

dr hab. inż. Mirosław Szmajda, prof. uczelni
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Automatyki
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole
m.szmajda@po.edu.pl

Opole, 3 października 2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusz Bartczak

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Borkowski

Dyscyplina naukowa: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

1. WSTĘP I PODSTAWA PRAWNA

Recenzja została zlecona przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej w piśmie o znaku RDN-AEE/134/2022 z dnia 22.07.2022 r. w oparciu o dokumentację, w skład której wchodzi:

- rozprawa doktorska pt.: „Dobór algorytmów MPPT w systemie fotowoltaicznym w warunkach częściowego zacielenia z wykorzystaniem oddziaływań impulsowych”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Józef Borkowski.

Recenzja dotyczy postępowania w przewodzie doktorskim wszczętego w dyscyplinie Elektronika, co wg obecnych uwarunkowań prawnych, określonych w rozporządzeniu MNiSW z dnia 2018 r. w sprawie dziedzin i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. 2018, poz. 1818) odpowiada dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

2. OCENA FORMALNA PRACY

Praca doktorska pt.: „Dobór algorytmów MPPT w systemie fotowoltaicznym w warunkach częściowego zacielenia z wykorzystaniem oddziaływań impulsowych” obejmuje 97 stron i składa się z 6 zasadniczych rozdziałów, w tym bibliografii z wykazem 71 prac. Praca jest uzupełniona: streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem wybranych skrótów anglojęzycznych, wykazem ważniejszych oznaczeń, wprowadzeniem, rozdziałem zawierającym cel i tezę pracy, spisem rysunków. Praca jest napisana w języku polskim i zorganizowana jak poniżej:

- nienumerowany rozdział „Wprowadzenie” - wprowadzenie w tematykę rozprawy,
- nienumerowany rozdział „Cel, zakres i teza pracy”,
- rozdział 1 – prezentujący własności fizyczne, modelowanie oraz wykorzystania paneli fotowoltaicznych,
- rozdział 2 – traktujący o zacieleniu paneli fotowoltaicznych,
- rozdział 3 – dotyczący modelowania systemu fotowoltaicznego,
- rozdział 4 – prezentujący algorytmy MPPT – śledzenia punktu mocy maksymalnej wraz z opisem autorskiego algorytmu,

- rozdział 5 – podsumowującego dysertację z ze wskazaniem możliwości rozwojowych metod oraz ich ograniczeń,
- rozdział 6 – bibliografia.

Uwagi na temat poprawności językowej i redakcyjnej rozprawy.

- Praca jest napisana starannie bez większych błędów językowych.
- Generalnie struktura pracy jest logiczna i czytelna.
- Moim zdaniem wstęp powinien być numerowany i otwierać pracę jako rozdział nr. 1.
- Cel, zakres oraz teza pracy zostały poprawnie.
- Brak cytowania wzorów w całym dokumencie w tekście poprzedzającym ich wprowadzenie.
- Rozdział 2.2. Na rys. 21 jest prawdopodobnie błąd. Przesyłane dane do bazy MS SQL zapewne powinny być: I_{sc1} , I_{sc2} , V_{oc1} , V_{oc2} .
- Rozdział 2.2. str. 33 u góry. Ścisłej powinno być „maksymalna wartość prądu zwarcia wynosi 650 mA”.
- Rozdział 2.2 str. 33-34. Brak komentarza do rys. 28 i 29.
- Rozdział 2.2 str. 34. Brak legendy do rys. 30.
- Rozdział 2.2 str. 35. Rys. 30 prawa strona mało czytelna. Brak komentarza do tego rysunku. Jaka jest interpretacja zwłaszcza prawej części rysunku?
- Rozdział 2.2 str. 35. Rys. 34 lewa strona. Brak legendy.
- Rozdział 3.2. W równaniach (8) oraz w cytowanym w tekście równaniu (6) nie występuje współczynnik napięcia termicznego V_t .
- Rozdział 3.3. Rys. 42. W algorytmie w bloku 4 od góry występuje nigdzie nie zdefiniowany wcześniej parametr V_{mpc} . Proszę o komentarz.
- Rozdział 4.4. Brak komentarzy do rys. 66 – 68.

