

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ		
1. Датум и орган који је именовео комисију:		
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :		
1. др Татјана Лончар-Турукало	редовни професор	Телекомуникације и обрада сигнала, 26.04.2022.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		председник
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2. др Милан Рапаић	редовни професор	Аутоматика и управљање системима, 07.10.2021.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3. др Предраг Видовић	ванредни професор	Електроенергетика, 10.07.2020.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4. др Мирсад Ћосовић	доцент	Електроенергетика, 25.09.2019
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Електротехнички факултет, Универзитет у Сарајеву		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
5. др Дејан Вукобратовић	редовни професор	Телекомуникације и обрада сигнала, 01.04.2019.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		ментор
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
6. др Драгиша Мишковић	научни сарадник	Телекомуникације и обрада сигнала, 26.09.2018.

презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије	ментор	
установа у којој је запослен-а	функција у комисији	

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

- Име, име једног родитеља, презиме:
Огњен, Божо, Кундачина
- Датум рођења, општина, држава:
18.10.1994, Невесиње, Босна и Херцеговина
- Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:
Факултет техничких наука, Мастер академске студије, Мастер електротехнике и рачунарства
- Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:
2018, Енергетика, електроника и телекомуникације

III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Примена метода дубоког учења за надгледање и оптимизацију електроенергетских система (Application of Deep Learning Methods in Monitoring and Optimization of Electric Power Systems)

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл. Дисертација садржи 139 нумерисаних страница, 10 табела, 31 слику и 174 референце.

Садржај дисертације по поглављима је следећи:

- Introduction* (Увод)
- Power System State Estimation* (Естимација стања у електроенергетским системима)
- Graph Neural Networks* (Графовске неуронске мреже)
- Graph Neural Network-based State Estimation* (Естимација стања базирана на графовским неуронским мрежама)
- Dynamic Distribution Network Reconfiguration* (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже)
- Reinforcement Learning* (Учење подстицајем)
- Reinforcement Learning based Dynamic Distribution Network Reconfiguration* (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже базирана на учењу подстицајем)
- Conclusions* (Закључци)

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. *Introduction* (Увод)

Прво поглавље дисертације пружа широки преглед тренутног стања у области примене дубоког учења за надгледање и оптимизацију електроенергетских система. Описује се релевантна литература и истраживања која су до сада спроведена у овој области. Поглавље такође уводи предмет истраживања дисертације, а то су проблеми естимације стања електроенергетског система и динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже. Описане су методе које ће бити коришћене - графовске неуронске мреже и учење подстицајем. На крају, даје се преглед доприноса дисертације.

2. *Power System State Estimation* (Естимација стања у електроенергетским системима)

У другом поглављу дисертације пружа се дефиниција два најчешћа приступа решавању проблема естимације стања у преносном електроенергетском систему. Први приступ уважава мерења и из SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) и WAMS (*Wide-Area Monitoring System*) система. Овај приступ се описује системом нелинеарних једначина и традиционално се решава централизовано користећи *Gauss-Newton* метод за итеративно решавање система нелинеарних једначина. Други приступ уважава само фазорска мерења из WAMS система и има линеарну формулацију, што омогућава брже и неитеративно решење проблема.

3. *Graph Neural Networks* (Графовске неуронске мреже)

Треће поглавље дисертације пружа кратак преглед машинског учења на графовима, основе теорије везане за графовске неуронске мреже, и наводи неке практичне аспекте у употреби графовских неуронских мрежа у реалним применама. Главни циљ овог дела је да се пружи контекст потребан за разумевање графовских неуронских мрежа. Кандидат прво уводи дефиницију графа и категоризује најчешће задатке машинског учења на графовима. Затим се даје кратак осврт на традиционалне методе машинског учења на графовима како би се истакла потреба за учењем репрезентација графова. Коначно, пружа се преглед метода учења репрезентација графова, укључујући и графовске неуронске мреже засноване на дубоком учењу.

4. *Graph Neural Network-based State Estimation* (Естимација стања базирана на графовским неуронским мрежама)

У овом поглављу, објашњено је како се графовске неуронске мреже могу применити на проблем линеарне и нелинеарне естимације стања. Са посебном пажњом је обрађен процес трансформације графа електроенергетског система, да би се над њим могао применити предложени метод и дати су детаљи предложене архитектуре графовске неуронске мреже. Такође, анализирана је рачунска сложеност и дистрибуирана имплементација предложеног метода. Тестирањем на електроенергетским системима различитих величина, евалуирана је прецизност предикције предложеног метода у нормалним радним стањима система, као и осетљивост на корумпирана мерења условљена сајбер нападима и губитак улазних података услед неправилности у њиховом преносу.

