

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

mgr inż. Rafał Hyrzyński | Ośrodek Energetyki Ciepłej | Zakład Energetyki Rozproszonej | IMP PAN

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Modelowanie i optymalizacja magazynów energii, w tym magazynów energii ciepłej, w systemie energetycznym z generacją ze źródeł trudno prognozowalnych.

Promotor: Prof. dr hab. inż. Janusz Badur

Autor poprzez niniejszą pracę podjął próbę włączenia się w nurt szeroko zakrojonych prac badawczych, będących pochodną zmian transformacyjnych, ukierunkowanych na dekarbonizację gospodarki. Konstrukcja pracy opiera się o trzy główne filary, które stanowią rozdziały nr 7, 8 i 9. Pozostałe rozdziały stanowią niezbędne jej uzupełnienie i wypełnienie jej celów uzgodnionych zarówno z promotorem, jak również będących spełnieniem słusznych wymogów postawionych przez dyrektora IMP PAN i Radę Naukową IMP PAN.

W podsumowaniu zaś, stanowiącym ostatni rozdział niemniejszej pracy (rozdział 10), autor odniósł się do realizacji założonych przez siebie celów, zdefiniowanych na etapie formułowania tematyki celu badawczego oraz dowiedzenia prawdziwości postawionej tezy.

Rozpoczynając od rozdziałów podstawowych, zdefiniowanych przez autora na wstępie jako filarów niniejszej dysertacji, wskazać należy, iż w rozdziale nr 7 przeanalizowano zmienny charakter generacji energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych. Dla właściwego odwzorowania charakteru tej pracy posłużono się danymi z systemu niemieckiego, z obszaru graniczącego z Polską, zarządzanego przez 50Hertz Transmission GmbH. Współzależność pomiędzy średnią mocą generowaną przez źródła wiatrowe i słoneczne jest dla analizowanego obszaru zauważalna, jednakże dla dłuższych przedziałów czasowych (tygodni i miesięcy). Z kolei dla mniejszych przedziałów czasowych (godziny, dni), w celu zapewnienia stabilnej i przewidywalnej generacji z trudno prognozowalnych źródeł OZE oraz dla zapewnienia bezpieczeństwa funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, należy szukać właściwych rozwiązań technicznych. Jedną z opcji, jaka może być zastosowana, są magazyny energii. Problem ten (czy może właściwie „zagadnienie”) ma szczególny wymiar w przypadku energetyki wiatrowej, która, z racji trudniejszego prognozowania, może w krótkich przedziałach czasu istotnie wpływać na bilans mocy systemu elektroenergetycznego. Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla rocznego przedziału czasowego sumaryczne, maksymalne wykorzystanie mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych oscyluje w granicach 70%. Dodatkowo, na bazie przeprowadzonych obliczeń, można przyjąć założenie, że optymalny *mix* wytwarzania energii w Polsce będzie zapewniony dla źródeł trudno prognozowanych (elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych) przy ich porównywalnej mocy zainstalowanej (patrz: Rys. 124). Nadto wskazano, że bardzo ważnym zagadnieniem związanym z transformacją energetyczną i np. zastosowaniem magazynów energii, są koszty tejże transformacji, które zostały oszacowane na kwotę z przedziału od 841 mld PLN do 3 125 mld PLN, przy czym wyższa z wartości uwzględnia nakłady na budowę magazynów energii.

Efektem rozdziału nr 7 było udowodnienie prawdziwości postawionej tezy (patrz: rozdział 1.2) oraz realizacja dwóch celów dodatkowych, tj. nr 1 i nr 5 (patrz: rozdział 1.1).

W następnym rozdziale, zdefiniowanym jako podstawowy (rozdział nr 8), przedstawiono studium przypadku (case study) pracy systemu elektroenergetycznego z istotnym udziałem trudno prognozowalnych źródeł OZE o zmienny profilu generacji energii elektrycznej, których praca kompensowana jest przez elektrownie konwencjonalne wspomagane przez hybrydowy magazyn energii (magazyn energii mechanicznej [CAES] współpracujący z magazynem energii termicznej [UTES]).

