

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Подобност теме и кандидаткиње Кристине Лазовић за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр.: 1960/16 од 06.11.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Кристине Лазовић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом:

Развој метода и техника за унапређење флексибилности ветроелектрана у савременим електроенергетским системима

(енг. *Development of Methods and Techniques for Enhancing the Flexibility of wind Power Plants in Modern Power Systems*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидаткињи

1.1. Биографски подаци

Кристина Б. Лазовић је рођена у Брусу, 06. марта 1994. године, где је завршила основну школу и гимназију, општи смер. Учествовала је на такмичењима из математике и физике, а најзначајнија признања која је освојила су трећа награда на Српској физичкој олимпијади и бронзана медаља на међународном такмичењу IJSO (eng. International Junior Science Olympiad), у Бакуу, Азербејџан, 2009.године. На крају основне и средње школе је награђена Вуковом дипломом и признањем „Бак генерације”.

Електротехнички факултет уписује 2013. године. Ангажована је као студент демонстратор на Катедри за општу електротехнику на предмету Лабораторијске вежбе из основа електротехнике, током школске 2014/2015 и на Катедри за електроенергетске системе, на предметима Обновљиви извори енергије током школске 2016/2017. Одредила је тромесечну стручну праксу у предузећу Електромреже Србије. У току основних студија учествовала је на такмичењу Електријада где је освојила прво место из Анализе електроенергетских система 2016. године. Од стране Електротехничког факултета је награђена као најбољи студент на модулу Енергетика 2014. године. Основне студије је завршила са просечном оценом 9.88.

Мастер академске студије уписала је на Електротехничком факултету, модул Електроенергетски системи, смер Мреже и системи. Диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства је стекла септембра 2018.године. Мастер студије је завршила са просечном оценом 10.0. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду уписала је 2018. године. Добитник је стипендије ЕТФ BAFA USA као студент докторских студија за школску 2018/2019.

Од 01.02.2018. запослена је на Електротехничком факултету у Београду као сарадник у настави, а од 01.02.2019. као асистент са пуним радним временом. Ангажована у извођењу наставе из предмета Елементи електроенергетских система, Анализа електроенергетских система 1, Обновљиви извори енергије на основним и Софтвер за обновљиве изворе енергије и Планирање електроенергетских система на мастер академским студијама.

Течно говори енглески језик.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидаткиња је уписала докторске студије на Електротехничком факултету у Београду школске 2018/2019. године на модулу Електроенергетске мреже и системи. Током докторских студија испунила је све обавезе и положила испите предвиђене наставним планом.

Р.Бр.	Назив предмета/обавезе	Оцена	ЕСПБ
1	Интеграција обновљивих извора у дистрибутивни систем	10	9
2	Ветроенергетика и соларна енергетика	10	9
3	Управљање електроенергетским системима	10	9
4	Планирање рада електроенергетских система у интерконекцији	10	9
5	Поузданост електроенергетских система	10	9
6	Увод у научни рад	10	6
7	Методе оптимизације у електроенергетским системима	10	9
8	Дистрибутивни системи - оптимално планирање и експлоатација	10	9
9	Стабилност електроенергетских система	10	9
10	Оптимално планирање електроенергетских система	10	9
11	Студијски истраживачки рад I		15
12	Научно стручни рад		3
13	Студијски истраживачки рад II		15
	Укупно		120

У даљем тексту је наведен списак публикација кандидаткиње Кристине Лазовић.

Радови публиковани у часописима међународног значаја

- **K. Lazović**, Ž. Đurišić, Minimizing wind power plant imbalances using freight train gravity energy storage and intraday forecast updates, Journal of Energy Storage, Vol. 126, No. 117015, Aug, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117015>. (ISSN: 2352-1538, IF: 9.8, M21a)
- **K. Džodić**, Ž. Đurišić, The permanently rotating wind turbines: a new strategy for reliable power system frequency support under low and no wind conditions, Frontiers in Energy Research, Vol. 11-2023, May, 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1176680>. (ISSN: 2296-598X, IF: 3.858, M22)

Радови саопштени на међународним конференцијама

- М. Žerajić, Т. Šiljegović, Р. Gorašević, Ђ. Lazović, **K. Lazović**, Ž.Đurišić, Participation of wind farms in voltage control in the transmission grid of Serbia, WindEurope Conference, Copenhagen, Apr, 2025. (M34)
- **K. Džodić**, Ј. Krstivojević, Reliability enhancement through optimal placement of photovoltaic power plant and battery energy storage in distribution system, 22th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24), Bilbao, Spain, 2024. (M33)
- K. Obradović, **K. Džodić**, Ž. Đurišić, Mutual influence of wind power plants on the production losses due to the wake effect, case study South Banat region - Serbia, WindEurope Summit 2022, Bilbao, Spain, Apr, 2022. (M34)

