

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Klary Janigi

pt. „Wykorzystanie metod prognozowania warunków pracy sieci niskiego napięcia z generacją rozproszoną w kontekście rozwoju energetyki prosumenckiej”

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej z dnia 12 lipca 2023 r. oraz pismo Zastępcy Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej, dr. hab. inż. Michała Majki z dnia 03 sierpnia 2023 r.

### **2. Tematyka, tezy i cel rozprawy**

Tematyka rozprawy dotyczy problemów napięciowych w sieciach niskiego napięcia, które są stosunkowo nowym problemem w systemie elektroenergetycznym. Do tej pory regulacja zaczepowa w transformatorach zasilających, realizowana przy wyłączonym obciążeniu, była wystarczająca. Wraz z silnym nasyceniem sieci niskiego napięcia źródłami fotowoltaicznymi – a tych źródeł dotyczy rozprawa – problemy napięciowe w tych sieciach stanowią jeden z głównych problemów w systemach elektroenergetycznych nie tylko w naszym kraju. Wybór tej tematyki jest więc bardzo aktualny, trafny i istotny z punktu widzenia naukowego, ale też praktycznego.

Doktorantka w rozprawie stawia sobie dwa cele:

1. Porównanie wybranych metod sterowania napięciem znajdujących zastosowanie w sieciach niskiego napięcia z dużym udziałem instalacji prosumenckich;
2. Określenie możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych (SSN) w autorskiej metodzie przeciwdziałania zjawisku nadmiernego wzrostu napięcia.

wtH.

Realizując te cele Doktorantka w pracy dokonuje teoretycznego przedstawienia różnych metod regulacji napięcia w sieciach z dużym nasyceniem źródeł oraz porównania praktycznego tych metod w konkretnej, przygotowanej przez siebie sieci testowej. Daje to podstawy do zaproponowania własnej autorskiej metody mającej na celu opanowanie problemów napięciowych w tego typu sieciach, wykorzystującą w sposób pośredni sieci neuronowe.

Jest to podstawa do sformułowania tezy rozprawy:

*Wykorzystanie możliwości sztucznych sieci neuronowych przy wyborze nastaw kompensacji prądowej regulatora napięcia transformatora pozwala na skuteczne opanowanie problemów napięciowych w sieciach nn o dużym nasyceniu generacją rozproszoną.*

Tak postawiony cel i tezę pracy uważam za ważną i aktualną, zarówno od strony naukowej jak i użytecznej. Tematyka rozprawy bezdyskusyjnie wpisuje się w dyscyplinę naukową: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

### **3. Ogólna ocena rozprawy**

Opiniowana rozprawa zawiera 210 stron tekstu wraz z załącznikami oraz spisem literatury obejmującym 257 pozycji.

W celu zrealizowania założonego celu i udowodnienia postawionej tezy Autorka przedstawiła tematykę rozprawy w trzech częściach, będących jednocześnie kolejnymi rozdziałami rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono obszernie rys historyczny rozwoju elektroenergetyki ze szczególnym uwzględnieniem źródeł małej mocy (rozproszonych), liberalizację rynków i ich wpływ na rozwój energetyki prosumenckiej, porozumienia międzynarodowe w kwestii ochrony klimatu oraz wymagania jakościowe dla pracy sieci i dla warunków przyłączenia źródeł. Szczegółowo opisano oddziaływanie źródeł na warunki napięciowe w sieci oraz wymagania stawiane przez operatorów systemów dla źródeł fotowoltaicznych. Te zagadnienia ściśle związane są już z tematyką rozprawy i stanowią dobre wprowadzenie do dalszych rozważań.

Rozdział trzeci przedstawia szeroki przegląd metod regulacji napięcia w sieciach z dużym nasyceniem źródłami fotowoltaicznymi, z podziałem tych metod na metody lokalne, zdecentralizowane i scentralizowane. Przy lokalnym sterowaniu napięciem źródła rozproszone mogą same (na podstawie własnych charakterystyk pracy i pomiarów wykonanych w miejscu ich przyłączenia) minimalizować swój negatywny wpływ na sieć. Zaletą tego rozwiązania jest szybkość działania oraz niski koszt (nie jest wymagana żadna infrastruktura komunikacyjna); wadą zaś tych metod jest brak możliwości koordynacji pracy źródeł. Metody scentralizowane, na podstawie zebranych danych pomiarowych z wielu miejsc sieci, umożliwiają pełną koordynację pracy sieci dzięki odpowiednio rozbudowanej strukturze komunikacyjnej i nadrzędnemu systemowi sterowania. Zapewnia to najwyższy poziom optymalizacji sieci, jednak związane jest z wysokim kosztem automatyzacji

i rozbudowy infrastruktury teletechnicznej. Zdecentralizowane metody sterowania napięciem łączą cechy metod lokalnych i scentralizowanych. Istotą zdecentralizowanego sterowania jest częściowa koordynacja grup zautomatyzowanych komponentów sieci, jednak bez kontroli z poziomu centrum operatora systemu. Tak jak w przypadku metod scentralizowanych, w metodach tych konieczne jest zapewnienie komunikacji między wybranymi elementami sieci. Opis tych grup metod ma duże znaczenie w całej koncepcji pracy, gdyż jednym z celów opracowania nowej skutecznej metody, jest – nie podana co prawda wprost – minimalizacja kosztów jej wdrożenia. Lokuje ją to w grupie metod lokalnych. W dalszej części rozdziału Doktorantka przedstawia kolejno różne już szczegółowe sposoby i algorytmy regulacji napięcia. Przy tej okazji dokonuje bardzo szerokiego przeglądu literaturowego, co do skuteczności ich działania.

