

Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak
Politechnika Warszawska,
Wydział Elektryczny

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 29. 01. 2025
Zarejestrowano pod nr 510-12.5/24
Podpis *dm*

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Łukasza Jerzego Topolskiego**
pt. „ Współpraca elektrowni fotowoltaicznych z siecią zasilającą ”
opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny „Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie
z dnia 7 listopada 2024 roku.

1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Przestawiona rozprawa doktorska dotyczy zagadnień pracy sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, do której dołączone jest wiele mikroinstalacji fotowoltaicznych. Badania takiej sieci były prowadzone w gminie Ochotnica Dolna gdzie zainstalowanych było ponad 700 urządzeń fotowoltaicznych o mocy jednostkowej 2kW. Energia pozyskiwana była wykorzystywana w podgrzewaczach wody oraz także przesyła do sieci dystrybucyjnej. Jednofazowe moduły były dołączane nierównomiernie do poszczególnych faz. Eksploatacja systemu prowadziła do powstawania niesymetrii napięć fazowych oraz nadmiernego wzrostu i napięć w wielu punktach sieci dystrybucyjnej, co powodowało częste wyłączenia mikroinstalacji. Autor zaprojektował i przeprowadził wiele badań pozwalających na ocenę wskaźników jakości napięcia. Ważnym elementem rozprawy jest opracowanie modeli symulacyjnych pozwalających na obrazowanie pracy sieci. Do budowy modelu symulacyjnego wykorzystano wyniki pomiarów dokonanych w systemie rzeczywistym. Autorski model symulacyjny pozwala analizować pracę systemu w przypadku zmiennych warunków i parametrów dołączonych źródeł i odbiorników.

Tematykę rozprawy należy uznać za interesującą pod względem badawczym i aplikacyjnym. Wyniki prac mogą być wykorzystane do poprawy wskaźników jakości napięcia we wskazanej lokalizacji. Mogą być pomocne przy formułowaniu zaleceń w przypadku projektowania nowych systemów z panelami fotowoltaicznymi.

2. Charakterystyka pracy

Praca doktorska liczy 170 stron łącznie ze spisem literatury zawierającym 154 pozycji oraz załącznikami. Podzielona została na 8 rozdziałów (150 stron), a istotne merytorycznie zagadnienia o charakterze naukowym zostały przedstawione - moim zdaniem - w rozdziałach 5, 6 i 7.

Rozdział 1 „Wprowadzenie”

Sformułowano cel, tezę oraz metodę badawczą pracy:

- *Celem niniejszej dysertacji jest zbadanie wpływu jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na wybrane parametry jakości dostawy energii elektrycznej oraz ocena skuteczności działania technicznych sposobów ich poprawy w obwodach niskiego napięcia z dużą koncentracją jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych.*
- *Teza pracy: Poprawę wybranych wskaźników jakości napięcia zasilającego w sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia można osiągnąć poprzez odpowiedni wybór (spośród urządzeń jedno- lub trójfazowych) oraz konfigurację falowników fotowoltaicznych, aktywną*

regulację napięcia w sieciach SN oraz zastosowanie kondycjonerów jakości dostawy energii elektrycznej.

- *Metoda badawcza: Badania oddziaływania mikroinstalacji fotowoltaicznych na wybrane parametry jakości dostawy energii elektrycznej oraz badania technicznych sposobów poprawy parametrów napięcia zostały przeprowadzone:*
 - a) w warunkach laboratoryjnych,*
 - b) w wytypowanych obwodach niskiego napięcia z dużą koncentracją jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych oraz z przyłączonymi badanymi kondycjonerami jakości dostawy energii elektrycznej,*
 - c) z wykorzystaniem modelu symulacyjnego rzeczywistego obwodu niskiego napięcia z jednofazowymi mikroinstalacjami oraz kondycjonerami jakości dostawy energii elektrycznej.*

Moim zdaniem takie zdefiniowanie zadań badawczych jest poprawne i zgodne z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim.

