

Prof. dr hab. inż. Ihor Shchur
Katedra Elektromechatroniki i
Komputerowych Systemów
Elektromechanicznych
Narodowy Uniwersytet „Politechnika Lwowska”
ul. S. Bandery 12, Lwów 79013, Ukraina
tel. +38 097 5951298, e-mail: ihor.z.shchur@lpnu.ua

Lwów, 17 stycznia 2025 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ... 29. 01. 2025
Zarejestrowano pod nr ... 510.4.6/24
Podpis ...

RECENZJA rozprawy doktorskiej

Autor: **mgr inż. Łukasz Jerzy Topolski**

Tytuł: **Współpraca elektrowni fotowoltaicznych z siecią zasilającą**

Recenzja wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologii Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica.

1. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa zawiera 170 stron. Składa się z 8 rozdziałów oraz załącznika, bibliografia obejmuje 154 pozycji.

2. Aktualność problemu oraz ogólny pogląd na treść rozprawy

W ostatnich latach wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (OZE) do wytwarzania energii elektrycznej zyskało duże tempo rozwoju, co wpisuje się w światowy trend, zgodnie z którym w 2050 roku 90% światowej produkcji energii elektrycznej powinno pochodzić z OZE. W planach tych na pierwszy plan wysuwa się fotowoltaika, która już przewyższa energię wiatrową ze względu na większą dostępność źródła energii, łatwiejszą realizację i znaczne obniżki cen paneli fotowoltaicznych. Zalety te powodują intensywny rozwój zarówno elektrowni słonecznych o dużej mocy, jak i małych i mikroinstalacji fotowoltaicznych. Związana z tym transformacja współczesnej elektroenergetyki rodzi szereg nowych problemów, które należy rozwiązywać równolegle. Wśród tych problemów istotny jest problem współpracy dużej liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych z sieciami dystrybucyjnymi niskiego napięcia, do których one są przyłączane. Właśnie ten realny problem stał się przedmiotem badań prowadzonych w recenzowanej rozprawie doktorskiej autorstwa Pana Łukasza Jerzego Topolskiego.

W swojej pracy Autor wszechstronnie zbadał wskazany problem, przeprowadzając szereg badań eksperymentalnych na rzeczywistej sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia ze stosunkowo dużą liczbą podłączonych prosumentów, a także badania

teoretyczne, w szczególności poprzez symulację komputerową pracy tej sieci w różnych warunkach w środowisku Matlab/Simulink. Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić negatywny wpływ pracy znacznej liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych na główne wskaźniki jakości energii elektrycznej: wzrostów napięć w fazach, asymetrię tych napięć, występowanie wyższych harmoniczných prądów. W wielu przypadkach czynniki te prowadziły do automatycznego wyłączenia mikroinstalacji, co powodowało zmniejszenie w nich produkcji energii elektrycznej i wywołało skargi właścicieli. Główne badania w recenzowanej pracy dotyczą analizy skuteczności różnych działań mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu mikroinstalacji fotowoltaicznych na sieci dystrybucyjne niskiego napięcia i poprawę jakości energii elektrycznej.

3. Ocena celu i tezy pracy

Cel pracy ustalony jest przez Doktoranta zgodnie z tytułem rozprawy i dotyczy badania wpływu jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na główne parametry jakości dostawy energii elektrycznej oraz oceny skuteczności działania rozwiązań technicznych poprawy parametrów jakości dostawy energii elektrycznej w obwodach niskiego napięcia z dużą koncentracją jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych.

Teza pracy jasno sformułowana przez Autora głosi, że właśnie aktywna regulacja napięcia w dystrybucyjnych sieciach niskiego napięcia, do których podłączona jest duża liczba jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych, umożliwia poprawę wybranych wskaźników jakości napięcia w sieci. Można to osiągnąć poprzez działania po stronie prosumenta dokonując właściwy dobór i konfigurację falowników fotowoltaicznych oraz po stronie operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) poprzez zastosowanie kondycjonerów dostawy energii elektrycznej.

