



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Wpływ fotowoltaicznych źródeł energii
na jakość dostawy energii elektrycznej

Autor: mgr inż. Krzysztof Stanisław Piech

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Bień prof. AGH

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

Kraków, 2023.

1. Streszczenie

Rozprawa doktorska skupia się na badaniach z zakresu elektrotechniki i energetyki, koncentrując się na fotowoltaicznych źródłach energii i ich wpływie na jakość dostawy energii elektrycznej. Opisano w niej badania wykonane na siedmiu instalacjach fotowoltaicznych, o łącznej mocy szczytowej 801,19 kWp, poddając ocenie wpływ tych systemów na sieć elektroenergetyczną. Podjęte działania obejmowały analizę danych pomiarowych, badania porównawcze modułów fotowoltaicznych, testy laboratoryjne falowników fotowoltaicznych oraz badania ankietowe na temat fotowoltaicznych źródeł energii.

Praca ma charakter badawczy z możliwością aplikacji dla analizowanych źródeł PV. Zaproponowano w niej wieloaspektową metodę oceny interakcji instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną składającą się z sześciu etapów. Pierwszy etap metody polega na dogłębnym zrozumieniu charakterystyki działania instalacji fotowoltaicznych, uwzględniając m.in. moc szczytową, efektywność, a także wpływ na jakość dostarczanej energii. Kolejnym elementem są badania laboratoryjne, które umożliwiają analizę wpływu różnych parametrów na wydajność instalacji. Następnie zaleca się przeprowadzenie analizy praktycznej współpracy instalacji z siecią elektroenergetyczną, oceniając jej działanie w rzeczywistych warunkach. Czwarty etap stanowią symulacyjne badania falowników, które są kluczowym elementem każdej instalacji fotowoltaicznej, a ich działanie bezpośrednio wpływa na efektywność instalacji. Jako piąty krok metody zaprojektowano badania ankietowe, dzięki którym zebrano informacje na temat społecznej percepcji i oczekiwań związanych z fotowoltaicznymi źródłami energii. Na zakończenie, należy zintegrować wyniki z poprzednich etapów. Wszystkie te elementy tworzą holistyczną metodę oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną, uwzględniającą aspekty techniczne, społeczne i ekonomiczne związane z funkcjonowaniem i eksploatacją instalacji.

W ramach dysertacji, opracowano i zastosowano metodykę badania falowników jedno i trójfazowych, dedykowanych do instalacji fotowoltaicznych, pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych. Badania te, przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, zaowocowały opracowaniem metodyki testowania tych urządzeń. Wykonano również badania porównawcze modułów fotowoltaicznych, pokazując wpływ różnic na eksploatację instalacji fotowoltaicznej oraz jakość dostawy energii elektrycznej. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących generacji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych. Wykazano, że produkcja ta jest bardzo zmienna, a różnice między miesiącami rok do roku mogą sięgać nawet 130%.

W celu zrozumienia działania pojedynczych modułów PV wykonano ich analizę porównawczą, pokazując wpływ różnic technologicznych na eksploatację instalacji fotowoltaicznej oraz jakość dostawy energii elektrycznej. Badania modułów PV oraz falowników mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia wpływu wyboru elementów składowych systemu fotowoltaicznego na jego efektywność.

Kolejną częścią pracy były badania ankietowe na temat OZE w tym fotowoltaicznych źródeł energii. Dokonano pomiaru opinii wśród trzech grup respondentów, w tym twórców klastrów energii, operatorów sieci dystrybucyjnych i instytucji zainteresowanych rozwojem energetyki rozproszonej w Polsce. Wyniki tych badań dostarczyły cennych informacji na temat spojrzenia różnych grup interesariuszy na temat wpływu fotowoltaicznych źródeł energii na jakość dostawy energii elektrycznej.

Podsumowując, praca doktorska dostarcza istotnych informacji na temat wpływu fotowoltaicznych źródeł energii na jakość dostawy energii elektrycznej, a wyniki badań mogą być cenne dla inwestorów, operatorów systemów dystrybucyjnych, a także dla naukowców i inżynierów pracujących nad rozwojem i optymalizacją systemów fotowoltaicznych.

1.1 Cel pracy

Na podstawie współczesnego stanu wiedzy, przeglądu literaturowego oraz dotychczas prowadzonych przez autora prac naukowych z zakresu elektrotechniki i energetyki wyznaczono cel dysertacji polegający na opracowaniu metody oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną oraz ich wpływ na jakość dostawy energii elektrycznej. Tak postawiony cel w ocenie autora pracy pozwoli na lepsze zrozumienie dynamiki badanego zjawiska.