Rozdział 2 „Transformacja energetyczna Świata, Europy i Polski”

Przedstawiono opis zachodzącej transformacji energetycznej na świecie, w Europie oraz w Polsce. Przytoczono wiele danych dotyczących historii rozwoju fotowoltaiki, a także prognoz rozwoju fotowoltaiki. Autor zapoznał się z wieloma ważnymi opracowaniami, które są aktualnie dostępne. W uporządkowany i przemyślany sposób przedstawił zagadnienia transformacji energetycznej. Przytaczane dane statystyczne są analizowane i komentowane przez Autora.

Rozdział 3 „Podział oraz budowa instalacji fotowoltaicznej”

W pierwszej kolejności podano podział ze względu na wielkość instalacji definiując mikroinstalacji i małe instalacje wskazując jednocześnie, że w ustawie o odnawialnych źródłach energii nie ma definicji dużej instalacji. Innym kryterium podziału jest wskazanie sposobu współpracy z siecią elektroenergetyczną. Może to być instalacja typu: on-grid, off-grid lub hybrydowa. Wskazano także inne podziały związane z lokalizacją i orientacją paneli fotowoltaicznych względem słońca.

Opisane zostały także podstawowe typy paneli fotowoltaicznych oraz falowników. Dokonano podziału paneli ze względu na technologie. Przedstawiono podstawowe właściwości i typowe charakterystyki fotoogniwa.

Bazując na danych zaczerpniętych z literatury Autor przytoczył następującą klasyfikację falowników:

- mikrofalowniki
- falowniki stringów
- falowniki stringowe współpracujące z optymalizatorami mocy
- falowniki centralne

Wskazał też inny podział biorąc pod uwagę budowę wewnętrzną. Można wówczas wyróżnić falowniki transformatorowe i beztransformatorowe.

Zamieszczony został schemat instalacji fotowoltaicznej ze stringowym falownikiem typu on-grid. W komentarzu wskazano na opcjonalne modyfikacje. Podane zostały także schematy ideowe, podstawowej topologii przekształtnika 1- i 3-fazowego.

Rozdział 4 „Wymagania stawiane falownikom instalacji fotowoltaicznych”

Scharakteryzowano wymagania techniczne oraz strategie sterowania falownikami instalacji fotowoltaicznych poprawiające ich współpracę z siecią zasilającą. Korzystając z literatury wskazano na podział strategii sterowania falowników na trzy kategorie:

- podstawowe strategie sterowania
- strategie sterowania wynikające z przepisów prawa oraz norm
- zaawansowane strategie sterowania wynikające z obecnych możliwości technicznych

W dalszej części rozdziału opisano strategię sterowania falownikami mikroinstalacji fotowoltaicznych wpływające na poprawę ich współpracy z siecią zasilającą.

W podsumowaniu - Tabela 4.1 - opisano krótko metody sterowania dla następujących strategii sterowania: $Q=f(U)$, $\cos\phi = f(P)$, $\cos\phi = 1$, $Q=const$, Stałe ograniczenie poziomu generacji mocy czynnej: np. do 80-90% mocy znamionowej falownika, $P=f(U)$, Aktywacja trybu UVRT, Aktywacja trybu OVRT.

Autor, po analizie różnych dokumentów prawnych, wskazał na niespójności zapisów i zestawiał to w tabeli 4.2.

Rozdział 5 „Badania falowników mikroinstalacji fotowoltaicznych na zgodność z kodeksem sieci NC RfG, wymaganiami OSD oraz normami technicznymi” został poświęcony laboratoryjnym badaniom falowników mikroinstalacji fotowoltaicznych w zakresie ich pracy w trybach $Q=f(U)$, $P=f(U)$, OVRT oraz emisji wyższych harmonicznym prądu.

Autor uczestniczył [„Piknik OZE 2021”] w badaniach 29 falowników o mocach znamionowych do 10 kW (12 falowników jednofazowych oraz 17 falowników trójfazowych) pochodzących od siedemnastu różnych producentów urządzeń energoelektronicznych powszechnie dostępnych na rynku europejskim i polskim. Wszystkie przebadane falowniki zostały skonfigurowane przez dostawców urządzeń tak, aby spełniały wymagania kodeksu sieci NC RfG [46] [79], OSD [69] [81] oraz normy PN-EN 50549-1:2019-02 [82].

