

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 743. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 7.2.2012. године одређени смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења“, коју је предао кандидат мр Бранко (Мирослав) Радичевић, дипл. инж. Након прегледа добијеног материјала Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Увод

1.1. Наслов и обим докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Бранка М. Радичевића под насловом „Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења“ је написана на 137 страна, садржи 78 слика, 13 табела и цитирано је 77 референци.

1.2. Хронологија одобравања и израде дисертације

На 723. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду која је одржана 2.11.2010. године формирана је Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата мр Бранка М. Радичевића под насловом „Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења“ у саставу: проф. др Милан С. Савић (ментор), проф. др Никола Рајаковић и проф. др Љубомир Герић (Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду). Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на 738. седници одржаној 1.11.2011. године усвојило извештај Комисије и одобрило израду докторске дисертације под горе наведеним насловом, а Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 26.12.2011. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације (одлука бр. 06-8780/16-11).

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација припада техничким наукама, ужој научној области Електроенергетски системи (Техника високог напона и Обновљиви извори електричне енергије) за коју је матични Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

1.4. Биографски подаци о кандидату

Бранко М. Радичевић је рођен 14.5.1970. године у Београду, где је завршио основну школу и Математичку гимназију. На Електротехничком факултету Универзитета у Београду на Одсеку за енергетику је дипломирао 12.7.2001. године, са просечном оценом током студија 8,12 и оценом 10 на дипломском раду под насловом „Техноекономска анализа савремених ветрогенератора велике снаге“. Постдипломске студије уписао је такође на Електротехничком факултету у Београду, на профилу Енергетски претварачи и погони. Све предвиђене испите положио је са оценом 10. Магистарски рад са темом „Процена глобалног и локалног ветроенергетског потенцијала и савремена решења за добијање електричне енергије од енергије ветра“ одбранио је 10.12.2005. године. Од новембра 2001. године запослен је на Пољопривредном факултету Универзитета у Београду, као асистент на Катедри за техничке науке. Држи рачунске и лабораторијске вежбе из предмета: Обновљиви извори енергије, Електротехника у пољопривреди, Аутоматизација у пољопривреди и Физичко-техничка мерења. У свом досадашњем раду мр Бранко М. Радичевић је самостално или у сарадњи са

другим ауторима објавио 20 радова у међународним и домаћим часописима, 5 радова на међународним конференцијама и 10 радова на конференцијама националног значаја (више од половине радова је у непосредној вези са темом докторске дисертације). Учествовао је у реализацији пет пројекта технолошког развоја МНТР Републике Србије, две студије и једног међународног пројекта FP6 (из области ветроенергетике). Коаутор је једног уџбеника. Пријавио је 1 међународни патент који је у фази одобравања. Научно-истраживачки рад мр Бранка М. Радичевића у протеклом периоду био је усмерен на следеће области: обновљиви извори електричне енергије, техника високог напона, заштита ветроелектрана од атмосферског пражњења, примена електричне енергије у индустрији и пољопривреди, електричне машине и информациони системи. Члан је Европског удружења за ветроенергију и IEEE организације.

2. Опис дисертације

2.1. Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација се састоји од осам поглавља: Уводна разматрања, Ветроелектране, Атмосферска пражњења у присуству ветроелектрана, Теоријска анализа утицаја ротације елиса ветротурбина на карактеристике атмосферског пражњења, Експериментално истраживање, Физичко тумачење анализираних феномена, Закључци, доприноси, и будући рад, Литература, листа слика и табела и биографија аутора и Прилози. По форми и садржају рад задовољава стандарде за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу докторске дисертације објашњен је значај ветроелектрана у савременом електроенергетском систему (ЕЕС) и дат је преглед актуелног стања и стандарда из области громобранске заштите ветроелектрана. Како би се заштита елиса ветротурбина од директног удара грома сместила у шири контекст, у другом поглављу су укратко приказани главни делови савремене ветротурбине са хоризонталном осом. Посебна пажња је посвећена анализи карактеристика и начинима заштите компоненти кроз које протиче главни део струје пражњења. На основу искуства из авио индустрије размотрени су различити принципи заштиту композитних материјала који се користе за израду елиса ветротурбина, као најугроженије компоненте, од директног атмосферског пражњења. У трећем поглављу дат је преглед специфичности, карактеристика и релевантних параметара атмосферских пражњења која типично погађају ветроелектране које су погону.