- Ž. Đurišić, **K. Džodić**, Đ. Lazović, N. Arsenijević, Free wind operation of wind turbine for permanent power system frequency support, WindEurope Summit 2019, Bilbao, Spain, Apr, 2019. (M34)

Радови публиковани у часописима ван SCI листе

- **K. Цодић**, Ђ. Лазовић, А. Савић, М. Жарковић, Стохастичка анализа рада и развоја електроенергетског система Србије, ЕНЕРГИЈА, ЕКОЛОГИЈА, ЕКОНОМИЈА бр.1-2, Март, 2020. ISSN 0354-8651, (M51).
- Ђ. Лазовић, Б. Шкрбић, **K. Цодић**, Ж. Ђуришић, Декарбонизација транспортног сектора кроз интеграцију фотонапонских система и електричних возила, ЕНЕРГИЈА, ЕКОЛОГИЈА, ЕКОНОМИЈА бр.1-2 Март 2020. ISSN 0354-8651, (M51).

Радови саопштени на домаћим конференцијама

- М. Ашћерић, **K. Лазовић**, Ж. Ђуришић, Допринос вештачког инерцијалног одзива ветроелектрана системској инерцији у перспективном електроенергетском систему Србије, 37. Саветовање CIGRE Србија 2025, С2 - 11, Копаоник, Мај, 2025. (M63)
- Ж. Ђуришић, **K. Лазовић**, Ђ. Лазовић, М. Ашћерић, Трошкови ангажовања ветроелектрана за пружање реактивне подршке електроенергетском систему, XXIV Међународни симпозијум INFOTEN, 132 - 135, Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет, Јахорина, Март, 2025. (M63)
- Ђ. Лазовић, Б. Шкрбић, **K. Лазовић**, Ж. Ђуришић, Ефикасност балансирања ветроелектрана у Јужном Банату коришћењем интегрисаних батеријских складишта прописаног капацитета, 37. Саветовање CIGRE Србија 2025, Копаоник, Мај, 2025. (M63)
- Б. Шкрбић, **K. Лазовић**, Ђ. Лазовић, Ж. Ђуришић, Оптимизација структуре хибридне ветар-соларне електране за боље искоришћење расположивог капацитета преносне мреже у тачки прикључења, 37. Саветовање CIGRE Србија 2025., Копаоник, Мај, 2025. (M63)
- **K. Цодић**, Ж. Ђуришић Унапређење флексибилности ветроелектране Крново применом интегрисаног гравитационог складишта енергије, 1. Саветовање CIRED Црна Гора, СТК 4, Мај, 2024. (M63)
- **K. Цодић**, Ђ. Лазовић, М. Ашћерић, Ж. Ђуришић, Ветроелектрана са топлотним складиштем енергије, XXIII Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEN, 145-150, Јахорина, Март, 2024. (M63)
- М. Ашћерић, **K. Цодић**, Ж. Ђуришић, Утицај интеграције ветроелектрана на смањење инерције у електроенергетском систему Србије, XXII Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEN, 98 - 103, Јахорина, Март, 2023. (M63)
- Ж. Ђуришић, Ђ. Лазовић, **K. Цодић**, Б. Шкрбић, И. Батић, М. Радовановић, Б. Поповић Здравковић, Б. Ковачевић, М. Ђорђевић, Анализа потребних капацитета за балансирање обновљивих извора енергије у ЕЕС-у Србије за постојеће и перспективно стање 2030. године – I део: методологија, 36. Саветовање CIGRE Србија 2023, СТК Ц2 - 01, Златибор, Мај, 2023. (M63)
- Ж. Ђуришић, Ђ. Лазовић, **K. Цодић**, Б. Шкрбић, И. Батић, М. Радовановић, Б. Ковачевић, Б. Поповић Здравковић, А. Латиновић, Анализа потребних капацитета за балансирање обновљивих извора енергије у ЕЕС-у Србије за постојеће и перспективно стање 2030. године – II део: резултати, 36. Саветовање CIGRE Србија 2023, СТК Ц2 - 02, Златибор, Мај, 2023. (M63)
- Ђ. Лазовић, **K. Цодић**, А. Савић, В. Антонијевић, Ж. Ђуришић, М. Дилпарић, Н. Врцел, А. Латиновић, Д. Суруџић, Утврђивање оптималног ангажовања производних јединица ЛП