Badania przeprowadzono w Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej w Centrum Energetyki AGH.

Badane falowniki fotowoltaiczne zostały zasilone po stronie DC z symulatora paneli fotowoltaicznych, tj. źródła DC z regulowaną charakterystyką $I=f(U)$. Od strony AC falowniki przyłączono do bezimpedancyjnego dwukierunkowego trójfazowego źródła napięcia 3x230. Źródła to pozwala na ustalanie częstotliwości oraz wartości skutecznej napięcia niezależnie dla każdej z trzech fazach. Na wejściu oraz wyjściu falowników mierzono wartości napięcia, prądu oraz mocy za pomocą miernika parametrów sieci.

W postaci graficznej przedstawiono wyniki badań falowników przy różnych strategiach sterowania. Oceniano także odporność układu na wzrosty napięcia zasilającego. Ważny fragment dotyczył pomiaru zawartości wyższych harmonicznym prądu.

Na podstawie przeprowadzonych badań Autor sformułował wniosek, że trudno jest ocenić kompleksowo falowniki porównując wszystkie tryby pracy.

Rozdział 6 „Wpływ instalacji fotowoltaicznych na wybrane parametry jakości dostawy energii elektrycznej w sieci dystrybucyjnej”.

W rozdziale przedstawiono teoretyczny opis zjawisk oraz wyniki badań wpływu mikroinstalacji fotowoltaicznych na wybrane parametry napięcia, takie jak: wartość skuteczna napięcia, asymetria napięcia, wahania napięcia oraz odkształcenie napięcia wyższymi harmonicznymi. W rozdziale tym przeanalizowano również zjawisko automatycznego wyłączenia się falowników mikroinstalacji fotowoltaicznych.

Badania wpływu instalacji fotowoltaicznych na wybrane wskaźniki jakości dostawy energii elektrycznej oraz sposobów redukcji ich negatywnego oddziaływania były prowadzone przez Autora na terenie gminy Ochotnica Dolna w latach 2018-2022.

Wszystkie 726 jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych zaprojektowano w taki sposób, aby w pierwszej kolejności energia elektryczna dostarczana z paneli fotowoltaicznych poprzez falownik była wykorzystywana na potrzeby grzania ciepłej wody użytkowej. W przypadku gdy woda osiągnie zadaną temperaturę, przekaźnik priorytetowy wyłącza grzałki i przełącza falownik na instalację wewnętrzną odbiorcy. Nadwyżki energii zostaną oddane do sieci dystrybucyjnej.

W sposób opisowy Autor analizuje wzrosty napięcia w zależności od lokalizacji punktu pomiarowego. Wybrane analizy zostały obrazowane na zamieszczonych wykresach. Analizę wpływu jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na wartość skuteczną napięcia, asymetrię napięć fazowych, wahania napięcia oraz odkształcenie napięcia wyższymi harmonicznymi przeprowadzono w wybranym fragmencie sieci, w którym udział prosumentów wynosił 48%.

W analizie wpływu zmienności współczynników zauważono korelację wzrostu ich wartości ze wzrostem generacji w mikroinstalacji prosumenta.

Ocena współczynnika r-Persona jest bardzo wrażliwa na obserwacje odstające. Można mieć wątpliwości czy wykres z rys. 6.21 spełnia ten warunek.

Rozdział 7 „Sposoby poprawy współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią zasilającą” został poświęcony przeglądowi sposobów poprawy współpracy mikroinstalacji fotowoltaicznych z siecią zasilającą, uwzględniając działania jakie mogą zostać podjęte przez instalatorów mikroinstalacji oraz OSD. W rozdziale tym przedstawiono wyniki pomiarów oraz symulacji skuteczności poprawy parametrów napięcia za pomocą wybranych rozwiązań technicznych, takich jak: aktywacja w falownikach trybu $\cos\phi = f(P)$, zastosowanie równoległego filtra aktywnego, kompensatora DSTATCOM, symetryzatora transformatorowego, bateryjnego magazynu energii z funkcją symetryzacji i stabilizacji napięć fazowych oraz szeregowego regulatora napięcia typu LVR i DVR.