3. OCENA MERYTORYCZNA PRACY

3.1. Istotność zagadnienia.

Tematyka niniejszej dysertacji związana jest z zagadnieniami optymalizacji algorytmów śledzenia maksymalnego punktu mocy MPPT (Maximum Power Point Tracking) w systemach pozyskiwania energii elektrycznej z energii słonecznej - paneli fotowoltaicznych PV. Praca stanowi propozycję rozwiązania problemu implementacji optymalnego algorytmu MPPT z punktu widzenia pracy systemu fotowoltaicznego, którego panele PV mogą podlegać częściowym zacięniom. Tematyka ta jest bardzo istotna obecnie, w dobie dynamicznego wzrostu mikroinstalacji PV, gdzie często występuje ryzyko częściowego przysłaniania paneli przez różnego rodzaju przeszkody typu: drzewa, kominy, inne budynki, ptasie odchody, kurz lub chmury. Czynniki te mają istotny wpływ na wydajność systemu fotowoltaicznego oraz skrócenie jego żywotności. Doktorant podejmuje próbę rozwiązania problemu, proponując autorski algorytm, będący połączeniem dwóch znanych algorytmów, poprzedzonych procedurą pomiarową, w wyniku której wykrywany jest stan równomiernego oświetlenia panelu lub jego częściowego zacięniem. Ostatecznie dysertacja stanowi krok w kierunku opracowania inteligentnego algorytmu MPPT, mogącego być zaimplementowanym w inwerterach fotowoltaicznych.

Uważam, że praca porusza zagadnienia istotne oraz ewidentnie posiada charakter badawczy i wpisuje się w zakres zagadnień dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.



3.2. Zawartość merytoryczna pracy

Wprowadzenie prezentuje krótką motywację podjęcia Doktoranta zagadnienia opracowania algorytmu oddziaływań impulsowych, rozszerzających możliwości obecnie stosowanych algorytmów MPPT. Następnie zaprezentował strukturę rozprawy objaśniając kolejność wprowadzanych zagadnień. Odczuwa się jednak brak odniesień w tym rozdziale do najważniejszych publikacji z literatury przedmiotu, wskazujących m.in. na konieczność podjęcia badań nad zwiększaniem efektywności algorytmów MPPT.

W rozdziale **Cel, zakres i teza pracy**, ustalono cel pracy jako:

„opracowanie nowej metody śledzenia maksymalnego punktu mocy, bazującej na doborze algorytmu MPPT przy pomocy krótkich oddziaływań impulsowych, prowadzącej do poprawy efektywności systemu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacielenia”,

oraz postawiono tezę:

„zastosowanie oddziaływań impulsowych w algorytmie śledzenia maksymalnego punktu mocy pozwala na efektywny wzrost sprawności systemu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacielenia”.

W ramach pracy mają zostać przeprowadzone czynności o następującym zakresie:

- modelowanie elementów systemu fotowoltaicznego w warunkach dużej dynamiki zmian impedancji obciążenia,
- badania symulacyjne umożliwiające udoskonalenie modeli,
- badania eksperymentalne umożliwiające opracowania modeli zmian nasłonecznienia odpowiadającym rzeczywistym warunkom częściowego zacielenia,
- opracowania algorytmu MPPT wykorzystującego oddziaływanie impulsowe,
- zaprojektowanie i wykonanie układów pomiarowych, potwierdzających poprawność tworzonych modeli elementów systemu fotowoltaicznego, profili zmian nasłonecznienia oraz opracowanego algorytmu MPPT.

Teza postawiona jest jasno, choć dosyć ostrożnie, ze względu na brak ilościowych uwarunkowań, potwierdzających efektywny wzrost sprawności systemu fotowoltaicznego. Cel i zakres pracy jasny oraz poprawny.

Rozdział 1 stanowi rys historyczny, wprowadzający do podstaw fizycznych tematyki generowania energii elektrycznej w funkcji oświetlenia słonecznego, zawierający m.in.: historię wykorzystania energii słonecznej, wprowadzenie do zagadnienia promieniowania słonecznego, sposobów usytuowania paneli fotowoltaicznych oraz zarysu zagadnienia tzw. trackerów fotowoltaicznych, charakterystyk ogniw fotowoltaicznych oraz ostatecznie modeli ogniw fotowoltaicznych.

