

Dr hab. inż. Zbigniew Watral, prof. WAT

Warszawa. 26 listopada 2020

Wydział Elektroniki,

Wojskowa Akademia Techniczna

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2,

00-908 Warszawa 46

WPŁYNEŁO

02 GRU. 2020

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pani mgr inż. Joanny Baraniak

Modelowanie wpływu systemów ładowania pojazdów elektrycznych na jakość energii elektrycznej

przygotowana na podstawie uchwały podjętej przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka,
Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej
w dniu 15 września 2020 r.

1. Jakie zagadnienie naukowo-badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza pracy) i czy zostało dostatecznie jasno zostały sformułowane.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ogólnie dotyczy problematyki elektromobilności widzianej z punktu widzenia oddziaływania rosnącej liczby pojazdów elektrycznych na sieć elektroenergetyczną kraju. Wzrost liczby pojazdów hybrydowych i elektrycznych powoduje konieczność budowy kolejnych stacji ładowania zasobników energii w pojazdach, energią elektryczną. W stacji ładowania pojazdów dokonywana jest transformacja energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej do pojazdu przez przekształtniki energoelektroniczne, które z natury swojego działania są układami impulsowymi. Tego typu obciążenie ma niewątpliwie wpływ na zniekształcenia przebiegu prądu pobieranego ze źródła.

Doktorantka w swojej rozprawie przedstawia wpływ różnych systemów ładowania pojazdów elektrycznych na jakość energii elektrycznej w sieci dystrybucyjnej. Praca ma charakter symulacyjny a Doktorantka postawiła sobie za cel znalezienie najbardziej efektywnych metod predykcji i oceny wpływu rozbudowanych systemów ładowania pojazdów

elektrycznych na jakość energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom tej sieci przy pomocy badań symulacyjnych. Prowadząc badania symulacyjne Doktorantka postawiła tezę, że *zastosowanie właściwie dobranych, realistycznych modeli układów ładowania pojazdów elektrycznych pozwala w drodze symulacji komputerowych ocenić wpływ systemów ładowania na jakość energii elektrycznej.*

Cel i teza rozprawy zostały sformułowane w sposób jasny i zrozumiały. Zasadność tak postawionej tezy potwierdza fakt, że obecnie ze względu na małą liczbę stacji ładowania podłączonych do sieci elektroenergetycznej trudno jest w sposób eksperymentalny, jednoznacznie stwierdzić jakie jest ich oddziaływanie na sieć dystrybucyjną. Doktorantka proponuje zamiast rzeczywistych pomiarów alternatywne rozwiązanie tego problemu i skorzystanie z dostępnych narzędzi analitycznych zapewniających porównywalną wiarygodność wyników. Zdaje sobie przy tym sprawę, że niewątpliwie decydujący wpływ na udowodnienie tak postawionej tezy będzie miało opracowanie wiarygodnych modeli symulacyjnych samej sieci oraz układów ładowania pojazdów elektrycznych.

Tematyka pracy jest jak najbardziej aktualna z uwagi na zmieniające się trendy w dziedzinie motoryzacji, zapowiedzi polityków, które niekoniecznie skorelowane są z działaniami w obszarze techniki. Nieprzygotowanie krajowej sieci elektroenergetycznej na tak duże oddziaływanie odbiorników energii elektrycznej podłączonych przez stacje ładowania, które w określonych okolicznościach mogą również stać się źródłami energii włączanymi do sieci, może stać się sporym wyzwaniem.

Zabezpieczanie się przed skutkami wdrażania wizji elektromobilności wymusza zmiany w prawodawstwie i jest wyzwaniem technicznym dla przemysłu motoryzacyjnego, ale przede wszystkim dla sieci elektroenergetycznych. Rozwijanie efektywnych metod komputerowych umożliwiających ocenę zagrożenia wywołanego włączeniem do sieci dystrybucyjnej mobilnych odbiorników energii jest na wczesnym etapie wdrażania elektromobilności ważnym narzędziem.

W rezultacie należy stwierdzić, iż podjęta przez Doktorantkę problematyka badań jest kluczowa z punktu widzenia prawidłowego zabezpieczenia dystrybucyjnych sieci elektroenergetycznych przed negatywnymi skutkami oddziaływania stacji ładowania pojazdów elektrycznych i bez wątpienia kwalifikuje się ona jako przedmiot rozprawy doktorskiej w dyscyplinie *automatyka, elektronika i elektrotechnika.*

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.