5. *Dynamic Distribution Network Reconfiguration* (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже)

У овом поглављу, представљају се основе статичке и динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже, истичући њихову важност у софтверу за управљање дистрибутивним системом. Такође, пружа се математичка формулација проблема динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже, која ће бити трансформисана у одговарајућу формулацију учења подстицајем у поглављу 7.

6. *Reinforcement Learning* (Учење подстицајем)

У овом поглављу уводи се основна теорија везана за учење подстицајем, фокусирајући се на следеће концепте: коначни Марковљеви процеси одлучивања (МПО), Q -учење и дубоко Q -учење. Коначни МПО се користе за моделовање ситуација у којима је присутан процес секвенцијалног доношења одлука. Објашњава се основна структура МПО-а, као и примена функција награде и прелаза стања. Затим, фокус се премешта на Q -учење, које представља алгоритам за учење подстицајем за проналажење оптималне стратегије у окружењу заснованом на МПО-у. На крају, разматра се дубоко Q -учење, које је модерна варијанта Q -учења која користи дубоке неуронске

мреже. Објашњава се процес тренирања дубоког Q -учења и предности које оно пружа у постизању бољих перформанси у комплексним окружењима.

7. *Reinforcement Learning based Dynamic Distribution Network Reconfiguration* (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже базирана на учењу подстицајем)

У овом поглављу описује се начин на који се динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже изражава као проблем учења подстицајем. Детаљно се објашњава како се узимају у обзир циљна функција и ограничења, као и алгоритми за обуку и евалуацију предложеног метода заснованог на дубоком Q -учењу. На крају, врши се евалуација перформанси предложеног приступа на три дистрибутивне мреже: тестна мрежа која садржи 15 чворова, стварна велика дистрибутивна мрежа и стандардна *IEEE* мрежа која садржи 33 чвора.

8. *Conclusions* (Закључци)

У завршном поглављу, износе се закључци добијени из истраживања и анализе презентованих резултата. Истичу се главни доприноси дисертације у вези са применом метода дубоког учења за естимацију стања електроенергетског система и динамичку реконфигурацију дистрибутивне мреже. Такође се дискутује о потенцијалним унапређењима и даљим истраживањима која могу произаћи из овог рада. У целини, резултати указују на велики потенцијал примене графовских неуронских мрежа и учења подстицајем у домену електроенергетских система. Овај рад доприноси разумевању и примени ових метода, пружајући основу за даље истраживање и развој напредних техника за надгледање и оптимизацију електроенергетских система.

На основу изложеног, Комисија позитивно оцењује све делове докторске дисертације.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду* који је повезан са садржајем докторске дисертације. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду уредника часописа о томе.

Списак резултата M21 - Рад у врхунском међународном часопису

1. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Graph Neural Networks on Factor Graphs for Robust, Fast, and Scalable Linear State Estimation with PMUs. Sustainable Energy, Grids and Networks, pp. 1–16, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101056>.

Списак резултата M23 - Рад у међународном часопису

1. Ognjen Kundacina, Predrag Vidovic, and Milan Petkovic. Solving dynamic distribution network reconfiguration using deep reinforcement learning. Electrical Engineering, pp. 1–15, 2021, DOI: [10.1007/s00202-021-01399-y](https://doi.org/10.1007/s00202-021-01399-y).

Списак резултата M33 - Саопштење са међународног скупа штампано у целини

1. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Distributed Nonlinear State Estimation in Electric Power Systems using Graph Neural Networks, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, 2022, pp. 1–6, DOI: [10.1109/SmartGridComm52983.2022.9960967](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9960967).

2. Ognjen Kundacina, Miodrag Forcan, Mirsad Cosovic, Darijo Raca, Merim Dzaferagic, Dragisa Miskovic, Mirjana Maksimovic, and Dejan Vukobratovic. Near Real-Time Distributed State Estimation via AI/ML-Empowered 5G Networks, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, 2022, pp. 1–6, DOI: [10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961031](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961031).

3. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, and Dejan Vukobratovic. State estimation in electric power systems leveraging graph neural networks, 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 1-6, 2022, DOI: [10.1109/PMAPS53380.2022.9810559](https://doi.org/10.1109/PMAPS53380.2022.9810559).

4. Ognjen Stanojev, Ognjen Kundacina, Uros Markovic, Evangelos Vrettos, Petros Aristidou, and Gabriela Hug. A reinforcement learning approach for fast frequency control in low-inertia power systems. 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), pp. 1–6. IEEE, 2021, DOI: [10.1109/NAPS50074.2021.9449821](https://doi.org/10.1109/NAPS50074.2021.9449821).

5. Ognjen Kundacina, Gorana Gojic, Mile Mitrovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Supporting Future Electrical Utilities: Using Deep Learning Methods in EMS and DMS Algorithms, 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), pp. 1-6, 2023, DOI: [10.1109/INFOTEH57020.2023.10094173](https://doi.org/10.1109/INFOTEH57020.2023.10094173).

6. Ognjen Kundacina, Gorana Gojic, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Scalability and Sample Efficiency Analysis of Graph Neural Networks for Power System State Estimation, Sixth International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom), Istanbul, 2023, DOI: [10.1109/BalkanCom58402.2023.10167975](https://doi.org/10.1109/BalkanCom58402.2023.10167975).

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

Дубоко учење је показало велики потенцијал за унапређење различитих алгоритама у електроенергетским системима, укључујући алгоритме надгледања као што су процена стабилности и откривање локације кварова, као и алгоритме оптимизације попут прорачуна оптималних токова снага. Један од трендова у овој области је употреба графовских неуронских мрежа и учења подстицајем. У овој дисертацији су ове методе примењене на проблеме естимације стања и динамичке реконфигурације дистрибутивних мрежа и показано је да ове методе испољавају висок ниво тачности и побољшане перформансе у поређењу са традиционално коришћеним техникама. Како се ова област наставља развијати, очекује се да ће бити спроведено више истраживања и развоја у овим областима, са фокусом на имплементацију ових техника у

оквиру стварних електроенергетских система ради демонстрације њиховог практичног потенцијала.

Први део ове дисертације истражује како се графовске неуронске мреже могу искористити за брзо и прецизно решавање линеарног и нелинеарног проблема естимације стања у преносним електроенергетским системима. Евалуацијом обученог модела на новим скуповима улазних мерења потврђује се да предложени приступ може бити коришћен као високо прецизан апроксиматор традиционалних решења за естимацију стања, уз додатну предност линеарне рачунске комплексности током процеса предикције. Модел даје добре резултате и у неопсервабилним сценаријима који нису решиви коришћењем традиционалних метода за естимацију стања. Такође, предложени метод је робустан на мерења са високим варијансама, као и на промене улазних података узрокованих сајбер нападима. Предложени приступ показује скалабилност када се тестира на електроенергетским системима различитих величина, као и ефикасност узорковања јер резултије квалитетним предикцијама чак и када је обучен на малом броју насумично генерисаних података. Коначно, предложени метод надмашује устаљене приступе за естимацију стања засноване на дубоком учењу, гледајући тачност предвиђања и значајно мањи број параметара, посебно како се величина електроенергетског система повећава. Коначно, слични закључци могу се пренети и за примене графовских неуронских мрежа на друге формулације проблема естимације стања. На пример, способност предложеног модела да пружи релевантна решења у неопсервабилним сценаријима указује на то да би он могао бити користан за естимацију стања у традиционално неопсервабилним дистрибутивним системима.

