

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana Ognjen Gawrica pt.

„Improved grid interaction of photovoltaics using smart micro-inverters”

Opracowanie recenzji zostało zlecone przez prof. dr. hab. inż. Antoniego Kalukiewicza,
Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo Hutniczej w
Krakowie

1. Ocena Tematyki Poruszanej w Rozprawie

Komisja Europejska w swoich dokumentach wewnętrznych wskazuje na konieczność odchodzenia od energetyki opartej o paliwa płynne oraz stałe – tzw. ekonomia bezwęglowa. Jako główne zagrożenie wynikające z faktu oparcia energetyki o paliwa kopalne podaje przy tym rosnące uzależnienie od źródeł importowanych oraz uciążliwość dla środowiska naturalnego, tytułem emisji do atmosfery szkodliwych substancji. Z tego też względu założenia polityki EU do 2050 przewidują 50% udział źródeł rozproszonych w bilansie wytwarzanej energii oraz 80% redukcję emisji gazów cieplarnianych (przy czym jako poziom odniesienia podaje się rok 1990). Uwzględniając powyższe system elektroenergetyczny ze scentralizowanego przekształca się w system zdecentralizowany, w którym coraz większą rolę odgrywają, bądź będą odgrywać źródła rozproszone.

Źródła rozproszone są jednak wyzwaniem dla operatorów systemu elektroenergetycznego, powodując „zakłócenia” w jego pracy poprzez pogorszenie stabilności dynamicznej, profilu napięciowego (jakości energii), zmiany kierunków rozplywu mocy itp. Biorąc pod uwagę powyższe ze strony Operatora Systemu Przesyłowego jak i Operatorów Systemu Dystrybucyjnego rośnie presja w zakresie wprowadzania rozwiązań/regulacji dzięki którym źródła rozproszone będą nie tylko mniej uciążliwe dla systemu elektroenergetycznego, ale wręcz będą mogły wspomagać system elektroenergetyczny w warunkach awaryjnych (będą mogły świadczyć usługi na rzecz systemu). W rezultacie tych działań poprawie ulegnie m.in. stabilność

dynamiczna, jakość dostarczanej energii. Ponadto wyzwania w zakresie zapewnienia odpowiedniej jakości energii w warunkach rozproszonego systemu elektroenergetycznego, niejednokrotnie wymuszają instalację energoelektronicznych układów wpływających na parametry pracy systemu elektroenergetycznego – instalację układów FACTS.

Biorąc pod uwagę powyższe należy stwierdzić, że problematyka poruszana w doktoracie a obejmująca badania w zakresie metod sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi współpracującymi z siecią elektroenergetyczną w celu zapobiegania lokalnym wzrostom napięcia jest bardzo ważna, tak z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia – temat rozprawy jest ściśle wbudowany we współczesne badania prowadzone w energoelektronice. Ze względu na wymienione wcześniej powody, problemy naukowe podjęte w rozprawie są związane z bardzo dużym obszarem potencjalnych zastosowań. Dotyczy to szczególnie aplikacji w systemach elektroenergetycznych, po stronie niskich i średnich napięć.

Podsumowując ten punkt należy uznać prowadzenie przez Doktoranta badań w tej tematyce i w przedstawionym zakresie za jak najbardziej celowe. Doktorant tą tematyką zajmuje się od lat, o czym świadczą cztery współautorskie publikacje zamieszczone w wykazie literatury.

2. Ocena Strony Redakcyjnej

Recenzowana rozprawa łącznie ze spisem literatury (w tym 4 artykuły współautorstwa Doktoranta) liczy 187 stron i została podzielona na 10 rozdziałów głównych. Praca ma istotne elementy rozprawy naukowej: i) motywację którą jest opracowanie i implementacja nowej metody sterowania mikroinwerterami PV w celu eliminacji zjawisk związanych z lokalnymi wzrostami napięć, ii) cele pracy, które przedstawiono w rozdziale 2, iii) wyniki własnych badań, iv) wnioski.

