

ЗДРУЖЕНИЕ НА ЕНЕРГЕТИЧАРИТЕ НА  
МАКЕДОНИЈА  
MACEDONIAN ENERGY ASSOCIATION



МЕЃУНАРОДНО СОВЕТУВАЊЕ  
INTERNATIONAL SYMPOSIUM

ЗДРУЖЕНИЕ НА ЕНЕРГЕТИЧАРИТЕ  
НА МАКЕДОНИЈА

MACEDONIAN ENERGY  
ASSOCIATION



МЕЃУНАРОДНО СОВЕТУВАЊЕ  
“ЕНЕРГЕТИКА 2016”



INTERNATIONAL SYMPOSIUM  
“ENERGETICS 2016”

Зборник на реферати - книга 1  
Symposium proceeding - Book 1

Охрид, хотели Метропол-Белви  
06-08 Октомври, 2016



Ohrid, hotels Metropol-Belvi  
06 - 08 October, 2016

**ЗДРУЖЕНИЕ НА ЕНЕРГЕТИЧАРИТЕ  
НА МАКЕДОНИЈА**



**MACEDONIAN ENERGY  
ASSOCIATION**

**МЕЃУНАРОДНО СОВЕТУВАЊЕ  
“ЕНЕРГЕТИКА 2016”**

**INTERNATIONAL SYMPOSIUM  
“ENERGETICS 2016”**

Зборник на реферати - **Книга 1**  
Symposium proceeding - **Book 1**

**ОХРИД**  
**ХОТЕЛ, Метропол**  
*06 - 08, октомври, 2016*

**ОHRID**  
**HOTEL Metropol**  
*06 - 08, oktober, 2016*



**Советување: МЕЃУНАРОДНО СОВЕТУВАЊЕ "ЕНЕРГЕТИКА 2016"**

**Организација: ЗДРУЖЕНИЕ НА ЕНЕРГЕТИЧАРИТЕ  
НА МАКЕДОНИЈА**

*Главен уредник:*

**Зоран БОЖИНКОЧЕВ**

*Технички уредник:*

**Зоран БОЖИНКОЧЕВ**

CIP - Каталогизација во публикација  
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски",  
Скопје

620.9(062)

МЕЃУНАРОДНО советување "Енергетика 2016" (2016 ; Охрид)

Зборник на реферати / Меѓународно советување "Енергетика 2016",  
Охрид , 06-08 октомври 2016 = Symposium proceedings / International  
symposium "Energetics 2016", Охрид, 06-08 october, 2016 ; [главен  
уредник Зоран Божинковчев]. - Скопје : Здружение на енергетичарите на  
Македонија ЗЕМАК = Skopje : Association of energy department  
engineers of Macedonia, 2016. - 2 св. (800 стр.) : илустр. ; 24 см

Дел од трудовите на англ. јазик. - Библиографија кон одделни трудови

ISBN 978 608-4764-02-1 (кн. 1)

ISBN 978-608-4764-03-8 (кн. 2)

I. International symposium "Energetics 2016" (2016 ; Охрид) види

Меѓународно советување "Енергетика 2016" (2016 ; Охрид)

а) Енергетика - Собири

COBISS.MK-ID 97061386

Печати: "2-ри Август" - Штип

## ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР

**Иван Куковски,** *Претседател*  
**Зоран Божинковец,** *Потпретседатели:*  
**Драган Мијалковски**

### Членови

Д-р Ристо Јаневски,  
М-р Дарко Илиевски, Георги Велевски,  
Игор Шешо

## ПРОГРАМСКИ ОДБОР

**Проф. д-р Вангел Фуштиќ,** *Претседател*

**Проф. д-р Славе Арменски,** *Потпретседатели:*  
**Проф. д-р Атанас Илиев**

### Членови

Академик Глигор Каневче  
Академик Љупчо Коцарев  
Д-р Димитар Хаџимишев  
Д-р Ристо Јаневски  
Проф. д-р Миле Станковски  
Проф. д-р Зоран Панов  
Проф. д-р Атанас Кочов  
Проф. д-р Милорад Јовановски  
Д-р Иван Чорбев  
Проф. д-р Весна Ангеловска  
Проф. д-р Антон Чаушевски  
Проф. д-р Влашко Стоилков  
Проф. д-р Софија Н. Поцева  
Раде Карангелески  
Дончо Коевски  
Проф. д-р Доне Ташевски  
Проф. д-р Илија Петровски  
Проф. д-р Сотир Пановски  
Проф. д-р Константин Димитров  
Проф. д-р Љупчо Петковски  
М-р Александар Пауновски  
Д-р Игор Гиевски  
Д-р Георги Качурков  
Проф. д-р Зоран Марков  
Благој Деспотовски  
Ацо Антевски  
Проф. д-р Влатко Чингоски  
Проф. д-р Благој Делипетров  
Проф. д-р Славчо Алексовски  
Проф. д-р Ристо Филкоски  
Проф. д-р Предраг Поповски

Проф. д-р Сања Василевска  
Проф. д-р Иле Цветановски  
М-р Синиша Спасов  
Проф. д-р Игор Неделковски  
Д-р Андреја Волкановски  
Проф. д-р Васка Атанасова  
Проф. д-р Љупчо Димитриевиќ  
Ацо Ристевски  
М-р Роберт Робески  
М-р Магдалена Т. Трпевска  
М-р Божин Стојчевски  
Димитар Петров  
М-р Даниела Младеновска  
М-р Субија Изеироски  
М-р Дарко Митровски  
Д-р Радомир Цветановски  
Иван Бановски  
Ивица Димовски  
Сашо Николчов  
Газменд Фетахи  
Мирко Стојановски  
Невенка Ј. Филиповска  
Љупчо Гаштеовски  
Миле Шошевски  
Татјана Илиевска  
Климент Наумовски  
Пеце Муртановски  
Димитар Кочовски

## ORGANIZING BOARD

**Dragan Mijalkovski,** *Chairman*  
**Zoran Bozhinkochev,** *Vice Chairmans:*  
**Dragan Mijalkovski**

### Members

D-r Risto Janevski,  
M-p Darko Ilievski,  
Georgi Velevski, Igor Shesho,

## PROGRAMME BOARD

**Prof. d-r Vangel Fustik,** *Chairman*

**Prof. d-r Slave Armenski,** *Vice Chairmens:*  
**Prof. d-r Atanas Iliev**

### Members

Akad. Gligor Kanevce  
Akad. Ljupco Kocarev  
D-r Dimitar Hadjimisev  
D-r Risto Janevski  
Prof. d-r Mile Stankovski  
Prof. d-r Zoran Panov  
Prof. d-r Atanas Kocov  
Prof. d-r Milorad Jovanovski  
D-r Ivan Chorbev  
Prof. d-r Vesna Angelovska  
Prof. d-r Anton Chaushevski  
Prof. d-r Vlatko Stoilkov  
Prof. d-r Sofija N. Poceva  
Rade Karangeleski  
Donco Koevski  
Prof. d-r Done Tasevski  
Prof. d-r Ilija Petrovski  
Prof. d-r Sotir Panovski  
Prof. d-r Konstantin Dimitrov  
Prof. d-r Ljupco Petkovski  
M-r Aleksandar Paunoski  
D-r Igor Gievski  
D-Georgi Kachurkov  
Prof. d-r Zoran Markov  
Blagoj Despotovski  
Ace Antevski  
Prof. d-r Vlatko Cingoski  
Prof. d-r Blagoj Delipetrov  
Prof. d-r Slavco Aleksovski  
Prof. d-r Risto Filkoski  
Prof. d-r Predrag Popovsk  
Prof. d-r Sanja Vasilevska

