

Dvostruko napajani asinkroni generatori

Hladek, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:961225>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-26**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

DVOSTRUKO NAPAJANI ASINRKONI GENERATORI

Diplomski rad

Bruno Hladek

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Bruno Hladek
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1446, 07.10.2022.
JMBAG:	0165077358
Mentor:	doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Marinko Barukčić
Član Povjerenstva 1:	doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Željko Špoljarić
Naslov diplomskog rada:	Dvostruko napajani asinkroni generatori
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Objasniti izvedbu i princip rada dvostruko napajanog asinkronog generatora. Objasniti principe regulacije rada i načiniti simulacijski model reguliranog dvostruko napajanog asinkronog generatora. Analizirati rezultate dobivene simulacijom.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	19.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	8.10.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	08.10.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 08.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Bruno Hladek
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1446, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Dvostruko napajani asinkroni generatori**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil

i sumentora

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 pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. ZADATAK DIPLOMSKOG RADA	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME.....	2
3. PRINCIP RADA DVOSTRUKO NAPAJANOG ASINKRONOG GENERATORA	3
3.1. Korištenje dvostruko napajanih asinkronih generatora u svrhu proizvodnje napona stalne frekvencije	7
3.2. Dvostruko napajani asinkroni generatori u vjetroturbinama	9
4. DVOSTRUKO NAPAJANI ASINKRONI GENERATORI U MREŽI.....	14
5. MODELIRANJE DVOSTRUKO NAPAJANOG ASINKRONOG GENERATORA.....	18
5.1 Modeliranje vjetroturbine.....	23
6. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJA	25
6.1. Trofazni kratki spoj u mreži	25
6.2. Jednofazni kratki spoj u mreži	32
6.3. Pad frekvencije u mreži.....	39
6.4. Udar vjetra	46
6.5. Prenapon u mreži	53
7. ZAKLJUČAK.....	60
8. LITERATURA	61
9. SAŽETAK.....	64
10. ABSTRACT	65

1. UVOD

Razvojem vjetroelektrana i korištenjem energije vjetra za proizvodnju električne energije na decentraliziran način, posebno na kraju elektroenergetske mreže, zbog velike udaljenosti dalekovoda, impedancija električne mreže gledajući od strane vjetroturbina raste, a omjer kratkog spoja postaje mali, što je glavna karakteristika slabe, odnosno nestabilne mreže. Kako se udio električne energije dobivene iz energije vjetra povećava i raspršuje tako i oslabljuje mrežu, razvijaju se radne karakteristike električne mreže, kao što su slaba inercija, niski omjer kratkog spoja, visoka impedancija mreže, slabo električno prigušenje i slaba naponska podrška. Dakle, siguran i stabilan rad elektroenergetske mreže s velikim vjetroelektranama suočava se sa značajnim izazovima. Asinkroni generatori s dvostrukim napajanjem (DFIG, engl. *doubly fed induction generators*) imaju jednostavan i jasan dizajn, trošak generatora/pretvarača takvog sustava smanjen je jer se projektira na 25–30% nazivne snage generatora te može raditi i pri podsinkronoj i nadsinkronoj brzini i sl. Glavna problematika vjetroelektrana spojenih na mrežu je raditi pri frekvencijama nižim i višim od nazivne te prolaženje kroz stanja visokog napona (HVRT, engl. *high voltage ride through*) i niskog napona (LVRT, engl. *low voltage ride through*) u mreži tijekom kvara. Primjeri simulacija prikazuju uspješan rad vjetroturbina s DFIG-om tijekom trofaznog kratkog spoja, jednofaznog kratkog spoja, pada frekvencije, prenapona u mreži te udara vjetra. U prvom poglavlju rada opisana je građa dvostruko napajanih asinkronih generatora te njihov princip rada kada su spojeni na električnu mrežu te usporedba s konvencionalnim strojevima. U drugom poglavlju obrađeni su uvjeti mrežnih operatera i usklađenost DFIG-ova s mrežnim pravilima za prolaz kroz stanje niskog i visokog napona u mreži, također opisan je način rada DFIG-a tijekom niskog i visokog napona u mreži. U oba slučaja, cilj je stabilizacija mreže uz osiguranje jalove snage. U trećem poglavlju opisan je model vjetroturbine s DFIG-om povezan s mrežom. Vjetroturbina se simulira kao dio elektroenergetskog sustava, uključujući različite komponente kao što su transformatori, dalekovodi i sabirnice. Model se simulira u programskom alatu matlab, sustav koristi blokove za simulaciju impedancije, transformatora i prijenosnih dalekovoda. U četvrtom poglavlju obrađen je način rada vjetroturbine s DFIG-om tijekom trofaznog, jednofaznog kratkog spoja, pada frekvencije, prenapona u mreži te naglog udara vjetra.

1.1. ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

Objasniti izvedbu i princip rada dvostruko napajanog asinkronog generatora. Objasniti principe regulacije rada i načiniti simulacijski model reguliranog dvostruko napajanog asinkronog generatora. Analizirati rezultate dobivene simulacijom.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Studija [1] daje detaljan pregled tehnologija koje se koriste za povećanje pouzdanosti vjetroturbina s DFIG-om. U radu se analizira trenutno stanje prohodnih tehnologija, fokusirajući se i na niskonaponske prohodne (LVRT) i na visokonaponske prohodne (HVRT) mogućnosti. Studija klasificira različite LVRT i HVRT strategije, istražuje njihove prednosti i ograničenja te ocrtava najnovija dostignuća i raspravlja o budućim trendovima u poboljšanju ovih tehnologija. Studija [2] istražuje kako karakteristike greške utječu na sposobnost mikromreža da ispune zahtjeve mrežnog operatera tijekom LVRT ili čak odabere pravi kod koji će se koristiti. Također ima za cilj dati jasno razumijevanje kako karakteristike greške utječu na ponašanje mreže tijekom različitih vrsta grešaka, što će biti od pomoći u odabiru najbolje metode ili uređaja za poboljšanje LVRT-a i za određivanje optimalnih ocjena za te uređaje, a time i smanjenje trošak ugradnje. Znanstveni rad [3] provodi usporedbu dvaju prikaza s povišenim frekvencijama koje se koriste u modeliranju prostora stanja pretvarača energetske elektronike, dinamički fazori i harmonijski prostor stanja. Ove metode proizlaze iz sličnih hipoteza i imaju za cilj rješavanje problema vremenske periodičnosti uočene u sustavima s višestrukim harmoničkim komponentama u stabilnom stanju. U referenci [4] istražuje se strategija modeliranja i upravljanja sustavom za pretvorbu energije vjetra (WECS) pomoću asinkronog generatora s dvostrukim napajanjem spojenog na mrežu. Istraživanje je usmjereno na povećanje učinkovitosti i stabilnosti DFIG-a primjenom kontrolne sheme koja se temelji na vektorskoj kontroli i praćenju maksimalne snage (MPPT). Rad [5] posvećen je usporednoj studiji performansi asinkronih generatora s jednostrukim i dvostrukim napajanjem pogonjenih vjetroturbinom sličnog proizvodnog kapaciteta i konstantne ili promjenjive brzine vjetra. Modeliranje dijelova jednostrukih i dvostrukih asinkronih generatora temelji se na Bondgraph metodi. Studija pokazuje da DFIG ima prednosti u usporedbi s jednostrukim napajanim asinkronim generatorom, naime bolju kvalitetu struje i prilagodbu fluktuirajućim brzinama vjetra.

3. PRINCIP RADA DVOSTRUKO NAPAJANOG ASINKRONOG GENERATORA

Asinkroni generatori s dvostrukim napajanjem su u osnovi električni strojevi koji su napajani izmjeničnom strujom u njihove namote statora i rotora. Većina DFIG-ova (dvostruko napajanih asinkronih generatora, engl. *doubly fed induction generator*) u industriji su trofazni asinkroni strojevi koji imaju rotor s namotajima. U ovom slučaju stroj radi kao sinkroni generator čija je električna kutna brzina (tj. brzina kojom se osovina okreće) promjenjiva podešavanjem frekvencije izmjenične struje koja se dovodi u namote rotora. Rotor sa namotima i kliznim kolutima sastoji se od cilindrične jezgre izrađene od laminiranog čelika sa utorima u kojima se polažu trofazni namotaji ravnomjerno raspoređeni sa faznim pomakom od 120 električnih stupnjeva te mogu biti spojeni u spoj zvijezde ili trokuta [6].

Od sada će se klizno kolutni trofazni asinkroni stroj koji radi kao dvostruko napajani asinkroni generator nazivati jednostavno dvostruko napajanim asinkroni generatorom.

Iako je njihov princip rada je poznat već desetljećima, dvostruko napajani električni strojevi tek su nedavno ušli u opću upotrebu. Veliki razlog tome je pojava i razvoj tehnologije koja koristi energiju vjetra za proizvodnju električne energije odnosno vjetroelektrana.

Prema [7] dvostruko napajani asinkroni generatori daleko su najrašireniji tip električnih strojeva s dvostrukim napajanjem i jedan su od najčešćih tipova generatora koji se koriste za proizvodnju električne energije u vjetroturbinama zbog njihovih brojnih prednosti u odnosu na druge vrste generatora. Obično se u DFIG-u očekuje da se kontrola klizanja uglavnom provodi na pretvaračima (na strani rotora) kako bi se potvrdilo da ubrizgani napon rotora pri frekvenciji klizanja daje konstantnu frekvenciju statora [8,9]. U slučaju DFIG, mogu se mjeriti struje statora i struje rotora, što je jedinstvena prednost u usporedbi s drugim tipovima asinkronih generatora [10]. Zbog toga asinkroni generatori s dvostrukim napajanjem mogu biti izravno spojeni na izmjenični elektroenergetski sustav i ostati sinkronizirani cijelo vrijeme sa elektroenergetskim sustavom. Druge prednosti uključuju mogućnost kontrole faktora snage (npr. u svrhu održavanja faktora snage), sve to s električnim elementima kompaktne veličine u vjetroturbini.

Mehanička snaga na osovini dvostruko napajanog asinkronog generatora pretvara se u električnu energiju koja se dovodi u izmjeničnu mrežu preko namota statora i rotora. Nadalje, stroj radi kao sinkroni generator čija sinkrona brzina (tj. brzina kojom se osovina generatora mora okretati kako

bi proizvela snagu na frekvenciji izmjenične mreže $f_{mreže}$) se može mijenjati podešavanjem frekvencije izmjeničnih struja koje ulaze u namote rotora.

U konvencionalnom trofaznom sinkronom generatoru, kada vanjski izvor mehaničke snage (tj. pogonski stroj) zakreće rotor generatora, statičko magnetsko polje stvoreno istosmjernom strujom dovedenom u namot rotora vrti se istom brzinom kao i rotor. Kao rezultat toga, silnice promjenjivog magnetskog toka prolaze kroz namote statora dok se magnetsko polje rotora rotira, inducirajući izmjenični napon na namotu statora.

Mehanička snaga primijenjena na osovinu generatora od strane primarne energije vjetra se pretvara u električnu energiju koja je dostupna na namotima statora. U konvencionalnim (jednostrano napajanim) asinkronim generatorima, odnos između frekvencija izmjeničnih napona induciranih preko namota statora generatora i brzina rotora izražava se jednadžbom (3-1):

$$f_{stator} = \frac{n_{rotor} * N_{polova}}{120} \quad (3-1)$$

gdje je;

f_{stator} – frekvencija izmjeničnog napona inducirano preko statora namota jednostrano napajano asinkronog generatora, izraženo u Herzima [Hz].

n_{rotor} - brzina rotora dvostruko napajano asinkronog generatora, izraženo u okretajima u minuti [o/min].

N_{polova} - broj polova u dvostruko napajano asinkronom generatoru po faza

Koristeći jednadžbu (3-1) moguće je odrediti kada je brzina n_{rotora} rotora generatora jednaka sinkronoj brzini generatora n_s , frekvencija f_{stator} izmjeničnih napona induciranih na namotima statora generatora jednaka je frekvenciji izmjenične mreže $f_{mreže}$.

Kod dvostruko napajanih asinkronih generatora vrijede isti principi rada kao i kod konvencionalnog (jednostruko napajano) asinkronog generatora. Jedina je razlika u tome što magnetsko polje stvoreno u rotoru nije statično (jer se stvara pomoću trofazne izmjenične struje umjesto istosmjerne struje), već se vrti brzinom $n_{\phi,rotor}$ proporcionalnom frekvenciji izmjenične struje koja se dovodi u namote rotora generatora. To znači da se rotirajuće magnetsko polje koje prolazi kroz namote statora generatora ne rotira samo zbog rotacije rotora generatora, već i zbog rotacijskog učinka koji proizvode izmjenične struje koje ulaze u namote rotora generatora. Stoga,

u dvostruko napajanom asinkronom generatoru, obje vrijednosti i brzina vrtnje n_{rotor} rotora i frekvencija f_{rotor} izmjeničnih struja dovedenih u namote rotora određuju brzinu $n_{\phi,rotor}$ rotirajućeg magnetskog polja koje prolazi kroz namote statora, a time i frekvenciju f_{stator} izmjeničnog napona inducirano na namotima statora. [11]

Uzimajući u obzir principe rada dvostrukog napajanog generatora može odrediti da kada se magnetsko polje na rotoru rotira u istom smjeru kao i rotor generatora, zbrajaju se brzina rotora n_{rotor} i brzina $n_{\phi,rotor}$ magnetskog polja rotora (proporcionalna f_{rotor}). To je prikazano na slici 1. frekvencija f_{stator} napona induciranih preko namota statora generatora može se stoga izračunati pomoću jednadžbe (3-2):

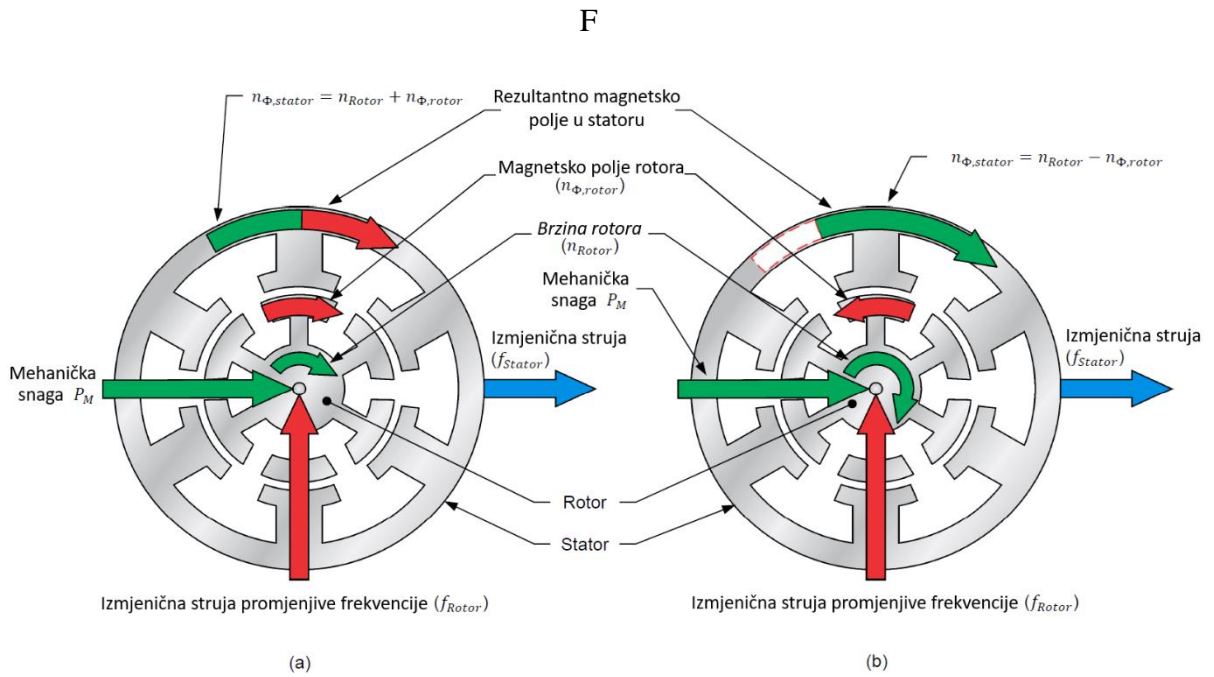
$$f_{stator} = \frac{n_{rotor} * N_{polova}}{120} + f_{rotor} \quad (3-2)$$

gdje je;

f_{rotor} - frekvencija izmjeničnih struja koje se dovode u namote rotora generatora

Nasuprot tome, kada magnetsko polje na rotoru rotira u smjeru suprotnom od smjera rotora generatora, brzina rotora n_{rotor} i brzina $n_{\phi,rotor}$ magnetskog polja rotora oduzimaju se jedna od druge. To je prikazano na slici 1. Frekvencija f_{stator} napona induciranih preko namota statora generatora može se stoga izračunati pomoću jednadžbe (3-3):

$$f_{stator} = \frac{n_{rotor} * N_{polova}}{120} - f_{rotor} \quad (3-3)$$



Slika 3.1. Smjer rotacije magnetskog polja i smjer rotacije rotora dvostruko napajanog asinkronog generatora [11]

Slika 3.1. prikazuje dva slučaja, a) magnetskog polja statora i rotora imaju jednak smjer rotacije b) magnetskog polja statora i rotora imaju različite smjerove rotacija. Frekvencija f_{stator} izmjeničnih napona proizvedenih na statoru dvostruko napajanog asinkronog generatora proporcionalan je brzini $n_{\phi, stator}$ rotirajućeg magnetskog polja na statoru. Sama brzina $n_{\phi, stator}$ okretnog magnetskog polja statora ovisi o brzini rotora n_{rotor} (koja je rezultat mehaničke snage na osovini rotora) i frekvenciji f_{rotor} izmjeničnih struja koje ulaze u rotor stroja. [11]

3.1. Korištenje dvostruko napajanih asinkronih generatora u svrhu proizvodnje napona stalne frekvencije

Primarni razlog za korištenja dvostruko napajanih asinkronih generatora općenito je proizvodnja trofaznog napona čija je frekvencija na statoru konstantna, odnosno čija frekvencija statora ostaje jednaka frekvenciji izmjenične mreže na koju je generator spojen. Kako bi se postigla ova funkcija, frekvencija izmjeničnih struja rotora koje se dovode na namote rotora dvostruko napajanih asinkronih generatora mora se stalno podešavati kako bi se suprotstavila svakoj promjeni brzine rotora uzrokovanj fluktuacijama mehaničke snage koju osigurava glavni pogon generatora.

Kada se brzina rotora generatora smanji ispod nazivne sinkrone brzine, frekvencija izmjeničnih struja koje treba unijeti u namote generatora povećava se u skladu s time i pozitivnog je predznaka. Pozitivan predznak frekvencije ukazuje na to da slijed faza trofaznih izmjeničnih struja koje ulaze u namote rotora mora osigurati da se ukupno magnetsko polje rotora da se okreće u istom smjeru kao i rotor generatora, kao što je ilustrirano na slici 3.1. a).

Slično, kada se brzina rotora generatora poveća iznad nazivne sinkrone brzine, frekvencija izmjeničnih struja koje treba narinuti u namote generatora se sukladno tome povećava i negativnog je predznaka. Negativni predznak frekvencije ukazuje na to da slijed faza trofaznih izmjeničnih struja koje ulaze u namote rotora mora natjerati magnetsko polje rotora da se okreće u smjeru suprotnom od smjera rotora generatora, kao što je ilustrirano kao slučaj b) slici 3.1. Frekvencija izmjeničnih struja rotora koje se dovode na namote rotora DFIG-a određuje se prema jednadžbi (3-4):

$$f_{rotor} = f_{mreže} - \frac{n_{rotor} * N_{polova}}{120} \quad (3-4)$$

gdje je:

$f_{mreže}$ - frekvencija izmjenične mreže

Na primjer, kada razmotrite dvostruko napajani asinkroni generator koji ima 4 magnetska pola, generator napaja izmjeničnu mrežu strujom nazivne frekvencije 50 Hz. Uzimajući u obzir da vanjski izvor tjera generator da se okreće brzinom od 1980 o/min, frekvencija rotora izmjeničnih struja koje treba narinuti u namote rotora generatora može se izračunati na jednadžbom (3-4):

$$f_{rotor} = 50 [Hz] - \frac{1980[\frac{r}{min}] * 4 [pola]}{120} = -16 Hz \quad (3-5)$$

Frekvencija f_{rotor} izmjeničnih struja koje se dovode u namote rotora generatora treba imati iznos 16 Hz manji od 50 Hz tako da je frekvencija f_{stator} izlaznog napona generatora jednaka frekvenciji $f_{mreže}$ izmjenične mreže. Negativni predznak frekvencije rotora pokazuje da se magnetsko polje stvoreno u namotima rotora mora okretati u smjeru suprotnom od smjera okretanja rotora.

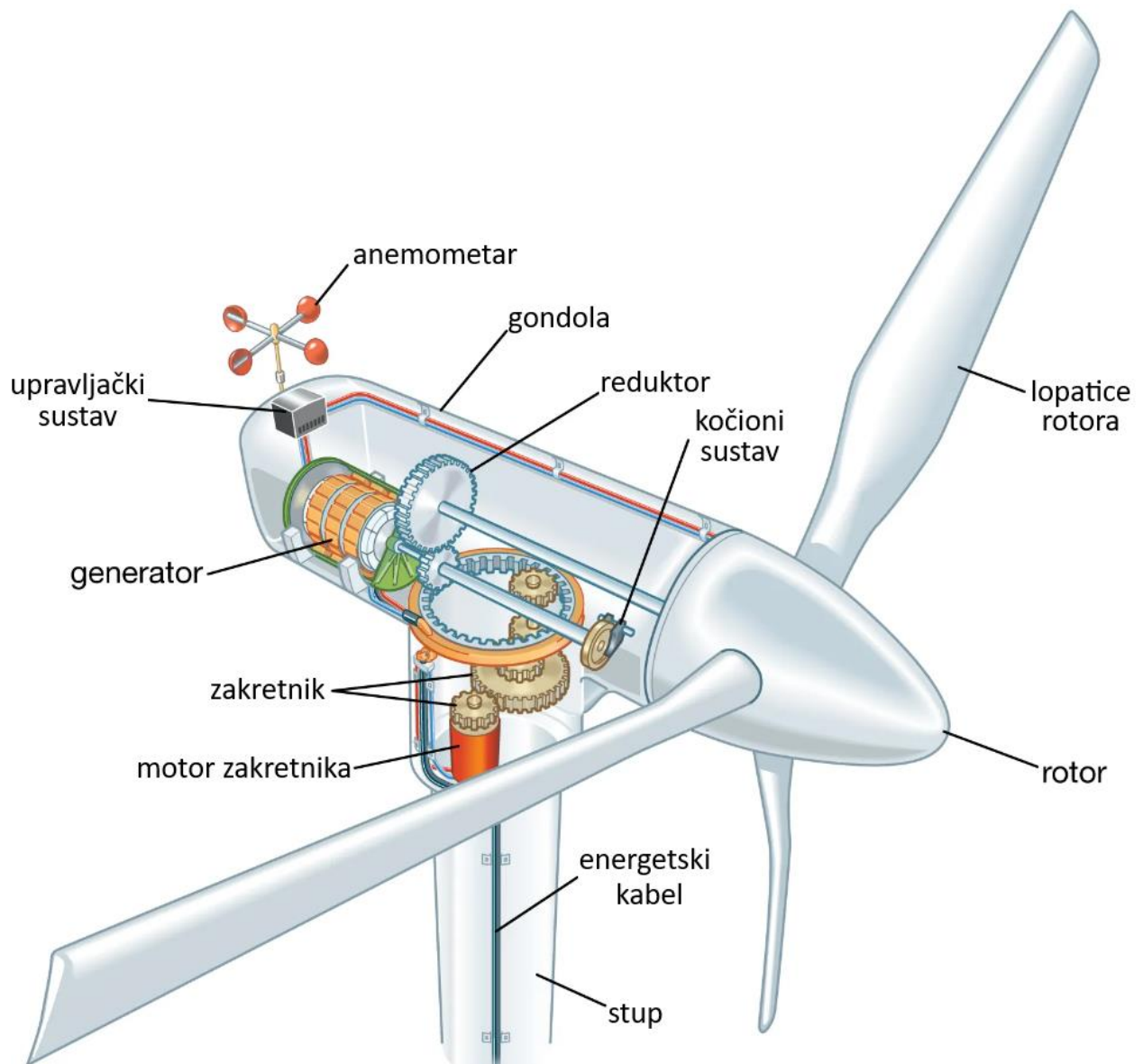
Kada se asinkroni generator s dvostrukim napajanjem koristi za proizvodnju električne energije pri naponu i frekvenciji izmjenične mreže, svako odstupanje brzine rotora generatora n_{rotor} od sinkrone brzine n_s kompenzira se podešavanjem frekvencije f_{rotor} izmjeničnih struja koje ulaze u namote rotora generatora tako da frekvencija f_{stator} napona proizvedenog na statoru ostaje jednaka frekvenciji mreže. Drugim riječima, frekvencija rotora je podešena tako da brzina $n_{\phi, stator}$ okretnog magnetskog polja koje inducira napon u namotima statora ostaje konstantna. Posljedično, da bi napon proizveden na statoru održao jednaku vrijednost kao napon mreže, u stroju (točnije na namotima statora) se mora održavati određena vrijednost magnetskog toka. To se može postići dovođenjem napona na namote rotora generatora koji je proporcionalan frekvenciji napona dovedenog na namote rotora (održava omjer napona i frekvencije U/f konstantnim i osigurava konstantnu vrijednost magnetskog toka u stroju). Vrijednost omjera napona i frekvencije U/f općenito se postavlja tako da je jalova snaga na statoru Q_{stator} jednaka nuli. Ovo je slično uobičajenoj praksi koja se koristi kod konvencionalnih sinkronih generatora gdje se struja pobude (istosmjerna struja u rotoru) podešava tako da se jalova snaga na statoru Q_{stator} postavi na nulu.

3.2. Dvostruko napajani asinkroni generatori u vjetroturbinama

Većina asinkronih generatora s dvostrukim napajanjem u današnjoj industriji koristi se za proizvodnju električne energije u velikim vjetroturbinama, elektrane koje se sastoje od spomenutih vjetroturbina su značajnih snaga, odnosno prestanak rada opreme ovog mjerila bi uzrokovalo značajnije promjene u tom dijelu mreže. Zbog mnogih prednosti koje dvostruko napajani asinkroni generatori nude [12] u odnosu na druge vrste generatora u primjenama gdje se mehanička snaga koju osigurava primarni izvor energije koji pokreće generator uvelike razlikuje (npr. vjetar koji puše promjenjivom brzinom i djeluje na lopatice rotora vjetroturbine). Radi jasnijeg shvaćanja prednosti korištenja dvostruko napajanih asinkronih generatora za proizvodnju električne energije u vjetroturbinama, važno je znati nešto o velikim vjetroturbinama.