Jak wielokrotnie podkreślano w treści niniejszej dysertacji, poprawa elastyczności oraz zapewnienie bezpieczeństwa i nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej jest jednym z kluczowych wyzwań transformacji systemów elektroenergetycznych, w tym Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Wyzwania te są pochodną polityk i strategii UE, zmierzających do uzyskania neutralności klimatycznej, głównie za sprawą wysokiego udziału źródeł odnawialnych w generacji energii elektrycznej, co autor wyczerpująco przeanalizował w rozdziale 2. W tym kontekście systemy CAES, mając za wyznacznik poziom możliwej do uzyskania mocy, są obecnie poważną alternatywą dla magazynów wykorzystujących elektrownie szczytowo-pompowe. Podstawowymi elementami systemów CAES są: (1) stacja sprężania powietrza, (2) zbiornik sprężonego powietrza, będący jednocześnie magazynem energii mechanicznej (w istniejących rozwiązaniach są to zazwyczaj podziemne zbiorniki, np. w postaci kawern skalnych, jaskiń solnych czy kopalń głębinowych), (3) stacja rozprężania z komorami spalania i turbinami gazowymi oraz (4) generator. W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję magazynu sprężonego powietrza (CAES) sprężonego z podziemnym magazynem energii cieplnej (UTES) i rozpatrzono w trzech poziomach, a mianowicie: (1) globalnym poziomie produkcji energii, (2) centralnym poziomie konwersji i magazynowania energii, (3) lokalnym poziomie magazynowania energii termicznej.

Następnie zaproponowano rozwiązanie, które w pewnym stopniu może poprawić warunki pracy KSE poprzez kompensowanie zmiennej produkcji energii elektrycznej przez trudno prognozowalne OZE pracą magazynu energii w układzie CAES (odpowiednią do bieżących warunków pracy KSE: (1) sprężanie powietrza [nadwyżka produkcji energii w KSE], (2) praca generatorowa [zapotrzebowanie na moc ze strony KSE]).

Analizie poddano dwa różne magazyny (1) z podziemnym wymiennikiem ciepła (UHE) i (2) bez niego (D-CAES). Sprawność pierwszego procesu ładowania i rozładowania kawerny wyniosła $\eta_{CAES} = 52,09\%$, co jest wartością zadowalającą, biorąc pod uwagę nieregularność pracy trudno prognozowalnych odnawialnych źródeł energii, takich jak farmy wiatrowe i fotowoltaiczne. Dodatkowo nowo zaproponowany układ CAES z UHE, będącym elementem składowym UTES, prowadzi do wzrostu sprawności do wartości $\eta_{CAES} = 52,26\%$.

Podziemny wymiennik ciepła (UHE) jest elementem zmniejszającym straty ciepła do otoczenia z systemu CAES, a tym samym zwiększającym sprawność konwersji energii. Aby uchwycić ten efekt, sprężono i opracowano zero-wymiarowy model systemu CAES z lokalnym podejściem Thermal-FSI. Określono zarówno moc wyjściową jak i sprawność obiegu CAES z i bez podziemnego wymiennika ciepła (UHE). Z termodynamicznego

i ekologicznego punktu widzenia CAES z UHE, będącym elementem składowym UTES, jest obiecującą technologią, która może wyjść naprzeciw wymogom „nowego systemu elektroenergetycznego” wysoce nasyconego trudno prognozowalnymi źródłami OZE i jednocześnie spełnić restrykcyjne normy ekologiczne. Z drugiej strony wysokie nakłady inwestycyjne i niskie gęstości mocy oraz nie do końca znane problemy eksploatacyjne ograniczają zastosowanie tego typu systemów magazynowania energii jedynie do źródeł pilotażowych. Na szersze wdrożenie, zdaniem autora, należy jeszcze poczekać, jednakże można zakładać, że potrzeby w zakresie magazynowania energii wymuszą tego typu inwestycje i jednocześnie zapewnią im odpowiednie uzasadnienie biznesowe.

Dodatkowo należy podkreślić zalety zero-wymiarowego modelu matematycznego. Równania stosowane w tych modelach wyrażone są za pomocą parametrów, które są stosunkowo łatwe do wyznaczenia. Model ów jest zbudowany w taki sposób, że może być zaimplementowany do ogólnego kodu obliczającego obiegi termodynamiczne, ponieważ UHE może współpracować z turbinami gazowymi lub innymi urządzeniami. Kolejną zaletą modelu jest jego kompatybilność z kodami numerycznymi CFD, dzięki czemu parametry modelu mogą być sprzężone z modelami 2D/3D w podejściu lokalnym.