Układ redakcyjny pracy generalnie nie budzi zastrzeżeń, chociaż jak w każdym opracowaniu można znaleźć błędy edycyjne i stylistyczne („rozwiązanie dowodzi”, „mikroinwertery są w prawie zawsze” itp.), brak odnośników do literatury w miejscach tego wymagających czy sformułowania żargonowe/nieściśle wg mojej oceny pod względem merytorycznym. Wiele do życzenia pozostawia jakość tłumaczenia polskojęzycznej części pracy.

3. Układ Pracy i Ocena Merytoryczna

Celem pracy jest opracowanie rozwiązania pozwalającego na zwiększenie mocy przyłączeniowej dla OZE (instalacje solarne) bez konieczności rozbudowy infrastruktury elektroenergetycznej. W zakresie szczegółowym celem jest opracowanie i implementacja nowej metody sterowania przekształtnikami solarnymi tak, aby sieć elektroenergetyczną zabezpieczyć przed przepięciami. Dla osiągnięcia założonego celu Autor proponuje wykorzystanie

mikroinwerterów, które dodatkowo dają możliwość implementacji już w istniejących instalacjach (jedynie poprzez wymianę przekształtnika), pozwalają również OSD na wdrożenie zdalnego monitoringu jakości energii elektrycznej i na zdalne sterowanie siecią niskich napięć, dodatkowo możliwe jest zwiększenie niezawodności systemu solarnego. Proponowane w pracy rozwiązanie ma w rezultacie doprowadzić również do zwiększenia uzysku energetycznego instalacji PV.

W pracy Autor konsekwentnie dąży do spełnienia założonych celów posługując się metodami analitycznymi, symulacji komputerowej oraz uproszczonymi badaniami eksperymentalnymi jako sposobem weryfikacji wyników.

W ujęciu szczegółowym, w pierwszej części pracy opisano zagadnienia związane z rozwojem sektora elektroenergetycznego. Autor omówił kwestie dotyczące generacji rozproszonej, jej wpływ na pracę sieci elektroenergetycznej w aspekcie m.in. jakości energii elektrycznej. Ta część pracy zawiera również ogólny opis treści związanych z „sieciami inteligentnymi” jak również omówienie celów pracy.

W kolejnej części pracy skomentowano zagadnienia związane z integracją instalacji słonecznych z systemem elektroenergetycznym. Ograniczono się do omówienia problemów związanych z przepięciami oraz niezbalansowaniem napięć. Następnie omówiono sposoby poprawy profilu napięcia, spośród których Autor najwięcej uwagi poświęcił układom LTC, rozwiązaniom z rodziny Custom Power Systems oraz układom wykorzystującym systemy magazynowania energii. Ta część pracy zawiera również podstawowe wiadomości z zakresu algorytmów MPPT oraz dyskusję na temat sposobów zmniejszania rozmiarów przekształtników solarnych. Autor jako główne czynniki pozwalające na zmniejszenie rozmiarów wskazuje zastosowanie kondensatorów cienkowarstwowych, przekształtników beztransformatorowych, rezonansowych czy typu „Z”. Omawiane są również zagadnienia związane z wymaganymi funkcjonalnościami przekształtników „smart”, do których zalicza konieczność regulacji napięcia i częstotliwości poprzez sterowanie mocami czynną i bierną oraz konieczność zarządzania pracą przekształtników z poziomu OSD.

Kolejna część pracy zawiera opis zaproponowanej przez Autora metody SMT (Sequential Module-level Tripping). Zaproponowane rozwiązanie polega na zastąpieniu jednego centralnego inwertera solarnego wieloma mikroinwerterami. Dzięki nowej konfiguracji w zależności od warunków napięciowych możliwe jest sekwencyjne wyłączanie poszczególnych mikroinwerterów a tym samym wpływ na profil napięciowy. Tego typu rozwiązanie, zdaniem Autora poprawi również uzysk energetyczny instalacji solarnej oraz przyczyni się do zwiększenia niezawodności. Wzrost niezawodności jest możliwy dzięki całkowitemu wyłączeniu poszczególnych mikroinwerterów (a tym samym możliwe jest ich chłodzenie).