Vjetroturbine velikih dimenzija u osnovi se dijele na dvije vrste koje određuju ponašanje vjetroturbine tijekom varijacija brzine vjetra: vjetroturbine fiksne brzine i vjetroturbine promjenjive brzine.

U vjetroturbinama fiksne brzine općenito se koriste trofazni asinkroni generatori. Dijelovi vjetroturbine prikazani su na slici 3.2.1. Budući da je izlaz generatora vezan izravno na mrežu (lokalna izmjenična mreža), brzina rotacije generatora je fiksna (u praksi, općenito može malo varirati, budući da je dopušteno da klizanje varira u rasponu od tipično 2% do 3%), kao i brzina vrtnje rotora vjetroturbine. Svaka fluktuacija brzine vjetra prirodno uzrokuje variranje mehaničke snage na rotoru vjetroturbine, budući da je brzina rotacije fiksna, to uzrokuje da se moment na rotoru vjetroturbine mijenja u skladu s tim. Pri pojavama udara vjetra, okretni moment na rotoru vjetroturbine se značajno povećava, dok brzina rotora malo varira. Stoga svaki nalet vjetra opterećuje mehaničke komponente (osobito reduktor) u vjetroturbini i uzrokuje naglo povećanje momenta rotora, kao i snage na izlazu generatora vjetroturbine. Svaka fluktuacija u izlaznoj snazi generatora vjetroturbine izvor je nestabilnosti u elektroenergetskoj mreži na koju je spojen.



Slika 3.2.1. Glavni dijelovi vjetroturbine [13]

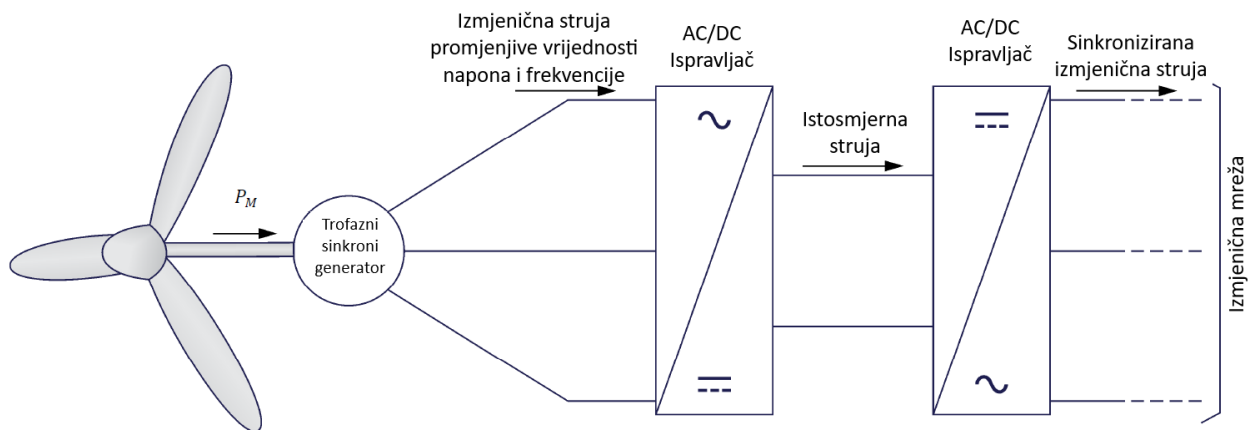
U vjetroturbinama promjenjive brzine, brzina vrtnje pripadajućeg rotora može varirati s promjenom brzine vjetra. Ovo isključuje upotrebu asinkronih generatora u takvim vjetroturbinama jer je brzina rotacije generatora gotovo konstantna kada je njegov izlaz povezan izravno s mrežom. Isto vrijedi i za sinkrone generatore koji rade strogo konstantnom brzinom kada su povezani izravno na mrežu.

Ovo je slučaj gdje dvostruko napajani asinkroni generatori imaju veliku prednost, budući da omogućuju održavanje izlaznog napona i frekvencije generatora na konstantnim vrijednostima, bez obzira na brzinu rotora generatora (a time i bez obzira na brzinu vjetra). Kao što se vidi u prethodnom odjeljku, to se postiže dovođenjem izmjeničnih struja promjenjive frekvencije i amplitude u namote rotora generatora. Podešavanjem amplitude i frekvencije izmjeničnih struja

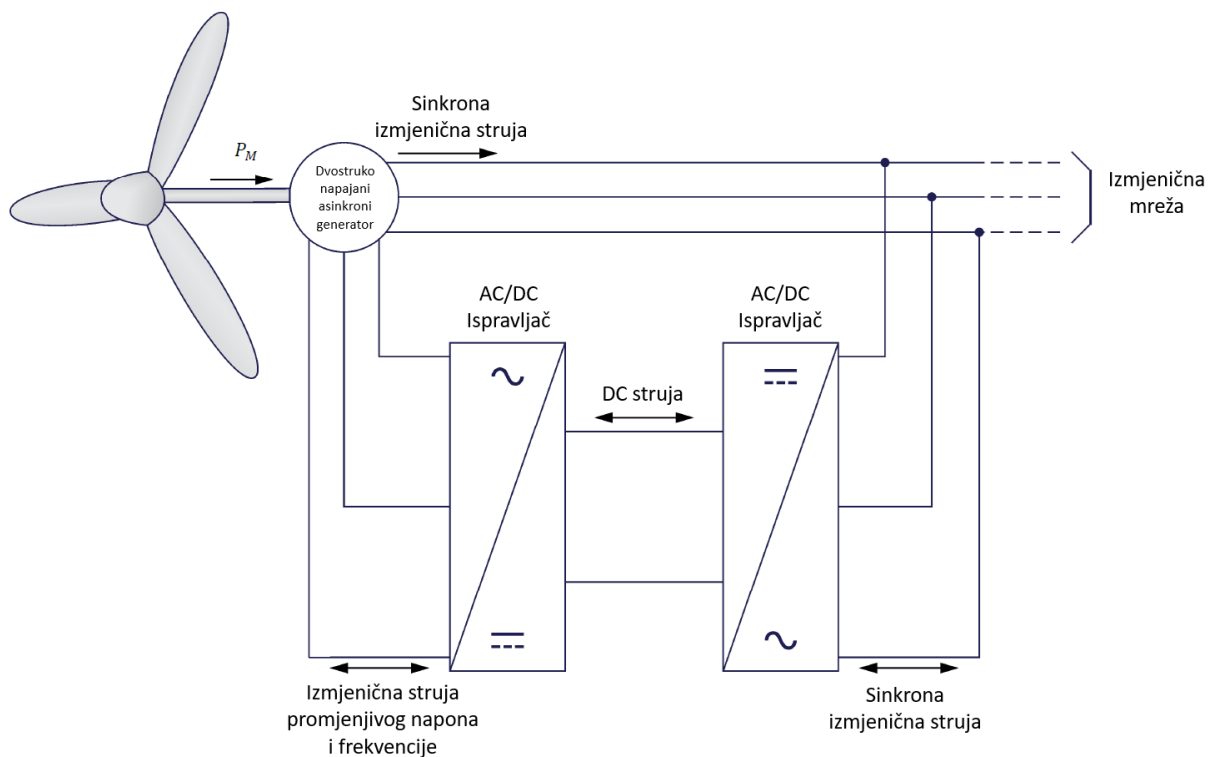
koje ulaze u namote rotora generatora, moguće je održavati konstantnu amplitudu i frekvenciju napona (na statoru) koje proizvodi generator, unatoč varijacijama u brzini rotora vjetroturbine (i, posljedično, u brzini vrtnje generatora) uzrokovane fluktuacijama brzine vjetra. Time se također omogućuje rad bez iznenadnih varijacija zakretnog momenta na rotoru vjetroturbine, čime se smanjuje naprezanje mehaničkih komponentama vjetroturbine i izgladuju varijacije u količini električne energije koju proizvodi generator.

Također, korištenjem ovog tipa generatora je moguće podesiti količinu jalove snage koja se razmjenjuje između generatora i izmjenične mreže. To omogućuje kontrolu faktora snage sustava (npr. kako bi faktor snage imao stalnu vrijednost 1). Naposljetku, korištenje dvostruko napajanih asinkronih generatora u vjetroturbinama promjenjive brzine omogućuje proizvodnju električne energije pri nižim brzinama vjetra nego kod vjetroturbina fiksne brzine koje koriste asinkroni generator.

Bilo bi moguće dobiti slične rezultate u vjetroturbinama promjenjive brzine pomoću trofaznog sinkronog generatora i energetske elektronike, kao što je prikazano na slici 3.2.2. U ovom postavu, generator se okreće brzinom koja je proporcionalna brzini vjetra. Izmjenične struje koje proizvodi generator pretvaraju se u istosmjernu struju pomoću AC/DC ispravljača, a zatim ih pretvara AC/DC izmjenjivač natrag u izmjenične struje koje su sinkrone s mrežom. Stoga je potrebno da uređaji energetske elektronike koji se koriste u takvom krugu imaju veličinu i kapacitet za obradu 100% izlazne snage generatora. Uređaji energetske elektronike koji se koriste u dvostruko napajanim asinkronim generatorima, s druge strane, trebaju samo obraditi dio izlazne snage generatora, tj. snage koja se dovodi do ili iz namota rotora generatora, što je obično oko 30% nazivne snage generatora. Posljedično, uređaji energetske elektronike u vjetroturbinama promjenjive brzine koje koriste asinkrone generatore s dvostrukim napajanjem obično trebaju biti oko 30% veličine uređaja energetske elektronike koji se koriste za trofazne sinkrone generatore usporedne veličine, kao što je prikazano na slici 3.2.3.



Slika 3.2.2. Topologija trofaznog sinkronog generatora spojenog na izmjeničnu mrežu [14]



Slika 3.2.3. Topologija dvostruko napajanih asinkronog generatora spojenog na izmjeničnu mrežu [14]

Korištenje asinkronog generatora s dvostrukim napajanjem umjesto „običnog“ asinkronog generatora u vjetroturbinama nudi sljedeće prednosti:

- Visoka učinkovitost u širokom rasponu brzina. Dvostruko napajani asinkroni generator omogućuje vjetroturbinama učinkovit rad pri širokom rasponu brzina vjetera, optimizirajući korištenje energije iz različitih uvjeta vjetera. Glavna prednost što se tiče iskorištavanja brzine vjetera jest proizvodnja električne energije pri manjim brzinama vjetera.
- Rad pri promjenjivoj brzini rotora dok amplituda i frekvencija generiranog napona ostaju konstantni.

- Optimizacija generirane snage kao funkcije raspoloživog vjetra do nazivne izlazne snage generatora vjetroturbine.
- Digitalna eliminacija iznenadnih promjena momenta rotora i izlazne snage generatora.
- Kontrola faktora snage (npr. u svrhu održavanja usklađenosti faktora snage).
- Elektronika smanjene snage: u usporedbi sa sustavima punog pretvarača, zahtijeva pretvarače manje snage (obično oko 30% nazivne snage generatora), što smanjuje cijenu i složenost energetske elektroničke komponente.
- Razdvojena kontrola djelatne i jalove snage: Ova značajka omogućuje pružanje podrške mreži upravljanjem stabilnošću napona i frekvencije, pridonoseći pouzdanosti mreže. Mogućnost isporučivanja ili apsorpiranja jalove snage, pomažući pri reguliranju razine napona u mreži je također jedna od prednosti.
- Upravljanje smetnjama u mreži: Moderni DFIG sustavi opremljeni su kontrolnim strategijama za nastavak rada tijekom smetnje u mreži, održavajući rad i doprinoseći stabilnosti mreže tijekom kvarova.
- Fleksibilni dizajn sustava DFIG-a prilagodljivi su širokom rasponu veličina turbina i snaga, što ih čini prikladnima za male i velike projekte energije vjetra.
- Meki (engl. *soft start*) start i sinkronizacija mreže omogućuje sustavu glatko pokretanje i sinkronizaciju s mrežom bez izazivanja mehaničkog naprezanja na komponentama turbine, što dovodi do duljeg vijeka trajanja opreme i nižih troškova održavanja.

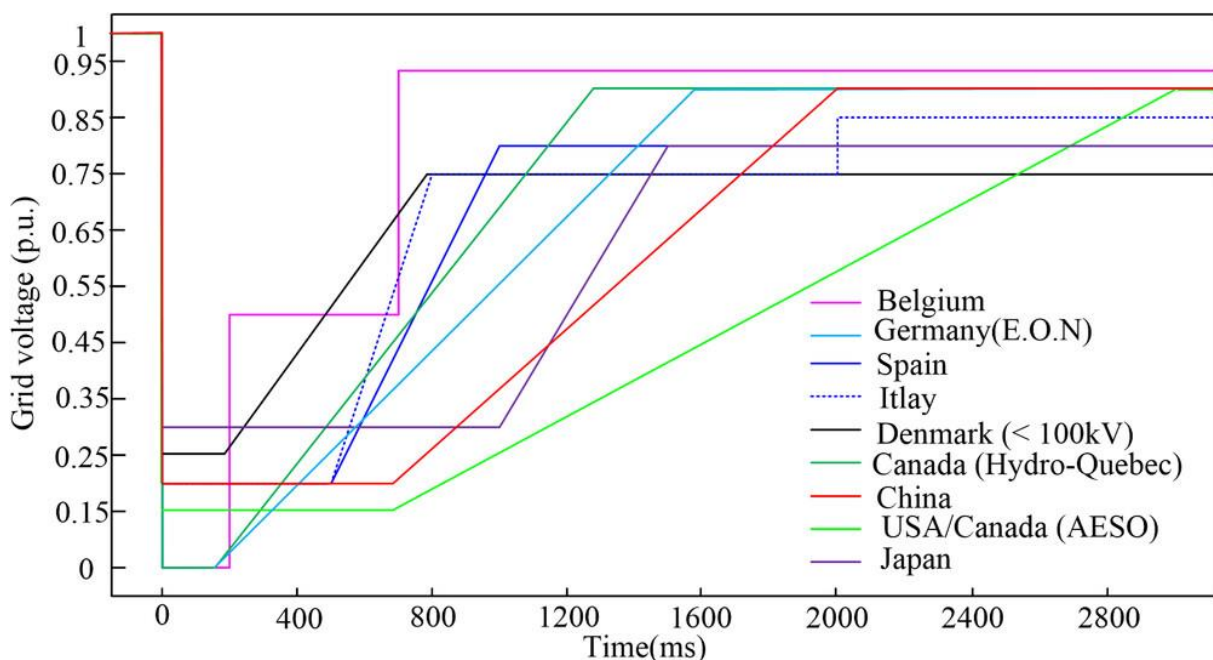
S druge strane, asinkroni generator s dvostrukim napajanjem zahtijeva složeniji sklop za pretvorbu snage koji asinkronom generatoru nije potreban. Također, klizni prstenovi na asinkronom stroju s namotanim rotorom koji se nalazi u sklopu dvostruko napajanog asinkronog generatora zahtijevaju periodično održavanje i predstavljaju prijetnju od mogućeg zastoja, ovisnost o kliznim prstenovima i četkicama predstavlja njihov najznačajniji nedostatak. Klizni prstenovi i četkice podložni su habanju tijekom vremena zbog neprekidnog fizičkog kontakta i trenja. Ova mehanička komponenta kritičan je čimbenik koji može dovesti do povećanja operativnih troškova i mogućih poremećaja u proizvodnji energije vjetra.

4. DVOSTRUKO NAPAJANI ASINKRONI GENERATORI U MREŽI

Mrežnim pravilima distribucijskog sustava uređuju se tehnički uvjeti priključenja korisnika distribucijske mreže na elektroenergetsku distribucijsku mrežu, planiranje razvoja mreže, pogon i način vođenja mreže te korištenje mreže. [15]

Mrežni zahtjevi za distribucijsku proizvodnju ažuriraju se i revidiraju. U takvim mrežnim pravilima nameću se osnovni zahtjevi kao što su kvaliteta električne energije (THD razina ubrizgane struje) i zahtjevi za sprječavanjem otočnog pogona.

Na primjer, u njemačkom mrežnom kodeksu, proizvodnja u distribuciji bi trebala rješavati kvarove mreže, poznate kao LVRT i HVRT i podržavati mrežu tijekom oporavka napona. Slični zahtjevi mogu se pronaći u drugim zemljama, poput Danske, Italije, Španjolske i SAD-a u kojima generalne uprave dijele visok postotak proizvodnje električne energije. Spособnost LVRT definirana je tako da bi dvostruko napajani asinkroni generator, odnosno vjetroelektrana koja ih koristi mora ostati spojena na mrežu unutar određenog vremena i pružiti potporu mreži pri oporavku od niskog napona. Različite krivulje ovisno o regulacijama država s definiranim vremenom ostanka spojenog prikazane su na slici 4.1 i slici 4.2.



Slika 4.1. Zahtjevi mrežnih operatera različitih država za LVRT [1]

Vjetro turbine koje koriste DFIG imaju mogućnost ostati spojene i operativne tijekom kratkotrajnih padova napona mreže ili kvarova. Ova sposobnost pomaže u održavanju stabilnosti mreže i

osigurava kontinuiranu proizvodnju energije, čak i pod nepovoljnim uvjetima mreže. Bez LVRT-a, vjetroturbine bi se morale odspojiti s mreže tijekom većih kvarova, što bi moglo dodatno destabilizirati elektroenergetski sustav, posebno s povećanjem udjela energije vjetra u mreži [16].

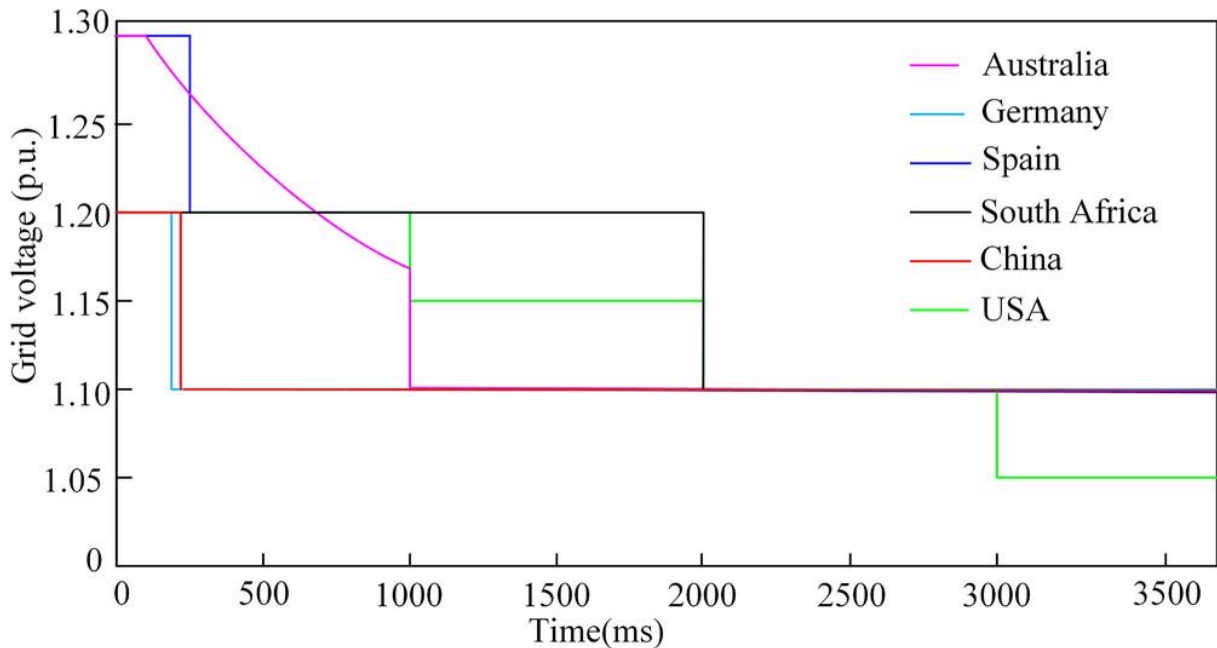
Kada dođe do kvara u mreži, kontrolni sustav turbine otkriva iznenadni pad napona u mreži (npr. uzrokovan kratkim spojem ili kvarom na mreži). Pad napona uzrokuje neravnotežu između napona statora i napona rotora, što dovodi do velikog skoka struje rotora. Ako se ne kontrolira, ova struja bi mogla oštetiti pretvarač na strani rotora. Kako bi se zaštitio pretvarač na strani rotora od prekomjerne struje, aktivira se *crowbar* zaštita [9]. Krug *crowbar* zaštite kratko spaja namote rotora zaobilazeći pretvarač na strani rotora i spajajući otpornike preko rotora. To omogućuje DFIG-u da privremeno djeluje kao konvencionalni asinkroni generator. Više o *crowbar* zaštiti može se pronaći u referenci [17,18].

Tijekom aktivacije *crowbar* zaštite, DFIG gubi sposobnost upravljanja snage preko rotora, ali nastavlja generirati energiju poput asinkronog generatora, dovodeći snagu u mrežu sve dok je napon statora dovoljan.

Pretvarač na strani mreže (koji ostaje aktivan čak i ako je pretvarač na strani rotora premošten tj. spojen preko otpornika) može ubrizgati jalovu snagu u mrežu kako bi pomogao stabilizirati i vratiti napon. Ova potpora jalovoj snazi neophodna je za oporavak napona tijekom i nakon kvara.

Nakon što se kvar ukloni i napon mreže vrati na normalu, *crowbar* zaštite se deaktivira, a pretvarač na strani rotora nastavlja s normalnim radom. DFIG ponovno preuzima kontrolu nad djelatnom i jalovom snagom, a turbina se vraća u normalan rad.

Glavni izazovi tijekom LVRT-a u DFIG-u su toplinski stres na komponentama: Tijekom kvarova, povećane struje u statoru i rotoru mogu stvoriti toplinski stres na komponentama, posebno ako kvar traje dulje. Vrijeme aktiviranja i deaktiviranja *crowbar* zaštite mora se pažljivo kontrolirati kako bi se izbjegle prekomjerne struje rotora i održao stabilan rad.



Slika 4.2. Zahtjevi mrežnih operatera različitih država za HVRT [1]

U većini zemalja, zavodi za norme (engl. TSO – *Tehcnical standard orders*) izdali su strogu mrežnu regulativu za vjetroelektrane tijekom nestabilnosti mreže. Kao što je prikazano na slici 4.1 za vjetroelektranu su postavljene granice s različitim amplitudama pada napona mreže i odgovarajuće vrijeme poremećaja, također na slici 4.2 su prikazane granice za porast napona u mreži. Vjetroelektrana također treba osigurati jalovu snagu (do 100% strujnog kapaciteta) kako bi sudjelovala u obnovi napona pri poremećaju pada napona u mreži. [19]

Iz slike 4.2 vidi se da prema mrežnim pravilima Španjolske, kada vrijednost napona mreže poraste na 1,3 puta veći od nazivnog napona, vjetroturbina bi trebala ostati spojena na mrežu 300 ms i osigurati dovoljnu struju za oporavak od greške. Zahtjevi za HVRT obično se smatraju ispunjenima na vjetroelektranama, a ne samo na razini vjetroturbine.

Njemački E.ON standard zahtijeva da vjetroturbina može održavati dugotrajni izvan mrežni (otočni pogon) rad kada napon mreže poraste do 1,2 puta vrijednosti nazivnog napona, a vjetroturbina mora apsorbirati određenu količinu jalove snage i jalove struje. Sposobnost rada kroz kvarove visokog napona u mreži je obavezan zahtjev u trenutnim mrežnim pravilima raznih zemalja. Slika 4.2. prikazuje zahtjeve HVRT-a prema različitim mrežnim kodovima. Australija i Španjolska imaju stroge zahtjeve za HVRT, kao što se može vidjeti na slici 4.2.

HVRT u vjetroturbini s DFIG-om značajka je koja turbini omogućuje da ostane spojena na mrežu tijekom kratkotrajnih prenaponskih događaja. HVRT je dizajniran kako bi osigurao da vjetroturbina može proći kroz smetnje visokog napona bez odspajanja s mreže, čime se pomaže stabilizirati mrežu tijekom tih događaja. [20]

Kao što niskonaponski prolaz (LVRT) omogućuje turbinama da ostanu spojene tijekom padova napona, visokonaponski prolaz (HVRT) je sposobnost turbine da se nosi s udarima napona. Do skokova napona može doći zbog greške na mreži se uklanjaju, iznenadni prekidi opterećenja., udara groma, preklopne prijelazne pojave na dalekovodima.

Tijekom ovih događaja, napon na terminalima vjetroturbine može premašiti normalne radne razine. HVRT osigurava da se turbina ne odvaja nepotrebno kada dođe do ovih privremenih skokova napona.

Tijekom prenapona u mreži senzori napona na statoru turbine i pretvaraču na strani mreže otkrivaju porast napona mreže, ako napon prijeđe određeni unaprijed definirani prag, aktivira se HVRT zaštitna shema. DFIG-ov pretvarač na strani rotora osjetljiv je na promjene napona jer struje rotora kontrolira energetska elektronika. Kad napon statora poraste, inducira visoki napon u krugu rotora, što može uzrokovati prekomjerne struje. Kako bi se zaštitio pretvarač, aktivira se sustav upravljanja ograničenjem struje kako bi se spriječile prekomjerne struje rotora tijekom događaja prenapona [21]. Zaštitni sustav *crowbar* (koji se češće koristi pri LVRT) također se može aktivirati u ekstremnim slučajevima kako bi zaštitio pretvarač na strani rotora.

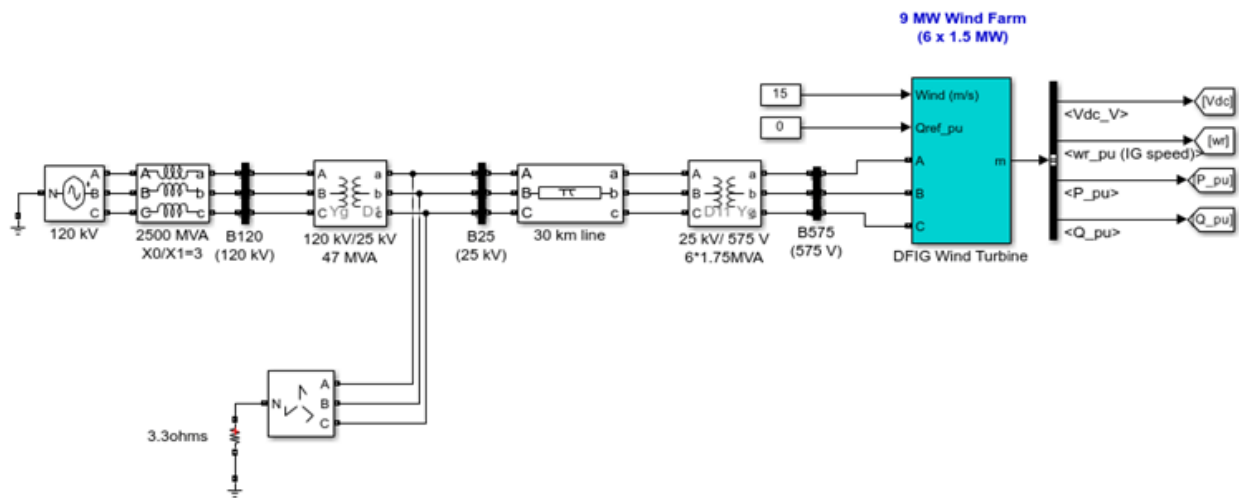
Tijekom događaja prenapona, jedan od ključnih odgovora DFIG-a je ubrizgavanje jalove snage u mrežu kako bi se napon vratio na normalne razine. Pretvarač na strani mreže igra značajnu ulogu u upravljanju tom razmjenom jalove snage. Ubrizgavanjem jalove snage, turbina pomaže u ublažavanju prenapona, podržavajući mehanizam kontrole napona mreže.