ЕПС ради балансирања ЕЕС за различите сценарије инсталисаних капацитета ОИЕ, 36. Саветовање CIGRE Србија 2023, СТК Ц2 - 06, Златибор, Мај, 2023. (М63)

- **К. Цодић**, Ђ. Лазовић, А. Савић, В. Антонијевић, Ж. Ђуришић, М. Дилпарић, Н. Врцел, Д. Суруцић, М. Ђорђевић, Процена трошкова балансне резерве производних јединица ЈП ЕПС ради балансирања ЕЕС за различите сценарије инсталисаних капацитета ОИЕ, 36. Саветовање CIGRE Србија 2023, СТК Ц2 - 07, Златибор, Мај, 2023. (М63)

- М. Ашћерић, **К. Цодић**, Ж. Ђуришић, Анализа смањења системске инерције у ЕЕС-у Србије за различите сценарије развоја инсталисаних капацитета ОИЕ и допринос ветроелектрана регулацији фреквенције, 36. Саветовање CIGRE Србија 2023, СТК Ц2 - 04, Златибор, Мај, 2023. (М63)

- Т. Шиљеговић, М. Жерајић, **К. Цодић**, Ж. Ђуришић, Анализа потенцијала ветроелектрана за регулацију напона у деловима преносне мреже Србије са критичним напонским приликама, 36. Саветовање CIGRE Србија 2023, СТК Ц2 - 05, Златибор, Мај, 2023. (М63)

- М. Ђорђевић, А. Латиновић, Д. Суруцић, **К. Цодић**, Ђ. Лазовић, Ж. Ђуришић: Изазови интеграције значајних капацитета обновљивих извора енергије у електроенергетски систем, 20. симпозијум CIGRE Србија, Ц2-10, Бајина Башта, Октобар 2022. (М63)

- К. Обрадовић, **К. Цодић**, Ж. Ђуришић, Анализа међусобног утицаја ветроелектрана у јужном Банату на смањење производње услед ефекта заветрине, 35. саветовање CIGRE Србија, Реф. Р - Ц6-05, Златибор, Октобар, 2021 (М63)

- **К. Цодић**, Д. Тодоровић, М. Жерајић, Ж. Ђуришић, Анализа реалних капацитета надземних водова за прикључење ветроелектрана и соларних електрана велике снаге, 35. саветовање CIGRE Србија, Реф Р - Б2-06, Златибор, Октобар, 2021. (М63)

- Ђ. Лазовић, **К. Цодић**, Ж. Ђуришић: Анализа економске оправданости инвестирања у соларну електрану са вертикално постављеним бифацијалним фотонапонским модулима у перспективним условима слободног тржишта, 36. саветовање Енергетика, Златибор, Јун 2021. (М63)

- **К. Цодић**, Д. Шошић, Оптимално место и време уградње уређаја за аутоматизацију дистрибутивне мреже, 12. Саветовање Саветовање CIGRE Србија, СТК-5 Р-5.02 Врњачка Бања, Србија, Септембар, 2021 (М63)

- **К. Цодић**, Ј. Крстивојевић, Одређивање оптималног броја и локација дистрибуираних извора енергије за побољшање показатеља поузданости у дистрибутивној мрежи, 12. Саветовање CIGRE Србија, СТК-4 Р-4.02, Врњачка Бања, Септембар, 2021 (М63)

- **К. Цодић**, Ђ. Лазовић, Ж. Ђуришић, Анализа капацитета ветроелектрана за подршку фреквенцијској стабилности електроенергетског система, 34. саветовање CIGRE Србија, Реф Р. Ц2-03, Врњачка бања, Јун, 2019. (М63)

- Ђ. Лазовић, **К. Цодић**, Ж. Ђуришић, Утицај напонског одзива потрошње на напонске прилике и ефикасност потрошње у активним дистрибутивним мрежама, XVIII Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEN, 107-111, Јахорина, Март, 2019. (М63)

- **К. Цодић**, Оптималан распоред рада уређаја у кући која се напаја из фотонапонског система, XVIII Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEN, 524-530, Јахорина, Март 2018. (М63)

- Ђ. Лазовић, **К. Цодић**, Ј. Стојковић, М. Копривица, А. Тасић, П. Стефанов: Одређивање скупа синхроних фазорских мерења за идентификацију електромеханичких осцилација, 18. симпозијум CIGRE Србија, Ц2-05, Зрењанин, Октобар 2018. (М63)

- **К. Цодић**, Ђ. Лазовић, Ј. Стојковић, М. Копривица, А. Тасић, П. Стефанов: Примена синхронизованих фазорских мерења у идентификацији електромеханичких осцилација, 18. симпозијум CIGRE Србија, Р. Ц2-04, Зрењанин, Октобар 2018. (М63)

- А. Леповић, К. Цодић, Управљање потрошњом у паметној кући са инсталираним ПВ системом, XVI Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEN, Јахорина, Март 2017. (М63)

У наставку је наведена листа неких значајнијих пројеката и студија кандидаткиње Кристине Лазовић:

- Развој енергетски самоодрживе микромреже са обновљивим изворима енергије и интегрисаном електроенергетском и термоенергетском инфраструктуром, наручилац: Alliance of national and international science organizations for the belt and road regions (ANSO), China, Август, 2025.