Други део ове дисертације истражује вишекритеријумску формулацију проблема динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже с циљем минимизовања укупних трошкова губитака енергије и манипулација прекидачком опремом. Предложено решење, засновано на дубоком учењу подстицајем, успешно третира динамичку реконфигурацију дистрибутивне мреже као Марковљев процес одлучивања користећи смањен скуп варијабли стања и рачунски ефикасан приступ за уважавање ограничења броја манипулација прекидачком опремом. Резултати су показали да се развијени алгоритам брже извршава од тренутно коришћених метода, уз постизање сличних вредности оптимизационе функције. Предложени метод је успешно извршен користећи податке извода дистрибутивне мреже са великим бројем чворова, показујући његову скалабилност. Ово истраживање доприноси области управљања и оптимизације електроенергетских система пружањем новог и ефикасног решења за динамичку реконфигурацију дистрибутивних мрежа.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Резултати истраживања у овој дисертацији су добро описани и приказани. Процес генерисања података за потребе обуке и евалуације модела заснованих на дубоком учењу је јасно објашњен, а резултати су презентовани кроз слике, табеле и дијаграме који су лако разумљиви и помажу у њиховом тумачењу. Анализа резултата је концизна, логична и добро усмерена на извођење закључака. Такође, резултати су упоређени са ранијим истраживањима, а дати су и предлози за будућа истраживања и практичну примену. Укратко, начин приказа и тумачења резултата истраживања у овој дисертацији је добро структуриран, јасан и подржан одговарајућим визуелним средствима. Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, у Библиотеци ФТН-а, о чему је комисија извештена путем електронске поште.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Да, докторска дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Да, дисертација садржи све битне елементе, укључујући наслов, садржину, резултате и тумачење истих, што се захтева од овакве врсте рада.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Оригинални научни доприноси дела докторске дисертације који се бави естимацијом стања електроенергетских система помоћу графовских неуронских мрежа су следећи:

1. Предложена је оригинална примена графовских неуронских мрежа на фактор графове уместо на традиционални модел електроенергетског система. Ово омогућава флексибилност у интеграцији и искључивању различитих врста мерења на сабирницама и гранама мреже. Представљена је и архитектура графовске неуронске мреже специјализована за примену на фактор графове.

2. Предложени модел има линеарну рачунарску сложеност у односу на величину електроенергетског система, што га чини погодним за примену на велике системе. Такође, његова имплементација је погодна за дистрибуирано извршавање и паралелизацију.

3. Перформансе предложеног модела су евалуиране у различитим сценаријима, укључујући ситуације са недоступним подацима, грешкама у преносу података и злонамерном променом вредности података. Такође, истражена су локална својства модела и показано је да се погоршавање квалитета предикција јавља само у оквиру блиског суседства чвора где се јавља грешка или злонамерна промена података.

Оригинални научни доприноси дела докторске дисертације који се бави динамичком реконфигурацијом дистрибутивне мреже заснованом на учењу подстицајем су следећи:

1. Предложена дефиниција варијабли стања агента заснованог на учењу подстицајем обухвата мањи број величина у поређењу са до сада предложеним приступима. Смањење скупа варијабли стања значајно олакшава примену алгоритма у стварном свету, због мањег броја мерења потребних за извршење алгоритма. Смањење броја варијабли стања такође олакшава тренирање неуронске мреже

која се користи у алгоритму.

2. Предложен је ефикасан начин за уважавање ограничења броја манипулација прекидачком опремом приликом избора акција у алгоритму. Овај приступ је омогућен ажурирањем скупа доступних акција током извршавања итерација обуке алгоритма тако да се ограничења броја манипулација прекидачком опремом не крше. Ово поједностављује функцију награде у односу на приступ који дозвољава акције које крше ограничења, али их кажњава великом негативном наградом. Овај начин избора акција може се применити и на сличне проблеме управљања и оптимизације енергетских система.

3. Предложени алгоритам је скалабилан и ефикасан током извршавања, али захтева високо ангажовање рачунарских ресурса током процеса обуке. У поређењу са до сада коришћеним методама, предложени алгоритам показује приближне или боље вредности оптимизационе функције и смањено време извршавања.

4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?

У дисертацији нису уочени недостаци који би утицали на резултате истраживања.

X ПРЕДЛОГ:

На основу наведеног, комисија предлаже:

- а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана;**
- б) да се докторска дисертација врати кандидату на дораду (да се допуни односно измени);
- в) да се докторска дисертација одбије.

Место и датум: Нови Сад, 13.10.2023.

1. др Татјана Лончар-Турукало,
редовни професор
_____, председник

2. др Милан Рапаић, редовни
професор
_____, члан

3. др Предраг Видовић, ванредни
професор
_____, члан

4. др Мирсад Ћосовић, доцент
_____, члан

5. др Дејан Вукобратовић, редовни
професор
_____, ментор

6. др Драгиша Мишковић, научни
сарадник
_____, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.