Efektem rozdziału nr 8 była realizacja zadania głównego, które było jednocześnie drugim celem dodatkowym (patrz: rozdział 1.1).

Trzeci z filarów niniejszej dysertacji to analiza ekonomiczna i zbadanie uzasadnienia biznesowego dla koncepcji polegającej na budowie magazynu energii. Zadanie to przeprowadzono w ramach prac nad rozdziałem nr 9. Wykonane w ramach tegoż rozdziału analizy wskazują, że obecny poziom nakładów inwestycyjnych dla magazynów energii nie pozwala na osiągnięcie przez nie minimalnej, akceptowalnej dla inwestora stopy zwrotu ($IRR=WACC$). Mając na uwadze możliwe do uzyskania przychody z tytułu Rynku mocy oraz arbitrażu cenowego, niezbędny byłby spadek nakładów inwestycyjnych o ok. 13% w przypadku magazynów litowo-jonowych (przy uwzględnieniu zastrzeżenia, o którym mowa w przypisie nr 270). W przypadku pozostałych technologii magazynowania spadek nakładów musiałby być istotnie większy tak, aby inwestycja była zasadna ekonomicznie.

Obserwuje się systematyczny spadek kosztów technologii magazynowania energii, co może wskazywać, że za kilka lat wysokość nakładów inwestycyjnych będzie się kształtowała na poziomie wskazującym na racjonalność inwestycji w elektrochemiczne systemy magazynowania energii. Analizy wskazują, że bardziej opłacalna jest praca magazynów energii z wykorzystaniem arbitrażu cenowego niż w wariacie bilansowania OZE (patrz: rozdziały 9.4 i 9.5), zaś szczególnie duże różnice w tym zakresie występują w przypadku magazynów litowo-jonowych.

Magazyny litowo-jonowe charakteryzują się najniższym kosztem magazynowania energii zarówno pod kątem kosztów na 1 MWh pojemności, jak i 1 MW mocy rozładowania oraz, co istotne, charakteryzują się najwyższym poziomem sprawności. Wśród zalet magazynów litowo-jonowych należy wskazać dużą moc rozładowania oraz krótki czas reakcji, przez co idealnie nadają się one do stabilizowania parametrów jakościowych energii elektrycznej w KSE.

Kluczowym aspektem jest dalszy dynamiczny rozwój technologii, który pozwoli na spadek kosztów technologii magazynowania energii. Należy zwrócić uwagę, że rozwój magazynów energii jest jednym z kluczowych elementów dla wykonalności realizacji polityki klimatycznej do 2050 roku, czyli osiągnięcia neutralności klimatycznej poprzez zastosowanie odpowiednich technologii przetwarzania i magazynowania energii na poziomie całej Unii Europejskiej.

Efektem rozdziału nr 9 była realizacja czwartego celu dodatkowego (patrz: rozdział 1.1).

Pozostałe rozdziały, które jak wskazano we wstępie niniejszego streszczenia dysertacji, stanowią niezbędne jej uzupełnienie i wypełnienie celów uzgodnionych z promotorem, jak również będących spełnieniem słusznym wymogów postawionych przez dyrektora IMP PAN i Radę Naukową IMP PAN. Stanowią one konieczne i bogate tło do rozdziałów podstawowych. Na ich podstawie autor niniejszej pracy podejmował decyzje o wyborze takich a nie innych założeń do przeprowadzonych analiz i symulacji.

Rozdział 2. stanowił punkt wyjścia, niezbędne potwierdzenie, że zarówno tematyka pracy, jak też zarysowany nią obszar zainteresowań, jest zbieżny z politykami, strategiami i zadaniami określonymi na poziomie globalnym (ONZ), regionalnym (UE) i lokalnym (Polska). Z przeprowadzonych analiz wynika, że począwszy od *Karty Narodów Zjednoczonych*, powołującej do życia Organizację Narodów Zjednoczonych, poprzez Konferencję sztokholmską i niezwykle ważny raport Sekretarza Generalnego ONZ U Thanta pt. „Człowiek i jego środowisko” z 1969 roku, *Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu* z 1992 r., aż po *Szczyty Klimatyczne ONZ*, będące wynikiem UNFCCC, świat zjednoczony wokół ONZ powoli, acz coraz bardziej skutecznie wdraża zasady, które jednoznacznie stawiają troskę o przyszłość planety w centrum zainteresowania.

