

Wieńczysław Wasik
„ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o.
Zakład Techniki Ciepłej

Regulacyjność bloków gazowo-parowych w kontekście bilansowania oraz obrony i odbudowy systemu elektroenergetycznego

Control capability of combined cycle gas turbine power plants in relation to balancing, defence and restoration of the power system

W artykule opisano właściwości regulacyjne bloków gazowo-parowych. Na podstawie przykładowych wyników testów odbiorowych przeprowadzonych przez „ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o. oceniono możliwość wykorzystania tych jednostek wytwórczych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym do regulacji mocy czynnej i częstotliwości, a także do udziału w obronie i odbudowie zasilania w przypadku wystąpienia awarii systemowej. Porównano również właściwości regulacyjne bloków gazowo-parowych z blokami węglowymi.

Słowa kluczowe: blok gazowo-parowy, regulacyjność, bilansowanie KSE, odbudowa KSE, testy odbiorowe

The article describes control properties of combined cycle gas turbine (CCGT) power plants. Based on the exemplary results of grid code tests performed by „ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o., the assessment is made of possible use of these generating units for active power and frequency control in the National Power System and also for participation in defence and restoration of the power supply system in case of its failure. Moreover, the article provides a comparison of control properties of CCGT power plants and coal-fired power plants.

Keywords: combined cycle gas turbine (CCGT) power plant, control capability, balancing of the National Power System, restoration of the National Power System, grid code tests

Wprowadzenie

W obliczu zachodzącej transformacji energetycznej, ukie-
runkowanej w szczególności na zastępowanie bloków węglowych
przez silnie zależne od warunków otoczenia (energii pierwotnej)
odnawialne źródła energii (OZE), mające uprzywilejowany dostęp
w dostarczaniu energii elektrycznej do sieci, konieczne będzie
podjęcie dodatkowych zadań regulacyjnych i produkcyjnych przez
inne konwencjonalne elektrownie ciepłone. Rolę taką, mimo koge-
neracyjnego charakteru pracy (wytwarzania ciepła i energii elek-
trycznej w skojarzeniu), mogłyby pełnić istniejące oraz planowane
wysokosprawne, niskoemisyjne bloki gazowo-parowe (BGP).

W niniejszym artykule, na podstawie zebranych doświad-
czeń z przeprowadzonych testów odbiorowych, zostały przed-
stawione wybrane właściwości regulacyjne BGP eksploato-
wanych w kraju oraz przykładowe wyniki badań wykonanych
na jednostkach wytwórczych gazowo-parowych pracujących
w konfiguracji jednowałowej.

Struktura regulacji bloku gazowo-parowego

Głównymi elementami układu automatycznej regulacji
(UAR) obciążenia BGP są regulatory turbiny gazowej i pa-
rowej, współpracujące ze sobą w ramach nadrzędnego ko-

ordynatora obciążenia, którego zadaniem jest bilansowanie
sumarycznej mocy turbozespołów do wartości żądanej przez
operatora lub wartości zadanej, otrzymywanej zdalnie z regu-
latora centralnego LFC.

Podczas normalnej eksploatacji BGP moc elektryczna po-
jedynczego generatora napędzanego turbiną gazową i parową
lub moc sumaryczna kilku generatorów (w przypadku rozwią-
zania wielowałowego) regulowana jest poprzez zmianę ilości
paliwa gazowego lub ciekłego na dopływie do komory spalania
szybko reagującej wiodącej turbiny gazowej. Nadążna turbina
parowa w celu uzyskania maksymalnej sprawności BGP pracuje
zazwyczaj na parametrach poślizgowych przy całkowicie otwar-
tych zaworach regulacyjnych. W tak przyjętym rozwiązaniu ko-
ordynator obciążenia BGP przekazuje moc zadaną bloku tylko
do regulatora turbiny gazowej.

W obrębie regulatora turbiny gazowej można wyróżnić na-
stępujące układy regulacji:

- otwartą pętlę sterowania położeniem zaworu paliwa, ak-
tywną podczas przyspieszania turbiny (naboru obrotów) do
prędkości synchronicznej w trakcie uruchamiania;
- układ regulacji obrotów z regulatorem typu PI, aktywnym
podczas pracy turbiny z generatorem odłączonym od sieci
w końcowej fazie uruchomienia przy dochodzeniu turbiny do
prędkości znamionowej lub po zrzuceniu obciążenia do pracy
na potrzeby własne / bieg luzem turbiny;

- układ regulacji obrotów ze statyzmem z regulatorem prędkości obrotowej typu P, aktywnym podczas pracy turbiny w sieci elastycznej (wydzielonej);
- układ regulacji mocy z regulatorem typu PI wyposażonym w dodatkowy układ korekcji mocy zadanej od częstotliwości, aktywnym podczas pracy turbiny z generatorem przyłączonym do sieci sztywnej;
- układ regulacji temperatury spalin na wylocie z turbiny pełniący funkcję ogranicznika temperatury maksymalnej, korygowanej w funkcji obrotów i temperatury powietrza na wlocie do sprężarki, z regulatorem temperatury oddziałującym na ograniczenie otwarcia zaworu paliwa;
- układ sterowania kątem otwarcia aparatu kierowniczego na wlocie do sprężarki (IGV), którego zadaniem jest utrzymanie prawidłowego ciśnienia i przepływu powietrza podczas rozbiegu turbiny do obrotów znamionowych, pracy z obciążeniem przy zbyt niskiej częstotliwości, zrzucie mocy i zmniejszaniu obrotów w czasie odstawiania turbiny oraz utrzymanie temperatury spalin wylotowych na poziomie zadanej temperatury referencyjnej podczas obciążania turbiny gazowej.

O wyborze sygnału sterującego położeniem zaworu paliwa w danym etapie pracy turbiny gazowej decyduje bramka logiczna minimum, która wybiera najmniejszą wartość odpowiednio znormalizowanych sygnałów wyjściowych z: regulatora przyspieszenia wału, regulatora prędkości obrotowej, regulatora mocy, programu uruchomienia i odstawienia turbiny gazowej oraz ograniczników.

Wpływ parametrów otoczenia na pasmo regulacyjne bloku gazowo-parowego

Pasmo mocy regulacyjnej Jednostek Wytwórczych Centralnie Dysponowanych (JWCD) określone jest przedziałem obciążenia od poziomu minimum technicznego do poziomu mocy osiągalnej. Zgodnie z zaleceniami *Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej* (IRiESP) [1] pasmo regulacyjne jednostek wytwórczych powinno zawierać się w zakresie od 40 do 100% mocy znamionowej.