Prof. d-r Igor Nedelkovski  
Prof. d-r Ilije Cvetanovski  
D-r Andreja Volkanovski  
Prof. d-r Vaska Atanasova  
Prof. d-r Ljupco Dimitrievski  
M-r Darko Ilievski  
M-r Robe Robeski  
M-r Magdalena T. Trpevska  
M-r Bozin Stojcevski  
Dimitar Petrov  
M-r Daniela Mladenovska  
M-r Panzo Andonov  
M-r Subija Izeiroski  
D-r Radomir Cvetanovski  
Ivan Banovski  
Ivica Dimovski  
Sasho Nikolchov  
Gazmend Fetahi  
Mirko Stojanovski  
Nevenka J. Filipovska  
Ljupco Gasteovski  
Mile Sosevski  
Tatjana Ilievski  
Kliment Naumovski  
Pece Murtanovski  
Dimitar Kocovski

<b>СОДРЖИНА</b>	<b>CONTENT</b>
<b>КНИГА 1</b>	<b>BOOK 1</b>
<i>ЕНЕРГЕТСКИ СТРАТЕГИИ, ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛ. ЕНЕРГИЈА И ТОПЛИНА</i>	<i>ENERGY STRATEGIES, POWER AND HEAT GENERATION</i>
<i>ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА И ПАМЕТНИ МРЕЖИ</i>	<i>RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SMART GRIDS</i>
<i>УПРАВУВАЊЕ, МЕРЕЊЕ И ЗАШТИТА ВО ЕЕС</i>	<i>POWER SYSTEM CONTROL, MEASUREMENT AND PROTECTION</i>
<b>КНИГА 2</b>	<b>BOOK 2</b>
<i>ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ, ЖИВОТНА СРЕДИНА И БЕЗБЕДНОСТ ПРИ РАБОТА</i>	<i>ENERGY EFFICIENCY, ENVIRONMENT AND PROFESSIONAL SAFETY</i>
<i>МЕНАЏМЕНТ И ЕКОНОМИКА НА ЕЕС</i>	<i>POWER SYSTEM MANAGEMENT AND ECONOMICS</i>
<i>ПАЗАРИ НА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА И РЕГУЛАТИВА</i>	<i>ELECTRICITY MARKETS AND REGULATION</i>

---

---

#### **ОРГАНИЗАТОР И ИЗДАВАЧ**

"Здружение на енергетичарите на Македонија" - **ЗЕМАК**,  
ул. Даме Груев 14а, 1000 Скопје, Република Македонија

#### **ORGANIZER AND EDITOR**

"Association of energy department engineers of Macedonia" - **ZEMAK**,  
Dame Gruev str, 14a, 1000 Skopje, Republic of Macedonia

*Организаторот и програмскиот одбор на советувањето не сметаа за потребно да се прават стручни рецензии на пријавените реферати. Ставовите и заклучоците на авторите на печатените реферати се оригинални*

ЕНЕРГЕТСКИ И ЕКОЛОШКИ ЕФЕКТИ ОД ПРИМЕНАТА НА КОМБИНИРАНА КОГЕНЕРАТИВНА ПОСТРОЈКА НА ПРИРОДЕН ГАС ЗА ТОПЛИФИКАЦИЈА НА ГРАДОТ БИТОЛА  
i) Сузана ЗИКОВСКА<sup>1</sup>,  
Славе АРМЕНСКИ<sup>2</sup>  
1 ЕЛЕМ, Подружница Рек Битола,  
2 Машински факултет, Скопје,.....521

ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFECTS OF APPLICATION OF COMBINED COGENERATION NATURAL GAS FOR HEATING OF BITOLA  
i) Susanna ZIKOVSKA<sup>1</sup>,  
Slave ARMENSKI<sup>2</sup>  
1 ELEM Subsidiary REK Bitola  
2 Mashinski Faculty, Skopje.....521

### ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА И ПАМЕТНИ МРЕЖИ

### RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SMART GRIDS

ИСКОРИСТУВАЊЕ НА ОБНОВЛИВИТЕ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА ВО РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА  
М-р Маргарита КУКОВСКИ дипл. екк.  
Дејан МЛАДЕНОВСКИ дипл. маш. инж.  
АД МЕПСО - Скопје.....191

USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE REPUBLIC OF MACEDONIA  
M-r Margarita KUKOVSK, grad.econ.,  
Dejan Mladenovska, grad.mech.eng.  
MEPSO - Skopje.....191

ОПТИМИЗАЦИЈА НА МАЛИ ХИДРОЕЛЕКТРАНИ  
Александар ДИМИТРОВСКИ,  
Радомир КАРАНГЕЛЕСКИ,  
м-р Драгица УСТАПЕТРОВА-АТАНАСОВА  
Geing Krebs und Kiefer International и др.....203

OPTIMIZATION OF SMALL HYDROPOWER PLANTS  
Aleksandar Dimitrov,  
Radomir Karangeleski,  
MA Dragica USTAPETROVA-ATANASOVA  
Geing Krebs und Kiefer International and others.....203

ПОДОБРУВАЊЕ НА ЕФИКАСНОСТА НА КОРИСТЕЊЕТО НА ВОДАТА ПРЕКУ ИЗГРАДБА НА МАЛИ ХИДРОЦЕНТРАЛИ ВО СОСТАВ НА ВОДОСТОПАНСКИ СИСТЕМИ  
Дијана ЛИКАР, дипл. маш. инж.<sup>1</sup>  
Цветан Драгески, дипл. маш. инж.<sup>2</sup>  
1 Градежен институт Македонија АД Скопје  
2 Монтинг Енергетика ДОО Скопје.....89

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE USE OF WATER THROUGH THE CONSTRUCTION OF SMALL HYDRO POWER PLANTS IN COMPOSITION OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS  
Dijana LIKAR grad.mech.eng.1  
Цветан Драгески, дипл. маш. инж.2  
1 Civil Engineering Institute Makedonija AD Skopje  
2 Monting Energetika DOO Skopje.....89

СО КОМБИНАЦИЈА НА ОЕИ ДО ЕНЕРГЕТСКИ, ЕКОНОМСКИ И ЕКОЛОШКИ ОДРЖЛИВО РЕШЕНИЕ <sup>2</sup>  
С. Поповска-Василевска<sup>1</sup>, С. Арменски<sup>2</sup>,  
Т. Кушевски<sup>3</sup>, Ј. Наунов<sup>3</sup>, Н. Митревски<sup>4</sup>  
1 Технички факултет-Битола; 2 Машински факултет-Скопје; 3 КЈП Водовод-Кочани;  
4 Пренова-Скопје.....55

WITH COMBINATION OF RESs TO ENERGY, FEASIBLE AND ECOLOGICALLY SUSTAINABLE SOLUTION <sup>2</sup>  
S. Popovska-Vasilevska<sup>1</sup>, S. Armenski<sup>2</sup>,  
T. Kushevski<sup>3</sup>, J. Naunov<sup>3</sup>, N. Mitrevski<sup>4</sup>  
1 Faculty of Technical Sciences-Bitola; 2 Faculty of Mechanical Engineering-Skopje; 3 PCU Vodovod-Kochani; 4 Pronova-Skopje.....55