Analiza rozprawy i uzyskanych w pracy wyników pozwala stwierdzić, że ustalony cel pracy jest osiągnięty, a teza sformułowana przez Autora jest udowodniona.

4. Charakterystyka rozprawy

Doktorant dokładnie zbadał i przeanalizował działania prosumenta, biorąc pod uwagę możliwe sposoby sterowania nowoczesnymi falownikami mikroinstalacji fotowoltaicznych różnych firm. Przeprowadzono badania eksperymentalnie i symulacje komputerowe możliwych do realizacji po stronie OSD nowoczesnych środków technicznych i doboru odpowiednich miejsc ich instalacji w sieciach, a mianowicie: równoległego filtra aktywnego, kompensatora DSTATCOM, symetryzatora transformatorowego, baterijny magazyn energii elektrycznej, szeregowy regulator napięcia typu LVR oraz dynamiczny regulator napięcia typu DVR. Uzyskane wyniki modelowania komputerowego są generalnie zgodne z wynikami eksperymentalnych badań, co wskazuje na adekwatność opracowanych modeli komputerowych i wiarygodność wyników symulacji. Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować rekomendacje dotyczące skuteczności i celowości stosowania rozważanych rozwiązań technicznych. Autor rozwiązał więc postawiony problem, wykorzystując nowoczesne

metody teoretyczne i eksperymentalne, dowodząc przy tym swoje umiejętności prowadzenia badań naukowych na współczesnym poziomie.

Omówienie dorobku Autora ograniczono w recenzji do podkreślenia następujących głównych zalet rozprawy.

1. Przystudiowanie znacznej liczby źródeł literaturowych oraz szczegółowa i ciekawa prezentacja w rozdziale 2 tendencji rozwoju energetyki na świecie, w Europie i w Polsce oraz jej transformacji, spowodowanej zadaniami całkowitego przejścia na energię źródeł odnawialnych do roku 2050.
2. Aktualność wybranego tematu, nowego dla branży elektroenergetycznej, w szczególności dla Polski, który pojawił się wskutek znaczącego wzrostu liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych małej mocy, podłączanych do sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia, nie dostosowanych do takiej pracy.
3. Analiza znacznej liczby nowych wymagań dla falowników fotowoltaicznych, w szczególności w zakresie strategii ich sterowania mających na celu poprawę współpracy z sieciami elektroenergetycznymi, do których oni są przyłączone.
4. Badania eksperymentalne 29 falowników (12 jednofazowych i 17 trójfazowych) o mocy znamionowej do 10 kW dostępnych na rynku polskim pod kątem możliwości realizacji szeregu strategii sterowania pozwalających na redukcję wzrostów napięcia sieciowego w przypadku szczytowej produkcji energii elektrycznej.
5. Stosownie dobrany obiekt badań eksperymentalnych – wytypowane obwody niskiego napięcia, w których udział mikroinstalacji fotowoltaicznych przekracza 30% wszystkich przyłączonych odbiorników i prosumentów, na terenie gminy Ochotnica Dolna. Szczegółowe badania eksperymentalne przeprowadzone na tym obiekcie jednoznacznie wskazały na problemy z jakością energii elektrycznej w sieciach, które powstały na skutek przyłączenia do nich dużej liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych małej mocy.
6. Działania po stronie prosumenta, jednoznacznie uzasadnione wynikami badań eksperymentalnych, pozwalające na poprawę, przy najmniejszych nakładach materiałowych, wskaźników jakości napięcia w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia, do których przyłączane są mikroinstalacje fotowoltaiczne.
7. Badania porównawcze, zarówno symulacyjne jak i eksperymentalne, znacznej liczby różnorodnych urządzeń technicznych, zarówno starych jak i nowych, służących poprawie jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych z przyłączonymi do nich mikroinstalacjami fotowoltaicznymi.