W przypadku BGP występuje silna zależność pasma regulacyjnego od warunków otoczenia (pogodowych), w szczególności temperatury powietrza oraz, w mniejszym stopniu, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności względnej powietrza. Pozostałe czynniki wpływające na poziom minimum technicznego i mocy osiągalnej to: produkcja ciepła (w wodzie i/lub w parze technologicznej), praca instalacji antyoblodzeniowej oraz częstotliwość sieci. Biorąc pod uwagę powyższe zagadnienia można określić następujące parametry brzegowe pasma regulacyjnego BGP:

- minimum środowiskowe $P_{\min_MEL}$ (ang. *minimum environmental load* – MEL),
- moc osiągalna dyspozycyjna P_{os_dysp} w bieżących warunkach otoczenia, zwana również obciążeniem podstawowym (ang. *base load*),

- moc osiągalna deklarowana P_{os} , definiowana tylko w odniesieniu do jednoznacznych warunków referencyjnych (określonego punktu bilansowego, najczęściej dla temperatury otoczenia +8°C, wybranego ciśnienia otoczenia i wilgotności względnej powietrza).

Minimum środowiskowe (MEL) oznacza moc minimalną całego BGP, przy którym turbina gazowa pracuje w niskoemisyjnym trybie spalania (z zachowaniem wymaganego poziomu emisji, w szczególności NO_x), z uwzględnieniem wpływu parametrów otoczenia na generowaną moc czynną, natomiast turbina parowa pracuje najczęściej z pełnym poślizgiem. Zazwyczaj różni się dwa poziomy minimum środowiskowego: niższą wartość w trybie pośrednim z produkcją ciepła oraz wyższą wartość podczas pracy BGP w pełnej kondensacji.

Pod pojęciem mocy osiągalnej dyspozycyjnej należy rozumieć maksymalną w danej chwili moc czynną BGP zależną od parametrów zewnętrznych (zwłaszcza temperatury otoczenia) oraz od reżimu pracy (trybu kondensacyjnego lub ciepłowniczego). Podczas eksploatacji BGP z obciążeniem podstawowym turbina gazowa pracuje z aktywnym ogranicznikiem temperatury spalin wylotowych (przy maksymalnym kącie otwarcia aparatu kierowniczego na wlocie do sprężarki), natomiast turbina parowa prowadzona jest w trybie ciśnienia poślizgowego z całkowicie otwartymi zaworami regulacyjnymi.

Moc osiągalna deklarowana (P_{os}) oznacza z kolei potwierdzoną testem odbiorowym moc maksymalną BGP w trybie kondensacyjnym, z uwzględnieniem wpływu parametrów zewnętrznych na generowaną moc czynną.

Należy zaznaczyć, że powyższe pojęcia parametrów brzegowych pasma regulacyjnego BGP wynikają wprost ze specyfiki pracy turbiny gazowej i nie mają zastosowania dla bloków węglowych.

W praktyce zakres pasma regulacyjnego BGP zawiera się zazwyczaj w następujących granicach: od 38 do 47% P_{os} do poziomu mocy osiągalnej dyspozycyjnej (P_{os_dysp}).

Regulacja mocy czynnej i częstotliwości

Częstotliwość w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) utrzymywana jest na żądanym poziomie przez:

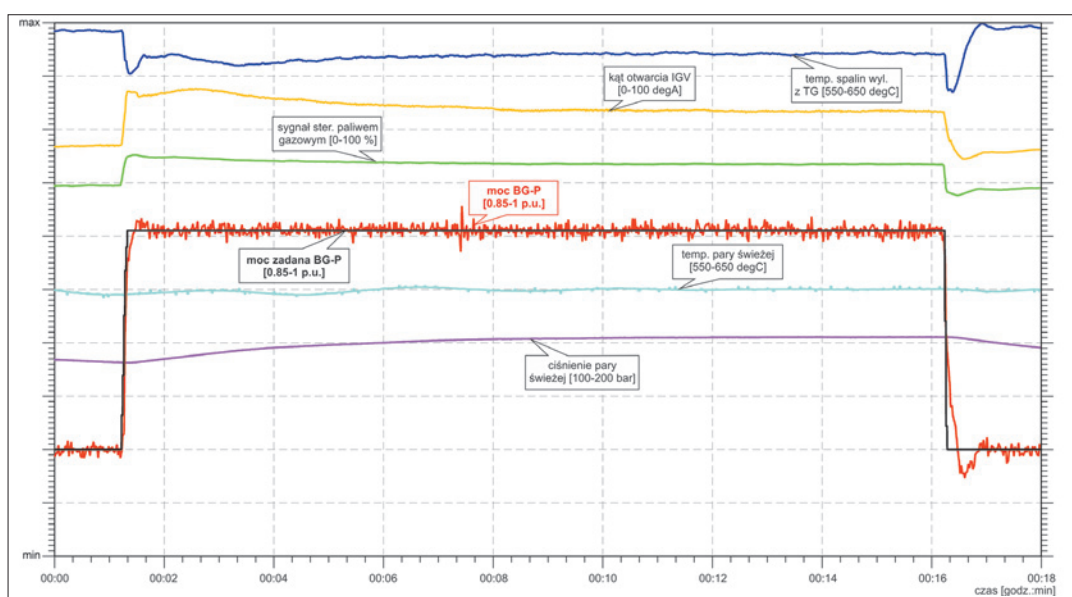
- regulację pierwotną (sekundową), realizowaną przez regulatory prędkości obrotowej generatorów JWCD w odpowiedzi na odchyłkę częstotliwości, zgodnie z nastawionym statyzmem;
- regulację wtórną (minutową), realizowaną przez układy automatyki blokowej JWCD w odpowiedzi na indywidualne sygnały regulacyjne wartości zadanej mocy czynnej ΔP_{w_zadane} otrzymywane z regulatora centralnego LFC, której zadaniem jest przywrócenie częstotliwości znamionowej oraz odbudowa rezerwy regulacji pierwotnej;
- regulację trójną (godzinową), realizowaną przez układy automatyki blokowej JWCD w odpowiedzi na otrzymywane w Bieżących Planach Koordynacji Dobowej (BPKD) 15-minutowe Bieżące Punkty Pracy (BPP), mającą na celu odbudowę rezerwy wtórnej oraz dobowo-godzinowe bilansowanie obciążenia w KSE.

Zakresy regulacji pierwotnej i wtórnej wynoszą zazwyczaj $\pm 5\%$ mocy osiągalnej i muszą być dostępne w całym pasmie regulacyjnym, przy czym w przypadku BGP wyznaczone są one względem przyjętej wartości mocy osiągalnej deklarowanej. Niezależnie od aktywnego znacznika regulacji (1, 2 lub 3) praca JWCD w regulacji pierwotnej i/lub wtórnej nie może powodować pracy jednostki wytwórczej w zaniżeniu (poniżej dolnego brzegu pasma), jak i w przeciążeniu (powyżej górnego brzegu pasma).

