

Dr hab. inż. Roman Korab, prof. PŚ  
Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów  
Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej  
roman.korab@polsl.pl  
Tel. 32 237 12 52

Gliwice, 6 lipca 2020 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Michaliny Grynowicz-Jaworskiej

pt. „**Optymalizacja układów kompensacji mocy biernej farm wiatrowych**”

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

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała nr AEiE/7.2/2020 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej z dnia 29 kwietnia 2020 r. oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEiE, Pana Dr hab. inż. Wojciecha Jarzyny, prof. PL, z dnia 5 maja 2020 r.

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

Tematyka rozprawy dotyczy gospodarki mocą bierną w systemie elektroenergetycznym. Jest to tematyka stale aktualna, ponieważ w systemach prądu przemiennego moc bierna nieodłącznie towarzyszy mocy czynnej i jest niezbędna do funkcjonowania maszyn i urządzeń elektrycznych. Jednak z punktu widzenia racjonalizacji pracy systemu występowanie mocy biernej jest zjawiskiem niekorzystnym, gdyż zwiększeniu ulegają straty mocy czynnej i spadki napięć, ograniczane są zdolności przesyłowe sieci i możliwości wytwórcze generatorów, co w konsekwencji prowadzi do konieczności ponoszenia większych nakładów inwestycyjnych na te urządzenia. Zatem właściwa gospodarka mocą bierną, polegająca m.in. na jej kompensowaniu w odpowiednich punktach systemu elektroenergetycznego, jest działaniem celowym i słusznym.

Wydawać by się mogło, że po wielu dziesięcioleciach prac nad tym zagadnieniem problem właściwej kompensacji mocy biernej jest już całkowicie rozwiązany. Jednak, jak pokazuje w rozprawie Autorka, nie jest to do końca prawda. Wynika to z ciągłego rozwoju systemu, napędzanego postępowaniem technologicznym, ale też regulacjami prawnymi, prowadzącego do wdrożenia nowych rozwiązań, m.in. w sposobie przyłączenia źródeł wytwórczych do sieci, które powodują powstanie niewystępujących dotychczas problemów w obszarze kompensacji mocy biernej. Właśnie jedno z takich rozwiązań technicznych, polegające na przyłączeniu farmy wiatrowej do węzła sieci 110 kV za pomocą linii kablowej

WN, jest przedmiotem zainteresowania Autorki rozprawy. Z uwagi na coraz szersze stosowanie tego rozwiązania w praktyce uważam, że wybór obiektu badań oraz tematyki z nim związanej jest trafny i uzasadniony.

Farma wiatrowa składa się z szeregu urządzeń istotnych z punktu widzenia gospodarki mocą bierną. Są to: generatory elektrowni wiatrowych, kable SN tworzące jej sieć wewnętrzną, kondensatory i dławiki kompensacyjne SN oraz transformatory SN/WN. Ponieważ bilans mocy biernej jest określany w węźle sieci 110 kV, do którego jest przyłączona farma, konieczne jest również uwzględnienie kabla WN łączącego farmę z siecią OSD oraz urządzeń służących do kompensacji pojemności tego kabla. Z uwagi na dużą liczbę elementów wpływających na wypadkowy bilans mocy biernej całego obiektu, tylko właściwy dobór ich parametrów warunkuje poprawność regulacji bilansu mocy biernej w różnych sytuacjach ruchowych, przy jednoczesnym ograniczeniu całkowitych kosztów ponoszonych przez inwestora w okresie eksploatacji farmy. Taki jest cel badań opisanych w rozprawie.

Spełnienie sformułowanego w rozprawie celu wymaga opracowania odpowiedniej metody, pozwalającej na optymalny, ze względu na przyjęte kryterium, dobór parametrów poszczególnych urządzeń. W związku z tym Autorka stawia tezę, która mówi, że „możliwe jest stworzenie metodyki oceny i doboru parametrów układu generacji i poboru mocy biernej przez farmę wiatrową, tak by wymagania stawiane przez operatorów sieci mogły być spełnione, a osiągnięcie tego stanu było racjonalne z punktu widzenia kosztów ponoszonych przez właściciela farmy”. Postawiona teza wydaje się być łatwa do udowodnienia. Zawiera ona w swej treści funkcję celu, jaką jest spełnienie przez farmę wiatrową wymagań stawianych przez operatorów, przy minimalizacji całkowitych kosztów funkcjonowania obiektu, dla której wystarczy opracować odpowiednią metodę, pozwalającą na wyznaczenie jej wartości dla różnych wariantów konfiguracji układu kompensacji mocy biernej farmy oraz parametrów tworzących go urządzeń. Jednak, aby to osiągnąć, konieczne jest przede wszystkim właściwe zdefiniowanie, określone słownie w bardzo ogólny sposób, funkcji celu za pomocą precyzyjnej zależności matematycznej, ujmującej całość problemu. To zadanie stanowi główną trudność w udowodnieniu tezy.

Sformułowana w pracy teza jest zgodna z celem jaki wyznaczyła sobie Doktorantka, przy czym, w świetle opracowanej w rozprawie metody oraz zaprezentowanych wyników obliczeń, zamiast sformułowania „stworzenie metodyki oceny i doboru” lepiej byłoby użyć zwrotu „stworzenie metodyki oceny lub doboru”. Sugestia ta wynika z tego, że opracowana metoda została zastosowana zarówno do oceny różnych, o z góry zdefiniowanych parametrach, wariantów wykonania układu kompensacji mocy biernej farmy (rozdział 6), jak i do doboru parametrów układu o zadanej strukturze (rozdział 7).

Reasumując, uważam wybraną tematykę rozprawy za interesującą i aktualną, zarówno od strony naukowej, jak i użytecznej. Cel pracy został jasno sformułowany. Teza została postawiona w sposób właściwy i odpowiadający celowi pracy.

### 3. Ogólna ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa zawiera 97 stron treści zasadniczej, podzielonej na 8 rozdziałów. Dodatkowo obejmuje spis oznaczeń oraz spis literatury, składający się ze 108 pozycji.

Rozdział pierwszy rozpoczyna się od ogólnego przedstawienia sektora wiatrowego na świecie i w Polsce. Szczególną uwagę Doktorantka zwraca na aktualne uwarunkowania prawne (ustawa odległościowa 10 h oraz system wsparcia źródeł OZE) i ich możliwy wpływ na rozwój branży. Z tekstu wybrzmiewa negatywny stosunek Autorki do obowiązujących zasad, podkreślony pytaniem o przyszłość sektora wiatrowego w Polsce. Odpowiadając na to pytanie Doktorantka wyraża nadzieję, że energetyka wiatrowa ma szansę na dalszy rozwój, na co przytacza szereg argumentów. W świetle podanych przez Urząd Regulacji Energetyki bieżących danych (z 15 czerwca 2020 r.), mówiących o trwającej realizacji blisko 160 instalacji wiatrowych o łącznej mocy zainstalowanej na poziomie 2,5 GW, należy uznać pogląd Autorki za słuszny, a tematykę pracy za aktualną i ważną z praktycznego punktu widzenia.

W dalszej części rozdziału pierwszego Autorka przedstawia metodykę stosowaną do określania produkcji energii przez turbinę wiatrową, którą wykorzystuje później w swoich pracach. Rozważania ilustruje wynikami symulacji uzyskanymi dla trzech różnych lokalizacji (Mazowsze, Pomorze, Lubelszczyzna), stwierdzając, że otrzymane wyniki uzasadniają ekonomicznie budowę farm wiatrowych w tych miejscach. Dalej następuje przejście do zagadnień technicznych związanych z pracą źródeł wiatrowych w systemie elektroenergetycznym. Analizie poddana zostaje kwestia bilansu mocy czynnej w krajowym systemie elektroenergetycznym, z czego może wynikać konieczność redukcji generacji źródeł wiatrowych. Działanie to jest słusznie postrzegane przez Autorkę jako naturalna procedura operatorska. W kolejnym punkcie dyskutowany jest temat dotyczący obciążalności prądowej linii napowietrznych 110 kV, cechujących się bardzo często ograniczonymi zdolnościami przesyłowymi, w szczególności w okresach letnich. Tutaj Autorka postuluje wprowadzenie obciążalności dynamicznej, jako środka pozwalającego na zwiększenie przepustowości linii. Także w opinii recenzenta byłoby to działanie wysoce racjonalne, ponieważ – jak wskazują również wyniki badań prowadzonych w KEiSU Politechniki Śląskiej – główny wpływ na zwiększenie obciążalności linii napowietrznych ma prędkość i kierunek wiatru, a więc czynnik wpływający bezpośrednio na generację mocy czynnej przez farmę wiatrową.

Ostatni rozpatrywany w tym rozdziale aspekt ściśle związany jest z tematyką pracy i dotyczy gospodarki mocą bierną farm wiatrowych. Możliwy wpływ źródeł wiatrowych na poziomy napięcie w sieci 110 kV został przedstawiony przy wykorzystaniu fragmentu rzeczywistej sieci w KSE. Wynika z niego jednoznaczny wniosek mówiący o znacznym wpływie tych źródeł na wartości napięć węzłowych i to nie tylko w wymiarze lokalnym. Zatem wykorzystanie farm wiatrowych w procesie regulacji napięć jest działaniem uzasadnionym. Aby było to możliwe, obiekty te muszą być wyposażone w odpowiednie urządzenia, pozwalające na właściwe kształtowanie bilansu mocy biernej w różnych

sytuacjach ruchowych, przy czym parametry tych urządzeń powinny być dobrane tak, aby zminimalizować łączne koszty z nimi związane w całym okresie eksploatacji farmy. Jak zaznaczono w poprzednim punkcie recenzji, jest to główny cel rozprawy. Został on sformułowany w rozdziale drugim, w którym również została postawiona – omówiona wcześniej – teza pracy.

Realizacja założonego celu oraz udowodnienie postawionej tezy wymagają wykonania odpowiednich obliczeń, do których niezbędny jest model matematyczny układu generacji i poboru mocy biernej farmy wiatrowej. To zagadnienie jest przedmiotem rozdziału trzeciego rozprawy, w którym w pierwszej kolejności zostały przedstawione modele poszczególnych elementów tego układu. Są to modele ogólnie znane i dobrze opisane w literaturze. Dlatego w pracy przedstawiono je w sposób skrótowy, uwypuklając istotne, z punktu widzenia wybranej tematyki, cechy. Złożenie, odpowiednio sparаметryzowanych, modeli poszczególnych elementów prowadzi do modelu całej farmy wiatrowej, którego schemat przedstawiono na zakończenie rozdziału. Jest on wykorzystywany w dalszych analizach. Należy stwierdzić, że model ten jest poprawny i wystarczający z punktu widzenia jego przeznaczenia.

Ponieważ opracowana w pracy metoda oceny lub doboru parametrów urządzeń wchodzących w skład układu kompensacji mocy biernej farmy wiatrowej bazuje na kryterium techniczno-ekonomicznym, konieczna jest znajomość kosztów związanych z tymi elementami układu, które (lub których parametry) mają zostać poddane analizie. Przybliżone zależności i dane pozwalające na oszacowanie kosztów związanych z urządzeniami wykorzystywanymi do kompensacji mocy biernej farmy zawarto również w rozdziale trzecim. Stanowi to oczekiwane uzupełnienie modeli matematycznych tych urządzeń. W rozdziale trzecim znalazły się także punkty, w których omówiono wymagania rozporządzenia UE 2016/631 w zakresie generacji i poboru mocy biernej przez farmy wiatrowe oraz zdefiniowano karę jaką ponosi właściciel farmy za niezerowy bilans mocy biernej, przy braku generacji mocy czynnej. Uważam, że te dwa zagadnienia lepiej wpasowałyby się w tematykę rozdziału piątego.

W rozdziale czwartym Doktorantka sformułowała model matematyczny pozwalający na określenie przybliżonego bilansu mocy biernej farmy wiatrowej w węźle jej przyłączenia do systemu elektroenergetycznego. Jest to prosty model, bazujący na znanych ogólnie zależnościach opisujących generację i pobór mocy biernej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne oraz straty mocy biernej na reaktancjach układu sieciowego. Na tej podstawie tworzone są bilanse mocy biernej w kolejnych punktach węzłowych układu, a finalnie wyznaczany jest bilans w punkcie przyłączenia farmy do sieci 110 kV. Opracowany model ma charakter inżynierski. Jest on prawidłowy i wystarczający do szacunkowego wyznaczenia bilansu mocy biernej farmy o dowolnych parametrach w różnych stanach jej pracy. Zdaniem recenzenta, celem lepszego zilustrowania kolejnych etapów obliczeń wykonywanych w modelu, można było w pracy dodać schemat elektryczny farmy wiatrowej (np. taki jak na rys. 3.14) z naniesionymi symbolami poszczególnych wielkości występujących w modelu.

Opracowana metodyka określania przybliżonego bilansu mocy biernej została zastosowana w rozdziale piątym pracy do oceny możliwości wypełnienia przez modelową farmę wiatrową wymagań dotyczących generacji i poboru mocy biernej, sformułowanych przez rozporządzenie UE 2016/631. Analizie została poddana farma o mocy 60 MW, składająca się z 30 turbin wiatrowych. Zasymulowany został roczny okres pracy farmy, w którym dla każdej godziny określone zostały generacja mocy czynnej (wynikająca z aktualnej prędkości wiatru) oraz bilans mocy biernej układu w punkcie przyłączenia. Bilans ten został wyznaczony dla maksymalnych i minimalnych wartości mocy biernych generowanych przez generatory turbin wiatrowych (w przypadku niezerowej generacji mocy czynnej) oraz dla zerowych wartości mocy biernych generowanych przez generatory turbin wiatrowych (w przypadku zerowej generacji mocy czynnej). Uzyskane wartości bilansów dla poszczególnych godzin zostały skonfrontowane z wymaganiami, jakie dla tych przedziałów czasowych wynikają z rozporządzenia UE 2016/631, co pozwoliło na ilościowe określenie deficytu mocy biernej w każdej godzinie rocznego okresu analizy. Niezerowa wartość deficytu w danej godzinie oznacza brak spełnienia wymogów stawianych farmie przez operatora sieci. Może to stanowić podstawę do naliczania opłat karnych.

Wyznaczony deficyt mocy biernej, a w konsekwencji możliwe opłaty karne, mogą zostać zminimalizowane poprzez właściwy dobór urządzeń kompensacyjnych. Taki jest cel opiniowanej rozprawy i jednocześnie treść rozdziałów szóstego i siódmego. W tym miejscu należy zastanowić się nad określeniem „właściwy” w odniesieniu do problemu doboru środków do kompensacji mocy biernej farmy wiatrowej. W najprostszym podejściu można te urządzenia dobrać tak, aby możliwe było wyzerowanie deficytu mocy biernej w każdej sytuacji ruchowej, a więc całkowite uniknięcie opłat karnych. Zapewne jest to technicznie możliwe, jednak należy pamiętać, że wzrost mocy urządzeń kompensacyjnych pociąga za sobą wymierne koszty, które mogą przekroczyć wartość unikniętych opłat karnych. Zatem dobierając urządzenia kompensacyjne należy wziąć pod uwagę oba wymienione czynniki i tak dobrać te urządzenia, aby zminimalizować łączny koszt wynikający z ich instalacji oraz z kar ponoszonych za niespełnienie wymagań rozporządzenia UE 2016/631. Takie podejście zastosowała Doktorantka w rozprawie, formułując wskaźnik jakości (wzór 6.7), obejmujący trzy kryteria kosztowe: (1) roczną opłatę za brak spełnienia wymagań dotyczących zakresu regulacji mocy biernej przy niezerowej generacji mocy czynnej, (2) roczną opłatę za niezerowy bilans mocy biernej przy zerowej generacji mocy czynnej oraz (3) roczny koszt stały i zmienny wynikający z instalacji urządzeń kompensacyjnych. Podejście to należy uznać w pełni za właściwe. Analogiczne jest stosowane dla problemu optymalizacji poziomu niezawodności SEE, gdzie minimalizuje się sumę kosztów zapewnienia niezawodności (wynikających z nakładów inwestycyjnych) i kosztów strat gospodarczych (wynikających z przerw w dostawie energii). Natomiast w procesie doboru urządzeń do kompensacji mocy biernej jest to podejście nowe, ponieważ dotychczas w tym obszarze ograniczano się zwykle tylko do minimalizacji kosztów związanych z instalacją urządzeń o wymaganej mocy.

W dalszej części rozdziału szóstego zdefiniowany wskaźnik jakości został zastosowany do oceny kilku, możliwych do zastosowania w praktyce, konfiguracji urządzeń kompensacyjnych o różnych parametrach. Podobnie jak w rozdziale piątym, analizowana była praca modelowej farmy o mocy 60 MW w okresie rocznym, przy czym rozpatrywano cztery różne długości linii kablowej 110 kV łączącej farmę z siecią (5, 15, 25 i 50 km). Ocenie poddane zostały: (1) dławik nieregulowany o stałej indukcyjności (dostrojonej w różnym stopniu do pojemności kabla), (2) dławik o indukcyjności regulowanej za pomocą przełącznika zaczepów (z różną liczbą zaczepów i różnym skokiem regulacji), (3) kompensator statyczny SVC (w postaci dławika z płynną regulacją tyrystorową TCR/TSR), (4) kompensator STATCOM (z płynną regulacją pobieranej lub generowanej mocy biernej), (5) dławik nieregulowany o indukcyjności dostrojonej do pojemności kabla współpracujący z regulowaną baterią kondensatorów (z różną liczbą załączanych członów pojemnościowych). Wykonane obliczenia pozwoliły na ocenę poszczególnych wariantów oraz wybór rozwiązania optymalnego przy różnych długościach linii kablowej 110 kV. We wszystkich przypadkach wariantem minimalizującym wartość wskaźnika jakości był dławik nieregulowany współpracujący z regulowaną baterią kondensatorów. Tak szeroka analiza udowodniła przydatność zaproponowanego wskaźnika jakości w ocenie różnorodnych wariantów wykonania układu kompensacji mocy biernej farmy wiatrowej.

W rozdziale siódmym Doktorantka kontynuuje problem optymalnego doboru urządzeń służących do kompensacji mocy biernej farm wiatrowych, przy czym tym razem skupia się na określeniu optymalnych parametrów dla najlepszego wariantu znalezionej w rozdziale szóstym, czyli dla nieregulowanego dławika WN współpracującego z regulowaną baterią kondensatorów SN, uzupełnionego dodatkowym dławikiem SN. Optymalizacji podlega stopień rozstrojenia dławika WN (w stosunku do pojemności kabla WN o długości 50 km), liczba członów regulowanej baterii kondensatorów (każdy człon o mocy 1 Mvar) oraz indukcyjność dławika SN. W tym celu Autorka stosuje tzw. algorytm kukułki. Zastosowana metoda jest stosunkowo nową, inspirowaną biologicznie, metodą optymalizacji metaheurystycznej, która w procesie obliczeniowym, w kolejnych iteracjach, wykorzystuje jedynie informację o wartości funkcji celu (wskaźnika jakości) dla aktualnie dobranych parametrów i na tej podstawie poszukuje ich poprawy. Wartość funkcji celu jest wyznaczana dla opracowanego wcześniej schematu zastępczego sieci farmy wiatrowej, przy czym, w odróżnieniu do obliczeń wykonywanych w rozdziale szóstym, tym razem bilans mocy biernej w punkcie przyłączenia farmy jest określany na podstawie obliczeń rozplywu mocy w sieci wewnętrznej obiektu. Uważam, że dokonany przez Autorkę wybór klasy metody optymalizacji (heurystyka) jest właściwy dla rozpatrywanego problemu. Dobrze również został zorganizowany proces obliczeniowy, wymagający wielokrotnego obliczania rozplywów mocy i wartości funkcji celu. Na podstawie uzyskanych wyników można również stwierdzić, że zastosowany algorytm kukułki spełnił swoje zadanie i pozwolił na wyznaczenie parametrów urządzeń kompensacyjnych pozwalających na spełnienie wymagań operatora,

*ell*

przy racjonalnych kosztach ponoszonych przez właściciela farmy. Zatem przeprowadzona analiza ponownie udowodniła przydatność zaproponowanego w rozprawie wskaźnika jakości, tym razem w optymalizacji parametrów układu kompensacji mocy biernej farmy wiatrowej. Tym samym osiągnięto postawiony w pracy cel oraz udowodniono sformułowaną w niej tezę. Na zakończenie, w rozdziale ósmym, podsumowano całość przeprowadzonych badań.

Dokonując oceny całości pracy należy stwierdzić, że jest ona dobrze skomponowana, napisana w sposób jasny i rzeczowy, bez zbędnych treści. Występujące potknięcia językowe oraz błędy edycyjne nie zaburzają przekazu z niej płynącego. Zamieszczone przykłady dobrze ilustrują zaproponowaną metodykę. Podsumowując, moja ogólna ocena rozprawy jest jednoznacznie pozytywna.

#### 4. Pytania i uwagi dyskusyjne, komentarze

##### Pytania i uwagi dyskusyjne

1. W pracy, celem określenia rocznej produkcji energii przez elektrownię wiatrową, wykorzystano charakterystykę mocy czynnej wytwarzanej przez generator napędzany turbiną wiatrową w zależności od prędkości wiatru. Przykład takiej charakterystyki przedstawiono na rys. 1.5. Jako źródło informacji o prędkościach wiatru wykorzystano atlas ANEMOS. Na tej podstawie, dla wybranego roku, obliczono ilość wyprodukowanej przez elektrownię wiatrową energii oraz roczny rozkład mocy generowanej. Czy Autorka dysponuje danymi, które pozwoliłyby na porównanie rzeczywistej produkcji z wynikami uzyskanymi symulacyjnie, celem oceny dokładności zastosowanej procedury obliczeniowej?
2. W rozdziale 1.4.1 analizowany jest problem dotyczący maksymalnej generacji źródeł wiatrowych, jaka może zostać zaabsorbowana przez system elektroenergetyczny przy danym obciążeniu (zależność (1.1) – na marginesie, w tekście i w spisie oznaczeń brak jest wyjaśnienia zmiennej  $P_S(i)$ ). Autorka proponuje, aby w przypadku, gdy bieżąca generacja źródeł wiatrowych przekracza wartość maksymalną, redukować wytwarzanie w tych źródłach. Na pierwszy rzut oka przepis ten wydaje się racjonalny i łatwy do zastosowania. Z technicznego punktu widzenia tak niewątpliwie jest. Jednak jak w praktyce mogłaby przebiegać taka procedura? Czy redukcja wytwarzania powinna dotyczyć wybranych źródeł, pewnych obszarów KSE, czy też powinna być stosowana proporcjonalnie do wszystkich? Co ze stroną ekonomiczną procedury, tzn. z rekompensatą utraconych korzyści? Przecież właściciel źródła ma zapewne podpisaną z operatorem umowę przyłączeniową, pozwalającą na wprowadzanie do sieci pełnej mocy swojej farmy wiatrowej.
3. W pracy rozpatrywane są różne długości linii kablowej 110 kV łączącej farmę wiatrową z siecią WN, wynoszące nawet 50 km. W punkcie 3.6 Autorka podaje, że linia o długości 10 km jest źródłem mocy biernej o wartości  $6 \div 7,5$  Mvar, co daje prąd ładowania linii na poziomie  $30 \div 40$  A. Dla linii 50 km będzie to około  $150 \div 200$  A, czyli wartość

niepomijalna z punktu widzenia doboru przekroju żyły roboczej kabla. Biorąc pod uwagę rozpatrywaną w pracy, modelową farmę wiatrową o mocy 60 MW oraz stosowane typowo kable 110 kV, jaka może być maksymalna długość kabla WN z punktu widzenia kryterium obciążalności długotrwałej? Czy można zarekomendować najlepszy (ze względu na maksymalizację obciążalności długotrwałej) sposób wykonania linii (ułożenie kabli, konfiguracja żył powrotnych)?

4. W punkcie 3.8 podane są zależności pozwalające na oszacowanie kosztu zakupu rozpatrywanych w pracy urządzeń do kompensacji mocy biernej. Z tekstu wynika, że wzór pozwalający na obliczenie jednostkowego kosztu mocy zainstalowanej dławika pochodzi z publikacji [88]. Skąd pochodzą kolejne, podane w tym punkcie, wzory oraz założenia pozwalające na wyznaczenie kosztów innych urządzeń? Czy konieczna była aż taka dokładność (do 1 PLN) wyznaczania kosztów poszczególnych urządzeń, skoro są to tylko wartości szacunkowe?
5. W punkcie 3.8 podana jest również orientacyjna wartość strat mocy czynnej w dławiku, wynosząca 2 kW/Mvar. Na tej podstawie wyznaczana jest roczna wartość strat energii, będąca jednym ze składników funkcji celu, określonej wzorem (6.7). Przy wartości 2 kW/Mvar podane jest, że są to straty w żelazie. Czy przy wyznaczaniu strat w dławiku uwzględniane są tylko straty w rdzeniu, czy również straty w uzwojeniach?
6. W opisanym w rozdziale czwartym uproszczonym modelu pozwalającym na wyznaczenie bilansu mocy biernej w węźle przyłączenia farmy wiatrowej, w niektórych zależnościach występują napięcia w charakterystycznych punktach układu ( $U_{FSN}$ ,  $U_{FWN}$ ). Jakie wartości tych napięć przyjmowano w obliczeniach i jakie konsekwencje ma przyjęte założenie na uzyskany wynik? Kontynuując to pytanie, jakie wartości napięć w punkcie przyłączenia PCC przyjmowano w obliczeniach rozplwywowych wykonywanych dla poszczególnych godzin roku w rozdziale siódmym?
7. W punkcie 6.1.3, na str. 72 w akapicie pod wzorem (6.7), podano, że w analizach przyjęto wartość współczynnika  $\alpha_{kQ}$  na poziomie 0,1 MWh/Mvarh. Na str. 73 podano natomiast, że przyjęto wartość  $\alpha_{kQ} = 0,05$  MWh/Mvarh. Która wartość jest prawidłowa? Współczynnik  $\alpha_{k0}$  jest z kolei równy 0,5 MWh/Mvarh. Z czego wynika różna wartość współczynników  $\alpha_{kQ}$  i  $\alpha_{k0}$  przyjmowanych do wyznaczenia opłaty karnej za brak spełnienia bilansu mocy biernej w różnych stanach pracy farmy?
8. Sformułowana w rozdziale 6.1.3 funkcja celu (wskaźnik jakości  $W_Q$ ) w zadaniu optymalizacji wielokryterialnej zawiera trzy człony, sumowane z uwzględnieniem odpowiednich wag (współczynniki  $\beta$ ). W obliczeniach przyjęto jednakowe wartości współczynników wagowych. Z czego wynika przyjęcie takiego założenia? Jakie są wartości poszczególnych składników funkcji celu, tzn. czy są one porównywalne czy może któryś dominuje? Czy badana była czułość funkcji celu na zmianę współczynników wagowych?



9. W sformułowanym w rozprawie wskaźniku jakości (6.7) uwzględniono koszt strat energii w dławikach kompensacyjnych. Czy uzasadnionym byłoby uzupełnienie funkcji celu o koszty strat w sieci wewnętrznej farmy?
10. Obowiązujące zasady wynikające z rozporządzenia UE 2016/631 wymagają zerowego bilansu mocy biernej w punkcie przyłączenia farmy przy braku generacji mocy czynnej. Czy nie można po prostu odłączyć farmy od sieci w węźle 110 kV w takiej sytuacji, zamiast kompensować jej moc bierną?
11. W rozdziale 7.1, opisując optymalizację heurystyczną, Autorka stwierdza, że „Wykorzystanie metod heurystycznych pozwala osiągnąć lepsze rezultaty obliczeniowe niż w przypadku stosowania tradycyjnych algorytmów”. Jakie argumenty można podać na potwierdzenie tej tezy?
12. W rozdziale siódmym, do doboru parametrów układu kompensacji mocy biernej farmy, Autorka zastosowała tzw. algorytm kukułki. Jakie było uzasadnienie wyboru akurat tego algorytmu? Czy można w tym celu było zastosować inny algorytm z klasy metaheurystycznych?
13. W punkcie 7.4 przedstawiono sposób wykonywania obliczeń optymalizacyjnych oraz ich rezultaty. W zastosowanym podejściu algorytm kukułki współpracuje z algorytmem pozwalającym na wyznaczenie rozptyłu mocy w sieci farmy wiatrowej. Na str. 101 pada stwierdzenie, że ze względu na promieniową strukturę sieci zastosowano uproszczoną metodę obliczania rozptyłu mocy. Na czym polegała ta metoda?
14. W tabeli 7.3 przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych, których celem był dobór stopnia rozkompensowania dławika WN, liczby członów baterii kondensatorów oraz indukcyjności dławika SN. Wyniki dla stopnia rozkompensowania i indukcyjności dławika podano z dokładnością do pięciu miejsc po przecinku. Czy jest sens stosowania aż tak dużej dokładności obliczeń, skoro we wcześniejszej części pracy była mowa o dużej niepewności parametrów dławika i kabla WN, wynikającej z procesu ich projektowania i produkcji? Czy nie lepiej byłoby założenie pewnego stałego „skoku” zmiany wartości tych wielkości, czyli zastosowanie optymalizacji dla zmiennych dyskretnych, a nie ciągłych?

#### Komentarze

1. W streszczeniu pracy znajduje się zdanie „W rzeczywistości chodzi zarówno o generację, jak również produkcję tej mocy...”. Generacja mocy, to jej produkcja. Sądząc po tematyce pracy zdanie powinno brzmieć „W rzeczywistości chodzi zarówno o generację, jak również pobór tej mocy...”.
2. Tytuł rozdziału 1.4 („Podstawowe problemy związane z przyłączaniem farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego”) sugeruje, że znajduje się w nim opis problemów na jakie inwestor może napotkać podczas procesu przyłączania farmy wiatrowej do systemu elektroenergetycznego (np. zgody formalno-prawne, problemy natury technicznej, które

należy rozwiązać, itp.). Tymczasem treść rozdziału dotyczy różnych aspektów związanych z pracą przyłączonej już farmy wiatrowej. Dlatego w mojej opinii lepszym tytułem tego rozdziału byłby „Podstawowe problemy związane z pracą farm wiatrowych w systemie elektroenergetycznym”.

3. W opisie rys. 1.4 (ostatni akapit na str. 20) przywołano województwa pomorskie i kujawsko-pomorskie, podczas gdy rysunek dotyczy województw pomorskiego i zachodniopomorskiego.
4. W punkcie 1.4.3 rozprawy niektóre rysunki są niewłaściwie przywołane w tekście. Dla przykładu, wg opisu w tekście, rys. 1.23 dotyczy szczytu zimowego, podczas gdy podpis pod tym rysunkiem mówi, że jest to stan dla sezonu letniego. Podobnie błędnie został przywołany rys. 1.24.
5. W zależności (3.8) powinien być współczynnik  $\alpha_{k0}$  zamiast  $\alpha_{kQ}$ . W opisie oznaczeń symboli występujących we wzorze (3.8) współczynnik ten powinien być wyjaśniony, zamiast – niewystępującego w tym wzorze – współczynnika  $k_k$ .
6. W pracy można zauważyć niekonsekwencję w zapisie symboli, np. reaktancja jednostkowa kabla jest oznaczana dużą literą ( $X_k$ ), a susceptancja małą ( $b_k$ ). Z kolei pojemność jednostkowa kabla WN jest oznaczona dwojako: np. we wzorze (4.15) literą małą ( $c_{kWN}$ ), a w spisie oznaczeń dużą ( $C_{kWN}$ ). Również w dwojaki sposób zapisywane są jednostki, np. poprawnie  $\mu\text{F}$  (str. 52) i niepoprawnie mikroF (str. 58).
7. Odwołując się w tekście do rysunków lub tabel Autorka w środku zdania stosuje skróty, np. „Rys. 1.9” lub „Tab. 1.2”, pisane z dużej litery. Nie jest to sposób zgodny z zasadami pisowni, ale najprawdopodobniej wynika on z zastosowanej automatycznej numeracji w edytorze tekstu, ponieważ jeżeli w tekście pojawia się zwrot „na rysunku...” lub „w tabeli...”, to jest pisany prawidłowo, małą literą.
8. W rozprawie Autorka nie ustrzegła się żargonowych określeń, np. „jeśli natomiast farma » stoi « ”, „dławik bez regulacji jest najbardziej *prymitywnym* rozwiązaniem”, „moc zainstalowana *wiatraków*”. W mojej opinii w lepiej byłoby użyć odpowiednio określeń *farma nie pracuje, najprostszym rozwiązaniem, elektrowni wiatrowych*.
9. Niektóre pozycje literatury wydają się być niewłaściwie cytowane. Przykładowo, na str. 33, Doktorantka pisze, że problematyka monitorowania temperatury przewodów linii napowietrznej była „przedmiotem zainteresowania autorki rozprawy”, przywołując w tym miejscu publikacje [8] i [76]. Tak sformułowane przywołanie pozycji literaturowych sugeruje, że są one autorstwa Doktorantki. Stan faktyczny jest jednak inny i moim zdaniem te pozycje literatury powinny być wspomniane w pracy w inny sposób. Kolejną wątpliwość budzi cytowanie pozycji [42] na str. 61, dotyczące kary za niespełnienie warunku zerowej generacji mocy biernej przy braku produkcji mocy czynnej przez farmę wiatrową. Pozycja [42] dotyczy bowiem problemu dynamicznej obciążalności linii napowietrznych.

eli

10. Spis literatury można było uporządkować w lepszy sposób, grupując pozycje literaturowe w odpowiednie kategorie (np. książki, artykuły, referaty konferencyjne, normy i przepisy prawne, źródła internetowe). Pozycje [71] i [85] są tożsame, przy czym właściwy jest opis pozycji [71].

Przestawione wyżej uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i pozostają bez wpływu na moją pozytywną ocenę rozprawy. Wszystkie ewentualne nieścisłości należy uznać za zrozumiałe, biorąc pod uwagę złożoność problemu badawczego.

## 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, że opiniowana rozprawa spełnia to wymaganie. Doktorantka w swojej pracy precyzyjnie określa obszar zainteresowania, jednoznacznie formułuje cel badań, a później konsekwentnie go realizuje, udowadniając postawioną tezę. Prowadzony wykład jest jasny i czytelny. Zawiera wszystkie istotne elementy opracowania naukowego z obszaru nauk technicznych, obejmujące: omówienie najważniejszych problemów praktycznych dotyczących wybranej tematyki, genezę problemu badawczego, cel i tezę pracy, sformułowanie matematyczne problemu badawczego, propozycję sposobu jego rozwiązania, omówienie uzyskanych wyników, podsumowanie oraz wykaz literatury.

Jako najważniejsze osiągnięcie naukowe rozprawy uważam zaproponowanie i zaimplementowanie nowego kryterium optymalizacji układu służącego do kompensacji mocy biernej farm wiatrowych. Kryterium to z jednej strony uwzględnia koszty urządzeń kompensacyjnych, a z drugiej opłaty karne za brak spełnienia wymagań operatorów. Takie podejście stawia problem optymalnego doboru urządzeń kompensacyjnych w nowym świetle, rodząc konieczność zastosowania adekwatnych metod obliczeniowych. Przedstawiony w rozprawie sposób rozwiązania problemu naukowego daje ponadto możliwość jego praktycznego wykorzystania, w szczególności w procesie projektowania farm wiatrowych.

## 6. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę przedstawioną wyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa Mgr inż. Michaliny Gryniewicz-Jaworskiej pt. „Optymalizacja układów kompensacji mocy biernej farm wiatrowych” odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z późn. zm. – Dz. U. 2017 r., poz. 1789) i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony. Opiniowana rozprawa została zrealizowana w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Roman Uroń