Następna część pracy zawiera wyniki badań symulacyjnych, które m.in. wykonano na modelu linii promieniowej zasilającej 42. odbiorców indywidualnych co w rezultacie daje 336 kroków regulacji. Badania swoim zakresem objęły zarówno analizy pokazujące wpływ metody SMT na poziomy napięcie w poszczególnych miejscach linii promieniowej jak i na dynamikę regulacji napięcia dla wybranego odbiorcy. Ta część pracy zawiera również wpływ zaproponowanej metody na niezawodność pracy instalacji solarnej.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wykorzystując w tym celu symulator czasu rzeczywistego, model ogniwa solarnego jak i pojedynczy mikroinwerter. Badania swoim zakresem obejmowały analizę właściwości i skuteczności zaproponowanej metody w aspekcie wpływu na profil napięcia.

Ostatnia część pracy zawiera podsumowanie oraz omówienie zakresu dalszych badań.

Podsumowując tę część, należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska ma charakter analityczno-symulacyjny. Autor wykazał się znajomością technik modelowania układów elektrycznych. Należy wyrazić również opinię, że recenzowana praca stanowi aktualne spojrzenie na zagadnienia związane z regulacją napięcia w sieciach elektroenergetycznych niskich napięć.

Według opinii recenzenta za oryginalne elementy pracy należy uznać przede wszystkim:

- opracowanie metody SMT;
- opracowanie modelu symulacyjnego pozwalającego dla wybranych przypadków na weryfikację skuteczności metody;
- weryfikację eksperymentalną zaproponowanej metody.

4. Komentarze i Uwagi

Zdaniem Recenzenta doktorat zyskałby na jakości, gdyby ograniczyć ilość poruszanych wątków a tym pozostawionym poświęcić większą ilość miejsca. Przykładem wątku który w obecnej formie niewiele wnosi do doktoratu jest część poświęcona zmniejszaniu gabarytów przekształtników solarnych. Skoro Autor zdecydował się już opisać to zagadnienie to należało również omówić rozwiązania na bazie węgla krzemu, przekształtniki matrycowe czy też matrycowo-reakcyjne.

Uwagi szczegółowe.

- a) Zdaniem Recenzenta wprost nie udowodniono, że opracowane rozwiązanie pozwala na zwiększenie mocy przyłączeniowej dla OZE bez konieczności rozbudowy infrastruktury elektroenergetycznej. W pracy wykazano, że dla pewnych założonych

warunków (parametrów) dzięki implementacji mikroinwerterów solarnych sterowanych na podstawie metody SMT możliwa jest modyfikacja profilu napięcia. Wydaje się, że postawiony w pracy cel można udowodnić, gdyby Autor zdecydował się na analizy symulacyjne i eksperymentalne pokazujące przypadek sieci w której współczynniki P_{st} i względnych zmian napięcia d są bliskie wartościom granicznym, a włączenie dodatkowego źródła niespokojnego powoduje przekroczenie wartości określonych dla sieci niskiego napięcia. Następnie gdyby Autor wykazał, że włączenie instalacji solarnej na bazie mikroinwerterów i zastosowanie metody SMT poprawia profil napięcia (P_{st} i d) tym samym wykazałby że założony cel został osiągnięty, tzn. bez konieczności przebudowy sieci (bądź implementacji innych rozwiązań) zwiększa się moc przyłączeniowa dla źródeł niespokojnych.