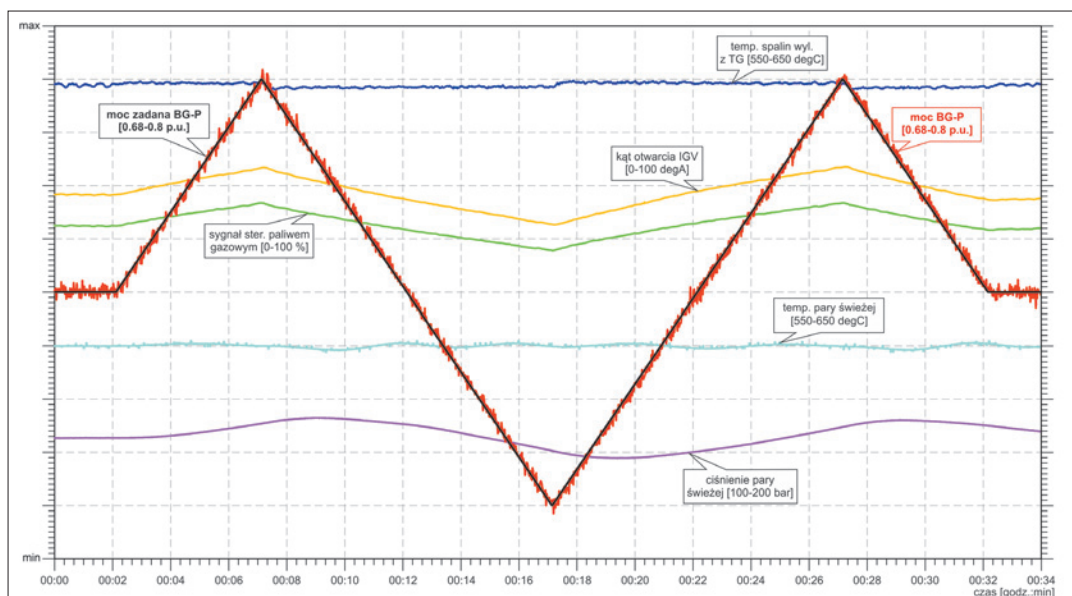
Udział BGP w regulacji pierwotnej, wtórnej i trójnej wymaga zastosowania określonej struktury i właściwych nastaw regulatora turbiny gazowej w celu zapewnienia wymaganej dynamiki zmian obciążenia całego bloku. Aby spełnić wymagania dla regulacji pierwotnej, zwłaszcza w zakresie aktywowania pełnej odpowiedzi mocy wynikającej z charakterystyki statycznej i odchyłki częstotliwości w czasie do 30 sekund, konieczne jest przejściowe przeregulowanie turbiny gazowej w celu

skompensowania powolnej reakcji turbiny parowej. Dlatego też, ze względu na to, że $2/3$ mocy sumarycznej generowanej przez BGP jest udziałem turbiny gazowej, konieczne jest ustawienie w regulatorze turbiny gazowej większej nastawy wzmocnienia, np. dla oczekiwanego 6% statyzmu BGP regulator turbiny gazowej powinien mieć nastawiony statyzm 4% ($0,66 \times 6\%$). Spotykane są również inne rozwiązania, w których np. przy niewielkim wzroście częstotliwości w KSE (w kierunku zmniejszania mocy) turbina parowa pełni funkcję wspomagającą, wykorzystując efekt szybkiego „zaworowania” (przymknięcia zaworów regulacyjnych), natomiast turbina gazowa doregulowuje moc do wartości oczekiwanej, wynikającej z odchyłki częstotliwości i ustawionego statyzmu regulacji BGP.

Przykładowe wyniki badań działania regulacji pierwotnej, wtórnej i trójnej przedstawiono na rysunkach od 1a do 3. Wynika z nich, że oczekiwana zmiana obciążenia BGP o $+5\% P_{os}$, w odpowiedzi na działanie regulacji pierwotnej, osiągnięta jest zgodnie

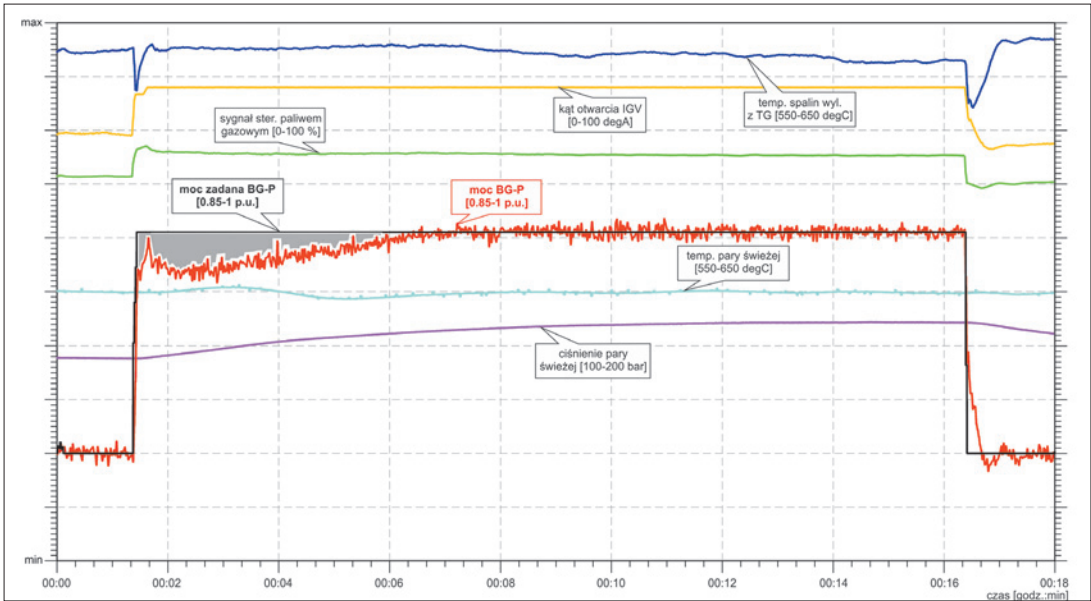


Rys. 1a.
Próba działania regulacji pierwotnej $+5\% P_{os}$ w odpowiedzi na symulowaną odchyłkę częstotliwości $\Delta f = -450$ mHz wokół mocy bazowej $P_B = P_{os_dysp} - 7,5\% P_{os}$ przy ustawionym statyzmie BGP $s = 6\%$ i znieczulonej regulacji pierwotnej ($\Delta f_0 = \pm 300$ mHz)
Źródło: opracowanie własne

