

## Вјетроелектране у дистрибуираним мрежама и њихова заштитна опрема Wind power plants in distribution grids and their protection equipment

Немања Радић, Александар Станисављевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

### Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ

**Кратак садржај** – У раду је описан рад вјетроелектране и њихове заштитне опреме, а такође је и урађена симулација на модификованој IEEE 13-bus дистрибутивној тест мрежи. IEEE 13 мрежа је модификована додавањем вјетроелектрана. У оквиру ове мреже моделована је и релејна заштита ветроелектране. Симулиран је трополни кратак спој са земљом и приказан је рад релејне заштите током кратких спојева.

**Кључне речи:** IEEE 13-bus тест мрежа, вјетроелектрана, релејна заштита, напон, струја

**Abstract** – This paper presents the operation of a wind power plant and its associated protection equipment, as well as a simulation conducted on a modified IEEE 13-bus distribution test network. The IEEE 13-bus network was adapted by incorporating wind power plants. Within this network, the relay protection system of the wind power plant was modeled. A three-phase fault to ground was simulated, and the performance of the relay protection during the fault conditions was analyzed and discussed.

**Keywords:** IEEE 13-bus test grid, wind power plant, relay protection, voltage, current

**НАПОМЕНА:** Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Александар Станисављевић, вандредни професор

### 1. УВОД

Глобални еколошки проблеми и проблеми енергетског дефицита се данас у свијету посматрају као јединствен проблем добијања чисте енергије у складу са принципима одрживог развоја. Од свих обновљивих извора енергије највећи технолошки напредак и највећи тренд изградње у свијету у посљедњих 20 година имају вјетроелектране [1].

Тема овог рада јесте заштита вјетроелектрана у дистрибутивним мрежама микропроцесорском заштитом чија је функција да штите роторе вјетрогенератора, трансформаторе, изводе и многе друге дијелове вјетроелектрана. У овом раду, биће приказане предности које оваква заштита уноси у вјетро паркове и електроенергетске системе. Основни мотиви за примјену микропроцесорских заштитних уређаја јесу једноставна подешавања путем интуитивних софтверских алата.

У раду се објашњава како се примјењује заштита и шта је оно на шта треба да се обрати пажња при примјени заштите. Описани су стандарди који се примјењују при реализацији релејне заштите, као и могућности које заштита пружа кориснику.

У другој глави представљен је историјат и принцип рада вјетроелектрана. У трећој глави биће представљена енергија вјетра. У четвртој глави представљени су типови вјетротурбина те механичке карактеристике модерних вјетротурбина велике снаге. У петој глави описане су опште карактеристике микропроцесорске заштите, њен историјски развој, принцип рада, као и врсте заштита које се најчешће користе. Описан је и начин заштита вјетроелектрана као и правила прикључења вјетрогенератора на мрежу. Шеста глава представља симулацију у Матлаб Симулинку и резултате. Последње двије главе су Закључак и Литература.

### 2. ВЈЕТРОЕЛЕКТРАНЕ

Први писани трагови примене вјетроелектрана помињу се још 200. године п.н.е. и односе се на вјетрењаче коришћене за мљењење жита у тадашњој Персији. Почетком 12. вијека вјетрењаче се појављују у Европи у модификованом облику са хоризонталном осовином, слика 1 [1].



Слика 1. Древна вјетротурбина за мљењење жита [1]

Прву вјетротурбину која је коришћена за генерисање електричне енергије направио је 1891. године Данац Пол Ла Кур (Poul la Cour, 1846–1908). Енергетска криза из 1973. године, а касније и све већи еколошки проблеми везани за сагоријевање фосилних горива, поновом популаризују обновљиве изворе енергије и почетком деведесетих година вјетрогенератори доживљавају ренесансу. Европска унија је 2007. године донела закон да 20% све енергије треба да буде из обновљивих извора до 2020. године. Очекује се да

ће енергија вјетра до 2050. године бити доминантан извор електричне енергије у свијету [2].

Кинетичка енергија вјетра се трансформише у механичку енергију помоћу вјетротурбине. Брзину обртања вјетротурбине (која износи десетак обртаја у минути) обично је потребно прилагодити захтијевању брзини обртања генератора. За то се користи механички мултипликатор.

Највише инсталираних производних капацитета електричне енергије у ЕУ у посљедњих 20 година је у вјетроелектранама [1].