W **rozdziale 2** Doktorant prezentuje problemy, związane z częściowymi zacieleniami paneli fotowoltaicznych, oraz sposobami zapobiegania uszkodzeniom paneli związanych z tym zjawiskiem. Identyfikuje, iż zastosowanie diod bocznikujących lub tranzystorów odłączających zacieleną sekcję ogniw, wpływa na charakterystykę prądowo-napięciową I-V oraz mocowo-napięciową P-V modułu PV. Aby zaobserwować przedmiotowe zjawisko Doktorant konstruuje autorski układ pomiarowy do badań rzeczywistych charakterystyk zmian oświetlenia paneli PV. Układ składa się z dwóch paneli PV, zamontowanych obok siebie i odpowiednio zorientowanych względem kierunku oraz nachylenia do podłoża. Panele są wyposażone w czujnik prądu oraz tranzystor kluczujący MOSFET. Moc ogniw wynosi po 10 W, prąd zwarcioowy 0,65 A oraz napięcie na nieobciążonym ogniwie 21,6 V. Układ



umożliwiał rejestrację prądów oraz napięć w obydwu układach PV oraz sterowanie kluczami tranzystorowymi. Sterowanie tranzystorami oraz pomiary wykonywane były za pomocą specjalnie skonstruowanego systemu wbudowanego, zawierającego dwurdzeniowy mikrokontroler rodziny ESP32. Jeden z rdzeni realizował sekwencję pomiarową oraz sterowanie, natomiast drugi pełnił rolę komunikacyjną, wysyłając dane za pomocą łącza Wi-Fi do serwera. Również Doktorant opracował oprogramowanie serwera w języku C# w środowisku ASP.NET CORE. Na serwerze znajdowała się baza danych MS SQL. W języku Java Script wykorzystując narzędzie Angular 12. Dane pomiarowe gromadzone były zdalnie w bazie MSSQL, do których dostęp był za pomocą specjalnie stworzonej strony internetowej. Interesującym byłoby zamieszczenie w dysertacji zdjęcia stanowiska pomiarowego wraz z jego opisem oraz zrzuty ekranu stworzonej strony internetowej. Istotne jest to zwłaszcza, ponieważ stwierdzenie: „każdy z paneli jest zamontowany w taki sposób, że kierunek ułożenia ciągu szeregowo połączonych ogniw w panelu jest prostopadły do gruntu” jest nie do końca dla mnie zrozumiałe. Myślę, że zdjęcie wyjaśniłoby wszystko.

Opracowana została również procedura sterowania, polegająca na zwieraniu oraz rozwieraniu ogniw oraz na pomiarze i akwizycji prądów i napięć - rys. 21. Doktorant niestety nie skomentował dokładniej tego rysunku, określając dlaczego zastosował akurat opóźnienia 500 ms. Algorytm działa w pętli nieskończonej (blok decyzyjny „if == 1”), czy nie wystarczyłoby zwyczajnie „zapętlić” powtarzalnego fragmentu bez stosowania bloku warunkowego. Jakie były ilości zebranych danych? Ze względu na fakt, iż urządzenie jest w rzeczywistości urządzeniem pomiarowym, czy oszacowano niepewność pomiaru napięć i prądów? W szczególności warto by określić rozrzut pomiarów, uwiarygadniając uzyskane pomiary.