Главне особине и принципи заштитних система ветроелектрана од директног атмосферског пражњења детаљно су приказани у четвртном поглављу. Извршена је анализа могућих тачака удара грома на елисама ветроелектрана и размотрене су последице које при томе могу настати. Затим је теоријски анализиран утицај ротације елиса ветротурбине на број и особине атмосферског пражњења. У петом поглављу су дати резултати оригиналног експерименталног истраживања. Извршена је компарација ефикасности примењених различитих метода громобранске заштите на елисама модела ветротурбине смањених димензија. На основу експерименталног истраживања добијени су закључци у погледу промене угрожености ветроелектрана од атмосферских пражњења у условима мировања и ротације елиса и имплицитно су одређене промене атрактивних зона. Као резултат целокупног истраживања усвојен је унапређен принцип заштите ветроелектрана од удара грома и извршена је процена очекиваног броја година рада ветротурбине без оштећења елиса приликом директних атмосферских пражњења за различите примењене методе громобранске заштите на елисама ветротурбина. Објашњено је да се добијени резултати у високонапонској лабораторији могу, на основу теорије сличности, применити и на актуелне ветротурбине у реалном раду.

У шестом поглављу, на основу теорије дугих прескока, дато је физичко тумачење анализираних феномена за стационарно стање (када елисе мирују) и у случајевима када се елисе обрћу на различитим брзинама ротације. У седмом поглављу дати су главни закључци и доприноси

докторске дисертације и смернице за будући рад. У последњем поглављу наведен је списак коришћене литературе, дата је листа слика и табела по поглављима и биографски подаци о аутору. У прилогу је дат преглед и спецификација коришћене лабораторијске и додатне опреме.

3. Оцена дисертације

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација „Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења” је научно веома актуелна због све већег броја ветротурбина које су у погону, њихове повећане осетљивости на атмосферске ударе и тешких последица које при томе настају и представља оригиналан и значајан допринос разматраној проблематици. Ветроелектране су нестандартне конструкције са ротирајућим елементима. Оне имају повећан ризик од удара грома због све већих јединичних инсталираних снага, дужине елиса и висина носећих стубова. На већини локација на којима се оне инсталирају кераунички ниво је висок. Развој заштитних система ветроелектрана од директног удара грома има изузетан значај, како би се смањиле штетне последице због механичких оштећења елиса, кварова на електричној и електронској опреми и испада ветроелектрана из погона.

Истраживања која је кандидат спровео у току израде докторске дисертације су мултидисциплинарна, јер обухватају познавање следећих области: техника високог напона, ветроенергетика, физика атмосферских пражњења и громобранска заштита. У стручној литератури има мало података о утицају ротације елиса ветрогенератора на атрактивну зону. Оригиналност истраживања се огледа у томе што је први пут направљен експериментални покушај да се испита да ли постоји утицај ротације елиса на учесталост и начин атмосферског пражњења у зони прихватног система на врховима изолационих и/или проводних елиса ветротурбине, што се до сада није систематски проучавало.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена савремена литература из области атмосферског пражњења, громобранске заштите ветроелектрана, технике високог напона и ветроенергетике у виду фундаменталних књига, уџбеника, међународних стандарда и радова из релевантних часописа где су приказани резултати најновијих истраживања. Наведено је преко 70 референци које су кандидату послужиле као основа за анализу метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Примењена је метода физичког моделовања и експерименталног лабораторијског испитивања. Развијена је методологија испитивања ефикасности громобранске заштите ветроелектрана у условима ротације елиса и формиран је оригиналан физички модел за одређивање промене атрактивног ефекта услед ротације. Кандидат је извршио експериментално утврђивање разлике у прескочним ударним напонима између посебно обликоване лучне електроде и елиса наменски конструисаног модела ветротурбине који је потпуно веран оригиналу, само смањених димензија и без електричног генератора. Ветротурбина је покретана помоћу фреквентно управљаног индукционог мотора.

У току испитивања на моделу кандидат је извршио детаљну компарацију различитих метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења и процену ефикасности примењених громобранских заштитних система на елисама (примена уземљених проводних капа на крајевима елиса од изолационог материјала, употреба електрода-рецептора у облику угмади у близини врхова елиса и испитивање елиса без инсталираних заштитних система). На основу теорије сличности утврђене су карактеристике директних атмосферских пражњења за

Следеће ротационе брзине елиса: $\omega = 0$ када елисе не ротирају, $\omega = 250$ о/мин (симулирани су ветрови умерене јачине), и $\omega = 400$ о/мин (номинална брзина ротора). Као критеријум се користио 50% прескочни ударни склопни стандардни напон негативног поларитета до 2.000 kV и позитивног поларитета до 3.500 kV одређен методом горе-доле за елисе које мирују и које се врте наведеним брзинама, за примењене различите методе громобранске заштите. На основу промене прескочног напона анализом резултата донет је закључак о утицају ротације на атрактивност елиса ветрогенератора на атмосферске ударе. Усавршена је оригинална метода за процену очекиваног броја година рада ветротурбине без општећења елиса од директних атмосферских пражњења за различите примењене методе заштите.