DOCTORAL DISERTATION EVALUATION REPORT

I COMMITTEE INFORMATION		
1. Date and body that assigned the committee:		
2. Committee members information in accordance with regulations for doctoral studies at the University of Novi Sad:		
1. dr Tatjana Lončar Turukalo	Full professor	Telecommunications and Signal Processing, 26.04.2022.
Surname and name	Title	Scientific field and date of election
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad		Chair
Institution of employment		Role of committee member
2. dr Milan Rapačić	Full professor	Automatic Control and System Engineering, 07.10.2021.
Surname and name	Title	Scientific field and date of election
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad		Member
Institution of employment		Role of committee member
3. dr Predrag Vidović	Associate professor	Electroenergetics, 10.07.2020.
Surname and name	Title	Scientific field and date of election
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad		Member
Institution of employment		Role of committee member
4. dr Mirsad Ćosović,	Assistant professor	Electroenergetics, 25.09.2019
Surname and name	Title	Scientific field and date of election
Faculty of Electrical Engineering, University of Sarajevo		Member
Institution of employment		Role of committee member
5. dr Dejan Vukobratović	Full professor	Telecommunications and Signal Processing, 01.04.2019.
Surname and name	Title	Scientific field and date of election
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad		Telecommunications and Signal Processing,

		26.09.2018.
Institution of employment		Scientific field and date of election
6. dr Dragiša Mišković	Science associate	Supervisor Telecommunications and Signal Processing, 26.09.2018.
Surname and name	Title	Scientific field and date of election
The Institute for Artificial Intelligence Research and Development of Serbia		Supervisor
Institution of employment		Role of committee member

II CANDIDATE INFORMATION

1. Name, name of one parent, surname:
Ognjen, Božo, Kundačina
2. Date, municipality and country of birth:
18.10.1994, Nevesinje, Bosnia and Herzegovina
3. Name of the academic institution, previously completed academic program and the title acquired:
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, master's academic studies, Master in Electrical and Computer Engineering
4. Year of enrolment into doctoral studies and name of the PhD study program:
2018, Power, Electronic and Telecommunication Engineering

III TITLE OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

**Примена метода дубоког учења за надгледање и оптимизацију електроенергетских система
(Application of Deep Learning Methods in Monitoring and Optimization of Electric Power Systems)**

IV OVERVIEW OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Concisely summarize the dissertation content with indicated number of pages, chapters, figures, images, charts etc.

The doctoral dissertation encompasses 139 numerated pages, 10 tabels, 31 figure, and 174 references.

It consists of the following chapters:

1. *Introduction*
2. *Power System State Estimation*
3. *Graph Neural Networks*
4. *Graph Neural Network-based State Estimation*
5. *Dynamic Distribution Network Reconfiguration*
6. *Reinforcement Learning*
7. *Reinforcement Learning based Dynamic Distribution Network Reconfiguration*
8. *Conclusions*

V EVALUATION OF INDIVIDUAL DISSERTATION CHAPTERS:

1. Introduction

The first chapter of the dissertation provides a broad overview of the current state of the art in the field of deep learning applications for power system monitoring and optimization. The relevant literature and research that have been conducted so far in this area are described. The chapter also introduces the subject of the dissertation research, namely the problems of power system state estimation (SE) and dynamic distribution network reconfiguration (DDNR). The methods that will be used are described: graph neural networks (GNNs) and deep reinforcement learning (DRL). Finally, an overview of the contributions of the dissertation is given.

2. Power System State Estimation

The second chapter of the dissertation provides a definition of the two most common approaches to solving the problem of SE in the transmission power system. The first approach considers measurements from both SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) and WAMS (Wide-Area Monitoring System) systems. This approach is described by a system of nonlinear equations and is traditionally solved in a centralized manner using the Gauss-Newton method for iteratively solving systems of nonlinear equations. The second approach considers only the phasor measurements from the WAMS system and has a linear formulation, which enables a faster and non-iterative solution to the problem.

3. Graph Neural Networks

The third chapter of the dissertation provides a brief overview of machine learning on graphs, the basics of the theory related to GNNs, and lists some practical aspects in the use of GNNs in real-world applications. The main goal of this section is to provide the context needed to understand graph neural networks. The candidate first introduces the definition of a graph and categorizes the most common machine learning tasks on graphs. Then, a brief review of traditional machine learning methods on graphs is given to highlight the need for learning graph representations. Finally, an overview of methods for learning graph representations, including GNNs based on deep learning, is provided.