1.1.1 Cele szczegółowe

Aby zrealizować cel pracy, autor postanowił doprecyzować zakres prowadzonych rozważań wprowadzając pięć celów szczegółowych. Po pierwsze, autor zamierza zidentyfikować przyczyny niskiej efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznych, co może przyczynić się do ich optymalizacji. Po drugie, autor pragnie zidentyfikować związek pomiędzy warunkami atmosferycznymi a generacją zaburzeń elektromagnetycznych przez fotowoltaiczne źródła energii. Jest to istotne dla zrozumienia, jak te warunki wpływają na jakość dostawy energii. Trzeci cel szczegółowy dotyczy opracowania metodyki badania falowników fotowoltaicznych pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych. Czwarty cel szczegółowy to sformułowanie metodyki badania opinii interesariuszy skupionych wokół klastrów energii na temat rozproszonych źródeł energii, w tym źródeł fotowoltaicznych. Na koniec, badacz planuje zaproponować autorskie narzędzia do analizy danych pomiarowych z analizatorów jakości energii elektrycznej (JEE), co może przyczynić się do rozwoju narzędzi i technologii monitorowania jakości dostawy energii.

Cele szczegółowe:

1. Wskazanie przyczyn słabej efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznych.
2. Wykazanie zależności pomiędzy warunkami atmosferycznymi a generacją zaburzeń elektrycznych przez fotowoltaiczne źródła energii.
3. Opracowanie metodyki badania falowników fotowoltaicznych pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych.
4. Opracowanie metodyki badania opinii interesariuszy zebranych wokół Klastrów Energii na temat rozproszonych źródeł energii w tym źródeł fotowoltaicznych oraz ich wpływu na dostawę energii elektrycznej.
5. Propozycja autorskich narzędzi do analizy danych pomiarowych z analizatorów JEE.

Realizacja celów została opisana w dalszej części pracy.

1.2 Teza pracy

Obserwacja i analiza danych pomiarowych związanych z pracą instalacji fotowoltaicznej umożliwia ocenę jej współpracy z systemem elektroenergetycznym.

Teza pracy doktorskiej koncentruje się na obserwacji i analizie danych pracy instalacji fotowoltaicznej, które umożliwiają ocenę jej współpracy z systemem elektroenergetycznym. Współpraca ta obejmuje zarówno potencjalne pogorszenie jakości energii elektrycznej poprzez wprowadzanie zaburzeń do sieci elektroenergetycznej przez falowniki fotowoltaiczne, jak i możliwość poprawy niezawodności dostaw energii dzięki lokalnej dostępności tych źródeł. Autor w analizach zawartych w dysertacji skupia się na jej obiektywnej ocenie.

1.3 Zakres pracy

W rozdziale 1 przedstawiono cele, tezę pracy jak również motywację do podjęcia tematyki badawczej i streszczenie wszystkich rozdziałów.

Rozdział 2 przedstawia przegląd aktualnej literatury oraz dyskusję na temat odnawialnych źródeł energii, dostępnych obecnie technologii pozyskiwania energii elektrycznej oraz charakteryzuje energetykę rozproszoną. W tym miejscu omówiono również szczegółowo fotowoltaikę, począwszy od efektu fotoelektrycznego i zasady działania ogniwa PV przez przegląd kolejnych generacji modułów fotowoltaicznych a skończywszy na metodach magazynowania energii elektrycznej z systemów PV.

Analiza, przegląd literatury i wprowadzenie do zagadnienia jakości energii elektrycznej znajdują się w rozdziale 3. Szczegółowo omówiono charakteryzujące ją parametry oraz zreferowano wymagania stawiane JEE dostępne w aktualnych rozporządzeniach i normach. Zasygnalizowano problemy dotyczące jakości energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych w skład których wchodzi układy fotowoltaiczne. Opisano typowe zaburzenia elektroenergetyczne ze szczególnym uwzględnieniem wyższych harmonicznych prądu i napięcia.

Po wprowadzeniu teoretycznym znajdującym się w rozdziałach 2 i 3, od rozdziału numer 4 zaczyna się część praktyczna doktoratu. W pierwszej kolejności w rozdziale 4 zaprezentowano wyniki prac przeprowadzonych na badawczych instalacjach fotowoltaicznych wchodzących w skład Parku Naukowo-Technologicznego Euro-Centrum w Katowicach. Przebadano trzy działające instalacje PV składające się na największą tego typu instalację PV w Polsce. Zbudowana z 1463 modułów fotowoltaicznych charakteryzuje się łączną mocą szczytową wynoszącą 364,07 [kWp]. Przedstawiono szczegółowe informacje dotyczące typów wykorzystanych paneli PV, ich charakterystyki prądowo-napięciowe jak również rodzaj montażu i orientację instalacji względem stron świata. Kolejno zaprezentowano sposób agregacji danych pomiarowych, mierzone wielkości oraz analizy i dyskusję nad otrzymanymi wynikami.