W bibliografii dołączonej do rozprawy umieszczono 104 pozycje literatury z czego 9 to normy, 8 ustawy lub rozporządzenia i 12 pozycji to odwołania do stron internetowych. Lista publikacji zawiera tylko trzy pozycje autorskie Doktorantki z 2019 i 2020 roku. Wszystkie zacytowane pozycje bibliografii zostały użyte w sposób poprawny. Na 104 pozycje literaturowe 6 z nich nie zostało jednak zacytowanych w rozprawie. Co rodzi wątpliwości o ich wpływie na przegląd i dokonaną analizę źródeł wiedzy. Należy zauważyć, że literatura, do której odwołuje się Doktorantka jest współczesna i w zdecydowanej większości nie starsza niż z 2012 roku. Wszystkie pozycje literaturowe dotyczą technicznych, prawnych i normatywnych aspektów omawianego zagadnienia. Doktorantka w 2 i 3 rozdziale pracy umiejętnie wprowadza czytelnika w zagadnienie elektromobilności i przedstawia przykłady analizy potencjalnego wpływu układów ładowania pojazdów elektrycznych na jakość energii elektrycznej. W swojej szerokiej analizie zagadnień związanych z budową układów ładowania pojazdów elektrycznych Doktorantka zwróciła również uwagę na bezpieczeństwo pracy sieci dystrybucyjnej oraz wymagania stawiane przez przepisy prawne i normy techniczne.

Prezentowane są wyniki badań z kilku kluczowych zagranicznych publikacji opatrzone rzeczowymi i wnikliwymi komentarzami. Doktorantka zauważa, że dotychczasowe wyniki tych analiz są niejednoznaczne a często skrajnie różne i z tego między innymi powodu to zagadnienie jest ciągle aktualne i zachęca do zajęcia się nim. Z przeprowadzonej analizy literaturowej Doktorantka wyciąga słuszny wniosek, że w najbliższym czasie Operatorzy Sieci Dystrybucyjnych oprócz prognozowania i opracowywania mechanizmów zarządzania popytem na energię elektryczną będą musieli się zmierzyć z określeniem potencjalnych zagrożeń jakie będzie niosło podłączenie nie do końca znanej liczby mobilnych odbiorców energii elektrycznej.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione

Doktorantka zapewne na podstawie dokonanej analizy literaturowej stwierdziła, że nie uda się stworzyć uniwersalnego modelu symulacyjnego uwzględniającego wszystkie możliwe warianty układów ładowania i dlatego zdecydowała się wybrać reprezentatywną grupę czterech najczęściej stosowanych ładowarek. W ramach opracowywania modeli

symulacyjnych wykonała pomiary ładowarki samochodowej o mocy 200 kW podłączonej do sieci SN chcąc sprawdzić czy możliwa jest identyfikacja układu ładowarki na podstawie wyników pomiarów. Analiza widmowa prądu pobieranego z sieci przez ładowarkę pokazała, że rozkład harmonicznym otrzymany na drodze pomiarów znacznie różni się od wyników symulacji w programie Matlab/Simulink. Doktorantka wykazała, że przyczyną pojawienia się dodatkowych harmonicznym w widmie prądu zmierzonego w rzeczywistości jest między innymi asymetria napięcia wyjściowego oraz asymetria rezystancji i indukcyjności rozproszenia uzwojeń zastosowanego transformatora. Stwierdzona w widmie prądu swego rodzaju anomalia w stosunku do teoretycznego rozkładu harmonicznym dla modelu ładowarki wyposażonej transformator trójuzwojeniowy symetryczny obciążony 12 pulsowym prostownikiem z przetwornicą DC/DC obniżającą napięcie, była w konsekwencji przyczynkiem do modyfikacji modelu symulacyjnego układu zasilania modelowanej ładowarki. Jest to być może z pozoru nieistotne działanie, ale świadczy ono o dążeniu Doktorantki do jak najbardziej wiarygodnego odwzorowania rzeczywistości w budowanych modelach symulacyjnych układu ładowania. Kolejne bloki funkcjonalne tworzonych modeli symulacyjnych ładowarek zostały również wnikliwie przeanalizowane i poddane krytycznej ocenie. Po skonstruowaniu modeli symulacyjnych układów ładowania przeprowadzone zostały symulacje a otrzymane wyniki prezentowane są w formie charakterystyk widmowych prądu fazowego pobieranego z sieci dystrybucyjnej. Dla porównania różnych ładowarek zestawiono je w formie tabel co zdecydowanie ułatwia interpretację wyników. Doktorantka zmierzając w kierunku udowodnienia postawionej tezy zamodelowała w sposób poprawny wszystkie bloki funkcjonalne stosowane w tego rodzaju układach ładowania i wykonała bardzo dużo symulacji za którymi czasem nie nadała ich opis. Zrealizowany przez Doktorantkę program badań symulacyjnych jest przemyślany i wyraźnie ukierunkowany na zrealizowanie celu pracy. W rozdziale piątym rozprawy dokonano analizy wpływu układów ładowania pojazdów elektrycznych na sieć niskiego napięcia i przedstawiono wyniki symulacji dla wszystkich wybranych ładowarek pojazdów elektrycznych w różnych konfiguracjach. Każdorazowo wyniki symulacji były porównywane z wartościami normatywnymi podanymi w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnych.