- Анализа потенцијала варијабилности погонских параметара елемената преносног система Србије при различитим погонским стањима и амбијанталним условима, наручилац: Акционарско друштво "Електромрежа Србије" Београд, Март, 2024.

- Анализа потенцијала ветроелетрана и фотонапонских електрана за пружање помоћних услуга регулације напона и фреквенције у ЕЕС Србије, наручилац: Акционарско друштво "Електромрежа Србије" Београд, Фебруар, 2024.

- Временски профил производње шест ветроелектрана на територији Србије укупне инсталисане снаге 1220MW, наручилац: BA TRADE DOO, Новембар, 2023.

- Конференција Powertech Belgrade 2023, наручилац: Министарство науке, технолошког развоја и иновација, Мај, 2023.

- Студија техно-економске оправданости изградње фотонапонске електране на крову зграде Факултета драмских уметности у Београду, наручилац: Факултет драмских уметности, Мај, 2023.

- Израда идејног решења фотонапонске електране Голубачка тврђава, наручилац: Унион Инжењеринг ДОО Београд, Март 2023.

- Студија оправданости изградње соларне електране Соколац на подручју општине Соколац, наручилац: Глобал Траде Солутионс доо Београд, Децембар, 2022.

- Студија техно-економске оправданости изградње фотонапонског панела снаге 490 kWp на крову зграде Техничких факултета Универзитета у Београду, наручилац: Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, Мај, 2022.

- Анализа ветроенергетског потенцијала, оптимизације просторног распореда ветроагрегата и процена годишње производње ветроелектрана на територији општине Алексинац и Ражањ, наручилац: BA TRADE DOO, Март, 2022.

- Процена производње Ветроелектрана "Бечеј 1" и "Бечеј 2" за различите висине стубова ветроагрегата, наручилац: BA TRADE DOO, Фебруар, 2022.

- Утврђивање начина оптималног ангажовања производних јединица ЈП ЕПС ради балансирања ЕЕС у условима интеграције обновљивих извора енергије с освртом на захтеве и могућности унапређења постојећег регулаторног оквира, наручилац: Јавно предузеће "Електропривреда Србије" Београд, Април, 2021.

- Прелиминарна анализа могућности коришћења производних јединица планираних по НЕРП за Опт-Оут, за пружање помоћне услуге регулације напона, наручилац: Електротехнички институт "Никола Тесла" АД, Београд, Септембар, 2020.

- Анализа капацитета, оптималне структуре и услова прикључења енергетског комплекса соларне електране и ветроелектране на Пештерској висоравни, наручилац: New Tech Group AG Switzerland, Септембар, 2020.

- Унапређење коришћења информационих технологија и практичних вештина у настави из обновљивих извора енергије, наручилац: Министарство просвете, науке и технолошког развоја, Октобар, 2019.

Дана 05.12.2025. године на Електротехничком факултету у Београду, Кристина Лазовић је имала јавни усмени испит о подобности теме и кандидаткиње пред комисијом у саставу:

1. др Александар Савић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Владан Дурковић, доцент, Универзитет Црне Горе – Електротехнички факултет
3. др Богдан Брковић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Комисија је једногласно закључила да кандидаткиња испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације и оценила испит оценом задовољно.

1.3. Оцена подобности кандидаткиње за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада кандидаткиње Кристине Лазовић и узимајући у обзир претходно наведене чињенице, Комисија је стекла увид у способности и научно-истраживачки рад кандидаткиње, те констатује да је кандидаткиња:

- Положила све испите и завршила све обавезе предвиђене наставним планом и програмом и тиме остварила 120 ЕСПБ бодова.
- Јавно одбранила испит о подобности теме и кандидата 5.12.2025. године пред комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду.
- Публиковала укупно тридесет и три рада, од којих два у истакнутим међународним часописима, два у часописима националног значаја, четири на међународним скуповима, и двадесет пет на скуповима националног значаја, што је квалификује за научни рад.
- Има вишегодишње искуство у раду на међународним и домаћим пројектима у вези са развојем пројеката ветроелектрана и анализом њихових могућности за пружање помоћних услуга, као и истраживачком раду на тему развоја нових методологија за унапређење флексибилности ветроелектрана и смањењу негативних утицаја њихове интеграције на систем.