### 3. ЕНЕРГИЈА ВЈЕТРА

Вјетар је облик енергије који представља усмјерено кретање ваздушних маса. Настаје као посљедица разлика у атмосферским притисцима, које су узроковане неједнаким загријавањем ваздушних маса. Разликују се глобални или геострофски вјетрови и локални или површински вјетрови. С обзиром на то да вјетар представља усмјерено кретање ваздушних маса он посједује одређену кинетичку енергију, која је сразмјерна маси и квадрату брзине којом струји та маса ваздуха.

$$P' = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3. \quad (3.7)$$

Снага вјетра је пропорционална трећем степену брзине вјетра, што значи да се и врло мале варијације брзине вјетра битно одражавају на промјену његове снаге. Јака зависност између снаге и брзине вјетра има низ битних посљедица на пројектовање вјетроелектрана, како у погледу захтијеване тачности мјерења брзине вјетра, тако и у погледу захтијеваних експлоатационих карактеристика вјетроагрегата [5].

### 4. ВЈЕТРОТУРБИНЕ

Кинетичка енергија вјетра се трансформише у механичку енергију обртног кретања помоћу вјетротурбине. Постоје различите конструкције вјетротурбина. Циљ је да се постигне што већи степен искоришћења и стабилан рад у што ширем опсегу брзина вјетра. Развој вјетротурбина је још увијек интензиван [1].

Генерално, вјетротурбине се дијеле на вјетротурбине са:

- вертикалном осовином,
- хоризонталном осовином.

Код вјетротурбина са вертикалном осовином вјетар струји нормално на осу ротације, па се оне не морају усмјеравати према смјеру дувања вјетра. Код њих се генератор поставља у подножју турбине, те нису потребни јаки торњеви, као код турбина са хоризонталном осовином. Познате су: Дариусова, Савонијусова и Х вјетротурбина [1].

Вјетротурбине са хоризонталном осовином се данас доминантно користе, како за велике, тако и за мале снаге. Могу бити постављене уз и низ вјетар. Вјетротурбине постављене низ вјетар се саме прилагођавају смјеру вјетра и не захтијевају посебне механичке системе за закретање према смјеру вјетра. За урбане градске услове вјетроагрегати су и даље врло

мало примењиви, прије свега због буке и опасности за околину због могућег разлетања турбине услед хаварије или проблема хватања леда на лопатице, којег центрифугалне силе могу откинути и при нормалном погону вјетротурбине. Ипак, у посљедње вријеме се интензивно развијају концепти малих турбина (са хоризонталном и вертикалном осовином) који су прихватљиви и за урбане средине [1].

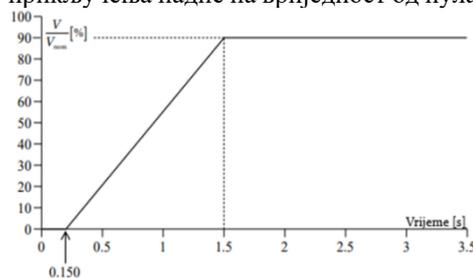
### 5. РЕЛЕЈНА ЗАШТИТА ВЈЕТРОЕЛЕКТРАНА

Развој микропроцесорске заштите је почео крајем 60-тих и почетком 70-тих година. До краја 80-тих година микропроцесорске заштите су постале високо поуздане и сигурне. Средином и крајем 90-тих година цијена је смањена на испод 10% у односу на исти класични релеј (заштиту), при чему је микропроцесорском заштитом увијек обезбјеђена свеобухватнија и квалитетнија заштита [4].

Најчешће је случај да се микропроцесор користи као база за функционално обједињавање више врста релеја, као и функција које се срећу у оквиру заштитног система.

У раном периоду употребе вјетроелектрана, вјетротурбине су се тренутно искључивале са мреже уколико би напон мреже опао испод 80 % од номиналне вриједности напона. Вјетротурбине су биле осјетљиве на пропаде напона, а при наведеном начину искључивања генератора, нарушава се стабилност ЕЕС. Почетком 2003. године, ријешен је наведени проблем тренутног искључивања генератора са мреже уколико пропад напона траје релативно кратко, односно, користи се "нисконапонска возња", односно, LVRT (*eng. low voltage ride through* - врло често се користи и израз FRT - *eng. fault ride through*) карактеристика искључења генератора [6]. Велики број држава у свијету има дефинисана правила о погону преносних и дистрибутивних мрежа. У ова правила се убрајају ЛВРТ захтјеви који се односе на то да вјетропарк остане у погону и при сниженим вриједностима напона. У наставку текста размотрени су њемачки, ирски и дански LVRT захтјеви за прикључење вјетропарка на мрежу.