Po badaniach wykonanych na dużych instalacjach fotowoltaicznych, w rozdziale 5 autor pracy postanowił przyrzeć się funkcjonowaniu każdego elementu systemu PV z osobna jak również całości instalacji oraz działaniu pojedynczych modułów PV zbudowanych w różnych technologiach. Analizy porównawcze możliwe były do wykonania dzięki uzyskanemu dostępowi do instalacji badawczej zlokalizowanej w laboratorium na dachu budynku C3 Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, stanowiącej część zaplecza naukowego Laboratorium Robotyki, Fotowoltaiki i Lewitacji Magnetycznej w Katedrze Automatyki i Robotyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH. Topologia omawianego systemu PV, w tym implementacja w jego strukturze optymizerów mocy daje szerokie możliwości badawcze.

Rozdziały 6 i 7 prezentują wyniki pomiarów wykonanych na komercyjnych instalacjach fotowoltaicznych. W tekście przedstawiono szczegółowe informacje dotyczące typów użytych modułów fotowoltaicznych, ich charakterystyk prądowo-napięciowych oraz sposobu montażu i orientacji względem stron świata. Kolejno przedstawiono sposób zbierania danych pomiarowych, mierzone parametry oraz analizy i dyskusję wyników. W analizach wzięto pod uwagę parametry i współczynniki takie jak: napięcia fazowe i międzyfazowe, częstotliwość zasilania, niesymetria napięć, odchylenia napięcia, migotanie światła, prądy, THD prądu i napięcia, harmoniczne rzędu od 1 do 25 (lub 40), CP05 i CP95 czy współczynnik mocy. Otrzymane wyniki autor opatrzył swoimi komentarzami i przemyśleniami jak również odniósł do aktualnie obowiązujących norm i zaleceń dotyczących jakości energii elektrycznej. Dodatkowo w rozdziale 7 autor zaproponował nowy wskaźnik $PDPP_{st}$, pokazujący, ile próbek danych przekroczyło dopuszczalny poziom P_{st} dla człowieka oraz drugi wskaźnik, $PDPTHU$, prezentujący ilość próbek danych przekraczających dopuszczalny poziom $THDU$ równy 8%.

Po wykonaniu badań w PNT w Katowicach oraz w laboratorium PV AGH, analizie uzyskanych wyników (opisanych w rozdziałach 4 i 5) autor pracy zauważył zależności łączące warunki atmosferyczne i amplitudę generowanych zaburzeń elektromagnetycznych przez instalacje PV.

W rezultacie postanowiono przeprowadzić symulacje działania systemu fotowoltaicznego w ustandaryzowanych, izolowanych warunkach, czyli w laboratorium JEE Centrum Energetyki AGH. Ponieważ falowniki są bardzo ważną składową całego systemu PV, zaprojektowano szereg testów mających sprawdzić ich działanie w różnych, symulowanych warunkach pogodowych. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych łącznie na 31 falownikach jedno i trójfazowych, dedykowanych dla prosumenckich instalacji PV jak również szczegółowe analizy danych i uzyskane wnioski opisano w części symulacyjnej doktoratu znajdującej się w rozdziale 8.

Inspiracją do powstania rozdziału 9 była mająca obecnie miejsce transformacja energetyczna w Polsce i zachodzące zmiany w topologiach sieci systemów elektroenergetycznych. Ta część dysertacji opisuje wyniki badań ankietowych przeprowadzonych wśród trzech grup respondentów związanych z Kłastrami Energii: ich twórców i koordynatorów, operatorów sieci dystrybucyjnych oraz instytucji zainteresowanych rozwojem energetyki rozproszonej w Polsce. Badania pozwoliły poznać opinię uczestników na temat idei i funkcjonowania Kłastrów Energii oraz spostrzeżeń i wyobrażeń ankietowanych dotyczących korzyści i zagrożeń wynikających z ich powstania. Co bardzo istotne z punktu widzenia niniejszej dysertacji, badani największe nadzieje na bezpieczeństwo energetyczne, zrównoważony rozwój z poszanowaniem środowiska naturalnego oraz stabilizację sytuacji ekonomicznej na rynku energii upatrują w energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznych. Zagrożenia płynące z dynamicznego wzrostu ilości instalacji PV zostały przedstawione w dedykowanym dla operatorów sieci dystrybucyjnych załączniku do ankiety nr. 2 zatytułowanym „Jakość dostawy energii elektrycznej i instalacje PV”.

Rozdziały 10, 11 i 12 stanowią syntezę wszystkich prac wykonanych przez autora. Na podstawie analiz, testów i wyników zawartych w rozprawie doktorskiej, w rozdziale 10 badacz proponuje opracowaną przez siebie metodę oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną po to, aby w rozdziale 11 zatytułowanym „Analiza wyników pracy” dowieść osiągnięcie wszystkich celów pracy i udowodnić tezę. Podsumowanie rozważań zawartych w pracy doktorskiej, otrzymanych wyników jak również przedstawienie oryginalnych osiągnięć naukowych wraz z dalszymi planami badawczymi autora przedstawiono w rozdziale 12.

Rozdział 13 prezentuje wykaz prac badawczych, prowadzonych przez autora, które miały wpływ na powstanie doktoratu. Kolejno w rozdziałach od 14 do 17 znajdują się sekcje poświęcone źródłom literaturowym wykorzystanym w pracy oraz spisom zawierającym wykazy zamieszczonych rysunków, równań i tabel.