4. Graph Neural Network-based State Estimation

In this chapter, it is explained how GNNs can be applied to the problem of linear and nonlinear SE. The transformation process of the graph of the power system was treated with special attention, so that the proposed method could be applied to it, and the details of the proposed architecture of the GNN were given. Also, the computational complexity and distributed implementation of the proposed method were analyzed. By testing on power systems of different sizes, the accuracy of the prediction of the proposed method in the normal operating conditions of the system was evaluated, as well as the sensitivity to corrupt measurements caused by cyber attacks and the loss of input data due to irregularities in their transmission.

5. Dynamic Distribution Network Reconfiguration

In this chapter, the basics of static and DDNR are presented, highlighting their importance in distribution management system software. Also, a mathematical formulation of the problem of dynamic reconfiguration of the distribution network is provided, which will be transformed into a suitable formulation in the DRL framework in Chapter 7.

6. Reinforcement Learning

This chapter introduces the basic theory related to deep reinforcement learning (DRL), focusing on the following concepts: finite Markov decision processes (MDPs), Q-learning, and deep Q-learning. Finite MDPs are used to model situations in which a sequential decision-making process is present. The basic structure of an MDP is explained, as well as the implementation of reward functions and state transitions. Next, the focus shifts to Q-learning, which is a DRL algorithm for finding an optimal strategy in an MDP-based environment. Finally, deep Q-learning is discussed, which is a modern variant of Q-learning that uses deep neural networks. An explanation of the process of training deep Q-learning is given, along with the benefits it provides in achieving better performance in complex environments.

7. Reinforcement Learning based Dynamic Distribution Network Reconfiguration

This chapter describes how the dynamic reconfiguration of a distribution network is expressed as a DRL problem. It explains in detail how the objective function and constraints are taken into account, as well as the training and evaluation algorithms of the proposed deep Q-learning based method. Finally, the performance of the proposed approach is evaluated on three distribution networks: a test network containing 15 nodes, a real-world large distribution network, and a standard IEEE network containing 33 nodes.

8. Conclusions

In the final chapter, the conclusions obtained from the research and analysis of the obtained results are presented. The main contributions of the dissertation related to the application of deep learning methods for power system state estimation and DDNR are highlighted. Potential improvements and further research that may result from this work are also discussed. Overall, the results indicate a great potential for the application of GNNs and DRL in the domain of power systems. This work contributes to the understanding and application of these methods, providing a basis for further research and development of advanced techniques for monitoring and optimizing power systems.

Based on the above, the committee positively evaluates all parts of the doctoral dissertation.

VI LIST OF SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL MANUSCRIPTS PUBLISHED OR ACCEPTED FOR PUBLICATION, WHICH ARE BASED ON THE RESULTS OF THE DOCTORAL RESEARCH:

List the manuscript titles, where and when they were published. First, list at least one paper published or accepted for publication in accordance with the *Rules of Doctoral Studies of the University of Novi Sad* that is related to the content of the doctoral dissertation. In the case of manuscripts accepted for publication, list the titles of the works, where and when they will be published and attach a confirmation from the journal editor.

List of results M21 - Paper in a top international journal

1. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Graph Neural Networks on Factor Graphs for Robust, Fast, and Scalable Linear State Estimation with PMUs. Sustainable Energy, Grids and Networks, pp. 1–16, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101056>.

List of results M23 - Paper in an international journal

1. Ognjen Kundacina, Predrag Vidovic, and Milan Petkovic. Solving dynamic distribution network reconfiguration using deep reinforcement learning. Electrical Engineering, pp. 1–15, 2021, DOI: [10.1007/s00202-021-01399-y](https://doi.org/10.1007/s00202-021-01399-y).

Presentation from the international meeting printed in its entirety.

1. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Distributed Nonlinear State Estimation in Electric Power Systems using Graph Neural Networks, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, 2022, pp. 1–6, DOI: [10.1109/SmartGridComm52983.2022.9960967](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9960967). Списак резултата М33 - Саопштење са међународног скупа штампано у целини

2. Ognjen Kundacina, Miodrag Forcan, Mirsad Cosovic, Darijo Raca, Merim Dzaferagic, Dragisa Miskovic, Mirjana Maksimovic, and Dejan Vukobratovic. Near Real-Time Distributed State Estimation via AI/ML-Empowered 5G Networks, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, 2022, pp. 1–6, DOI: [10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961031](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961031).

3. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, and Dejan Vukobratovic. State estimation in electric power systems leveraging graph neural networks, 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 1-6, 2022, DOI: [10.1109/PMAPS53380.2022.9810559](https://doi.org/10.1109/PMAPS53380.2022.9810559).

4. Ognjen Stanojev, Ognjen Kundacina, Uros Markovic, Evangelos Vrettos, Petros Aristidou, and Gabriela Hug. A reinforcement learning approach for fast frequency control in low-inertia power systems. 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), pp. 1–6. IEEE, 2021, DOI: [10.1109/NAPS50074.2021.9449821](https://doi.org/10.1109/NAPS50074.2021.9449821).

5. Ognjen Kundacina, Gorana Gojic, Mile Mitrovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Supporting Future Electrical Utilities: Using Deep Learning Methods in EMS and DMS Algorithms, 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), pp. 1-6, 2023, DOI: [10.1109/INFOTEH57020.2023.10094173](https://doi.org/10.1109/INFOTEH57020.2023.10094173).

6. Ognjen Kundacina, Gorana Gojic, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Scalability and Sample Efficiency Analysis of Graph Neural Networks for Power System State Estimation, Sixth International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom), Istanbul, 2023, DOI: [10.1109/BalkanCom58402.2023.10167975](https://doi.org/10.1109/BalkanCom58402.2023.10167975).

VII CONCLUSIONS AND RESEARCH RESULTS:

Deep learning has demonstrated great potential to improve various tasks in power systems, including monitoring tasks such as stability assessment and fault detection, as well as for optimization tasks like Volt-Var optimization, optimal power flow, etc. One of the current trends in the field is the use of GNNs and DRL. In this thesis, we applied these methods to SE and DDNR problems and shown that these methods exhibit high levels of accuracy and improved performance when compared to traditionally used techniques. As the field continues to evolve, it is expected that more research and development will be conducted in these areas, with a focus on implementing these techniques in real-world power systems to

demonstrate their practical potential.

This thesis presents two main contributions. As the first one, we investigate how GNN can be used as fast and accurate solvers of linear and nonlinear SE. The proposed graph attention network-based model, specialized for the newly introduced heterogeneous augmented factor graphs, recursively propagates the input measurements from the factor nodes to generate predictions in the variable nodes. Evaluating the trained model on unseen data samples confirms that the proposed GNN approach can be used as a highly accurate approximator of the traditional SE solutions, with the added benefit of linear computational complexity at inference time. The model is robust in unobservable scenarios that are not solvable using traditional SE and deep learning methods, such as when individual measurements or entire measurement units fail to deliver measurement data to the proposed SE solver. Furthermore, the GNN model performs well when measurement variances are high or outliers are present in the input data. The proposed approach demonstrates scalability and sample efficiency when tested on power systems of various sizes, as it makes good predictions even when trained on a small number of randomly generated samples. Finally, the proposed GNN model outperforms the more conventional deep learning-based SE approach in terms of prediction accuracy and significantly lower number of trainable parameters, especially as the size of the power system grows. In this work, we focused on using GNNs to solve a linear and nonlinear transmission system SE model. However, the proposed learning framework, graph augmentation techniques, and conclusions can be applied to a wide range of SE formulations. For example, the GNN's ability to provide relevant solutions in underdetermined scenarios suggests that it could be useful for GNN-based SE in highly unobservable distribution systems.

As a second main contribution, this thesis has explored a multi-objective formulation for DDNR, aimed at minimizing the total cost of energy losses and switching operations. The proposed solution, based on DRL, demonstrated successful treatment of DDNR as an MDP through the use of state variables with reduced observability requirements and a computationally efficient approach for handling switching operation constraints. The results showed that the developed algorithm is scalable, performs faster than the state-of-the-art method while yielding comparable cost savings, and is capable of handling large-scale wholereal-world distribution networks. This work contributes to the field of power system control and optimization by providing a novel and effective solution for DDNR.

The committee considers that conclusions are logically derived from the obtained results and clearly reflect the significance and scientific contribution of the conducted research.

VIII ASSESSMENT OF THE METHOD OF PRESENTATION AND INTERPRETATION OF RESEARCH RESULTS:

Explicitly state a positive or negative assessment of the way research results are presented and interpreted.