5. Ocena zastosowanych metod badawczych

Zastosowane w pracy metody badawcze zostały szczegółowo opisane w rozdziale 1.3 Wprowadzenia i podzielone na trzy grupy: 1) badania eksperymentalne w warunkach laboratoryjnych; 2) badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych, tj. w

wybranych do badań obwodach niskiego napięcia z dużą koncentracją jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych oraz z przyłączonymi badanymi kondycjonerami jakości dostawy energii elektrycznej; 3) badania teoretyczne z wykorzystaniem symulacji komputerowej wybranych rzeczywistych obwodów niskiego napięcia z jednofazowymi mikroinstalacjami fotowoltaicznymi oraz z przyłączonymi badanymi kondycjonerami jakości dostawy energii elektrycznej. Analiza tych metod pokazuje, że Autor w swojej pracy skupiał się bardziej na badaniach eksperymentalnych, niż na badaniach teoretycznych.

Również w rozdziale 8.1 Podsumowania autor szczegółowo wymienił wszystkie prace w obrębie tych trzech grup metod, które zostały wykonane, aby osiągnąć cel postawiony w pracy. Ocena tych prac, a także ich szczegółowy opis w rozprawie, pozwalają stwierdzić, że Autor prowadził swoje badania w sposób celowy, z logiczną konsekwencją, wykorzystując nowoczesne metody i urządzenia techniczne. Wszystko to potwierdza wiarygodność wyników uzyskanych w pracy.

6. Osiągnięcia naukowe pracy

W rozdziale 8.1 Podsumowania autor przeliczył pięć oryginalnych osiągnięć naukowych jego pracy – od a) do e). Poniżej przedstawiam ich ocenę.

- a) Zaproponowany przez Autora obszar położenia charakterystyki $P = f(U)$ dla falowników fotowoltaicznych w zależności od częstości obserwowanych wyłączeń mikroinstalacji jest logiczny i prawdopodobnie skuteczny.
- b) Ten punkt stanowi istotne osiągnięcie, ma jednak wartość bardziej praktyczną, niż naukową.
- c) Ten punkt też stanowi istotne osiągnięcie, ma jednak wartość bardziej praktyczną, niż naukową.
- d) Zgadzam się z tym punktem dotyczącym osiągnięć naukowych. On pozwala oszacować ilość niewygenerowanej energii elektrycznej na skutek automatycznych wyłączeń mikroinstalacji.
- e) Zgadzam się z tym punktem dotyczącym osiągnięć naukowych. A nawet więcej. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę nie tylko na przeprowadzenie badań polowych i symulacyjnych oraz uzyskanie doświadczeń w zakresie oceny pracy urządzeń poprawiających jakość zasilania, ale także analizę możliwości zastosowania każdego z rozwiązań technicznych.

7. Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników badań

Prezentowana rozprawa doktorska ma przede wszystkim istotne znaczenie praktyczne, gdyż kompleksowo analizuje nowe problemy, jakie pojawiają się dla prosumentów i OSD w związku z przyłączeniem dużej liczby jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych do sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia, oraz przedstawia sposoby ich rozwiązania przez obie strony w celu poprawy jakości energii elektrycznej w tych sieciach. W szczególności warto podkreślić następujące wyniki badań.