Praca zawiera dwa załączniki stanowiące rozszerzenie i uzupełnienie dwóch rozdziałów. „Załącznik A - Badania porównawcze falowników – dodatkowe analizy” oraz „Załącznik B - Badania ankietowe na temat fotowoltaicznych źródeł energii. Klastry energii – dodatkowe analizy”. Obydwa dokumenty stanowią integralną część rozprawy doktorskiej. Ich cyfrowe wersje zostały zamieszczone na dodatkowej płycie CD.

2. Metoda oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną

Na podstawie analizy, testów i wyników zawartych w rozdziałach pracy doktorskiej, autor proponuje następującą metodę oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną.

W pierwszej kolejności, konieczne jest zrozumienie charakterystyki działania dużych instalacji fotowoltaicznych, co zostało przedstawione w rozdziale 4, gdzie przebadano trzy instalacje fotowoltaiczne o łącznej mocy szczytowej wynoszącej 364,07 kWp. Badania polegały na zainstalowaniu analizatorów jakości energii elektrycznej i agregacji danych pomiarowych, aby ostatecznie wykonać analizy wpływu fotowoltaicznych źródeł energii na jakość dostawy energii elektrycznej.

Następnie, w rozdziale 5, przeprowadzono badania w laboratorium fotowoltaicznym AGH. W tym kontekście, kluczowe jest przeprowadzenie szczegółowych badań laboratoryjnych, które pozwolą na zrozumienie wpływu różnych parametrów na wydajność instalacji fotowoltaicznej.

W rozdziałach 6 i 7, analizowano instalacje PV z TAURON Dystrybucja S.A. Oddział w Gliwicach, MPWIK Kraków Zakład Oczyszczania Ścieków Płaszów oraz GPW Ruda Śląska. Te analizy pozwalają na zrozumienie, jak instalacje fotowoltaiczne współpracują z siecią elektroenergetyczną w praktycznych warunkach.

Rozdział 8 skupia się na eksperymentalnych badaniach porównawczych falowników fotowoltaicznych. Falowniki są kluczowym elementem każdej instalacji PV, a ich wybór i działanie mają bezpośredni wpływ na efektywność oraz jakość dostawy energii.

Wreszcie, w rozdziale 9, przeprowadzono badania ankietowe na temat fotowoltaicznych źródeł energii. Te badania dostarczają ważnych informacji na temat percepcji i oczekiwań różnych interesariuszy w kontekście fotowoltaicznych źródeł energii.

Wszystkie te elementy razem tworzą kompleksową metodę oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną. Metoda ta uwzględnia zarówno techniczny wymiar działania instalacji fotowoltaicznej, jak i społeczne oraz ekonomiczne aspekty związane z jej wdrożeniem i eksploatacją.

Metoda oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną została podzielona na sześć etapów:

1. Zrozumienie charakterystyki działania instalacji fotowoltaicznych: Przeprowadzenie szczegółowej analizy działania instalacji fotowoltaicznych, uwzględniającej takie aspekty jak moc szczytowa, wydajność i wpływ na jakość dostawy energii elektrycznej.

2. Badania laboratoryjne: Wykorzystanie laboratoriów fotowoltaicznych do przeprowadzenia szczegółowych badań nad wydajnością i efektywnością instalacji fotowoltaicznych. Badania te powinny uwzględniać różne parametry i warunki, aby uzyskać jak najbardziej kompleksowy obraz działania instalacji.

3. Analiza praktycznej współpracy z siecią elektroenergetyczną: Przeprowadzenie analizy działania instalacji fotowoltaicznych w praktycznych warunkach. Ta analiza powinna uwzględniać zarówno techniczne aspekty współpracy z siecią, jak i ewentualne problemy lub wyzwania.

4. Eksperymentalne badania falowników fotowoltaicznych: Przeprowadzenie szczegółowych badań symulacyjnych nad działaniem falowników fotowoltaicznych, które są kluczowym elementem każdej instalacji. Badania te powinny uwzględniać różne modele i typy falowników, a także ich wpływ na efektywność i jakość dostawy energii.

5. Badania ankietowe: Przeprowadzenie badań ankietowych wśród różnych interesariuszy, aby zrozumieć ich percepcję i oczekiwania w kontekście fotowoltaicznych źródeł energii. Te badania mogą dostarczyć ważnych informacji, które mogą pomóc w optymalizacji instalacji i poprawie jej współpracy z siecią elektroenergetyczną.

6. Integracja wyników: Na koniec, wszystkie wyniki powinny być zintegrowane w celu stworzenia kompleksowej oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną. Ta ocena powinna uwzględniać zarówno techniczne jak również społeczne i ekonomiczne aspekty związane z wdrożeniem i eksploatacją systemów fotowoltaicznych.

3. Analiza wyników pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy treści dysertacji stwierdza się, iż autor osiągnął główny cel pracy, pięć celów szczegółowych oraz udowodnił postawioną tezę.