Upravljački sustav DFIG-a dizajniran je da turbinu drži povezanom s mrežom za određeni raspon prenapona (prema zahtjevima koda mreže). Kontinuirano prati razine napona i sve dok napon ostaje unutar granica mogućnosti HVRT turbine, turbina ostaje uključena.

Ako prenapon prekorači sigurne radne granice dulje vrijeme, upravljački sustav će isključiti turbinu iz mreže kako bi je zaštitio od oštećenja. Nakon što se događaj prenapona poništi i napon mreže vrati na normalne razine, DFIG se brzo vraća u normalan rad, prilagođavajući djelatnu i jalovu izlaznu snagu kako bi se stabilizirala mreža.

Glavni izazovi u implementaciji HVRT-a su prenapon u mreži može uzrokovati prekomjerno zagrijavanje i u namotima statora i rotora, kao i u pretvaračima, što dovodi do povećanog trošenja ovih komponenti. Zaštita osjetljive energetske elektronike u pretvaraču tijekom događaja prenapona je kritična, jer su te komponente posebno osjetljive na skokove napona. Svaka mreža ima različite zahtjeve za HVRT prema kojima se treba prilagoditi.

5. MODELIRANJE DVOSTRUKO NAPAJANOG ASINKRONOG GENERATORA



Slika 5.1 Model dvostruko napajanih asinkronih generatora spojenih na elektroenergetsku mrežu

Na slici 5.1 je prikazan demonstracijski model u programskom paketu Matlab, koji simulira rad vjetroturbine s DFIG-om povezan sa srednjenaponskom mrežom. Promatrajući s lijeva na desnu stranu, prvi je blok izmjenični trofazni izvor napona koji predstavlja elektroenergetski sustav naponske razine 120 kV, što znači da se radi o prijenosnom dijelu mreže. Drugi blok implementira trofaznu impedanciju faza Z0-Z1. Vlastite impedancije i međusobne impedancije postavljaju se unosom parametara pozitivne i nulte sekvence.

Postavljeni parametri trofazne impedancije faza Z0-Z1:

Parametri pozitivnog slijeda:

$$R_1 = 0,1 \text{ } [\Omega]$$

$$L_1 = \frac{1}{2 * \pi * 60} * \frac{(120 * 10^3)^2}{2500 * 10^6} = 15,3 \text{ } [\text{mH}]$$

Parametri nultog slijeda:

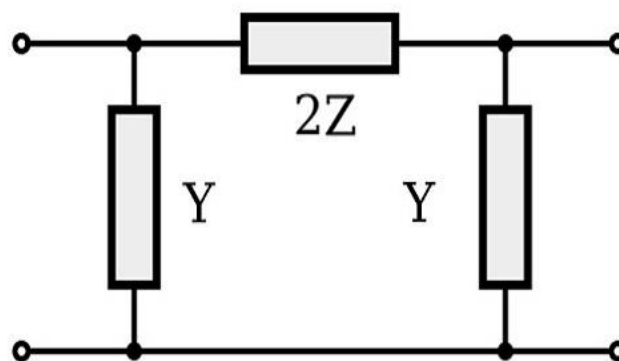
$$R_0 = 0,3 \text{ } [\Omega]$$

$$L_0 = \frac{3}{2 * \pi * 60} * \frac{(120 * 10^3)^2}{2500 * 10^6} = 45,8 \text{ } [\text{mH}]$$

Nakon njih slijedi blok naziva B120, koji je jednak kao blok B25 i blok B575, oni predstavljaju sabirnicu, sabirnica na shemi elektroenergetskog sustava označava važnu lokaciju za mjerenje i ne predstavlja fizičku komponentu u sustavu. Višestruke fizičke signalne linije mogu se spojiti

izravno kao što bi bile u fizičkom svijetu, bez upotrebe sabirnice. Primjer bi se mogao i dalje simulirati da su sabirnice uklonjene i vodovi koji odgovaraju istoj fazi spojeni izravno zajedno.

Sa sabirnica se ide linijama na idući blok koji predstavlja trofazni transformator. Sekundarni namot spojen je u spoj trokut dok je primarni namot spojen je u zvijezdu (primar i sekundar određujemo prema toku energije, s obzirom da se radi o simulaciji dvostruko napajanom asinkronom generatoru tok snage je od vjetroelektrane prema mreži) nazivna snaga ovog transformatora je 47 MVA, njegova funkcija je povećanje napona sa 25 kV na naponsku razinu 120 kV. Primar transformatora je uzemljen preko transformatora za uzemljenje koji je u cik-cak spoju. Nakon toga imamo blok trofaznog prijenosnog dalekovoda sa jednom PI sekcijom



Slika 5.1. Jednopolni prikaz RL elementa i dva kapacitivna elementa na krajevima dalekovoda [17]

RLC elementi računaju se pomoću hiperboličkih korekcija koje daju točan prikaz u pozitivnom nizu i nultom nizu samo na određenoj frekvenciji.

Postavljeni parametri RLC elementa:

Dužina – $l = 30$ km

Komponenta pozitivnog slijeda otpora – $r_1 = 0,1153$ [Ohms/km]

Komponenta nultog slijeda otpora – $r_0 = 0,413$ [Ohms/km]

Komponenta pozitivnog slijeda induktiviteta – $l_1 = 1,05 \cdot 10^{-3}$ [H/km]

Komponenta nultog slijeda induktiviteta – $l_0 = 3,32 \cdot 10^{-3}$ [H/km]

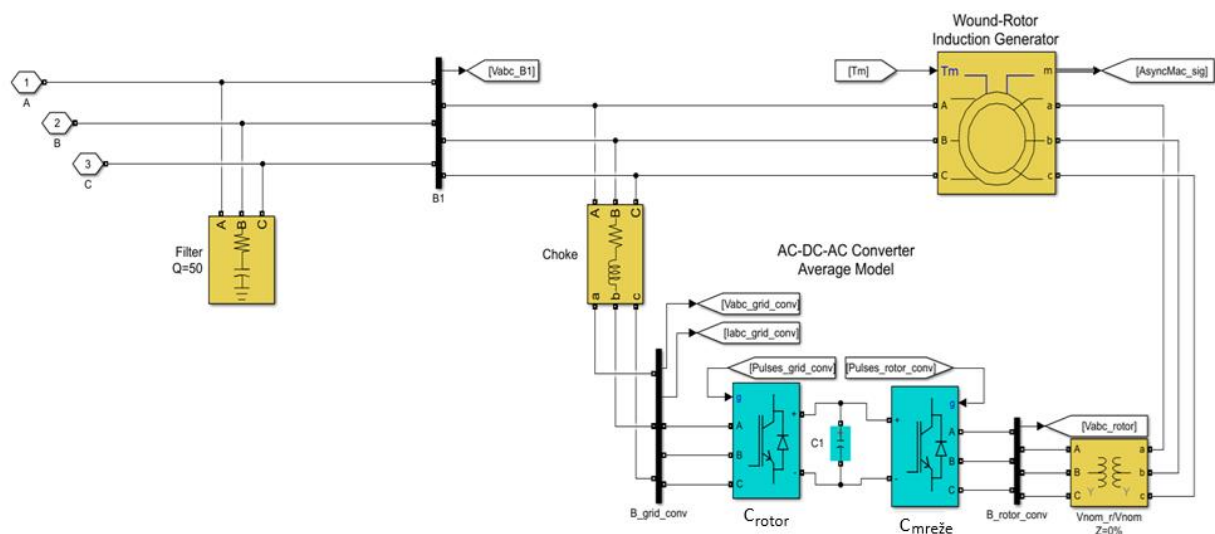
Komponenta pozitivnog slijeda kapaciteta – $c_1 = 11,33 \cdot 10^{-9}$ [F/km]

Komponenta nultog slijeda kapaciteta - $c_0 = 5,01 \cdot 10^{-9}$ [F/km]

Modeliran je jedan set vjetroelektrane pomoću kojega se može dobiti odziv ekvivalentan farmi 6 vjetroelektrana. „DFIG (Doubly-fed induction generator) Wind Turbine“ blok koji predstavlja vjetroelektranu koja se sastoji od od šest dvostruko napajanih asinkronih generatora nazivnih snaga 1.5MW koji skupa proizvode snagu od 9MW pri nazivnoj brzini vjetra od 15m/s, minimalna brzina za pokretanje vjetroturbina je 6 m/s, a maksimalna brzina prije isključenja vjetroturbine je 30 m/s. Postavljeni parametri reduktora i generatora (koji čine električni pogon) za jednu vjetroturbinu prikazani su u tablici :

Tablica 5.1. Parametri reduktora i generatora

Inercijska konstanta vjetroturbine	4,32 [s]
Konstanta opruge osovine odnosi se na osovinu velike brzine	1,11 [p.u. nazivnog mehaničkog momenta /rad]
Međusobno prigušenje osovine	1,5 [p.u. nazivnog mehaničkog momenta/p.u. dw]]
Početna brzina vjetroturbine	1,2 [p.u. nazivne brzine]
Početni izlazni moment	0,83 [p.u. nazivnog mehaničkog momenta]



Slika 4.2 Model dvostrano napajanoj asinkronoj generatoru

Na slici 4.2 može se detaljno vidjeti od kojih blokova je sastavljen dvostruko napajani asinkroni generator, sastoji se od klizno – kolutnog stroja kojemu se dovodi napajanje na rotor, a stator je sinkroniziran s mrežom. Rotor je povezan s turbinom koja mu predaje mehaničku snagu također u rotorskom krugu se nalazi AC/DC/AC pretvarač s istosmjernim međukrugom o, pretvarač je podijeljen u dvije komponente, pretvarač na strani rotora (C_{rotor}) i pretvarač na strani mreže ($C_{mreže}$). C_{rotor} i $C_{mreže}$ su pretvarači s izvorom napona koji koriste prisilno komutirane energetske

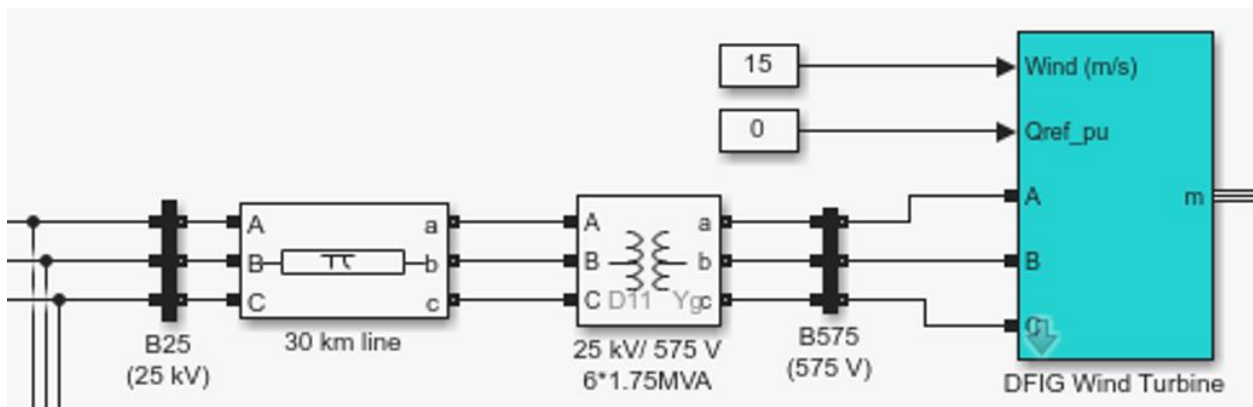
elektroničke uređaje (IGBT) za sintetiziranje izmjeničnog napona iz izvora istosmjernog napona. Kondenzator spojen u istosmjernom međukrugu djeluje kao izvor istosmjernog napona. Spojna zavojnica L koristi se za spajanje $C_{mreže}$ na mrežu. Trofazni namot rotora povezan je s C_{rotor} pomoću kliznih prstenova i četkica, a trofazni namot statora izravno je spojen na mrežu. Snagu vjetra koja zakreće lopatice rotora vjetroturbina pretvara se u električnu energiju pomoću DFIG-a i prenosi je u mrežu pomoću namota statora i rotora. Upravljački sustav generira naredbu za kut nagiba i signale za naredbu napona U_r i U_{gc} za C_{rotor} odnosno $C_{mreže}$ kako bi se kontrolirala snaga vjetroturbine, napon istosmjerne sabirnice i jalova snaga ili napon na stezaljkama mreže.

Postavljeni parametri pretvarača:

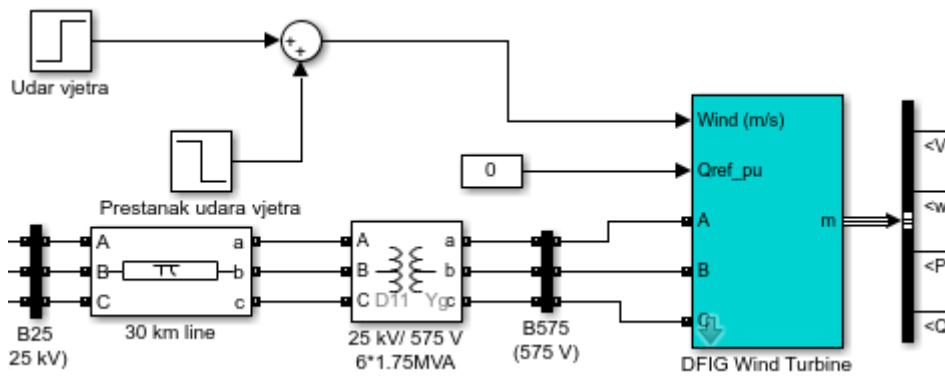
Maksimalna struja pretvarača na strani mreže $C_{mreže}$ (*p.u.* nazivne struje generatora) – 0,8 p.u.

Zavojnica sa strane mreže

- $L = 0,3$ p.u.
- $R = 0,003$ p.u.



Slika 5.4 Model za slučajeve s konstantnom brzinom vjetra



Slika 5.5 Model za slučajeve promjenjive brzine vjetra

U prva tri pokusa brzina vjetra koja djeluje na lopatice vjetroturbine je konstanta i njezina vrijednost iznosi 15 m/s, izvedena je preko bloka prikazanog na slici 5.4 koji daje konstantan ulaz u navedenom iznosu. Za slučaj koji simulira udar vjetra korištena su dva „step“ bloka i sumator kao što je prikazano na slici 5.5. prvi „step“ blok daje daje konstantnu brzinu vjetra 15 m/s kao početni uvjet, a nakon 1 sekunde step „Udar vjetra“ povećava brzinu vjetra na 20 m/s čime simulira udar vjetra. Step „Prestanak udara vjetra“ smanjuje brzinu vjetra za 5 m/s nakon jedne sekunde, posljedično iznos brzine vjetra se smanjuje na stalnu vrijednost 15 m/s.

Mehanička snaga i izlazna električna snaga rotora se računaju prema izrazu:

$$P_m = T_m * \omega_r * W_s = T_{em} * \omega_s \quad (5-1)$$

gdje je:

P_m – Mehanička snaga vjetroturbine dobivena iz snage vjetra koja je prenesena na rotor

T_m – Mehanički moment apliciran na rotor

ω_r – kutna brzina rotora

W_s – izlazna električna snaga statora

T_{em} – elektromagnetski moment apliciran na rotor od strane generatora

ω_s – kutna brzina rezultantnog magnetskog polja u zračnom prostoru generatora, ova brzina ima naziv sinkrona brzina. Njezina vrijednost proporcionalna je frekvenciji napona mreže i broju polova generatora.

5.1 Modeliranje vjetroturbine

Prema [4] Kinetička energija vjetra pretvara se u rotacijsku energiju u obliku momenta pomoću vjetroturbine. Snaga dostupna u vjetru dana je jednadžbom (5-2):

$$Pv = \frac{1}{2} * \rho * A * V_v^3 \quad (5-2)$$

gdje je:

A – površina lopatica na koju djeluje vjetar [m^2]

ρ – gustoća zraka [kg/m^3]

V_v – brzina vjetra [m/s]

Dobivena snaga koju generira turbina iz raspoložive snage vjetra dana je jednadžbom (5-3):

$$Pt = \frac{1}{2} * \rho * \pi * R^2 * V_v^3 * C_p(\lambda, \beta) \quad (5-3)$$

gdje je:

R – polumjer turbine rotora [m]

$C_p(\lambda, \beta)$ – koeficijent snage

$C_p(\lambda, \beta)$ izražava se jednadžbom (5-4) i jednadžbom (5-5):

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 * \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 * \beta^{c_5} - c_6 \right) * e^{\frac{-c_7}{\lambda_i}} \quad (5-4)$$

gdje $c_1=0.73$; $c_2=151$; $c_3=0.58$; $c_4=0.002$; $c_5=2.4$; $c_6=13.2$; $c_7=18.4$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,73 * \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0,58 * \beta - 0,002 * \beta^{2,4} - 13,2 \right) * e^{\frac{18,4}{\lambda_i}} \quad (5-5)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0,02 * \beta} - \frac{0,003}{\beta^3 + 1} \quad (5-6)$$

Prema Betzovom , najveća teorijska vrijednost C_p izražena je jednađžbom (5-7):

$$C_{p \text{ Theo max}} = 0,593 * 100 [\%] = 59,3 \% \quad (5-7)$$

λ je izražena jednađžbom (5-8):

$$\lambda = \frac{R * \omega_t}{V_v} \quad (5-8)$$

Okretni moment T_t koji generira turbina je izražen jednađžbom (5-9):

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (5-8)$$

gdje je:

ω_t – kutna brzina rotora vjetroturbine[rad/s]

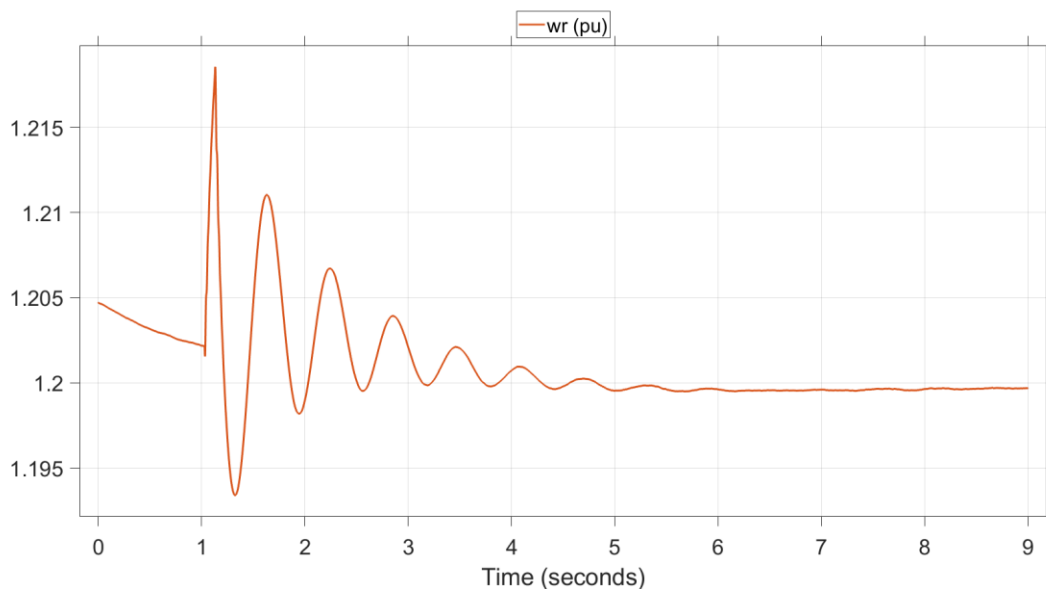
6. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJA

6.1. Trofazni kratki spoj u mreži

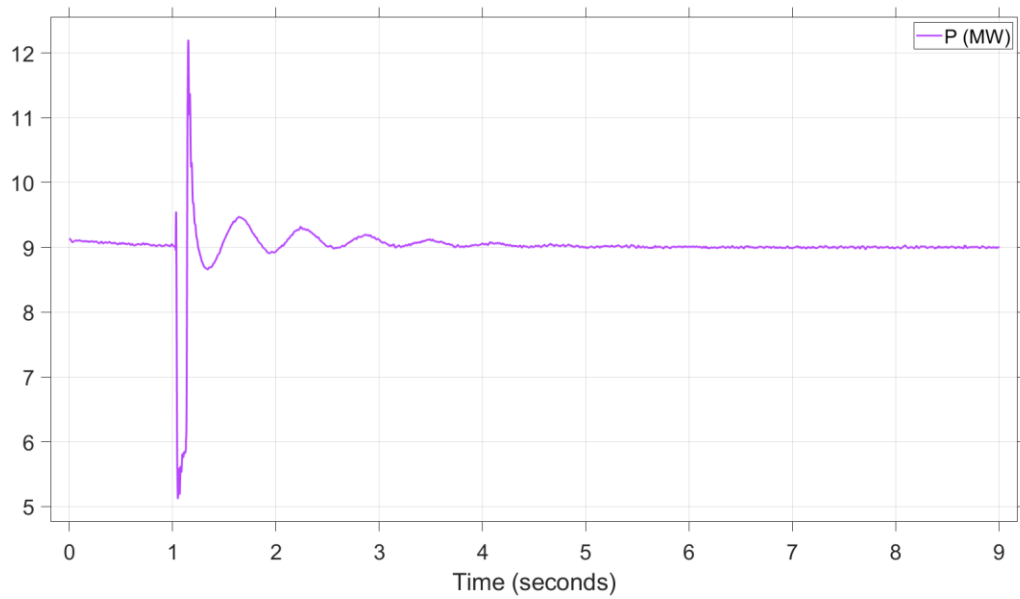
Trofazni kratki spoj u mreži nastaje kada sve tri faze elektroenergetskog sustava dođu u izravan kontakt jedna s drugom ili zajedničkom točkom, što rezultira kvarom u kojem napon pada i teče iznimno velika struja. Ova vrsta greške je najteža i može uzrokovati značajnu neravnotežu u mreži. U prvom primjeru simulira se kvar u mreži, odnosno trolezni kratki spoj na način da se u blok izmjeničnog trofaznog naponskog izvora koji predstavlja dio mreže naponske razine 120 kV postavlja amplituda napona na 0,5 p.u. u vremenskom periodu od 1,03 do 1,13 sekunde, nakon toga amplituda napona vraća se na 1,0 p.u.