- b) Autor opisując wpływ instalacji fotowoltaicznych na sieć elektroenergetyczną, przemilczał podstawowy (jak się wydaje) parametry definiujące oddziaływanie odbiorników/źródeł niespokojnych na sieć elektroenergetyczną – współczynniki P_{st} i d . Również zakres prowadzonych badań symulacyjnych jak i eksperymentalnych nie uwzględniał analizy wpływu zaproponowanej metody na oba parametry. Proszę o informację czy a jeśli tak to jaki wpływ będzie miała zaproponowana przez Autora metoda na współczynnik P_{st} i d ?
- c) Praca w dużej mierze dotyczy zagadnień związanych ze współpracą przekształtników energoelektronicznych (będących interfejsami źródeł rozproszonych) z systemem elektromagnetycznym. Rodzi się natomiast pytanie, dlaczego w pracy brak jest odniesienia do obowiązującej w tej materii normy EN 50438 (również CLC/FprTS 50549-1 oraz CLC/FprTS 50549-2). Wydaje się, że idealnym miejscem na odniesienie się do ww. regulacji jest chociażby rozdział 5.2.4 – zdaniem Recenzenta znacznie zyskałby wówczas na wartości. Brak jest również odpowiedzi na pytanie, czy zaproponowane w pracy rozwiązania będą miały jakikolwiek wpływ na spełnienie wymagań stawianych przekształtnikom współpracującym z siecią systemową – szczególnie w zakresie stabilizacji pracy systemu elektroenergetycznego w warunkach awaryjnych?
- d) Zdaniem Recenzenta badania eksperymentalne zostały bardzo spłycone. Można odnieść wrażenie, że skuteczność metody potwierdzono poprzez wyłączenie mikroinwertera solarnego pracującego z mocą znamionową a tym samym osiągnięto wpływ na poziom napięcia. W pracy brak jest informacji na temat mocy i charakteru

obciążenia, wartości impedancji sieci (zdaniem Recenzenta używanie sformułowania „polska impedancja” jest mało precyzyjne) czy zastosowanego w trakcie badań eksperymentalnych algorytmu sterowania. Rodzi się pytanie, czy sygnał wyłączający inwerter został wygenerowany przez algorytm w wyniku wykrycia wzrostu napięcia czy wyłączenie nastąpiło w wyniku intencjonalnego zadziałania Doktoranta?

- e) Zdaniem Autora, zaproponowana w pracy metoda SMT pozwala na zwiększenie niezawodności systemu solarnego poprzez wyłączanie poszczególnych mikroinwerterów. Jednakże, aby zapewnić równomierne zwiększenie niezawodności wszystkich inwerterów wydaje się, że istnieje konieczność opracowania algorytmu pozwalającego na równy udział w wyłączeniach. Proszę o komentarz w tej kwestii.
- f) Autor twierdzi, że zastosowanie metodologii SMT tylko poprzez zmianę oprogramowania jest niemożliwe – przyczyną takiego stanu rzeczy jest brak standaryzacji w zakresie protokołów komunikacji. Uniezależnienie się od technologii implementowanych przez firmy produkujące mikroinwertery jest możliwe poprzez dobudowanie zewnętrznych przekaźników oraz czujnika napięcia. Biorąc pod uwagę powyższe nasuwa się pytanie: skoro zakres koniecznych zmian wydaje się być dość ograniczony, dlaczego Autor w pracy nie pokusił się na ich wprowadzenie np. w dwóch dostępnych na rynku mikroinwerterach solarnych? Mógłby wówczas przeanalizować skuteczność zaproponowanej metody oraz systemu sterowania, wpływ metody SMT na współczynniki P_{st} i d . Mógłby również uzyskać odpowiedź na najważniejsze jak się wydaje pytanie: czy zastosowanie metody SMT wciąż pozwala na wypełnienie wymagań stawianych przekształtnikom sprzęgającym mikroźródła z siecią systemową – mam tutaj na myśli normę EN 50438. Część eksperymentalna pracy znacznie zyskałaby na wartości.
- g) W pracy brak jest rysunku przedstawiającego schemat elektryczny systemu solarnego zbudowanego na bazie mikroinwerterów solarnych w którym istnieje możliwość implementacji zaproponowanej przez Autora metody SMT (z naniesionymi sygnałami pomiarowymi, łącznikami LoM bądź dodatkowymi łącznikami zabezpieczającymi). Brak jest również szczegółowych informacji dotyczących budowy systemu sterowania. Przedstawiona w pracy (rozdział 6.4) ogólna koncepcja proponowanych rozwiązań w zakresie systemu sterowania – zdaniem Recenzenta – jest niewystarczająca.
- h) Zdaniem Autora zaproponowane w pracy mikroinwertery pozwalają OSD na wdrożenie zdalnego monitoringu jakości energii elektrycznej oraz zdalnego sterowania