1. Wyniki badań eksperymentalnych znacznej liczby falowników fotowoltaicznych dostępnych na polskim rynku pod kątem obecności opcji regulacji napięcia w obwodach prądu przemiennego sieci, do których są przyłączane.
2. Wyniki badań polowych zmian wartości i asymetrii napięć fazowych w sieci niskiego napięcia z przyłączonymi mikroinstalacjami fotowoltaicznymi, co pozwoliło oszacować skuteczność możliwych działań po stronie prosumenta w celu poprawy jakości energii elektrycznej w analizowanej sieci.
3. Wyniki badań polowych przeprowadzonych w tej że sieci w celu oceny skuteczności stosowania aktywnych metod regulacji napięcia po stronie OSD, które przedstawiają możliwości wybranych urządzeń technicznych w zakresie poprawy wybranych parametrów jakości dostawy energii elektrycznej.
4. Ogólne wyniki zostały bardzo dobrze zaprezentowane w ostatnim rozdziale 8.2, w którym podsumowano wszystkie przeprowadzone badania i przedstawiono zalecenia dotyczące kompleksowego zastosowania działań zarówno po stronie prosumentów, jak i OSD.
5. Opracowane modele komputerowe sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia uwzględniające wszystkie badane sposoby rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej ze słońca, jej zużycie oraz kondycjonowanie parametrów energii elektrycznej, które mogą być wykorzystane w dalszych badaniach.

8. Uwagi krytyczne

Chciałbym zwrócić uwagę na te zagadnienia rozprawy, które w opinii recenzenta mają charakter dyskusyjny lub potrzebują ustosunkowania do nich Autora.

1. Zważywszy na fakt, że badania prowadzone w pracy mają charakter praktyczny, pożądane byłoby również skupienie się w większym stopniu na analizie teoretycznej badanego problemu i metodach jego rozwiązania. W pracy zamieszczono jednak tylko 14 równań matematycznych, które są zazwyczaj powszechnie znane. Pojawił się jednak nowy problem związany ze znacznymi odchyleniami napięć fazowych w sieci rozdzielczej niskiego napięcia i ich asymetrią, co jest spowodowane nie tylko typowymi przyczynami asymetrii obciążenia, ale także asymetrią i znaczną dodatkową generacją energii elektrycznej z sieci przez mikroinstalacje fotowoltaiczne rozproszone w sieci. Czy zdaniem Autora problem ten wart jest dalszych badań teoretycznych, czy uzyskane przez autora wyniki i rekomendacje w wystarczającym stopniu zaspokajają wymagania kompatybilności elektromagnetycznej generacji rozproszonej w sieciach niskiego napięcia?
2. Jednym z głównych problemów przyłączenia znacznej liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych małej mocy do sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia jest rozłączanie falowników na skutek powstających przepięć w fazach, co powoduje, jak pokazano na rys. 6.12 i 6.13, znaczne zmniejszenie energii elektrycznej pozyskiwanej ze słońca. Głównym działaniem prosumentów mającym na celu redukcję wzrostów

napięć fazowych jest zwiększenie poboru mocy biernej indukcyjnej, co stanowi jedną z opcji strategii sterowania $Q = f(U)$ dla falowników. Jednak dodatkowa moc bierna będzie skutkowała dodatkowymi stratami energii w sieci. W jakim stopniu, zdaniem Autora, wybór strategii sterowania falownikiem $Q = f(U)$ czy $P = f(U)$ wpłynie na wartość strat energii w sieci i czy ma to istotne znaczenie zwłaszcza dla sieci niskiego napięcia?

3. Zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych w pracy, jednym z najlepszych sposobów poprawy jakości energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia w związku z przyłączeniem do nich dużej liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych jest wykorzystanie bateryjnego magazynu energii elektrycznej. Ważnym wynikiem badań jest udowodnienie możliwości znacznego zmniejszenia mocy i pojemności energetycznej takich magazynów energii, co obniża ich stosunkowo wysoki koszt. Jest to jednak możliwe jedynie w przypadku sterowania bateryjnym magazynem energii w celu symetryzacji napięć fazowych poprzez regulację różnych kierunków przepływu mocy czynnej i biernej w fazach, co jest wykorzystywane w tej pracy. Moim zdaniem, jeżeli ma być stosowany bateryjny magazyn energii, to celowe jest jego wykorzystanie również do bilansowania energii w takich sieciach, co oczywiście będzie wymagało zwiększenia jego pojemności. Gromadząc energię elektryczną otrzymaną ze słońca w ciągu dnia i dostarczając ją odbiorcom rano i wieczorem, gdy napięcie w sieciach ulega znacznemu obniżeniu z powodu dużego zużycia energii, można by rozwiązać niemal wszystkie problemy rozpatrywane w pracy. Czy zdaniem Autora, dobrany na podstawie wymagań poprawy jakości energii elektrycznej bateryjny magazyn energii elektrycznej może zostać wykorzystany do dobowego bilansowania mocy czynnej w sieci niskiego napięcia? Czy jest to ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem?
4. Modele komputerowe przedstawione w Załączniku A nie są wystarczająco opisane, co rodzi szereg pytań. Przykładowo: nie wskazano, skąd uzyskano dobowe 10-minutowe profile składowych prądów fazowych czynnych i biernych odbiorców pokazane na rys. A1; na rysunkach A4, A5 i A9 pokazane są wyrażenia empiryczne MATLAB Function, które służą do obliczania decydujących składowych czynnych i biernych prądów liniowych, jednak nie wiadomo, w jaki sposób zostały oni uzyskane.
5. Na rysunkach 7.5, 7.6 i 7.7 przedstawiono dla porównania po dwa przebiegi czasowe, odpowiednio przed i po wprowadzeniu opcji falownika $\cos\phi = f(P)$, odpowiednio dla średniej trójfazowej mocy czynnej i biernej, tygodniowych agregowanych 10-minutowo wartości skutecznych napięć fazowych oraz tygodniowych agregowanych 10-minutowo wartości skutecznych składowych symetrycznych kolejności zerowej i przeciwnej napięcia. Jednakże na wszystkich rysunkach jeden przebieg czasowy uzyskano eksperymentalnie, a drugi poprzez symulację komputerową, co podważa zasadność takiego porównania.

6. Doceniając bardzo dobrą stronę edytorską rozprawy doktorskiej, należy podać dwie uwagi: 1) w niemal wszystkich przedstawionych w pracy przebiegach czasowych oznaczenia na osiach wykonane są zbyt małą czcionką, co wymagało użycia szkła powiększającego, aby je odczytać; 2) żeby wizualnie porównać skuteczność stosowania określonych urządzeń technicznych, lepiej byłoby, aby skale na tych samych typach przebiegów czasowych były jednakowe.
7. Bibliografia literatury wykorzystanej w pracy, zamieszczona na końcu rozprawy, zawiera wiele odniesień do materiałów regulacyjnych i informacji zaczerpniętych z Internetu, lecz zbyt mało do artykułów naukowych, szczególnie w ostatnich latach. Większość wymienionych artykułów opublikowano w latach 2010-2015.

Podczas obrony proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do w/w uwag krytycznych.

6. Ocena ogólna i wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu stwierdzam, że Łukasz Jerzy Topolski w swojej rozprawie doktorskiej szczegółowo zbadał nowy problem naukowy i aplikacyjny, który pojawił się na skutek masowego wprowadzania mikroinstalacji fotowoltaicznych do praktyki współczesnej elektroenergetyki w Polsce, przeprowadził dużą liczbę badań eksperymentalnych i ocenił skuteczność różnych możliwych rozwiązań problemu. Autor wykazał się wysokim poziomem teoretycznym i praktycznym w kwestiach związanych z realizacją badania doktorskiego, umiejętnością organizowania i prowadzenia prac teoretycznych i badań eksperymentalnych, a także umiejętnością poszukiwania rozwiązań problemów naukowych i aplikacyjnych.

Uważam, że rozprawa mgr inż. Łukasza Jerzego Topolskiego pod tytułem „Współpraca elektrowni fotowoltaicznych z siecią zasilającą” rozwiązującą istotny problem naukowy jest ukończoną pracą naukową i aplikacyjną, która stanowi znaczący wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologii Kosmiczne.

Przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Jerzego Topolskiego pod tytułem „Współpraca elektrowni fotowoltaicznych z siecią zasilającą” do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologii Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie.



Prof. dr hab. inż. Ihor SHCHUR