Na podstawie wskazanych osiągnięć można stwierdzić, że teza sformułowana na początku rozprawy przez Doktorantkę została udowodniona w sposób jednoznaczny.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Uzyskane przez Doktorantkę wyniki z przeprowadzonych analiz i badań symulacyjnych są oryginalne i powinny zostać wykorzystane przez projektantów oraz eksploatorów systemów ładowania pojazdów elektrycznych. Na szczególne podkreślenie zasługuje uwzględnienie przez Doktorantkę w swoich badaniach różnych konfiguracji czterech najczęściej stosowanych układów ładowania pojazdów elektrycznych i przedstawienie bogatej dokumentacji z badań. Opracowane modele symulacyjne układów ładowania pojazdów elektrycznych mogą stanowić bazę do dalszych prac w tym zakresie. Po zapoznaniu się z rozprawą za oryginalne, własne osiągnięcia Doktorantki uważam:

1. Opracowanie własnych modeli ładowarek samochodów elektrycznych oraz model sieci niskiego napięcia w środowisku Matlab/Simulink i przeprowadzenie badań symulacyjnych dla różnych konfiguracji oraz różnych rodzajów układów ładowania pojazdów elektrycznych.
2. Przeprowadzenie analizy wpływu poszczególnych rozwiązań układów ładowania pojazdów elektrycznych na jakość energii elektrycznej oraz sformułowanie wniosków i rekomendacji mogących stanowić podstawę zmian w przepisach prawnych, normach technicznych oraz instrukcjach ruchu i eksploatacji sieci elektroenergetycznych,
3. Opracowanie zaleceń do projektowania elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych współpracujących z układami ładowania pojazdów elektrycznych,

Dzięki wykazanym umiejętnościom Doktorantka uzyskała interesujące wyniki badań i analiz pokazując przy tym dobre przygotowanie teoretyczne i dużą zręczność zarówno w modelowaniu, jak i komputerowej symulacji rozpatrywanych zagadnień. Doktorantka wykazała się zdolnością do samodzielnego prowadzenia badań, a także umiejętnością przedstawiania i komentowania uzyskanych wyników badań oraz analiz i formułowania wniosków.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma objętości 135 stron i została podzielona na 6 rozdziałów w tym wstęp i wnioski, przy czym rozdziały 4 i 5 stanowią zasadniczą część

rozprawy doktorskiej. W pracy zamieszczono 116 rysunków i 6 tabel, które są staranne i czytelne. Rozprawa jest napisana w sposób poprawny i zrozumiały a układ pracy stanowi opis logicznego ciągu rozważań opracowania naukowego. Doktorantka używa w większości poprawnych sformułowań technicznych i symboli. Sposób prezentowania uzyskanych wyników w większości jest poprawny i zrozumiały. Odnośniki literaturowe wskazują, że Doktorantka posiada także niezbędną orientację w bibliografii obejmującej rozważane zagadnienia. W stosunku do całej rozprawy można stwierdzić, że Doktorantka opanowała warsztat pisania rozpraw naukowych w stopniu dobrym. Uwagi do rozprawy, głównie edytorskie przedstawiono poniżej.

Uwagi do pracy:

1. Niektóre symbole elementów elektrycznych używane na schematach są niezgodne z normą polską a ponadto są one różne dla tych samych elementów rys. 3.2 i 3.3, brak punktów węzłowych.
2. Przedstawiane schematy zastępcze począwszy od rys. 4.1 zawierają niektóre symbole elektryczne niezgodne z normą polską a opisy symboli na schemacie są niezgodne z wcześniejszym opisem parametrów modelowanych transformatorów. Doktorantka prawdopodobnie przedstawia schemat zastępczy zamodelowany w programie symulacyjnym, ale o tym nie pisze. Dopiero po rysunku 4.10 wspomina, że schemat zastępczy na rysunku 4.10 został zaimplementowany z wykorzystaniem programu symulacyjnego Matlab/Simulink. Może właściwym byłoby przedstawienie schematów zastępczych z użyciem symboli i opisów zgodnie z normami polskimi a dopiero przy przejściu do symulacji pokazać modele zaimplementowane w programie symulacyjnym.
3. Na stronie 24 Doktorantka napisała cyt. *Jednak w modelu znajdują się modelowane urządzenia o częstotliwości pracy znacznie przekraczającej 4 kHz i żeby poprawnie odwzorować ich działanie zdecydowano się ustawić krok symulacji na 2 μ s, co pozwala na próbkowanie z maksymalną częstotliwością 0,5 MHz. W celu ograniczenia ilości danych generowanych przez model częstotliwość próbkowania ustawiono na 10 kHz.* Jak to ograniczenie wpłynie na odwzorowanie pracy urządzeń pracujących z większą częstotliwością niż 10 kHz?
4. Na stronie 27 w ostatnim wierszu podano cyt. *pojemność między dwiema dowolnymi żyłami wynosi 0,6C.* Co to oznacza?
5. W pracy użyto kilkakrotnie sformułowania napięcia międzyprzewodowe w odniesieniu do napięć przewodowych.