Tablica 6.1.1. Parametri trofaznog izmjeničnog naponskog izvora

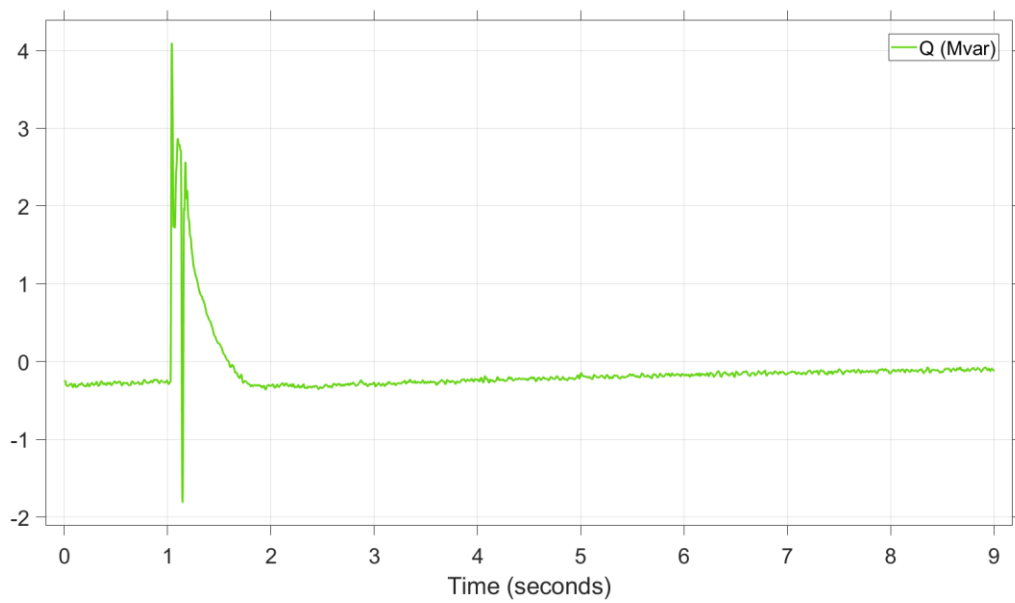
Varijacija vremena	Amplituda		
Vrsta varijacije	Parovi vremena i amplitude		
Amplituda [p.u.]	1,0	0,5	1,0
Vrijeme promjene amplitude [ms]	0	1,03	1,13



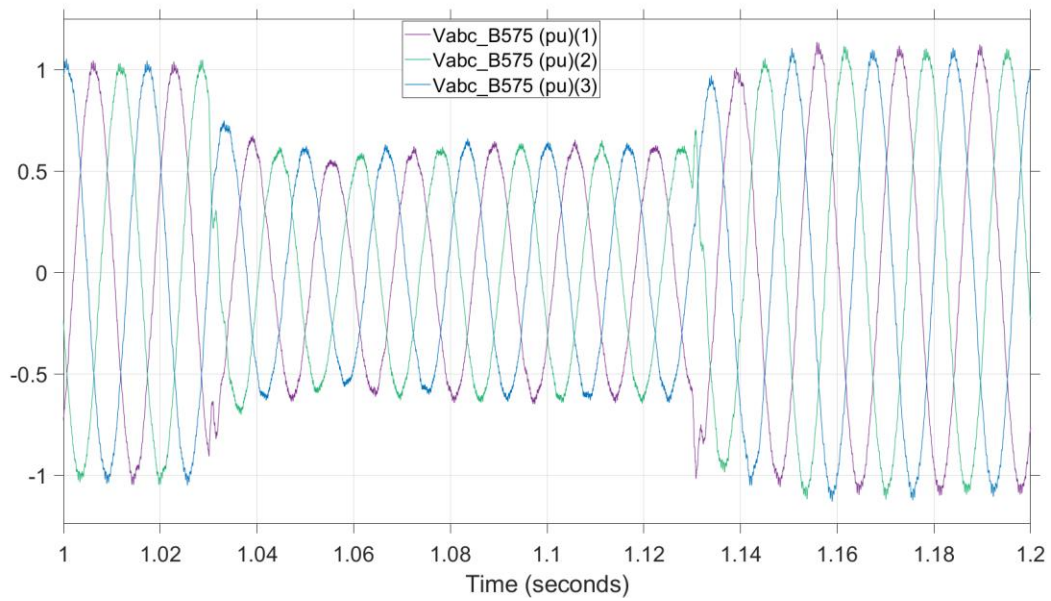
Slika 6.1.1. Kutna brzina generatora



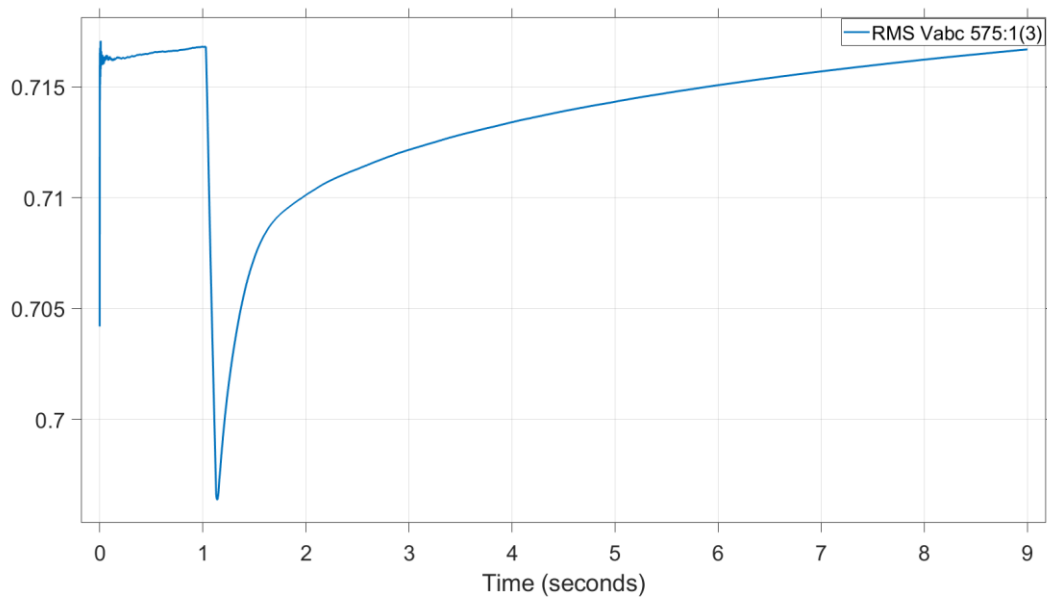
Slika 6.1.2. Djelatna snaga generatora



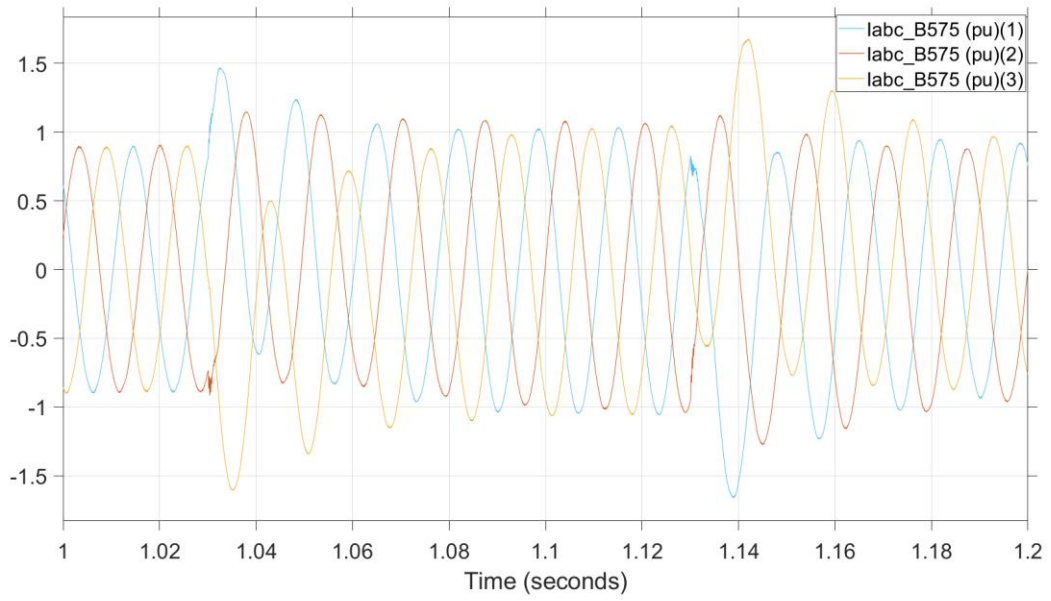
Slika 6.1.3. Jalova snaga generatora



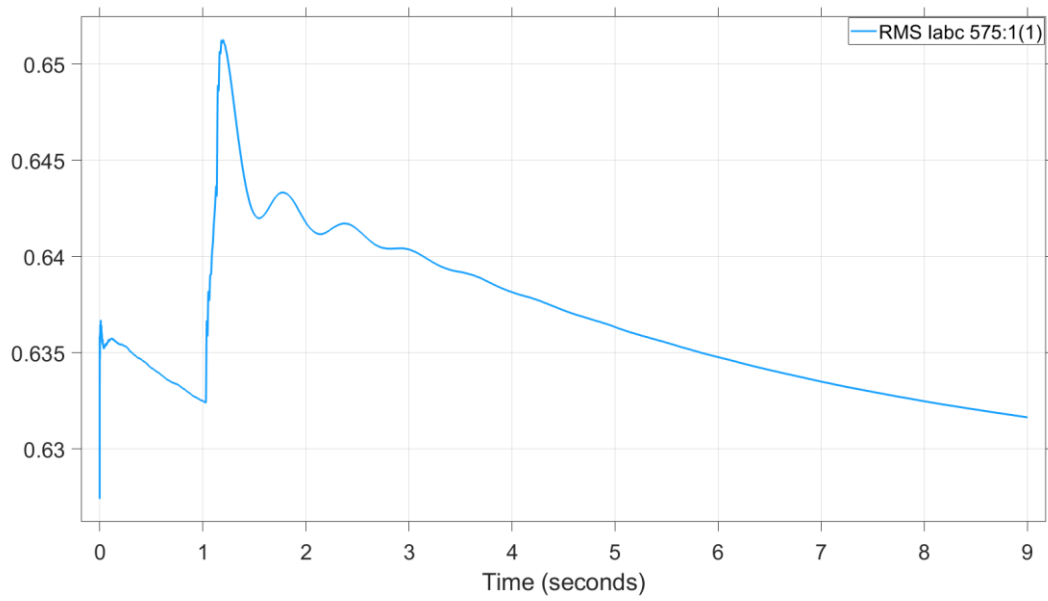
Slika 6.1.4. Trenutne vrijednosti napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



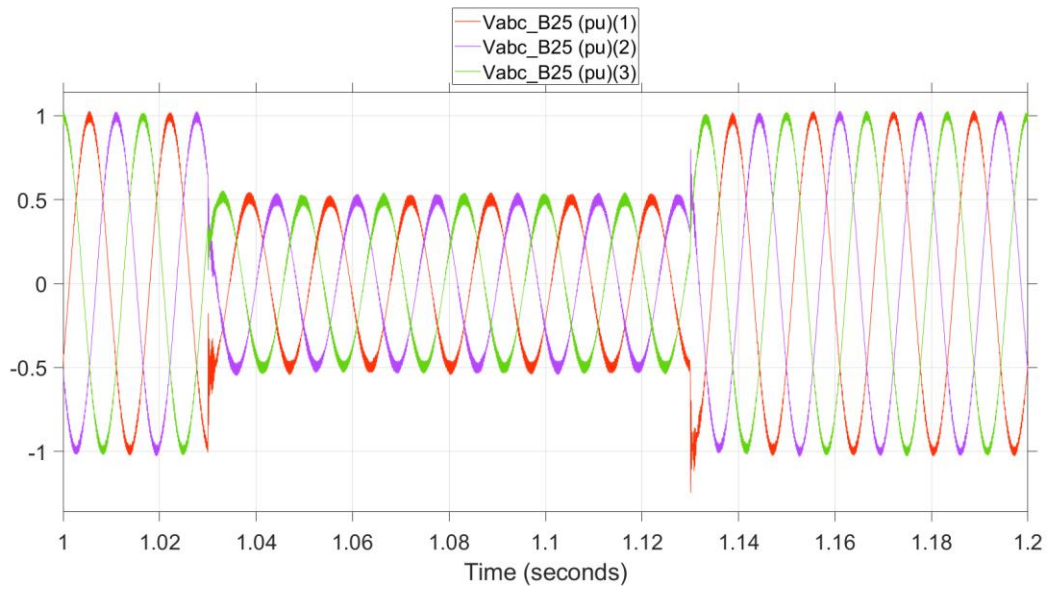
Slika 6.1.5. Efektivna vrijednost napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



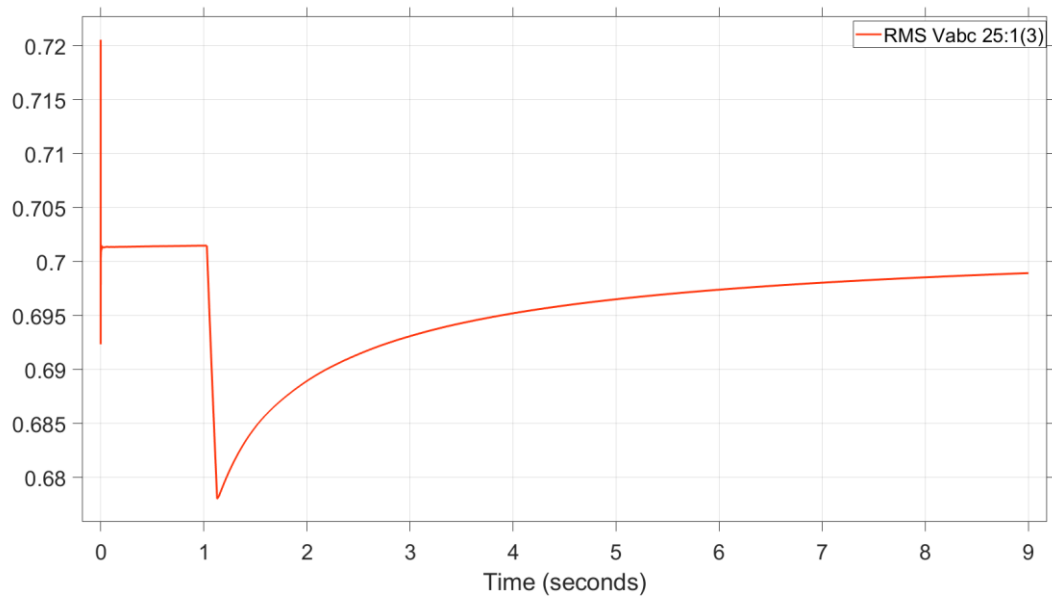
Slika 6.1.6. Trenutne vrijednosti struja niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



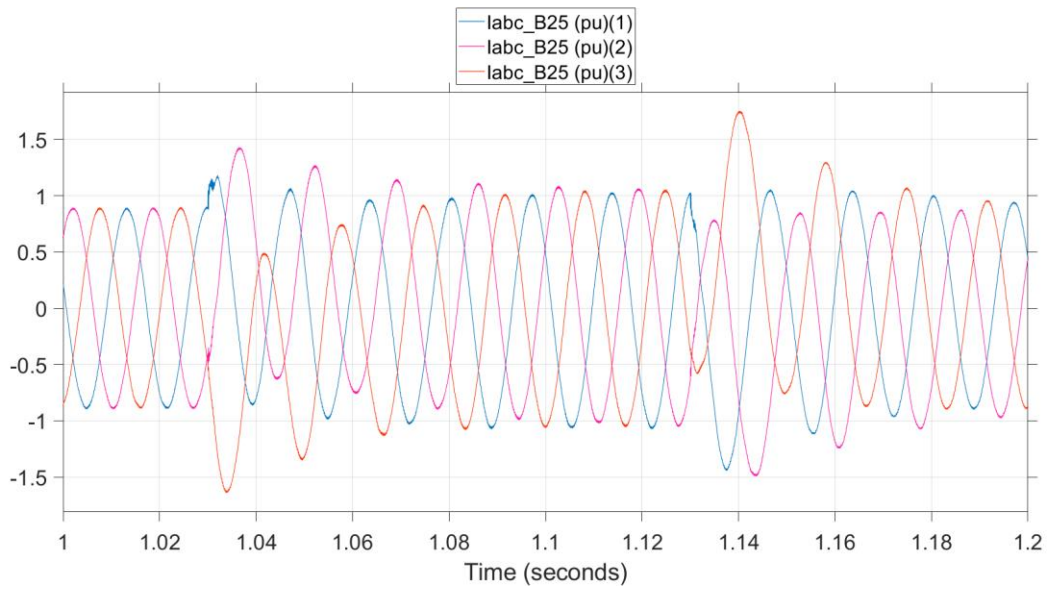
Slika 6.1.7. Efektivna vrijednost struje niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



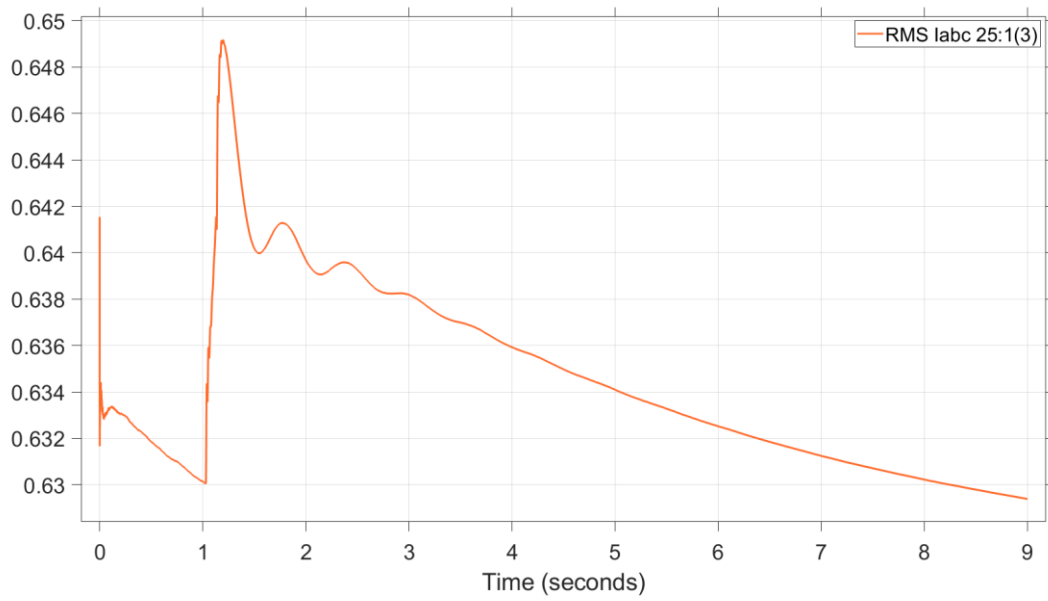
Slika 6.1.8. Trenutne vrijednosti napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.1.9. Efektivna vrijednost napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.1.10. Trenutne vrijednosti struja srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.1.11. Efektivna vrijednost struje srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže

Tijekom trofaznog kratkog spoja u trenutku 1,03 sekundi na srednjenaponskom dijelu mreže, amplituda napona mreže naglo pada što je vidljivo na slici 6.1.8. i slici 6.1.9., posljedično tome može se uočiti na slici 6.1.10. i slici 6.1.11. da dolazi do porasta struje u tom trenutku. Približavajući se mjestu priključka vjetroelektrane, na niskonaponskom dijelu mreže na koji je vjetroelektrana spojena vidljive su posljedice kvara, pad vrijednosti napona na slici 6.1.4. i slici 6.1.5. i skok struje na slici 6.1.6. i slici 6.1.7. Budući da je stator DFIG-a izravno spojen na mrežu, napon na stezaljkama statora pada u skladu s tim dolazi do nesimetričnosti između statora i rotora.

Nagli pad napona statora uzrokuje veliku struju rotora jer krug rotora pokušava održati magnetsko polje rotora. Kutna brzina generatora koja je iznosila 1205 okr/min do trenutka 1,03 s. Zbog velikog poremećaja u mreži dolazi do pada kutne brzine koja je prikazana na slici 6.1.1. Nestankom kvara iz mreže dolazi do rasterećenja i kutna brzina raste na 1218 okr/min te joj je nakon toga potrebno nekoliko sekundi da se stabilizira. Kroz pretvarač snage spojen na rotor može poteći prevelika struja, što bi moglo oštetiti pretvarač. Kratkim spajanjem namota rotora, *crowbar* ograničava struju koja teče u pretvarač, štiteći tako osjetljivu elektroniku napajanja. U tom razdoblju vjetroturbina ne može regulirati snagu koju isporučuje u mrežu. Ovo je privremeno stanje kako bi se spriječila šteta tijekom kvara.

Pretvarač na strani mreže (koji ostaje operativan čak i kada je pretvarač na strani rotora premošten) još uvijek može ubrizgati jalovu snagu u mrežu, pomažući s podrškom napona ako to zahtijeva mrežni kod. Međutim, to ovisi o specifičnom dizajnu upravljačkog sustava vjetroturbine. Ako se greška otkloni unutar navedenog vremenskog okvira LVRT, turbina bi trebala ostati spojena na mrežu, a kada se mrežni napon ponovno uspostavi, *crowbar* zaštita se deaktivira, dopuštajući DFIG-u da nastavi s normalnim radom s ponovnom kontrolom snage. U ovom slučaju regulatori koji djeluju u milisekundnom vremenskom intervalu su regulatori uzbude odnosno djelatne snage i regulatori jalove snage, prema slici 6.1.3. može se vidjeti da dolazi do ubrizgavanja jalove snage u mrežu, djelatna snaga prikazana na slici 6.1.2. koja se predaje u mrežu naglo pada.

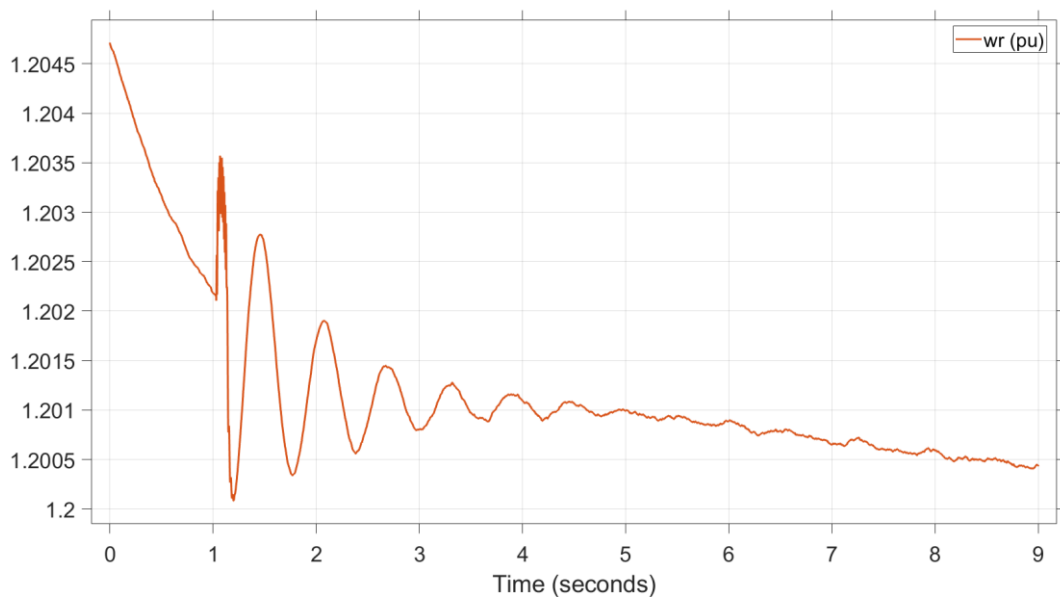
Nakon što se kratki spoj ukloni i mrežni napon se počne oporavljati, *crowbar* zaštita se isključuje, a pretvarač na strani rotora ponovno preuzima kontrolu nad strujama rotora. DFIG postupno obnavlja proizvodnju djelatne i jalove snage kako se napon statora vraća na normalne razine. Kontrolni sustav osigurava nesmetan prijelaz natrag na uobičajeni rad bez izazivanja daljnjeg opterećenja mreže.

6.2. Jednofazni kratki spoj u mreži

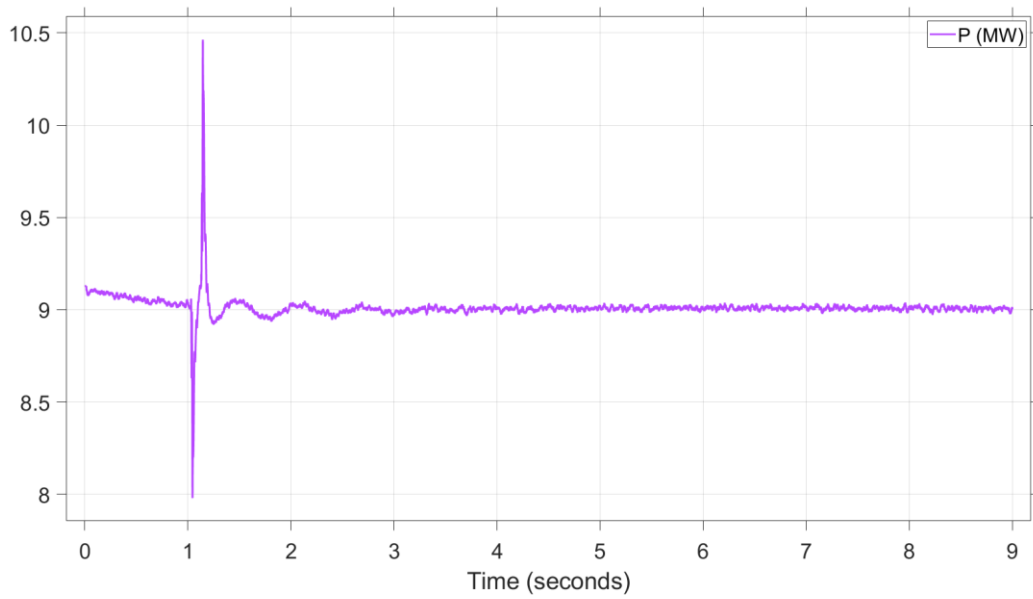
U drugom primjeru se simulira jednofazni kratki spoj, također se u blok izmjeničnog trofaznog naponskog izvora koji predstavlja dio mreže naponske razine 120 kV postavila amplituda napona na jednoj od faza iznosi 0,5 p.u. u vremenskom periodu od 1,03 do 1,13 sekunde, napon preostalih faza u tom vremenskom intervalu iznosi 1,0 p.u.. Nakon što vremenski interval trajanja jednofaznog kratkog spoja završi, amplitude napona svih faza su 1,0 p.u.

Tablica 6.1.1. Parametri trofaznog izmjeničnog naponskog izvora

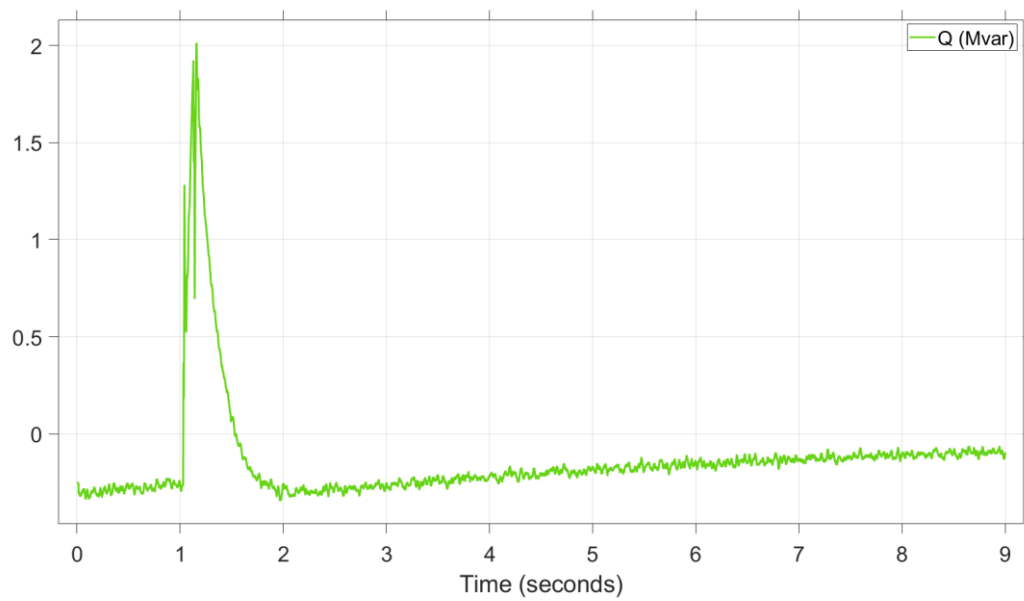
Varijacija vremena	Amplituda		
Vrsta varijacije	Parovi vremena i amplitude		
Amplituda [p.u.]	1,0	0,5	1,0
Vrijeme promjene amplitude [ms]	0,1	1,03	1,13