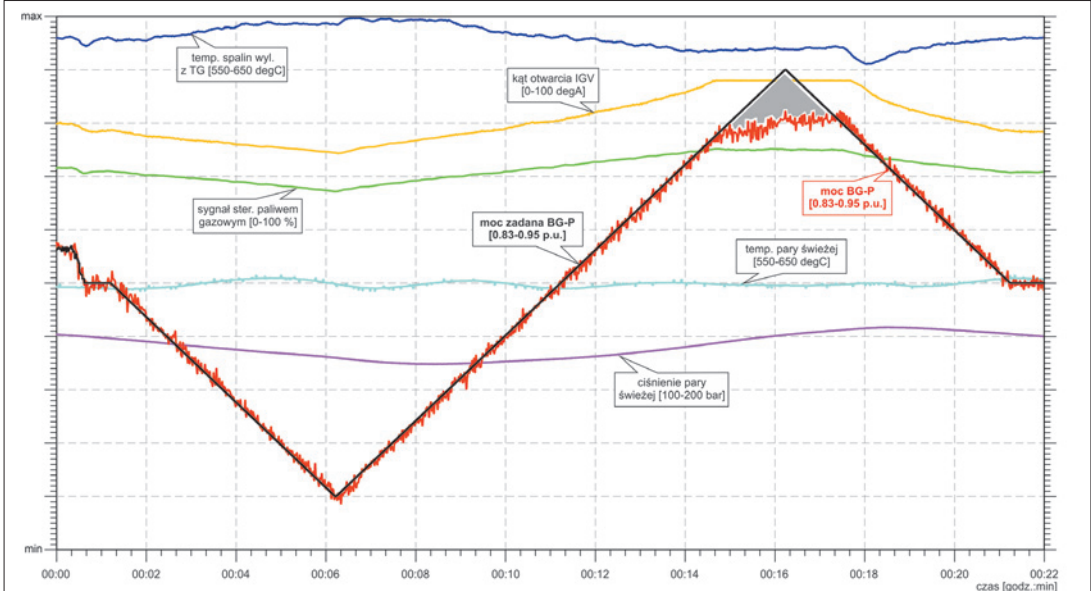


Rys. 2a.
Próba działania regulacji wtórnej $\pm 5\% P_{os}$ wokół mocy bazowej $P_B = P_{os_dysp} - 7,5\% P_{os}$
Źródło: opracowanie własne

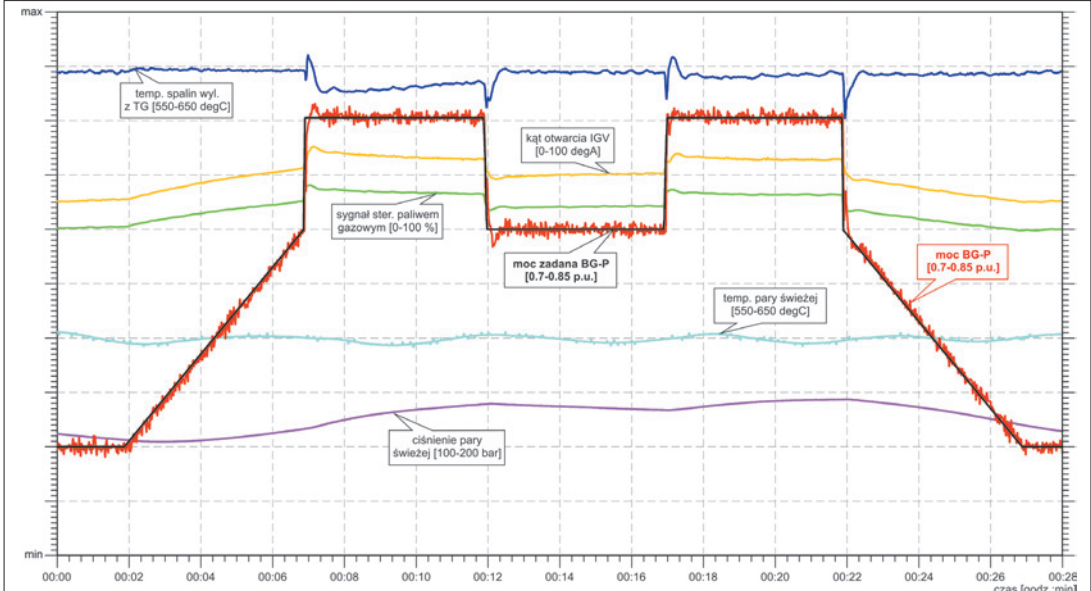
Rys. 1b.
Próba działania regulacji
pierwotnej $+5\% P_{os}$
w odpowiedzi
na symulowaną
odchyłkę częstotliwości
 $\Delta f = -110$ mHz
wokół mocy bazowej
 $P_B = P_{os_dysp} - 5\% P_{os}$
przy ustawionym
statyzmie BGP $s = 4\%$
i załączonej regulacji
pierwotnej
($\Delta f_o = \pm 10$ mHz)
Źródło: opracowanie
własne



Rys. 2b.
Próba działania
regulacji wtórnej $\pm 5\% P_{os}$
wokół mocy bazowej
 $P_B = P_{os_dysp} - 5\% P_{os}$
Źródło: opracowanie
własne



Rys. 3.
Próba współdziałania
regulacji pierwotnej
 $\pm 2,5\% P_{os}$ w odpowiedzi
na symulowaną
odchyłkę częstotliwości
 $\Delta f = \pm 60$ mHz
przy ustawionym
statyzmie BGP $s = 4\%$
i załączonej
regulacji pierwotnej
($\Delta f_o = \pm 10$ mHz)
oraz regulacji wtórnej
 $\pm 5\% P_{os}$ wokół mocy
bazowej $P_B = 75\% P_{os}$
Źródło: opracowanie
własne



z wymaganiami IRIESP do 30 sekund (z czego połowa zakresu aktywowana jest w czasie poniżej 15 sekund), a po tym okresie w stanie ustalonym moc utrzymywana jest w sposób trwały z dokładnością $\pm 1\% P_{os}$. Jak można zauważyć, skokowym zmianom mocy towarzyszą wtedy szybkie, przejściowe zmiany temperatury spalin rzędu ok. $\pm 1\%$ wartości ustalonej w czasie do 30 sekund, nie powodując istotnych zaburzeń temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej. Z kolei w przypadku załączonej regulacji wtórnej moc rzeczywista nadąża równomiernie za mocą zadaną z prędkością $1\% P_{os}/\text{min}$, a jej aktywacja następuje w czasie kilku sekund. Takie pożądane działanie regulacji pierwotnej i wtórnej w pobliżu górnego brzegu pasma regulacji będzie możliwe, o ile zapewniona zostanie odpowiednia rezerwa w stosunku do mocy osiągalnej dyspozycyjnej. Dla BGP wiąże się to z koniecznością przyjęcia niższego poziomu mocy bazowej w górnym przedziale pasma regulacji względem obciążenia podstawowego, jaki można by uzyskać dla aktualnych parametrów otoczenia.

Z analizy przeprowadzonych testów, których przebieg pokazano na rysunkach 1a, 1b, 2a i 2b, wynika, że rezerwa pasma dla regulacji pierwotnej i wtórnej (dla każdej z nich z osobna) powinna wynosić ok. $7,5\% P_{os}$. Jak pokazują rysunki 1b i 2b, dysponowanie mniejszą rezerwą, np. 5% , będzie skutkować niedotrzymaniem wskaźników regulacyjnych z powodu zadziałania ogranicznika temperatury spalin wylotowych z turbiny gazowej.