Оригинална теоријска разматрања, анализа резултата нумеричких симулација, као и сложено експериментално истраживање и изведени закључци омогућили су да се у докторској дисертацији на квалитетан начин изврши анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења.

3.4. Оцена примењивости и верификације остварених резултата

У докторској дисертацији су комбиноване теоријске, експерименталне и нумеричке методе са циљем развоја новог и оригиналног испитивања утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике директног атмосферског пражњења. Извршене анализе и добијени закључци треба да допринесу бољем разумевању одређивања могућих тачака удара грома у области прихватног система на елисама ветротурбина и пројектовању ефикаснијих заштитних громобранских система елиса. Велики број специфичности атмосферског пражњења у присуству ветроелектрана које су први пут у свету истражене током израде докторске дисертације олакшаће даљи развој метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења.

С обзиром да је скалирање свих битних величина током експерименталног истраживања на моделу ветротурбине извршено на основу теорије сличности и применом описане нове методологије, добијени резултати се могу применити на ветроелектранама великих снага у реалним условима, и на тај начин су у потпуности применљиви у пракси. Такође, развој оригиналне методе и процедура експерименталне верификације утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике директног атмосферског пражњења у зони прихватног система на елисама омогућавају независно понављање и проверу свих добијених резултата.

3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

У докторској дисертацији кандидат је испољио изузетно познавање проблематике из области заштите ветроелектрана од директног атмосферског пражњења, а показана систематичност у аналитичком приступу, идентификацији проблема, развоју нових физичких модела и процедура високонапонског испитивања и решавању практичних проблема указују да је кандидат способан за самосталан научни и стручни рад. Током израде докторске дисертације, на основу објављених научних радова у врхунским светским часописима, обављеним научно-стручним усавршавањима у иностранству, као и кроз вишегодишње ангажовање на међународним и домаћим научним и стручним пројектима, кандидат се успешно развио у самосталног истраживача из области обновљивих извора енергије, технике високог напона и громобранске заштите.

4. Остварени научни допринос

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У докторској дисертацији „Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења” остварени су следећи научни доприноси:

- 1) Сprovedено је оригинално експериментално истраживање анализе утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике атмосферског пражњења.
- 2) За потребе истраживања конструисан је оригиналан физички модел са лучном електродом која симулира врх скоковитог лидера у претпоследњем скоку. Овом методом је постигнуто да ударно растојање између модела врха скоковитог лидера и елисе буде независно од њеног положаја. Иницирање развоја пражњења ка елисама описаног модела ветротурбине је независно од позиције елиса.
- 3) Користећи модел ветротурбине мале снаге са хоризонталном осом и са инсталираним громобранским заштитним системима на елисама (умањена верзија савремене ветротурбине) у лабораторијским условима је детектовано благо смањење броја директних удара у зони прихватног система на елисама ветротурбине када се ротор обртао, у односу на случај када су елисе биле стационарне.
- 4) Током експерименталних истраживања запажени су одређени ефекти:
 - У ваздушном зазору између лучне електроде и ротирајућих елиса ветротурбине истовремено са повећањем брзине обртања елиса забележено је смањење вредности резултујућег електричног поља и пораст 50% прескочних напона оба поларитета добијених на основу методе горе-доле.
 - Упоредо са повећањем ротационе брзине елиса долази до померања тачака спајања лидера са врхова одговарајућих елиса и лучне електроде нешто ближе ка врховима елиса.
 - Примећена је повећана дисперзија прескочних напона и приметно изражена транзијентност ударних напона током ротирања елиса ветротурбине. Наведени ефекти постајали су доминантнији са повећањем ротационе брзине и били су изражени код експеримената са позитивним пражњењима.
- 5) Лабораторијско истраживање је показало да се добијени резултати на моделу у стационарном стању (када елисе мирују) у потпуности поклапају са резултатима истраживања која су извршена на елисама пуне величине. Ово је изузетно битна чињеница, јер потврђује тачност добијених резултата и приликом експеримената са ротирајућим елисама модела ветротурбине. Такође, описани експерименти се могу обављати и у мањим високонапонским лабораторијама, што је од велике важности.
- 6) Ефикасност примењених громобранских заштитних система на умањеном моделу ветротурбине је била релативно висока и добијени резултати су у великој мери у складу са заштитом ветротурбина од атмосферског пражњења у реалним условима. Показано је да прихватни систем у облику проводних капа на врховима елиса има већу ефикасност заштите у односу на рецепторски заштитни прихватни систем. Електрично пражњење негативног поларитета са лучне електроде је погађало проводне капе/рецепторе у скоро 100% случајева и при свим разматраним брзинама ротације елиса. Са друге стране, позитивна пражњења у више наврата су изазивала оштећења/напрснућа на изолационој површини елиса, јер су се удари дешавали мимо заштитних система у облику капа/рецептора.
- 7) На основу испитивања на физичком моделу, анализе различитих концепата заштите ветротурбина од удара грома и симулације рада ветроелектрана у реалним условима, предложен је унапређен принцип заштите ветроелектрана од атмосферског пражњења.
- 8) Предложен је оригиналан начин естимације очекиваног броја година рада ветротурбине без оштећења елиса за различите примењене методе заштите од