W celu ustalenia korelacji pomiędzy mocą uzyskaną z paneli a warunkami atmosferycznymi, w szczególności zachmurzeniem nieba, pozyskano dane z lokalnej stacji meteorologicznej. Następnie porównano trendy napięć otwartych obwodów (V_{oc}) oraz różnicy tych napięć obydwóch paneli (ΔV_{oc}). Porównanie dotyczyło dwóch dni o zróżnicowanym nasłonecznieniu. Widoczna jest zauważalna, aczkolwiek niewielka różnica rozrzutu wartości ΔV_{oc} w dniach o dużym nasłonecznieniu i pochmurnym. Zjawisko to bardziej widoczne jest przy analizie prądów zwartego ogniwa I_{sc} oraz różnicy tych prądów w obydwu panelach ΔI_{sc} . Ostatecznie Doktorant konstatuje, iż większe wartości parametrów ΔV_{oc} oraz ΔI_{sc} występują dla warunków częściowego zacienienia, niż w warunkach podobnego nasłonecznienia obydwu paneli. Ponadto, analizując prąd I_{sc} możliwe jest oszacowanie stanu nasłonecznienia w określonym dniu. Doktorant przeanalizował zachowanie się charakterystyk I-V oraz P-V w funkcji czasu dla różnych scenariuszy nasłonecznienia, m.in.: występowanie częściowego zacienienia – intensywniejsze oświetlenie najpierw pierwszego panelu a następnie drugiego oraz stopniowe wyłanianie się słońca oraz ponowne zachmurzenie podczas dnia pochmurnego. Badania dowodzą dynamicznych zmian punktu MPP, które mogą sprawiać problemy przy zastosowaniu standardowych algorytmów MPPT.

Rozdział 3 prezentuje zagadnienia związane z modelowaniem systemu fotowoltaicznego. Zaproponowany został panel fotowoltaiczny za pomocą modelu połączonych ze sobą szeregowo trzech grup ogniw i zabezpieczony trzema diodami bocznikującymi. Model modułu PV został zamodelowany za pomocą rozszerzonego modelu jednodiodowego. Doktorant, w celu polepszenia estymacji parametrów ogniwa PV dla oświetlenia o niskim natężeniu, zaproponował modyfikację stosowanego w niniejszej pracy algorytmu Stornelli. Zmodyfikowany algorytm wyznacza w sposób iteracyjny pięć parametrów modelu w oparciu parametry wejściowe: I_{sc} , V_{oc} , I_{MP} (prąd w punkcie maksymalnej mocy), V_{MP} (napięcie w punkcie maksymalnej mocy). Algorytm jest dwuetapowy i najpierw wyznaczana jest rezystancja szeregową R_s , obliczana na podstawie iteracyjnego dopasowania wyznaczonej wartości napięcia do podanego przez producenta parametru V_{MP} , przy założonej a priori wartości współczynnika

idealności diody n_1 (rys. 41). Drugi etap wyznacza wartość rezystancji równoległej R_{sh} , korzystając z tego samego algorytmu (rys. 42), z tym, że algorytm poszukuje optymalnej wartości parametru R_{sh} , dopasowując się do zdefiniowanej przez producenta wartości I_{mp} .

Dysponując modelem własnym oraz Stornelliiego Doktorant przetestował zbieżności algorytmów dla warunków dobrego i słabego oświetlenia. Brak jest jednak komentarza jak wykonał owo badanie. Doktorant stwierdził, iż proponowany przez niego algorytm uzyskał lepszą estymację parametrów charakterystyki dla słabego oświetlenia. Nie wyraził jednak o ile i czy wartość ta była znacząca. Interesujące byłoby zbadać jak model się zachowuje przy jeszcze niższych natężeniach światła. Następnie został przetestowany panel rzeczywisty dla dwóch oświetleń o natężeniach 1000 W/m^2 oraz 300 W/m^2 . Badania wskazują na nieznaczną 1% większą dokładność dopasowania krzywej względem algorytmu Stornelliiego. Doktorant podsumowuje, iż algorytmu tego nie powinno się stosować dla estymacji małych ogniw PV. Czy ten wniosek wynika z rys. 45? Tutaj pomocny byłoby szerszy komentarz.

