Mgr inż. Jarosław Król Kraków 28.02.2020 r.

Katedra Energetyki

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Energetyka dwudziestego pierwszego wieku ma przed sobą wiele wyzwań, aby w przyszłości zapewnić bezpieczeństwo energetyczne i stabilność systemu energetycznego. W dobie rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną, rosnących cen paliw kopalnych, zobowiązań dotyczących wykorzystania odnawialnych źródeł energii, efektywności energetycznej oraz wymagających norm środowiskowych, konwencjonalna energetyka ustępuje miejsca nowym, bezemisyjnym technologiom. W celu ograniczenia negatywnych wpływów obecnej polityki energetycznej, jak również czynników makroekonomicznych, jednostki wytwórcze bazujące na węglu muszą nieustannie podejmować działania podnoszące efektywność energetyczno-ekonomiczną, aby utrzymać konkurencyjność. Rynek technologii energetycznych oferuje wiele rozwiązań umożliwiających zwiekszenie sprawności wytwarzania. Jednak większość z nich opiera się na założeniach inwestycyjnych, mających na celu modernizacje podnoszące efektywność energetyczną, dywersyfikację źródeł produkcji lub ograniczające emisję szkodliwych związków do środowiska. W przedstawionej pracy skoncentrowano się na podejściu bezinwestycyjnym, które ma na celu zoptymalizowanie pracy istniejących urządzeń i osiągnięcie maksimum efektywności energetyczno-ekonomicznej dostępnych zasobów. Optymalizacji poddano hybrydową elektrociepłownię, w której produkowana jest energia elektryczna i ciepło w trzech niezależnych źródłach. Jednostki wytwórcze wymienionej instalacji to kotły parowe połączone z turbiną upustowo-kondensacyjną, kotły wodne oraz silniki gazowe. Konfiguracja trzech niezależnych źródeł wytwórczych, daje duże możliwości optymalizacji reżimu pracy poszczególnych jednostek w zależności od zapotrzebowania na energię cieplną i aktualnej sytuacji na rynku energetycznym. Praca doktorska ma na celu zaproponowanie rozwiązania niewymagającego nakładów inwestycyjnych, w celu utrzymania istniejącego przemysłu energetycznego opartego na węglu w sposób bardziej efektywny energetycznie i zyskowny. Zasadniczą ideą proponowanego podejścia, jest świadome korzystanie z istniejących zasobów przy dużym nacisku na efektywność i śledzenie kosztów. W związku z tym opracowano model matematyczny hybrydowej elektrociepłowni, który umożliwia obliczenia ekonomiczne uwzględniające koszty emisji CO2 i ich wpływ na rentowność elektrociepłowni. Zaprezentowany model matematyczny jest uniwersalny dla podobnych systemów energetycznych i może być wykorzystywany w różnych zakresach analiz.

Dla lepszego zrozumienia, praca jest podzielona na główne tematy, opisane w poszczególnych rozdziałach. W rozdziale pierwszym (Wstępie) przedstawiono sytuację energetyczną Polski w kontekście rosnących kosztów emisji CO2, rosnących cen kopalnych nośników energetycznych, niestabilnych cen energii elektrycznej oraz zmiennego prawa energetycznego i środowiskowego. Zauważono, że przy wzroście cen emisji tony CO2 z 7 €/t do 25 €/t stare jednostki produkcyjne, oparte na kotłach parowych opalanych węglem, sprzęgniętych z turbiną upustowo-kondensacyjną, w szczególności wyłącznie z turbiną kondensacyjną, mogą być nieopłacalne. Jedną z możliwych alternatyw produkcji w skojarzeniu ciepła i energii elektrycznej może być produkcja w kotłach wodnych jako jednostkach szczytowych i silnikach gazowych, w ramach hybrydowego źródła ciepła. Rozdział drugi przedstawia rozeznanie literaturowe, w którym omówiono ostatnie prace związane z modelowaniem elektrociepłowni, hybrydowych źródeł ciepła oraz problematyką emisji CO2. W rozdziale trzecim przedstawiono zakres, tezę i cel pracy, którym jest opracowanie matematycznego modelu energetyczno-ekonomicznego hybrydowej elektrociepłowni. Algorytm oblicza kompletny bilans energetyczny oraz wynik finansowy aktywowanego modułu produkcyjnego, w funkcji przyjętego zapotrzebowania na moc grzewczą. W efekcie operator instalacji może świadomie podejmować decyzję o najbardziej ekonomicznie optymalnej konfiguracji pracy hybrydowej elektrociepłowni. Model ten został wdrożony, przetestowany i użytkowany w jednej z istniejących elektrociepłowni w Polsce. Zakres pracy obejmuje opracowaniu matematycznego algorytmu do optymalizacji pracy hybrydowej elektrociepłowni, wyposażonej w kotły parowe połączone z turbiną upustowokondensacyjną, kotły wodne oraz silniki gazowe. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków pracy instalacji, uwzględniono wszystkie istotne aspekty technologiczne, prawne i rynkowe. Teza pracy została sformułowana następująco: stworzenie przedstawionego algorytmu obliczeniowego, jest odpowiedzią na zapotrzebowanie jednostek produkcyjnych o złożonej strukturze wytwórczej dla tego typu analiz. Zastosowanie algorytmu pozwala na bieżąco śledzić koszty i przychody z produkcji energii elektrycznej i ciepła. Jest narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji dla najbardziej opłacalnej konfiguracji pracy elektrociepłowni hybrydowej.