6. W tabeli na rys. 4.17 w dwóch wierszach są takie same opisy a jednostki miary są różne a ponadto wartość obliczonego THD_I w przewodzie neutralnym powinna wynosić 58,26%.
7. Na stronie 43 powołano się na rysunek 4.21 zamiast na rysunek 4.20.
8. W opisie rzeczywistych wyników z badania ładowarki o mocy 200 kW po rysunku 4.20 prezentującym rzeczywiste przebiegi prądu nagle pojawia się rysunek 4.21 zacytowany z bibliografii. To niepotrzebnie zakłóciło odbiór opisu badań eksperymentalnych. Doktorantka najpierw skomentowała rysunek 4.21 a potem ponownie odwołała się do rysunku 4.21 komentując rysunek 4.20.
9. Brak odwołania do rysunku 4.24, 4.29. Często w rozprawie pojawiają się rysunki a odwołania do nich są później, albo nawet po komentarzach do rysunku np. rysunek 4.30. W rozdziale 5 pracy brakuje odwołań i komentarzy do wielu rysunków.
10. Na rysunku 4.32 wartość THD_U dla napięcia przewodowego L31 wynosi 1,5876% podczas gdy w opisie podano 1,56%.
11. Charakterystyki widmowe przedstawiane w rozprawie prezentują w skali procentowej poziom danej harmonicznej odniesionej do harmonicznej podstawowej. W takiej sytuacji na charakterystyce pierwsza harmoniczna powinna mieć poziom 100%. Doktorantka rozciągając skalę rzędnych, dla pokazania dalszych harmonicznych, sprawiła, że w każdym przypadku harmoniczna podstawowa osiąga maksimum. Dobrze byłoby wyjaśnić jak interpretować takie charakterystyki lub pomijać harmoniczną podstawową.
12. Na rysunku 4.33 widać, że pierwsza harmoniczna wynosi 1,2% a piąta 1,1% co Doktorantka komentuje cyt. *Analizując rozkład harmonicznych można zauważyć, że w napięciu zasilającym w punkcie wykonywania pomiaru dominuje piąta harmoniczna, której wartość osiąga 1,1 % wartości harmonicznej podstawowej.* Proszę wyjaśnić.
13. W tezie pracy zamiast słowa *pozwała* może lepszym byłoby *umożliwia*.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko-technicznych

Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane w rozprawie mogą być pomocne przy określeniu wymagań, jakie powinny spełniać nowobudowane i przyłączane do sieci dystrybucyjnej stacje ładowania pojazdów elektrycznych tak, aby nie wpływały negatywnie na parametry jakościowe energii oraz niezawodność i bezpieczeństwo pracy sieci. Mogą one być

wykorzystane do prognozowania i opracowywania mechanizmów zarządzania popytem na energię elektryczną, badania i określenia potencjalnych zagrożeń oraz szans, z którymi w ciągu najbliższych lat zmierzą się Operatorzy Sieci Dystrybucyjnych.

Przeprowadzone w rozprawie rozważania i jej wyniki, mimo drobnych uwag, przekonują, że Doktorantka dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie **elektronika** będącej przedmiotem dotychczasowej działalności naukowej Doktorantki, z jednoczesnym stwierdzeniem pozytywnej relacji Jej osiągnięć wobec dyscypliny **automatyka, elektronika i elektrotechnika** według nowej kwalifikacji. Osiągnięcia Doktorantki dla uprawianej dyscypliny są bez wątpienia zauważalne i przydatne dla środowiska inżyniersko-technicznego. Doktorantka podjęła aktualne i ważne zadanie, rozwiązała je, stosując akceptowalne metody oraz wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zatem, stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane w art. 13 ust. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21 czerwca 2016 r., poz. 882) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Zbigniew Watral