Комисија закључује да кандидаткиња Кристина Лазовић у сваком погледу испуњава услове за рад на предложеној теми.

2. Предмет, циљ и значај истраживања

Флексибилност електроенергетског система или појединачног ресурса у њему је способност промене рада током ограниченог времена као одговор на спољне сигнале, без изазивања непланираних поремећаја [1]. У традиционалним електроенергетским системима, флексибилност се обезбеђивала оперативним планирањем производње и резерви од стране конвенционалних производних јединица. Међутим, услед све већег удела обновљивих извора енергије и истовременог повлачења електрана на фосилна горива обезбеђивање потребног нивоа флексибилности постаје сложеније и од кључне важности за стабилан и поуздан рад система [2]. Пружање услуга флексибилности, које су у традиционалном електроенергетском систему биле доминантно обезбеђиване од стране конвенционалних електрана, морају, због њиховог потискивања и гашења у процесу енергетске транзиције, бити, у значајној мери, пренесене на варијабилне обновљиве изворе енергије који постају доминантне производне јединице у савременим електроенергетским системима. То значи да валоризација обновљивих

извора енергије неће бити само одређена количином произведене енергије, већ и мерама флексибилности, као што су могућност обликовања временског профила активне и реактивне снаге инјектирања у циљу пружања услуга регулације баланса активних снага и управљања напонским приликама у електроенергетском систему.

Ветроенергетика представља један од најважнијих сектора у савременој енергетици, обезбеђујући производњу електричне енергије на еколошки прихватљив и одржив начин. Међутим, интермитентна природа енергије ветра, самим тим и производње ветроелектрана се одражава на функционисање електроенергетског система, између осталог, кроз потребу за ангажовањем веће балансне резерве [3], веће трошкове рада [4], проблеме са фреквенцијском стабилношћу [5] и израженије флукуације напона [6]. Предмет истраживања у овој дисертацији је смањење поменутих негативних ефеката кроз имплементацију иновативних стратегија и техника управљања ветроагрегатима и интеграцију са различитим системима за складиштење енергије.

Оператори система постављају пред ветроелектране све строжије захтеве у погледу балансне одговорности и техничке опремљености за учешће у регулацији фреквенције и напона, не би ли преузели улогу пружаоца помоћних услуга, коју су традиционално обављали синхрони генератори [7, 8]. Ипак, јединствене карактеристике ветроелектрана међу којима су: специфичност технологија ветроагрегата, непредвидивост производње и брзе промене излазне снаге чине их ресурсом ограничене флексибилности [9]. У том погледу, као њихов основни недостатак истиче се зависност од интермитентне енергије ветра, и што се у условима када ветра нема, капацитет за обезбеђивање подршке систему у виду инерције или реактивне снаге смањује.

У погледу фреквенцијске стабилности, инерција обртних маса машина синхронизованих на мрежу је један од најважнијих показатеља јер од величине инерције зависи брзина промене фреквенције непосредно након дебаланса активних снага производње и потрошње. Из тог разлога, инерцијални одзив система након поремећаја је од кључног значаја за одржавање транзијентне стабилности електроенергетског система. Ветроагрегати су виђени као носиоци системске инерције у будућности, јер је велика количина кинетичке енергије складиштена у ветротурбини и ветрогенератору и иста се, може брзо ослободити применом одговарајућег управљачког алгорита, [10, 11]. Међутим, ниво ускладиштене кинетичке енергије у обртним масама ветрогенератора зависи од тренутне брзине ветра, и уколико до поремећаја дође у условима када је ветар слаб, ветроагрегати не могу да допринесу кроз инјектирање додатне енергије.

Интеграција ветроелектрана и фотонапонских електрана захтева даљи развоја преносне мреже, што резултује изградњом високонапонских интерконективних далековода који треба да обезбеде евакуацију и транзит снага производње дисперзованих обновљивих извора енергије према центрима потрошње. С обзиром на то да ове производне јединице имају релативно низак фактор искоришћења капацитета, оптерећење далековода у преносној мрежи је интермитентно и доводи до честих периода ниског оптерећења, испод прага природне снаге, што резултује појавом превисоких напона са којима се суочавају оператори преносног система у многим земљама. Осим тога, флукуације брзине ветра, самим тим и производње ветроелектране узрокују колебања напона која доводе до проблема одржавања квалитета електричне енергије у прикључној мрежи. Решавање проблема напонских прилика у преносној мрежи је директно повезано са обезбеђивањем ресурса реактивне подршке. Преносни систем често не може да обезбеди адекватну реактивну подршку због локалног карактера напонске регулације, и губитака услед преноса реактивних снага. Због тога оператори система од ветроелектрана захтевају да могу да обезбеде и подршку у реактивној