Szybkość zmiany obciążenia (rampa)

Zgodnie z zaleceniami IRIESP [1] szybkość zmiany mocy czynnej w zakresie pasma regulacyjnego konwencjonalnych jednostek wytwórczych (przy wyłączonej regulacji pierwotnej i wtórnej) powinna być realizowana z prędkością od 2 do $8\% P_{os}/\text{min}$. Wymogi ogólnego stosowania kodeksu sieci NC RfG [2] stanowią z kolei, że minimalne i maksymalne wartości graniczne prędkości zmiany mocy generowanej dla nowych jednostek ciepłych gazowych pracujących w obiegu zamkniętym powinny wynosić

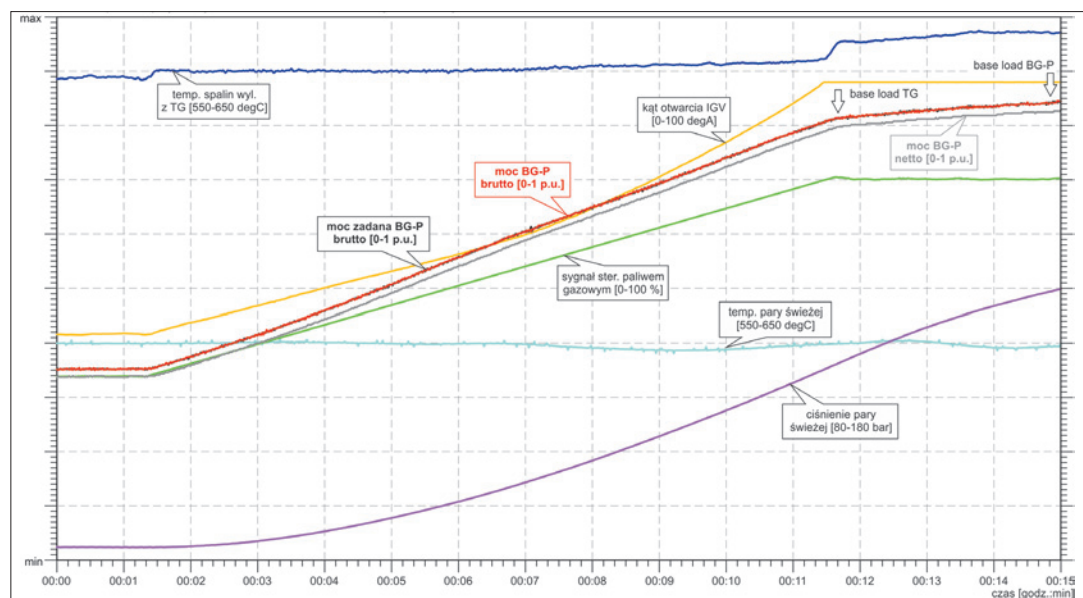
od 5 do $8\% P_{os}/\text{min}$, a dla obiegu otwartego (bez turbiny parowej) nawet od 12 do $20\% P_{os}/\text{min}$.

Ze względu na inercyjny charakter części parowej BGP (ok. 2–3-minutowe opóźnienie kotła odzysknicowego i turbiny parowej względem turbiny gazowej) gradient ciągłej zmiany obciążenia BGP w zakresie od $P_{\text{min_MEL}}$ do $P_{\text{os_dysp}}$ wyznaczany jest jako średnia wartość prędkości, zmierzona od momentu rozpoczęcia zmiany wymuszenia do chwili osiągnięcia przez turbinę gazową obciążenia podstawowego, tj. do momentu trwałego aktywowania ogranicznika temperatury spalin wylotowych (ograniczenia ilości paliwa).

Przykładowy przebieg próby liniowych zmian obciążenia BGP w trybie kondensacyjnym, którego celem było sprawdzenie możliwości zmiany obciążenia z prędkością $4,5\% P_{os}/\text{min}$ w kierunku dociążania, przedstawiony został na rysunku 4.

Uzyskany wynik testu potwierdził zdolność BGP do szybkiej, liniowej zmiany obciążenia z zadanym gradientem. Na szczególną uwagę zasługują następujące właściwości BGP: brak opóźnienia w początkowej fazie zmiany obciążenia, liniowe nadążanie mocy generowanej za mocą zadaną do momentu osiągnięcia poziomu obciążenia podstawowego turbiny gazowej (poza niewielkimi zakłóceniami występującymi podczas przełączania trybów spalania) oraz praktycznie stała różnica pomiędzy mocą brutto a mocą netto w całym zakresie pasma regulacyjnego. Jest to zasadnicza, korzystna różnica w porównaniu z blokami węglowymi, gdzie zazwyczaj po rozpoczęciu wymuszenia moc regulowana nie nadąża za mocą zadaną ze względu na „łagodne” formowanie mocy zadanej dla regulatora turbiny z uwzględnieniem inercyjnego modelu kotła (wg tzw. krzywej „s”), natomiast wraz z naborem obciążenia, któremu towarzyszy załączanie kolejnych napędów, m.in. młynów węglowych, pomp wody zasilającej (zwłaszcza w pobliżu górnego brzegu pasma regulacyjnego), obserwuje się większą rozbieżność pomiędzy wartościami mocy czynnej brutto i netto.

W praktyce prędkość zmiany obciążenia BGP w zakresie od $P_{\text{min_MEL}}$ do $P_{\text{os_dysp_TG}}$ wynosi od 4 do $7\% P_{os}/\text{min}$.



Rys. 4.
Próbę liniowych zmian obciążenia BGP z prędkością $4,5\% P_{os}/\text{min}$
Źródło: opracowanie własne

Czasy rozruchu

Według zaleceń IRIESP [1] konwencjonalne jednostki wytwórcze powinny być przystosowane do co najmniej 200 uruchomień w ciągu roku, a czasy rozruchu liczone od momentu wydania polecenia uruchomienia do momentu uzyskania poziomu minimum technicznego nie powinny przekroczyć:

- dwóch godzin dla uruchomienia ze stanu gorącego (po postoju do ośmiu godzin),
- trzech godzin dla uruchomienia ze stanu ciepłego (po postoju od ośmiu do pięćdziesięciu godzin),
- pięciu godzin dla uruchomienia ze stanu zimnego (po postoju powyżej pięćdziesięciu godzin).