Ważnym dokonaniem Autora jest opracowanie modelu symulacyjnego (program Matlab/Simulink) wybranego fragmentu sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia z dołączonymi instalacjami fotowoltaicznymi. Z powodu czasochłonności obliczeń symulacje wykonano dla danych z okresu dobowego (24 godzin) w trybie *Phasor 50Hz*.

Modele odbiorów, jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych oraz układów poprawiających parametry napięcia zostały wykonane w postaci sterowanych źródeł prądowych oraz napięciowych. Symulacje dotyczą stanów ustalonych.

W celu jak najlepszego odwzorowania warunków napięciowych występujących w obwodzie wykorzystano rzeczywisty, agregowany, 10-minutowo dobowy profil mocy czynnej oraz odpowiadający mu profil mocy biernej (dla składowych symetrycznych kolejności zgodnej napięć i prądów) dla poszczególnych faz.

Uważam że jest to wartościowy fragment o charakterze naukowym pozwalający na analizę różnorodnych struktur sieci. Oczywiście jest to możliwe jeśli są dostępne precyzyjne dane parametrów sieci. Przykładowy zestaw takich danych jest zamieszczony w tabeli 7.3.

Zdaniem Autora poprawa współpracy sieci elektroenergetycznej z instalacją fotowoltaiczną wymaga działań zarówno po stronie operatora SD jak i prosumenta. Wskazówki dotyczące określonych działań są zamieszczone w podrozdziale 7.4.

W szczególności wartościowe są analizy z wykorzystaniem modelu symulacyjnego dla przypadków różnych działań (tabela 7.21).

Rozdział 8 „Podsumowanie”

Autor przedstawia podsumowanie niniejszej dysertacji, które zawiera krótki opis wykonanych prac oraz wykaz oryginalnych osiągnięć Autora. Moim zdaniem jest to powtórzenie obszernych fragmentów pracy. Podsumowanie powinno być bardzo syntetyczne i zawierać istotne informacje co Autor uważa za swoje oryginalne osiągnięcia. W podrozdziale 8.1 autor napisał jakie czynności wykonał przygotowując i wykonując badania, których wyniki są wykorzystane w pracy (9 punktów).

Wskazał też na 5 - jego zdaniem - najważniejszych osiągnięć naukowych cytowanych poniżej:

1. zaproponowanie obszaru położenia charakterystyki $P=f(U)$ dla falowników fotowoltaicznych w zależności od częstości obserwowanych wyłączeń mikroinstalacji (rozd. 4.2.3, rys. 4.5),

2. zmierzenie rzeczywistych charakterystyk $Q=f(U)$ dla 12 różnych trójfazowych falowników fotowoltaicznych (rozdz. 5.3, rys. 5.3),
3. przeprowadzenie badania emisji wyższych harmonicznych prądu dla siedmiu jednofazowych falowników oraz siedemnastu trójfazowych falowników fotowoltaicznych (rozdz. 5.7, rys. 5.11-5.12),
4. przeprowadzenie badań w zakresie ilości energii niewygenerowanej na skutek automatycznych wyłączeń mikroinstalacji oraz zaproponowanie zależności pozwalającej oszacować tę energię (rozdz. 6.6),
5. przeprowadzenie badań polowych (in situ) oraz symulacyjnych wpływu jednofazowych mikroinstalacji oraz różnych rozwiązań technicznych w zakresie redukcji ich negatywnego oddziaływania na wybrane parametry jakości dostawy energii elektrycznej w rzeczywistych obwodach niskiego napięcia oraz uzyskanie doświadczenia w zakresie oceny pracy urządzeń poprawiających jakość zasilania (rozdz. 6-7).

Tak sformułowane osiągnięcia nie mają charakteru naukowego.

3. Uwagi ogólne

Ocena celów naukowych.

Celem niniejszej dysertacji - wskazanym przez Autora - jest zbadanie wpływu jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na wybrane parametry jakości dostawy energii elektrycznej oraz ocena skuteczności działania technicznych sposobów ich poprawy w obwodach niskiego napięcia z dużą koncentracją jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych.