Kolejnym krokiem konstruowania modelu było uwzględnienie pojemności ogniw PV. Doktorant rozważa istotność tego zjawiska oraz proponuje metodę pomiarową, umożliwiającą oszacowania pojemności ogniwa. Zostały zdjęte charakterystyki czasowe odpowiedzi układu na pobudzenie impulsem zwarcia w różnych warunkach oświetlenia o wartościach natężenia światła od 150 W/m^2 do 600 W/m^2 . Doktorant podsumowuje, iż ze wzrostem napięcia rośnie pojemność ogniwa. Czy na podstawie rys. 49 został wyciągnięty taki wniosek? I dalej Doktorant stwierdza, iż: „gdy napięcie jest mniejsze niż $0,6 \text{ V}$ i wartość prądu jest zbliżona do wartości prądu zwarcia I_{sc} ogniwa to pojemność jest mniejsza”. Skąd wynika ta wartość napięcia $0,6 \text{ V}$? Nie wynika to z rys. 49. Zapewne chodzi tu o rys. 51 i rys. 52, natomiast nie wynika to wprost z lektury bieżącego tekstu. W dalszej części podrozdziału wprowadzone są teoretyczne zależności pojemności ogniwa w zależności od jego fizycznej budowy. Doktorant wykorzystuje tu oprogramowanie SCAPS w celu wyznaczenia charakterystyk pojemnościowo-napięciowych C-V. Brak jest tutaj jednak spójności pomiędzy zarejestrowanymi rzeczywistymi przebiegami z pierwszej części podrozdziału z charakterystykami C-V, wyznaczonymi teoretycznie na podstawie programu SCAPS. Rozwiązaniem być może byłoby zamodelowanie ogniwa PV, określając jego pojemność i teoretyczne wygenerowanie przebiegów jak w pierwszej części podrozdziału, a następnie dopasowanie modelu do otrzymanych przebiegów rzeczywistych. Kwestia, czy oprogramowanie SCAPS ma takie możliwości?

Część powyższych wątpliwości wyjaśnia się w podrozdziale 3.5, w którym Doktorant uzupełnia model jednodiodowy o pojemność nieliniową C_{pv} . Model ten był zaproponowany w publikacji [57] z 2010, natomiast Doktorant zauważył, iż założenie liniowej zależności pojemności C_{pv} można zastosować w przypadku wartości natężenia promieniowania poniżej ok. 300 W/m^2 . Nie wyjaśnia on na podstawie jakich wyników, bądź rozważań wyciągnięte zostały takie wnioski. Prawdopodobnie sytuację tę wyjaśniają rys. 56 i rys. 58, na których przedstawiono nieliniowe zależności pojemności od napięcia przy różnych wartościach natężenia promieniowania i temperatury pracy, jednak Doktorant nie odwołuje się do tych rysunków w przytoczonym kontekście. W tym podrozdziale dokonano również analitycznych rozważań nad wpływem dodatkowej pojemności na czasowe odpowiedzi układu na pobudzenie impulsem zwarcia i porównano je z podobnymi zasymulowanymi w Matlabie. Porównanie to wykonano dla jednego natężenia promieniowania, prawdopodobnie 150 W/m^2 , jednak nie wynika to wprost zarówno z rys. 55, jak i tekstu podrozdziału. Interesujące byłoby jednak jak wyglądałyby wyniki pomiarów dla natężenia o wartości powyżej 300 W/m^2 . Również zasymulowano zmiany odpowiedzi na pobudzenie impulsem zwarcia w funkcji temperatury w zakresie $25^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}$. Sugerowałbym rozważenie w przyszłości również temperatur ujemnych, ponieważ takie temperatury pracy panelu PV są naturalne dla naszych szerokości geograficznych, nie mówiąc

o warunkach panujących w przestrzeni kosmicznej, w których to panele PV są bardzo często stosowane.

W podrozdziale Doktorant wykonuje również eksperyment z 90% zacieleniem jednego z paneli oraz rejestracją odpowiedzi na pobudzenie impulsem zwarcia. Jest to kluczowy moment z punktu widzenia proponowanego autorskiego algorytmu MPPT, ponieważ monitoring charakterystycznego „załamania” przebiegu umożliwi detekcję częściowego zacielenia panelu PV. Z tego względu odczuwa się tutaj brak pogłębionego komentarza zjawiska oraz ewentualnej próby jego zamodelowania i określenia wpływu najważniejszych parametrów takich jak np. pojemność czy temperatura.