Rozdział czwarty opisuje hybrydową elektrociepłownię. Badana instalacja składa się z trzech niezależnych jednostek wytwórczych. System energetyczny 1 to trzy kotły parowe o wydajności 50 t/h pary świeżej, połączone z turbiną upustowo-kondenscyjną o nominalnej mocy elektrycznej 20 MWe. System energetyczny 2 to dwa kotły wodne o nominalnej mocy termicznej 25 MW. System energetyczny 3 to z kolei dwa silniki gazowe o mocy sumarycznej 7,2 MWt oraz 8,4 MWe. Elektrociepłownia dla której opracowano model matematyczny, jest jednostką średniej wielkości, ale posiada ciekawą strukturę wytwórczą. Trzy niezależne systemy są podłączone do miejskiej sieci ciepłowniczej i mogą pracować równolegle lub oddzielnie, w zależności od zapotrzebowania na energię cieplną. Ideą optymalizacji jest znalezienie najbardziej opłacalnej konfiguracji pracy elektrociepłowni dla przewidywanego zapotrzebowania na moc grzewczą. Dodatkową zaletą jest możliwość ciągłego śledzenia kosztów produkcji, w opozycji do aktualnych cen sprzedaży energii elektrycznej i ciepła. W celu zbadania niekorzystnego wpływu pracy urządzeń kotłowych w zakresie niskich obciążeń, do analizy przyjęto zapotrzebowanie na ciepło z okresów przejściowych zima/wiosna, jesień/zima. Sezon przejściowy charakteryzuje się niskim zapotrzebowaniem na ciepło, a zarazem wysoką amplitudą, co wymusza na urządzeniach pracę w minimach technologicznych. Skutkuje to obniżoną sprawnością i zwiększonymi kosztami produkcji.

W rozdziale piątym przedstawiono model matematyczny hybrydowej elektrociepłowni w podziale na poszczególne systemy energetyczne: kotły parowe, kotły wodne oraz silniki gazowe. Podano również sposób w jaki wykonywane są obliczenia ekonomiczne.

W rozdziale szóstym przedstawiono dokładną analizę pracy elektrociepłowni wykorzystującej kotły parowe i kotły wodne. W tym rozdziale została wykonana szczegółowa analiza porównawcza funkcjonowania dwóch systemów energetycznych zasilanych węglem: systemu kogeneracyjnego opartego na kotłach parowych połączonych z turbiną upustowokondensacyjną oraz kotłów wodnych. Analiza systemu dowiodła mniejszej opłacalności układu kogeneracji z zastosowaniem turbiny upustowo-kondensacyjnej pracującej na niskich parametrach pary świeżej. W obecnie występujących trudnych warunkach rynkowych dla instalacji węglowych, badana technologia kogeneracyjna w porównaniu z tradycyjną technologią opartą na kotłach wodnych starego typu, generuję niższe zyski. Dodatkowo przeprowadzono analizę symulującą wzrost cen uprawnień do emisji CO2 z 7 €/t do 15 €/t i 30 €/t, co znacznie zwiększyło skalę strat generowanych w układzie kogeneracyjnym. Dowiodło to większej wrażliwości systemu CHP na wahania cen praw do emisji CO2.