ВЛИЈАНИЕ НА КУСИТЕ ВРСКИ ВРЗ РАБОТАТА НА ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ СО ДВОЈНО-НАПОЈУВАН АСИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР (DFIG)  
Марија ЧИНГОСКА, Влатко ЧИНГОСКИ,  
Север-МАК, Скопје,  
ETF, Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип.....65

IMPACTS SHORT-CIRCUIT OVER THE WIND DUAL- POWERED ASYNCHRONOUS GENERATOR (DFIG)  
Marija CHINGOSKA, Влатко CHINGOSKI,  
Sever-MAK, Skopje  
ETF, University „Goce Delchev“ - Stip.....65

**СОДРЖИНА**

**CONTENT**

**КНИГА 1**

**BOOK 1**

*ЕНЕРГЕТСКИ СТРАТЕГИИ,  
ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛ.  
ЕНЕРГИЈА И ТОПЛИНА*

*ENERGY STRATEGIES, POWER  
AND HEAT GENERATION*

***ЕНЕРГЕТСКИ СТРАТЕГИИ, ПРОИЗ-  
ВОДСТВО НА ЕЛ. ЕНЕРГИЈА И ТОПЛИНА***

***ENERGY STRATEGIES, POWER  
AND HEAT GENERATION***

стручен труд

**ВЛИЈАНИЕ НА КУСИТЕ ВРСКИ ВРЗ РАБОТАТА НА  
ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ СО ДВОЈНО-НАПОЈУВАН АСИНХРОНЕН  
ГЕНЕРАТОР (DFIG)**

**Марија ЧИНГОСКА, Север-МАК, Скопје**  
**Влатко ЧИНГОСКИ, ЕТФ, Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип**

**АПСТРАКТ**

*Ветрогенераторите денес се почесто се користат како обновливи енергетски извори за производство на електрична енергија, без разлика дали станува збор за копнени или водени површини. При тоа, како погоноски генератор многу често се користи специјална изведба на асинхронна машина со намотан ротор со двојно-напојување (DFIG – Double-fed Induction Generator), пред сè заради нејзините позитивни својства во смисол на поширок работен дијапазон, поголемо производство на електрична енергија при исти локациски услови и можност за генерирање на активна и реактивна моќност за поддршка на напонските прилики во електроенергетската мрежа.*

*Во овој труд прикажана е симулација на влијанието кои го имаат кусите врски на собирниците на дистрибутивната електроенергетска мрежа каде што е приклучен ветрогенераторот врз неговата работа и неговите работни карактеристики, пред сè напонот, струјата и активната и реактивната моќност која тој ја дава во мрежа. Анализата и симулацијата е направена со користење на програмскиот пакет Matlab/SIMULINK.*

**ABSTRACT**

*Wind turbines today are increasingly used as power generators for renewable electricity production, on-shore or off-shore. A specially designed induction machine with wound rotor and double-fed (DFIG - Double-fed Induction Generator) as a power generator is often used, primarily because of its good properties in terms of wider operational range, larger output power generation under the same site conditions and the possibility of generating active and reactive power to support the voltage/frequency conditions of the electricity network.*

*In this paper the authors presents a simulation results of the impacts that particular short circuits fault conditions occurring at the distribution network busbars impose on the wind turbine operation and its output parameters, such as the voltage, current and the active and the reactive power delivered to the power grid. Specific cases are simulated and the obtained results are presented and discussed using the software package Matlab/SIMULINK as the simulation tool.*



## 1. ВОВЕД

Континуираниот пораст на потребите за електричната енергија и начинот на нејзиното обезбедување се меѓу главните технолошко – економски теми за дискусија денес. Пригиснати од постојаното зголемување на побарувачката на електрична енергија, зголемувањето на трошоците за нејзино производство и неизвесностите кои ги носи континуираното исцрпување на природните енергетски ресурси од една страна, и негативните влијанија врз животот на современиот човек, врз животната средина, сериозните климатски промени и опасноста од глобално затоплување од друга страна, наметнуваат промени како во начинот на добивањето на електрична енергија, така и во начинот на нејзиното користење. Факт е дека т.н. обновливи извори на енергија, односно често нарекувани алтернативни извори на енергија, овозможуваат производство на електрична енергија со минимално негативно влијание врз животната средина споредено со производството на електрична енергија со користење на останатите фосилни енергенси како јаглен, нафта и природен гас. Дополнителна предност е и фактот што овие енергетски извори се речиси неисцрпни, токму поради нивниот обновлив карактер.

Еден од најперспективните облици на обновлива енергија од аспект на нејзино претворање во електрична е секако искористувањето на ветерната енергија. Ветерната енергија всушност претставува индиректна енергија на сончево зрачење која се добива како резултат на постоење на кинетичка енергија на подвижни, различно загреани воздушни маси во атмосферата. Се проценува дека околу 1-2% од целокупното сончевото зрачење се претвора во ветерна енергија, но и тој износ повеќекратно ги надминува денешните светски потреби од електрична енергија.

Основна предност кај ветрогенераторите или електричните генератори кои ја претвораат кинетичката енергија на ветерот во електрична енергија е бесплатното гориво. Имено, ветерот како погонско гориво кај овие системи е целосно бесплатен што овозможува сериозно намалување на цената на произведената електрична енергија. Од друга страна, недостатокот на повољни локации, потребата од поголем простор за лоцирање на ветрогенераторите, релативно малата инсталирана моќност по единица ветрогенератор и скапата опрема која е потребна за работа и управување на овие енергетски системи, не дозволуваат цената на произведениот kWh енергија од ветер да падне на очекуваната ниска вредност.

Сепак, најголемиот проблем не е цената туку можностите, начинот и влијанието кое овие дистрибуирани системи за производство на електрична енергија може да го имаат врз стабилноста и доверливоста во работата на постојниот електроенергетски систем. Имено, постојните електронергетски системи се дизајнирани за квалитетно снабдување со електрична енергија од т.н. концентрирани, релативно големи производни единици како што се термоелектрани, нуклеарни електрани и/или хидроелектрани преку соодветни високонапонски преносни водови, како и средно ниско напонски дистрибутивни водови до крајните потрошувачи. Со вклучување на ветрогенераторите со значително помала инсталирана моќност заедно со останатите помали производни капацитети од типот на соларни електрани, мали хидроелектрани, мали гасни електрани и сл., се менува концептот на електроенергетската мрежа формирајќи т.н. дистрибуиран електроенергетски систем, односно се менува значително протокот на електричната енергија во самиот електроенергетски систем. Дополнителни проблеми создава и самиот карактер на ветрогенераторите кои работат стохастично, недетерминистички, односно

заради останати климатски или локациски прилики. Заради сето ова, самите ветрогенератори се потенцијални извори на т.н. електронско загадување на електроенергетската мрежа, загадување кое негативно се рефлектира врз останатите производители приклучени кон таа мрежа, особено врз квалитетот на испорачаната електрична енергија на крајните потрошувачи. Покрај влијанието кое ветрогенераторите го имаат врз електроенергетската мрежа, истовремено и случувањата во самата електроенергетска мрежа имаат соодветни, најчесто негативни влијанија врз работата на ветрогенераторите.