Rozdział czwarty rozprawy zawiera zasadniczą część pracy. Na przygotowanym przez Doktorantkę modelu sieci niskiego napięcia zostały przetestowane różne metody regulacji napięcia, opisane wcześniej w sposób teoretyczny. Dodatkowo na potrzeby tych analiz Doktorantka przygotowała modele niektórych regulatorów w programie PowerFactory, który był używany do analiz. W tej części rozprawy opisany jest też autorski sposób regulacji wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe do przygotowania funkcji kompensacyjnej w regulatorze napięcia transformatora zasilającego badaną sieć. Przeprowadzone analizy i otrzymane wyniki pokazują korzystne efekty zastosowanego algorytmu w porównaniu do innych, znanych i przebadanych również w tej pracy metod. Potwierdza to słuszność przedstawionej tezy rozprawy.

Przedstawiany autorki opis metod regulacji napięcia oraz problemów teoretycznych i praktycznych związanych z ich realizacją, zaplanowane i przeprowadzone analizy, wskazują na dobrą znajomość zagadnień teoretycznych związanych z zagadnieniem, oraz dobrą ogólną wiedzę Doktorantki w zakresie elektrotechniki (w tym elektroenergetyki), która jest częścią dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w której realizowana jest rozprawa.

Dokonując oceny tej części pracy należy stwierdzić, że całość pracy jest dobrze skomponowana, napisana w sposób jasny i bez potknięć językowych, w dobrym warsztacie edycyjnym.

Podsumowując, ogólna ocena rozprawy jest jednoznacznie pozytywna.

#### **4. Uwagi dyskusyjne i komentarze**

Czytając i analizując tekst rozprawy nasunęły się następujące pytania i kwestie dyskusyjne, które powinny zostać wyjaśnione, czy skomentowane przez Doktorantkę.

1. W rozprawie konsekwentnie stosowany jest symetryczny model trójfazowy, począwszy od ogólnej analizy problemu (rodz. 2.4.2) poprzez tworzenie modelu (parametry dla składowej symetrycznej zgodnej elementów), aż do analiz i ich wyników. W sieciach niskiego napięcia problem niesymetrii obciążeń, ale

wtH.

i generacji w źródłach fotowoltaicznych jest problemem naturalnym i nieuniknionym. Dlaczego zdecydowano się na takie rozwiązanie (w pełni symetrycznego układu)? Pytanie to moim zdaniem jest tym bardziej zasadne, że program PowerFactory, który służył do symulacji umożliwia analizę w układzie fazowym. W treści rozprawy autorka podejmuje ten problem, ale nieco mało wyraźnie.

2. Wzorem (4.1) zdefiniowano współczynnik penetracji PV jako stosunek zainstalowanej mocy źródeł PV do obciążalności mocowej gałęzi. W przypadku sieci jednorodnej (dokładniej wykonanej jednym rodzajem przewodu i w jednej technologii) definicja nie budzi wątpliwości, jak jednak liczyć ten współczynnik, gdy przekroje linii będą zróżnicowane? Czy należy liczyć go w stosunku do obciążalności maksymalnej, czy też dla każdego odcinka osobno z potencjałem wytwórczym przyłączonym 'za' tym odcinkiem? Jak wtedy należy go interpretować?
3. W czasie publicznej obrony rozprawy prosiłbym Doktorantkę o doprecyzowanie jaki prąd był parametrem wejściowym dla uczenia sieci neuronowej, a następnie nastawy kompensacji prądowej, gdyż ogólnie w rozdziale 4.2.8, na stronie 119 napisano „*Za wejście SSN przyjęto zatem prąd mierzony w stacji (wartość skuteczna i kierunek przepływu), ....*”, co sugeruje raczej po prostu wartość prądu, a dalej na stronie 120 jest, że „*W modelu transformatora zasilającego..... uaktywniono funkcję kompensacji prądowej,....Wybrano kompensację bazującą na wartości prądu czynnego, ..*”,
4. Wynikiem działania sztucznej sieci neuronowej jest nastawa kompensacji prądowej dla regulacji w transformatorze zasilającym. Intuicyjnie powinna to być funkcja monotoniczna lub przynajmniej przedziałami monotoniczna i tak jest 'prawie' na rys. 4.30. Czym Autorka tłumaczy wzrost numeru zaczepu (rys 4.30a – taki 'ząbek' na wykresie) tuż po przekroczeniu zera przez prąd mierzony, a potem już tylko jego spadek (jak można się było spodziewać)?
5. Przedstawiony algorytm działania nie budzi żadnych zastrzeżeń od strony teoretycznej, co więcej jest bardzo ciekawy i na dodatek praktyczny. Chciałbym jednak zapytać, jak widzi Doktorantka praktyczną stronę jego stosowania. Czy dane do uczenia sieci neuronowej, a potem do nastawy kompensacji prądowej powinny pochodzić z symulacji pracy takiej sieci, na pewno można dysponować wtedy większym zbiorem danych, czy raczej z pomiarów rzeczywistej pracy sieci, co niewątpliwie ogranicza ten zbiór generując dodatkowe koszty związane z pomiarami?
6. Na stronie 12-13 Autorka stwierdza, że „*aby ograniczyć zakres inwestycji, metody powinny wykorzystywać w jak największym stopniu istniejące rozwiązania i opierać się na technikach dobrze rozpoznanych i łatwych w eksploatacji. Z drugiej strony*

WtH.

*powinny także uwzględniać interesy prosumenta.*” Myślę, że także interes klasycznych odbiorców nie powinien na konieczności rozbudowy układów regulacyjnych ucierpieć, gdyż nakłady inwestycyjne (na rozbudowę układów regulacji, choćby transformatory z regulacją zaczepową pod obciążeniem) przenoszone są poprzez opłatę przesyłową na wszystkich użytkowników sieci – czyli problem stwarzają ‘niektórzy’ a koszty ponoszą wszyscy, na dodatek ci ‘niektórzy’ mogą nawet ponosić mniejsze koszty rozwiązania tego problemu. Można tu podać nawet całe grupy odbiorców – np. w sieci terenowej problem będzie na pewno większy (większy potencjał do stosowania źródeł fotowoltaicznych) i tam będą konieczne inwestycje, a koszty będą przeniesione na odbiorców miejskich, gdzie problem jest z natury dużo mniejszy. Jak Doktorantka widzi ten problem ?

7. W niektórych miejscach pracy występują błędne odwołania do literatury. Najbardziej widoczne jest to przy odwołaniu do katalogów transformatorów (str. 94 tab. 4.1 odwołuje się do poz. 219 zaś katalog transformatorów to poz. 217; analogicznie jest przy odwołaniu do katalogu przewodów). Najpewniej od pewnego miejsca nastąpiło jakieś nieskontrolowane przesunięcie o dwie pozycje literaturowe, co nieco komplikuje czytelnikowi śledzenie odniesień.
8. W spisie literatury (należy podkreślić, bardzo obszernym jak na rozprawę doktorską) Doktorantka nie wymienia ani jednej pozycji swojego autorstwa lub współautorstwa. Czy w okresie przygotowywania rozprawy Autorka rzeczywiście nic nie publikowała w tematyce związanej z pracą ?

Przestawione wyżej uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i pozostają bez wpływu na moją pozytywną ocenę rozprawy.

## 5. Podsumowanie

Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (art.13) wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jestem przekonany o tym, że opiniowana rozprawa spełnia to wymaganie. Sposób rozwiązania problemu naukowego przedstawiony w rozprawie daje ponadto możliwość jego praktycznego wykorzystania.

Jako najważniejsze osiągnięcie rozprawy uważam opracowanie skutecznej metody regulacji napięć w sieci niskiego napięcia z dużym nasyceniem źródłami fotowoltaicznymi. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwala skutecznie określić funkcję kompensacji prądowej w transformatorze z regulacją przekładni, co w klasycznym przypadku jest bardzo trudne, często jedynie intuicyjne. Całość rozwiązania jest stosunkowo prosta, niewymagająca dodatkowych nakładów inwestycyjnych w sieci. Wykazane pozytywne cechy i skuteczność proponowanej metody na tle innych, znanych metod, potwierdzona

przeprowadzonymi symulacjami na tym samym fragmencie sieci jednoznacznie pokazuje trafność wyboru tego rozwiązania.

Przedstawione na końcu rozprawy kierunki dalszych badań pokazują z jednej strony duży potencjał tej tematyki, a z drugiej zdolność Doktorantki do krytycznego podejścia do już wykonanej pracy i wyciągania wniosków z otrzymanych wyników, co prowadzi do dalszych poszukiwań jeszcze lepszych i efektywniejszych rozwiązań. Na pewno potwierdza to bardzo dobrą orientację w tematyce i duże zaangażowanie naukowe Doktorantki, a przede wszystkim jej zdolność do prowadzenia badań naukowych.

Doktorantka w rozprawie konsekwentnie realizuje jej cel udowadniając postawioną we wstępie tezę. Prowadzony wykład jest jasny i czytelny oraz zawiera wszystkie istotne elementy: genezę, tezę, przegląd aktualnej wiedzy, sformułowanie problemu, jego rozwiązanie, prezentację wyników, podsumowanie oraz wykaz literatury.

## **6. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Klary Janigi pt. *„Wykorzystanie metod prognozowania warunków pracy sieci niskiego napięcia z generacją rozproszoną w kontekście rozwoju energetyki prosumenckiej”* odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. – Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