Rozdział 4 zawiera wprowadzenie, krótkie omówienie stosowanych obecnie algorytmów MPPT wraz z wynikami symulacji, obrazującymi zmiany punktu MPP w warunkach częściowego zacielenia oraz bez zacielenia. Zaprezentowano następujące algorytmy: P&O (Perturb and Observe), IC (Incremental Conductance), PSO (Particle Swarm Optimization), CS (Cuckoo Search), FSC (Fractional Short-Circuit Current) oraz FOV (Fractional Open-Circuit Voltage). Doktorant stwierdza, iż spośród omawianych algorytmów P&O jest najczęściej używany i sprawdza się w przypadkach występowania jednego maksimum w charakterystyce P-V. Natomiast w przypadkach występowania kilku maksimum lokalnych w tej charakterystyce, algorytm P&O „utyka” i lepszym rozwiązaniem jest CS, który jest odporny na tego typu zjawisko kosztem dłuższego poszukiwania globalnego maksimum.

W podrozdziale 4.8 ostatecznie przedstawiono autorski algorytm z wykorzystaniem oddziaływania impulsowego. W rzeczywistości jest on połączeniem dwóch algorytmów: P&O oraz CS. Rodzaj algorytmu jest wybierany w wyniku monitoringu zmian mocy pobieranej z systemu fotowoltaicznego. Po detekcji takiej zmiany uruchamiane jest krótkie zwarcie panelu PV w celu rejestracji charakterystyki zmian napięcia powrotu, opisanej w rozdziale 3.5, oraz na jej podstawie ustalone, czy bieżące warunki pogodowe odpowiadają częściowemu zacieleniu czy też jego braku. W pierwszym z przypadków wybierany jest algorytm CS, ze względu na spodziewane występowanie więcej niż jednego maksimum na charakterystyce P-V. W drugim przypadku, charakterystyka P-V będzie zawierała tylko jedno maksimum globalne, do poszukiwania którego wybrany zostanie szybszy od CS algorytm P&O. Następnie Doktorant prezentuje zmodyfikowaną przez siebie przetwornicę DC/DC, która umożliwi implementację autorskiego algorytmu. Ostatecznie przetestowano działanie algorytmu na: wygenerowanych teoretycznie profilach skokowych oraz liniowych zmianach nasłonecznienia (zawierającego elementy zacielenia oraz jego braku), zarejestrowanych rzeczywistych warunków zacielenia z dwoma oraz trzema ekstremami lokalnymi charakterystyki P-V. Podsumowując efekty badań widoczne jest, iż autorski algorytm zaproponowany przez Doktoranta łączy pozytywne elementy algorytmów P&O oraz CS. W przypadku niezmiennych się warunków pogodowych – ciągłego zacielenia bądź ciągłego nasłonecznienia, poszczególne algorytmy są nieznacznie (na poziomie poniżej 0,05%) lepsze od algorytmu Doktoranta, ale w przypadku zmiany warunków (z zacielenia na ciągłe nasłonecznienie lub odwrotnie) gorsze są już przynajmniej o ponad 2% i wartości te zależą od liczby takich zmian. Ponadto udowodniono, iż algorytm ten sprawdza się również w oparciu o sygnały rzeczywiste.

Tym samym stawiana **teza** „zastosowanie oddziaływań impulsowych w algorytmie śledzenia maksymalnego punktu mocy pozwala na efektywny wzrost sprawności systemu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacielenia” **została udowodniona**.

W **rozdziale 5** zostało zawarte 3 stronicowe podsumowanie, omawiające tok logiczny dysertacji oraz wykaz elementów autorskich, poruszanych w rozprawie.