Во овој труд се разгледуваат карактеристични случаи на куси врски кои се случуваат во дистрибутивните електроенергетски системи и се анализира нивното влијание врз работата на ветрогенераторите кои се директно приклучени кон таа мрежа. Направените анализи и симулации со користење на програмскиот пакет *Matlab/SIMULINK* како и добиените резултати за еден широкораспространет тип на ветрогенератор погонувани со двојно-напојуван асинхронен генератор (*DFIG – Double-Fed Induction Fenerator*) се прикажани и дискутирани во овој труд.

### 1.1. Современи ветрогенератори погонувани од асинхронни машини

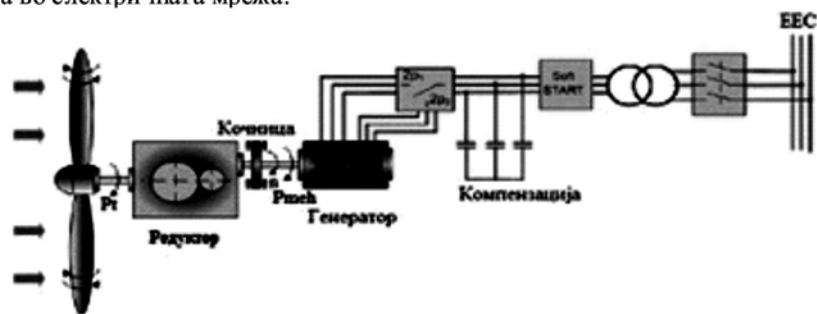
Кај современите ветрогенератори можат да се користат неколку видови на генератори во зависност од видот на употребената турбина, која се избира согласно условите на локацијата каде треба да се инсталира ветерната фарма. Генерално може да се користат три вида на електрични генератори: генератори за еднонасочна струја, синхронни генератори и асинхронни генератори. Сите три вида на генератори имаат свои предности и недостатоци заради што треба посебно внимание да се посвети при изборот на најсоодветниот тип на генератор.

Денес кај современите ветрогенератори најчесто користени се асинхронните генератори. Основна предност е нивната флексибилност при промена на брзина на ветерот и секако прифатливата цена. Од нив комерцијално најупотребувани се: (i) асинхронниот генератор со кафезен ротор (*squirrel-cage induction generator*), и (ii) двојно напојуваниот асинхрон генератор (*double-fed induction generator*). Двата типа асинхронни генератори работат приближно на ист принцип, иако двојно напојуваниот асинхронен генераторот има неколку дополнителни предности.

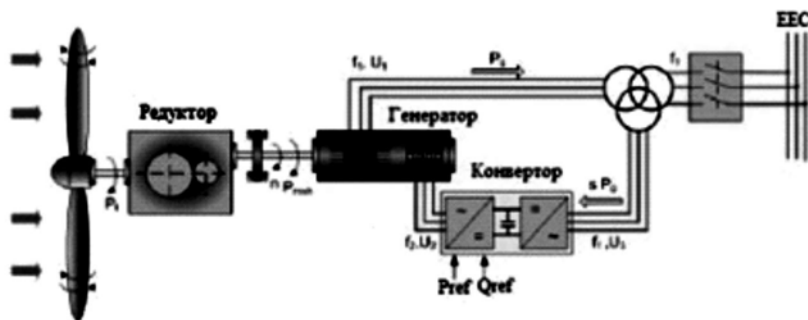
Асинхронниот генератор со кафезен ротор е често користен пред сè заради неговата механичка едноставност и цврста конструкција. Погонот на генераторот е ограничен да работи со речиси константна брзина која се добива благодарение на аеродинамичката форма на гондолата. Кај овој систем лизгањето на генераторот е прилично мало и изнесува околу 1 до 2%, од што може да се заклучи дека загубите на енергија во роторот се занемарливи. Бидејќи асинхронниот мотор не може да работи без соодветно магнетизирање на машината, овој генератор мора да биде приклучен или кон мрежата на електроенергетскиот систем или кон мрежа на кондензаторски батерии од каде истиот ќе може да повлече потребна реактивната енергија за магнетизирање во процесот на стартување.

Асинхронниот генератор со двојно напојување вообичаено се користи во погони каде се очекува поголема променлива брзина на вртење, што претставува реален случај кај ветрогенераторите. Според конструкцијата, тој всушност претставува асинхрон мотор кој може да работи и како генератор, со негативно лизгање. Доколку се направи споредба на работењето помеѓу асинхронен мотор и асинхрон генератор може да заклучиме дека во режим на мотор се создава роторски флуks со поларитет кој е обратен од оној на статорот, па така роторскиот флуks се движи позади статорскиот флуks, односно доцни за вредност еднаква на лизгањето  $s$ .

Во генераторски режим процесот е обратен, односно тука постои примарен задвижувач, т.е. ветерната турбина, која го придвижува роторот со брзина која е поголема од синхроната брзина. Притоа, статорскиот флуks индуцира струи во роторот, но поради фактот што овој роторски флуks е спротивно насочен во однос на статорскиот и ги пресекува статорските намотки, во статорските намотки се индуцира струја со активна компонента, односно моторот се однесува како генератор, т.е. машината генерира во статорските намотки енергија која потоа се предава во електричната мрежа.



а) Ветрогенератор со асинхронен генератор со кафезен ротор



б) Ветрогенератор со двојно напојуван асинхронен генератор (DFIG)  
Сл. 1: Принципиелна шема на ветрогенератори со асинхронни машини.

## 1.2 Ветрогенератор со двојно напојуван асинхронен генератор (DFIG)

Ветрогенераторите се сложени електромеханички уреди кои служат за претворавање на кинетичката енергија на ветерот во електрична енергија. Според видот и технологијата, генерално може да ги класифицираме во четири основни типа:

- Тип 1: Ветрогенератори со константна брзина на вртење ( $s \cong const$ ),
- Тип 2: Ветрогенератори со променлива брзина на вртење ( $s \neq const$ )
- Тип 3: Ветрогенератори со двојно напојуван асинхронен генератор (DFIG),
- Тип 4: Ветрогенератори со потполна конверзија (full-converter).

Ветрогенераторите од третиот тип кои користат т.н. двојно напојуван асинхронен генератор (Double-Fed Induction Generator – DFIG) можат успешно да го елиминираат проблемот со зголемени загуби на енергија во роторот на асинхроната машина при поголеми промени на брзината на вртењето, односно при поголеми вредности на лизгањето  $s$  со користење на енергетски претворувачи, односно т.н. **back-to-back**

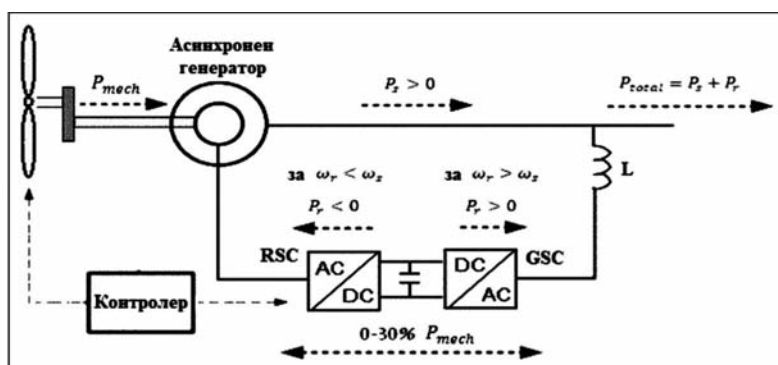
изведба овозможено е раздвојување на активните и реактивните излезни енергии на машината и максимално искористување на енергијата на ветерот при различни брзини на вртење (*различни брзини на упадниот ветер*) со значително помали механички напрегања. Бидејќи конверторот управува само со моќноста во колото на роторот, нема потреба истиот да биде димензиониран со моќност еднаква на вкупна инсталирана моќност на турбината, што значително ја намалува неговата цена. Основни недостатоци на оваа технологија, главно се релативно високата цена и комплексноста на изведбата кои во пракса успешно се надоместуваат со можноста за искористување на поголем дел од енергијата на ветерот во споредба со други технологии.