W rozdziale siódmym omówiono dokładną analizę porównawczą energetycznoekonomiczną systemów wymienionych w rozdziale szóstym, z tą różnicą, że wyposażono je dodatkowo w dwa kogeneracyjne silniki gazowe. Zakres analizy został rozszerzony i skupiono się w nim na porównaniu opłacalności układów pracujących oddzielnie jak również współpracujących ze sobą. Mianowicie analizie poddano produkcję energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu z wykorzystaniem kotłów parowych oraz samego ciepła w kotłach wodnych. Dodatkowo zbadano współpracę wymienionych systemów z dwoma silnikami gazowymi, pracującymi w podstawie obciążenia zapotrzebowania na ciepło. Przeprowadzona analiza analogicznie uwzględniała wpływ kosztów emisji CO2, jak również dodatkowo zbadano wpływ „żółtych certyfikatów" na rentowność kogeneracji napędzanej gazem ziemnym. Wykazano, że silniki gazowe z uwagi na subsydiowanie produkcji energii elektrycznej prawami majątkowymi tzw. „żółtymi certyfikatami”, znacząco podwyższają rentowność elektrociepłowni gazowych.

W rozdziale ósmym, który jest główną częścią pracy, przeprowadzono szczegółową analizę produkcji energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu w oparciu o model hybrydowej elektrociepłowni opisany w rozdziale siódmym. Analizy dokonano przy użyciu opracowanego modelu matematycznego instalacji, dla dwóch konfiguracji produkcji:  Dwa silniki gazowe pracujące w podstawie obciążenia cieplnego w połączeniu z kotłem parowym i turbiną upustowo-kondensacyjną,  Dwa silniki gazowe pracujące w podstawie obciążenia cieplnego w połączeniu z kotłem wodnym. W rozdziale przeanalizowano pięć różnych scenariuszy, które uwzględniają wzrost cen uprawnień do emisji CO2, wzrost cen paliw tj. węgla oraz gazu ziemnego, w różnych kombinacjach. Podobnie jak w poprzednich dwóch analizach, wybrano profil mocy grzewczej wejściowej dla okresu przejściowego, aby wymusić pracę jednostek opalanych węglem przy niskich wydajnościach, w minimach technologicznych. Przeprowadzona analiza wykazuje słabość technologii energetycznych opartych na węglu w obecnie wykreowanym rynku energii. W największej stopniu ma na to wpływ wprowadzenie rynku uprawnień do emisji CO2 oraz subsydiowanie niskoemisyjnych technologii energetycznych. Dodatkowo analiza potwierdza znacząco niższą wrażliwość na wzrosty cen praw do emisji CO2 dla kogeneracji zasilanej gazem ziemnym, w szczególności przy uwzględnieniu wsparcia produkcji energii elektrycznej prawami majątkowymi.