Sformułowana została następująca teza: Poprawę wybranych wskaźników jakości napięcia zasilającego w sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia można osiągnąć poprzez odpowiedni wybór (spośród urządzeń jedno- lub trójfazowych) oraz konfigurację falowników fotowoltaicznych, aktywną regulację napięcia w sieciach SN oraz zastosowanie kondycjonerów jakości dostawy energii elektrycznej.

Cel i teza zostały poprawnie sformułowane, a w treści pracy są opisy i analizy dotyczące tych zagadnień.

Ocena źródeł literaturowych.

W spisie literatury znajduje się 154 różnorodnych pozycji:

- artykuły w czasopiśmie lub materiałach konferencyjnych oraz książki,
- materiały firmowe i operatorów sieci dystrybucyjnych
- dokumenty o charakterze ustaw rozporządzeń itp.

Wiele pozycji to linki do materiałów dostępnych w internecie.

Można uznać, że jest to reprezentatywny zbiór obejmujący zagadnienia przedstawiane w pracy.

Ocena rozwiązania problemów naukowych i oryginalności

Autor podjął się rozwiązania zagadnień naukowych, które zostały sformułowane w tezie pracy. Osiągnięciami naukowymi Autora, moim zdaniem, są przeprowadzone analizy wyników badań (liczne pomiary w systemie rzeczywistym). Istotne osiągnięcie naukowe to także opracowanie autorskiego modelu symulacyjnego i zweryfikowanie jego poprawności na podstawie danych eksperymentalnych.

Osiągnięcia naukowe opisane w pracy są bardzo wartościowe. Jestem przekonany, że wyniki badań mogą być wykorzystywane w praktyce.

Ocena redakcji pracy.

Redakcja praca jest poprawna. Mam pewne zastrzeżenia do graficznej prezentacji. wyników badań. Na wielu rysunkach nałożonych jest na siebie kilka, niewiele się różniących, przebiegów. Utrudnia to analizowanie prezentowanych wyników. Także wielkość czcionki na niektórych rysunkach jest zbyt mała

Przedstawianie rysunków w sposób taki, że część jest na jednej, a część, łącznie z podpisem, na drugiej stronie utrudnia porównanie prezentowanych wyników.

Uwagi dyskusyjne.

Opracowane oprogramowanie pozwala badać zachowanie mikrosieci w różnych warunkach.

1. Jak definiowano sygnały sterujące źródłami prądu i napięcia w modelu symulacyjnym.
2. Czy w modelu symulacyjnym można uwzględnić zmiany rezystancji w funkcji temperatury?
3. Czy rozważał Pan sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia optymalizacji pozwalającego na wybór najlepszej kombinacji strategii sterowania w poszczególnych punktach?
4. Czy rozważał Pan zagadnienia wymiarowania magazynów energii i rozmieszczenia ich w taki sposób, żeby zapewnić wartości napięć we wszystkich punktach w przedziale dopuszczalnych wartości?
5. Czy wybór identycznych strategii sterowania we wszystkich falownikach będzie najbardziej odpowiedni dla całej mikrosieci, czy też należy w inny zdefiniowany sposób zróżnicować strategię sterowania w systemie?

4. Wniosek końcowy

Sformułowane w tekście recenzji uwagi nie zmieniają pozytywnej oceny pracy. Praca stanowi dojrzałe przedstawienie zagadnień konfiguracji mikrosieci niskiego napięcia ze znaczną zawartością urządzeń fotowoltaicznych. Stanowi oryginalny wkład Autora do badań, projektowania i optymalizacji warunków pracy mikrosieci z dołączonymi wieloma modułami fotowoltaicznymi. Autor wykazał się znajomością zagadnień z dyscypliny „Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne”, umiejętnością formułowania celów badawczych oraz analizowania wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uzyskane rezultaty mogą być pomocne w dalszych pracach badawczych, a także aplikacjach przemysłowych. W szczególności należy docenić fakt wykonania wielu czasochłonnych pomiarów w istniejącej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia i badań symulacyjnych oraz badań laboratoryjnych. Moim zdaniem rozprawa doktorska - mgr. inż. Łukasza Jerzego Topolskiego pt. „*Współpraca elektrowni fotowoltaicznych z siecią zasilającą*” spełnia wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Warszawa, 23-01-2025