Конструктивно, кај типичниот DFIG статорската намотка е директно поврзана преку соодветен енергетски трансформатор кон електричната мрежа, односно со електроенергетскиот систем на кој е приклучена турбината, а роторската намотка е поврзана исто така кон електроенергетската мрежа, но индиректно, преку соодветни енергетски претворувачи, односно конвертори најчесто од типот на широчинско-импулсно модулирани енергетски претворувачи (*Pulse Width Modulation Energy Converters – PWM Energy Converter*). Овие конвертори можат да вршат промена и контрола на јачината, фреквенцијата и вредноста на фазниот агол на струите во роторот на асинхроната машина. Согласно на тоа, овие асинхронни машини се способни да работат во широк дијапазон на промена на брзината на вртење и до  $\pm 30\%$  од синхроната брзина, односно да работат со лизгање  $s \cong \pm 0,3$ . Како резултат на тоа, овие ветрогенератори нудат повеќе предности како на пр., висока енергетска ефикасност, значително намалување на механичките напрегања и промена на излезната моќност со постојана контрола на произведената реактивна моќност.

Роторот на двојно напојуваниот асинхронен генератор е механички поврзан со ветерната турбина преку систем за задвижување кој најчесто содржи две осовини, осовина на ниска (*турбинска*) брзина, и осовина на висока (*генераторска*) брзина, лагери и систем на запчести преносници, односно со користење на механички редуктор. Роторската намотка се напојува преку двонасочен претворувач (*bi-directional converter*) кој има функција на напонски извор. Соодветно, брзината на вртењето и вртежниот момент кај оваа машина може да се регулира со контрола на конверторот од роторската страна (*Rotor-Side Converter – RSC*).

Друга многу важна можност кај оваа машина е можноста таа да работи и со под-синхрона, но и со над-синхрона брзина, односно во услови при кои брзината на роторот (*всушност брзината на турбината*) е поголема или помала од синхроната брзина на машината. Произведената електрична енергија преку статорските намотки секогаш се пренесува до електричната мрежа, додека во роторските намотки енергијата може да се генерира во двете насоки – кон мрежата или кон машината. Последново, директно се должи на фактот што употребените **PWM** претворачи се способни да генерираат напони и струи изместени за различни фазни агли.

Во процес на работа со помала брзина од синхроната (*под-синхроно работење*), роторскиот претворач (RSC) се однесува како преобразувач (*inverter*), додека мрежниот претворач (GSC) се однесува како исправувач (*rectifier*). Во овој случај, *активната моќност тече во правец од мрежата кон роторот*. Во спротивниот случај, кога брзината на роторот е поголема од синхроната брзина (*над-синхроно работење*), роторскиот претворач RSC работи како исправувач (*rectifier*), додека мрежниот претворач GSC работи како преобразувач (*inverter*), т.е. како резултат имаме *течење на генерираната активна моќност кон мрежата како преку намотките на роторот, така и преку намотките на статорот* (Сл. 2).



Сл. 2: Движење на енергијата кај двојно напојуван асинхронен генератор.

## 2. МОДЕЛИРАЊЕ НА ВЕТРОГЕНЕРАТОР СО DFIG СО ПОМОШ НА ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ MATLAB/SIMULINK

За анализа на режимите на работа и влијанието на различни параметри врз работата на ветрогенератор погонуван од двојно напојуван асинхронен генератор (DFIG) со помош на програмскиот пакет *Matlab/SIMULINK* потребно е да се направи соодветен модел за негово нумеричко симулирање. Во самата библиотека на програмскиот пакет постои програмски модул наречен *SimPowerSystems* кој е специјално развиен за моделирање и симулација на различни видови на енергетски системи. Во овој програмски модул развиен е и модел на ветерна турбина, односно ветрогенератор со двојно напојуван асинхронен генератор.

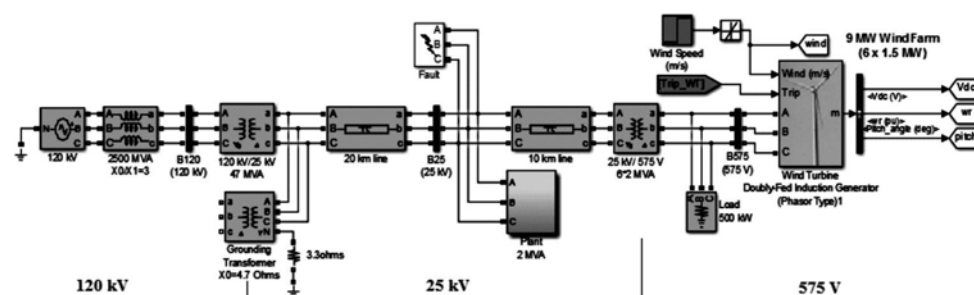
Моделот кој е користен за симулирање на работните режими се состои од ветерна фарма составена од шест идентични ветрогенератори кои користат двојно напојуван асинхронен генератор со единечна инсталирана моќност од 1,5 MW или вкупна инсталирана моќност на целото ветерно поле од 9 MW. Согласно Сл. 3, моделираниот систем работи на три различни напонски нивоа, ветрогенераторско напонско ниво од 575 V, дистрибутивен напон од 25 kV, и системски напон од 120 kV, при што самиот модел е поделен на три сериски поврзани делови:

- 1) Ветерна фарма која работи на номинален работен напон од 575 V,
- 2) Крута електроенергетска мрежа симулирана од идеален напонски извор со номинален напон од 120 kV и моќност од 2500 MVA, и
- 3) Дистрибутивен електроенергетски систем со должина од 30 km на напонско ниво од 25 kV, на која е приклучено оптоварување на растојание од 10 km од ветерната фарма со моќност од 2 MVA составен од висонапонски мотор ( $U_n = 2300 V$ ,  $P_n = 1,68 MW$ ,  $\cos \phi = 0,93$ ) и чисто активен товар со номинална моќност од 200 kW.

Помеѓу различните напонски нивоа, поставени се соодветни енергетски трансформатори и тоа: 25/0,575 kV, 12 MVA (TR1) и 120/25 kV, 47 MVA (TR2), додека на среднонапонското ниво од 25 kV приклучен е и еден трансформатор за заземјување (GTR). За симулирање на куса врска на 25 kV собирници, во моделот е внесен посебен елемент.