На слици 2. дати су њемачки LVRT захтјеви. По Њемачком правилнику, вјетропарк може остати прикључен на мрежу 150 ms, чак у случају да напон на мјесту прикључења падне на вриједност од нула волти.



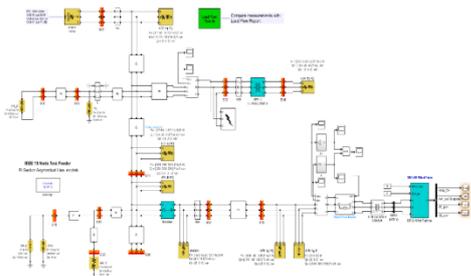
Слика 2. LVRT захтјеви правилника о раду дистрибутивних мрежа Њемачке [7]

По ирском правилнику на мјесту прикључења на мрежу, напон вјетропарка ни у једном тренутку не смије пасти испод 15 % од номиналне вриједности. У супротном долази до искључења [8].

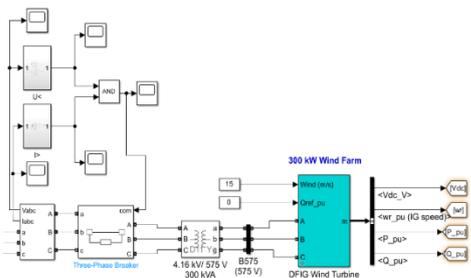
Код данских захтјева када напон на мјесту прикључења вјетропарка опадне до 15% номиналног напона, тада вјетропарк остаје прикључен на мрежу првих 100 ms. За временски период од 100 ms до 1000 ms, вријеме останка вјетропарка у погону расте линеарно са повећањем напона од 15% до 75% номиналног напона. Ако се напон повећа изнад 75% номиналног напона, послије 10 секунди, вјетропарк остаје трајно у погону [9].

## 6. РЕЛЕЈНА ЗАШТИТА ВЈЕТРОЕЛЕКТРАНА

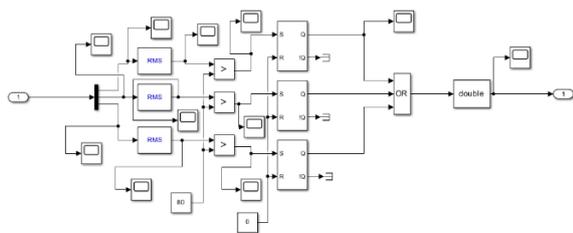
Симулиран је трополни кратак спој са земљом у чвору 633.



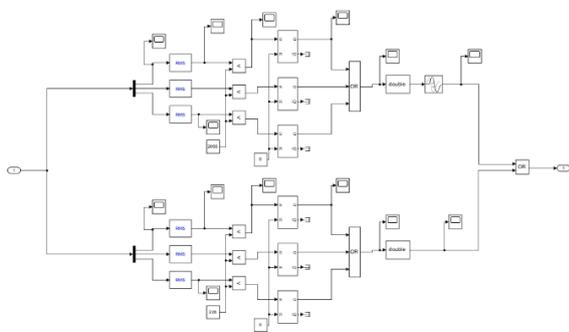
Слика 3. Модел мреже и вјетроелектране



Слика 4. Модел релејне заштите и вјетроелектране



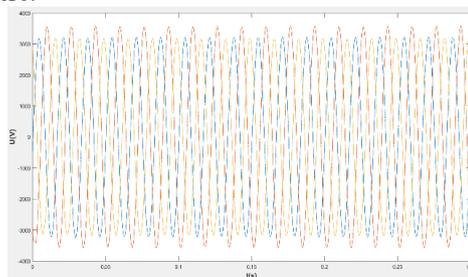
Слика 5. Струјни релеј



Слика 6. Напонски релеј

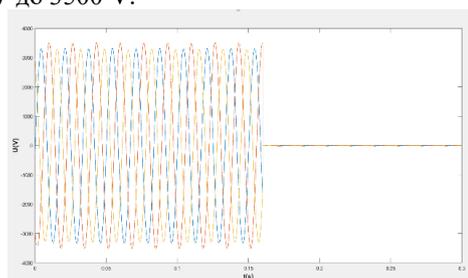
На овим сликама је приказан струјни и напонски релеј. У релејима се налази РМС блок одакле можемо да видимо ефективну вриједност струје и напона. Струјни