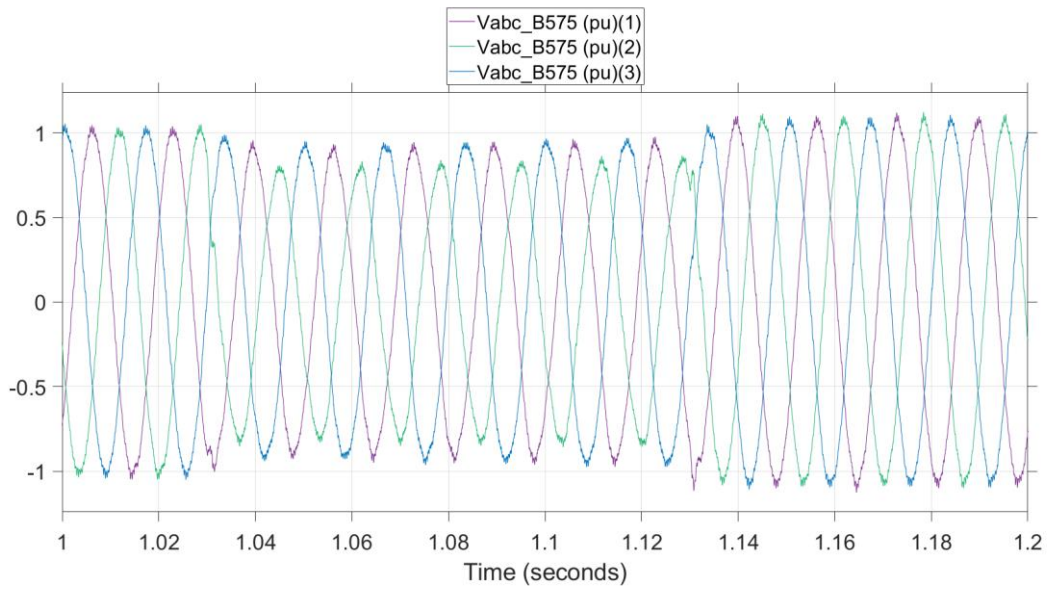
Slika 6.2.1. Kutna brzina generatora



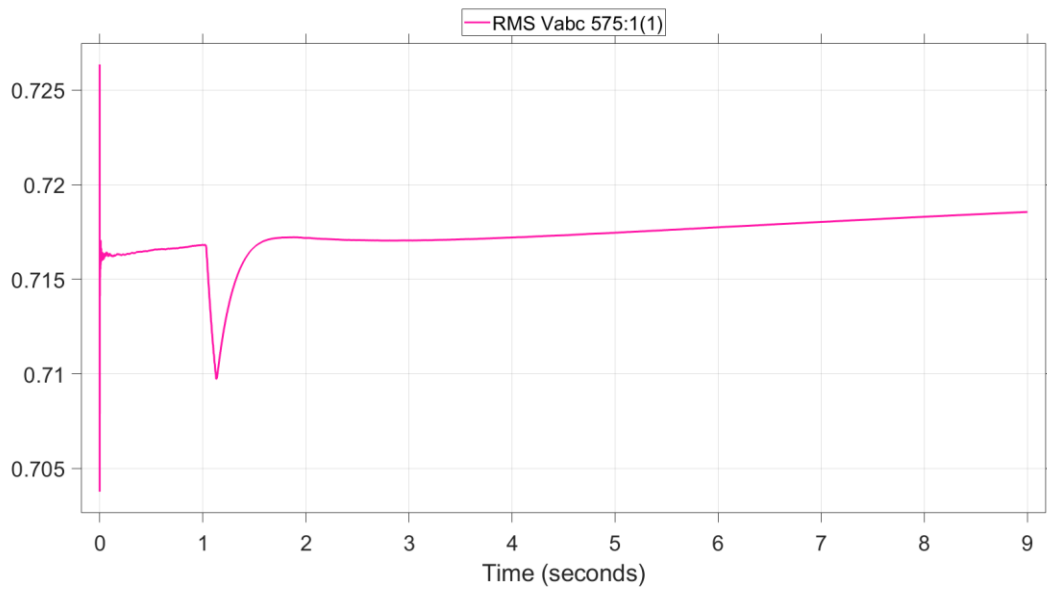
Slika 6.2.2. Djelatna snaga generatora



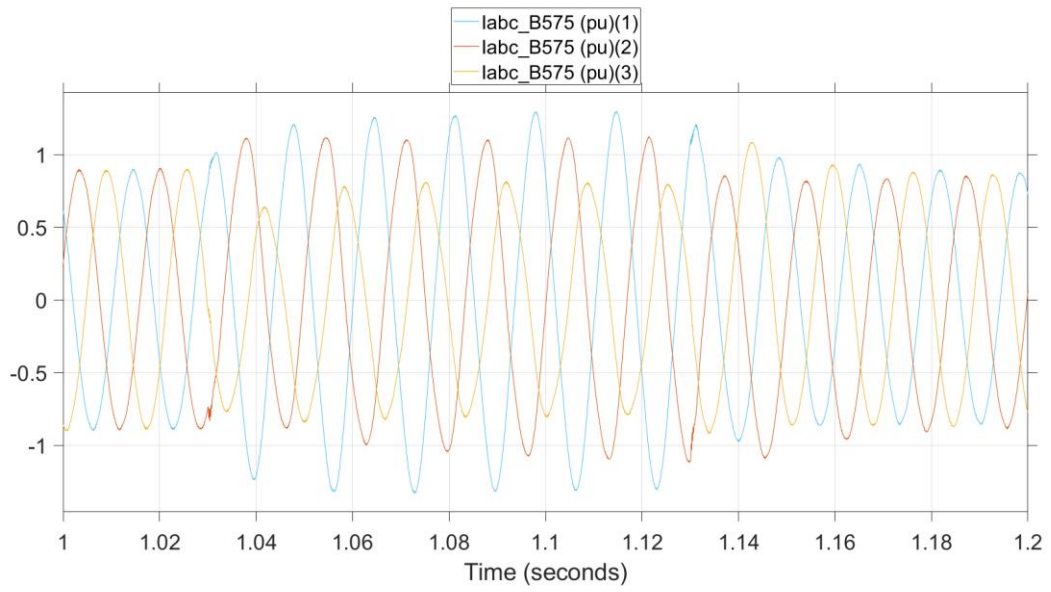
Slika 6.2.3. Jalova snaga generatora



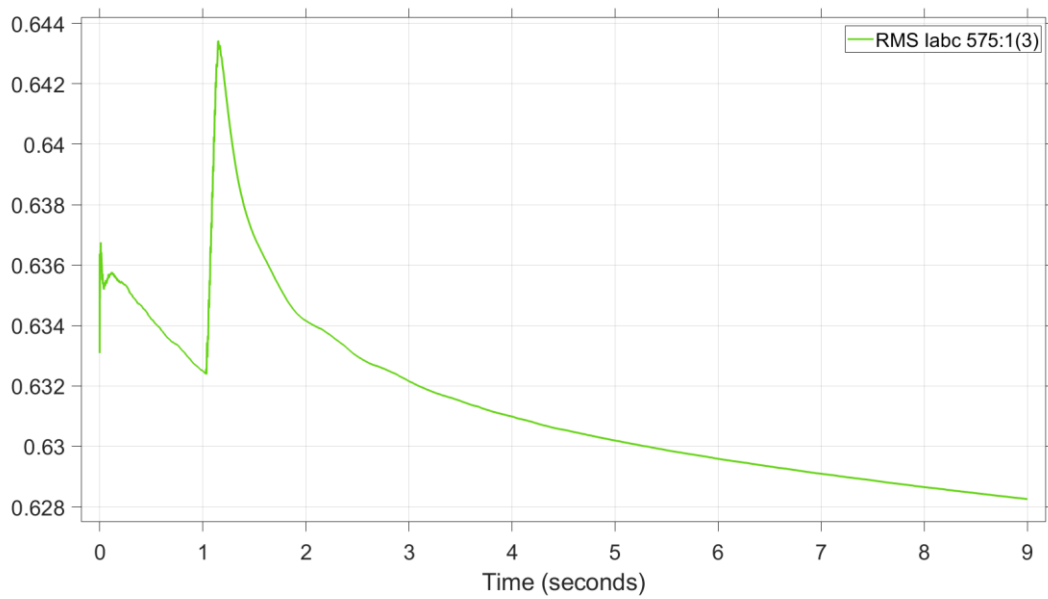
Slika 6.2.4. Trenutne vrijednosti napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



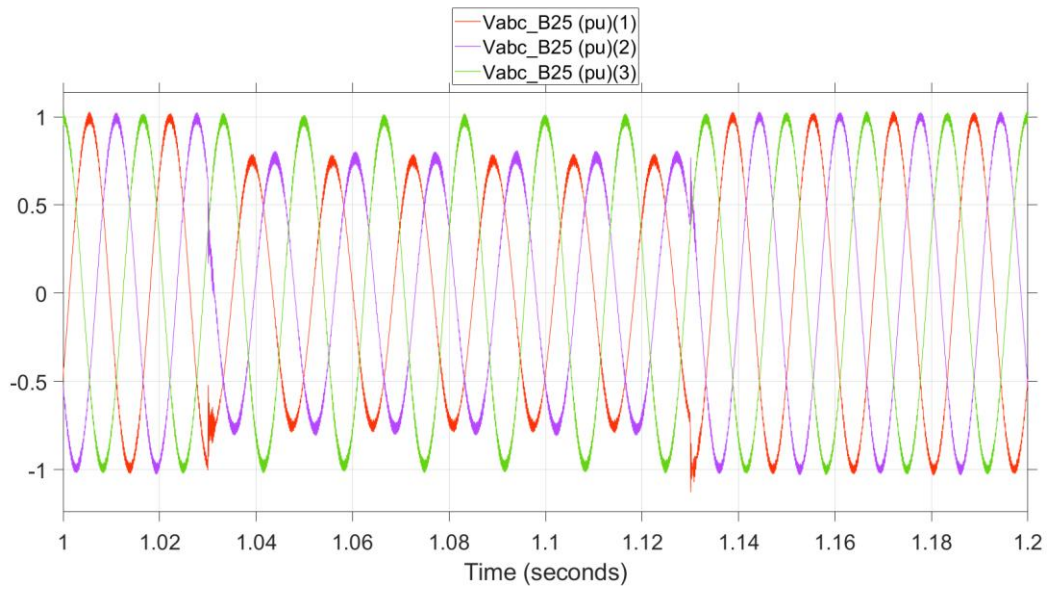
Slika 6.2.5. Efektivna vrijednost napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



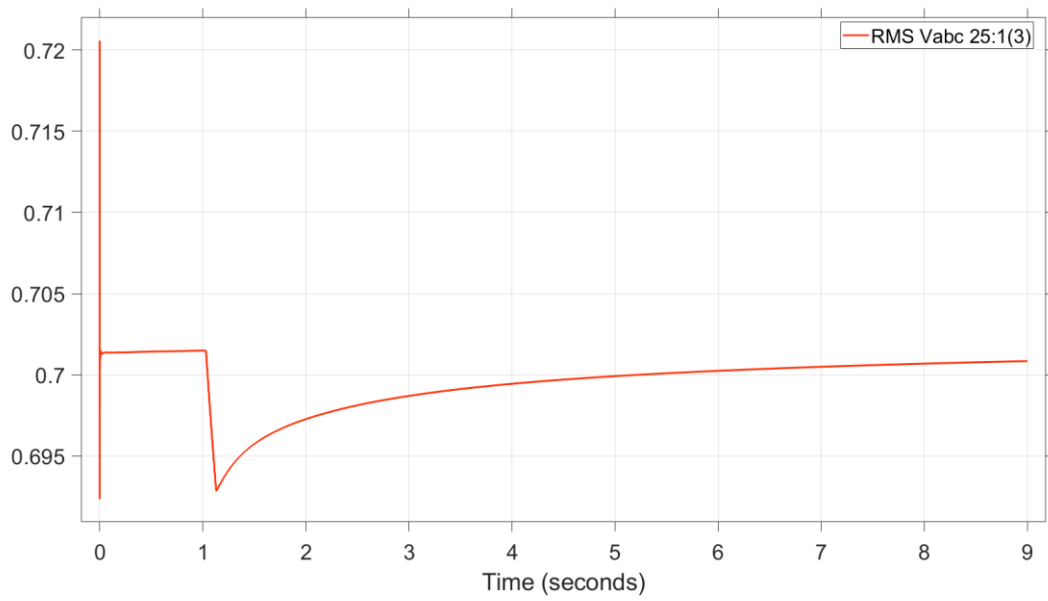
Slika 6.2.6. Trenutne vrijednosti struja niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



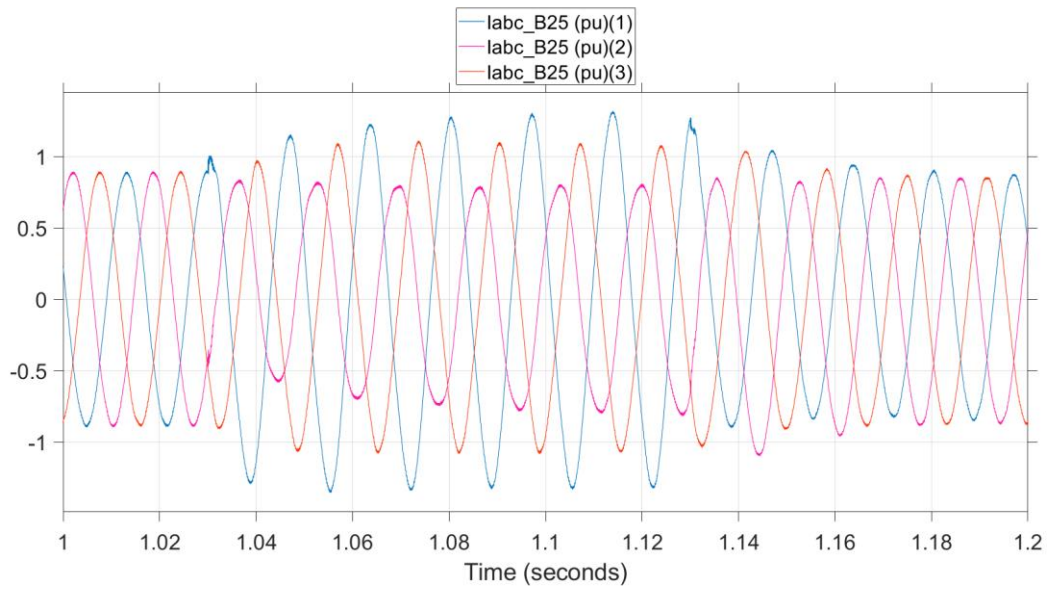
Slika 6.2.7. Efektivna vrijednost struje niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



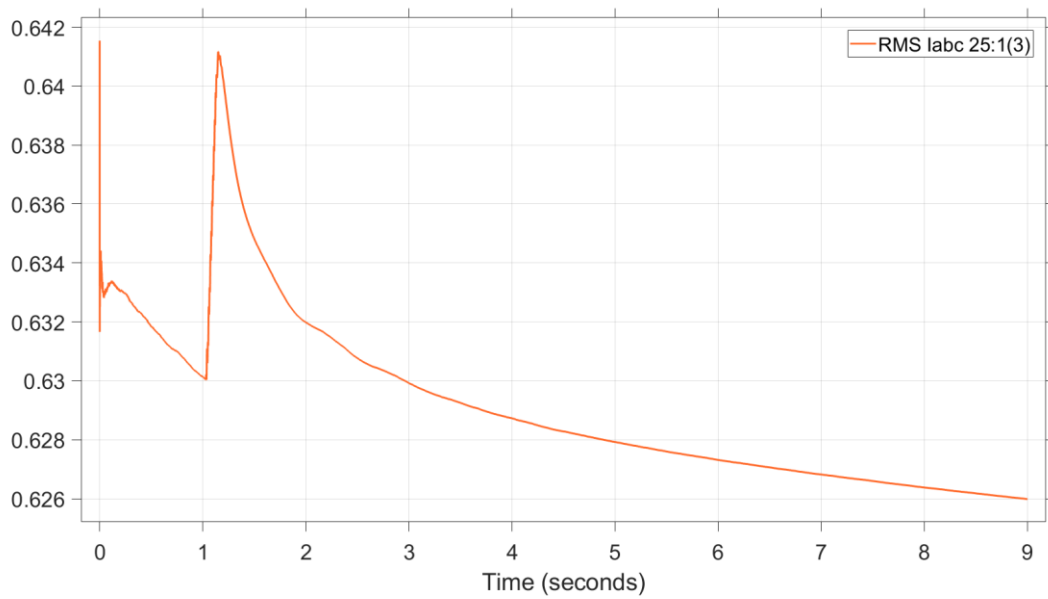
Slika 6.2.8. Trenutne vrijednosti napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.2.9. Efektivna vrijednost napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.2.10. Trenutne vrijednosti struja srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.2.11. Efektivna vrijednost struje srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže

Tijekom jednofaznog spoja s uzemljenjem u mreži, vjetroturbina s DFIG-om suočava se s stanjem asimetričnog kvara. Ovi kvarovi su manje ozbiljni od trofaznih kvarova, ali ipak uzrokuju značajne smetnje u sustavu. Na slici 6.2.1. prikazana je kutna brzina generatora, koja je oscilirala za 1 do 2 okr/min nekoliko sekundi te u brzom vremenu dolazi do stabilizacije kutne brzine generatora. Jednofazni kratki spoj uzrokuje nesimetričan napon na tri faze u mreži. Napon jedne faze značajno pada, dok druge dvije ostaju blizu svojih nominalnih vrijednosti. Jednofazni kratki spoj nastaje u 1,03 sekundi na sredjenaponskom dijelu mreže, amplituda napona faze pada što je vidljivo na slici 6.1.8. i slici 6.1.9., posljedično tome može se uočiti na slici 6.1.10. i slici 6.1.11. da dolazi do porasta struje na fazi na kojoj se pojavila greška u tom trenutku. Približavajući se mjestu priključka vjetroelektrane, na niskonaponskom dijelu mreže na koji je vjetroelektrana spojena vidljive su posljedice kvara, pad vrijednosti napona faze na slici 6.1.4. i slici 6.1.5. i skok struje na slici 6.1.6. i slici 6.1.7. Napon na stezaljkama statora DFIG također postaje nesimetričan budući da je stator izravno spojen na mrežu. Nesimetričan napon mreže inducira struje negativnog slijeda u namotima statora. Ove komponente negativnog slijeda uzrokuju oscilacije u struji rotora i momentu, što može utjecati na mehaničku i električnu stabilnost vjetroturbine. Struje rotora mogu porasti, potencijalno preopterećujući pretvarač na strani rotora. Ako se ne kontroliraju, ovi udari mogu oštetiti pretvarač ili dovesti do stanja prevelike struje. Kontrola pretvarača na strani rotora ograničava struje rotora kako bi se spriječilo preopterećenje energetske elektronike.

DFIG može prilagoditi ravnotežu između ubrizgavanja djelatne i jalove snage u mrežu. Na slici 6.2.3. vidi se da DFIG u trenutku nastanka kvara ubrizgava jalovu snagu u mrežu kako bi pružio potporu pri oporavku, a na slici 6.2.2. vidi se da popratno smanjuje iznos predane djelatne energije u mrežu. Tijekom kvara, ubrizgavanje jalove snage može imati prioritet da podrži napon mreže i pomogne u oporavku od kvara. U teškim slučajevima, kao što je kada struja rotora prekorači sigurne radne granice, *crowbar* zaštita može se aktivirati. Slično trofaznim kvarovima, DFIG mora ostati spojen na mrežu tijekom jednofaznog kratkog spoja. Ovo osigurava da se turbina ne isključi izvan mreže tijekom kvara, što bi moglo pogoršati nestabilnost mreže. Nakon što se greška otkloni i napon mreže vrati u normalu, DFIG-ov sustav upravljanja vraća se u normalan rad. Pretvarač na strani rotora ponovno preuzima punu kontrolu nad djelatnom i jalovom snagom. Sustav se glatko vraća u normalan rad, osiguravajući održavanje stabilnosti turbine i mreže.

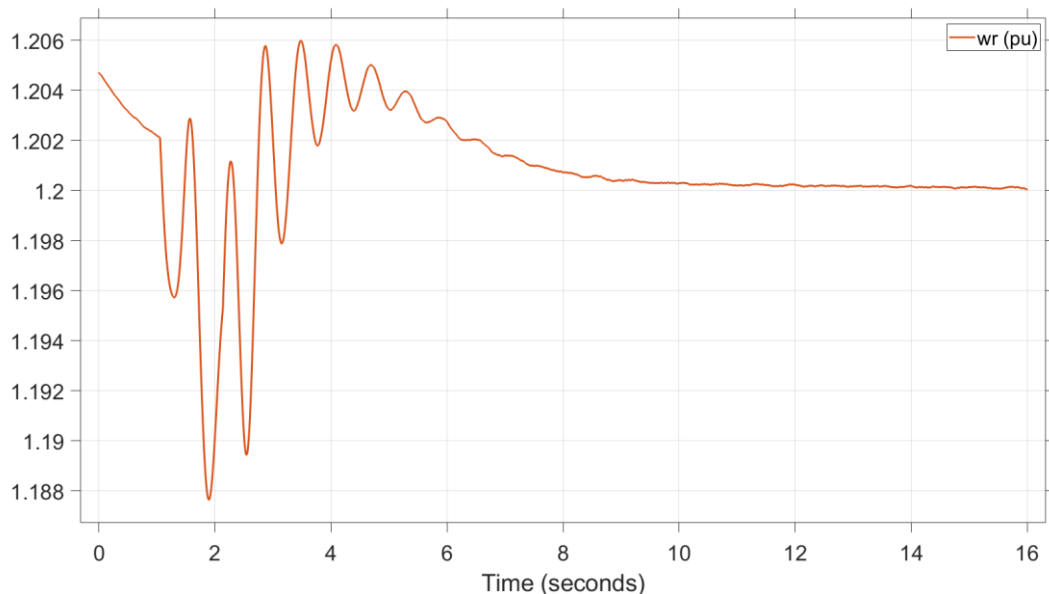
6.3. Pad frekvencije u mreži

U trećem pokusu simulira se pad frekvencije mreže. Pad frekvencije u elektroenergetskom sustavu obično se događa kada postoji neravnoteža između proizvodnje i potražnje (opterećenja). Nazivna frekvencija mreže u simulaciji iznosi 60 Hz. Pad frekvencije u mreži može trajati sekundama, minutama, a nekada i satima, u ovom slučaju simuliran je kratak pad frekvencije koji se može dogoditi kao posljedica lokaliziranog kvara, npr. isključenje malog generatora iz mreže. U blok izmjeničnog trofaznog naponskog izvora koji predstavlja dio mreže naponske razine 120 kV frekvencija mreže postavlja se u vremenskom intervalu od 1,05 do 2,05 sekundi na 59 Hz, kada taj vremenski period završi vrijednost frekvencije mreže se vraća na 60 Hz.

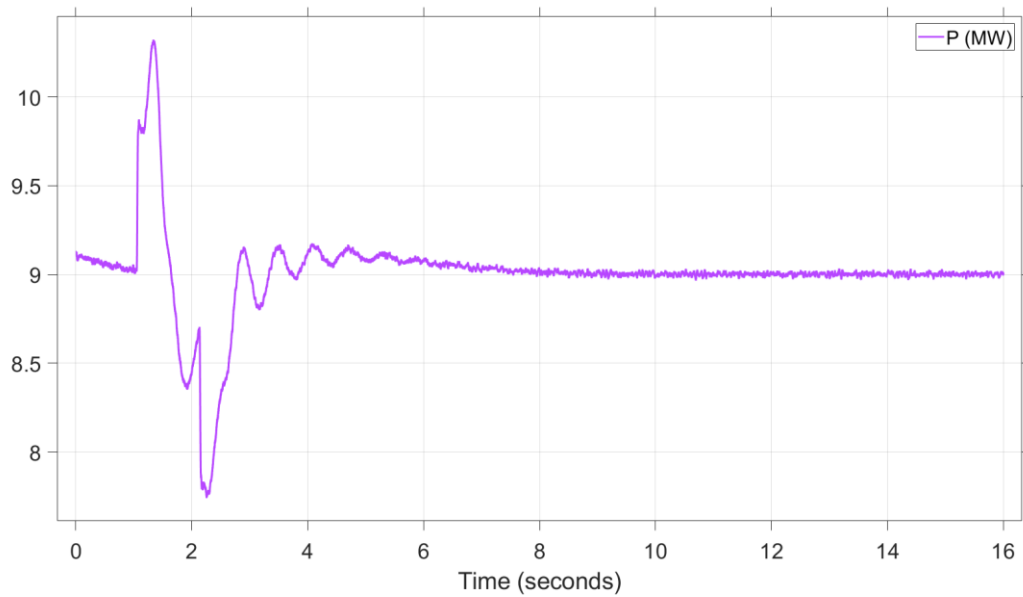
Parametri trofaznog izmjeničnog naponskog izvora:

Tablica 6.3.1. Parametri trofaznog izmjeničnog naponskog izvora

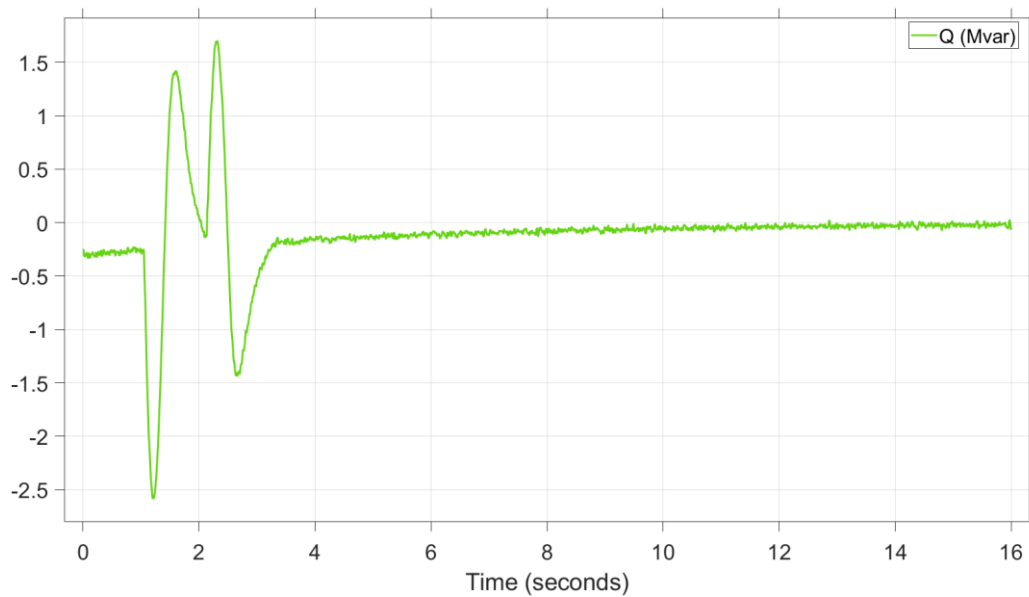
Varijacija vremena	Frekvencija		
Vrsta varijacije	Step		
Frekvencija [Hz]	60	59	60
Vrijeme promjene frekvencije [ms]	0	1,05	2,05