Ветрогенераторите користат двојно напојувани асинхронни генератори (DFIG) кои се состои од асинхронен генератор со намотан роторот и AC/DC/AC IGBT базиран PWM претворач. Статорската намотка е директно поврзана на електроенергетската додека роторската намотка се напојува со променлива фреквенција преку AC/DC/AC претвораот. Оваа технологија им овозможува на

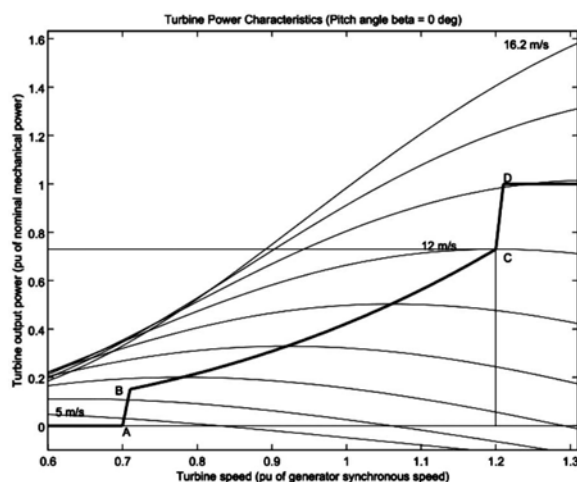
*DFIG* извлекување максимум енергија од ветерот дури и при мали брзини на ветерот преку оптимирање на брзината на турбината и минимизирање на механички напрегања на турбината, во услови на силни и непредвидени налети на ветрот. Оптималната брзина на турбините за производство на максимална механичка енергија за одредена брзина на ветерот е пропорционална со брзината на ветерот. За ветер со брзина помала од 10 m/s роторот работи во режим на под-синхрона брзина. При поголеми брзини на ветерот, работата на роторот преминува во режим на т.н. над-синхрона брзина. Системи за заштита се моделирани одвоено за ветерната фарма и за оптоварувањето, при што континуирано се следат напоните, струите и брзината на вртењето на генераторот.



Сл. 3: Модел на ветерна фарма базирана на двојно напојуван асинхронен генератор (DFIG) користен во анализите.

Зависноста на излезната моќност на ветрогенераторот во функција од брзината на вртењето при константен агол на позиција на перките ( $\beta=0$ ), даден е на Сл. 4. Ветрогенераторот може нормално да работи и да генерира моќност при промена на упадната брзина на ветерот во дијапазон помеѓу 5 m/s и 16,2 m/s. Со помош на претворувачите, двојно напојуваниот асинхронен генератор може да ја следи црвената линија, при што турбината всушност работи во оптимален режим во прилично широк дијапазон на промена на брзината на вртење, од 0,7 р.и. до 1,2 р.и. синхроната брзина на вртење, односно помеѓу точките *B* и *C*. Друга предност на *DFIG* технологијата е способноста енергетските претворувачи да генерираат или да апсорбираат реактивна моќност во процесот на работа, со што се елиминира потребата за инсталирање кондензаторски батерии, или за повлекување на реактивна енергија од електроенергетската мрежа како во случај на кафезни асинхрони машини. За потребите на анализите, предвидено е анализите да се реализираат во два засебни работни режими:

- 1) Режим на „напонски регулатор“ при што системот се обидува да одржи константен излезен напон на излезот од ветерното поле преку задавање на референтна вредност на излезниот напон на вредност  $U_{ref} = 1 \text{ p.u.}$ , со максимално дозволено отстапување од  $X_s = 0,02 \text{ p.u.}$ , односно со слободно генерирање на потребна реактивна моќност за да се задржи константна вредноста на излезниот напон (*Mode "Voltage regulation"*), и
- 2) Режим на работа во кој е фиксирана вредност на реактивна моќност која може да ја генерира ветерното поле, односно режим на променлив излезен напон како резултат на условите во електроенергетската мрежа (*Mode "VAR regulation"*).



Сл. 4: Зависност на генерираната моќност на ветрогенераторот во функција од брзината на вртењето на роторот за различни упадни брзини на ветерот.

## 2.1 Симулација на работа на DFIG ветрогенератор во режим на куса врска во дистрибутивната мрежа

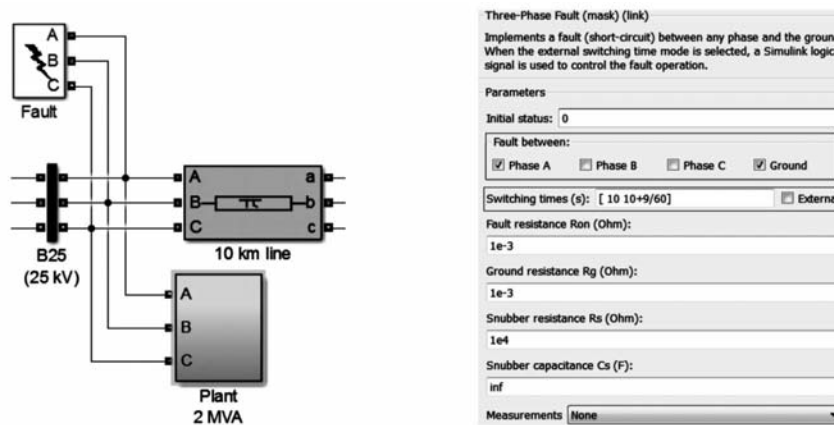
Една од посериозните состојби во електроенергетскиот систем претставува појавата на куса врска во било кој дел на системот. Без разлика на видот на кусата врска (едно-, дво-, или тро-полна) нејзината појава условува појава на повеќе транзиентни состојби кои во зависност од големината на струјата на куса врска и подесеноста на заштитата, можат да биде сериозен проблем за нормалното работење на системот и на ветрогенераторот приклучен на тој систем.

Кај трифазните системи генерално разликуваме четири вида на куса врска: еднополна куса врска (*K1*), двополна куса врска (*K2*), двополна куса врска и едновременен спој со земја (*K2Z*) и трополна куса врска (*K3*). Еднополната и двете двополни куси врски имаат значење само доколку нулата точка на системот е заземјена директно или преку отпорник со мала отпорност, во спротивно кај изолирани системи големината на струјата на куса врска е релативно мала.

Со користење на развиениот модел на ветрогенератор и со помош на програмскиот пакет *Matlab/SIMULINK* во продолжение на трудот, ќе ги прикажеме резултатите добиени со симулација на еднополна куса врска на собирниците на дистрибутивната 25 kV мрежа. На идентичен начин може да се симулираат и другите видови на куса врска кои можат да се појават во системот и истите да се анализираат.

### 2.1.1 Еднополна куса врска со земја

За да го симулираме овој хавариски режим, најпрво потребно е да се генерира дополнителен блок под наслов „*Fault*“ на 25 kV страна од електроенергетскиот систем (Сл. 5а). Потоа со негово користење ја реализираме кусата врска на фазата *A* со избор на позицијата „*Phase A Fault*“ како што е прикажано на Сл. 5б. Кусата врска настанува за времетраење од 9 временски периоди по  $t = 10\text{s}$  од работата во стационарен режим, односно во временскиот период помеѓу  $t = 10\text{s}$  и  $t = (10 + 9/60)\text{s}$ , т.е. истата трае 0,15 s.