релеј је подешен тако да у тренутку квара у било којој фази на излазу одмах даје логичку јединицу. Вриједност заштите је постављена на 80 А, а вријеме реаговања ове заштите је тренутно. Напонски релеј је подешен по LVRT карактеристици и има два степена дјеловања заштите. Први случај је да у тренутку квара, када напон падне на 90% од ефективне вриједности имамо временско затезање од 0,02 s и релеј на излазу даје логичку јединицу. Други случај је ако напон падне на 10% од ефективне вриједности релеј тренутно реагује. Коначан услов је да добијемо логичку јединицу из оба релеја и тада прекидач отвара своје контакте.



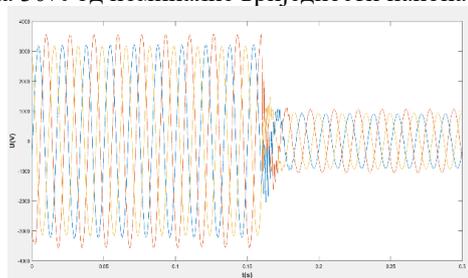
Слика 7. Напон на мјесту прикључења електране

На слици 7. приказана су мјерења напона на мјесту прикључења електране на мрежу прије квара. Видимо да су напони симетрични и да достижу вриједности од 3000 V до 3500 V.



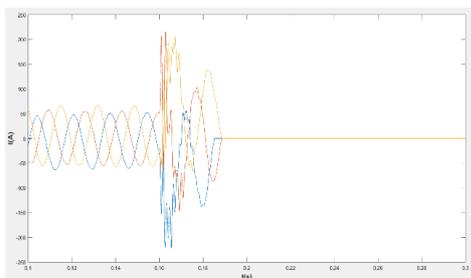
Слика 8. Напон на мјесту квара

На слици 8. видимо напон на мјесту квара. До квара је дошло у 0.16-ој секунди гдје видимо да је напон пао на нулту вриједност. На следећој слици приказан је напон на мјесту прикључења електране у тренутку квара. Са слике је уочљиво да је вриједност напона након квара пала на 30% од номиналне вриједности напона.

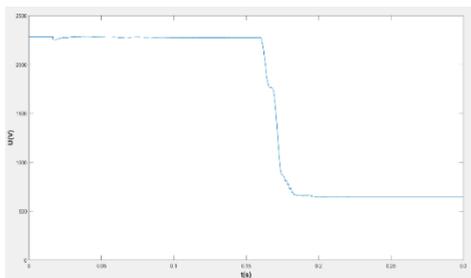


Слика 9. Напон на мјесту прикључења електране у тренутку квара

На наредној слици видимо да струја на мјесту прикључења електране у тренутку квара почиње да расте и достиже вриједности од око 200 А.

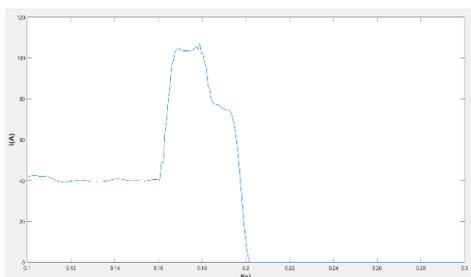


Слика 10. Струја на мјесту прикључења електране у тренутку квара



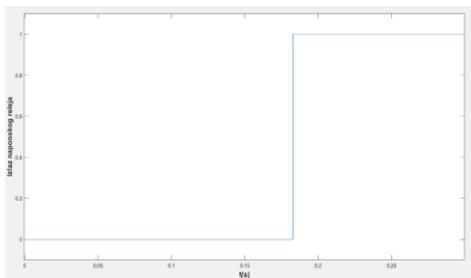
Слика 11. РМС напона

Ефективна вриједност напона је око 2300 V. У тренутку квара напон пада на вриједност од 650 V.