The research results in this dissertation are well described and presented. The process of generating data for the training and evaluation of deep learning-based models is clearly explained, and the results are presented through figures, tables and diagrams that are easy to understand and aid in interpretation. The analysis of the results is consistent, logical and well moderated in drawing conclusions. Also, the results are compared with earlier research, and suggestions for future research and practical application are given. In short, the way of presentation and interpretation of research results in this dissertation is well structured, clear and supported by appropriate visual means.

The work was checked in the software for plagiarism detection iThenticate, in the Library of the Faculty of Technical Sciences, about which the committee was informed via e-mail.

IX FINAL ASSESSMENT OF DOCTORAL DISSERTATION:

Explicitly state if the dissertation is or is not written in accordance with submitted dissertation proposal, as well as does it contain all the important elements. Provide clear, precise and concise answers to questions 3 and 4

1. Was the dissertation written in accordance with the previously submitted dissertation proposal?

Yes, the dissertation is written entirely in accordance with previously submitted dissertation proposal.

2. Does the dissertation contain all the important elements?

Yes, the dissertation contains all the essential elements, including the title, content, results, and their interpretation, which is required from this type of work.

3. Why does this dissertation provide original contributions to science?

The original scientific contributions of the part of the doctoral dissertation related to the power system state estimation using graph neural networks are as follows:

1. An original application of GNNs to factor graphs instead of the traditional power system model is proposed. This allows flexibility in the integration and exclusion of different types of measurements on buses and network branches. The architecture of a GNN specialized for application to factor graphs is also presented.

2. The proposed model has a linear computational complexity regarding the size of the power system, which makes it suitable for application to large systems. Also, its implementation is suitable for distributed execution and parallelization.

3. The performance of the proposed model was evaluated in various scenarios, including situations with unavailable data, data transmission errors, and malicious data value changes. Also, the local properties of the model were investigated and it was shown that the deterioration of the quality of model's predictions occurs only within the close neighborhood of the node where the error or malicious change of data occurs.

The original scientific contributions of the part of the doctoral dissertation related to the dynamic reconfiguration of the distribution network based on deep reinforcement learning are as follows:

1. The proposed definition of DRL agent's state variable set is smaller compared to the approaches proposed so far. Reducing the set of state variables significantly facilitates the implementation of the algorithm in the real world, due to the smaller number of measurements required to execute the algorithm. Reducing the number of state variables also makes it easier to train the neural network used in the algorithm.

2. An efficient way to satisfy the constraint of the number of switching manipulations during the selection of actions is proposed. This approach is made possible by updating the set of available actions during the execution of algorithm training iterations so that the switching manipulation constraints are not violated. This simplifies the reward function compared to an approach that allows constraint-violating actions but punishes them with a large negative reward. This way of selecting actions can also be applied to similar problems of management and optimization of electric power systems.

3. The proposed algorithm is scalable and efficient during execution, but requires a high computational effort during the training process. Compared to the methods used so far, the proposed algorithm shows approximate or better values of the optimization function and reduced execution time.

Overall, this dissertation makes significant contributions to the field of power system monitoring and optimization, offering novel and effective solutions for both power system state estimation using graph neural networks and dynamic reconfiguration of distribution networks through deep reinforcement learning. The insights and methodologies developed in this research can also be applied to address similar challenges within the broader domain of power systems, enhancing their overall monitoring, control, and optimization.

4. What are the shortcomings of the dissertation and what is their impact on the research results? In the dissertation, no shortcomings were observed that would affect the results of the research.
X PROPOSAL:
Based on the indicated information, the committee is proposes:
<ul style="list-style-type: none"> a) To accept the doctoral dissertation and approve the candidate's defense; б) To return the doctoral dissertation to the candidate for revisions (to supplement or modify); в) To reject the doctoral dissertation.

Place and date: Novi Sad, 13.10.2023.

1. dr Tatjana Lončar Turukalo,
full professor
_____, chair

2. dr Milan Rapačić,
full professor
_____, member

3. dr Predrag Vidović,
associate professor
_____, member

4. dr Mirsad Ćosović,
assistant professor
_____, member

5. dr Dejan Vukobratović,
full professor
_____, supervisor

6. dr Dragiša Mišković,
science associate
_____, supervisor

NOTE: A committee member who does not want to sign the report because they disagree with the majority opinion of the committee is obliged to provide an explanation or reasons why they do not want to sign the report and to sign it accordingly.