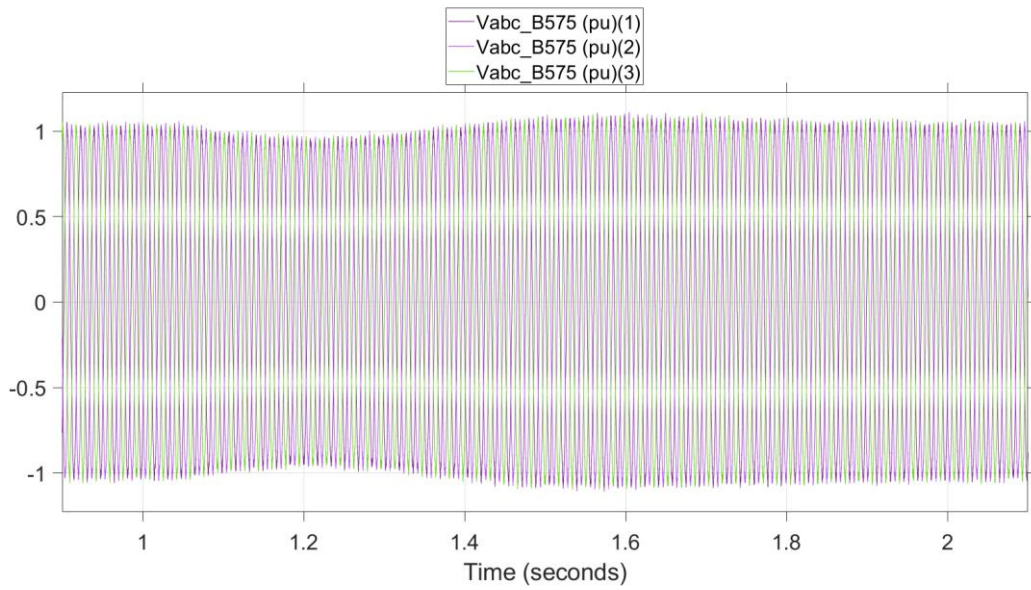
Slika 6.3.1. Kutna brzina generatora



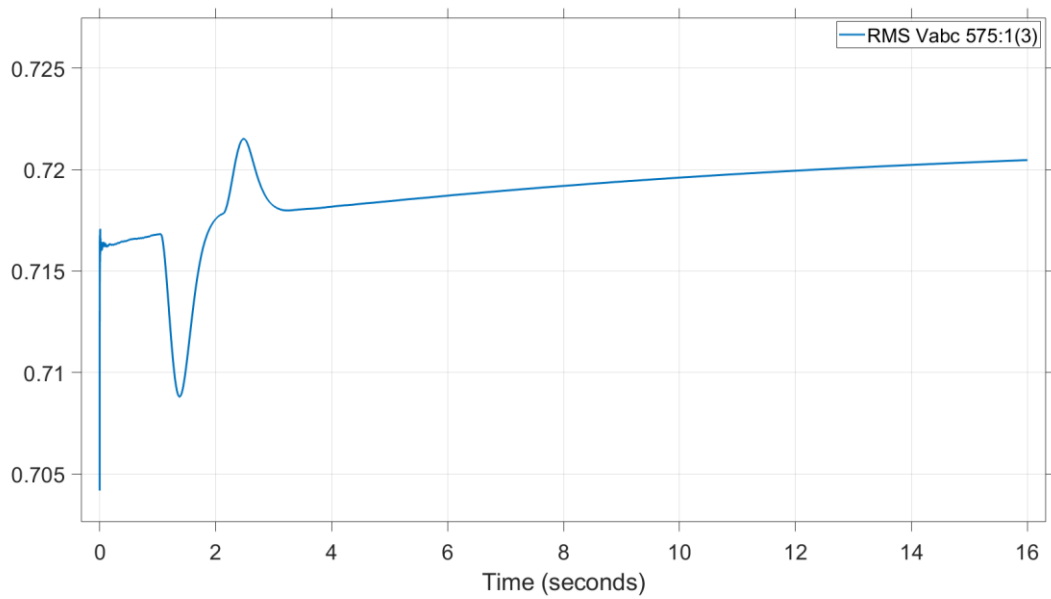
Slika 6.3.2. Djelatna snaga generatora



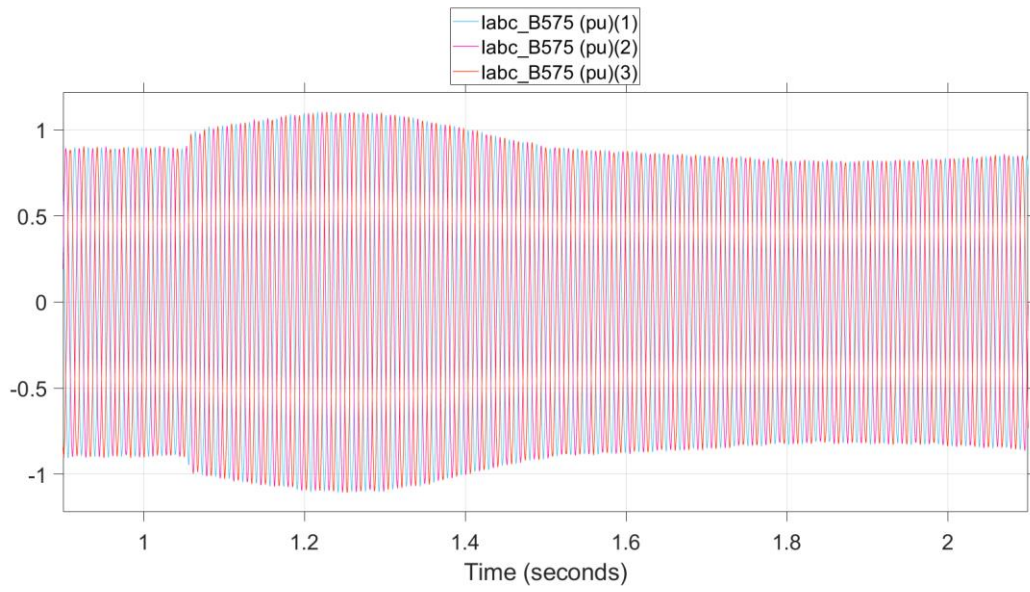
Slika 6.3.3. Jalova snaga generatora



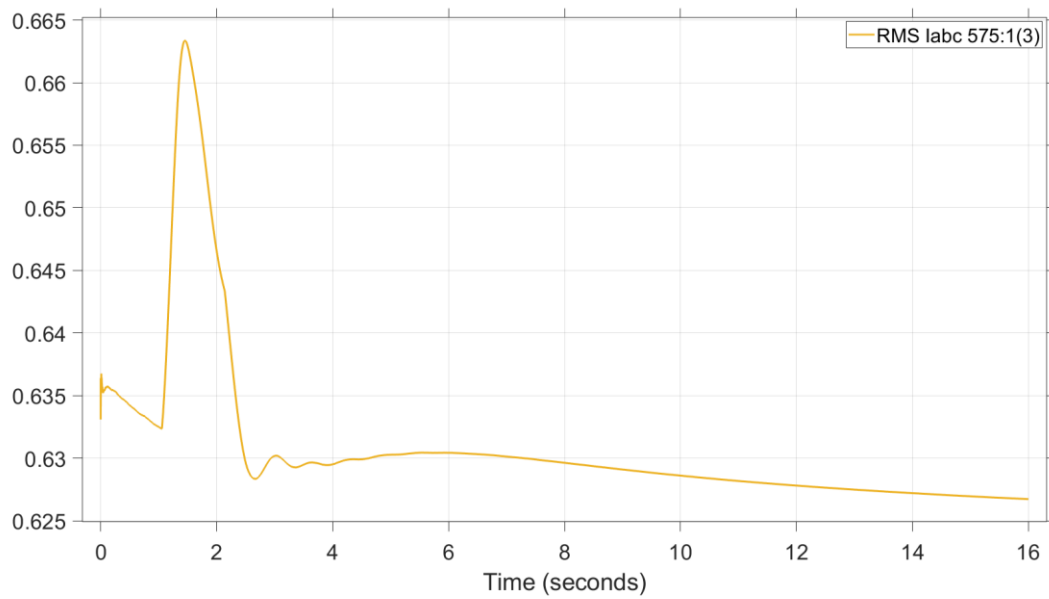
Slika 6.3.4. Trenutne vrijednosti napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



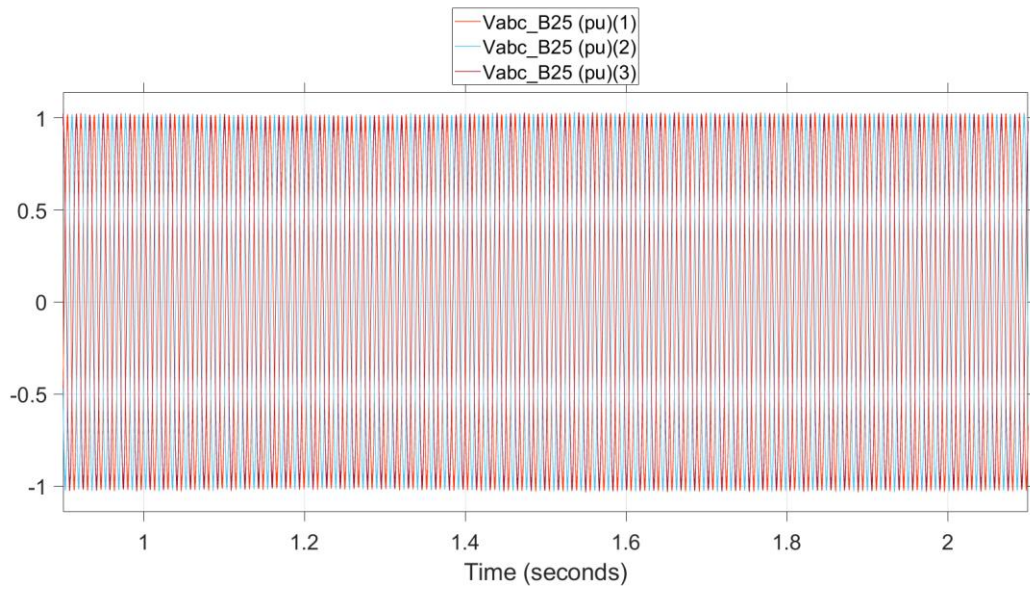
Slika 6.3.5. Efektivna vrijednost napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



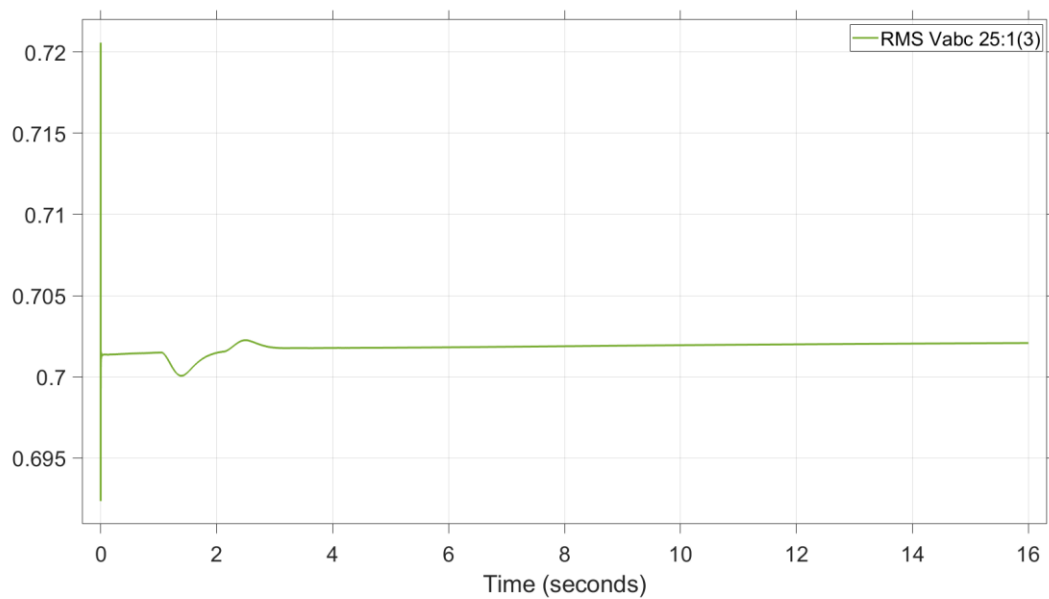
Slika 6.3.6. Trenutne vrijednosti struja niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



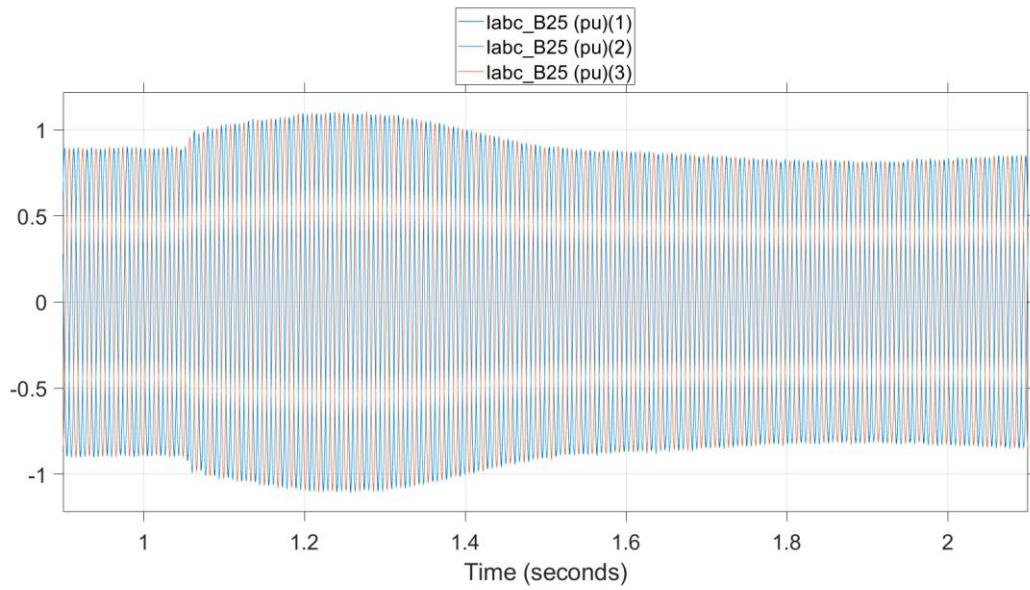
Slika 6.3.7. Efektivna vrijednost struje niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



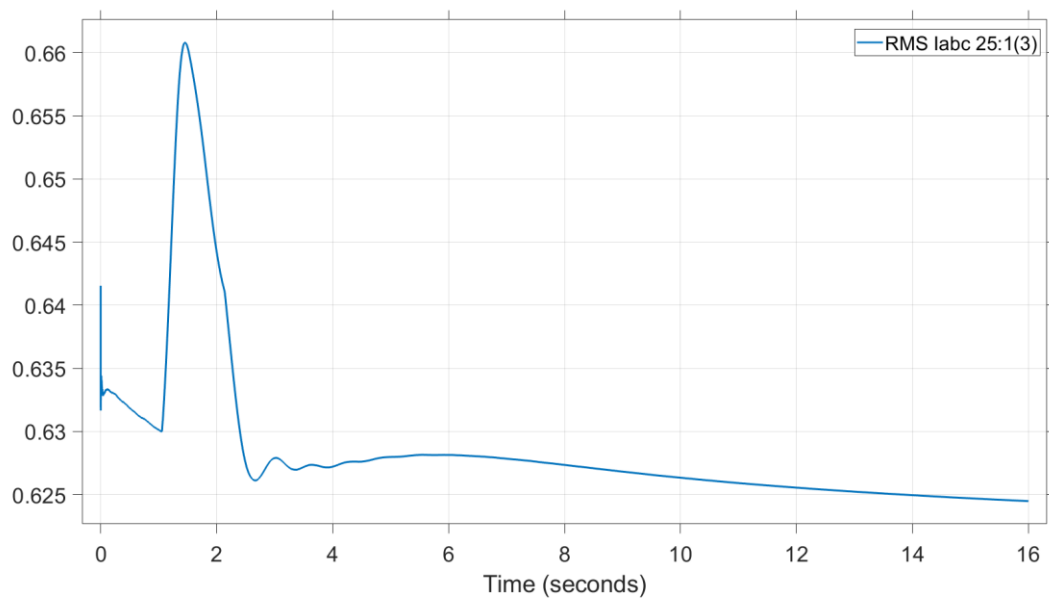
Slika 6.3.8. Trenutne vrijednosti napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.3.9. Efektivna vrijednost napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.3.10. Trenutne vrijednosti struja srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.3.11. Efektivna vrijednost struje srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže

Pad frekvencije u električnoj mreži može imati značajne učinke na sustav DFIG-a koji se obično koristi u vjetroturbinama. Pretvarač na strani rotora upravlja rotorskim strujama i omogućuje neovisnu regulaciju djelatne i jalove snage, dok pretvarač na strani mreže osigurava stabilnu razmjenu energije između DFIG-a i mreže. DFIG-ovi rade s brzinama rotora koje se malo razlikuju od sinkrone brzine, što im omogućuje rad u rasponu brzina vjetra. Pad frekvencije u mreži dovodi do smanjenja sinkrone brzine (budući da je sinkrona brzina proporcionalna frekvenciji mreže). Kako sinkrona brzina opada, proklizavanje rotora se mijenja, zahtijevajući od upravljačkog sustava da prilagodi brzinu rotora kako bi se održala optimalna ekstrakcija snage. Klizanje se odnosi na razliku između sinkrone brzine i stvarne brzine rotora. Pad kutne brzine generatora može se vidjeti na slici 6.3.1. Kao odgovor na pad frekvencije u mreži, DFIG sustav upravljanja (putem pretvarača na strani rotora) može prilagoditi izlaz djelatne snage kako bi pomogao stabilizirati mrežu, na slici 6.3.2. može se vidjeti povećanje djelatne snage predane u mrežu tijekom pada frekvencije mreže, to je moguće ako brzina vjetra dopušta, DFIG-ovi mogu povećati svoju izlaznu snagu podešavanjem kuta nagiba lopatica i povećanjem momenta primijenjenog na rotor.

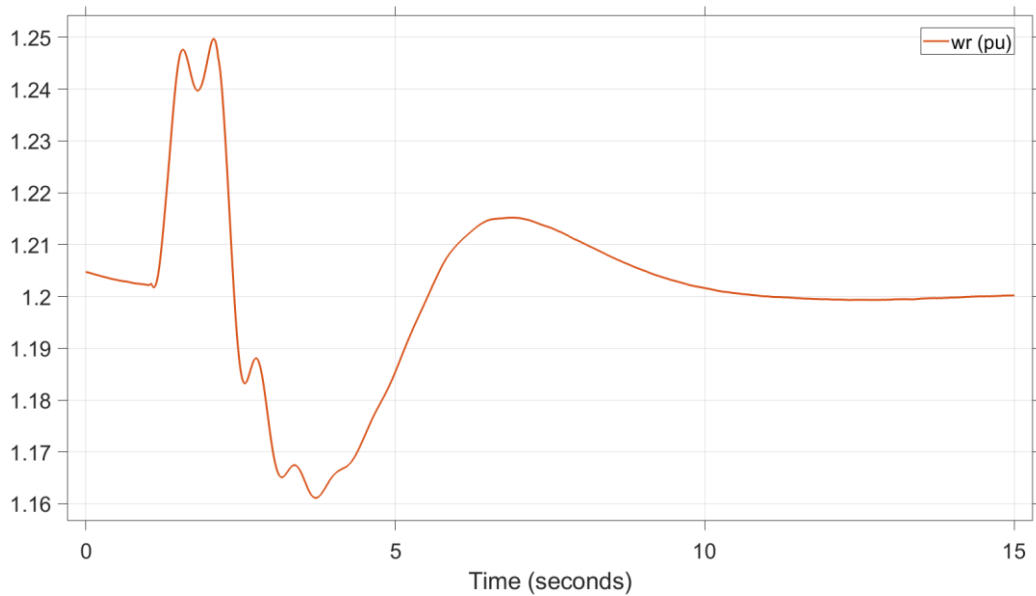
Pad frekvencije također može utjecati na stabilnost napona u mreži. DFIG-ovi imaju sposobnost opskrbljivanja ili apsorpiranja jalove snage kako bi pomogli u podršci naponu mreže tijekom poremećaja. Pretvarač na strani rotora prilagođava izlaznu jalovu snagu kako bi pomogao stabilizaciji napona tijekom i nakon pada frekvencije što je prikazano na slici 6.3.2. Također tijekom pada frekvencije dolazi do male promjene napona niskonaponske mreže, vidljivo na slici 6.3.4. i slici 6.3.5. i struje niskonaponskog dijela mreže što je vidljivo na slici 6.3.6. i slici 6.3.7. Na slici 6.3.8. i 6.3.9. može se uočiti da napon na srednjenaponskom dijelu mreže se nije promjenio, također se na slikama 6.3.10. i 6.3.11. može vidjeti isto za struju na srednjenaponskom dijelu mreže.

6.4. Udar vjetra

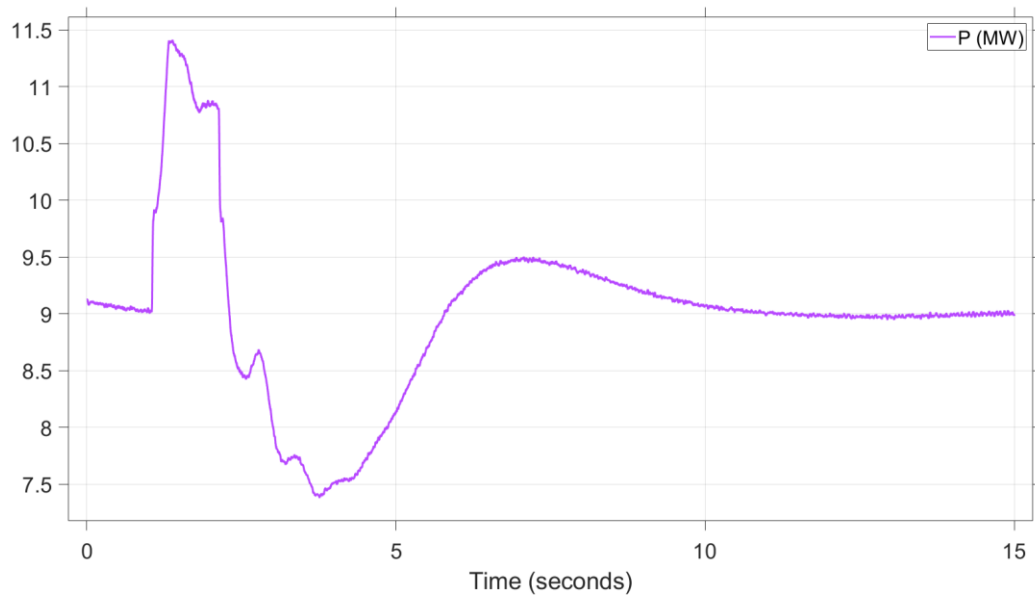
U pokusu simulira se nagli udar vjetar. U početku brzina vjetra iznosi 15 m/s, a nakon jedne sekunde dolazi do kratkotrajnog udara vjetra kojem brzina iznosi 20 m/s koji završava nakon jedne sekunde te se brzina smanjuje ponovo na 15 m/s. Dosadašnja tri slučaja su bili utjecaj mreže na dvostruko napajani asinkroni generator, a ovaj puta će se promatrati njegov utjecaj na napon i struju niskonaponske i srednje naponske razine mreže.

Tablica 6.1.1. Parametri trofaznog izmjeničnog naponskog izvora

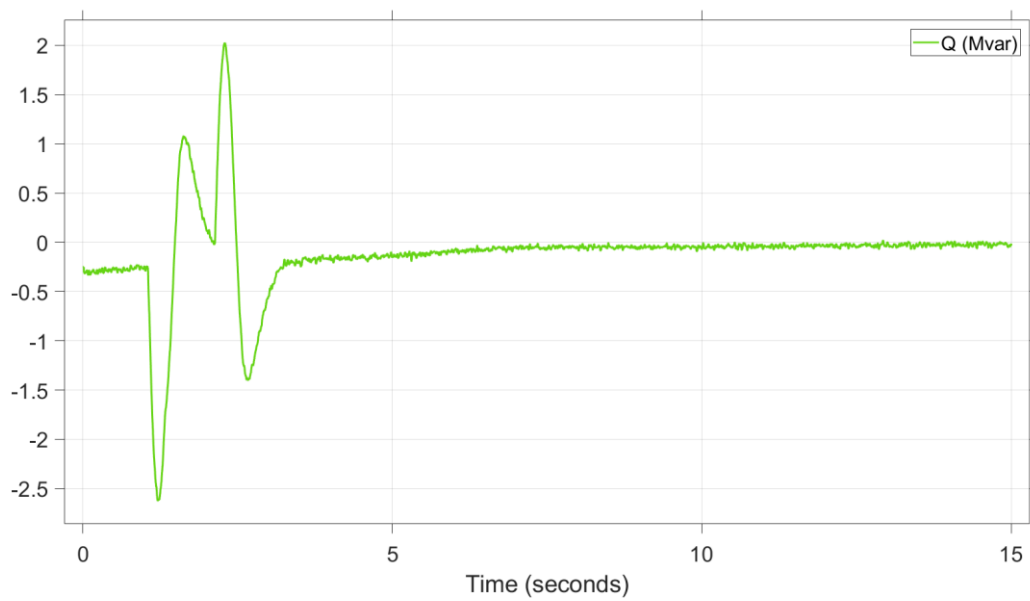
Varijacija vremena	Amplituda		
Vrsta varijacije	Brzina vjetra		
Brzina vjetra [m/s]	15	20	15
Vrijeme promjene brzine vjetra [ms]	0	1	2