Procedura oraz czas rozruchu BGP zależą w dużym stopniu od konfiguracji jednostki (układu jedno- lub wielowalowego) oraz stanu cieplnego turbiny parowej. Pierwsza faza rozruchu, czyli uruchomienie turbiny gazowej do prędkości znamionowej wraz z przyłączeniem generatora do sieci, obejmuje:

- start urządzenia rozruchowego (którym może być zewnętrzny silnik elektryczny bądź generator pracujący jako silnik synchroniczny o zmiennej częstotliwości i napięciu) do prędkości wentylacji kotła odzysknicowego,
- przewietrzanie (wentylacja) kotła odzysknicowego,
- wybieg turbiny gazowej do prędkości zapłonu,
- zapłon turbiny gazowej,
- chwilowe wygrzewanie turbiny gazowej na stałych obrotach,
- przyspieszanie wału (nabór obrotów),
- wyłączenie urządzenia rozruchowego w momencie wytworzenia dodatniej różnicy pomiędzy mocą wytwarzaną przez turbinę gazową a mocą napędową pobieraną przez sprężarkę,
- wzbudzenie generatora,
- osiągnięcie obrotów znamionowych,
- synchronizację generatora z siecią oraz nabór obciążenia wstępnego do poziomu tzw. rezerwy wirującej.

W przypadku rozwiązania jednowalowego nieposiadającego sprzęgła pomiędzy generatorem i turbiną parową, dodatkowo przed uruchomieniem turbiny gazowej, konieczne jest wytworzenie odpowiedniej próżni w kondensatorze oraz uszczelnienie dławnic turbiny parowej. Zazwyczaj maksymalny czas rozruchu turbiny gazowej do synchronizacji (niezależnie od stanu termicznego turbiny parowej) wynosi do 30 minut. W sytuacji kiedy wcześniejsze wyłączenie turbiny gazowej nastąpiło w trybie normalnej sekwencji, a nie w wyniku awaryjnego odstawienia (wybicia), niektórzy dostawcy nie stosują przewietrzania kotła odzysknicowego. Pozwala to skrócić czas naboru obrotów turbiny gazowej o ok. 10 minut.

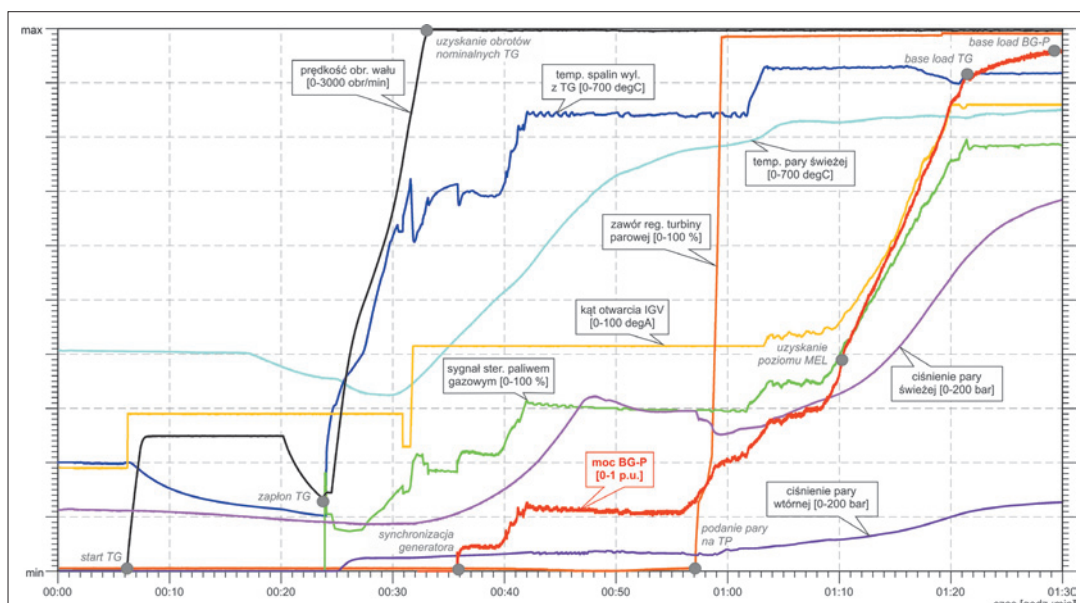
Uruchomienie kompletnego BGP jest bardziej czasochłonne i skomplikowane niż rozruch samej turbiny gazowej, ze względu na konieczność dochowania reżimów napiężeń cieplnych kotła odzysknicowego, turbiny parowej i kolektorów. Zasadniczym parametrem, istotnym dla prawidłowego przebiegu rozruchu części parowej, jest utrzymywanie stałej temperatury spalin wylotowych, mimo przyrostu obciążenia turbiny gazowej, poprzez aparat kierowniczy na wlocie do sprężarki regulującej ilość powietrza do kompresora.

Na rysunku 5 przedstawiono często występujący w warunkach eksploatacji przebieg rozruchu BGP ze stanu gorącego (po postoju nocnym, do ośmiu godzin), z zaznaczeniem charakterystycznych etapów uruchomienia. W analizowanym przypadku czas rozruchu BGP do pełnej mocy wyniósł 84 minuty, w tym czas do synchronizacji generatora z siecią 30 minut, natomiast czas do uzyskania minimum środowiskowego ok. 65 minut.

W praktyce czasy rozruchu BGP są z reguły krótsze niż zalecane przez IRIESP [1] i wynoszą odpowiednio:

- ok. godziny dla rozruchu ze stanu gorącego,
- od godziny do ok. trzech godzin dla rozruchu ze stanu ciepłego,
- od trzech do ok. czterech godzin dla rozruchu ze stanu zimnego.

Rys. 5.
Próba czasu
rozruchu BGP
ze stanu gorącego
po postoju
do ośmiu godzin
Źródło: opracowanie
własne



Wybrane zagadnienia obrony i odbudowy zasilania KSE

Gotowość BGP do obrony i odbudowy zasilania KSE oznacza jego zdolność do:

- opanowania zrzutów obciążenia do pracy na potrzeby własne (PPW),
- przechodzenia do pracy wyspowej zarówno z nadmiarem, jak i umiarkowanym niedoborem mocy generowanej w stosunku do mocy pobieranej przez wyspę w momencie wydzielania,
- regulacji częstotliwości i napięcia w sieci elastycznej, w tym opanowania zakłóceń spowodowanych załączaniem lub wyłączaniem odbiorników elektrycznych, odpowiadających skokowym zmianom mocy do $\pm 10\% P_{os}$,
- pracy w warunkach nieznamionowych parametrów zasilania (przy obniżonej częstotliwości i napięciu),
- podania napięcia na szyny najbliższej rozdzielni będącej w stanie beznapięciowym,
- obciążania w trybie pracy wyspowej po synchronizacji generatora(-ów) z KSE.

Dodatkowym, nieobligatoryjnym wymaganiem jest zdolność do samostartu w sytuacji zaniku napięcia w KSE. W przypadku posiadania takiej możliwości zdolność BGP do opanowania zrzutów obciążenia na potrzeby własne nie jest wymagana.