директног удара грома, узимајући у обзир стохастичку природу ветра, карактеристике атмосферског пражњења и кераунички ниво потенцијално погодних локација за изградњу ветроелектрана, при чему су анализе извршене за неколико карактеристичних брзина обртања елиса.

- 9) Добијени општи резултати и закључци се могу применити на актуелним ветротурбинама које су у погону у реалним условима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је у докторској дисертацији спровео истраживање утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике директних атмосферских пражњења у ветрогенератор. У почетној фази истраживања развијен је оригиналан физички модел, симулацијама су извршене све потребне провере, а затим је експериментално, на реалном ветрогенератору, потврђена изложена идеја.

Оригинална анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења, која је спроведена у току израде докторске дисертације, представља важан корак у истраживању у области даљег развоја громобранске заштите елиса ветроелектрана, јер јасно казује да ротација елиса има приметан утицај на учесталост и карактеристике атмосферског пражњења у зони прихватног система. Зато је неопходно извршити корекције постојећих нумеричко-софтверских метода за предикцију могућих тачака удара грома на врховима елиса, како би се узело у обзир да се током процеса атмосферског пражњења ветроелектрана не може третирати као потпуно статички објект, што је до сада био случај. Примењене оригинално развијене процедуре високонапонског испитивања показале су већу тачност и поузданост од постојећих симулационих метода на виртуелним моделима ветротурбина. Чињеница да се резултати предложених процедура могу успешно применити у потпуно реалним условима је потврда оправданости изложене идеје.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

Добијени резултати су у потпуности применљиви у пракси, јер на основу теорије сличности све анализе које су спроведене на умањеном моделу ветротурбине, који је веран оригиналу, одговарају реалним условима приликом рада савремених ветротурбина. Због изузетне сложености истраживања и мултидисциплинарног приступа потребно је додатно проверити и потврдити добијене резултате у пракси. Предложене методе за процену угрожености елиса ветротурбине од удара грома и развијени принципи испитивања до сада нису постојали, па се може очекивати да буду шире коришћени приликом даљег развоја громобранске заштите ветроелектрана.

4.4. Верификовани научни доприноси

Допринос докторске дисертације је верификован кроз рад који је кандидат објавио у врхунском научном часопису са SCI листе (M21):

3. Radičević, M. Savić, „*Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges*“, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 26, no. 4, pp. 1181–1190, 2011., DOI: 10.1109/TEC.2011.2162240.

Списак осталих радова који су у непосредној вези са темом докторске дисертације и који су резултат вишегодишњег истраживања кандидата, а који су публиковани у међународним и домаћим часописима, или су саопштени на међународним и домаћим конференцијама и штампани у целини, дат је у докторској дисертацији.

5. Закључак и предлог

Докторска дисертација кандидата мр Бранка М. Радичевића, под називом „Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења” садржи оригиналне научне доприносе, који се могу примењивати у пракси. У току израде докторске дисертације кандидат је показао да поседује способност да развија оригиналне методе испитивања и заштите ветроелектрана од директног атмосферског пражњења, а посебан допринос је испитивање громобранске заштите ветрогенератора у условима ротације елиса.

Комисија са задовољством констатује да је кандидат успешно завршио планирано истраживање. Докторска дисертација је написана у складу са стандардима у научно-истраживачком раду, а кандидат испуњава све формалне и суштинске услове и критеријуме предвиђене Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упуту Извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидату одобри јавна одбрана.

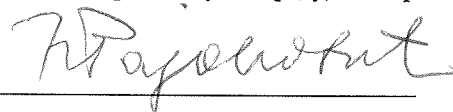
У Београду, **23.03.2012.** године

Потписници извештаја – комисија:



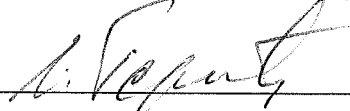
др Милан С. Савић, редовни професор

Електротехничког факултета Универзитета у Београду, ментор



др Никола Рајаковић, редовни професор

Електротехничког факултета Универзитета у Београду



др Љубомир Герић, редовни професор

Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду



др Златан Стојковић, редовни професор

Електротехничког факултета Универзитета у Београду