W rozdziale dziewiątym przeprowadzono walidację opracowanego modelu matematycznego elektrociepłowni. Walidację wykonano w oparciu o dane z pięciu dni pracy układu energetycznego, porównano wolumeny produkcji energii elektrycznej uzyskane z modelu, z danymi rzeczywistymi z elektrociepłowni. Pomimo, że chwilowe wartości uzyskanej mocy różnią się do 20%, to całkowita ilość wyprodukowanej energii elektrycznej uzyskana z modelu różniła się tylko o 0,7% od rzeczywistej wartości uzyskanej w elektrociepłowni. Tak więc dla celów prognostycznych w dobie n+1, opracowany model jest wystarczająco dokładny.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono podsumowanie pracy i konkluzje. Najważniejsze wnioski to:  Idea hybrydowej elektrociepłowni jest bardzo aktualnym rozwiązaniem w czasie obecnie wykreowanego rynku energii, a w szczególności dla dynamicznych zmian na nim zachodzących (ceny paliw, kosztów emisji CO2, zmiany cen subsydiowania produkcji, regulacji środowiskowych). Najważniejszą wartością dodaną tego typu instalacji jest elastyczność produkcji oraz możliwość wyboru trybu pracy. W badanym przypadku są to trzy niezależne instalacje zasilane różnymi paliwami, dające możliwość różnych konfiguracji pracy w zależności od bieżącej sytuacji panującej na rynku energetycznym. Z punktu widzenia operatora instalacji jest to bardzo wygodne rozwiązanie, dające możliwość produkcji w najbardziej efektywnych energetycznie lub ekonomicznie jednostkach wytwórczych. Istota optymalizacji zysków z produkcji, efektywności energetycznej pozostaje zachowana, ale także co równie istotne, utrzymanie niezależności energetycznej.  Elektrociepłownie na węgiel kamienny połączone z turbinami upustowokondensacyjnymi, pracującymi przy niskich parametrach pary świeżej, są silnie uzależnione od kosztów emisji CO2 i zmiany cen nośników energetycznych. Przy cenie założonej w Scenariuszu 1 rentowność produkcji energii elektrycznej w części kondensacyjnej turbiny jest ujemna w ciągu 24 h pracy. Jeśli cena emisji CO2 i węgla wzrasta, a ceny energii pozostają niezmienne, strata drastycznie się pogłębia i znacząco obniża całkowity zysk ekonomiczny instalacji. Rozwiązaniem niskiej efektywności ekonomicznej, może być modernizacja turbiny w system przeciwprężny, w którym sekcja kondensacyjna wykorzystywana jest jako odrębna jednostka produkcyjna, eksploatowana tylko w ekonomicznie uzasadnionych warunkach.  Przykładowe kotły wodne to przestarzała technologia produkcji ciepła, jednak w porównaniu z badanym systemem węglowej kogeneracji, wyposażonym w turbinę upustowo-kondensacyjną, generuje wyższe zyski. Dodatkową zaletą kotłów wodnych jest mniejsza podatność na zmiany cen na rynku energii i zdecydowanie większa elastyczność działania.  Analizowana instalacja dwóch silników gazowych produkujących w skojarzeniu energię elektryczną i ciepło, generuje najwyższe przychody dla operatora instalacji. Wynika to głównie z subsydiowania produkcji energii elektrycznej w kogeneracji gazowej, jak również niższą emisyjnością CO2 (niemal dwukrotną), co znacznie zmniejsza wrażliwość instalacji na zmiany cen uprawnień do emisji. Z punktu widzenia aktualnej polityki energetycznej Unii Europejskiej produkcja ciepła i energii elektrycznej w jednostkach kogeneracyjnych zasilanych gazem ziemnym to przyszłość. Przy założeniu, że podaż uprawnień do emisji będzie ograniczana, w efekcie doprowadzi do znacznego wzrostu cen, co w efekcie przełoży się na dalszy rozwój elektrociepłowni gazowych.  Alternatywą dla rozwoju tradycyjnych jednostek wytwórczych, bazujących na paliwach kopalnych, jest rozwój odnawialnych źródeł energii wyposażonych w jednostki magazynowania energii. Elektrownia hybrydowa wyposażona w jednostki napędzane gazem ziemnym i odnawialne źródła energii, znacznie zmniejsza zależność od emisji CO2 i zmiany cen nośników energii.  Model matematyczny elektrociepłowni został zweryfikowany na podstawie rzeczywistych danych z pięciu dni pracy elektrociepłowni. Różnice pomiędzy rzeczywistym zapotrzebowaniem na energię elektryczną wynoszą do 20%, jednak skumulowana energia wytworzona przez model różni się o mniej niż 0,7% od rzeczywistych danych. W związku z tym model ten może być z powodzeniem wykorzystywany do przewidywania wydajności ekonomicznej elektrociepłowni w dłuższym okresie czasu.  Wykazano że modelowanie matematyczne hybrydowych elektrociepłowni jest ważnym narzędziem wspierającym produkcję energii elektrycznej i cieplnej. Pomimo faktu, że nie odzwierciedla ono idealnie końcowych parametrów produkcji, szczególnie w odniesieniu do wytwarzanej energii elektrycznej, dostarcza jednak ważnych informacji z perspektywy zarządzania operacyjnego. W rozdziale 11 podano literaturę wykorzystaną w pracy doktorskiej.