W trybie PPW (po wyłączeniu wyłącznika blokowego lub sieciowego) regulator turbiny gazowej zostaje przełączony do regulacji prędkości obrotowej izochronicznej, której zadaniem jest przywrócenie obrotów znamionowych, po ich chwilowym wzroście spowodowanym nierównowagą pomiędzy wytwarzaną mocą mechaniczną a mocą elektryczną odbieraną z generatora. Z powodu niskiego zapotrzebowania BGP na energię elektryczną turbina parowa jest natychmiast wyłączana z uwagi na niski strumień ciepła w spalinach z tur-

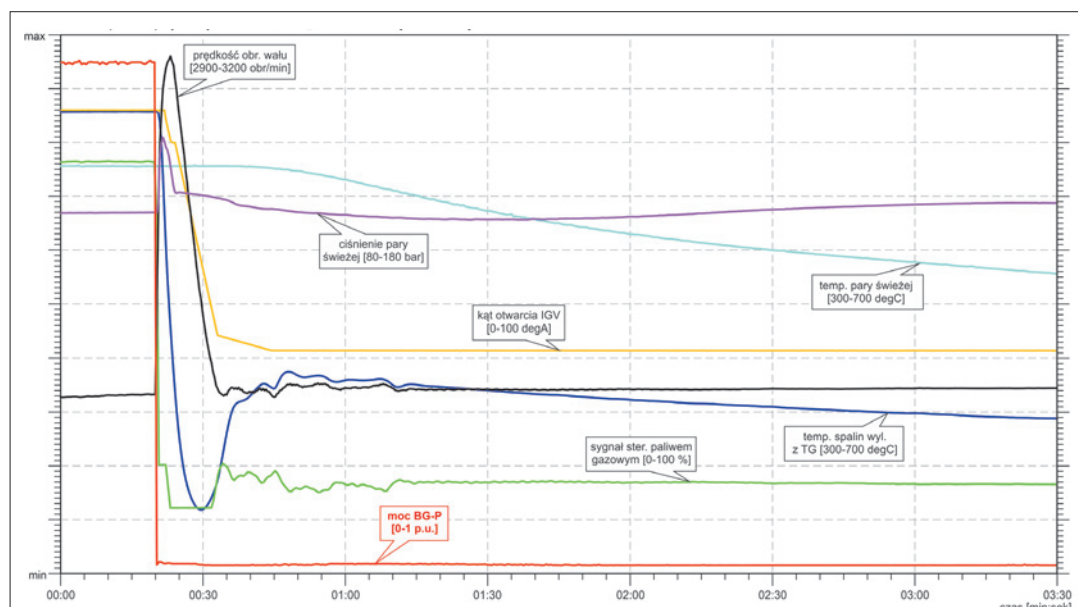
biny gazowej, który w krótkim czasie prowadziłby do spadku temperatury pary na wylocie z kotła odzysknicowego poniżej wartości minimalnej akceptowanej przez turbinę parową. Po zrzucie mocy turbina gazowa i kocioł odzysknicowy pozostają w ruchu obejściowym z otwartymi stacjami rozruchowo-zrzutowymi.

Przykładowy przebieg zrzutu mocy BGP do PPW z pełnego obciążenia przedstawiono na rysunku 6.

Zgodnie z wymaganiami IRIESP [1] jednostki wytwórcze przystosowane do pracy wyspowej powinny mieć możliwość ręcznego oraz automatycznego – z chwilą wystąpienia uzgodnionej odchyłki częstotliwości, która obecnie wynosi $\pm 1,3$ Hz (z czasem zwłoki 1 s) – załączenia proporcjonalnego regulatora prędkości obrotowej turbiny. Zrzut do pracy wyspowej (wydzielonej), będący wynikiem podziału systemu na niezbilansowane obszary obciążeniowe (w tym przypadku z nadmiarem generowanej mocy), jest trudniejszy do opanowania, ponieważ odbywa się w warunkach braku identyfikacji stanu łączników w torze wprowadzenia mocy.

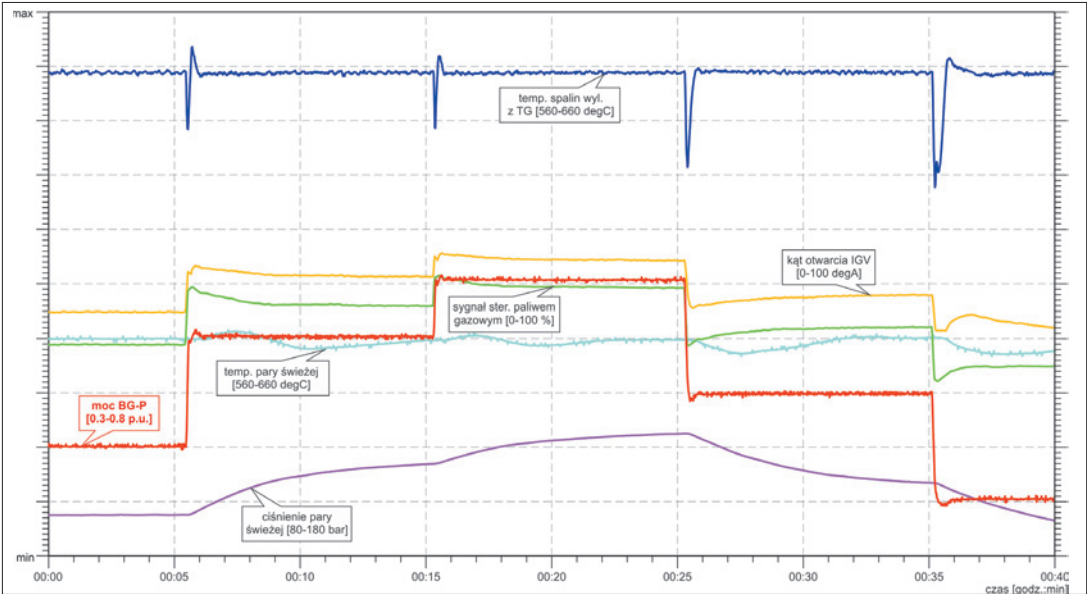
Kolejnym utrudnieniem dla BGP jest „z góry niezany” poziom obciążenia wyspy, co w przypadku turbiny gazowej stwarza ryzyko utraty płomienia podczas sekwencyjnego przełączania trybów spalania. Aby temu zapobiec, producenci turbin gazowych stosują algorytmy wspomagające identyfikację „dużej” i „małej” wyspy, wykorzystując oprócz odchyłki częstotliwości dodatkowe kryterium szybkości zmiany częstotliwości w czasie. Pozwala to w miarę szybko przełączyć turbinę gazową do oczekiwanego trybu spalania, tj. dyfuzyjnego w przypadku wystąpienia wyspy o rozmiarze lokalnym lub innego pośredniego dla wyspy regionalnej.