3.3. Uwagi dyskusyjne

1. We wprowadzeniu brak jest odniesień do najważniejszych publikacji z literatury przedmiotu, wskazujących m.in. na konieczność podjęcia badań nad zwiększaniem efektywności algorytmów MPPT. Proszę ustosunkować się, które z publikacji są najważniejsze, z punktu widzenia tez stawianych w niniejszej dysertacji.
2. Warto by zamieścić zdjęcia stanowiska pomiarowego wraz z opisem poszczególnych jego elementów oraz zrzutów ekranu stworzonego oprogramowania. Istotne jest to zwłaszcza, ponieważ zdanie: „Każdy z paneli jest zamontowany w taki sposób, że kierunek ułożenia ciągu szeregowo połączonych ogniw w panelu jest prostopadły do gruntu” jest nie do końca dla mnie zrozumiałe. Myślę, że zdjęcie wyjaśniłoby wszystko.
3. Ze względu na fakt, iż urządzenie jest w rzeczywistości urządzeniem pomiarowym, czy oszacowano niepewność pomiaru napięć i prądów. W szczególności warto określić rozrzut pomiarów, uwiarygadniając uzyskane pomiary.
4. Na czym polegało badanie zbieżności modeli: własnego oraz Stornelliiego w rozdziale 3.3.
5. Doktorant stwierdził, iż proponowany przez niego algorytm uzyskał lepszą estymację parametrów charakterystyki dla słabego oświetlenia niż algorytm Stornelliiego. Nie wyraził jednak o ile i czy wartość ta była znacząca.
6. Badania wskazują na nieznaczną 1% większą dokładność dopasowania krzywej względem algorytmu Stornelliiego. Doktorant podsumowuje, iż algorytmu tego nie powinno się stosować dla estymacji małych ogniw PV. Czy ten wniosek wynika z rys. 45? Tutaj pomocny byłby szerszy komentarz.
7. Rozdział 3.4. Doktorant stwierdza, iż ze wzrostem napięcia rośnie pojemność ogniwa. Czy na podstawie rys. 49 został wyciągnięty taki wniosek? I dalej Doktorant pisze, iż: „gdy napięcie jest mniejsze niż 0,6 V i wartość prądu jest zbliżona do wartości prądu zwarcia I_{sc} ogniwa to pojemność jest mniejsza”. Skąd wynika ta wartość napięcia 0,6 V? Nie wynika to z rys. 49. Zapewne chodzi tu o rys. 51 i rys. 52, natomiast nie wynika to wprost z lektury bieżącego tekstu.
8. Rozdział 3.4. Doktorant wykorzystuje tu oprogramowanie SCAPS w celu wyznaczenia charakterystyk pojemnościowo-napięciowych C-V. Brak jest tutaj jednak spójności pomiędzy zarejestrowanymi rzeczywistymi przebiegami z pierwszej części podrozdziału z charakterystykami C-V, wyznaczonymi teoretycznie na podstawie programu SCAPS. Rozwiązaniem być może byłoby zamodelowanie ogniwa PV, określając jego pojemność i teoretyczne wygenerowanie przebiegów jak w pierwszej części podrozdziału, a następnie dopasowanie modelu do otrzymanych przebiegów rzeczywistych. Kwestia, czy oprogramowanie SCAPS ma takie możliwości?
9. W podrozdziale 3.5 dokonano analitycznych rozważań nad wpływem dodatkowej pojemności na czasowe odpowiedzi układu na pobudzenie impulsem zwarcia i porównano je z podobnymi zasymulowanymi w Matlabie. Porównanie to wykonano dla jednego natężenia promieniowania, prawdopodobnie 150 W/m^2 , jednak nie jest to opisane zarówno na rys. 55, jak i w tekście rozdziału. Interesujące jednak byłoby jak wyglądałyby wyniki pomiarów dla natężenia o wartości powyżej 300 W/m^2 .
10. W podrozdziale 3.5 Doktorant wykonuje eksperyment z 90% zacienieniem jednego z paneli oraz rejestracją odpowiedzi na pobudzenie impulsem zwarcia. Jest to kluczowy moment z punktu widzenia proponowanego autorskiego algorytmu MPPT, ponieważ monitoring charakterystycznego „załamania” przebiegu umożliwi detekcję częściowego zacienienia panelu PV. Proszę skomentować to zjawisko oraz ewentualnie zarysować, jak wpływa na to zjawisko wybrane parametry takich jak np. pojemność czy temperatura.