снази [12, 13]. Савремени ветроагрегати имају способност управљања реактивним снагама [14], међутим, реактивни лимити ветроелектрана се такође мењају са условима ветра [15], што ограничава и условава њихову доступност са метеоролошким условима. Са друге стране, пружање реактивне подршке ветроелектрана је повезано са додатним трошковима јер за последицу има додатне губитке енергије у интерној мрежи ветроелектране, па је од интереса за оператора електране да се губици минимизују [16, 17], како би се трошкови пружања помоћне услуге реактивне подршке систему минимизовали.

Циљ ове докторске дисертације је представљање метода за унапређење флексибилности ветроелектрана, које омогућавају већу поузданост испоруке услуга инерцијалног одзива и реактивне резерве и ублажавање проблема енергетског дебаланса које праве ветроелектране.

Периоди слабог ветра, када су ветротурбине заустављене, су релативно чести, на копненим локацијама са умереним ветроенергетским потенцијалом су присутни око 10-20% времена, и тада ветроагрегати имају или никакве или доста редуковане способности да пруже подршку систему. У оквиру дисертације ће бити предложен концепт увођења ветроагрегата у моторни рад у условима слабог ветра чиме се обезбеђује да могу да пруже континуирану инерцијалну подршку [18] и стабилну подршку у реактивним снагама. На тај начин, способност ветроелектрана за пружање поменутих услуга постаје независна од тренутних услова ветра. Додатно, циљ је развити и оптимизацију прерасподеле реактивних снага међу ветроагрегатима којом се обезбеђује минимизација губитака у интерној мрежи ветроелектране.

У погледу смањења балансне грешке у генерисању активних снага ветроелектрана у дисертацији ће бити предложен концепт интеграције ветроелектрана са системом за складиштење енергије у виду теретног воза који се креће на нагнутом терену [19]. Научни допринос овог дела дисертације се огледа у представљању теретног воза као медијума за складиште енергије, који, иако се заснива на широко примењиваној технологији електричне вуче, представља иновативни концепт у погледу складиштења електричне енергије. Предложена технологија складишта спада у гравитациона, које се у односу на комерцијално најзаступљеније батеријске системе одликују вишеструко дужим животним веком, мањим ризиком од пожара и тиме што се не заснивају на материјалима који су опасни по околину и чији су глобални ресурси ограничени, због чега је на њих оријентисан и велики број савремених истраживања [20, 21]. У дисертацији ће бити развијена и стратегија управљања складиштем са циљем минимизације енергетског дебаланса који ветроелектрана прави одступајући од претходно уговореног плана рада. Предложени модел управљања ће имати ширу примену у погледу технологија интегрисаних складишта за балансирање производње обновљивих извора.

Значај истраживања у овој дисертацији се огледа у томе што предложене технике и методе омогућавају да ветроелектране поуздано пружају одређене помоћне услуге и да се смање негативни ефекти њихове интеграције у систем. Потребна за активним доприносом ветроелектрана у обезбеђивању сигурности система је све већа што је већи степен декарбонизације електроенергетског система, те ће њихов практични значај бити од нарочите важности у перспективним електроенергетским системима који ће се доминантно ослањати на варијабилне обновљиве изворе енергије. Методе представљене у дисертацији омогућавају да ветроелектране преузимају улогу коју су традиционално имали синхрони генератори, не само у погледу производње енергије, већ и на пољу обезбеђивања захтеваног нивоа флексибилности. О актуелности тематике обрађене у овој дисертацији говори и значајан број радова објављених у међународним научним часописима релевантним за област енергетике током претходних неколико година, од којих су одабрани наведени у наставку:

- [1] M. Z. Degefa, I. B. Sperstad, and H. Sæle, "Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources," *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107022, May 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107022.
- [2] S. Impram, S. Varbak Nese, and B. Oral, "Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey," *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, p. 100539, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100539.
- [3] J. Yan, C. Möhrten, T. Göçmen, M. Kelly, A. Wessel, and G. Giebel, "Uncovering wind power forecasting uncertainty sources and their propagation through the whole modelling chain," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112519, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112519.
- [4] D. Wahdany, C. Schmitt, and J. L. Cremer, "More than accuracy: end-to-end wind power forecasting that optimises the energy system," *Electric Power Systems Research*, vol. 221, p. 109384, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109384.
- [5] K. S. Ratnam, K. Palanisamy, and G. Yang, "Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, p. 109773, May 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109773.
- [6] F. Malik *et al.*, "A Comprehensive Review on Voltage Stability in Wind-Integrated Power Systems," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 644, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17030644.
- [7] L. Li, D. Zhu, X. Zou, J. Hu, Y. Kang, and J. M. Guerrero, "Review of frequency regulation requirements for wind power plants in international grid codes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 187, p. 113731, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113731.
- [8] Y.-K. Wu, S.-M. Chang, and P. Mandal, "Grid-Connected Wind Power Plants: A Survey on the Integration Requirements in Modern Grid Codes".
- [9] S. D. Ahmed, F. S. M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F. A. Al-Sulaiman, and I. M. El-Amin, "Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 10857–10878, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964896.
- [10] Q. Li, B. Ren, W. Tang, D. Wang, C. Wang, and Z. Lv, "Analyzing the inertia of power grid systems comprising diverse conventional and renewable energy sources," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 15095–15105, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.11.022.
- [11] H. Shu, H. Dong, G. Wang, J. Chen, B. Shi, and Y. Tang, "Wind-storage coordinated control strategy for inertia enhancement of high ratio renewable energy power systems," *Journal of Energy Storage*, vol. 97, p. 112998, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112998.
- [12] Y. Zhou, Z. Li, and G. Wang, "Study on leveraging wind farms' robust reactive power range for uncertain power system reactive power optimization," *Applied Energy*, vol. 298, p. 117130, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117130.
- [13] M. Atallah *et al.*, "Supervisory control of reactive power in wind farms with doubly fed induction generator-based wind turbines for voltage regulation and power losses reduction," *Electric Power Systems Research*, vol. 228, p. 110059, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2023.110059.
- [14] Z. Dong, Z. Li, L. Du, Y. Liu, and Z. Ding, "Coordination Strategy of Large-Scale DFIG-Based Wind Farm for Voltage Support With High Converter Capacity Utilization," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 1416–1425, Apr. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.3047273.
- [15] S. Li, "Reactive power limit of wind farm with doubly-fed induction generators and its asymmetric P-Q dependence," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 169, p. 110819, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110819.
- [16] P. Wang *et al.*, "An accelerated asynchronous distributed control for DFIG wind turbines and collection system loss minimization in waked wind farm," *Applied Energy*, vol. 377, p. 124612, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124612.

- [17] J. Han *et al.*, "Power loss minimization-oriented reactive power control for wind farm equipped with distributed energy storages using clustering-based data-driven method," *Energy*, vol. 328, p. 136599, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136599.
- [18] K. Džodić and Ž. Đurišić, "The permanently rotating wind turbines: a new strategy for reliable power system frequency support under low and no wind conditions," *Front. Energy Res.*, vol. 11, p. 1176680, May 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1176680.
- [19] K. Lazović and Ž. Đurišić, "Minimizing wind power plant imbalances using freight train gravity energy storage and intraday forecast updates," *Journal of Energy Storage*, vol. 126, p. 117015, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.117015.
- [20] A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, and M. Bercebar, "A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, p. 112213, May 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112213.
- [21] W. Tong *et al.*, "Solid gravity energy storage: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 53, p. 105226, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105226.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе на којима се заснива истраживање предложене докторске дисертације су:

- Ветроелектрана је у обавези према оператору преносног система да пружа инерцијални одзив при пореметањима фреквенције у преносној мрежи.
- Ветроелектрана је у обавези да обезбеди капацитет за реактивну подршку у тачки прикључења на електроенергетски систем.
- Ветроелектрана је у обавези да преузме балансну одговорност и минимизира одступање снаге производње од плана ињектирања снаге у тачки прикључења на електроенергетски систем.
- Ветроагрегати који се разматрају су савремени комерцијални ветроагрегати, тј. поседују енергетски претварач и имају могућност управљања активном и реактивном снагом (двострано напајана индукциона машина или синхрона машина прикључена преко претварача пуне снаге). Техничке спецификације одабраног ветроагрегата које укључују: криву снаге, оперативни опсег брзина обртања, константу инерције, висину стуба и PQ карактеристику су познате.
- Топологија и параметри кабловске мреже и блок трансформатора ветроелектране, као и просторни распоред ветроагрегата су познати.
- Прогноза производње ветроелектране за дан унапред је позната.
- Претпоставља се доступност мерења производње и брзине ветра ветроагрегата унутар ветроелектране у реалном времену.