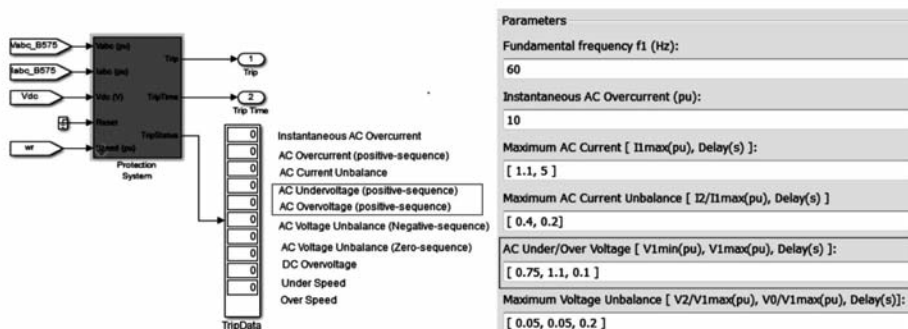


(а) блок „Fault”

(б) подесување на куса врска со земја за фаза А

Сл. 5. Имплементација на (а) блок за симулирање на куси врски и (б) подесување на видот на кусата врска и нејзините параметри.

За оваа симулација, поднапонската заштита на ветрогенераторот ја подесуваме така да истата се активира ако напонот на краевите на ветрогенераторот падне под вредност од 0,75 р.и. за времетраење  $t > 0,1s$  (Сл. 6).



(а) блок за заштита на ветрогенератор

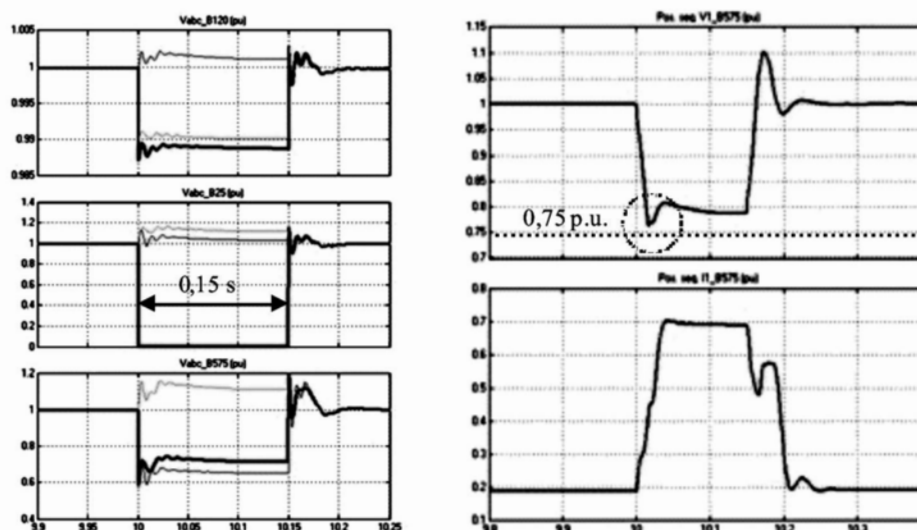
(б) подесување на заштита

Сл. 6. Подесување на системот за поднапонска заштита на ветрогенераторот.

Ако ја набљудуваме промената на излезниот напон на ветерната електрана на номинално напонско ниво од 0,575 kV ( $V1_{B575}$ ), може да се забележи дека во моментот на настанувањето на кусата врска се појавува пад на напон на вредност од 0,8 р.и., додека во истиот период струјата расте од 0,2 р.и. на 0,7 р.и. (Сл. 7а). Бидејќи оваа вредност е повисока од дозволената со поднапонската заштита (0,75 р.и.), во овој случај поднапонската заштита на ветрогенераторот не проработува, односно тој останува и понатака во работа и поминувајќи низ еден транзиентен период продолжува да испорачува електрична енергија во електроенергетскиот систем. Временските промени на активната и реактивната моќност на турбината како и промената на брзината и аголот на закривување на перките на ветерната турбина во периодот на настанувањето на кусата врска во фаза А на 25 kV собирници се дадени на Сл. 8а. Од овие графици може да се забележи нагла промена на активната моќност, т.е. пад на активната моќност од  $P = 1,87 MW$  на вредност  $P \approx 0 MW$ , а за



сметка на тој пад, се јавува пораст на генерираната реактивна моќност на вредност од околу  $Q \cong 5,5 \text{ MVAr}$ . После нормализирање на состојбата, реактивната моќност ја постигнала својата цел – ја задржала вредноста на излезниот напон во бараните граници, истата паѓа на вредност  $Q = 0 \text{ MVAr}$ , додека активната моќност повторно се востановува на номинална вредност  $P = 1,87 \text{ MW}$ . Брзината на вртењето на турбината покажува нагла, но релативно мала промена од 0,8 р.у. на вредност од 0,8035 р.у. за потоа постепено да опаѓа до номинална вредност за временски период  $t \cong 30\text{s}$ . Едновременно, не се забележуваат никакви промени на аголот на закосување на перките на турбината што е и очекувано бидејќи нема зголемување на брзината над максимално дозволеното, односно нема потреба од активна корекција на брзината на вртењето на турбината со цел нејзина заштита од евентуални механички удари и напрегања.



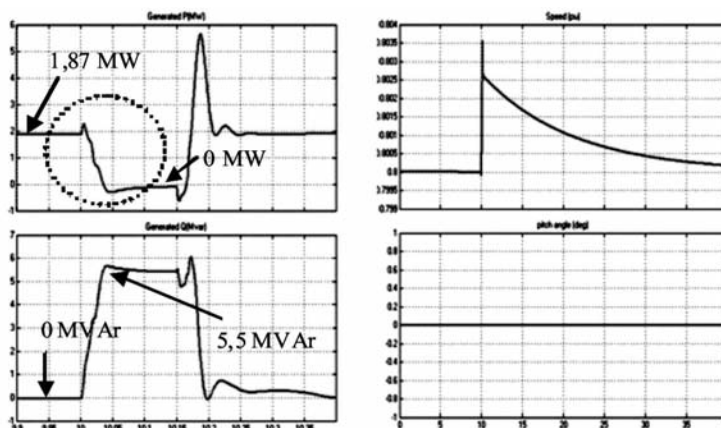
(а) куса врска во фаза А

(б) напон и струја на краевите на ветрогенератор

Сл. 7. Временски промени на (а) струите на 120 kV, 25 kV и 0.575 kV и (б) напонот и струјата на терминалните точки на ветрогенераторот во режим на напонска регулација.

Сето ова досега се однесува за работен режим на напонска регулација на ветрогенераторот. Доколку тој работи во режим на константно генерирана реактивна моќност со вредност  $Q = 0 \text{ MVAr}$  (не се дозволи генерирање на реактивна моќност), односно направиме промена на работниот режим од „Voltage regulation“ во „Var regulation“ се добиваат резултатите прикажани на Сл. 9.

Карактеристично за овој работен режим за разлика од претходниот е фактот што во овој случај заради настанувањето на кусата врска во фазата А, напонот на краевите на ветрогенераторот паѓа од номинална вредност  $U = 1 \text{ p.u.}$  на вредност  $U < 0,7 \text{ p.u.}$  со што се создаваат услови да проработи поднапонската заштита на ветрогенераторот. Како резултат гледаме дека најпрво струјата низ генераторот краткотрајно расте за да после 0,1s, колку што е времето на задршка на заштитата, истата проработи и го исклучи ветрогенераторот од електроенергетската мрежа, а вредноста на струјата падне на вредност  $I=0 \text{ p.u.}$  (Сл. 9б).



(а) активна и реактивна моќност (б) брзина и агол на перките

Сл. 8. Времени промени на (а) активната и реактивната моќност на ветрогенераторот, и (б) брзината на вртењето на турбината и аголот на закосување на перките на турбината во режим на напонска регулација.