Uzasadnienie osiągnięcia poszczególnych celów:

Cel główny:

Autor opracował metodę oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną, co zostało szczegółowo omówione w rozdziale 10. Autor pracy opracował i zastosował metodę oceny współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną. Wykorzystał do tego min. oprogramowanie komputerowe dostarczone przez kilku różnych, wiodących producentów, jak również zaimplementował algorytmy i arkusze kalkulacyjne własnego pomysłu. Metoda ta pozwala na ocenę dynamiki tego zjawiska, co jest kluczowe dla zrozumienia wpływu instalacji fotowoltaicznych na sieć elektroenergetyczną.

Cele szczegółowe:

1. Autor zidentyfikował przyczyny słabej efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznych, co zostało omówione w rozdziałach 2 do 8 z syntezą w rozdziale 8. Autor pracy przeprowadził szczegółową analizę funkcjonowania instalacji fotowoltaicznych w systemie elektroenergetycznym. W ramach tej analizy, zidentyfikował i omówił problemy dotyczące jakości energii elektrycznej, co pozwoliło mu na wskazanie przyczyn słabej efektywności energetycznej instalacji PV.

2. Autor wykazał związek pomiędzy warunkami atmosferycznymi a generacją zaburzeń elektromagnetycznych przez fotowoltaiczne źródła energii, co zostało omówione w rozdziałach 5 do 8. Autor pracy wykazał powiązanie zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez systemy fotowoltaiczne do sieci elektroenergetycznej ze zmiennością warunków pogodowych, głównie szybkimi zmianami irradiancji. Analiza ta pozwoliła na zrozumienie, jak warunki atmosferyczne wpływają na jakość dostawy energii.

3. Autor opracował metodykę badania falowników fotowoltaicznych pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych, co zostało omówione w rozdziale 8. Autor pracy przeprowadził szereg eksperymentów na falownikach fotowoltaicznych, które są integralnym elementem systemów PV. Badania te zaowocowały opracowaniem metodyki testowania tych urządzeń pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych. Prace zostały wykonane w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatorów promieniowania słonecznego oraz sieci. Udzielono odpowiedzi na pytania o wpływ fotowoltaicznych źródeł energii na jakość dostawy energii elektrycznej. Zaproponowana metodyka pozwala na dokładne badanie wpływu falowników na jakość energii elektrycznej.

4. Autor opracował metodykę badania opinii interesariuszy skupionych wokół klastrów energii na temat rozproszonych źródeł energii, w tym źródeł fotowoltaicznych, co zostało omówione w rozdziale 9. Autor pracy współtworzył metodykę badania opinii różnych interesariuszy na temat klastrów energii i energetyki rozproszonej, w tym fotowoltaicznych źródeł energii i ich wpływu na jakość dostawy energii elektrycznej. W ramach tego celu, przeprowadził badania ankietowe dedykowane do różnych środowisk. Metodyka ta pozwala na zrozumienie, jak różne grupy interesariuszy postrzegają wpływ tych źródeł na dostawę energii elektrycznej.

5. Autor zaproponował oryginalne narzędzia do analizy danych pomiarowych z analizatorów jakości energii elektrycznej (JEE), co zostało omówione w rozdziale 8. Autor pracy zaproponował autorskie narzędzia do analizy danych pomiarowych, takie jak algorytmy i arkusze kalkulacyjne. Te narzędzia zostały wykorzystane do analizy zebranych danych z analizatorów JEE, co pozwoliło na głębsze zrozumienie i interpretację wyników pomiarów. Narzędzia te mogą przyczynić się do rozwoju technologii monitorowania jakości dostawy energii.

Odnosząc się do przytoczonych uzasadnień jak również do wcześniejszych rozdziałów pracy stwierdzono, że cele pracy zostały osiągnięte a teza potwierdzona.

Każdy z celów został osiągnięty poprzez przeprowadzenie szczegółowych badań, analiz, symulacji i opracowanie odpowiednich metodyk. Wszystkie badania wykonane i przedstawione w niniejszej pracy poprzedzone były przygotowaniem, gromadzeniem i weryfikacją danych pomiarowych dla przedziałów czasowych od kilku tygodni do kilku lat. Wyniki tych działań zostały szczegółowo opisane i omówione w pracy, co pozwala na potwierdzenie realizacji postawionych celów.

W szczególności, analiza danych z instalacji fotowoltaicznych pozwala na identyfikację czynników wpływających na efektywność energetyczną tych systemów, takich jak wpływ falowników na jakość energii elektrycznej, wpływ warunków atmosferycznych na generację zaburzeń elektromagnetycznych oraz percepcję różnych grup interesariuszy na temat wpływu tych źródeł na dostawę energii elektrycznej.