Jak wspomniano, w trakcie procesu odbudowy zasilania KSE pożądaną cechą jednostek wytwórczych jest zdolność do szybkiego reagowania regulatora prędkości obrotowej typu P na zmiany częstotliwości spowodowane załączaniem i/lub wyłączeniem odbiorników elektrycznych na wyspie, tak aby zmiany częstotliwości w warunkach pracy wyspowej (wydzielonej)



Rys. 6.
Próba zrzutu
mocy BGP
do pracy
na potrzeby własne
Źródło: opracowanie
własne

Rys. 7.
Próba skokowych zmian
obciążenia BGP
od ± 5 do $\pm 10\% P_{os}$
w trybie pracy wyspowej
Źródło: opracowanie
własne



nie przekroczyły odchyłki ± 1 Hz. W przypadku BGP kompensowanie zakłóceń odbywa się poprzez szybko reagującą turbinę gazową. Jest to korzystniejsze rozwiązanie niż w przypadku klasycznych bloków węglowych, gdzie zazwyczaj wymagane jest utrzymywanie 10% rezerwy pary ponad aktualne zapotrzebowanie turbiny parowej.

Przykładowy przebieg odpowiedzi BGP na symulowane odchyłki częstotliwości (w sieci sztywnej), skutkujące szybkimi zmianami obciążenia od 5 do 10% P_{os} , przedstawiono na rysunku 7. Są one realizowane praktycznie skokowo, w czasie do 30 sekund, przy czym 10% szybkim zmianom obciążenia towarzyszą przejściowe zmiany temperatury spalin do ok. 3,5% wartości ustalonej.

Jako podsumowanie powyższych rozważań w tabeli 1 zestawiono właściwości regulacyjne BGP i bloków ciepłych węglowych.

Z porównania poszczególnych parametrów wynika, że BGP posiadają korzystniejsze wskaźniki regulacyjne niż bloki węglowe. Na szczególną uwagę zasługują: czas uruchomienia do synchronizacji generatora z siecią wynoszący maksymalnie do 30 minut, a także zdolność do realizacji skokowych zmian obciążenia $\pm 10\% P_{os}$ w ciągu 30 sekund.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule korzystne własności dynamiczne BGP przemawiają za ich wykorzystaniem w KSE do regulacji mocy czynnej i częstotliwości, a także do udziału w obronie i odbudowie zasilania w razie awarii systemowej, przy jednoczesnym zminimalizowaniu niekorzystnego oddziaływania na środowisko.

Mając na uwadze obecny i planowany dynamiczny rozwój energetyki odnawialnej (głównie wiatrowej i fotowoltaicznej) oraz postępującą dekarbonizację sektora energetycznego najlepszym sposobem na równoważenie zmiennego poziomu wytwarzania energii elektrycznej przez OZE mogą być BGP, charakteryzujące się dużą elastycznością oraz krótszymi czasami uruchamiania i odstawiania, co znajduje również swoje odzwierciedlenie w założeniach *Polityki energetycznej Polski do 2040 r.* [9], według której źródła gazowe mają być wykorzystywane głównie jako moce regulacyjne.

Obecnie jedynie dwa BGP w KSE posiadają status JWCD, a tylko jeden świadczy regulacyjną usługę systemową w zakresie zdolności do odbudowy KSE (samostartu i pracy wyspowej). Pozostałe BGP przyłączone do KSE to Jednostki Wytwórcze

Tabela 1

Właściwości regulacyjne BGP i bloków węglowych

Parametr	Blok gazowo-parowy		Blok węglowy	
Minimum techniczne, % P_{os}	38–47		40–55	
Szybkość zmiany obciążenia, % P_{os} /min (w zakresie pasma regulacyjnego)	4–7 (38 ... 47– P_{dysp_TG})		2–3 (40 ... 55–100% P_{os})	
Skokowe zmiany obciążenia, % P_{os} /30 s	5		5–10	
Czas rozruchu, min	do synchronizacji	do poziomu minimum środ.	do synchronizacji	do poziomu minimum techn.
– ze stanu gorącego (po postoju do 8 godzin)	12–30	50–65	120	180
– ze stanu ciepłego (po postoju od 8 do 50 godzin)		70–160	140–220	200–300

Źródło: opracowanie własne

niebędące Centralnie Dysponowane (nJWCD), które ze względu na priorytetowe wytwarzanie ciepła pracują w trybie „statycznej” generacji mocy elektrycznej.

Często za mankament BGP, z punktu widzenia regulacyjności, uznaje się zmienność ich mocy osiągalnej w zależności od panujących warunków otoczenia (głównie temperatury i wilgotności powietrza). Należy jednak podkreślić, że w odniesieniu do niestabilnej mocy czynnej generowanej przez źródła odnawialne jest ona relatywnie niewielka i dlatego nie powinna być uważana za poważną wadę.

PIŚMIENNICTWO

- [1] *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej*, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., wersja z dnia 7.04.2020, <https://www.pse.pl/dokumenty> [dostęp: 22.06.2020].
- [2] *Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączania jednostek wytwórczych do sieci*, Dz.Urz.UE L 112/1.
- [3] *Wymogi ogólnego stosowania wynikające z Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG)*, Polskie Sieci Elektro-

energetyczne S.A., 18.12.2018, <https://www.pse.pl/dokumenty> [dostęp: 22.06.2020].

- [4] Jendroszczyk J., Komarzyniec M., Kurzyński A., Pasiut G., Rzekowski E., Wasik W., *Ocena możliwości wykorzystania wybranych elektrociepłowni w ramach planów obrony i odbudowy KSE*, opracowanie „ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o., Gliwice 2004 (niepubl.).
- [5] Kacejko P., Wydra M., *Możliwości bloków gazowo-parowych w zakresie regulacji i obrony Krajowego Systemu Elektroenergetycznego*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 8.
- [6] Pawlik M., *Zaawansowane technologicznie bloki energetyczne – nowe wyzwania*, „Energetyka” 2013, nr 8.
- [7] Ackenheil R., Zaviska O., *Primary Frequency Control for Combined Cycle Power Plants*, „VGB PowerTech” 2007, no. 3.
- [8] Yilmaz O., *Participation of combined cycle power plants to power system frequency control: modeling and application*, 2006, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.633.9273&rep=rep1&type=pdf> [dostęp: 22.06.2020].
- [9] *Polityka energetyczna Polski do 2040 r.*, Ministerstwo Energii, wersja 2.1 z dnia 8.11.2019, <https://www.gov.pl/web/aktywa-panstwowe/zaktualizowany-projekt-polityki-energetycznej-polski-do-2040-r> [dostęp: 22.06.2020].



BIURO DORADZTWA I NADZORU INWESTYCYJNEGO



- Obsługa procesów inwestycyjnych, w tym doradztwo techniczne i formalno-prawne na etapie wyboru wykonawcy
- Pełnienie funkcji Inżyniera Kontraktu lub Doradcy Technicznego
- Niezależny Doradca Techniczny dla banków i instytucji finansujących