11. Jakie są możliwości wdrożenia prezentowanych w dysertacji rozwiązań i ewentualne dalsze ścieżki rozwojowe tematyki?

3.4. Ogólna ocena merytoryczna pracy

Praca jest naukowo kompletna. Występują w niej:

- odniesienie do literatury przedmiotu badań,
- modelowanie i symulacja paneli PV oraz systemu PV,
- projekt i konstrukcja stanowiska laboratoryjnego do weryfikacji charakterystyk, uzyskanych na podstawie symulacji,
- zastosowanie szerokiej wiedzy z zakresu: budowania układów pomiarowych, konstruowania systemów wbudowanych, tworzenia oprogramowania systemu wbudowanego, wykorzystania baz danych, programowania w języku C#, programowania w języku Java Script w oparciu o narzędzie Angular 12, zastosowania oprogramowania SCAPS do fizycznego modelowania ogniwa PV, programowania w środowisku Matlab,
- elementy rejestracji rzeczywistych danych pomiarowych z wykorzystaniem stanowiska laboratoryjnego,
- porównanie wyników autorskiej metody MPPT z rezultatami uzyskanymi za pomocą metod referencyjnych (P&O oraz CS).

Poszukiwania naukowe Doktoranta, zawarte zasadniczo w rozdziałach 2.2, 3.3, 3.4, 3.5 i 4.8, zaowocowały autorskimi aspektami badawczymi, które stanowią wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Moim zdaniem do najważniejszych z nich należą:

- opracowanie układów pomiarowych oraz wykonanie pomiarów do badań:
 - rzeczywistych charakterystyk zmian oświetlenia paneli fotowoltaicznych,
 - nieliniowej pojemności ogniw fotowoltaicznych,
 - śledzenia maksymalnego punktu mocy z wykorzystaniem oddziaływań impulsowych,
- akwizycja danych rzeczywistych oraz wykazanie występowania w charakterystykach P-V więcej niż jednego ekstremum lokalnego, związanego z częściowym zaciemnieniem i zasygnalizowanie nieoptymalnej pracy popularnych algorytmów MPPT,
- opracowanie metody estymacji parametrów modelu na podstawie danych podawanych przez producenta – modyfikacja algorytmu Stornelliego umożliwiająca lepsze modelowanie małych ogniw i porównanie wyników teoretycznie oraz z wykorzystaniem pomiarów rzeczywistego ogniwa,
- zaproponowanie modelu jednodiodowego ogniwa fotowoltaicznego z nieliniową pojemnością oraz wykonanie badań symulacyjnych i rzeczywistych wraz z rejestracją odpowiedzi na pobudzenie impulsem zwarcia – kluczowej z punktu widzenia detekcji częściowego zaciemnienia panelu PV,
- badanie wpływu nasłonecznienia oraz temperatury na charakterystyki C-V dla modelu systemu PV,
- badania symulacyjne działania różnych algorytmów śledzenia maksymalnego punktu mocy z wykorzystaniem opracowanych profili zmian oświetlenia oraz wyznaczenie

warunków oświetlenia, dla których występują błędy w określeniu MPP przez te algorytmy,

- opracowanie autorskiego algorytmu MPPT, wykorzystującego połączenie algorytmów P&O (Perturb and Observe) oraz CS (Cuckoo Search) w zależności od wykrytych warunków częściowego zacielenia.

Zaprezentowane badania mają charakter rozwojowy, zmierzające w kierunku implementacji rezultatów pracy w inteligentnych konwerterach DC/DC współpracujących z panelami PV.

Uważam, że Doktorant dysponuje teoretycznym oraz praktycznym warszatem badawczym, potrafi zaplanować eksperyment naukowy oraz posiada umiejętności publikowania wyników badań, czego dowodzą parametry bibliometryczne: 2 publikacje (w tym z listy JCR 100 pkt.), indeks Hirscha 1, 1 cytowanie (bez autocytowań).

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Po zapoznaniu się z pracą doktorską pt.: „Dobór algorytmów MPPT w systemie fotowoltaicznym w warunkach częściowego zacielenia z wykorzystaniem oddziaływań impulsowych”, oraz na podstawie dokumentu „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20.07.2018 r. (Dz. U. 2021 poz. 478) stwierdzam, iż

przedstawiona rozprawa spełnia

wymagania określone w przedmiotowym dokumencie i w związku z powyższym

wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz o dopuszczenie

mgr inż. Mateusza Bartczaka do publicznej obrony.

Mirosław Szmytko