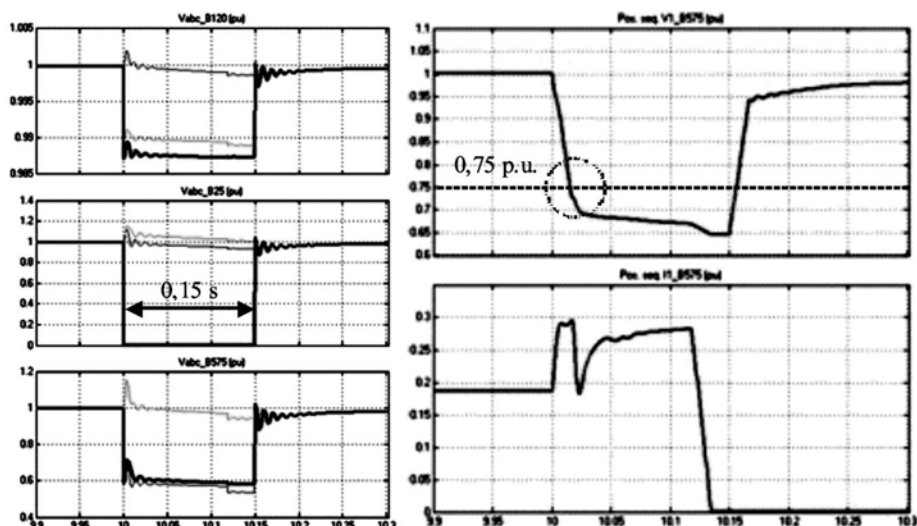
Со исклучување на ветрогенераторот од електроенергетската мрежа неговата брзина на вртење почнува да расте што е и очекувано како резултат на кинетичката енергија на вртливите маси и отсуство од кочен момент од страна на асинхронниот генератор. Овој пораст на брзината се толерира се додека таа брзина не ја достигне максимално дозволената вредност од 1.25 p.u. или околу 25% повисока од номиналната. Во тој момент, поради постоење на опасност од механички оштетувања на деловите на турбината, пред сè перките на турбината и можноста за појавата на значителни механички сили и напрегања во основните конструктивни делови на турбината, се менува аголот на закосувањето на перките за агол од речиси  $14^\circ$  со што самата турбина почнува да кочи и да ја стабилизира својата максимална брзина на вредност од околу 1,23 p.u. односно максимално дозволена брзина која нема да услови појава на било какви проблеми во работата пред сè од механичка природа.

Анализирајќи ги временските промени може да се забележи дека потребни се околу 40s за да се постигне максималната брзина – од моментот на кусата врска  $t = 10s$ , па се до максималната брзина која се постигнува во  $t = 50s$ . Механичката заштита на турбината преку закосување на аголот на перките станува активна во  $t = 45,5s$  и потребно и е време од неколку секунди за да го постигне аголот на закосување од  $14,2^\circ$  во временски момент  $t = 52,6s$ , со што почнува турбината да ја намалува брзината и се враќа на безбедна вредност од 1,23 p.u. во  $t = 62s$ .

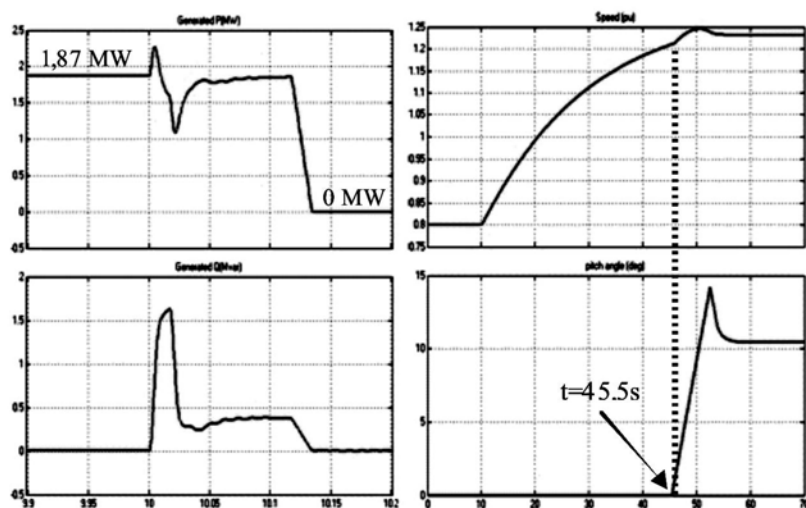
## 1. ЗАКЛУЧОК

Во овој труд дадена е методологија за симулација на работа на ветрогенератор со двојно напојуван асинхронен генератор во карактеристичен режим на работа со напонска и без напонска регулација во услови на појава на куса врска во дистрибутивната мрежа. За симулации користени се модели дадени во програмскиот модул *SimPowerSystems* на програмскиот пакет *Matlab/SIMULINK*. Добиените резултати се дискутирани и дадено е физичко образложение за процесите кои настануваат како и за начините истите да се држат под контрола преку соодветно подесување на заштитата во системот составен од ветрогенератори и постојниот

електроенергетски систем. Може да заклучиме дека користењето на моделирање и симулација со помош на програмскиот пакет *Matlab/SIMULINK* може во значителна мерка да ја поедностави анализата на сложените електроенергетски состојби кои вклучуваат преодни појави кај ветрогенераторите како обновливи извори на електрична енергија.



(а) куса врска во фаза А (б) напон и струја на краевите на ветерната електрана  
Сл. 9. Временски промени на (а) струите на 120 kV, 25 kV и 0.575 kV и (б) напонот и струјага на терминалните точки на ветрогенераторот без режим на напонска регулација.



(а) активна и реактивна моќност (б) брзина и агол на перките  
Сл. 10. Временски промени на (а) активната и реактивната моќност на ветрогенераторот, и (б) брзината на вртењето на турбината и аголот на закосување на перките на турбината без режим на напонска регулација.

#### **КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА**

1. Hemami A. (2012). *Wind Turbine Technology*, CENGAGE Learning.
2. Manwell J. F., McGowan J. G.; Rogers A. L. (2009). *Wind Energy Explained*, John Wiley & Sons Ltd.
3. Spera A. D. (2009). *Wind Turbine Technology*, ASME Press.
4. Lamchich M. T., Lachguer N. (2012). *Matlab/Simulink as Simulation Tool for Wind Generation Systems Based on Doubly Fed Induction Machines*, INTECH, MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Vol. 2, pp.139-160.
5. Singh M., Muljadi E., Jonkman J., Gevorgian V., Girsang I., Dhupia J. (2014). *Simulation for Wind Turbine Generators – With FAST and MATLAB-Simulink Modules*, NREL Technical Report NREL/TP-5D00-59195.
6. Manyonge A. W. , Ochieng R. M., Onyango F. N., Shichikha J. M. (2012). *Mathematical Modeling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis*, Applied Mathematical Sciences, Vol. 6, 2012, no. 91, pp. 4527-4536.
7. Марија Чингоски (2016). *Моделирање и симулација на ветрогенераторски систем со асинхронен генератор со помош на Matlab/SIMULINK*, Дипломска работа, ФЕИТ – Скопје.
8. Akshay Kumar (2013). *DFIG-Based Wind Power Conversion System Connected to Grid*, International Journal of Technical Research and Applications, Vol. 1, no. 3, pp. 15-24.