Wyniki badań zawarte w niniejszej pracy potwierdzają, że obserwacja i analiza danych pracy instalacji fotowoltaicznej nie tylko umożliwia ocenę jej współpracy z systemem elektroenergetycznym, ale także dostarcza informacji, które mogą przyczynić się do optymalizacji działania tych systemów i poprawy jakości dostawy energii. Rozważania zawarte w pracy udowadniają postawioną tezę. Analizy oraz wnioski wyciągnięte przez autora przedstawione w poszczególnych rozdziałach wraz z syntezą znajdującą się w rozdziale 11, pozwoliły na głębsze zrozumienie złożonych interakcji między fotowoltaiką a systemem elektroenergetycznym, co jest kluczowe dla dalszego rozwoju i integracji tych technologii.

4. Podsumowanie

Opis wykonanych prac, oryginalnych osiągnięć naukowych oraz dalszych planów badawczych.

Praca doktorska dotyczy zagadnień z zakresu elektrotechniki i energetyki, a konkretnie problematyki związanej z fotowoltaicznymi źródłami energii i ich wpływem na jakość dostawy energii elektrycznej. W tekście przedstawione są różne pomysły i wnioski, jakie autor pracy wyciągnął na podstawie swoich badań. Wszystkie badania wykonane przez autora i przedstawione w niniejszej pracy poprzedzone były przygotowaniem, gromadzeniem i weryfikacją danych pomiarowych dla przedziałów czasowych od kilku tygodni do kilku lat. W celu prezentacji pożądaných informacji, zaprojektowano struktury przedstawianých danych i tabel, do przeprowadzenia analiz wykorzystano oprogramowanie komputerowe dostarczone przez kilku różnych, wiodących producentów jak również zaimplementowano algorytmy i arkusze kalkulacyjne własnego pomysłu. Wykonano analizę specyfiki produkcji energii elektrycznej w systemach PV z uwzględnieniem czynników zewnętrznych takich jak parametry pogodowe. Przeprowadzono analizę charakterystyki funkcjonowania instalacji fotowoltaicznych w systemie elektroenergetycznym oraz zgłębiono problemy dotyczące jakości energii elektrycznej min. poprzez szczegółowy przegląd i omówienie dostępnej literatury naukowej.

Badania zawarte w rozprawie doktorskiej przeprowadzono łącznie na 7 instalacjach fotowoltaicznych składających się sumarycznie z 3 434 modułów fotowoltaicznych o całkowitej mocy szczytowej 801,19 [kWp]. Prace prowadzono w trzech różnych laboratoriach AGH: Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej, Laboratorium Robotyki, Fotowoltaiki i Lewitacji Magnetycznej, Laboratorium Maszyn i Napędu Elektrycznego oraz w Centrum Energetyki AGH.

Można wyróżnić pięć głównych grup działań, które zostały przeprowadzone w ramach prac nad rozprawą doktorską:

I. Przegląd aktualnej literatury oraz dyskusja na temat odnawialnych źródeł energii i jakości dostawy energii elektrycznej.

II. Część praktyczna doktoratu.

Analiza wpływu na sieć elektroenergetyczną siedmiu instalacji fotowoltaicznych (badawczych i komercyjnych) o łącznej mocy 801,19 kWp:

1. Park Naukowo-Technologiczny Euro-Centrum budynek nr. 8. Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 107,22 kWp (455 modułów PV).
2. Park Naukowo-Technologiczny Euro-Centrum budynek nr. 10. Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 209,85 kWp (820 modułów PV).
3. Park Naukowo-Technologiczny Euro-Centrum budynek nr. 11. Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 47 kWp (188 modułów PV).
4. TAURON Dystrybucja S.A. Oddział w Gliwicach. Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 53,07 kWp (384 moduły PV).
5. PV AGH monitoring 1 - MPWIK Kraków. Zakład Oczyszczania Ścieków Płaszów. Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 60 kWp (240 modułów PV).
6. PV AGH monitoring 2 - GPW Ruda Śląska. Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 311 kWp (1296 modułów PV).

III. Część praktyczna doktoratu.

Badania porównawcze modułów fotowoltaicznych:

7. Laboratorium RFiLM na dachu budynku C3 AGH: Moc szczytowa instalacji fotowoltaicznej: 13,049 kWp (51 modułów PV).

IV. Część symulacyjna doktoratu.

Przeprowadzenie testów laboratoryjnych 31 falowników fotowoltaicznych pod kątem ich wpływu na jakość dostawy energii elektrycznej z instalacji PV.

V. Badania ankietowe na temat fotowoltaicznych źródeł energii. Klastry energii.

1. Ankieta 1 „Klastry energii - szanse i bariery rozwoju. Koordynatorzy klastrów energii”. 51 pytań i 50 wypełnionych ankiet.
2. Ankieta 2 „Klastry energii - szanse i bariery rozwoju. Część 2: Operatorzy sieci dystrybucyjnych”. 73 pytania i 51 wypełnionych ankiet.
3. Ankieta 2 załącznik 1: Jakość dostawy energii elektrycznej i instalacje PV. 20 pytań i 19 wypełnionych ankiet.
4. Ankieta 3 „Klastry energii - szanse i bariery rozwoju. Część 3: Instytucje zainteresowane rozwojem energetyki rozproszonej w Polsce”. 36 pytań i 15 wypełnionych ankiet.