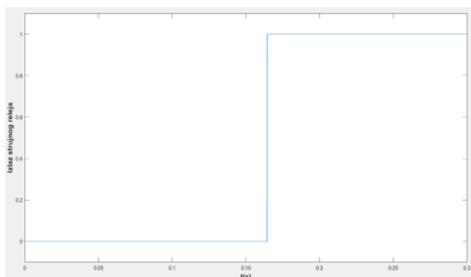


Слика 12. РМС струје

На слици 12. видимо да је ефективна вриједност струје око 40 А. Струјна заштита је постављена тако да дјелује на два пута већу вриједност од номиналне струје. Видимо да струја достиже вриједност од 80 А у 0,16-ој секунди.



Слика 13. Излаз напонског релеја



Слика 14. Излаз струјног релеја

На овим сликама видимо излазе напонског и струјног релеја. Иако је уочљиво да напонски релеј има временско затезање од 0,02 s, након чега долази до реаковања заштите.

## 7. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљене су ветроелектране, као и начини рада заштитне опреме. Описане су основне шеме релејне заштите које се користе и у савременим системима за конверзију енергије вјетра. Описана је структура мреже вјетропарка, као и конфигурација релејне заштите која се користи у дистрибутивној мрежи. Детаљно је описана релејна заштита вјетропарка и потенцијални изазови. Испитано је понашање система у случају трополног кратког споја са земљом са прикљученом вјетроелектраном на постојећу дистрибутивну мрежу. Квар је постављен на једној локацији и посматрани су напони и струје на мјесту квара и на мјесту прикључења електране на мрежу. Иако је квар удаљен од наше електране, лако је уочљиво да долази до већег пада напона на самом мјесту прикључења. За разматрани случај наглашена је потреба електричне заштите ротора да усљед краткоратног пада напона искључује вјетрогенератор са мреже, усљед чега може доћи до каскадног искључивања осталих генератора у ЕЕС. Уз кооперацију релејне заштите вјетрогенератора са LVRT захтјевима мреже ријешен је проблем стабилности и некоректног дјеловања заштите при краткотрајним падовима напона, што је описано у симулацији модела, И модел је радио у складу са LVRT. Како се повећава продор ветроелектрана у наш систем, изазови и заштитна разматрања се настављају развијати.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] ЖељкоР. Ђуришић „Вјетроелектране“, Академска мисао, Београд, 2019.
- [2] Wind Energy Handbook, Second edition, Tony Burton, Wind Energy Consultant, Powys, UK, 2011.
- [3] Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering Second Edition, David A. Spera, 2009.
- [4] Д. Бекут, „Релејна заштита“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2009.
- [5] Wind Energy Explained, Theory, Design and Application, Second Edition, J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, USA, 2009.
- [6] Tamer A. Kawady, Naema M. Mansour and Abdel-Maksoud I. Taalab, “Wind Farm Protection Systems: State of the Art and Challenges”, 2010, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/221907529\\_Wind\\_Farm\\_Protection\\_Systems\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/221907529_Wind_Farm_Protection_Systems_State_of_the_Art_and_Challenges).
- [7] BDWE Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V.: "Guideline for generating plants' connection to and parallel operation with the medium- voltagenetwork", 2008.

[8] Distribution System Operators – ESB Networks, ‘Irish Distribution Code’, 2015.

[9] M. Tsili, S. Papathanassiou: "A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms", IET Renew. Power Gen., 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 308–332, 2009.

#### Кратка биографија:



**Немања Радић** рођен је 1998. године у Добоју. Средњу школу – Гимназију Јован Дучић завршио је у Добоју 2017. године. Факултет техничких наукаписао је школске 2017/2018. године. На студијама се определио за смер Електроенергетика – Електроенергетски системи где је и дипломирао 2022. године Мастер студије уписао је 2022/2023 школске године.

**Контакт:** nradic11@gmail.com



**Александар М. Станисављевић** рођен је у Београду 1988. год. Дипломирао је и одбранио мастер рад на Факултету техничких наука у Новом Саду, 2011. и 2012. год., респективно. Од 2012. год. је на Факултету техничких наука као истраживач приправник. На истом факултету, одбранио је докторску дисертацију 2019. год. где је затим изабран је у наставно звање доцента. Од 2024. године је у звању ванредни професор.