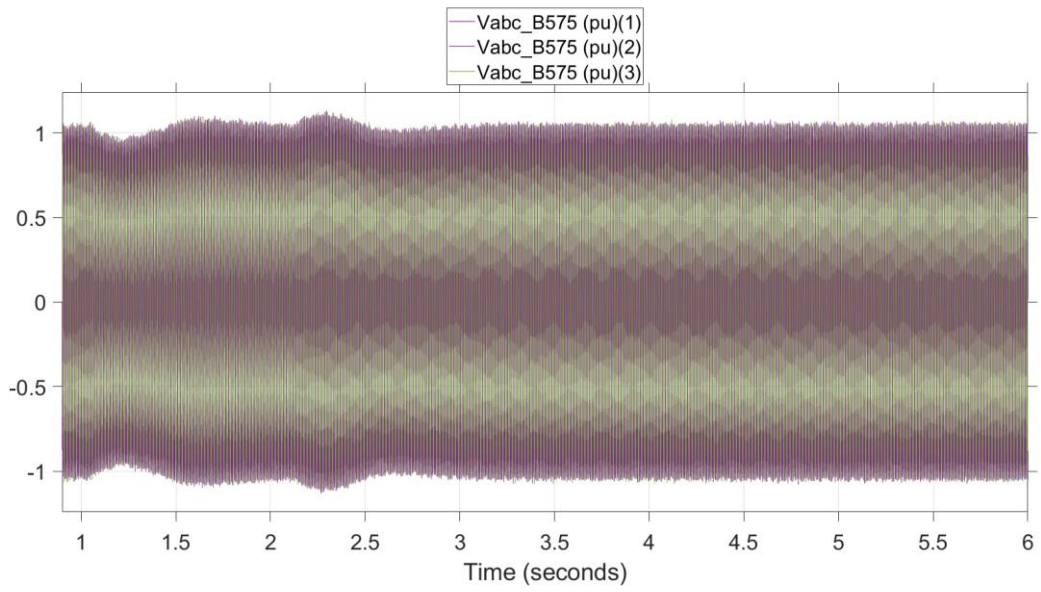
Slika 6.4.1. Kutna brzina generatora



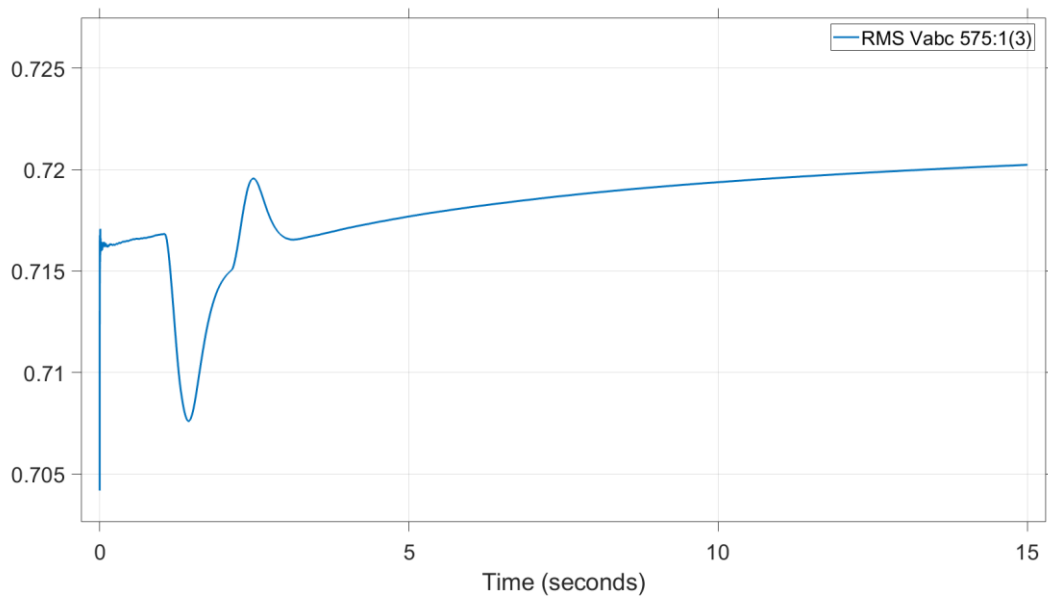
Slika 6.4.2. Djelatna snaga generatora



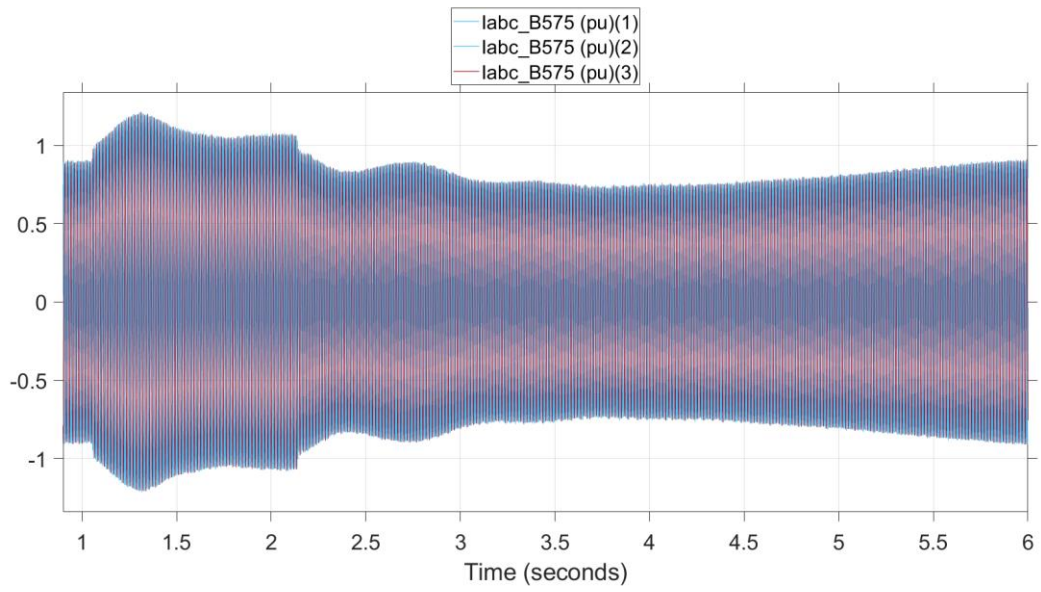
Slika 6.4.3. Jalova snaga generatora



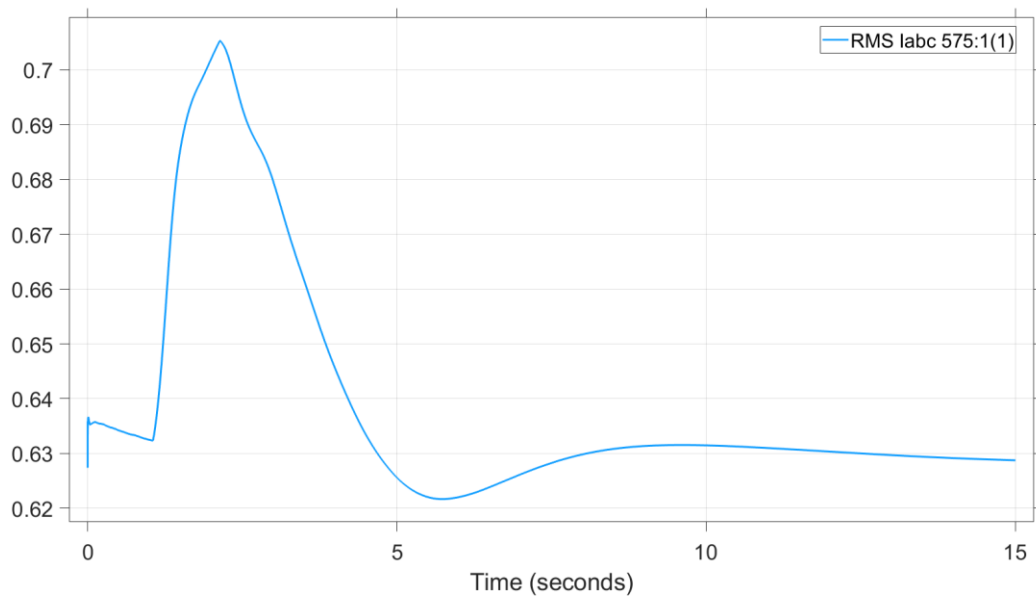
Slika 6.4.4. Trenutne vrijednosti napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



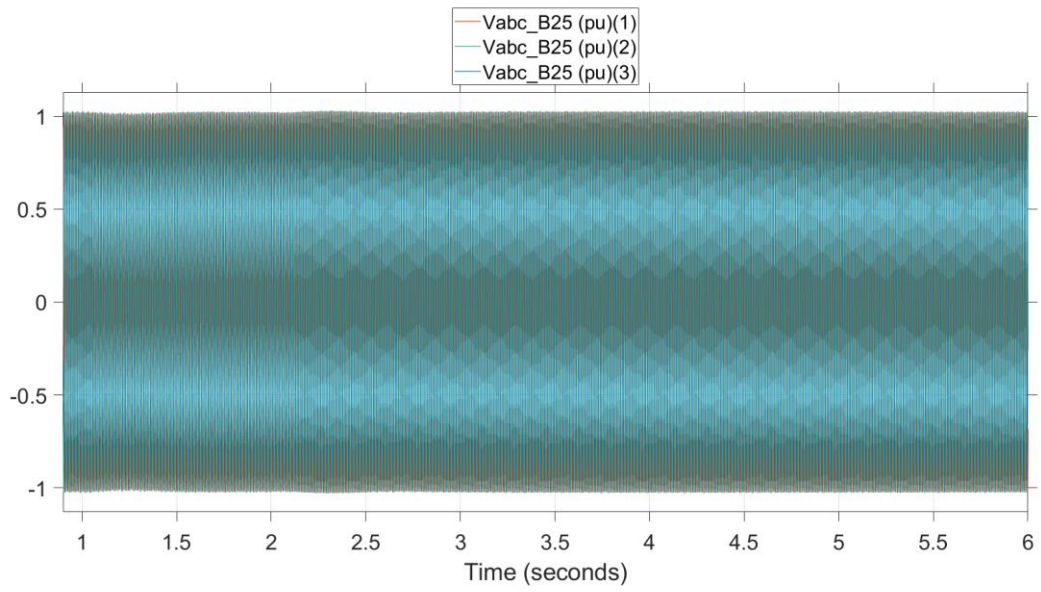
Slika 6.4.5. Efektivna vrijednost napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



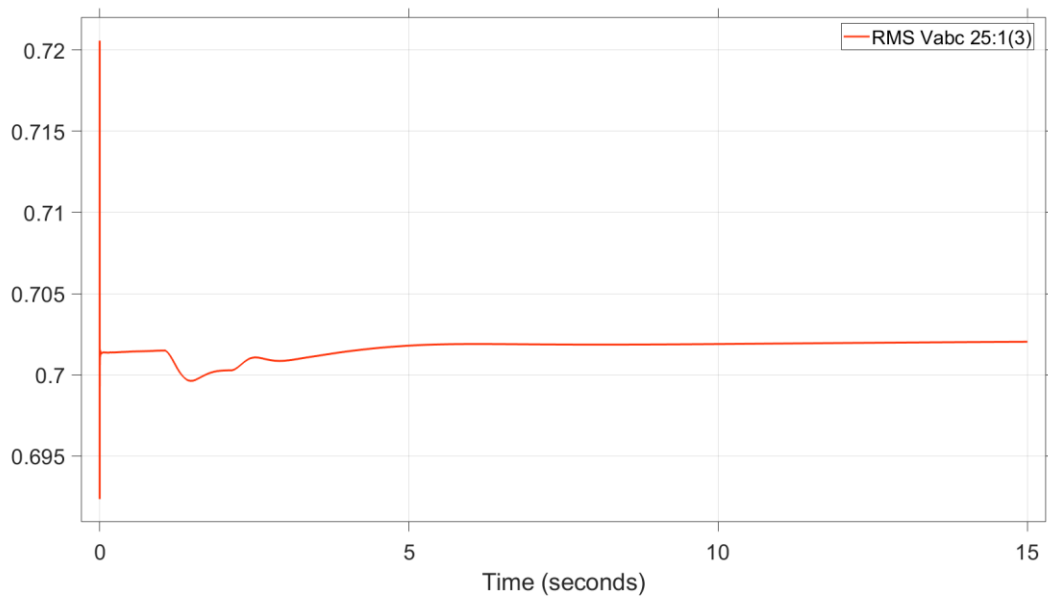
Slika 6.4.6. Trenutne vrijednosti struja niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



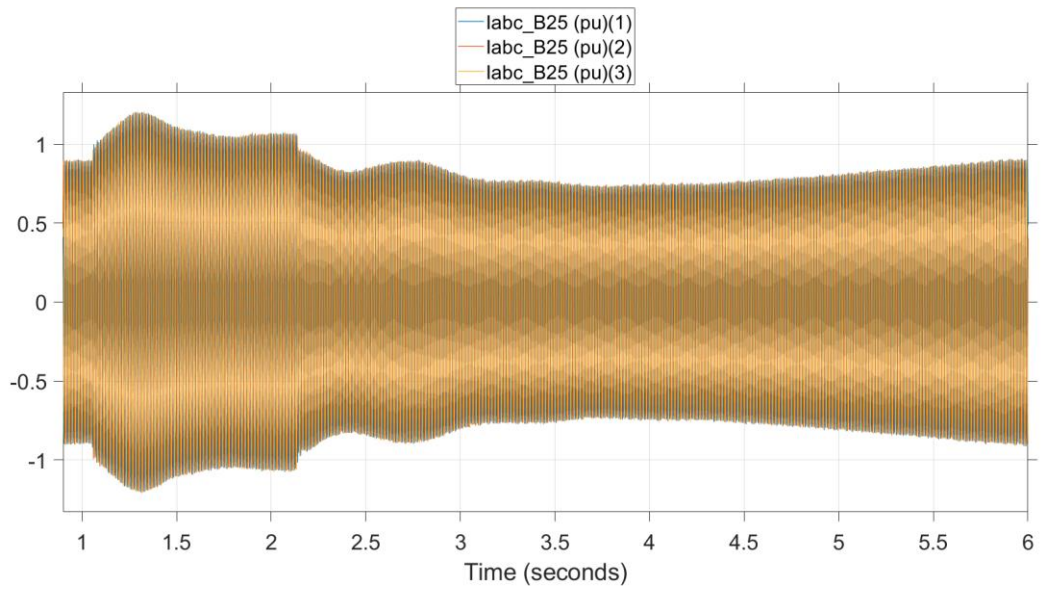
Slika 6.4.7. Efektivna vrijednost struje niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



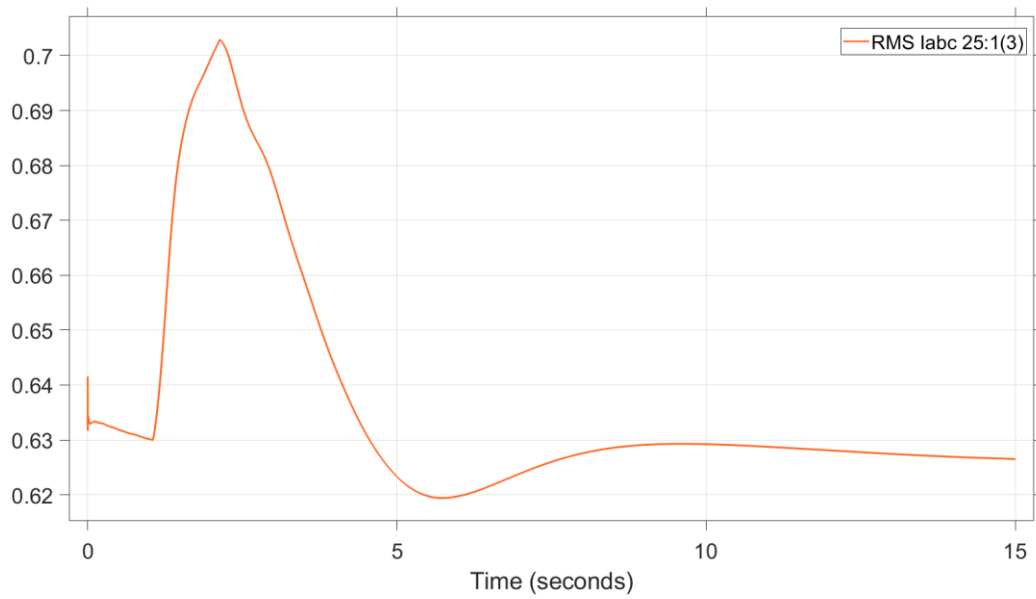
Slika 6.4.8. Trenutne vrijednosti napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.4.9. Efektivna vrijednost napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.4.10. Trenutne vrijednosti struja srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.4.11. Efektivna vrijednost struje srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže

Tijekom udara vjetra, koji je karakteriziran naglim povećanjem brzine vjetra, vjetroturbina s DFIG-om suočava se s brzim promjenama mehaničke ulazne snage. Na slici 6.4.1. vidljivo je da naglim povećanjem brzine vjetra povećava i kutna brzina generatora koja iznosi 1250 okr/min, time se povećala i djelatna snaga predana u mrežu. DFIG mora brzo prilagoditi svoj rad kako bi održao stabilnost, optimizirao izlaznu snagu i zaštitio i turbinu i mrežu od negativnih učinaka. Budući da je izlazna snaga vjetroturbine proporcionalna kubiku brzine vjetra, čak i malo povećanje brzine vjetra može dovesti do značajnog povećanja snage. Sustav kontrole nagiba je primarni mehanizam za ograničavanje snage tijekom udara vjetra. Podešava kut lopatica kako bi regulirao količinu uhvaćene energije vjetra. Pretvarač na strani rotora kontrolira struju rotora kako bi regulirao djelatnu snagu koja se dovodi u mrežu. Pretvarač na strani mreže upravlja protokom snage iz DFIG-a u mrežu, osiguravajući da turbina isporučuje odgovarajuću količinu djelatne snage bez preopterećenja sustava. Na slici 6.4.2. može se vidjeti kako DFIG smanjuje djelatnu snagu kako bi se prilagodio uvjetima mreže.

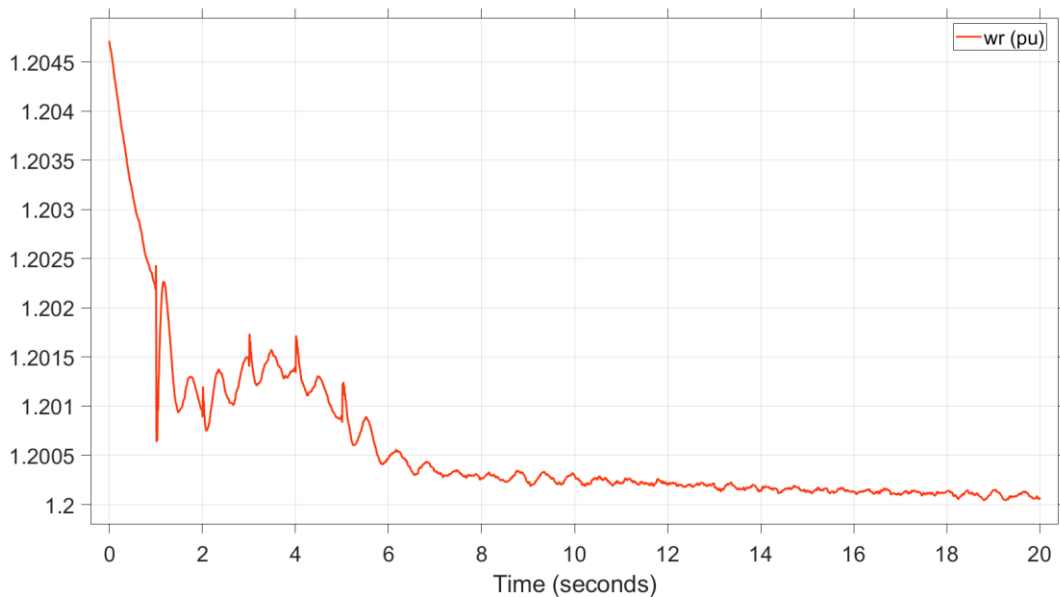
U nekim slučajevima kao što je ovaj, turbina može raditi u rasterećenom načinu rada (ispod maksimalnog kapaciteta) tijekom udara vjetra, posebno kada uvjeti mreže ili mehanička ograničenja zahtijevaju ograničenje izlazne snage. Sustav DFIG također upravlja jalovom snagom tijekom udara vjetra kako bi se održala stabilnost napona na točki priključka na mrežu. Ovo je važno za mrežne operatere, posebno u scenarijima visoke penetracije energije vjetra. Pretvarač na strani mreže može prilagoditi jalovu snagu ubrizganu ili apsorbiranu iz mreže, pomažući u reguliranju razina napona čak i kada djelatna izlazna snaga varira zbog udara vjetra što je vidljivo na slici 6.4.3. Na slikama 6.4.4.-6.4.7. vidljivo je da naglim povećanjem predane snage u mreži dolazi do poremećaja iznosa struje i napona niskonaponskog dijela mreže, što je također razlog za potrebnu regulaciju izlazne djelatne i jalove snage vjetroelektrane. Na slikama 6.4.8. – 6.4.11. vidljivo je da malo povećanje izlazne snage vjetroelektrane ne utječe na iznos napona i struje srednjenaponskog dijela mreže.

6.5. Prenapon u mreži

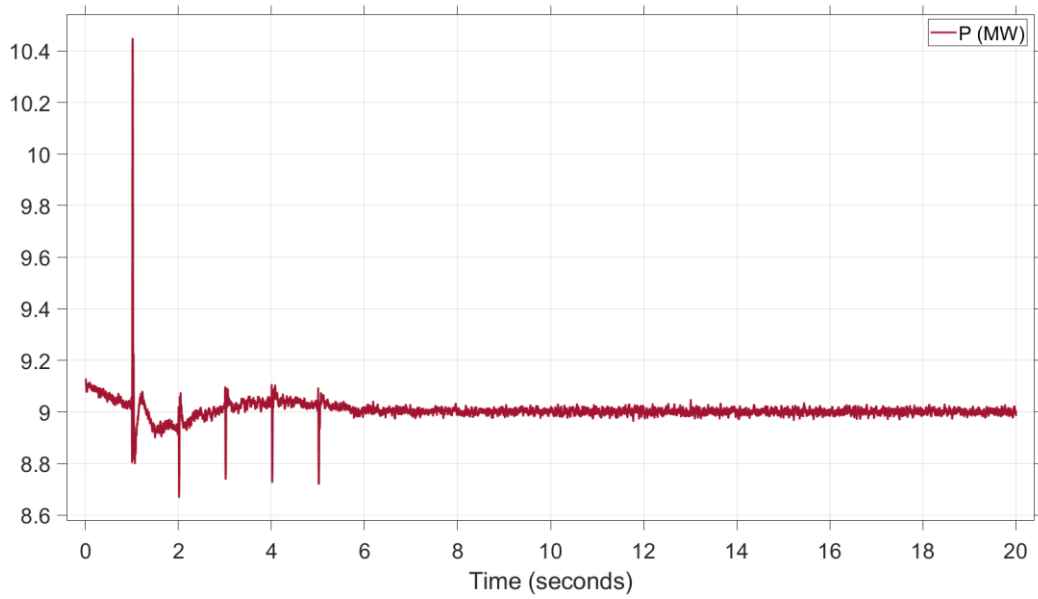
Prenaponski uvjeti u mreži mogu se pojaviti zbog nekoliko razloga, kao što su iznenadni gubitak opterećenja, isključenje opreme koja troši veliku energiju, udara groma ili kvarovi u prijenosnom sustavu., simulacija prenapona je podešena u bloku izmjeničnog trofaznog naponskog izvora, koji predstavlja 120 kV dio mreže. U prvoj sekundi dolazi do naglog porasta napona mreže s 1,0 p.u. na 1.2 p.u. napon mreže u tom trenutku iznosi 144 kV. Kroz vremenski interval od 4 sekunde napon mreže 1,2 p.u. se postepeno snižava za 0,05 p.u. svaku sekundu dok napon mreže ne dostigne vrijednost 1,0 p.u.

Tablica 6.1.1. Parametri trofaznog izmjeničnog naponskog izvora

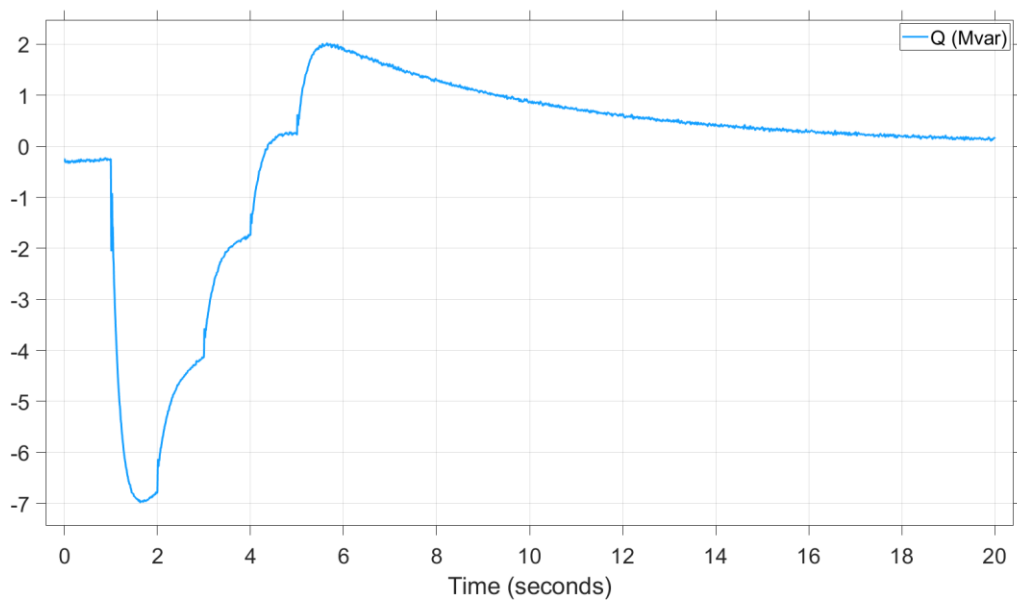
Varijacija vremena	Amplituda					
Vrsta varijacije	Parovi vremena i amplitude					
Amplituda [p.u.]	1,0	1,2	1,15	1,1	1,05	1,0
Vrijeme promjene amplitude [ms]	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0