Autor w swojej pracy badawczej przeprowadził szereg eksperymentów na falownikach fotowoltaicznych co zaowocowało opracowaniem metodyki testowania tych urządzeń pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych. Badania te zostały wykonane w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatorów promieniowania słonecznego oraz sieci. Autor podkreśla jednak, że wyniki te mogą odbiegać od rzeczywistych, ponieważ symulatory nie odwzorowują dokładnie naturalnych warunków. W związku z tym jako kolejny etap badań proponuje sprawdzenie funkcjonowania falowników w systemie elektroenergetycznym. Zwraca uwagę na wzrastającą liczbę instalacji fotowoltaicznych w Polsce i wskazuje, że jego badania mogą pomóc w ocenie wpływu falowników na parametry sieci elektroenergetycznej. Zakres badań przeprowadzonych przez autora pracy, może przyczynić się do umożliwienia dokonania oceny spełniania przez inwertery wymogów Kodeksu Sieci RfG oraz do identyfikacji możliwości efektywniejszego prowadzenia ruchu sieci. W pracy w szczególności skupiono się na analizie wyższych harmonicznych prądu i napięcia oraz ich powiązaniu z warunkami atmosferycznymi oddziałującymi na instalacje PV. Wykazano wpływ zacienienia oraz ograniczonej irradancji na pracę falowników fotowoltaicznych a co za tym idzie na sieć elektroenergetyczną do której podpięte są instalacje PV. Zaprezentowano różnice w odpowiedzi badanych urządzeń na zadane warunki pracy i przedstawiono ich potencjalne konsekwencje na poprawność działania sieci elektroenergetycznej.

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących generacji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych. Dane zawarte w tabelach i wykresach pokazują, że produkcja ta jest bardzo zmienna, a różnice między miesiącami rok do roku mogą sięgać nawet 130%. Predykcje uzysków energetycznych dla danej lokalizacji dokonywane są głównie na podstawie historycznych danych pogodowych i analizie statystycznej. Wynika z tego, że nie da się dokładnie przewidzieć produkcji energii elektrycznej z danej instalacji PV a co za tym idzie nie da się dokładnie określić poziomu zaburzeń jaki zostanie przez nią wygenerowany i przeniesiony do sieci elektroenergetycznej. Z punktu widzenia niniejszej rozprawy doktorskiej jest to bardzo ważny wniosek dotyczący wpływu fotowoltaicznych źródeł energii na jakość dostawy energii elektrycznej. Sytuacja taka skłania również do podejmowania przez autora pracy dalszych działań badawczych skupiających się wokół zagadnień predykcyjnych dla zakłóceń pochodzących z systemów PV.

Autor tekstu wskazuje na ważność wyboru odpowiednich elementów składowych systemu fotowoltaicznego. Porównuje uzyski energetyczne dwóch niemal identycznych paneli PV i pokazuje wpływ wynikłych różnic na eksploatację instalacji fotowoltaicznej oraz jakość dostawy energii elektrycznej. Autor stwierdza, że moduły z czarną ramką miały wyższe wartości od modułów z ramką białą, ale nie były to znaczące różnice. Jednocześnie zaznacza, że wyniki te należy interpretować ostrożnie, gdyż podczas skalowania wielkości instalacji PV, wartości uzysków jak również generowanych zaburzeń również będą się zmieniać.

Kolejnym omówionym zagadnieniem jest funkcjonowanie klastrów energii na terenie Polski. Autor pracy był członkiem zespołu badawczego, który opracował pytania sondażowe dotyczące klastrów energii. W ramach tych badań skupiono się na opinii respondentów, a autor przedstawił w pracy szczegóły zaproponowanej metodyki badawczej. Metodyka ta opierała się na przeprowadzeniu badań ankietowych wśród kilku różnych grup respondentów, a następnie analizie uzyskanych odpowiedzi, którą autor opracował samodzielnie. Przeprowadzono trzy kwestionariusze z sumaryczną ilością pytań wynoszącą 180, w których łącznie wzięło udział 116 podmiotów (osób fizycznych i instytucji). Za sprawą tych działań przeanalizowano perspektywę i poziom wiedzy społeczeństwa polskiego na temat fotowoltaicznych źródeł energii i jakości dostaw energii elektrycznej na przykładzie twórców klastrów energii, dystrybutorów sieci elektroenergetycznej i instytucji zainteresowanych transformacją energetyczną w Polsce. Zweryfikowano czy funkcjonowanie klastrów energii według opinii ich koordynatorów i mieszkańców, może mieć wpływ na poprawę jakości energii elektrycznej i zapewnienie ciągłości jej dostaw. Co więcej wykazano jakiego zdaniem Polaków rozproszone źródło energii jest najbardziej obiecującym w Polsce i jakie źródło cieszy się ich największym zainteresowaniem. W rozdziale tym dokonano oceny opinii dystrybutorów sieci elektroenergetycznych na temat wpływu fotowoltaicznych źródeł energii elektrycznej na jakość parametrów energii elektrycznej oraz zweryfikowano, czy widzą związek pomiędzy wzrostem występowania zaburzeń elektromagnetycznych w sieci elektroenergetycznej a wzrostem ilości instalacji fotowoltaicznych.

