

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI  
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI**



**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Daria Złotecka**

**ODBUDOWA ZDOLNOŚCI  
WYTWÓRCZYCH ELEKTROWNI  
PO AWARII KATASTROFALNEJ SYSTEMU  
ELEKTROENERGETYCZNEGO**

**Promotor:**

**prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska**

Poznań, 2023

## 1. WSTĘP

### 1.1. MOTYWACJA ROZPRAWY

Motywacją rozprawy są przewidywane zmiany w strukturze wytwórczej Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), związane z wycofywaniem bloków elektrowni konwencjonalnych. Postępująca zmiana struktury wytwarzania przekładać się będzie na zróżnicowanie udziału jednostek wytwórczych aktywnie uczestniczących w planach obrony i odbudowy zdolności wytwórczych systemu elektroenergetycznego na wypadek rozległej awarii systemowej, a tym samym na bezpieczeństwo energetyczne całego KSE.

Polityka energetyczna Unii Europejskiej wymusza postępujące zmiany w strukturze źródeł wytwarzania w systemach elektroenergetycznych, związane ze zmniejszaniem wpływu energetyki na środowisko, szczególnie w zakresie emisji zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych oraz zwiększania udziału źródeł odnawialnych w całkowitej produkcji energii w sektorze energetycznym. W najbliższych latach przewiduje się znaczną liczbę wycofania źródeł konwencjonalnych, nie tylko ze względu na kończący się graniczny czas pracy bloków energetycznych, ale również ze względu na potencjalne niespełnienie wymagań emisyjnych. Skutkiem przedstawianych w dokumentach strategicznych prognoz będzie znaczne zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> z energetycznego spalania paliw, jednak przedstawiona prognoza w zestawieniu z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną wskazuje na poważne zagrożenie bezpieczeństwa energetycznego systemu elektroenergetycznego ze względu na pogłębiający się deficyt mocy zainstalowanej w systemie i wycofanie z eksploatacji bloków dużej mocy, pracujących w sposób stabilny w podstawie obciążenia.

Z punktu widzenia konsekwencji realizacji celów szczegółowych i projektów strategicznych PEP2040, transformacja systemu wytwórczego w Polsce ma opierać się przede wszystkim na zastępowaniu elektrowni konwencjonalnych odnawialnymi źródłami energii (OZE) oraz energetyką jądrową. Inwestycje w źródła odnawialne w KSE stanowią odpowiedź na globalny cel Unii Europejskiej, dotyczący redukcji poziomu emisji CO<sub>2</sub> w związku z wprowadzonym pakietem *Fit for 55*, odnoszącym się do 55% redukcji emisji CO<sub>2</sub> do roku 2030 w porównaniu z rokiem 1990, z długoterminową perspektywą neutralności klimatycznej do roku 2050. Dla realizacji tak postawionego celu w zakresie elektroenergetyki, rozwój źródeł odnawialnych obejmuje stopniowe wdrażanie kluczowych działań strategicznych, wyszczególnionych poniżej.

- 1) Wdrożenie morskiej energetyki wiatrowej.
- 2) Rozwój energetyki wiatrowej na lądzie.
- 3) Rozwój fotowoltaiki.
- 4) Rozwój rozproszonej energetyki prosumenckiej.
- 5) Rozwój systemowych magazynów energii.
- 6) Wzrost znaczenia biomasy i biogazu.
- 7) Zwiększenie wykorzystania potencjału hydroenergetycznego.

Opisane działania rozwojowe mają na celu stopniowe zastępowanie odstawianych elektrowni konwencjonalnych w sposób warunkujący spełnienie bilansu mocy w systemie, jak również znaczne ograniczenie krajowej emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza. Nowa struktura wytwarzania energii elektrycznej w Polsce, poza analizami funkcjonowania systemu elektroenergetycznego w stanie normalnym, będzie wymagała szczegółowych analiz i scenariuszy postępowania w stanach awaryjnych systemu elektroenergetycznego, szczególnie na wypadek awarii katastrofalnych.

Kluczową kwestią dla prawidłowego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie bilansu mocy pomiędzy generacją a zapotrzebowaniem. Aktualna tendencja wskazuje na malejący trend wystarczalności KSE z punktu widzenia krajowej produkcji

energii elektrycznej, szczególnie w okresach szczytowego na nią zapotrzebowania. Prognoza postępującego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną niesie za sobą ryzyko uzależnienia KSE od pokrywania zapotrzebowania przy znacznym udziale wymiany transgranicznej, nawet w normalnym stanie pracy KSE. Operator Systemu Przesyłowego (OSP), którym w Polsce jest spółka Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE), przedstawił *Prognozę pokrycia zapotrzebowania szczytowego na moc w latach 2016-2035*. Dokument wskazuje na postępujący w kolejnych latach niedobór wymaganej nadwyżki mocy dostępnej dla OSP, jak również na potencjalny brak możliwości pokrycia zapotrzebowania przez elektrownie krajowe.

Rosnący deficyt mocy zainstalowanej w źródłach systemowych w istotny sposób przekłada się na obniżenie bezpieczeństwa energetycznego, jak również na rosnące ryzyko wystąpienia awarii katastrofalnej w systemie elektroenergetycznym. Zgodnie z *Instrukcją Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP)*, awaria systemowa jest zdarzeniem ruchowym, które skutkuje wyłączeniem z ruchu synchronicznego części KSE produkującej lub odbierającej energię elektryczną w ilości min. 5% aktualnego zapotrzebowania na moc w KSE. Szczególnym typem awarii systemowej jest **awaria katastrofalna**, określana mianem blackoutu, w wyniku której:

- następuje całkowity zanik napięcia w systemie elektroenergetycznym lub w znacznej jego części przez minimum 3 minuty, skutkujący uruchomieniem procedur odbudowy,
- następuje utrata zasilania dla przynajmniej 50% aktualnego zapotrzebowania,
- linie międzysystemowe zostają wyłączone,
- postępowanie operatorskie prowadzone jest zgodnie z instrukcjami Krajowej Dyspozycji Mocy (KDM) oraz obszarowych dyspozycji mocy (ODM), w przeciwieństwie do awarii lokalnych, kiedy działania operatorskie prowadzone są według bieżących wytycznych prowadzenia ruchu.

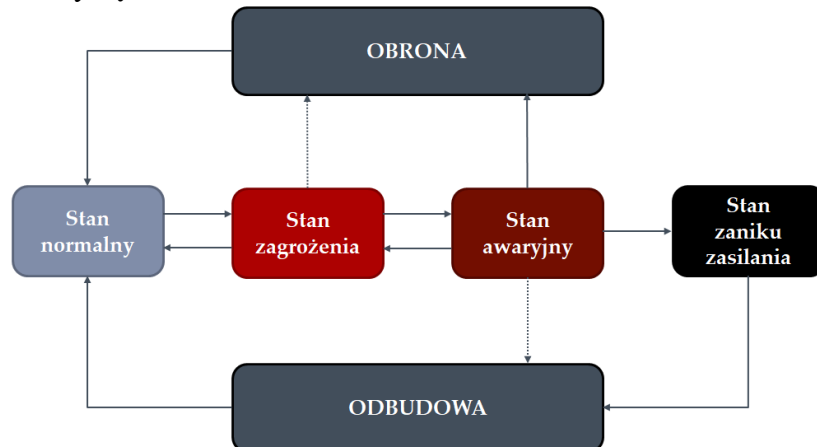
Na wypadek zagrożenia wystąpieniem awarii katastrofalnych istnieje zatem konieczność opracowywania oraz bieżącej aktualizacji planów obrony i odbudowy KSE, a obowiązek ten spoczywa na OSP, co wynika z zapisów *Ustawy Prawo Energetyczne*. Szczegółowe wymagania dotyczące opracowywania planów obrony i odbudowy KSE precyzuje w Polsce IRiESP, korespondując z europejskimi wymaganiami, zawartymi w *ENTSO-E Operation Handbook*.

Środki związane z planem **obrony** mają na celu zapobieganie wystąpieniu awarii systemowej lub rozprzestrzenianiu i pogłębianiu jej skutków, natomiast celem planu **obudowy** jest przywrócenia zasilania, resynchronizacja systemu elektroenergetycznego i powrót do stanu normalnego po wystąpieniu awarii katastrofalnej, w przypadku nieskutecznych procedur obrony systemu elektroenergetycznego, jak przedstawiono na Rysunku 1.

Zaktualizowane o zapisy kodeksu NC ER (ang. *Network Code on Electricity Emergency and Restoration*) plany odbudowy KSE przewidują zróżnicowane strategie w zależności od możliwości aktywnego uczestnictwa źródeł wytwórczych bądź sąsiednich systemów elektroenergetycznych w procesie odbudowy, po identyfikacji ich bieżącego stanu po wystąpieniu awarii. W związku z powyższym, można wyróżnić dwie główne strategie odbudowy systemów elektroenergetycznych:

- strategia oddolna – podanie napięcia na część danego OSP bez pomocy innych OSP; przy czym źródła energii rozruchowej mogą stanowić jednostki wytwórcze zdolne do rozruchu autonomicznego (samostartu), jednostki wytwórcze zdolne do przejścia do pracy na potrzeby własne lub do pracy wyspowej bądź wydzielone fragmenty KSE, utrzymujące się po awarii w pracy synchronicznej;

- strategia odgórna – podanie napięcia na część danego OSP z wykorzystaniem pomocy sąsiednich OSP.



Rys. 1. Schemat powrotu do stanu normalnego systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem planów obrony i odbudowy.

Strategie odbudowy systemów elektroenergetycznych obejmują wieloetapowe, sekwencyjne procesy związane z ryzykiem niepowodzenia resynchronizacji lub wydłużeniem czasu trwania awarii, dlatego w rozprawie doktorskiej przeprowadzono analizę ryzyka dla zróżnicowanych wariantów realizacji procesu odbudowy z uwzględnieniem postępujących zmian w strukturze wytwarzania energii elektrycznej w KSE.

## 1.2. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY

Przedmiotem niniejszej rozprawy jest odbudowa zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego, w ramach której sformułowano następującą tezę:

***Postępujące zmiany w strukturze wytwarzania energii elektrycznej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym wiążą się z koniecznością aktualizacji dotychczasowych planów odbudowy zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego i opracowania strategii w oparciu o minimalizację czasu procesu odbudowy i ryzyka z nim związanego.***

Uzupełnieniem powyżej sformułowanej tezy są następujące twierdzenia:

- 1) ze względu na zagrożenie awariami katastrofalnymi w systemie elektroenergetycznym, postępująca transformacja energetyczna w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym wymusza aktualizację planów obrony i odbudowy zdolności wytwórczych;
- 2) wieloetapowy proces odbudowy zdolności wytwórczych jest obarczony ryzykiem niepowodzenia lub wydłużeniem czasu trwania awarii katastrofalnej, dlatego istnieje konieczność opracowania narzędzi pozwalających oszacować poziom ryzyka na poszczególnym etapie jego realizacji;
- 3) porównanie proponowanych scenariuszy odbudowy zdolności wytwórczych może zostać zrealizowane z wykorzystaniem metod analizy ryzyka.

Na potrzeby udowodnienia postawionej tezy, sformułowano cel rozprawy:

*Głównym, oryginalnym celem niniejszej rozprawy jest opracowanie scenariuszy odbudowy zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego z uwzględnieniem zróżnicowanej struktury wytwarzania energii elektrycznej w Krajowym*

*Systemie Elektroenergetycznym oraz zaproponowanie modelu oceny ryzyka dla przyjętych scenariuszy odbudowy zdolności wytwórczych.*

Zakres rozprawy obejmuje siedem rozdziałów zasadniczych, podsumowanie oraz spis literatury. W rozdziale drugim przedstawiono, przewidywane na kolejne lata, zmiany w strukturze wytwórczej w KSE wynikające z postępującego wycofywania źródeł węglowych wraz z konsekwencjami tych działań dla bezpieczeństwa pracy KSE zarówno w stanie normalnym, jak i w stanach awaryjnych. W rozdziale trzecim omówiono problem awarii katastrofalnych, które dotknęły systemy elektroenergetyczne na całym świecie. Zaprezentowana została autorska analiza statystyczna 180 największych awarii systemowych wraz z wnioskami płynącymi z historii wcześniejszych awarii. Rozdział czwarty zawiera przegląd stosowanych strategii postępowania na wypadek awarii katastrofalnych w systemach elektroenergetycznych z uwzględnieniem roli poszczególnych typów źródeł wytwórczych w procesie odbudowy zdolności wytwórczych. W rozdziale zawarto wymagania stawiane źródłom wytwórczym w zakresie uczestnictwa w procesie odbudowy wraz z przykładami prób systemowych, realizowanych w KSE. W rozdziale piątym został przedstawiony przegląd literatury, dotyczący badań naukowych w zakresie awarii katastrofalnych w systemach elektroenergetycznych na etapie rozwoju awarii, a także w zakresie procesu odbudowy systemu elektroenergetycznego po wystąpieniu awarii. W rozdziale tym przedstawiono również przegląd literatury dotyczący nowych propozycji strategii angażowania źródeł odnawialnych w procesy obrony i odbudowy. Szczególną uwagę, w kontekście analizy ryzyka, poświęcono powyższym badaniom literaturowym.

Rozdział szósty rozpoczyna część badawczą rozprawy, w której zaprezentowano metodologię i wyniki badań symulacyjnych dla przyjętych scenariuszy odbudowy zdolności wytwórczych, opracowanych w programie symulacyjnym DIGSILENT PowerFactory. W badaniach uwzględniono aktualne strategie odbudowy oraz zaproponowano nowe strategie, wykorzystujące odnawialne źródła energii.

Wyniki symulacji z rozdziału szóstego stanowią punkt wyjścia do opracowania modelu zarządzania ryzykiem w procesie odbudowy zdolności wytwórczych, będącego przedmiotem rozdziału siódmego. W tym celu zaproponowano jakościową analizę ryzyka metodą muchy (ang. *bow-tie*) oraz ilościową analizę ryzyka, bazując na wielokryterialnej metodzie hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) oraz rozmytej metodzie FAHP (ang. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*).

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie rozprawy, gdzie sprecyzowano wnioski oraz wskazano dalsze kierunki badań w ramach przedstawianego zagadnienia.

## **2. ROZLEGŁE AWARIE W SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH**

### **2.1. ANALIZA STATYSTYCZNA AWARII KATASTROFALNYCH W SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH**

Rozległe awarie systemowe są zjawiskiem występującym w systemach elektroenergetycznych na całym świecie. Na potrzeby analizy statycznej zebrano 180 największych rozległych awarii systemowych, mających miejsce w latach 1965-2022, dla których przeanalizowano i zebrano dane dotyczące daty i miejsca wystąpienia awarii, liczby osób dotkniętych awarią, czasu trwania awarii systemowej, a także bezpośrednich przyczyn wystąpienia awarii.

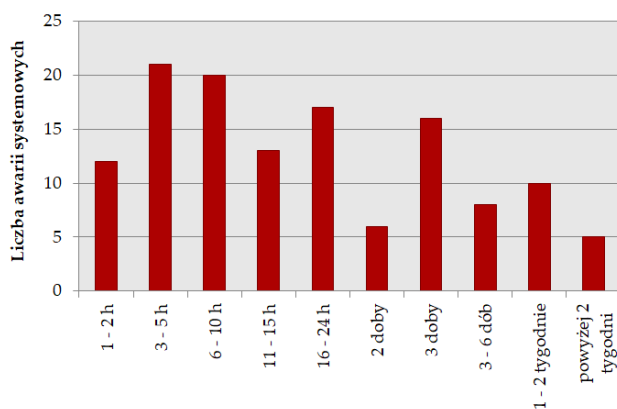
Z punktu widzenia liczby ludności dotkniętych awarią, aż 110 spośród zebranych awarii objęło zasięgiem ponad 1 mln osób. Na podstawie zestawionych przykładów awarii w systemach elektroenergetycznych można zauważyć, że skala zjawiska wykazuje charakter ogólnoświatowy, a ze względu na różnorodność przyczyn awarii, ich występowanie jest

nieuniknione. Awarie katastrofalne w szczególności dotyczyły systemów elektroenergetycznych, które wykazują znaczny udział w pokrywaniu obciążeń importem energii elektrycznej. Dodatkowe czynniki w postaci wyeksploatowanej infrastruktury systemu elektroenergetycznego czy ekstremalnych warunków atmosferycznych znacznie zwiększają ryzyko wystąpienia rozległych awarii systemowych. Nie bez znaczenia pozostaje również czas usunięcia skutków awarii i przywrócenie zasilania w całym systemie elektroenergetycznym. Skoordynowane działania służb dyspozytorskich i dostępne zasoby wytwórcze pozwalają na stosunkowo szybki powrót do stanu normalnego, jednak największe wyzwanie stanowi odbudowa zdolności wytwórczych w systemach, w których doszło do poważnych uszkodzeń infrastruktury sieciowej, np. wskutek katastrof naturalnych (huragany, burze śnieżne, trzęsienia ziemi) czy uszkodzeń linii transgranicznych dla systemów uzależnionych od importu energii elektrycznej. W takiej sytuacji czas przywrócenia zasilania nie jest przedstawiany w godzinach lecz w skali dni lub nawet tygodni, jak przedstawiono na Rysunku 2 Analiza minionych awarii systemowych pozwoliła na sprecyzowanie przyczyn ich powstawania. Zebrane czynniki inicjujące awarie w systemach elektroenergetycznych uogólniono do trzech głównych grup:

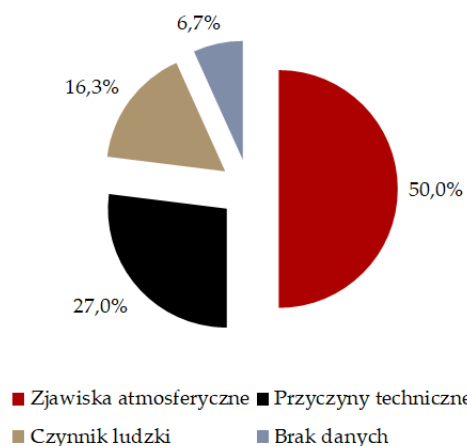
- przyczyny wynikające z warunków atmosferycznych,
- przyczyny techniczne, związane z infrastrukturą wytwórczą i/lub sieciową,
- przyczyny ludzkie, wynikające z błędnych lub celowych działań.

Na Rysunku 3 przedstawiono procentowy udział powyższych rodzajów przyczyn rozległych awarii w systemach elektroenergetycznych, zgodnie z którym można zauważyć, że za połowę awarii odpowiadają czynniki atmosferyczne.

Awarye katastrofalne obejmujące zasięgiem całe systemy elektroenergetyczne, z uwagi na konsekwencje gospodarcze, społeczne i ekonomiczne, stanowią najbardziej dotkliwe zagrożenie dla systemów elektroenergetycznych i wymuszają konieczność opracowania strategii odbudowy i ponownej resynchronizacji zasilania w całym systemie, z minimalizacją czasu trwania awarii.



Rys. 2. Zestawienie czasu przywrócenia zasilania po rozległej awarii w systemie elektroenergetycznym.



Rys. 3. Przyczyny rozległych awarii w systemach elektroenergetycznych.

## 2.2. ROLA ŹRÓDEŁ WYTWÓRCZYCH W PROCESIE ODBUDOWY ZDOLNOŚCI WYTWÓRCZYCH

Ze względu na rolę, jaką aktualnie pełnią poszczególne typy źródeł wytwórczych w systemie elektroenergetycznym na wypadek wystąpienia awarii katastrofalnej, wyróżnić można podział przedstawiony w Tabeli 1. Z punktu widzenia procesu uruchamiania konwencjonalnej jednostki wytwórczej, najistotniejszą kwestią jest uprzednie przeprowadzenie rozruchu napędów wymaganych urządzeń potrzeb własnych danego bloku. Dyspozycyjna moc czynna i bierna źródła rozruchowego musi zatem charakteryzować się

wystarczającym poziomem generacji do zasilania i pokrycia mocy urządzeń potrzeb własnych uruchamianego bloku z uwzględnieniem ich mocy rozruchowych przy sekwencyjnych rozruchach, a także mocy związanej z ładowaniem linii podczas tworzenia torów rozruchowych. Weryfikacja zdolności źródeł wytwórczych do aktywnego udziału w planach obrony i odbudowy zasilania KSE jest realizowana przy pomocy prób systemowych, wykonywanych na polecenie OSP zgodnie z zapisami IRiESP. Celem prób systemowych jest potwierdzenie zdolności jednostek wytwórczych do samostartu lub pracy w układzie wydzielonym w warunkach imitujących rzeczywiste sytuacje sieciowe lub warunki występujące w czasie możliwych zakłóceń pracy systemu elektroenergetycznego. Badania symulacyjne torów rozruchowych prowadzone w ramach czynności przygotowawczych pozwalają określić przewidywane wielkości parametrów, np. udary podczas załączania napędów urządzeń potrzeb własnych uruchamianych bloków czy spodziewane wartości napięć w tworzonym torze rozruchowym, wraz ze wskazaniem zaleceń dotyczących czynności przed rozpoczęciem, jak i w trakcie realizacji prób systemowych, jak np. zmiana położenia przełączników zaczepów w transformatorach wchodzących w skład torów rozruchowych czy zapewnienie wymaganej wartości napięcia generatorowego źródeł startowych.

*Tabela 1. Rola źródeł wytwórczych w procesie odbudowy zdolności wytwórczych*

<b>Rola</b>	<b>Charakterystyka</b>	<b>Typ źródeł wytwórczych</b>
Rola aktywna	Źródła zdolne do samostartu	Elektrownie wodne
		Elektrownie gazowe
		Zespoły prądotwórcze z silnikami tłokowymi
	Źródła uruchamiane lub pozostające w pracy autonomicznej	Elektrownie konwencjonalne
Elektrociepłownie konwencjonalne		
Rola pasywna	Źródła synchronizowane z systemem elektroenergetycznym po zakończeniu procesu odbudowy i powrocie do stanu normalnego	Elektrownie jądrowe
		Elektrownie wiatrowe
		Elektrownie fotowoltaiczne

Rola pasywna źródeł odnawialnych wynika z ich fluktuacyjnego charakteru generacji, zależnego od bieżących warunków atmosferycznych. W przypadku narastania zagrożenia awarią katastrofalną w systemie elektroenergetycznym, źródła fotowoltaiczne oraz elektrownie wiatrowe zostają odłączone z systemu, w wyniku zadziałania zabezpieczeń podczęstotliwościowych przy spadku częstotliwości systemowej w celu uniknięcia ryzyka wprowadzania do systemu niekontrolowanej generacji mocy. Z tego względu, ponowna resynchronizacja elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych jest realizowana po ustabilizowaniu parametrów systemu elektroenergetycznego po procesie odbudowy i powrocie do normalnego stanu pracy, na co dodatkowo nakłada się sposób integracji źródeł OZE z siecią przy pomocy inwerterów, których charakterystyka działania wymusza synchronizację przy braku oscylacji częstotliwości i napięcia systemowego. Z drugiej strony, rosnący udział źródeł OZE w strukturze wytwarzania przekłada się w negatywny sposób na zmniejszenie naturalnej inercji systemu elektroenergetycznego. Ze względu na postępującą integrację źródeł OZE z magazynami energii, zauważa się potencjał wykorzystania technologii magazynowania energii elektrycznej do udziału w planach obrony i odbudowy zdolności wytwórczych.

Elektrownie jądrowe na wypadek awarii w systemach elektroenergetycznych pełnią rolę pasywną ze względu na konieczność ochrony własnej infrastruktury technologicznej. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy elektrowni jądrowej, w przypadku zagrożenia lub

wystąpienia awarii systemowej, priorytetową kwestią jest zagwarantowanie zasilania systemów chłodzenia rdzenia reaktora, ponieważ nawet po awaryjnym odłączeniu bloku jądrowego z systemu, reaktor w stanie niekrytycznym charakteryzuje się generacją ciepła powyłączeniowego w wyniku zachodzących przemian jądrowych. Z tego względu, na wypadek utraty zasilania w podstawowych układach chłodzenia reaktora, bloki jądrowe wyposażane się w pasywne systemy bezpieczeństwa, obejmujące m.in. rezerwowe układy chłodzenia reaktora.

### **2.3. KONSEKWENCJE TRANSFORMACJI SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO DLA PLANÓW ODBUDOWY KSE**

Przewidywane zmiany w strukturze wytwarzania energii elektrycznej w KSE do roku 2040 w bezpośredni sposób przekładają się na zmianę struktury źródeł wytwórczych aktywnie uczestniczących w procesie odbudowy zdolności wytwórczych na wypadek awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego. Według dotychczasowych założeń strategii odbudowy, a także w optymistycznym scenariuszu spełnienia wymagań technicznych i organizacyjnych, źródła pełniące rolę aktywną w procesie odbudowy zdolności wytwórczych w przyszłości mogą stanowić:

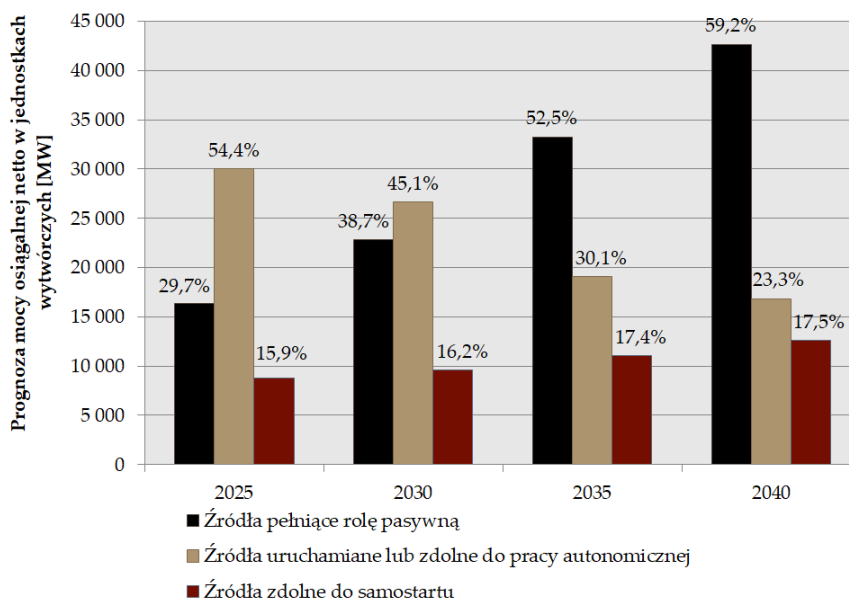
- źródła zdolne do samostartu – elektrownie wodne, elektrownie oraz elektrociepłownie gazowe i biogazowe,
- źródła zdolne do utrzymania się w pracy autonomicznej lub oczekujące na uruchomienie ze źródeł rozruchowych – bloki elektrowni konwencjonalnych węglowych oraz biomasowych.

Dynamiczny wzrost źródeł OZE oraz wdrożenie energetyki jądrowej niesie za sobą konsekwencje rosnącego udziału w strukturze wytwarzania źródeł pełniących rolę pasywną na wypadek konieczności odbudowy zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego, jak przedstawiono na Rysunku 4. Uwzględniając założenia dotychczasowych strategii odbudowy, zauważyć można postępującą w czasie diametralną zmianę proporcji pomiędzy źródłami pełniącymi rolę aktywną a źródłami pełniącymi rolę pasywną w procesie odbudowy zdolności wytwórczych. Przy aktualnych założeniach, już w roku 2035 udział źródeł pełniących rolę pasywną przewyższy udział źródeł uczestniczących obecnie w procesie odbudowy zdolności wytwórczych, co przekłada się na trudności związane z szybkim powrotem do stanu normalnego systemu elektroenergetycznego, ze względu na warunki odbudowy częstotliwości i inercję systemu, a także zwiększenie znaczenia strategii odgórnej podawania napięcia w scenariuszach odbudowy KSE.

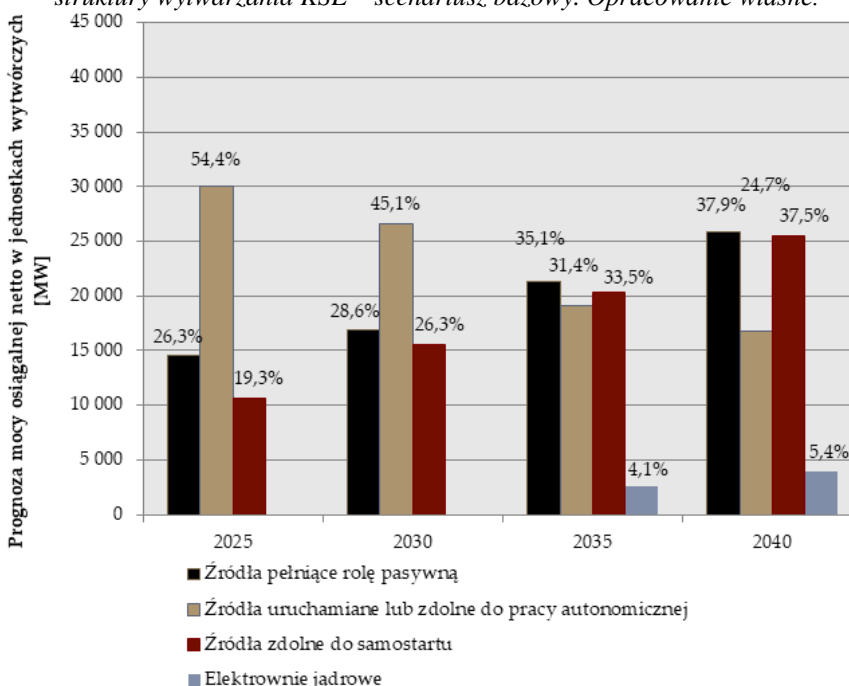
Uwzględniając opisywany w literaturze potencjał wykorzystania źródeł odnawialnych współpracujących z magazynami energii oraz morskich elektrowni wiatrowych do aktywnego uczestnictwa w procesie odbudowy systemu w zakresie zdolności do samostartu, zaproponować można alternatywny scenariusz zmian struktury źródeł dla transformowanej struktury wytwarzania KSE, jak przedstawiono na Rysunku 5. Na Rysunku 5 jako osobną grupę wyróżniono elektrownie jądrowe, ponieważ ze względu na specyfikę pracy nie będą pełniły roli źródeł rozruchowych, jednak pod kątem ochrony własnej infrastruktury, elektrownie te charakteryzują się specyficznymi wymaganiami w zakresie obrony zdolności wytwórczych, np. poprzez przechodzenie do pracy na potrzeby własne.

Symulacja scenariusza zaangażowania źródeł OZE do procesu obrony i odbudowy zdolności wytwórczych wskazuje na większe możliwości prowadzenia oddolnej strategii odbudowy ze względu na ograniczony udział źródeł pełniących rolę pasywną w procesie odbudowy w stosunku do scenariusza bazowego. Warunki te stanowią przesłankę do prowadzenia prac badawczych w zakresie zdolności źródeł OZE i magazynów energii do samostartu oraz przechodzenia w tryb pracy wyspowej.





Rys. 4. Rola źródeł wytwórczych w procesie obrony i odbudowy zdolności wytwórczych dla transformowanej struktury wytwarzania KSE – scenariusz bazowy. Opracowanie własne.



Rys. 5. Rola źródeł wytwórczych w procesie obrony i odbudowy zdolności wytwórczych dla transformowanej struktury wytwarzania KSE – scenariusz alternatywny, uwzględniający aktywną rolę magazynów energii oraz morskich elektrowni wiatrowych. Opracowanie własne.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE PROCESÓW ODBUDOWY ZDOLNOŚCI WYTWÓRCZYCH

#### 3.1. SKRÓCONY OPIS BADAŃ SYMULACYJNYCH

W ramach rozprawy doktorskiej dokonano oceny skuteczności działań w warunkach blackoutu przeprowadzając badania symulacyjne procesu odbudowy zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej z wykorzystaniem modeli opracowanych w środowisku DiGSILENT PowerFactory. Badania te umożliwiają przeprowadzenie analizy, której zadaniem jest wskazanie newralgicznych aspektów związanych z procesem odbudowy zdolności wytwórczych. Na potrzeby takiej analizy opracowano modele symulacyjne, składające się z:

- źródła rozruchowego,
- toru rozruchowego,
- źródła uruchamianego.

W celu porównania wyników badań symulacyjnych z danymi rzeczywistymi, utworzony został model weryfikacyjny toru rozruchowego, dotyczący zrealizowanej próby systemowej uruchomienia bloku nr 6 Elektrowni Turów z Elektrowni Wodnej Dychów w dniu 10.07.2016 r., w organizacji której uczestniczył m.in. zespół z Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Model obliczeniowy został utworzony na podstawie danych technicznych poszczególnych urządzeń uczestniczących w próbie systemowej, zgodnie z odwzorowanym schematem toru rozruchowego. Wielkości wybranych parametrów uzyskanych na drodze badań symulacyjnych porównano z rzeczywistymi wynikami próby systemowej podczas niewralgicznych zdarzeń, takich jak załączenie linii 220 kV Leśniów-Mikułowa, załączenie pomp akumulacyjnych w Elektrowni Wodnej Dychów oraz załączenie pompy wody zasilającej w Elektrowni Turów. Na podstawie porównania wyników można zauważyć znaczną zbieżność wyników badań symulacyjnych z wynikami rzeczywistej próby systemowej, co pozwala stwierdzić, że środowisko badań symulacyjnych DIGSILENT PowerFactory stanowi wiarygodne narzędzie do analizy odbudowy zdolności wytwórczych, a wyniki są porównywalne z pomiarami rejestrowanymi w rzeczywistym systemie elektroenergetycznym. Stanowi to przesłankę do podjęcia dalszych analiz w kierunku możliwości odbudowy zdolności wytwórczych dla różnego typu źródeł rozruchowych, które przedstawiono w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Analizowane na modelach symulacyjnych scenariusze odbudowy zdolności wytwórczych zostały zróżnicowane pod kątem typu źródła rozruchowego. W przyjętych analizach wzięto pod uwagę aktualnie rozpatrywane strategie odbudowy, a także zaprezentowano wyniki nowych propozycji udziału źródeł odnawialnych w procesach odbudowy zdolności wytwórczych, jak wyszczególniono poniżej:

- 1) Scenariusz S1 – odbudowa zdolności wytwórczych z wykorzystaniem elektrowni wodnej,
- 2) Scenariusz S2 – odbudowa zdolności wytwórczych z wykorzystaniem elektrowni gazowej,
- 3) Scenariusz S3 – odbudowa zdolności wytwórczych z wykorzystaniem bateryjnego magazynu energii współpracującego z lądową elektrownią wiatrową,
- 4) Scenariusz S4 – odbudowa zdolności wytwórczych z wykorzystaniem morskiej elektrowni wiatrowej przyłączonej z wykorzystaniem łącza VSC-HVDC oraz bateryjnego magazynu energii,
- 5) Scenariusz S5 – odbudowa zdolności wytwórczych z wykorzystaniem strategii odgórnej podania napięcia z sąsiedniego systemu elektroenergetycznego przy pomocy połączenia transgranicznego.

Dla każdego z analizowanych scenariuszy przeprowadzono badania symulacyjne odpowiedzi dynamicznych podczas sekwencyjnego załączania elementów toru rozruchowego, zróżnicowanego pod kątem:

- długości toru rozruchowego, dla trzech wariantów długości linii 220 kV, będących odzwierciedleniem lokalizacji źródła rozruchowego względem uruchamianych napędów:
  - L1 = 50 km,
  - L2 = 100 km,
  - L3 = 150 km,
- typu źródła uruchamianego, rozpatrywanego w dwóch wariantach:
  - M1÷M6 – odbiory dynamiczne w postaci silników asynchronicznych o rozruchu bezpośrednim, będących reprezentacją urządzeń potrzeb

własnych bloku uruchamianej elektrowni, bądź urządzeń technologicznych obiektów przemysłowych,

- OD110 – odbiór statyczny, będący reprezentacją obszaru o zadanym poborze mocy czynnej, wydzielonego z systemu elektroenergetycznego na skutek awarii katastrofalnej.

Badania symulacyjne prowadzone dla poszczególnych scenariuszy odbudowy zdolności wytwórczych mają na celu wskazanie dynamiki zmian parametrów i ewentualnych przekroczeń w tworzonej układzie elastycznym podczas tworzenia toru rozruchowego oraz przywracania zasilania kolejnym odbiorom wraz z minimalizacją czasu trwania procesu odbudowy. Obserwowane parametry obejmują: zmianę mocy czynnej oraz mocy biernej źródeł rozruchowych, zmianę poziomu napięcia przyelektrownianej rozdzielni źródeł rozruchowych, poziom napięcia na końcu linii długiej, a także zmianę częstotliwości w tworzonej układzie. Krytycznymi wielkościami, po przekroczeniu których proces odbudowy definitywnie uznaje się za nieskuteczny są zmiany napięcia i/lub częstotliwości na poziomie:

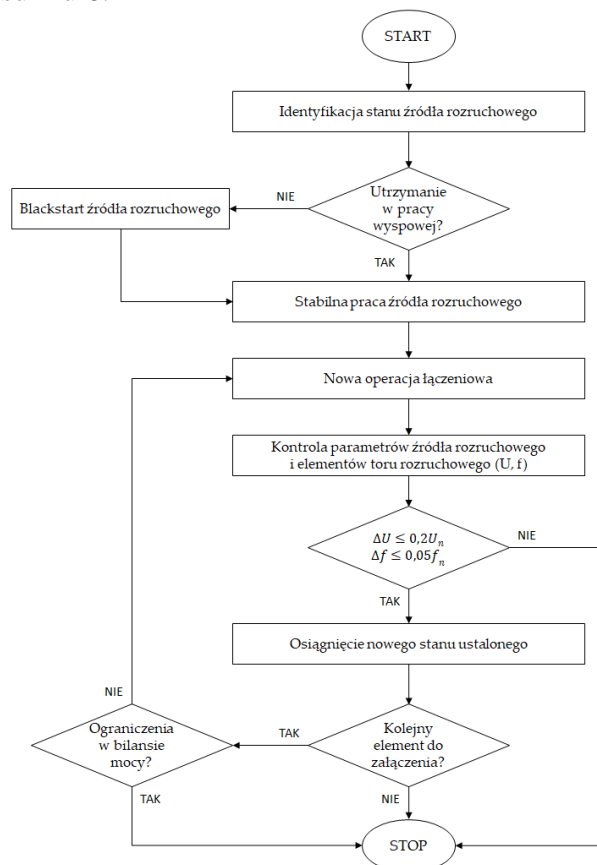
- $\Delta U \geq 0,2U_n$ ,
- $\Delta f \geq 0,05f_n$ .

Stąd, ograniczenie dotyczące krytycznych wielkości częstotliwości oraz napięcia w tworzonej układzie wydzielonym przedstawiają się następująco:

$$0,8U_n \leq U_i \leq 1,2 U_n \quad (1)$$

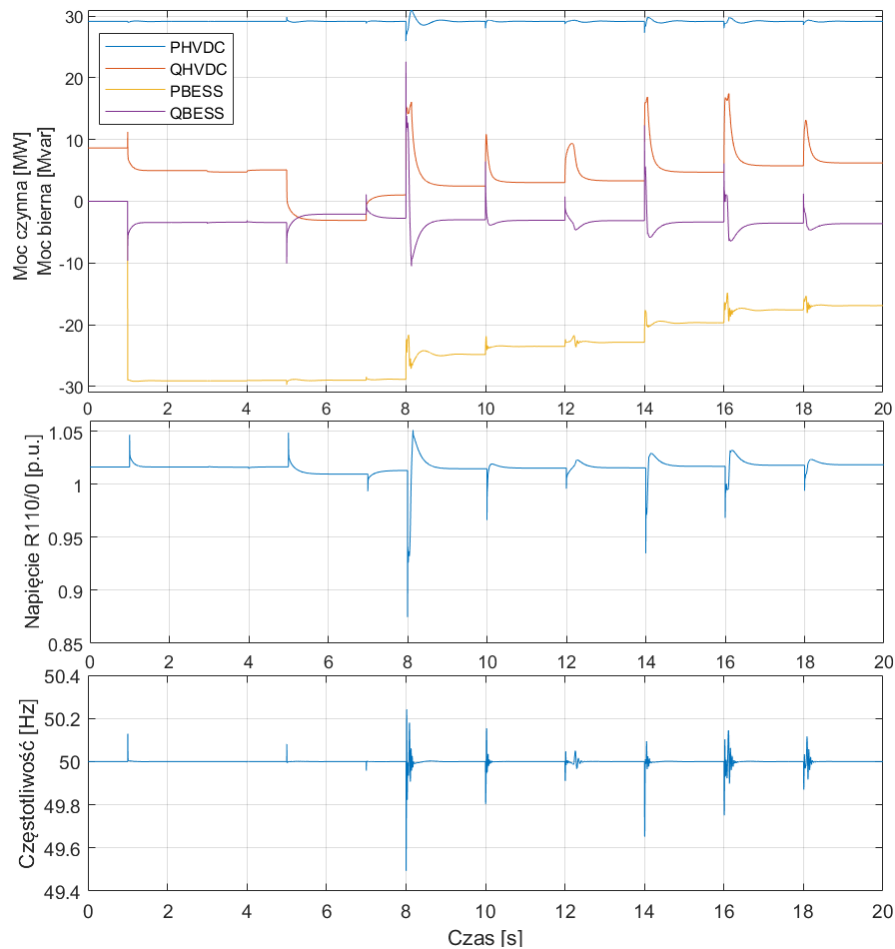
$$47,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 52,5 \text{ Hz} \quad (2)$$

W związku z powyższym, prowadzenie kolejnych czynności łączeniowych w modelowanych torach rozruchowych odbywało się zgodnie z zadanym algorytmem, przedstawionym na Rysunku 6.



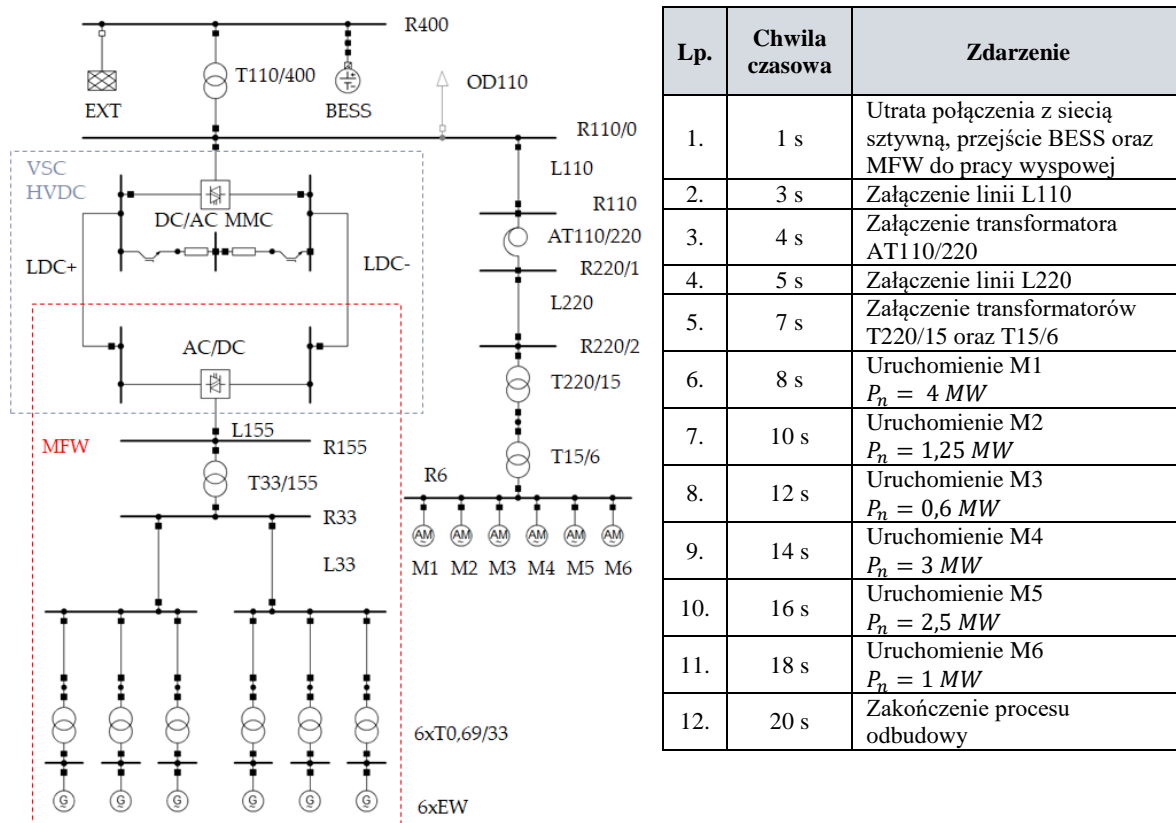
Rys. 6. Algorytm prowadzenia czynności łączeniowych w tworzonej torze rozruchowym.

Badania symulacyjne prowadzone dla poszczególnych scenariuszy obejmowały nie tylko przebiegi skutecznego procesu odbudowy, lecz wskazywały również na newralgiczne aspekty warunkujące nieudany proces odbudowy. Na Rysunku 7 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych udanego procesu odbudowy na przykładzie scenariusza S4, związanego z uruchamianiem sześciu odbiorów dynamicznych, stanowiących reprezentację urządzeń potrzeb własnych elektrowni uruchamianej. Badania w zakresie odbudowy zdolności wytwórczych w scenariuszu S4 prowadzono z wykorzystaniem bateryjnego magazynu energii (BESS) o mocy znamionowej równej mocy osiągalnej morskiej farmy wiatrowej (MFW)  $P_{BESS} = 30 MW$ , jak przedstawiono na Rysunku 8, zgodnie z zadanym harmonogramem czasowym. W badaniach przyjęto pracę MFW w warunkach znamionowych  $P_{MFW} = 30 MW$ , a także początkowy stan naładowania magazynu na poziomie  $SOC_0 = 0,8$  i długości linii 220 kV  $L_{220} = 100 km$ .



Rys. 7. Zmiana mocy czynnej, mocy biernej, częstotliwości oraz napięcia w scenariuszu S4.

Zgodnie z przedstawionym harmonogramem łążeń można zauważyć, że w układzie wydzielonym, bazującym na źródle rozruchowym HVDC+BESS, stabilizacja parametrów podczas procesu odbudowy przebiegała w stosunkowo krótkim czasie. Całkowity, minimalny czas odbudowy w scenariuszu S4 wyniósł  $t = 20 s$ . Załączenie odbioru M1 skutkowało wystąpieniem maksymalnego spadku napięcia na rozdzielni R110/0  $\Delta U = 0,125U_n$  warunkując jednocześnie maksymalny spadek częstotliwości  $\Delta f = 0,506 Hz$ . W przedstawionym scenariuszu można potwierdzić zdolność źródła rozruchowego HVDC+BESS do regulacji częstotliwości w układzie wydzielonym, przejawiającą się zdolnością do powrotu częstotliwości do wartości znamionowej  $f = 50 Hz$  po dynamicznych zmianach w bilansie mocy.



Rys. 8. Schemat toru rozruchowego modelu odbudowy zdolności wytwórczych dla scenariusza S4 oraz harmonogram czasowy czynności łączeniowych.

### 3.2. ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW SYMULACJI

Przedstawione scenariusze odbudowy poddano analizie porównawczej w zakresie zmian napięcia przyelektrownianej rozdzielni źródła rozruchowego oraz zmian częstotliwości w tworzonym torze rozruchowym. Porównanie wyników symulacji całościowego procesu odbudowy dla poszczególnych scenariuszy zestawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie wyników symulacji poszczególnych scenariuszy odbudowy – całościowy proces odbudowy

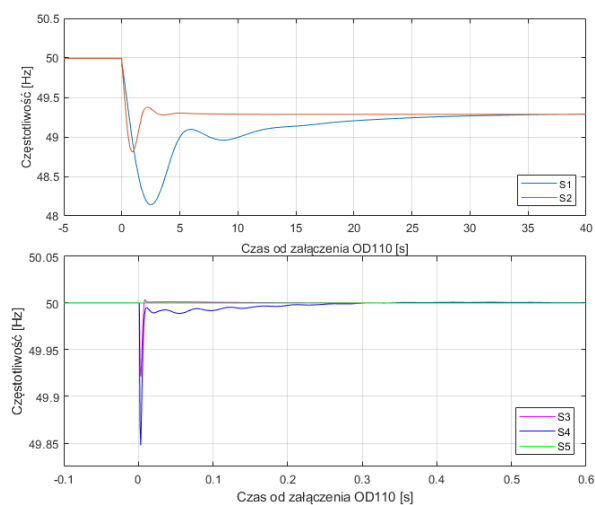
Scenariusz odbudowy	Względna wartość napięcia przyelektrownianej rozdzielni źródła rozruchowego po zakończeniu procesu odbudowy $U_{end} [p.u]$	Minimalna częstotliwość w układzie wydzielonym podczas procesu odbudowy $f_{min} [Hz]$	Częstotliwość w układzie wydzielonym po zakończeniu procesu odbudowy $f_{end} [Hz]$	Minimalny czas odbudowy $t_{end} [s]$
S1	1,046 $U_n$	49,334	49,602	430
S2	1,018 $U_n$	49,350	49,574	200
S3	0,986 $U_n$	49,646	50,000	13
S4	1,018 $U_n$	49,494	50,000	20
S5	0,998 $U_n$	49,936	50,000	10

Na podstawie przedstawionych wyników można zauważyć, że klasyczne scenariusze odbudowy S1 oraz S2 cechują się znacznie dłuższym całkowitym minimalnym czasem odbudowy w porównaniu z nowymi propozycjami scenariuszy odbudowy S3 oraz S4, bazującymi na układach hybrydowych. Najkrótszy czas odbudowy zdolności wytwórczych

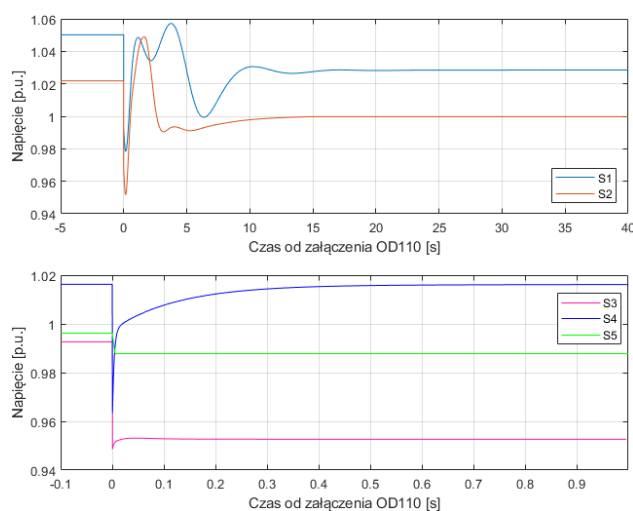
dotyczył odgórnej strategii podawania napięcia z systemu sąsiedniego w scenariuszu S5. Należy mieć na uwadze, że określony w scenariuszach minimalny czas odbudowy dotyczy czasu potrzebnego na stabilizację parametrów w tworzonym układzie wydzielonym i osiągnięcie nowego stanu ustalonego po kolejnych czynnościach łączeniowych, natomiast w warunkach rzeczywistych, czas ten byłby dłuższy. Niemniej jednak, określone minimalne czasy odbudowy są znacznie niższe od granicznego czasu oczekiwania na podanie napięcia ze źródła rozruchowego i odbudowy zdolności wytwórczych jednostek wytwórczych w elektrowniach ciepłych (ok. 2 godziny), który uzależniony jest od szybkości zmian termicznych w kotłach energetycznych, warunkujących parametry pary świeżej, w szczególności w zakresie tempa rozprężania kotła.

Z punktu widzenia zdolności odbudowy częstotliwości w torze wydzielonym z systemu elektroenergetycznego po awarii katastrofalnej według strategii oddolnej, scenariusze odbudowy S3 oraz S4 cechował korzystny efekt zdolności powrotu częstotliwości do wartości znamionowej  $f = 50 \text{ Hz}$  po zakończeniu każdej z czynności łączeniowych. Minimalne wartości częstotliwości obserwowane w torze rozruchowym w wariantach S1 oraz S2 wystąpiły po załączeniu odbioru M3 ze względu na fakt, że wartość częstotliwości w torze rozruchowym przed czynnością łączeniową odbiegała od wartości znamionowej, w wyniku zaburzenia bilansu pomiędzy generacją a obciążeniem podczas uruchamiania napędów M1 oraz M2. Efekt ten nie występował w scenariuszach odbudowy S3-S5 ze względu na zdolność odbudowy częstotliwości do wartości znamionowej. Stąd, w przypadku scenariuszy S3-S5 najniższa wartość częstotliwości w torze była obserwowana po załączeniu odbioru o najwyższej mocy znamionowej M1.

Analizy zdolności prowadzenia procesu odbudowy w oparciu o zróżnicowane źródła rozruchowe w poszczególnych scenariuszach pogłębiono o porównanie zmian parametrów tworzonego układu wyspowego podczas dołączenia na rozdzielni 110 kV odbioru statycznego o mocy  $P = 20 \text{ MW}$  i  $\cos\varphi = 0,9$ , będącego reprezentacją wyspy obciążeniowej. Na Rysunku 9 przedstawiono porównanie wyników symulacji w zakresie zmian częstotliwości w poszczególnych scenariuszach odbudowy, natomiast na Rysunku 10 – w zakresie zmian napięcia przyelektrownianej rozdzielni źródła rozruchowego. W Tabeli 3 przedstawiono zestawienie wyników dla nierzównowagi w procesie odbudowy załączania odbioru o najwyższej mocy znamionowej (M1) oraz załączenia odbioru statycznego OD110. Porównanie odchyłek częstotliwości oraz napięcia przy załączaniu odbioru dynamicznego M1 oraz statycznego OD110 wraz z czasem regulacji dla poszczególnych scenariuszy odbudowy zestawiono na Rysunku 11.



Rys. 9. Zmiany częstotliwości w układzie wyspowym podczas dołączania odbioru OD110.



Rys. 10. Zmiany napięcia w przyelektrownianej rozdzielni źródła rozruchowego podczas dołączania odbioru OD110.

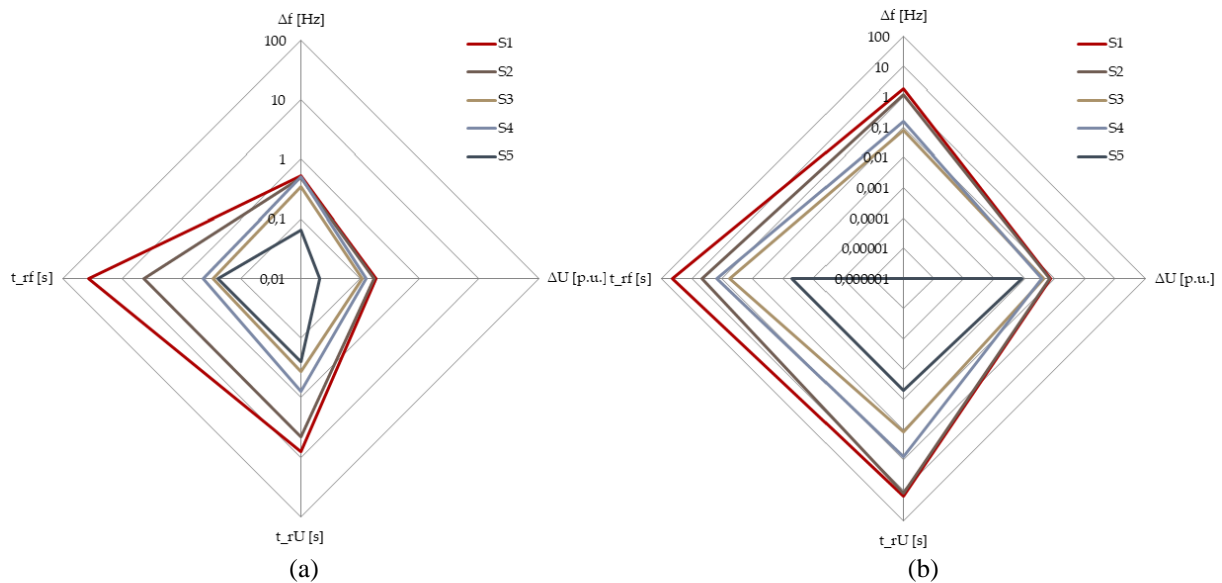
Chwilowe zmiany częstotliwości oraz napięcia podczas dołączenia odbioru statycznego wskazują, że najkorzystniejsze warunki odbudowy częstotliwości obserwowane są dla scenariusza S5 ze względu na pomijalny spadek częstotliwości po załączeniu odbioru OD110. Z kolei spośród scenariuszy oddolnej strategii odbudowy, najkorzystniejsze warunki odbudowy częstotliwości zauważalne są dla scenariusza S3 ze względu na minimalny spadek częstotliwości i najkrótszy czas regulacji. Niemniej jednak, scenariusz ten cechuje się najgorszymi warunkami napięciowymi po załączeniu odbioru OD110, skutkujących wartością ustaloną napięcia na poziomie  $U_{ust} = 0,953U_n$  w przyelektrownianej rozdzielni źródła rozruchowego. Pod tym względem korzystniejsze warunki wykazał scenariusz S4, w którym czas regulacji napięcia był stosunkowo krótki i przede wszystkim, warunkował powrót do wartości napięcia do stanu sprzed załączenia. Na podstawie przedstawionego porównania można zauważyć analogię w odpowiedziach dynamicznych częstotliwości oraz napięcia dla scenariuszy S1 oraz S2, zarówno w przypadku załączania odbioru dynamicznego, jak i statycznego, przy czym S2 cechuje się znacznie krótszymi czasami regulacji parametrów.

Tabela 3. Porównanie wyników symulacji poszczególnych scenariuszy odbudowy – uruchomienie odbioru M1 i załączanie odbioru OD110

Scenariusz odbudowy	Minimalna wartość napięcia po załączeniu odbioru $U_{min}$ [p.u.]	Wartość ustalona napięcia po załączeniu odbioru $U_{ust}$ [p.u.]	Czas regulacji napięcia $t_{rU}$ [s]	Minimalna wartość częstotliwości po załączeniu odbioru $f_{min}$ [Hz]	Wartość ustalona częstotliwości po załączeniu odbioru $f_{ust}$ [Hz]	Czas regulacji częstotliwości $t_{rf}$ [s]
Uruchomienie M1						
S1	$0,875U_n$	$1,053U_n$	8,200	49,458	49,855	36,100
S2	$0,860U_n$	$1,025U_n$	4,510	49,492	49,845	4,310
S3	$0,895U_n$	$0,999U_n$	0,371	49,646	50,000	0,301
S4	$0,875U_n$	$1,002U_n$	0,790	49,494	50,000	0,431
S5	$0,974U_n$	$1,000U_n$	0,249	49,936	50,000	0,242
Załączenie OD110						
S1	$0,979U_n$	$1,028U_n$	15,600	48,160	49,290	43,500
S2	$0,953U_n$	$0,999U_n$	12,740	48,810	49,300	4,640
S3	$0,949U_n$	$0,953U_n$	0,115	49,921	50,000	0,580
S4	$0,963U_n$	$1,003U_n$	0,782	49,847	50,000	1,473
S5	$0,989U_n$	$0,988U_n$	0,005	~50,000	50,000	5E-04

Przedstawione porównanie zmian częstotliwości i napięcia podczas uruchamiania odbioru statycznego i dynamicznego wskazują, że zgodnie z przewidywaniami, scenariusz odbudowy S5 charakteryzuje się zdecydowanie najmniejszymi odchyłkami i najkrótszym czasem stabilizacji parametrów w tworzonym układzie. Należy jednak mieć na uwadze, że scenariusz ten wymaga dyspozycyjności sąsiedniego systemu elektroenergetycznego po wystąpieniu awarii katastrofalnej. Dodatkowym aspektem jest konieczność operatywnej współpracy i skoordynowanych działań pomiędzy przynajmniej dwoma Operatorami Systemu Przesyłowego. Stąd, dysponowanie oddolnymi scenariuszami odbudowy z wykorzystaniem krajowej infrastruktury wytwórczej jest nieodzowne.





Rys. 11. Odchyłki częstotliwości oraz napięcia i czas regulacji dla poszczególnych scenariuszy odbudowy (a) przy uruchamianiu odbioru dynamicznego M1, (b) przy załączeniu odbioru statycznego OD110.

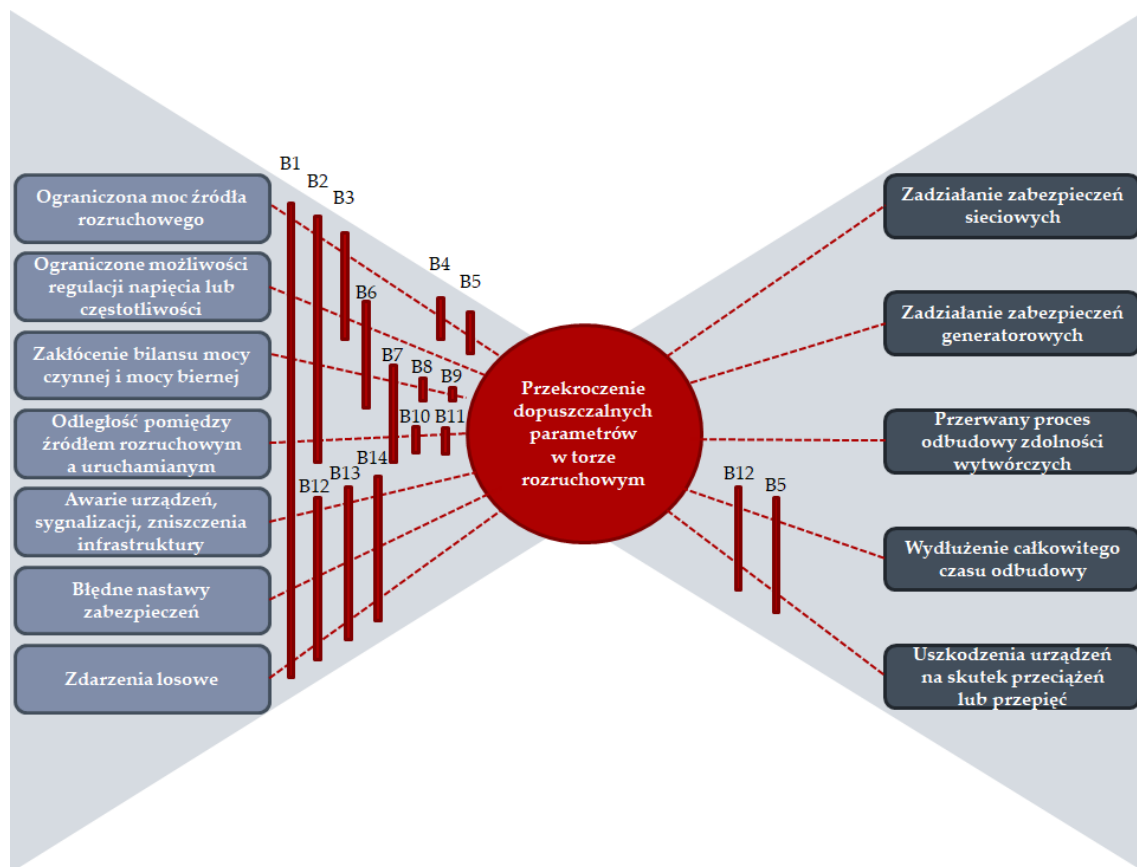
#### 4. ODBUDOWA ZDOLNOŚCI WYTWÓRCZYCH ELEKTROWNI W KONTEKŚCIE OCENY RYZYKA

##### 4.1. JAKOŚCIOWA OCENA RYZYKA DLA PROCESU ODBUDOWY ZDOLNOŚCI WYTWÓRCZYCH

Celem oceny ryzyka jest identyfikacja możliwych zagrożeń w procesie odbudowy zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego dla opracowanych scenariuszy podania napięcia i mocy rozruchowej oraz wskazanie konsekwencji ich wystąpienia. Punkt wyjścia do przeprowadzania oceny ryzyka dla procesu odbudowy zdolności wytwórczych stanowią wnioski płynące z przeprowadzonych badań symulacyjnych, a także zdarzenia i wnioski płynące z rzeczywistych prób systemowych, przedstawione w rozdziale 4.2.2 rozprawy. Jakościowa ocena ryzyka dla procesu odbudowy zdolności wytwórczych została poprowadzona w oparciu o metodę muchy (ang. *bow-tie analysis*), która stanowi graficzną reprezentację połączenia drzewa przyczyn oraz drzewa konsekwencji wystąpienia zdarzenia niepożądanego, jak przedstawiono na Rysunku 12. Jako zdarzenie niepożądane w procesie odbudowy zdolności wytwórczych przyjęto przekroczenie krytycznych parametrów napięcia i/lub częstotliwości w tworzonym torze rozruchowym, będące wynikiem rozwoju zagrożeń. W nawiązaniu do opracowanego diagramu muchy, w Tabeli 4 zestawiono szczegółową listę zagrożeń, które mogą stanowić potencjalne przyczyny nieskutecznego procesu odbudowy zdolności wytwórczych, wraz ze wskazaniem barier ograniczających ryzyko ich następstw.

Stosowanie wyszczególnionych barier technicznych oraz organizacyjnych (B1-B13) ma na celu zmniejszenie ryzyka niepowodzenia skuteczności procesu odbudowy zdolności wytwórczych i ograniczenie negatywnych konsekwencji przekroczenia dopuszczalnych parametrów w torze rozruchowym. Ze względu na postępujące zmiany w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, niezbędna jest systematyczna weryfikacja i aktualizacja programu odbudowy systemu dla modernizowanej infrastruktury sieciowej i wytwórczej.





Rys. 12. Diagram muchy dla procesu odbudowy zdolności wytwórczych. Opracowanie własne.

Tabela 4. Zestawienie zagrożeń dla skutecznego procesu odbudowy zdolności wytwórczych

Lp.	Zagrożenie	Bariery ograniczające rozwój zagrożenia	Konsekwencje
1.	<b>Ograniczona moc źródła rozruchowego</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B1 - Badania symulacyjne torów rozruchowych i organizacja prób systemowych,</li> <li>• B2 - Optymalizacja doboru źródła rozruchowego,</li> <li>• B3 - W miarę możliwości technicznych, praca równoległa kilku jednostek wytwórczych wchodzących w skład źródła rozruchowego,</li> <li>• B4 - Utrzymywanie wymaganego poziomu naładowania magazynu dedykowanego do pełnienia roli źródła rozruchowego (dla scenariuszy S3 oraz S4),</li> <li>• B5 - Dysponowanie alternatywnymi scenariuszami odbudowy,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Przy zbyt niskim poziomie naładowania, brak zdolności magazynu do pełnienia roli źródła rozruchowego,</li> <li>• Wydłużenie czasu odbudowy zdolności wytwórczych ze względu na wybór i przygotowanie alternatywnego scenariusza odbudowy,</li> </ul>
1.1.	Silna zależność stanu naładowania magazynu energii od bieżących warunków generacji OZE (scenariusz S3 i S4)		
1.2.	Niedyspozycyjność sąsiedniego systemu elektroenergetycznego (scenariusz S5)		
1.3.	Ograniczona moc wymiany (scenariusz S5)		
1.4.	Ograniczony czas pracy źródła rozruchowego przy określonej generacji mocy (scenariusz S3 i S4)		
2.	<b>Ograniczona zdolność regulacji częstotliwości i powrotu do wartości znamionowej</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B1 - Badania symulacyjne torów rozruchowych i organizacja prób systemowych,</li> <li>• B2 - Optymalizacja doboru źródła rozruchowego,</li> <li>• B3 - W miarę możliwości technicznych, praca równoległa kilku jednostek wytwórczych wchodzących w skład źródła rozruchowego,</li> <li>• B6 - Stosowanie urządzeń pomocniczych np. FACTS,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Występowanie dynamicznych zjawisk przejściowych, warunkujących długi czas stabilizacji parametrów po operacjach łączeniowych,</li> <li>• Nieskuteczna odbudowa zdolności wytwórczych,</li> <li>• Konieczność wznowienia procesu odbudowy,</li> </ul>
3.	<b>Ograniczone możliwości regulacji napięcia w torze rozruchowym</b>		
3.1.	Ograniczona liczba zaczepek transformatorów w torze rozruchowym		
3.2.	Ograniczone możliwości obniżenia napięcia źródła rozruchowego		

Lp.	Zagrożenie	Bariery ograniczające rozwój zagrożenia	Konsekwencje
4.	<b>Zakłócenie bilansu mocy czynnej oraz mocy biernej</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B1 - Badania symulacyjne torów rozruchowych i organizacja prób systemowych,</li> <li>• B2 - Optymalizacja doboru źródła rozruchowego,</li> <li>• B6 - Stosowanie urządzeń pomocniczych np. FACTS,</li> <li>• B7 - Łączenie krótszych odcinków torów rozruchowych,</li> <li>• B8 - W miarę możliwości, rezygnacja z rozruchu bezpośredniego napędów w elektrowni uruchamianej, celem ograniczenia pobieranego prądu rozruchowego,</li> <li>• B9 - Dociążenie źródła rozruchowego odbiorem mocy indukcyjnej przed załączeniem linii długiej,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Występowanie dynamicznych zjawisk przejściowych, warunkujących długi czas stabilizacji parametrów po operacjach łączeniowych,</li> <li>• Przekroczenie dopuszczalnych wartości napięcia i/lub częstotliwości,</li> <li>• Zadziałanie zabezpieczeń sieciowych i/lub generatorowych, a w konsekwencji, wyłączenie toru rozruchowego,</li> <li>• Pogorszenie parametrów termicznych bloku uruchamianego, warunkujące znaczne wydłużenie całkowitego czasu odbudowy systemu elektroenergetycznego,</li> </ul>
4.1.	Załączanie kolejnych elementów toru rozruchowego – linie, transformatory		
4.2.	Załączanie odbiorów dynamicznych ze względu na wysokie prądy rozruchowe, szczególnie przy rozruchu bezpośrednim napędów,		
4.3.	Dołączanie wysp obciążeniowych		
5.	<b>Odległość pomiędzy źródłem rozruchowym a uruchamianym</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B1 - Badania symulacyjne torów rozruchowych i organizacja prób systemowych,</li> <li>• B2 - Optymalizacja doboru źródła rozruchowego, również pod kątem lokalizacji względem źródła uruchamianego,</li> <li>• B7 - Łączenie krótszych odcinków torów rozruchowych,</li> <li>• B10 - Obniżenie napięcia źródła rozruchowego podczas załączania długich odcinków linii wysokiego napięcia,</li> <li>• B11 - Regulacja przełączników zaczepów transformatorów w torze rozruchowym,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wydłużenie czasu tworzenia toru rozruchowego,</li> <li>• Zadziałanie zabezpieczeń nadnapięciowych wskutek wysokiego napięcia na końcu linii długiej,</li> <li>• Niszczenie izolacji urządzeń wskutek przepięć i przeciążeń,</li> </ul>
5.1.	Ryzyko wystąpienia wysokiego napięcia na końcu linii długiej		
5.2.	Zwiększona liczba czynności łączeniowych w torze rozruchowym		
6.	<b>Błędna sygnalizacja w układach automatyki, pomiarów, wizualizacji, komunikacji</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B1 - Badania symulacyjne torów rozruchowych i organizacja prób systemowych,</li> <li>• B12 - Utrzymanie zdolności do powtórnego samostartu źródła rozruchowego,</li> <li>• B13 - Regularne kontrole urządzeń i unikanie zaniedbań eksploatacyjnych,</li> <li>• B14 - Regularne szkolenia kadry dyspozytorskiej.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brak możliwości identyfikacji stanu urządzeń oraz określenia warunków ich pracy,</li> <li>• Nieskuteczna odbudowa zdolności wytwórczych,</li> <li>• Konieczność wznowienia procesu odbudowy.</li> </ul>
7.	<b>Awarie urządzeń, zniszczenia infrastruktury</b>		
8.	<b>Błędne nastawy zabezpieczeń</b>		
9.	<b>Zdarzenia losowe</b>		

Jako jedną z podstawowych barier organizacyjnych zaproponowano badania symulacyjne procesów odbudowy, ponieważ mogą one stanowić istotny etap czynności przygotowawczych do opracowania planów obrony i odbudowy systemu elektroenergetycznego, ze wskazaniem newralgicznych aspektów i niezbędnych działań dla realizacji skutecznego procesu odbudowy, takich jak dobór źródeł rozruchowych dla źródeł uruchamianych, czy też dobór nastaw układów regulacji i zabezpieczeń w torze rozruchowym. Stąd, badania modelowe w zakresie poszukiwania struktury systemu elektroenergetycznego, stanu jego elementów czy analizowanych zjawisk stanowią niezwykle istotny obszar badawczy celem możliwie dokładnego odwzorowania systemu.

Zagrożenie związane z prowadzeniem procesu odbudowy w znacznej odległości pomiędzy źródłem rozruchowym a uruchamianym wiąże się nie tylko z pogorszeniem warunków napięciowych w torze rozruchowym, ale również ze zwiększeniem liczby łączy. W prowadzonych badaniach symulacyjnych przyjęto uproszczony model toru rozruchowego, stąd podane czasy tworzenia toru rozruchowego są wartościami minimalnymi, wynikającymi z czasu stabilizacji parametrów w układzie wydzielonym. W rzeczywistych warunkach procesu odbudowy, należy mieć na uwadze, że ze względu na bardziej rozbudowane układy sieciowe, całkowity czas obudowy uległby wydłużeniu. Stąd, zwiększenie skuteczności procesu odbudowy może zostać osiągnięte poprzez wykorzystanie źródeł rozruchowych położonych w bliższej odległości od źródła uruchamianego. W perspektywie rozwoju infrastruktury wytwórczej, należy zatem wskazać na celowość optymalnej lokalizacji źródeł wytwórczych do poprawy bezpieczeństwa energetycznego systemu i możliwości uwzględnienia źródeł w planach odbudowy systemu elektroenergetycznego. Stanowi to istotną przesłankę do prowadzenia badań w zakresie optymalnej lokalizacji źródeł wytwórczych w rozwijających się systemach elektroenergetycznych.

Wśród proponowanych barier technicznych, ograniczających ryzyko przekroczenia dopuszczalnych parametrów w torze rozruchowym ze względu na wystąpienie poważnego niezbilansowania mocy i ograniczone zdolności regulacji napięcia lub częstotliwości, wskazano stosowanie urządzeń pomocniczych, takich jak urządzenia FACTS (ang. *Flexible AC Transmission Systems* - elastyczne systemy przesyłowe prądu przemiennego). Jak wskazują wyniki badań literaturowych, w warunkach silnego niezbilansowania mikrosieci lub systemu elektroenergetycznego, urządzenia pomocnicze FACTS, takie jak kompensatory statyczne (STATCOM), magazyny energii czy energoelektroniczne regulatory przepływu mocy UPFC (ang. *Unified Power Flow Controller*) wykazują zdolność do poprawy warunków pracy układów wydzielonych. Z tego względu, ich implementacja może stanowić odpowiedź na potrzeby aktywnego bilansowania mocy i poprawy odpowiedzi dynamicznych w procesach obrony i odbudowy, zmniejszając ryzyko przekroczenia krytycznych parametrów w torze rozruchowym. W zakresie pracy elektrowni wiatrowych, do poprawy warunków generacji i poboru mocy biernej rozwiązaniem może być również zastosowanie dławików kompensacyjnych, szczególnie z możliwością regulacji zaczepowej pod obciążeniem. Badania literaturowe wskazują również na możliwość zwiększenia bezpieczeństwa pracy układów wydzielonych dzięki zastosowaniu techniki pomiarów synchronicznych i implementacji układów adaptacyjnego wydzielania obszarów wyspowych.

Jak wskazują raporty z realizacji rzeczywistych prób systemowych, awarie urządzeń, zdarzenia losowe, które nie są bezpośrednio związane z próbami systemowymi czy błędne nastawy zabezpieczeń są częstą przyczyną przerwania procesu odbudowy. Stąd, aby zmniejszyć ryzyko niekontrolowanego przerwania procesu odbudowy na wypadek rzeczywistej awarii systemowej bardzo istotna jest bieżąca kontrola urządzeń i dysponowanie bankiem zabezpieczeń dedykowanym dla pracy wyspowej jednostek wytwórczych, a także regularne szkolenia kadry dyspozytorskiej na wypadek wystąpienia awarii systemowej.

Przekroczenie krytycznych parametrów w torze rozruchowym stanowi zdarzenie, które może zapoczątkować rozwój awarii wtórnej, skutkującej kaskadowymi wyłączeniami elementów tworzonego układu wydzielonego. W konsekwencji, negatywnym efektem przerwania nieskutecznego procesu odbudowy jest wydłużenie czasu oczekiwania na rozruch uruchamianych jednostek wytwórczych, a tym samym stopniowe pogorszenie parametrów termicznych. Mając na uwadze, że wraz z wydłużeniem czasu postoju bloku wzrasta czas jego rozruchu, istotne jest dążenie do minimalizacji czasu odbudowy całego systemu elektroenergetycznego. Z punktu widzenia barier ograniczających konsekwencje przerwania procesu odbudowy zdolności wytwórczych, należy wyróżnić utrzymywanie zdolności do ponownego blackstartu źródła rozruchowego (B12), a także dysponowanie alternatywnymi

scenariuszami odbudowy zdolności wytwórczych (B5), które powinny zostać ujęte w opracowywanych planach odbudowy.

#### 4.2. ILOŚCIOWA OCENA RYZYKA DLA PROCESU ODBUDOWY ZDOLNOŚCI WYTWÓRCZYCH

Ilościowa ocena ryzyka dla procesu odbudowy zdolności wytwórczych została przeprowadzona z wykorzystaniem metody analitycznego procesu hierarchicznego AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*), która stanowi jedną z metod analizy wielokryterialnej, znajdującą zastosowanie w szerokim spektrum procesów decyzyjnych, takich jak zadania projektowe, logistyczne czy analizy dotyczące rozwoju systemów energetycznych, wraz z jej rozwinięciem w postaci rozmytej metody AHP, czyli FAHP (ang. *Fuzzy AHP*). Metoda AHP została zaproponowana przez Saaty'ego i do jej zalet można zaliczyć uniwersalność stosowania, a przede wszystkim, możliwość weryfikacji zgodności macierzy porównań.

Opracowanie macierzy porównań parami polega na konstruowaniu kwadratowej macierzy ocen  $A = [a_{ij}]$ , celem wyznaczenia wag rozpatrywanych  $n$  kryteriów, gdzie  $a_{ij}$  stanowi ocenę istotności kryterium  $a_i$  względem kryterium  $a_j$  wg skali Saaty'ego, przedstawionej w Tabeli 5.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Tabela 5. Skala ocen liczb trójkątnych w metodzie AHP i FAHP

Skala ocen Saaty'ego w metodzie AHP	Objaśnienie	Skala ocen w metodzie FAHP	
		Skala ocen liczb trójkątnych	Skala ocen dla relacji odwrotnych
1	równoważna istotność	(1,1,1)	(1,1,1)
3	nieznaczna przewaga $a_i$ względem $a_j$	(2,3,4)	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$
5	silna przewaga $a_i$ względem $a_j$	(4,5,6)	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4})$
7	bardzo silna przewaga $a_i$ względem $a_j$	(6,7,8)	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6})$
9	ekstremalna przewaga $a_i$ względem $a_j$	(9,9,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9})$
2	wartości pośrednie	(1,2,3)	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$
4		(3,4,5)	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3})$
6		(5,6,7)	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5})$
8		(7,8,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7})$

W kolejnym kroku dokonywana jest normalizacja macierzy porównań  $A = [a_{ij}]$  do postaci  $B = [b_{ij}]$ , zgodnie z zależnością (4):

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}. \quad (4)$$

Określenie wag poszczególnych kryteriów  $w_i$  polega na wyznaczeniu wektora znormalizowanej macierzy porównań  $\mathbf{w}$  (tzw. wektor preferencji), jako średniej arytmetycznej wartości kolejnych wierszy macierzy  $\mathbf{B} = [b_{ij}]$ :

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij}. \quad (5)$$

Weryfikacja spójności macierzy porównań polega na wyznaczeniu wartości indeksu spójności CI (ang. *Consistency Index*):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i}. \quad (7)$$

oraz wskaźnika spójności CR (ang. *Consistency Ratio*):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

gdzie:  $\lambda_{max}$  – maksymalna wartość własna macierzy porównań  $\mathbf{A}$ ,  $RI$  – indeks spójności losowych (ang. *Random Index*), zależny od stopnia macierzy porównań  $\mathbf{A}$ , jak przedstawiono w Tabeli 6.

Ostatecznie, warunek spójności macierzy porównań jest spełniony wtedy, kiedy zachodzi relacja:

$$CR < 0,1. \quad (9)$$

Wyznaczone i zweryfikowane w przedstawiony sposób wagi kryteriów decyzyjnych stanowią punkt wyjścia do przeprowadzenia analizy wielokryterialnej, której istotą jest porównanie parami dostępnych wariantów rozwiązań, celem wyznaczenia wag wariantów według analogicznego algorytmu obliczeniowego (3)-(9).

Tabela 6. Wartości indeksu spójności losowych RI w zależności od stopnia macierzy porównań

Stopień macierzy n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Rozwinięcie metody AHP stanowi rozmyta metoda FAHP, bazująca na teorii zbiorów rozmytych, w której na potrzeby analizy wielokryterialnej przyporządkowuje się trójkątne liczby dodatnie (10) lingwistycznym określeniom ocen, jak przedstawiono w Tabeli 5.

$$\tilde{x}_i = (l_i, m_i, u_i) \quad (10)$$

Podobnie jak w przypadku klasycznej metody AHP, pierwszym krokiem analizy jest opracowanie macierzy porównań parami ocen  $\tilde{\mathbf{A}} = [\tilde{a}_{ij}]$ , celem wyznaczenia wag rozpatrywanych  $n$  kryteriów, gdzie trójkątna liczba rozmyta  $\tilde{a}_{ij}$  stanowi ocenę istotności kryterium  $a_i$  względem kryterium  $a_j$ .

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1,1,1) & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Zgodnie z algorytmem prowadzenia metody FAHP, w kolejnym kroku, dla każdego z rozpatrywanych kryteriów obliczana jest średnia geometryczna rozmytych wartości porównawczych ocen, czego wynikiem jest trójkątna liczba rozmyta  $\tilde{r}_i$  (12):

$$\tilde{r}_i = \left( \prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Następnie, wyznaczany jest wektor rozmytych wag każdego z kryterium  $\tilde{w}_i$  (13):

$$\begin{aligned} \tilde{w}_i &= \tilde{r}_i \times (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n)^{-1} \\ \tilde{w}_i &= (lw_i, mw_i, uw_i) \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_i &= (lw_i, mw_i, uw_i) \\ (\tilde{w}_i)^{-1} &= \left( \frac{1}{uw_i}, \frac{1}{mw_i}, \frac{1}{lw_i} \right) \end{aligned}$$

Na potrzeby dalszej analizy konieczna jest defuzyfikacja rozmytego wektora wag  $\tilde{w}_i$  (13) do postaci liczby nierozmytej. W tym celu zastosować można metodę środka obszaru CoA (ang. *Centre of Area*), zgodnie z zależnością (14):

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (14)$$

Ostatnim krokiem w algorytmie FAHP jest normalizacja nierozmytych wag poszczególnych kryteriów decyzyjnych, zgodnie z zależnością (15):

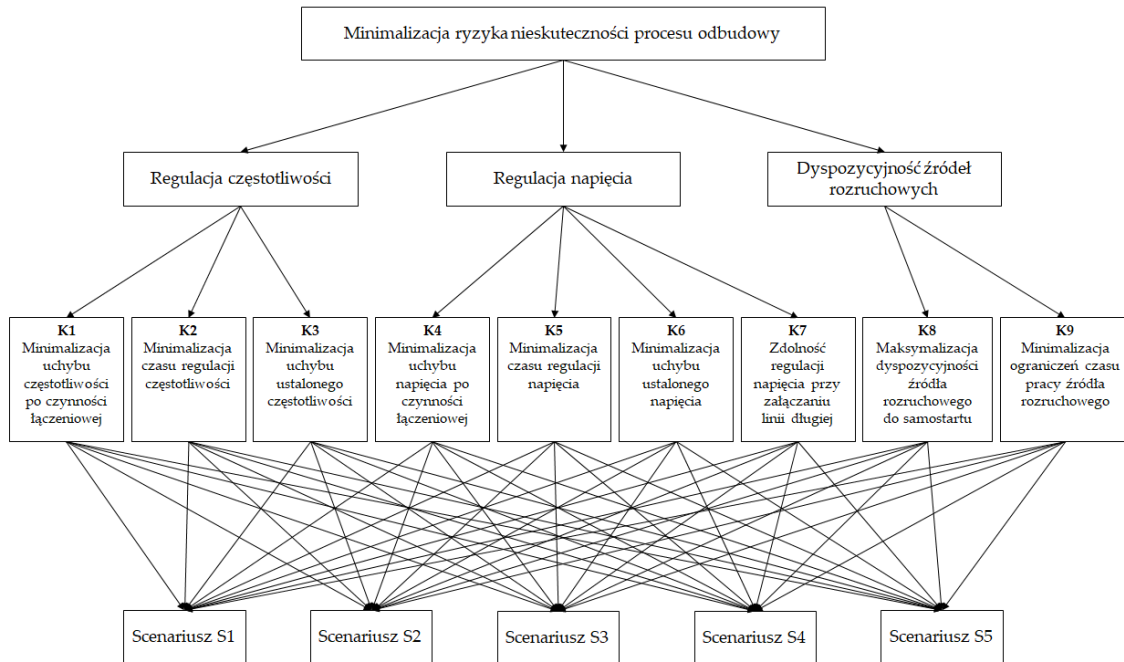
$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (15)$$

Wyznaczone w ten sposób wagi kryteriów decyzyjnych metodą FAHP stanowią punkt wyjścia do przeprowadzenia analizy wielokryterialnej, której istotą jest porównanie parami dostępnych wariantów rozwiązań wraz z wyznaczeniem ich wag, zgodnie z analogicznym algorytmem jak wyznaczanie wag kryteriów decyzyjnych (11)-(15).

W literaturze można znaleźć prace, w których autorzy dokonywali analizy wielokryterialnej z wykorzystaniem metody AHP, jak i FAHP również w zakresie oceny ryzyka dla procesu odbudowy zdolności wytwórczych. Prace te obejmowały badania w zakresie identyfikacji stanu systemu elektroenergetycznego na wypadek rozwoju ryzyka awarii w wyniku narastania zagrożeń, a także optymalizacji sekwencji uruchamiania źródeł startowych dla określonego fragmentu systemu elektroenergetycznego i redukcji obciążenia na wypadek awarii. Pomimo bardzo wartościowych analiz we wspomnianym powyżej zakresie, można zwrócić uwagę na brak w literaturze przedmiotu analiz porównawczych, związanych z ryzykiem prowadzenia procesu odbudowy w oparciu o zróżnicowane typy źródeł rozruchowych. Stąd, w rozprawie zaproponowano wielokryterialną analizę metodami AHP i FAHP, celem wyznaczenia scenariusza odbudowy, charakteryzującego się minimalizacją ryzyka nieskuteczności procesu odbudowy zdolności wytwórczych.

W pierwszym etapie zaproponowano analizę metodą AHP, której niewątpliwą zaletą jest możliwość weryfikacji zgodności macierzy porównań parami. W kolejnym kroku dokonano fuzyfikacji zweryfikowanych macierzy porównań parami, prowadząc analizę metodą FAHP. Finalnie, dokonano porównania wyników analizy AHP z wynikami analizy FAHP dla rozpatrywanych scenariuszy odbudowy.

Struktura hierarchiczna problemu zaadaptowana dla rozpatrywanej oceny ryzyka została przedstawiona na Rysunku 13, gdzie cel nadrzędny stanowi minimalizacja ryzyka nieskuteczności procesu odbudowy zdolności wytwórczych.



Rys. 13. Struktura hierarchiczna problemu i kryteria minimalizacji ryzyka nieskuteczności procesu odbudowy. Opracowanie własne.

W kolejnym etapie algorytmu metody AHP dokonano eksperckiej oceny rozpatrywanych kryteriów względem zakładanego celu nadrzędnego na zasadzie porównania parami. Zgodnie z zaproponowaną strukturą hierarchiczną problemu, wytypowano dziewięć kryteriów decyzyjnych (K1-K9), dla których macierz porównań  $A$  przyjmuje postać (16).

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} K1 & K2 & K3 & K4 & K5 & K6 & K7 & K8 & K9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} K1 \\ K2 \\ K3 \\ K4 \\ K5 \\ K6 \\ K7 \\ K8 \\ K9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 7 & 2 & 1 & 7 & 5 & 3 & \frac{1}{6} & 1 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & 1 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{2} & 4 & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ 1 & 5 & 3 & 1 & 7 & 4 & 3 & \frac{1}{6} & 1 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{4} & 3 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} \\ \frac{1}{3} & 5 & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 5 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ 6 & 7 & 5 & 6 & 7 & 7 & 5 & 1 & 5 \\ 1 & 5 & 3 & 1 & 5 & 7 & 5 & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (16)$$

Przypisanie ocen dla poszczególnych kryteriów decyzyjnych podyktowane było wnioskami płynącymi z przeprowadzonych badań symulacyjnych a także wniosków płynących z rzeczywistych prób systemowych, zaprezentowanych w rozdziale 4.2.2 rozprawy. Wśród rozpatrywanych kryteriów najwyższą istotność przypisano kryteriom,



których niespełnienie warunkowałyby największe ryzyko niepowodzenia procesu odbudowy zdolności wytwórczych, do których zaliczono dyspozycyjność źródła rozruchowego (K8), również ze względu na potencjalne ograniczenie czasu pracy źródła rozruchowego (K9), a także minimalizację uchybu regulacji częstotliwości (K1) oraz napięcia (K4). Niższe oceny istotności kryteriów przyjęto dla czasów regulacji częstotliwości (K2) oraz napięcia (K5), ponieważ pomimo faktu, że stanowią one istotne kryteria decyzyjne, nie stanowią one tak istotnego zagrożenia jak przekroczenie krytycznych parametrów w torze rozruchowym.

Korzystając z zależności (4), otrzymano znormalizowaną macierz porównań  $B$ , na podstawie której określono wektor preferencji  $w$ , stanowiący reprezentację wag poszczególnych kryteriów. W rozpatrywanym przypadku, weryfikacja spójności macierzy porównań analizowana jest dla stopnia macierzy  $n = 9$ , dla którego indeks spójności losowych przyjmuje wartość  $RI = 1,45$ . Na podstawie zależności (6)-(8) otrzymano następujące wyniki:

$$\lambda_{max} = 10,1544$$

$$CI = 0,1443$$

$$CR = 0,0995$$

Na podstawie warunku (9) można stwierdzić, że dobrane oceny kryteriów macierzy porównań (16) warunkują wymaganą spójność macierzy, ponieważ  $CR < 0,1$ .

Wyznaczone w powyższy sposób wagi kryteriów stanowią punkt wyjścia do oceny ryzyka scenariuszy odbudowy dla rozpatrywanych wariantów, tj. uruchamiania odbioru dynamicznego M1 oraz załączania odbioru statycznego OD110 (podrozdział 6.8 rozprawy). W tym celu, przeprowadzono analogiczny algorytm postępowania, jak przedstawiono w zależnościach (3)-(8), począwszy od skonstruowania macierzy porównań parami scenariuszy odbudowy S1-S5 dla każdego z rozpatrywanych kryteriów. Wynikowo, dla każdego z dziewięciu kryteriów uzyskano wagi istotności poszczególnych scenariuszy odbudowy w postaci wektorów preferencji, dla których przeprowadzono analizę spójności, zgodnie z warunkiem (9). W rozpatrywanym przypadku, weryfikacja spójności macierzy porównań pięciu scenariuszy analizowana jest dla stopnia macierzy  $n = 5$ , dla którego indeks spójności losowych przyjmuje wartość  $RI = 1,12$ . Na podstawie zebranych wyników można stwierdzić, że dobrane oceny kryteriów macierzy porównań scenariuszy odbudowy warunkują wymaganą spójność macierzy, ponieważ  $CR < 0,1$ .

Przypisanie ocen poszczególnym scenariuszom odbudowy w zakresie kryteriów K1-K7 stanowiło wynik analizy porównawczej scenariuszy S1-S5, przedstawionej w podrozdziale 6.8 rozprawy (podrozdział 3.2 autoreferatu). Na podstawie zestawionych wyników dotyczących zmian parametrów w zakresie regulacji częstotliwości oraz napięcia podczas uruchamiania odbioru dynamicznego M1 i załączania odbioru statycznego OD110 (Tabela 3.3), opracowanie macierzy porównań parami scenariuszy wynikało z przypisania proporcjonalnych zależności pomiędzy scenariuszami odbudowy w poszczególnych kryteriach decyzyjnych. W zakresie kryterium K3 przeanalizowano zdolność odbudowy częstotliwości w układzie wydzielonym dla poszczególnych scenariuszy. Pod tym względem najkorzystniejszymi warunkami wykazały się scenariusze S3-S5 ze względu na powrót częstotliwości do wartości znamionowej, stąd przypisano im najwyższą przewagę w stosunku do scenariuszy S1-S2.

W przypadku kryterium K7 przeanalizowano zmianę warunków napięciowych w układzie wydzielonym przy zmiennej odległości pomiędzy źródłem rozruchowym a źródłem uruchamianym, a także dostępne środki zaradcze na wypadek wystąpienia wysokiej wartości napięcia na końcu linii długiej. W zakresie kryteriów K7-K9 przyjęto analogiczne macierze porównań scenariuszy dla wariantu uruchamiania odbioru dynamicznego M1



i załączania odbioru statycznego OD110, w przypadku których założono analogiczną dyspozycyjność źródeł rozruchowych w postaci elektrowni wodnej (S1) oraz elektrowni gazowej (S2).

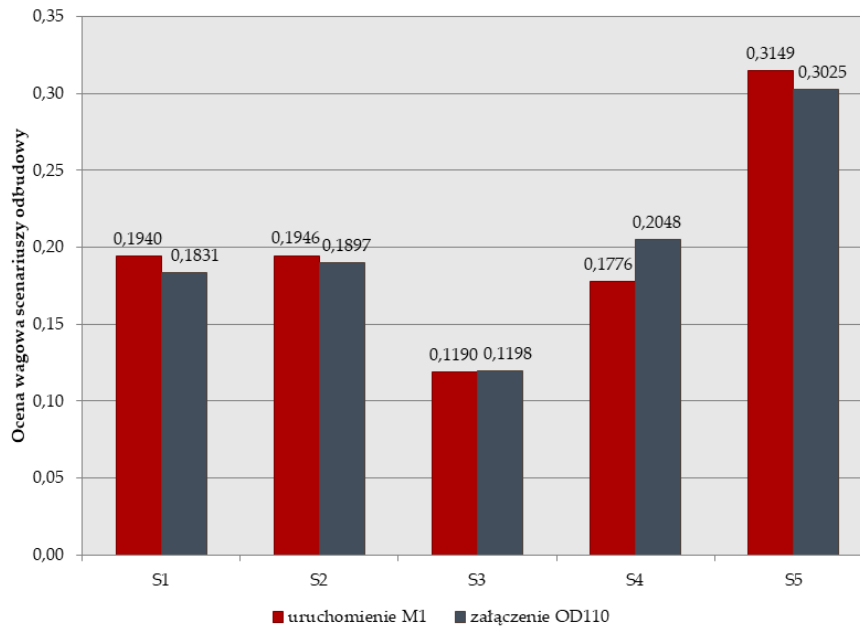
Oceny scenariuszy w zakresie kryterium K8, tj. dyspozycyjności źródła rozruchowego do samostartu, wynikają z ograniczeń obserwowanych dla scenariuszy S3-S5. W przypadku scenariuszy S3 oraz S4 ograniczenie dyspozycyjności źródła dotyczy przede wszystkim zaangażowania magazynu energii do pełnienia roli źródła rozruchowego. W przypadku niskiego poziomu naładowania magazynu, możliwości rozpatrywania tego typu źródeł do samostartu ograniczone są do minimum, szczególnie jeżeli nakłada się na to bieżące ograniczenie generacji ze źródeł wiatrowych. Wyższa ocena dyspozycyjności została dobrana dla scenariusza S4 z powodu dłuższego czasu wykorzystania mocy zainstalowanej w ciągu roku dla morskiej farmy wiatrowej, w porównaniu z lądową farmą wiatrową. Z punktu widzenia dyspozycyjności sąsiedniego systemu elektroenergetycznego do pełnienia roli źródła rozruchowego, również można wyróżnić szereg ograniczeń i brak pewności w zakresie prowadzenia procesu odbudowy według strategii odgórnej. Jak wskazują historyczne dane dotyczące awarii systemowych, skutki awarii katastrofalnych mogą obejmować również sąsiednie systemy elektroenergetyczne, co wiąże się z brakiem możliwości zastosowania strategii odbudowy według scenariusza S5. Dodatkowo, strategia ta wymaga skoordynowanych działań operatorskich przynajmniej dwóch OSP.

Oceny scenariuszy odbudowy ze względu na kryterium K9, tj. maksymalny czas pracy źródła rozruchowego, podyktowane są analogicznymi warunkami dla scenariuszy S3-S4 jak wskazano w kryterium K8. W przypadku ograniczenia generacji mocy źródeł OZE lub w sytuacji kiedy moc zapotrzebowana w układzie wyspowym przekracza możliwości generacji, maksymalny czas pracy źródła rozruchowego limitowany jest tempem rozładowania magazynu energii, co stanowi spore ograniczenie stosowania tego typu źródeł rozruchowych. Stąd, dla scenariusza S3 przypisano najniższą ocenę w ramach kryterium K9. Z kolei w ocenie scenariusza S5, pod warunkiem dyspozycyjności sąsiedniego systemu elektroenergetycznego, przypisano najwyższy poziom przewagi względem innych kryteriów, ze względu na brak ograniczeń maksymalnego czasu pracy.

Finalna ocena w zakresie minimalizacji ryzyka niepowodzenia procesu odbudowy zdolności wytwórczych dla poszczególnych scenariuszy odbudowy polegała na przypisaniu wektorowi preferencji scenariuszy  $w_K$  wag rozpatrywanych kryteriów decyzyjnych wektora preferencji kryteriów  $w$ , zgodnie z zależnością (17):

$$w_{S_{1-5}} = \sum_{i=1}^n w_{K_i} * w_i \quad (17)$$

W ten sposób, dla każdego scenariusza odbudowy określona została ocena wagowa  $w_{S_{1-5}}$  w zakresie uruchamiania odbioru M1 oraz załączania odbioru OD110, jak przedstawiono na Rysunku 14.



Rys. 14. Ocena wagowa scenariuszy odbudowy w zakresie uruchamiania odbioru M1 oraz załączania odbioru OD110 w metodzie AHP.

Opracowane macierze porównań parami w metodzie AHP, dla których przeprowadzono weryfikację spójności, stanowią punkt wyjścia do prowadzenia analizy metodą FAHP. Oceny porównań parami kryteriów decyzyjnych (zależność (10)) oraz oceny scenariuszy odbudowy zaproponowane w metodzie AHP poddano procesowi fuzyfikacji, zgodnie ze skalą liczb trójkątnych, przedstawioną w Tabeli 5.

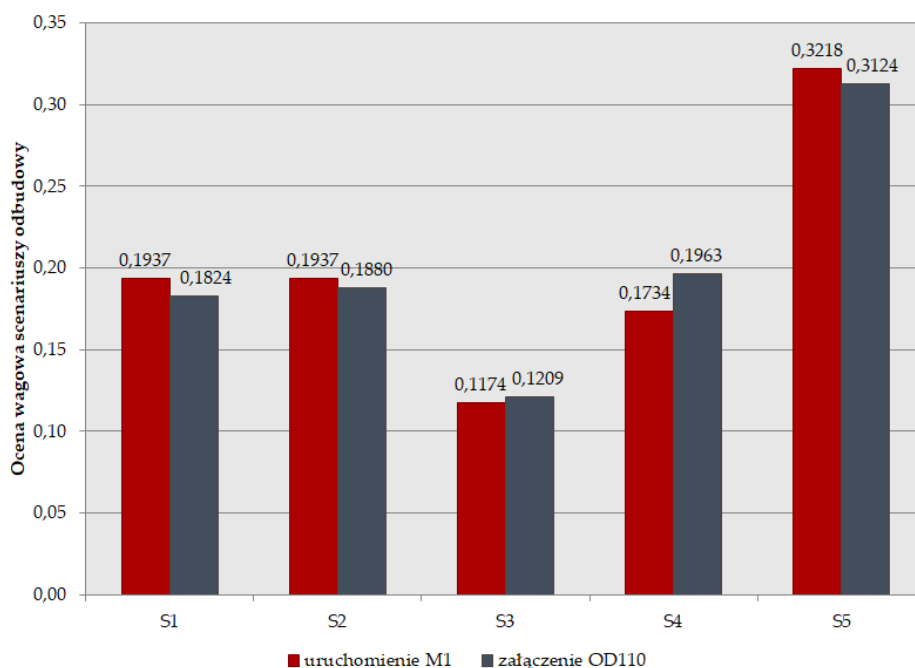
W zakresie wyznaczania wag kryteriów decyzyjnych, na podstawie zależności (11), macierz porównań parami ocen  $\tilde{A}$  przyjmuje postać (20). Kontynuując algorytm obliczeniowy (12)-(15), w kolejnym kroku wyznaczono średnią geometryczną ocen poszczególnych kryteriów, w wyniku czego otrzymano wektor trójkątnych liczb rozmytych  $\tilde{r}_i$ . Następnie, na podstawie zależności (13) wyznaczono wektor rozmytych wag każdego z kryterium  $\tilde{w}_i$ . Defuzyfikacji rozmytego wektora wag  $\tilde{w}_i$  do postaci liczby nierozmytej dokonano przy pomocy metody CoA, zgodnie z zależnością (14). Ostatecznie, przeprowadzono normalizację nierozmytych wag poszczególnych kryteriów decyzyjnych zgodnie z zależnością (15).

W zakresie analizy wariantów metodą FAHP, przeprowadzono analogiczny algorytm postępowania, jak przedstawiono w zależnościach (11)-(15), począwszy od skonstruowania macierzy porównań parami scenariuszy odbudowy S1-S5 dla każdego z rozpatrywanych kryteriów. W tym celu, bazując na wynikowych macierzach ocen scenariuszy w metodzie AHP, każdej z ocen przypisano jej rozmytą wartość, zgodnie ze skalą w Tabeli 5. Wynikowo, dla każdego z dziewięciu kryteriów uzyskano wagi istotności poszczególnych scenariuszy odbudowy w postaci nierozmytych, znormalizowanych wektorów preferencji  $N_K$ .

Końcowa ocena w zakresie minimalizacji ryzyka niepowodzenia procesu odbudowy zdolności wytwórczych dla poszczególnych scenariuszy odbudowy w metodzie FAHP polegała na przypisaniu wektorowi preferencji scenariuszy  $N_K$  wyznaczonych uprzednio wag rozpatrywanych kryteriów decyzyjnych wektora preferencji kryteriów  $N_i$ :

$$N_{S_{1-5}} = \sum_{i=1}^n N_{K_i} * N_i \quad (18)$$

W ten sposób, dla każdego scenariusza odbudowy określona została ocena wagowa  $N_{S_{1-5}}$  (18) w zakresie uruchamiania odbioru M1 oraz załączania odbioru OD110, jak przedstawiono na Rysunku 15.

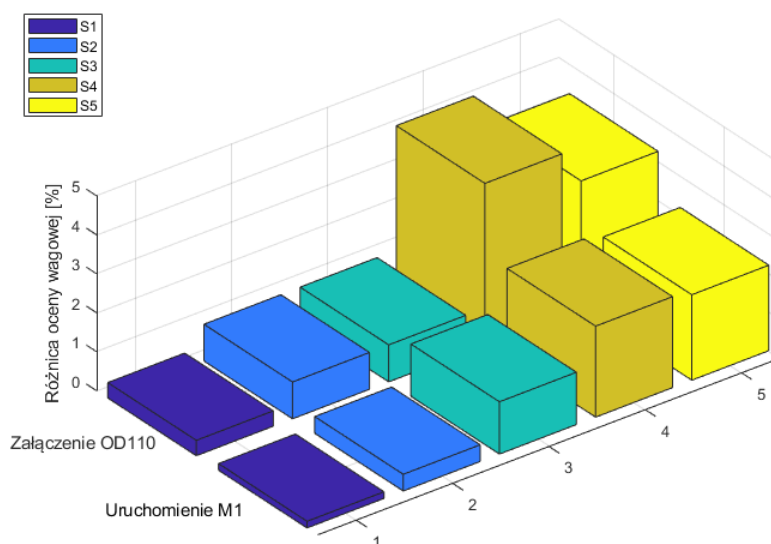


Rys. 15. Ocena wagowa scenariuszy odbudowy w zakresie uruchamiania odbioru M1 oraz załączania odbioru OD110 w metodzie FAHP.

Porównując uzyskane wyniki analizy wielokryterialnej metodą AHP oraz FAHP można stwierdzić silną analogię uzyskanych wyników oceny ryzyka dla rozpatrywanych scenariuszy odbudowy. Procentową różnicę uzyskanych wyników ocen wagowych dla poszczególnych scenariuszy odbudowy dla metody FAHP względem metody AHP przedstawiono na Rysunku 16. Pomimo nieznacznej rozbieżności uzyskanych ocen wagowych, która wyniosła maksymalnie 4,15%, obserwuje się porównywalne preferencje scenariuszy odbudowy w ramach rozpatrywanych wariantów pracy.

Na podstawie zestawionego porównania oceny wagowej można zauważyć, że preferowanym scenariuszem odbudowy w obydwu z rozpatrywanych wariantów jest scenariusz S5, zakładający prowadzenie procesu odbudowy z wykorzystaniem sąsiedniego systemu elektroenergetycznego. Niemniej jednak, ze względu na możliwe ograniczenie dyspozycyjności scenariusza S5 istnieje konieczność dysponowania scenariuszami odbudowy opartymi na krajowych źródłach rozruchowych. W zakresie oddolnej strategii odbudowy, wyniki analizy wielokryterialnej wskazały na korzyść uruchamiania odbiorów dynamicznych z wykorzystaniem dotychczasowych strategii, tj. prowadzenia procesów odbudowy w oparciu o elektrownie gazowe i elektrownie wodne, które wykazały bardzo zbliżone oceny wagowe prowadzonej analizy ryzyka. W zakresie przyłączenia wysp obciążeniowych, reprezentowanych wariantem odbudowy załączenia odbioru OD110, wśród oddolnych scenariuszy odbudowy można zauważyć przewagę scenariusza odbudowy S4 względem pozostałych scenariuszy. Należy jednak mieć na uwadze, że w rzeczywistych warunkach odbudowy przyłączenie wyspy obciążeniowej również będzie wiązało się z występowaniem zjawisk dynamicznych, szczególnie z uwzględnieniem jednoczesności przyłączenia grupy odbiorców. Najniższą ocenę wagową dla rozpatrywanych wariantów odbudowy osiągnął scenariusz S3, na którą składało się stosunkowo wysokie ryzyko niedyspozycyjności źródła rozruchowego, a także ograniczony czas pracy, pomimo bardzo korzystnych warunków regulacji częstotliwości oraz napięcia w torze rozruchowym przy najkrótszym czasie stabilizacji parametrów. Stanowi to przesłankę do podjęcia dalszych badań nad możliwością

wykorzystania bateryjnych magazynów energii współpracujących ze źródłami OZE do pełnienia roli źródła rozruchowego na potrzeby odbudowy zdolności wytwórczych, np. poprzez optymalizację wymiarowania mocy i pojemności magazynu, współpracę z urządzeniami pomocniczymi czy modyfikację układów regulacji.



Rys. 16. Porównanie ocen wagowych uzyskanych w metodzie AHP i FAHP.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest odbudowa zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego. Motywacją do podjęcia tematu są przewidywane zmiany w strukturze wytwórczej Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, które stanowią wyzwanie w zakresie podejmowania nowych kroków w kierunku zarządzania źródłami zarówno w normalnym stanie pracy, jak również w stanach awaryjnych. Aktualnie, w ramach krajowej infrastruktury wytwórczej, źródłami dedykowanymi do pełnienia roli źródła rozruchowego na wypadek rozległej awarii systemowej w ramach strategii oddolnej są hydrozespoły elektrowni wodnych, a także turboszespoły gazowe. Alternatywnie, rozpatrywanym scenariuszem odbudowy jest podanie napięcia z sąsiedniego systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem połączeń transgranicznych, pod warunkiem jego dyspozycyjności. Postępująca transformacja struktury wytwórczej wiąże się z malejącym udziałem źródeł potencjalnie uczestniczących w procesie odbudowy systemu elektroenergetycznego. Dlatego, ze względu na postępujący rozwój odnawialnych źródeł energii w systemie elektroenergetycznym, w pracy przeanalizowano nowe możliwości zaangażowania magazynów energii współpracujących z morską oraz lądową farmą wiatrową do pełnienia roli źródła rozruchowego.

W ramach rozprawy doktorskiej przeprowadzona została autorska analiza statystyczna najbardziej dotkliwych awarii w latach 1965-2022, które wystąpiły w systemach elektroenergetycznych na całym świecie. Przedstawiona analiza wskazuje na fakt, że awarie w systemach elektroenergetycznych są nieuniknione i, ze względu na mnogość ich przyczyn, dotyczą systemy o różnym poziomie rozwoju infrastruktury sieciowej i wytwórczej. Operatorzy systemów elektroenergetycznych stają zatem przed wyzwaniem minimalizacji zagrożenia awarią katastrofalną, a na wypadek jej wystąpienia, dysponowania skutecznymi narzędziami odbudowy i powrotu do normalnego stanu pracy systemu elektroenergetycznego. Jak przedstawiono w analizie statystycznej awarii, niezwykle istotnym aspektem jest czas odbudowy zdolności wytwórczych w systemie

elektroenergetycznym w celu ograniczenia negatywnych skutków awarii i jak najszybszego przywrócenia zasilania odbiorcom końcowym. Z tego względu, sukcesywna aktualizacja i weryfikacja planów odbudowy systemu elektroenergetycznego jest kluczowym aspektem poprawy bezpieczeństwa energetycznego na wypadek rozległych awarii systemowych.

Weryfikacja zdolności do aktywnego uczestnictwa źródeł wytwórczych w procesie obrony i odbudowy dokonywana jest w regularnych próbach systemowych, organizowanych na polecenie OSP, poprzedzanych często badaniami symulacyjnymi w tym zakresie. Jak pokazują przedstawione w rozprawie zdarzenia z rzeczywistych prób systemowych, wnioski płynące z tych eksperymentów i badań symulacyjnych pozwalają na określenie warunków pracy jednostek wytwórczych i infrastruktury sieciowej w układach wydzielonych. Dają one również możliwość sprecyzowania zagrożeń i newralgicznych punktów, mogących stanowić przyczynę nieskutecznego procesu odbudowy. Stanowi to przesłankę do prowadzenia analiz ryzyka nie tylko w zakresie rozwoju awarii systemowej, ale również w zakresie przywracania zdolności wytwórczych po jej wystąpieniu.

Głównym osiągnięciem pracy jest przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań symulacyjnych w zakresie zdolności źródeł do uczestnictwa w planach odbudowy zdolności wytwórczych po awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego. Właściwe badania zostały poprzedzone utworzeniem modelu weryfikacyjnego, co stanowi wartość dodaną niniejszej rozprawy. W modelu weryfikacyjnym zestawiono wyniki symulacji toru rozruchowego zamodelowanego w programie DIgSILENT PowerFactory z wynikami rzeczywistej próby systemowej uruchomienia konwencjonalnego bloku Elektrowni Turów poprzez podanie napięcia i mocy rozruchowej z Elektrowni Wodnej Dychów, w której przygotowaniu uczestniczyła autorka rozprawy, w ramach Zespołu z Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Wyniki badań w modelu weryfikacyjnym wykazały znaczną zbieżność modelu symulacyjnego z wynikami rzeczywistej próby systemowej, co pozwoliło na kontynuację prac modelowych nad alternatywnymi wariantami odbudowy z wykorzystaniem programu DIgSILENT PowerFactory. W pracy zaproponowano pięć scenariuszy odbudowy, zróżnicowanych ze względu na typ źródła rozruchowego, które stanowiły: hydrozespoły elektrowni wodnej, turbozespoły gazowe, sąsiedni system elektroenergetyczny, bateryjny magazyn energii współpracujący z lądową farmą wiatrową, a także magazyn energii współpracujący z morską farmą wiatrową. Rozpatrywane scenariusze przeanalizowano w zakresie uruchamiania odbiorów dynamicznych, będących reprezentacją napędów potrzeb własnych elektrowni uruchamianej, załączania odbioru statycznego, będącego reprezentacją wyspy obciążeniowej, a także w zakresie przesyłania mocy rozruchowej torem o zróżnicowanej odległości pomiędzy źródłem rozruchowym a źródłem uruchamianym. Wyniki symulacji porównano pod względem zmian napięcia w przyelektrownianej rozdzielni źródła rozruchowego, zmian częstotliwości oraz minimalnego czasu stabilizacji parametrów w tworzonym układzie wydzielonym. Tego typu porównanie źródeł rozruchowych stanowi nowatorski charakter badań w zakresie procesu odbudowy zdolności wytwórczych. Wyniki badań wykazały zdolność do prowadzenia procesu odbudowy w oparciu o analizowane źródła rozruchowe. Poza badaniami w zakresie skutecznych procesów odbudowy, przedstawiono również istotne wyniki symulacji nieskutecznych procesów odbudowy, które wskazują na szereg zagrożeń i ograniczeń związanych z poszczególnymi scenariuszami odbudowy.

W oparciu o przeprowadzone badania symulacyjne oraz wnioski z rzeczywistych prób systemowych przeprowadzono jakościową oraz ilościową ocenę ryzyka dla procesu odbudowy, która stanowi wypełnienie luki badawczej w tym zakresie. Uzyskane efekty pracy pozwalają stwierdzić, że jakościowa ocena ryzyka prowadzona metodą muchy stanowi ważne narzędzie analityczne, pozwalające określić zagrożenia dla procesu odbudowy i powiązane z nimi konsekwencje, prowadzące do nieskutecznego procesu odbudowy systemu

elektroenergetycznego. Wyszczególnione w ocenie jakościowej bariery stanowią istotny element minimalizacji ryzyka niepowodzenia procesu odbudowy zdolności wytwórczych. Ilościowa ocena ryzyka została poprowadzona z wykorzystaniem metod analizy wielokryterialnej AHP oraz FAHP i pozwoliła na liczbowe porównanie rozpatrywanych scenariuszy odbudowy zgodnie z autorskim zestawieniem kryteriów decyzyjnych, związanych z minimalizacją ryzyka nieskuteczności procesu odbudowy. Porównanie metod analizy wielokryterialnej AHP i FAHP wskazało na znaczną zbieżność uzyskanych wag kryteriów, a także finalnych ocen wag dla rozpatrywanych scenariuszy odbudowy. Na podstawie wyników oceny ilościowej można stwierdzić, że odgórna strategia odbudowy, bazująca na podaniu napięcia i mocy rozruchowej z sąsiedniego systemu elektroenergetycznego, charakteryzuje się najmniejszym ryzykiem niepowodzenia procesu odbudowy ze względu na najmniejsze zmiany częstotliwości oraz napięcia w odbudowywanym torze rozruchowym oraz najkrótszy czas stabilizacji parametrów. Jednocześnie, należy mieć na uwadze ograniczenia tego scenariusza, związane z prawdopodobnym brakiem dyspozycyjności systemu sąsiedniego, a także ograniczonymi zdolnościami regulacji napięcia w torze, szczególnie przy przesyłce mocy rozruchowej na znaczne odległości. Z tego względu, dysponowanie źródłami rozruchowymi w ramach krajowej infrastruktury jest niezwykle istotną kwestią. W zakresie uruchamiania odbiorów dynamicznych, najkorzystniejsze warunki dla minimalizacji ryzyka niepowodzenia odbudowy uzyskano dla dotychczasowych strategii odbudowy, tj. wykorzystania turbozespołów gazowych oraz hydrozespołów jako źródeł rozruchowych, przy czym bardzo zbliżone wyniki uzyskano dla scenariusza odbudowy z wykorzystaniem magazynu energii współpracującego z morską farmą wiatrową. W zakresie przyłączania lokalnej wyspy obciążeniowej, reprezentowanej przez odbiór statyczny, najkorzystniejsze wyniki w ramach strategii oddolnych uzyskano dla źródła rozruchowego w postaci magazynu energii współpracującego z morską farmą wiatrową. Jednakże, w warunkach rzeczywistego procesu odbudowy, w ramach wyspy obciążeniowej wyróżnić można także odbiory dynamiczne, wywołujące potencjalne udary, związane z prądami rozruchowymi takich urządzeń. Stanowi to istotną przesłankę do dalszych prac w tym zakresie, np. z uwzględnieniem współczynnika jednoczesności przyłączania grup odbiorców.

W kontekście rozwoju struktury wytwórczej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, należy zwrócić uwagę na fakt, że zaangażowanie nowego typu źródeł do pełnienia roli źródeł rozruchowych będzie wymagało aktualizacji programu odbudowy systemu wraz z opracowaniem planu testów i prób systemowych dla tego typu źródeł oraz uwzględnienia charakteru ich pracy w dokumentach strategicznych. Nie bez znaczenia pozostaje fakt planowanego wdrożenia energetyki jądrowej. Bezpieczeństwo pracy elektrowni jądrowej jest wielowątkowym wyzwaniem, dlatego strategia działań na wypadek awarii w systemie elektroenergetycznym jest kwestią priorytetową. Wielopoziomowa struktura warstw ochrony bezpieczeństwa pracy elektrowni jądrowej uwzględnia również dywersyfikację źródeł zasilania awaryjnego. W przedstawionych w pracy badaniach dla każdego z rozpatrywanych scenariuszy odbudowy analizowano załączanie odbiorów dynamicznych, ze szczególnym uwzględnieniem odbioru o najwyższej mocy elektrycznej, stanowiącego reprezentację pompy wody zasilającej w elektrowniach konwencjonalnych. Wyniki tych symulacji mogą stanowić odzwierciedlenie dla uruchamiania urządzeń wchodzących w skład układów chłodzenia w elektrowni jądrowej. Przedstawione scenariusze mogą zatem być potencjalnie rozpatrywane jako alternatywna ścieżka odbudowy zasilania urządzeń potrzeb własnych elektrowni jądrowych na wypadek braku dyspozycyjności awaryjnej infrastruktury wytwórczej. Dodatkowo, prowadzenie procesu odbudowy może znaleźć zastosowanie nie tylko na potrzeby uruchamiania źródeł rozruchowych, ale również w celu przywrócenia zasilania odbiorcom przemysłowym w zakresie newralgicznych procesów technologicznych. Wyniki badań wskazały na potencjalnie problematyczną kwestię

odległości pomiędzy źródłem rozruchowym a uruchamianym, związaną z występowaniem stosunkowo wysokiego napięcia na końcu tworzonego toru rozruchowego. Z tego względu, planowanie rozwoju infrastruktury wytwórczej powinno warunkować optymalną lokalizację źródeł, poprawiając bezpieczeństwo energetyczne systemu elektroenergetycznego oraz źródeł wytwórczych, z możliwością prowadzenia procesu odbudowy lokalnie.

Uzyskane wyniki badań pozwalają subiektywnie stwierdzić słuszność postawionej na początku pracy tezy, a studia literaturowe potwierdzają ważność i aktualność poruszanej tematyki. Zastosowane narzędzie badań symulacyjnych pozwala na rozbudowę utworzonych modeli, w których kierowano się możliwą uniwersalnością modelowanych torów. Zaproponowana adaptacja metod oceny ryzyka stanowi uniwersalne narzędzie, pozwalające na określenie ryzyka procesów, również z możliwością rozbudowy modelu. Poruszana tematyka bezpieczeństwa energetycznego jest przedmiotem licznych prac badawczych, również z udziałem i współudziałem autorki, czego potwierdzeniem są publikacje, raporty i wystąpienia konferencyjne na arenie krajowej i międzynarodowej.

Przeprowadzone badania wskazały na wiele ścieżek rozwojowych w ramach rozpatrywanej tematyki, inspirując do podejmowania dalszych badań w zakresie bezpieczeństwa energetycznego. W zakresie opracowanych scenariuszy odbudowy, kontynuacja badań może dotyczyć poprawy warunków procesu odbudowy poprzez optymalizację układów regulacji źródeł rozruchowych oraz dobór urządzeń pomocniczych, a także rozwój badań dotyczących optymalizacji lokalizacji źródeł o aspekt ich udziału w procesach obrony i odbudowy zdolności wytwórczych. Przedstawiona metodologia oceny ryzyka może posłużyć jako narzędzie do dalszych analiz, związanych z bezpieczeństwem energetycznym systemu elektroenergetycznego.

## DOROBEK NAUKOWY

### Publikacje związane z tematem rozprawy

1. Mishra D.K., **Złotecka D.**, Li L. Significance of SMES Devices for Power System Frequency Regulation Scheme Considering Distributed Energy Resources in a Deregulated Environment. *Energies* 2022, 15(5), 1766-1-1766-32.
2. Sroka K., **Złotecka D.** The risk of large blackouts failures in power systems. *Archives of Electrical Engineering* 2019, 68, s.411-426.
3. Grządzielski I., Sroka K., **Złotecka D.**, Kurzyński A., Kaczmarek M., Brzozowski M., Borodynyo J. Próba systemowa uruchomienia bloku cieplnego w Elektrowni Turów jako weryfikacja możliwości wykorzystania Elektrowni Wodnej Dychów w procesie restytucji KSE. *Przegląd Elektrotechniczny* 2019, 95(2), s. 29-34.
4. **Złotecka D.**, Sroka K. The characteristics and main causes of power system failures basing on the analysis of previous blackouts in the world. 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW), Świnoujście, s. 257-262.
5. **Złotecka D.** Nadmierne zwisy linii WN jako przyczyna awarii w systemach elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny* 2018, R. 94, Nr 10/2018, s. 143-147.
6. Grządzielski I., Sroka K., **Złotecka D.**, Kurzyński A., Kaczmarek M., Brzozowski M., Borodynyo J. Próba systemowa podania napięcia i mocy rozruchowej z EW Dychów do Elektrowni Turów. *Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny* 2018, s. 105-122.
7. Sroka K., **Złotecka D.**, Nieuchronność dużych awarii typu blackout w systemach elektroenergetycznych. *Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny* 2018, s. 265-278.
8. **Złotecka D.** Wpływ ekstremalnych zjawisk atmosferycznych na system elektroenergetyczny. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2018, 94, s. 87-98.
9. Grządzielski I., Sroka K., Kurzyński A., Kaczmarek M., **Radsak D.** Parallel Operation of a Steam Turbo-generator Set and Hydroelectric Sets in an Island System Formed for the National Power System Recovery After Catastrophic Failure. *Acta Energetica* 2017, 3(32), s. 69-83.

10. **Radsak D.**, Sroka K., Obrona i odbudowa zdolności wytwórczych elektrowni i elektrociepłowni w warunkach awarii katastrofalnej systemu elektroenergetycznego, *Przegląd Naukowo-Metodyczny, Rok X Nr 1/2017 (34), Edukacja dla Bezpieczeństwa ISSN 1899-3524*, s. 746-760
11. Grządzielski I., Sroka K., Łacny A., **Radsak D.** Operation of a BC50 Cogeneration Unit of a CHP Plant in an Isolated Island System. *Acta Energetica* 2016, 1(26), s. 15-25.
12. Grządzielski I., Sroka K., **Radsak D.**, Borodynko J. Elektrownia wodna Dychów jako źródło rozruchowe do odbudowy zdolności wytwórczych elektrowni ciepłych w zachodniej części krajowego systemu elektroenergetycznego. *Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny* 2016, s. 281-298.
13. Sroka K., Grządzielski I., Kurzyński A., Łacny A., **Radsak D.** Elektrociepłownia Karolin w procesach obrony i restytucji Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. *Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny* 2016, s. 255-268.

### Pozostałe publikacje

1. Sokólski P., Rutkowski T.A., Ceran B., **Złotecka D.**, Horla D. The Influence of Cooperation on the Operation of an MPC Controller Pair in a Nuclear Power Plant Turbine Generator Set. *Energies* 2022, 15(18), 6702-1-6702-19.
2. Sokólski P., Rutkowski T.A., Ceran B., **Złotecka D.**, Horla D. Numbers, Please: Power- and Voltage-Related Indices in Control of a Turbine-Generator Set. *Energies* 2022, 15(7), 2453-1-2453-24.
3. Sokólski P., Rutkowski T., Ceran B., Horla D., **Złotecka D.** Power System Stabilizer as a Part of a Generator MPC Adaptive Predictive Control System. *Energies* 2021, 14, 6631.
4. Ceran B., Jurasz J., Wróblewski R., Guderski A., **Złotecka D.**, Kaźmierczak Ł. Impact of the Minimum Head on Low-Head Hydropower Plants Energy Production and Profitability. *Energies* 2020, 13, 6728, s. 1-21.
5. **Złotecka D.**, Maćkowiak A., Sroka K. Impact of Escalating Emission Requirements on the Operation of Heating Systems in Poland. 15th International Conference on the European Energy Market (EEM): IEEE, 2018 - s. 1-5.
6. **Radsak D.** Redukcja emisji tlenków azotu w kotłach energetycznych jako konieczność spełnienia europejskich standardów emisyjnych. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2017, 90, s. 333-345.

### Udział w badaniach prowadzonych w ramach projektów badawczych na PP

1. Współpraca międzynarodowa w ramach Projektu Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej pn. *Międzynarodowa wymiana stypendialna doktorantów i kadry akademickiej. Współpraca PUT – UTS akceleracją zdolności publikacyjnej doktorantów*. Nr projektu POWR.03.03.00IP.08-00P13/18; University of Technology Sydney (UTS), School of Information, Systems & Modelling, Faculty of Engineering & IT, Sydney, Australia, 24.11.2019 – 7.12.2019 r.
2. Łowczowski K., Miller P., **Złotecka D.**, Udzik M., Bąk D. Opracowanie na potrzeby ENEA Operator w zakresie określenie dopuszczalnych warunków pracy SynchroCheck w sieci dystrybucyjnej, w celu ochrony urządzeń na terenie ENEA Operator – 2gi etap. R3324\_2022.
3. Miller P., Krzysztof Ł., **Złotecka D.**, Kacejko P. Opracowania na temat automatyki Synchro-Check w sieciach 110 kV, przygotowanie warsztatów na temat automatyki Synchro-Check oraz dobór nastaw automatyki Synchro-Check dla 2 lokalizacji. R2447\_2021.
4. Grządzielski I., Sroka K., **Radsak D.**, Zakrzewski M., Kurzyński A., Komarzyniec M., Surlej M., Kaczmarek M. Próba systemowa uruchomienia bloku Elektrowni Turów z Elektrowni Wodnej Dychów. Etap I. Opracowanie analizy teoretycznej, przygotowanie programu próby i jego uzgodnienie – raport z badań, Poznań, sierpień 2016.
5. Grządzielski I., Sroka K., **Radsak D.**, Kurzyński A., Kaczmarek M., Surlej M. Próba systemowa uruchomienia bloku Elektrowni Turów z Elektrowni Wodnej Dychów. Etap II. Raport z przebiegu próby, analiza wyników pomiarów zarejestrowanych w czasie próby, wnioski. Poznań, sierpień 2016.