Jednym z motorów napędowych tych zmian jest Wspólnota Europejska, która poprzez kolejne reformy, zwane pakietami energetyczno-klimatycznymi, wdraża ustalenia, zapadające na forach agend ONZ oraz wprowadza swoje, indywidualne i ambitne cele.

Zdaniem autora największe znaczenie w obecnej dobie mają: (1) *Porozumienie paryskie*, które było pierwszym w historii powszechnym i prawnie wiążącym światowym porozumieniem w dziedzinie ochrony przed zmianami klimatu oraz (2) *Europejski Zielony Ład*, który jest zestawem polityk, strategii, działań i narzędzi do osiągnięcia przez Wspólnotę neutralności klimatycznej w 2050 r.

Polska poprzez stanowione prawo, a przede wszystkim dokumenty strategiczne w obszarze energetyki, tj. kolejne polityki energetyczne, transformuje sektor energetyczny i – na miarę swoich możliwości – sukcesywnie dekarbonizuje gospodarkę. Obecnie wdrożona polityka (PEP2021-2040) zadanie to realizuje poprzez trzy filary: (1) sprawiedliwą transformację, (2) zeroemisyjny system energetyczny i (3) dobrą jakość powietrza. Zapowiedziana rewizja PEP2021-2040 zakłada włączenie czwartego filaru (4) suwerenności energetycznej.

Megatrendy kształtujące polityki i strategie jasno wskazują rozwój odnawialnych źródeł energii jako fundament nadchodzących zmian. Dużo miejsca poświęcają także najpowszechniej występującemu we Wszechświecie pierwiastkowi, czyli wodorowi (H₂),

upatrując w nim (lub jego pochodnych) elementu łączącego odrębnie dzisiaj funkcjonujące sektory w jeden supersektor wodorowy.

W każdym dokumencie strategicznym, niezależnie od miejsca jego wdrożenia (ONZ, UE, Polska), odnawialne źródła energii są w centrum uwagi. To na rozwoju OZE opiera się strategia dekarbonizacyjne.

Efektem prac nad rozdziałem nr 2 była realizacja trzeciego celu dodatkowego (patrz: rozdział 1.1).

Rozdziały 3. i 4. z kolei poświęcone są przeglądowi technologii w obszarze odnawialnych źródeł wytwórczych (rozdział 3.) i magazynowania energii (rozdział 4.).

Praca wykonana przez autora niniejszej dysertacji przy przeglądzie literatury, a także bieżących danych statystycznych, handlowych, technicznych, eksploatacyjnych i operacyjnych została wykorzystana przy formułowaniu założeń do rozdziałów: 7, 8 i 9.

Rozdziały 5. i 6. stanowią przegląd danych statystycznych z obszaru energetyki, w tym z obszaru wybranych odnawialnych źródeł energii (rozdział 5.) i zaprezentowaniu charakterystyki pracy trudno prognozowanych źródeł energii (rozdział 4.).

Efektem prac nad rozdziałami nr 3, 4, 5 i 6 były pośrednio dowiedzenie prawdziwości postawionej przez autora tezy, realizacja zadania głównego oraz celów dodatkowych (patrz: rozdział 1.1).

Wnioski wynikające ze wskazanego powyżej przeglądu wzbogaciły wiedzę autora i niewątpliwie zostaną wykorzystane w przyszłych pracach badawczych. Praca nad dysertacją usystematyzowała nadto wiedzę autora na temat dynamiki rozwoju obszaru energetyki w ogólnie i obszaru odnawialnych źródeł energii w szczególności (w ujęciu globalnym, regionalnym i lokalnym). Wiedza ta z pewnością zostanie wykorzystana w pracy zawodowej, z pożytkiem dla jej jakości.

Gdańsk, 30 maja 2022 r.