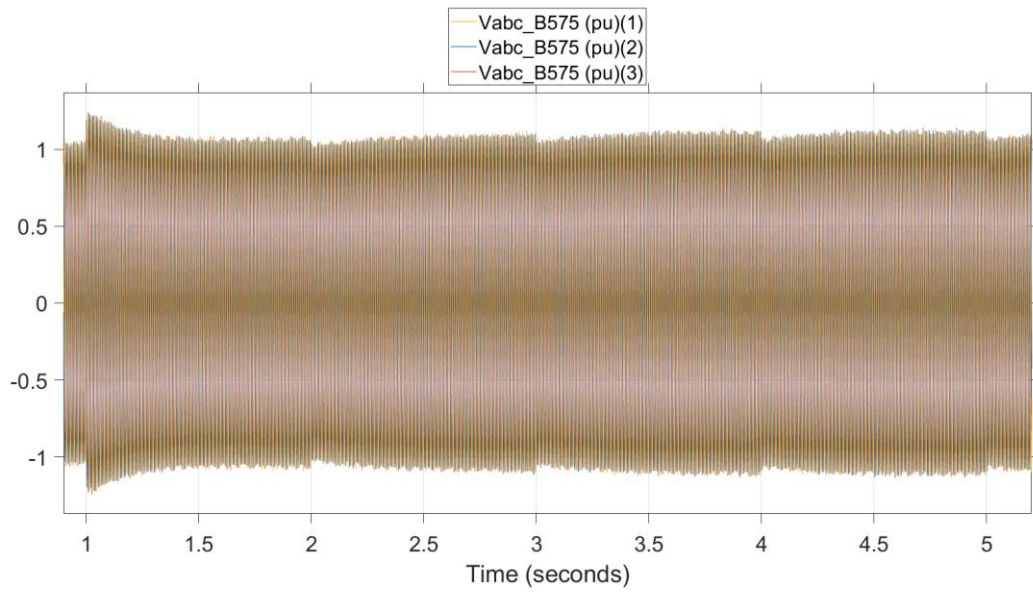
Slika 6.5.1. Kutna brzina generatora



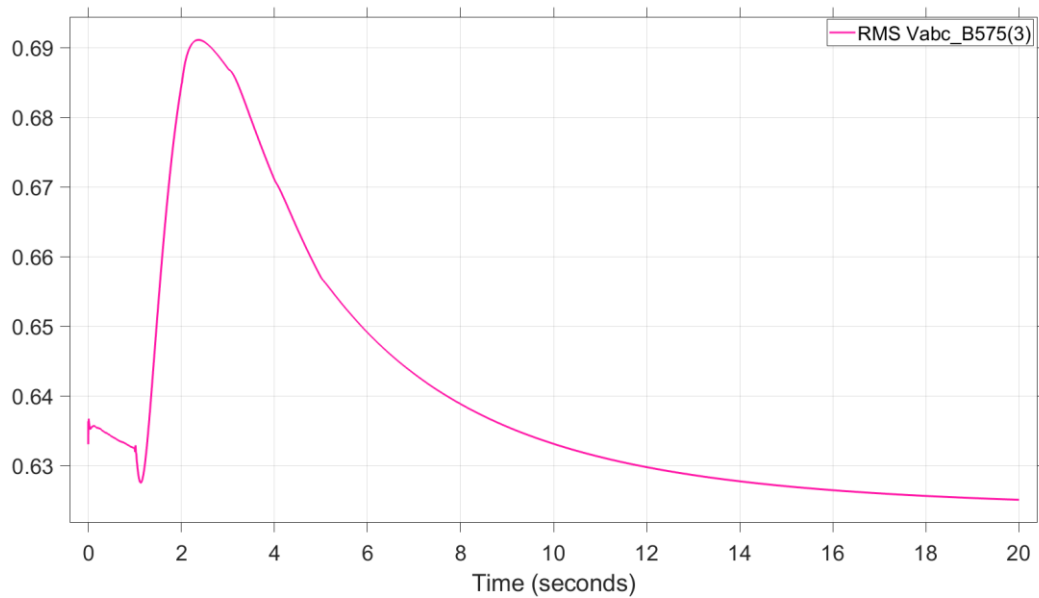
Slika 6.5.2. Djelatna snaga generatora



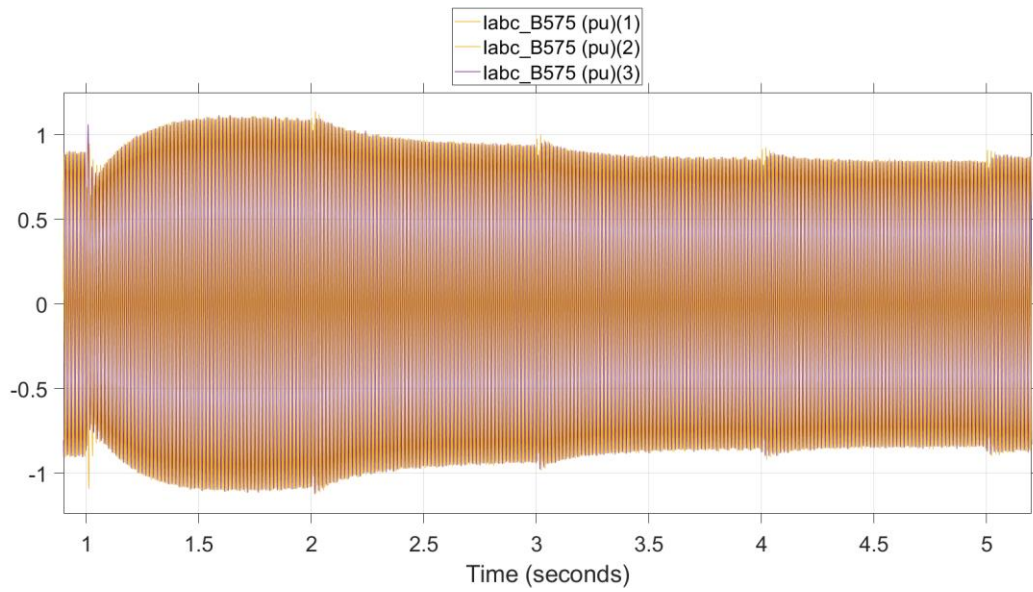
Slika 6.5.3. Jalova snaga generatora



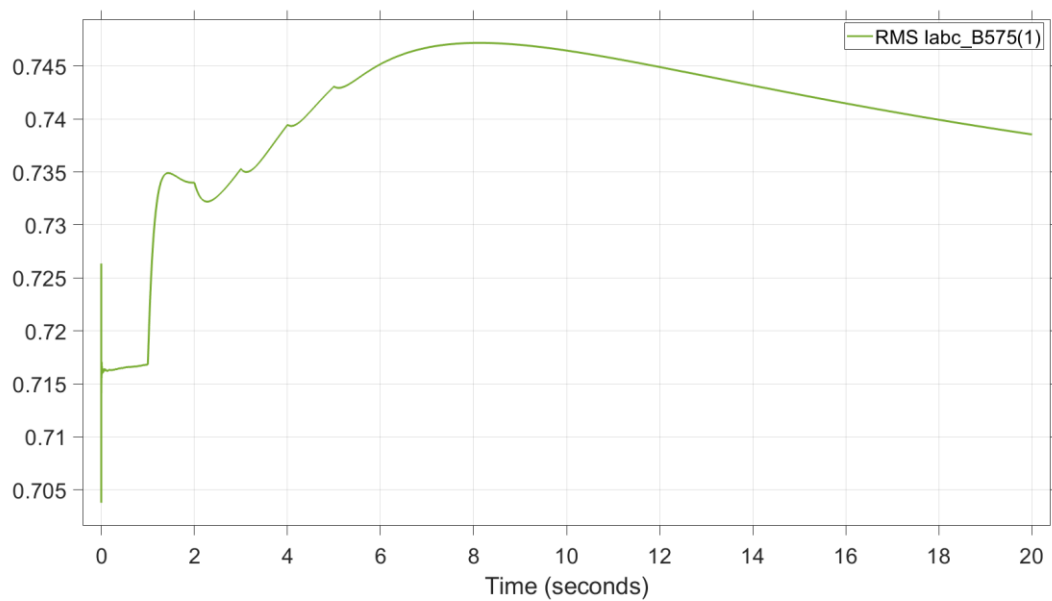
Slika 6.5.4. Trenutne vrijednosti napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



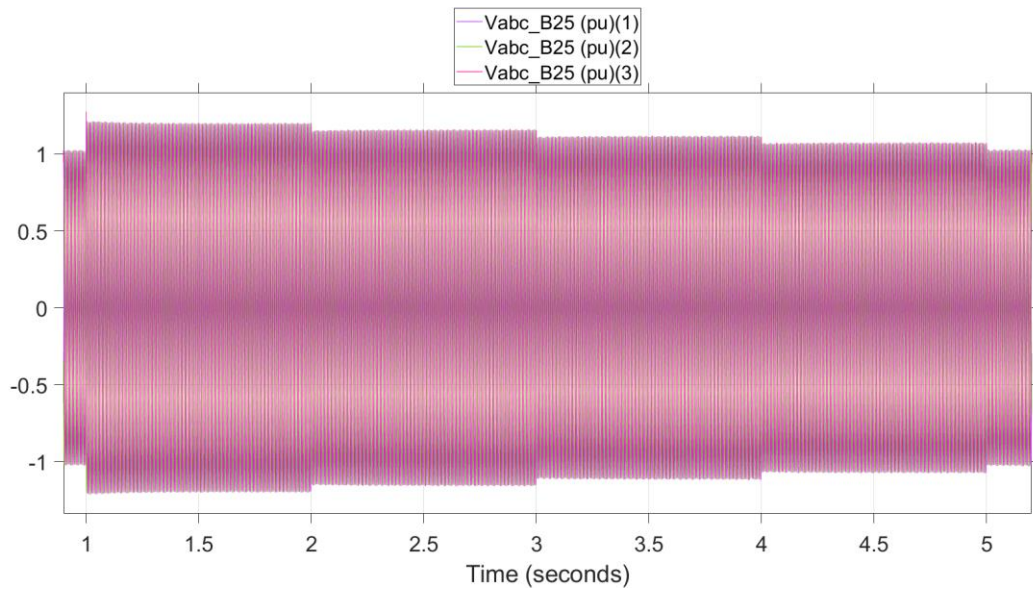
Slika 6.5.5. Efektivna vrijednost napona niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



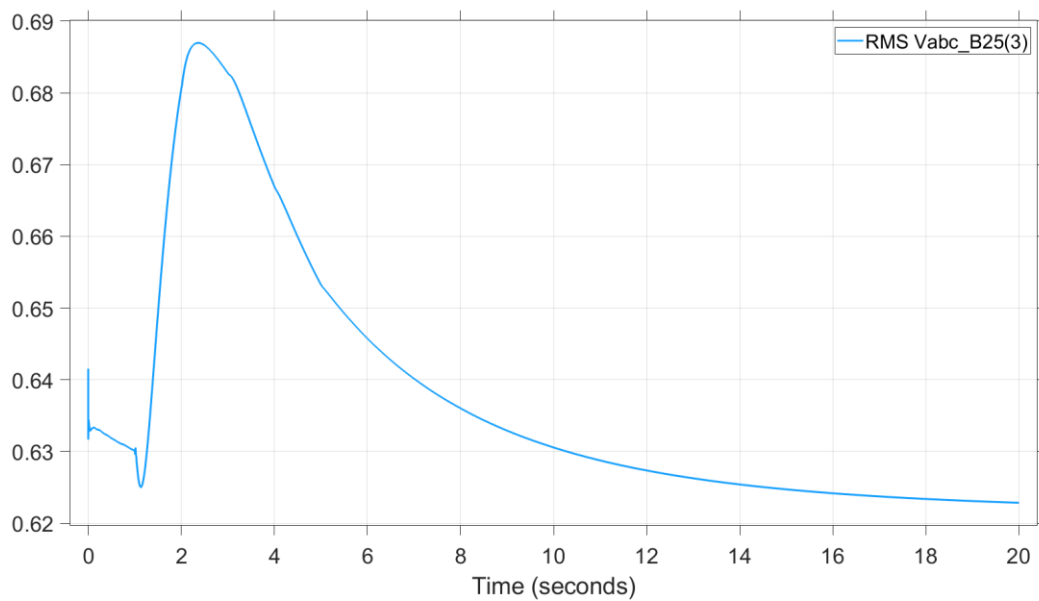
Slika 6.5.6. Trenutne vrijednosti struja niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



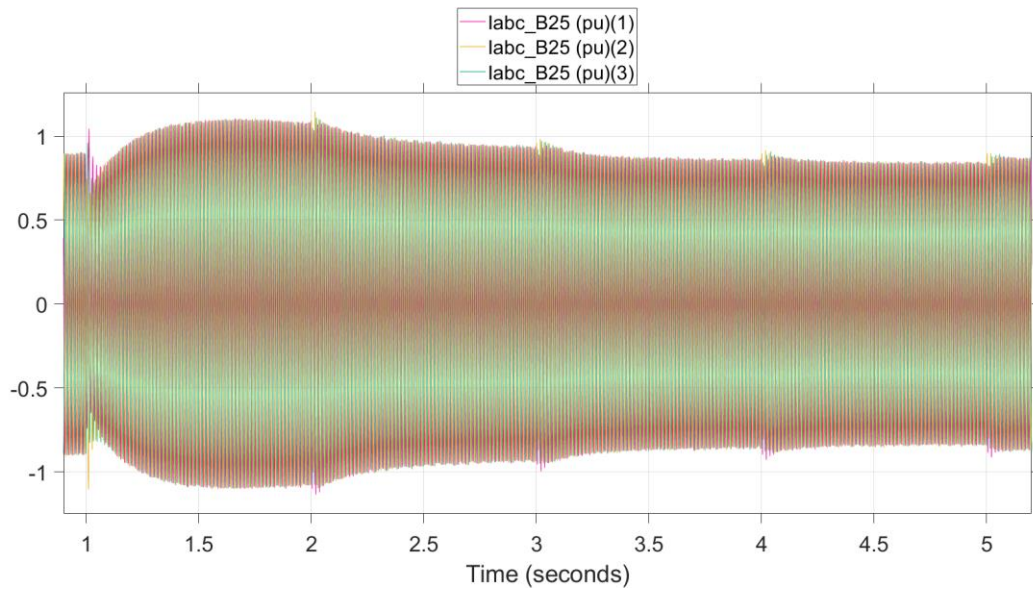
Slika 6.5.7. Efektivna vrijednost struje niskonaponskog (0,575 kV) dijela mreže



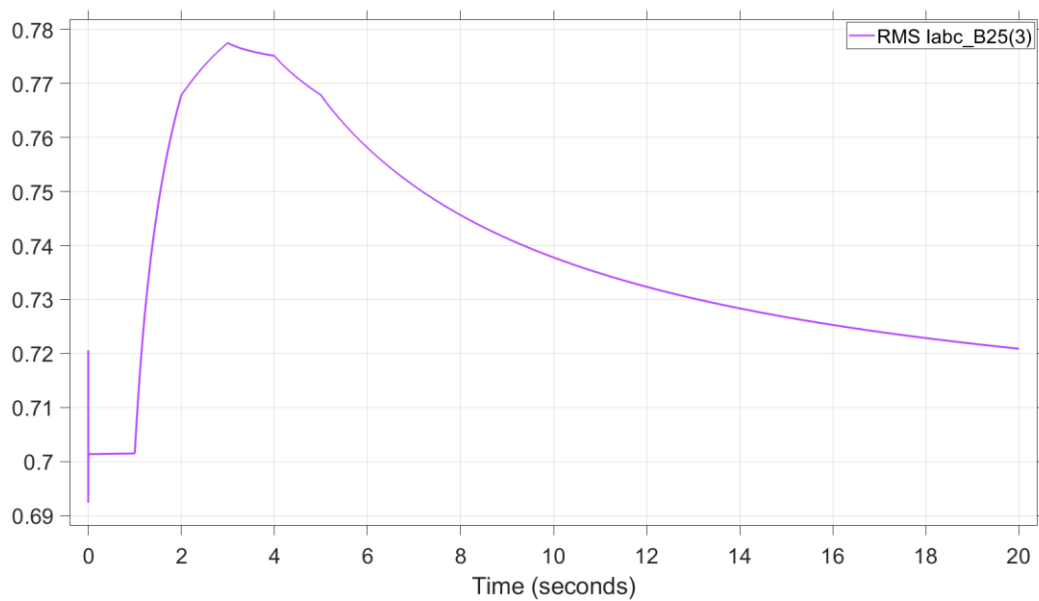
Slika 6.5.8. Trenutne vrijednosti napona srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.5.9. Efektivna vrijednost napona niskonaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.5.10. Trenutne vrijednosti struje srednjenaponskog (25 kV) dijela mreže



Slika 6.5.11. Efektivna vrijednost struje niskonaponskog (25 kV) dijela mreže

Tijekom visokonaponskih poremećaja, DFIG mora zaštititi svoje komponente, održavati stabilnost i podržavati mrežu bez isključivanja izvan mreže. Na slikama 6.5.4.- 6.5.7. mogu se uočiti promjene trenutne i efektivne vrijednosti napona i struje u srednjenaponskom dijelu. Također na slikama 6.5.8. – 6.5.11. mogu se vidjeti vrijednosti napona i struje niskonaponskog dijela mreže. Budući da je stator DFIG-a izravno spojen na mrežu, svako povećanje napona mreže izravno utječe na napon statora. Povećana struja statora može opteretiti namote statora i izolaciju generatora ako nije ispravno kontrolirana. Prenapon u statoru također inducira viši napon u krugu rotora, što dovodi do potencijalnih prekomjernih struja u rotoru. Prenapon nije imao velik učinak na kutnu brzinu generatora vjetroelektrane što je vidljivo na slici 6.5.1. Tijekom prenapona u mreži događaja, DFIG vjetroturbina mora prilagoditi svoju izlaznu snagu kako bi pomogla u stabilizaciji mreže i izbjegla daljnju nestabilnost napona. Tipično, od turbine će se tražiti da ograniči svoju proizvodnju djelatne snage dok generator povećava apsorpciju jalove snage kako bi se napon vratio na normalne razine. Na slici 6.5.2. može se uočiti kako DFIG smanjuje djelatnu snagu predanu u mrežu svaki puta kada dođe do promjene vrijednosti napona u mreži. Pretvarač na strani mreže može ubaciti ili apsorbirati jalovu snagu. U uvjetima visokog napona, pretvarač radi na apsorpiranju jalove snage iz mreže, podržavajući kontrolu napona. Nakon što se stanje prenapona ukloni i napon mreže se vrati na normalu Na slici 6.5.3. može se vidjeti da je apsorbirana jalova snaga iz mreže.

DFIG-ovi su opremljeni *crowbar* zaštitom koja se aktiviraju tijekom kvarova, uključujući situacije prenapona. Ako napon postane previsok, *crowbar* zaštita zaobilazi pretvarač na strani rotora kako bi ga zaštitio od prekomjernih struja. Ovo privremeno pretvara DFIG u jednostavan kavezni asinkroni generator, smanjujući njegovu sposobnost kontrole jalove snage i sudjelovanja u podršci mreži. U uvjetima ekstremnog prenapona, DFIG se može odvojiti od mreže kako bi se spriječilo oštećenje opreme. Mrežna pravila često određuju raspon napona unutar kojeg generator mora ostati spojen i kada se može isključiti radi sigurnosti.

7. ZAKLJUČAK

Tehnologija dvostruko napajanog asinkronog generatora (DFIG) ključna je u unaprjeđenju performansi i pouzdanosti modernih vjetroturbina, posebno kada zahtjevi mrežnih operatera nalažu da moraju izdržati uvjete prolaza niskog napona (LVRT) i visokog napona (HVRT). Ova sposobnost je ključna za osiguravanje da vjetroturbine mogu održavati rad i podržavati mrežu tijekom poremećaja napona, značajno pridonoseći stabilnosti i oporavku mreže.

DFIG-ovi pružaju kritičnu podršku tijekom padova i skokova napona, pomažući da se elektroenergetska mreža brže oporavi od smetnji. To se postiže njihovim robusnim sustavima upravljanja, koji omogućuju nastavak napajanja i stabilnost mreže čak i u nepovoljnim uvjetima. Sposobnost DFIG-ova da neovisno kontroliraju i djelatnu i jalovu snagu povećava njihovu fleksibilnost u upravljanju i stabilizaciji mreže. To rezultira poboljšanom kvalitetom električne energije i sposobnošću dinamičkog odgovora na zahtjeve mreže. Vjetroturbine opremljene DFIG-om učinkovite su u širokom rasponu brzina vjetra, optimizirajući hvatanje i pretvorbu energije. Ova učinkovitost doprinosi većoj ukupnoj proizvodnji energije i boljem iskorištavanju resursa vjetra. U usporedbi s drugim tehnologijama, DFIG-ovi nude troškovno učinkovito rješenje zbog svog jednostavnijeg dizajna i nižih kapitalnih troškova. Ova pristupačnost, u kombinaciji s njihovim visokim performansama, čini ih atraktivnom opcijom za vjetroelektrane. DFIG-ovi također olakšavaju odgovarajući pristup različitim zahtjevima mreže, prilagođavajući se promjenama u zahtjevima za napajanjem i podržavajući pouzdanost mreže. Ova prilagodljivost ključna je za integraciju obnovljivih izvora energije i osiguranje stabilne opskrbe energijom.

8. LITERATURA

- [1] Zakiud Din, Jianzhong Zhang, Zheng Xu, Yaqian Zhang, Jin Zhao, Low voltage and high voltage ride-through technologies for doubly fed induction generator system: Comprehensive review and future trends, datum objave: 28 siječanj 2021, <https://doi.org/10.1049/rpg2.12047>.
- [2] Tarek Kandil School of Engineering and Technology, Western Carolina University, Cullowhee, Investigation of the Impact of Fault Characteristics on the Cost-Effectiveness of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Systems in Withstanding Low-Voltage Ride-Through, 2024, <https://doi.org/10.3390/su16135812>
- [3] Philippe De Rua, Özgür Can Sakinci, Jef Beerten, Comparative Study of Dynamic Phasor and Harmonic State-Space Modeling for Small-Signal Stability Analysis, *Electric Power Systems Research*, godina 2020., <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106626>.
- [4] Abrar Ahmed Chhipa, Prashun Chakrabarti, Vadim Bolshev, Tulika Chakrabarti, Gennady Samari, Alexey N. Vasilyev, Sandeep Ghosh and Alexander Kudryavtsev, Modeling and Control Strategy of Wind Energy Conversion System with Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator, *Energies* 2022, 15(18), <https://doi.org/10.3390/en15186694>
- [5] Sugiarto Kadiman, Oni Yuliani, Comparison performance study of singly-fed and doubly-fed induction generators-based bond-graph wind turbines model, *kolovoz* 2024, doi:10.11591/ijece.v14i4.pp3592-3606
- [6] Simonetti, D. S. L., Amorim, A. E. A., & Oliveira, F. D. C. (2018). Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, str. 461–490, doi:10.1016/b978-0-12-812959-3.00015-0
- [7] Zin AABM, Pesaran MHA, Khairuddin AB, Jahanshaloo L, Shariati O. An overview on doubly fed induction generators controls and contributions to wind based electricity generation. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;27:692– 708. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.010>. URL (<http://www.science direct.com/science/article/pii/S1364032113004553>).
- [8] H.T. Jadhav, R. Roy. A critical review on the grid integration issues of DFIG based wind farms. In: *Proceedings of the 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*; 2011. str. 1–4
- [9] Junyent-Ferré A, Gomis-Bellmunt O, Sumper A, Sala M, Mata M. Modeling and control of the doubly fed induction generator wind turbine, [Oct]. *Simul Model Pract Theory* 2010;18(9):1365–81, [Oct].
- [10] Rahimi M, Parniani M. Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines – The influence of rotor and speed controller parameters, [Jun.]. *Int J Electr Power Energy Syst* 2010;32(5):464–77, [Jun.]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.09.017>

- [11] By the staff of Festo Didactic, Electricity and New Energy, Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG), Courseware Sample, 86376-F0, Festo Didactic Ltée/Ltd, Quebec, Kanada 2011, 07.2015. str. 37-44
- [12] Mostafa, M.A., El-Hay, E.A. & Elkholy, M.M. Optimal low voltage ride through of wind turbine doubly fed induction generator based on bonobo optimization algorithm. *Sci Rep* 13, 7778 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34240-6>
- [13] <https://cdn.britannica.com/48/121648-050-562F03B0/Components-wind-turbine.jpg>
- [14] Niteesh Sonker, Soumya Ranjan Das, Laxman Mohapatro, Department of electrical engineering National Institute of Technology Rourkela Odisha, Modeling and simulation of doubly-fed induction generator connected with wind turbine
- [15] HEP-Operator distribucijskog sustava, definicija pojma mrežna pravila, datum objave: 21. kolovoz 2018.
- [16] M. Abdelateef Mostafa, Enas A. El-Hay, Mahmoud M. Elkholy, An overview and case study of recent low voltage ride through methods for wind energy conversion system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113521>.
- [17] Koji Onishi, Yingxiao Li, Kenta Koiwa, Fang Liu, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Analysis on the operation of crowbar in doubly fed induction generators, *Electric Power Systems Research*, Volume 215, Dio A, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108950>
- [18] D. W. Xiang, L. Ran, P. J. Tavner, S. C. Yang, "Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(3): 652-662.
- [19] Erhab Youssef, Adel Sharaf, Amr Amin, Adel El Samhey, Chapter 14 - Wind Energy FACTS Applications and Stabilization Schemes, Editor(s): Imene Yahyaoui, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Elsevier, 2018, str. 431-460, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00014-9>.
- [20] Ali Darvish Falehi, Mansour Rafiee, LVRT/HVRT capability enhancement of DFIG wind turbine using optimal design and control of novel PI λ D μ -AMLI based DVR, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2018, Str. 111-125, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.06.001>

[21] Peilin Liu, Guofang Zhu, Lei Ding, Xuesong Gao, Chunjiang Jia, Chong Ng, V. Terzija, High-voltage ride-through strategy for wind turbine with fully-rated converter based on current operating range, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108101>.

[22] [Wind Farm - Doubly-Fed Induction Generator \(DFIG\) - MATLAB & Simulink \(mathworks.com\)](#)

9. SAŽETAK

Rad se usredotočuje se na asinkrone generatore s dvostrukim napajanjem (DFIG), koji se široko koriste u vjetroturbinama za proizvodnju električne energije. Raspravlja se o izazovima koje nameće integracija energije vjetra u elektroenergetske mreže, kao što su stabilnost mreže, niska inercija i podrška naponu. DFIG-ovi pomažu u rješavanju ovih izazova radeći i pri podsinkronim i nadsinkronim brzinama, pridonoseći kontroli napona i frekvencije tijekom poremećaja mreže. Objasnjeni su principi rada DFIG-a, s naglaskom na njihovu sposobnost generiranja napona konstantne frekvencije unatoč promjenjivim brzinama rotora. DFIG-ovi su u prednosti u odnosu na tradicionalne sinkrone generatore zbog svoje sposobnosti upravljanja i djelatnom i jalovom snagom, što ih čini idealnim za aplikacije vjetroturbina. Također se ističe njihovu učinkovitost u upravljanju promjenjivim brzinama vjetra i smanjenju mehaničkog naprezanja. Značajan dio rada posvećen je povezivanju s mrežom i mogućnostima prolaska kroz kvar u mreži (FRT, engl. *fault ride-through*), objašnjavajući kako DFIG-ovi ostaju operativni tijekom kvarova na mreži, kao što su padovi ili udari napona, pridonoseći stabilnosti i oporavku mreže. Razmatraju se zaštitne mjere i strategije upravljanja uključene u prolaz niskog napona (LVRT, engl. *low voltage ride through*) i prolaz visokog napona (HVRT, engl. *high voltage ride through*). Rad također uključuje odjeljak o modeliranju i simulaciji DFIG-ova i vjetroturbina, koristeći MATLAB za simulaciju kratkih spojeva, pada frekvencije, prenapona i udara vjetra. Ove simulacije pokazuju stabilan rad i sinkronizaciju DFIG-ova u izazovnim uvjetima. Zaključno, studija naglašava učinkovitost i važnost DFIG-ova u proizvodnji energije vjetra, posebno u poboljšanju stabilnosti mreže i optimizaciji ekstrakcije energije iz vjetra.

Ključne riječi: Asinkroni generator s dvostrukim napajanjem (DFIG), Regulacija DFIG, Mrežna stabilnost, Vjetroturbine.

10. ABSTRACT

The study focuses on doubly fed asynchronous generators (DFIGs), which are widely used in wind turbines to produce electricity. The challenges posed by the integration of wind energy into power grids, such as grid stability, low inertia and voltage support, are discussed. DFIGs help solve these challenges by operating at both subsynchronous and supersynchronous speeds, contributing to voltage and frequency control during grid disturbances. The operating principles of DFIGs are explained, with emphasis on their ability to generate constant frequency voltages despite varying rotor speeds. DFIGs have an advantage over traditional synchronous generators due to their ability to handle both active and reactive power, making them ideal for wind turbine applications. Their effectiveness in managing variable wind speeds and reducing mechanical stress is also highlighted. A significant part of the paper is devoted to grid connection and fault ride-through (FRT) capabilities, explaining how DFIGs remain operational during grid failures, such as voltage dips or surges, contributing to grid recovery. . Safeguards and control strategies involved in low voltage ride through (LVRT) and high voltage ride through (HVRT) are discussed. The paper also includes a section on modeling and simulation of DFIGs and wind turbines, using MATLAB to simulate short circuits, frequency drops, surges and wind gusts. These simulations demonstrate the stable operation and synchronization of DFIGs under challenging conditions. In conclusion, the study highlights the effectiveness and importance of DFIGs in wind energy generation, especially in improving grid stability and optimizing wind energy extraction.

Keywords: Doubly fed asynchronous generator (DFIG), DFIG regulation, Grid stability, Windturbines.