W ramach badań autor pracy udowodnił pomiarowo związek pomiędzy zmianami w nasłonecznieniu paneli a wzmożoną generacją zaburzeń elektromagnetycznych ze szczególnym zwróceniem uwagi na harmoniczne prądu. W pracy zaproponował również nowe wskaźniki, takie jak PDPP_{st} i PDPTH_U, które pozwalają na analizę poziomu komfortu migotania światła dla człowieka oraz przekroczonego dopuszczalnego poziomu THD_U w badanych zbiorach danych.

Oryginalne elementy naukowe pracy:

- Opracowanie metodyki badania falowników jedno i trójfazowych dedykowanych do instalacji fotowoltaicznych oraz analiza uzyskanych wyników
- Opracowanie testów dedykowanych dla falowników PV pod kątem generacji zaburzeń elektromagnetycznych
- Opracowanie metodyki badania opinii twórców i koordynatorów klastrów na temat klastrów energii i energetyki rozproszonej, w tym fotowoltaicznych źródeł energii oraz analiza uzyskanych wyników
- Opracowanie metodyki badania opinii operatorów sieci dystrybucyjnych na temat klastrów energii i energetyki rozproszonej, w tym fotowoltaicznych źródeł energii i ich wpływu na jakość dostawy energii elektrycznej oraz analiza uzyskanych wyników
- Opracowanie metodyki badania opinii instytucji zainteresowanych rozwojem energetyki rozproszonej w Polsce na temat klastrów energii i energetyki rozproszonej, w tym fotowoltaicznych źródeł energii i ich wpływu na jakość dostawy energii elektrycznej oraz analiza uzyskanych wyników
- Analizy zebranych danych przy wykorzystaniu autorskich narzędzi takich jak algorytmy i arkusze kalkulacyjne

- Wykazanie powiązania zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez systemy fotowoltaiczne do sieci elektroenergetycznej ze zmiennością warunków atmosferycznych (głównie szybkie zmiany irradiancji)
- Wykazanie związku pomiędzy harmonicznymi prądu a harmonicznymi napięcia
- Zaproponowanie nowych wskaźników PDPP_{st} i PDPTH_{D_U} do analizy poziomu dyskomfortu spowodowanego migotaniem światła dla ludzi oraz poziomu THD_U przekraczającego dopuszczalne wartości w ocenianych zbiorach danych pomiarowych
- Przeprowadzenie analizy porównawczej modułów fotowoltaicznych

Plany na kontynuację badań:

- Sprawdzenie funkcjonowania falowników w systemie elektroenergetycznym
- Sformułowanie lub doprecyzowanie wymagań stawianych falownikom fotowoltaicznym
- Stworzenie algorytmu pozwalającego na przeliczenie natężenia prądu modułu PV na nasłonecznienie, czyli irradiancję
- Predykcja zakłóceń generowanych przez systemy fotowoltaiczne

Autor pracy w tekście pracy wielokrotnie podkreśla i udowadnia aktualność i ważność podejmowanej tematyki badawczej. Przytoczone w dysertacji raporty, analizy i predykcje dowodzą, że zarówno polska jak i światowa energetyka zmierza w stronę zdecentralizowanych, rozproszonych źródeł energii. W związku z powyższym jako naturalną kontynuację swojego rozwoju naukowego autor chciałby zgłębiać problemy omawiane w niniejszej pracy. Jedną z propozycji na kontynuację badań naukowych jest stworzenie algorytmu pozwalającego na przeliczenie natężenia prądu modułu fotowoltaicznego na nasłonecznienie, czyli irradiancję. Działanie takie mogłoby zdaniem autora pomóc naukowcom jak również innym osobom zajmującym się tą dziedziną w przeprowadzaniu dokładniejszych analiz działania instalacji PV. Autor pracy porusza również temat predykcyjnych badań dotyczących zakłóceń generowanych przez systemy fotowoltaiczne. Zdaniem badacza, może się to stać istotnym zagadnieniem w przyszłości z racji dynamicznie wzrastającej ilości instalacji PV w systemie elektroenergetycznym.

W tekście omawiane są badania nad falownikami przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych a autor pracy proponuje sprawdzenie funkcjonowania testowanych falowników w warunkach naturalnych, czyli w systemie elektroenergetycznym, co może być następnym etapem badań. Jest to istotne ze względu na rosnącą liczbę instalacji fotowoltaicznych w kraju, a wiedza na temat wpływu falowników na parametry sieci elektroenergetycznej może być cenna zarówno dla inwestorów jak i operatorów systemów dystrybucyjnych.