4. Методе истраживања

- Прорачун којим се квантификује потенцијал моторног рада ветроагрегата са аспекта обезбеђивања инерцијалног одзива и реактивне подршке у условима слабог ветра.
- Динамичке симулације на основу којих ће бити показан ефекат моторног рада ветроагрегата на промену системске фреквенције услед дебаланса активних снага.
- Примена нелинеарног програмирања за решавање оптимизационог проблема одређивања реактивних лимита и прерасподеле реактивних снага унутар ветроелектране, уз уважавање могућности моторног рада ветроагрегата.
- Анализа техно-економских карактеристика иновативног система за складиштење енергије у виду теретног воза и поређење са другим технологијама складишта.

- Примена метода вештачке интелигенције за краткорочно прогнозирање производње ветроелектране.
- Прорачун којим се квантификује ефикасност предложеног координисаног рада хибридног система ветроелектране и система за складиште енергије у виду теретног воза.
- Прорачун, обрада и приказ резултата ће бити вршени применом програмског пакета MATLAB.
- Демонстрација предложених стратегија управљања биће спроведена кроз рачунарске симулације коришћењем реалних података о моделима ветроагрегата и реалним карактеристикама одабраних ветроелектрана.

5. Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси предложене докторске дисертације су:

- Оригинална стратегија управљања ветроагрегатима кроз увођење у моторни рад при слабом ветру, са циљем обезбеђивања инерцијалног одзива и пружања реактивне подршке.
- Развијен математички модел за одређивање реактивних лимита и оптимизацију прерасподеле реактивних снага унутар ветроелектране са циљем дефинисања капацитета и обезбеђивања захтеване реактивне подршке у тачки прикључења уз минимизацију губитака у интерној мрежи.
- Нови технолошки приступ у складиштењу енергије код ветроелектрана у брдовитим регионима кроз примену теретног воза који се креће на нагнутом терену.
- Развијен алгоритам за координисано управљање интегрисаним системом за складиштење енергије у циљу минимизације снаге дебаланса у тачки прикључења ветроелектране на електроенергетски систем.
- Развијена метода за краткорочно прогнозирање производње ветроелектране применом метода вештачке интелигенције.
- Имплементација развијених модела и стратегија управљања, и анализа ефеката њихове примене на моделима реалних ветроелектрана у региону.

6. План истраживања

Основни кораци истраживања у оквиру предложене докторске дисертације су:

- Упознавање са основним принципима управљања савременим ветроагрегатима и њиховим могућностима за регулацију активне и реактивне снаге.
- Упознавање са методама прогнозирања снаге производње ветроелектрана.
- Дефинисање модела за прорачун перформанси рада ветроагрегата у моторном режиму у погледу снаге потрошње, потенцијала за пружање инерцијалне подршке и реактивне подршке.
- Дефинисање и решавање оптимизационог проблема одређивања расположиве реактивне снаге на нивоу ветроелектране у реалном времену.
- Дефинисање и решавање оптимизационог проблема прерасподеле реактивних снага на нивоу ветроелектране, са циљем минимизације губитака у интерној мрежи.
- Дефинисање и решавање проблема минимизације одступања производње ветроелектране од плана за дан унапред кроз унутардневну трговину и управљање системом за складиштење енергије.
- Демонстрација развијених алгоритама и модела биће спроведена кроз симулације и прорачуне на реалним моделима ветроагрегата и ветроелектрана.

Текст докторске дисертације биће написан на српском језику.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи рад кандидаткиње Кристине Лазовић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема „Развој метода и техника за унапређење флексибилности ветроелектрана у савременим електроенергетским системима” (енглески: „*Development of Methods and Techniques for Enhancing the Flexibility of Wind Power Plants in Modern Power Systems*”) је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом ове докторске дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области Електроенергетски системи.

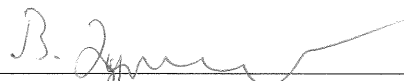
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидаткињи Кристини Лазовић одобри израду докторске дисертације под називом „Развој метода и техника за унапређење флексибилности ветроелектрана у савременим електроенергетским системима” (енглески: „*Development of Methods and Techniques for Enhancing the Flexibility of Wind Power Plants in Modern Power Systems*”), а под менторством др Жељка Ђуришића, редовног професора Електротехничког факултета у Београду.

У Београду, 09. 12. 2025.

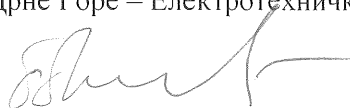
Чланови комисије



др Александар Савић, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Владан Дурковић, доцент,
Универзитет Црне Горе – Електротехнички факултет



др Богдан Брковић, доцент,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет