

Wybrane aspekty modelowania pracy modułów wytwarzania energii – wymagania i realizacja

Selected aspects of modelling the operation of power generating modules – requirements and implementation

W artykule przedstawiono aktualne wymagania i standardy dotyczące modelowania systemów elektroenergetycznych w kontekście integracji odnawialnych źródeł energii (OZE) z siecią. Omówiono europejskie regulacje, w szczególności kodeks sieci NC RfG, które nakładają obowiązek dostarczania i walidacji modeli symulacyjnych nowych jednostek wytwórczych. Autorzy analizują zarówno modele dostarczane przez producentów, jak i modele ogólne zgodne z normą IEC 61400-27-1, wskazując na ich zastosowanie w środowisku DlgSILENT PowerFactory. Podkreślono znaczenie iteracyjnego procesu modelowania, obejmującego testowanie, porównanie z danymi pomiarowymi i korektę parametrów, jako kluczowego elementu zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego.

Słowa kluczowe: modelowanie sieci, farmy wiatrowe, kodeks sieci NC RfG, norma IEC 61400-27-1, modele dynamiczne, DlgSILENT PowerFactory, symulacje numeryczne

The article presents the current requirements and standards for modelling power systems in the context of integrating renewable energy sources (RES) into the grid. The European regulations, and in particular the Network Code on Requirements for Grid Connection of Generators (NC RfG), are discussed which set out the obligation to provide and validate simulation models of new power generating modules. The authors analyse both models provided by manufacturers and general models compliant with IEC 61400-27-1, indicating their use in the DlgSILENT PowerFactory environment. The article emphasizes the importance of iterative modelling process, including testing, comparison with the measured data and parameter correction, as a key element to ensure reliable and safe operation of the electric power system.

Keywords: network modelling, wind farms, NC RfG, IEC 61400-27-1, dynamic models, DlgSILENT PowerFactory, numerical simulations

Wprowadzenie

Transformacja sektora elektroenergetycznego jest procesem o globalnym zasięgu, determinowanym przez różnorodne czynniki, w tym cele polityki klimatycznej oraz dążenie do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego i uniezależnienia od zewnętrznych dostaw surowców [1, 2]. Centralnym elementem tej przemiany jest intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE). Integracja nowych źródeł energii z istniejącą infrastrukturą dystrybucyjną wymaga jednak kompleksowego podejścia. Wynika to ze zmiennego charakteru generacji, spowodowanego zależnością od warunków atmosferycznych, rozproszeniem oraz często lokalizacją na terenach o ograniczonej zdolności przesyłowej. Z tego względu, w celu oceny wpływu nowo przyłączanych instalacji OZE oraz innych obiektów na dynamikę pracy systemu elektroenergetycznego, a także ich zdolności do świadczenia usług sieciowych, kluczowe znaczenie mają symulacje z wykorzystaniem zaawansowanych metod numerycznych.

W odpowiedzi na te wyzwania wielu ustawodawców na świecie wdrożyło formalne wymagania dotyczące modelowania i symulacji systemów elektroenergetycznych. Regulacje te obligują właścicieli jednostek wytwórczych do przedkładania Operatorom Systemów Przesyłowych (OSP) szczegółowych modeli dynamicznych i statycznych. Przykładowo: Chińska Republika Ludowa ustala te wymagania za pośrednictwem China Electricity Council (CEC) oraz National Energy Administration (NEA); w Stanach Zjednoczonych odpowiada za to North American Electric

Reliability Corporation (NERC); natomiast w Brazylii analogiczną funkcję pełni Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [3–5]. Unia Europejska również wprowadziła zharmonizowane przepisy, obligujące podmioty do wykonywania kompleksowych analiz symulacyjnych systemów przesyłowych, co stanowi przedmiot dalszych rozważań w niniejszym artykule.

Europejskie wymagania dotyczące modelowania

W Unii Europejskiej wymagania dotyczące symulacji dla nowych Modułów Wytwarzania Energii (MWE) zostały zdefiniowane w „Rozporządzeniu Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającym kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci”, zwanym dalej NC RfG [6].

Zgodnie z NC RfG właściciel każdego MWE, planujący przyłączenie go do sieci elektroenergetycznej, ma obowiązek dostarczyć właściwemu operatorowi systemu szczegółowe modele symulacyjne. Modele te muszą reprezentować zachowanie MWE zarówno w warunkach dynamicznych, jak i ustalonych. Ich dostarczenie jest niezbędne do przeprowadzenia symulacji zgodności (ang. *compliance simulations*), których celem jest potwierdzenie, że dana jednostka wytwórcza spełnia wymagania techniczne określone w kodeksach sieci oraz instrukcjach danego operatora systemu przesyłowego (OSP) lub dystrybucyjnego (OSD).

Właściciel MWE może zostać zwolniony z obowiązku realizacji symulacji zgodności, jeżeli potwierdzenie spełnienia wymagania odbywa się poprzez dostarczenie właściwemu operatorowi systemu akceptowalnego certyfikatu, który obejmuje wyniki symulacji i zwalidowane modele symulacyjne. Certyfikat taki może zostać wydany wyłącznie przez podmiot, który otrzymał akredytację od krajowej jednostki stowarzyszonej w ramach Europejskiej Współpracy w Dziedzinie Akredytacji, ustanowionej zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 765/2008.

Zgodnie z zapisami NC RfG: „W certyfikacie sprzętu określa się zakres jego ważności na poziomie krajowym lub na innym poziomie, na którym wybiera się określoną wartość z zakresu dopuszczonego na poziomie europejskim. W celu zastąpienia określonych części procesu weryfikacji spełnienia wymogów certyfikat sprzętu może uwzględniać modele potwierdzone rzeczywistymi wynikami testów.” [6]

Sytuacja, w której możliwe jest zastąpienie symulacji certyfikatami zachodzi wyłącznie w przypadku, gdy MWE sklasyfikowany jest jako moduł typu B. W przypadku, gdy potwierdzenie zgodności nie jest oparte na certyfikacie, odpowiedzialność za przeprowadzenie symulacji i walidację modeli spoczywa na właścicielu MWE.

Dostarczenie symulacji zgodności jest wymagane na etapie składania wniosku o pozwolenie na rozpoczęcie próbnej eksploatacji obiektu i wprowadzanie energii do sieci w ograniczonym zakresie, zwanego ION (ang. Interim Operational Notification).

Końcowy etap procesu dopuszczenia jednostki wytwórczej do pracy w systemie elektroenergetycznym, związany z uzyskaniem ostatecznego pozwolenia na eksploatację FON (ang. Final Operational Notification), nakłada na właściciela MWE obowiązek dostarczenia zwalidowanych modeli symulacyjnych. Proces walidacji realizowany jest z wykorzystaniem danych uzyskanych z przeprowadzonych testów obiektowych (tzw. testów zgodności).

Zgodnie z wymaganiami kodeksu sieci NC RfG, na podstawie opracowanego modelu matematycznego należy przeprowadzić symulacje zgodności w celu weryfikacji następujących zdolności technicznych:

- zdolność do regulacji częstotliwości – celem analizy jest wykazanie oczekiwanej zmiany mocy czynnej w reakcji na zmiany częstotliwości sieci w trybach FSM (ang. Frequency Sensitivity Mode) i LFSM (ang. Limited Frequency Sensitivity Mode); przebieg mocy oceniany jest zarówno w stanie dynamicznym, gdzie weryfikuje się czas opóźnienia i stabilizacji, jak i statycznym, gdzie sprawdzana jest wielkość odpowiedzi w zależności od wzmocnienia (statyzmu);

- zdolność do generacji mocy biernej – celem analizy jest wykazanie wielkości generacji mocy biernej po stronie indukcyjnej i pojemnościowej, zgodnie z profilem $U = f(Q/P_{max})$; zdolność do generacji mocy biernej jest bardzo istotną cechą ze względu na zapewnienie stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego;
- zdolność do przetrwania zwarcia (FRT) – celem analizy jest potwierdzenie zdolności MWE do utrzymania przez jednostkę połączenia z siecią elektroenergetyczną podczas krótkotrwałych spadków napięcia w punkcie przyłączenia, wywołanych zwarciami symetrycznym lub niesymetrycznym; jest to zdolność o kluczowym znaczeniu dla zapewnienia odporności systemu elektroenergetycznego na zakłócenia;
- zdolność do wprowadzenia szybkiego prądu zwarciovego – celem analizy jest potwierdzenie zdolności MWE do wspomagania działania zabezpieczeń i pomoc w utrzymaniu napięcia w sieci podczas zakłócenia; w przypadku generatorów synchronicznych zdolność ta jest naturalna, natomiast dla MWE przyłączonych do sieci poprzez inwertery (np. źródła OZE), wprowadzanie szybkiego prądu zwarciovego jest zależne od algorytmu sterowania zaimplementowanego przez wykonawcę na etapie uruchamiania MWE;
- pozwarciove odtworzenie mocy czynnej – celem analizy jest potwierdzenie zdolności MWE do szybkiego odtworzenia mocy czynnej po usunięciu zwarcia, aby zachować równowagę mocy czynnej w systemie elektroenergetycznym;
- zdolność do pracy wyspowej – celem analizy jest wykazanie zdolności MWE do pracy w systemie elastycznym, z aktywnym udziałem w regulacji napięcia i częstotliwości w warunkach skokowych zmian po stronie obciążenia i generacji;
- tłumienie oscylacji mocy – celem analizy jest wykazanie zdolności stabilizatora systemowego zainstalowanego po stronie MWE do efektywnego ograniczania wahań mocy, prowadzącej do szybkiej stabilizacji systemu elektroenergetycznego po wystąpieniu zakłóceń (zwarc).

W tabeli 1 przedstawiono zbiorcze zestawienie wymienionych zdolności, uzupełnione o typ MWE, dla którego wymagana jest symulacja zgodności.

Tabela 1
Zestawienie wymaganych symulacji dla poszczególnych zdolności MWE

Rozpatrywana zdolność	Moduł, dla którego obowiązuje wymóg przeprowadzenia symulacji		
	B	C	D
LFSM-O ¹⁾	☑	☑	☑
LFSM-U ¹⁾	☒	☑	☑
FSM ¹⁾	☒	☑	☑
Zdolność do generacji mocy biernej ¹⁾	☒	☑	☑
Wprowadzenie szybkiego prądu zwarciovego ²⁾	☑	☑	☑
FRT ¹⁾	☑	☑	☑
Pozwarciove odtworzenie mocy czynnej	☑	☑	☑
Zdolność do pracy wyspowej	☒	☑	☑
Tłumienie oscylacji mocy ³⁾	☒	☒	☒

¹⁾ Wymóg nie dotyczy morskich modułów parku energii.
²⁾ Wymóg nie dotyczy generatorów synchronicznych.
³⁾ Wymóg dotyczy wyłącznie generatorów synchronicznych.
(źródło: opracowanie własne na podstawie [7])

Charakterystyka modeli symulacyjnych

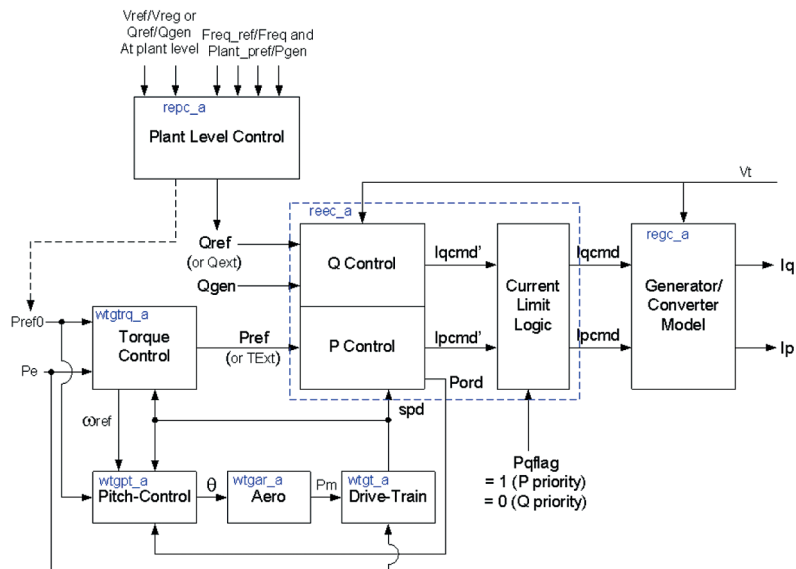
Dokładność wyników symulacji jest bezpośrednio uzależniona od jakości zastosowanych modeli. W związku z tym w pierwszej kolejności rekomenduje się wykorzystanie modeli dostarczonych przez producentów sprzętu / dostawców technologii. Wspólną cechą takich modeli jest użycie w nich algorytmów regulacji, które są wiernym odzwierciedleniem lub nieznacznie uproszczoną wersją tych zaimplementowanych w rzeczywistym urządzeniu. Takie podejście umożliwia odwzorowanie realnego zachowania sprzętu w odpowiedzi na zadawane wymuszenia i zakłócenia pochodzące z sieci elektroenergetycznej.

Z perspektywy użytkownika symulacji modele te najczęściej mają charakter „czarnej skrzynki” („*blackbox*”), co ogranicza możliwość modyfikacji jedynie do udostępnionych parametrów. Z punktu widzenia producenta takie ograniczenie jest uzasadnione potrzebą ochrony własności intelektualnej. Należy zaznaczyć, że zgodnie ze stanowiskiem Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej (PTPiREE) stosowanie modeli typu „blackbox” jest dopuszczalne pod warunkiem ich walidacji przez jednostkę certyfikującą, zgodnie z wypracowanymi przez nią procedurami. Zostało to doprecyzowane w odpowiedzi nr 9 na pytanie skierowane do PTPiREE w publicznym FAQ dostępnym na stronie Towarzystwa [8].

W praktyce może się zdarzyć, że model producenta okaże się niewystarczający do wykonania pełnej symulacji, na przykład ze względu na brak w nim określonego trybu pracy MWE. W takiej sytuacji możliwe jest zastosowanie modeli ogólnych. Przykładowo, dla turbin wiatrowych norma IEC 61400-27-1 dopuszcza takie rozwiązanie, opisując elektryczne modele symulacyjne dla typowych topologii i konfiguracji dostępnych na rynku [9]. Cechą wyróżniającą te modele jest ich modułowa budowa, oparta na połączeniu mniejszych komponentów realizujących przypisane funkcje. Szczegółowy opis działania każdego modułu wraz ze strukturą regulacji jest powszechnie dostępny, co umożliwia ich implementację w oprogramowaniu symulacyjnym.

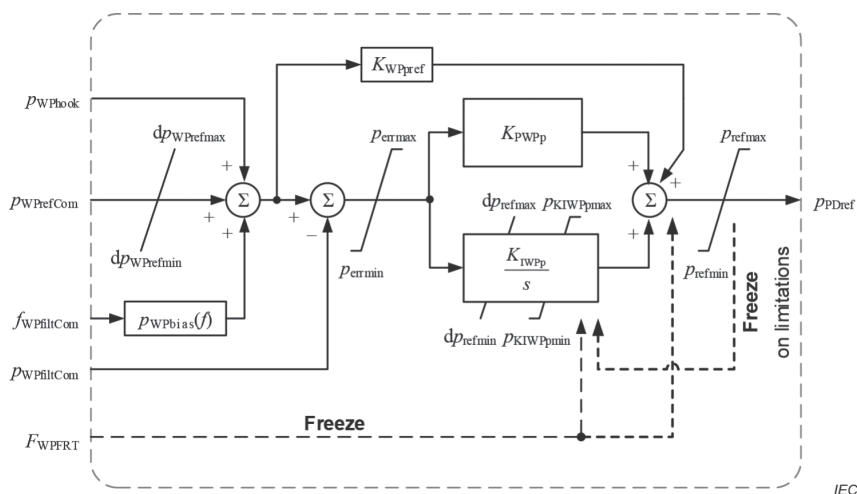
Użycie modeli ogólnych staje się koniecznością w przypadku braku dostępności modeli producenta. Do najpopularniejszych ogólnych modeli odnawialnych źródeł energii należą te opracowane przez Western Electricity Coordinating Council (WECC) oraz modele opisane w normie IEC 61400-27-1 [9].

Model ogólny turbiny wiatrowej typu 3, opracowany przez Western Electricity Coordinating Council (WECC), został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólny model turbiny wiatrowej typu 3 o strukturze modułowej, opracowany przez WECC [10]

Rysunek 2 prezentuje strukturę modułu regulatora częstotliwości i mocy czynnej, zgodną ze standardem IEC 61400-27-1. Rysunek ten pokazuje również komponenty na wejściu i wyjściu modułu regulatora, pozwalające na jego włączenie w kompleksową strukturę regulacji.



Rys. 2. Model regulatora częstotliwości i mocy czynnej według IEC 61400-27-1:2020 [11]

W kontekście modelowania turbin wiatrowych modele oparte na normie IEC 61400-27-1 stanowią preferowane rozwiązanie ze względu na ich zgodność z wymogami europejskich operatorów systemów przesyłowych [12]. Wymogi te są szczegółowo określone w kodeksach sieci w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG),

w zakresie przyłączenia odbioru (NC DC) oraz w zakresie przyłączenia do sieci systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego (NC HVDC), wytycznych dotyczących pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej (ang. System Operation Guidelines – SOGL) [13] oraz w rekomendacjach European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) [14] i zapisach normy dotyczącej formatu i zapisu danych symulacyjnych IEC 61970-600-2:2021 [15].

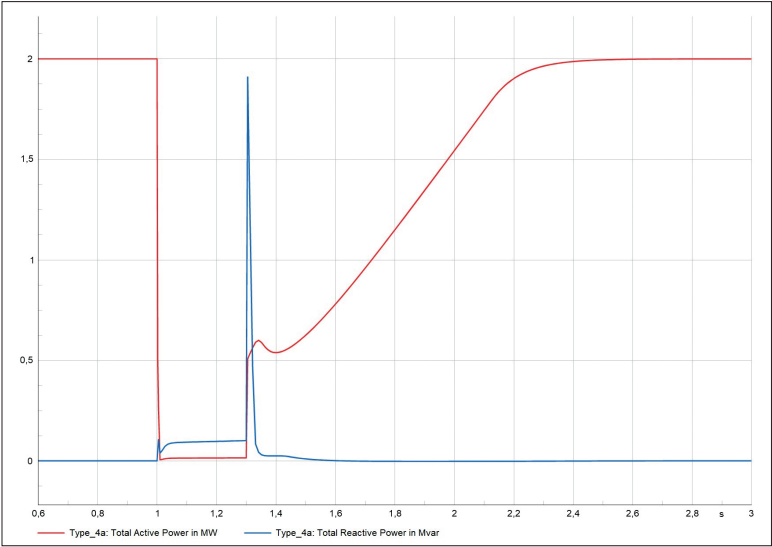
ENTSO-E, będąc stowarzyszeniem europejskich operatorów przesyłowych, aktywnie rozwija szczegółowe wytyczne i standardy implementacji tych regulacji. Działania te prowadzone są we współpracy z pięcioma głównymi dostawcami oprogramowania (Eurostag, DlgSILENT, Neplan, Netomac i PSS®E) w ramach Common Grid Model Exchange Standard (CGMES) [14].

Dla Polski szczególnie istotne jest aktywne współuczestnictwo Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, jako członka Komitetów Narodowych IEC, w procesie tworzenia normy 61970-600-2:2021. Norma ta, definiująca wspólny format plików CGMES, została opracowana z udziałem polskich ekspertów, co zapewnia zgodność dostarczanej w tym formacie dokumentacji z obowiązującymi w kraju wymogami i standardami.

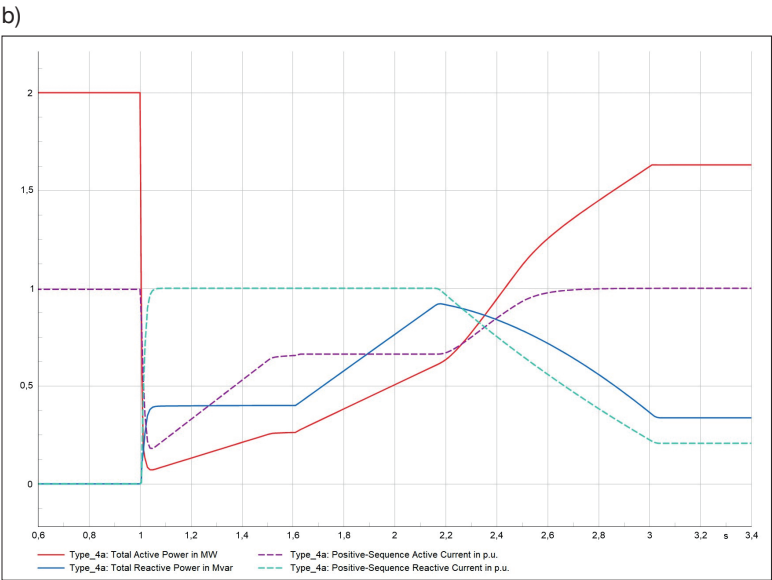
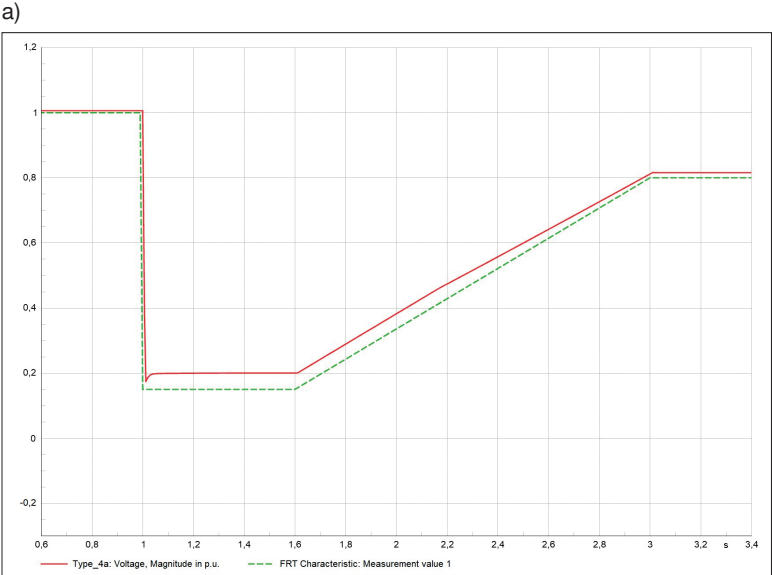
Zastosowanie norm w celu realizacji analiz

Przedstawione wymagania dotyczące budowania modeli symulacyjnych, określające metodykę działań niezbędnych do prawidłowego przeprowadzenia analiz symulacyjnych w kontekście przyłączania nowych MWE do sieci, zostały zaimplementowane do środowiska DlgSILENT PowerFactory. Wykonano w nim przykładowe analizy, stosując uproszczony model farmy wiatrowej, przy wykorzystaniu modelu ogólnego IEC 61400-27-1 Typ 4a dostosowanego dla jednostek o mocy nominalnej 2,0 MW. Zasymulowano trójfazowy symetryczny spadek napięcia w punkcie przyłączenia do poziomu 0% napięcia znamionowego (U_n), trwający przez 0,3 sekundy. Uzyskane odpowiedzi mocy czynnej i biernej zostały zaprezentowane na rysunku 3.

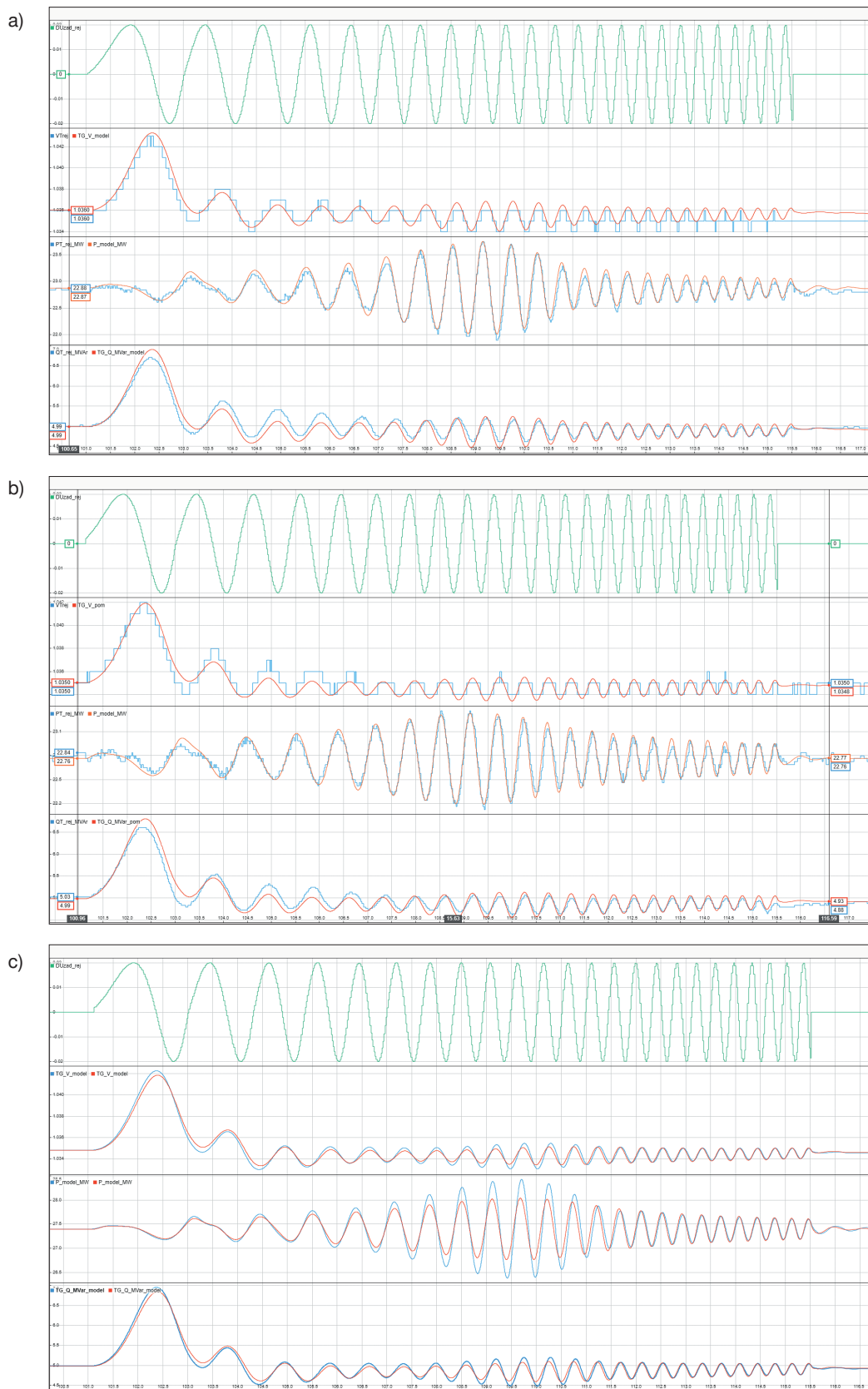
Wyniki potwierdzają poprawną odpowiedź modelu w reakcji na zakłócenie pochodzące od sieci. Niemniej pełne potwierdzenie poprawności i wierności modelu wymaga jego walidacji. Proces ten obejmuje porównanie danych symulacyjnych z rzeczywistymi pomiarami obiektowymi, pozyskanymi przy analogicznych wartościach początkowych i przy zastosowaniu identycznych wymuszeń, aby zweryfikować zdolność modelu do możliwie wiernego odwzorowania zachowania turbin wiatrowych.



Rys. 3. Odpowiedź mocy czynnej P i mocy biernej Q na spadek napięcia (źródło: opracowanie własne)



Rys. 4. a) zadany profil napięcia, b) odpowiedź mocy czynnej P i biernej Q na profil napięcia (źródło: opracowanie własne)



Rys. 5. Walidacja modelu stabilizatora mocy systemu elektroenergetycznego (PSS) i ocena jego wpływu na odpowiedź generatora
a) porównanie przebiegów zmierzonych (linia niebieska) i symulowanych (linia czerwona) dla stanu z wyłączonym PSS
b) porównanie przebiegów zmierzonych (linia niebieska) i symulowanych (linia czerwona) dla stanu z załączonym PSS
c) porównanie wyłącznie symulowanych odpowiedzi w celu oceny wpływu stabilizatora (linia czerwona – PSS załączony, linia niebieska – PSS wyłączony)
Prezentowane przebiegi (od góry): sinusoidalna zmiana wartości zadanej napięcia, napięcie generatora, moc czynna i bierna
(źródło: opracowanie własne)

Analiza zachowania MWE w odpowiedzi na przebieg napięcia zgodny z profilem FRT (ang. *Fault Ride-Through*), czyli zdolnością do pozostawania w pracy podczas zwarcia, stanowi bardziej wymagający scenariusz testowy. W celu wykazania zdolności użyto profilu napięciowego przedstawionego na rysunku 4 wraz z wynikowym napięciem na zaciskach generatora turbiny, który jest zgodny z charakterystyką określoną w „Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej” (IRiESP) [16].

Rysunek 4 prezentuje odpowiedź mocową i prądową modelu na zadany profil napięciowy. Zaprezentowane przebiegi demonstrowują aktywację układów regulacji, które zapewniają ochronę generatora przed skutkami zwarcia.

Jak wspomniano wcześniej, walidacja modelu stanowi jeden z kluczowych etapów procesu symulacyjnego. Przykład takiej walidacji przedstawiono na rysunku 5, gdzie porównano odpowiedź modelu stabilizatora mocy systemu elektroenergetycznego (PSS), zwalidowanego przez specjalistów Energopomiaru, z rzeczywistym zachowaniem układu zarejestrowanym podczas testów obiektowych.

Podsumowanie

Zastosowanie modeli symulacyjnych zgodnych z obowiązującymi normami i wytycznymi operatorów systemów przesyłowych umożliwia skuteczną ocenę zdolności MWE do pracy zarówno w warunkach dynamicznych, wywołanych zakłóceniami w sieci, jak i w odpowiedzi na zamierzone zmiany mocy czynnej i napięcia. Jednakże istotnym warunkiem wiarygodności tych modeli jest ich walidacja.

Z tego względu proces modelowania należy postrzegać jako ciągły cykl iteracyjny, obejmujący przygotowanie modelu, jego testowanie symulacyjne, porównanie wyników z danymi pomiarowymi, a następnie korektę parametrów. Zastosowanie takiego podejścia jest warunkiem koniecznym do zapewnienia pełnej zgodności z wymaganiami operatorów oraz do zagwarantowania bezpieczeństwa i niezawodności pracy całego systemu elektroenergetycznego.

PIŚMIENNICTWO

[1] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów „Zabezpieczenie naszej przyszłości. Cel klimatyczny na 2040 r. i droga ku neutralności klimatycznej do 2050 r. jako fundamenty zrównoważonego, sprawiedliwego i dostatniego społeczeństwa”, 6.02.2024, COM(2024) 63 final.

[2] Myllyvirta L., *Analysis: Clean energy just put China's CO2 emissions into reverse for first time*, <https://www.carbonbrief.org/analysis-clean-energy-just-put-chinas-co2-emissions-into-reverse-for-first-time/> [dostęp: 26.06.2025].

[3] NERC „MOD-032-1 – Data for Power System Modeling and Analysis”, 2015, <https://www.nerc.com/pa/stand/reliability%20standards/mod-032-1.pdf> [dostęp: 26.06.2025].

[4] China Electricity Council (CEC) „Technical Guidelines for Grid Connection of Power Generation Units” (in Chinese), 2022.

[5] Operador Nacional do Sistema Eléctrico (ONS) „Submódulo 2.17 – Modelos Dinâmicos e Estáticos”, 2023.

[6] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci”, Dz.U. UE L 112/1.

[7] PTPIREE, „Warunki i procedury wykorzystania certyfikatów w procesie przyłączenia modułów wytwarzania energii do sieci elektroenergetycznych” – wersja 1.2, 2021.

[8] PTPIREE, *Najczęściej zadawane pytania do dokumentu „Warunki i procedury wykorzystania certyfikatów w procesie przyłączenia modułów wytwarzania energii do sieci elektroenergetycznych”* ver. 1.5 z dnia 03.03.2022 r.”, 2022.

[9] Sørensen P., Andresen B., Fortmann J., Pourbeik P., „Modular structure of wind turbine models in IEC 61400-27-1”, 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver 2013.

[10] Western Electricity Coordinating Council, „WECC Type 3 Wind Turbine Generator Model – Phase II”, 2014.

[11] International Electrotechnical Commission, „Wind energy generation systems – Part 27-1: Electrical simulation models – Generic models”, IEC 61400-27-1:2020, Genewa 2020.

[12] Fortmann J., Miller N., Kazachkov Y., Bech J., Björn Andresen B., Pourbeik P., Sørensen P.E., *Wind Plant Models in IEC 61400-27-2 and WECC – latest developments in international standards on wind turbine and wind plant modeling*, 14th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Bruksela 2015.

[13] Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1485 z dnia 2 sierpnia 2017 r. ustanawiające wytyczne dotyczące pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej (Tekst mający znaczenie dla EOG.)”, Dz.U. UE L 220/1.

[14] European Committee for Electrotechnical Standardization, Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 600-1: Common Grid Model Exchange Specification (CGMES) – Structure and rules, EN IEC 61970-600-1, Brussels 2021.

[15] IEC 61970-600-2:2021: Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 600-2: Common Grid Model Exchange Specification (CGMES) – Exchange profiles specification”, 2021.

[16] Polskie Sieci Elektroenergetyczne, *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej*, Konstancin-Jeziorna 2024.