siecią niskiego napięcia. W związku z powyższym proszę o odpowiedź na następujące pytania: 1. Co dokładnie na myśli miał Autor, pisząc o możliwości monitorowania jakości energii – czy do tej pory OSD nie miał takiej możliwości, bądź zaproponowane rozwiązanie daje Operatorowi nowe możliwości? 2. Jakimi parametrami sieci i w jakim zakresie dzięki zaproponowanemu rozwiązaniu OSD może sterować?

- i) Trudno zgodzić się z Autorem, jakoby większość przekształtników spełniała jedynie podstawowe wymagania z zakresu przepięć/wzrostów napięć a jedynie w przekształtnikach – nazywanych przez Autora – „Smart” istniała możliwość dynamicznej regulacji mocy czynnej i biernej. Obowiązujące od kilku lat przepisy normatywne – obowiązujące również w Polsce – wymagają, aby przekształtniki sprzęgające (również w instalacjach mikrogeneracyjnych) posiadały chociażby odpowiedź częstotliwościową oraz dawały możliwość OSD do monitorowania jak i sterowania wybranymi parametrami.
- j) W jednej z części pracy Autor prowadzi dyskusję na temat sposobów zmniejszania gabarytów przekształtników solarnych. W dyskusji zabrakło m.in. miejsca na najnowsze rozwiązania wykorzystujące przyrządy półprzewodnikowe na bazie węgla krzemowego. Czy zdaniem Autora, zastosowanie tego typu rozwiązań może mieć pozytywny wpływ na gabaryty i właściwości przekształtników solarnych?
- k) Na rysunku 3.2 przedstawiającym profil obciążenia jak i profil produkcji instalacji nie wyjaśniono różnic pomiędzy „load profile 1 & 2”, ta sama uwaga dotyczy przebiegów „generator profile 1 & 2”. Wydaje się, że na osi Y błędnie oznaczono wartość mocy – trudno sobie wyobrazić dom w którym moc obciążenia jest na poziomie pojedynczych W. Na rys. 7.11 z kolei nie zdefiniowano jednostek osi X.
- l) Zdaniem Recenzenta rys. 6.2 zawiera nieścisłości. Przekształtnikowi DC/DC wraz z kondensatorem obwodu DC, przypisano przekształtnik DC/AC. Czy łącznik pomiędzy przekształtnikiem DC/AC a filtrem wyjściowym to łącznik antywyspowy? Jeśli tak, to powinien być przedstawiony jako integralna część przekształtnika solarnego i ze względów bezpieczeństwa zazwyczaj jest dublowany.
- m) W przeważającej części literatura na którą powołuje się Doktorant pochodzi sprzed kilku i kilkunastu lat. Uwzględniając fakt, iż zagadnienia jakimi Doktorant zajmuje się w pracy należą do aktualnych i podlegających dynamicznym zmianom wydaje się, że

wykaz literatury powinien uwzględniać nowsze pozycje. Przykładem może być chociażby literatura związana z Z-inwerterami.

- n) Ze względu na bardzo dużą liczbę zastosowanych akronimów wydaje się, że pracę warto uzupełnić o ich wykaz.

5. Ocena Rozprawy Doktorskiej

Recenzowana rozprawa, niezależnie od uwag podanych w niniejszej recenzji, stanowi istotny wkład Doktoranta w zakresie zagadnień związanych ze sterowaniem przekształtnikami energoelektronicznymi współpracującymi z siecią elektroenergetyczną w celu poprawy profilu napięcia. Autor w rozprawie wykonał badania teoretyczne oraz laboratoryjne, wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązywania problemów naukowych. Uzyskane przez niego wyniki mają znaczenie poznawcze i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych w elektroenergetyce.

6. Wniosek Końcowy

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska odpowiada wszystkim warunkom określonym przez obowiązującą Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym, i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

