

*Model oceny wpływu rozwoju rozproszonych  
źródeł energii na wybrane systemowe usługi  
regulacyjne*

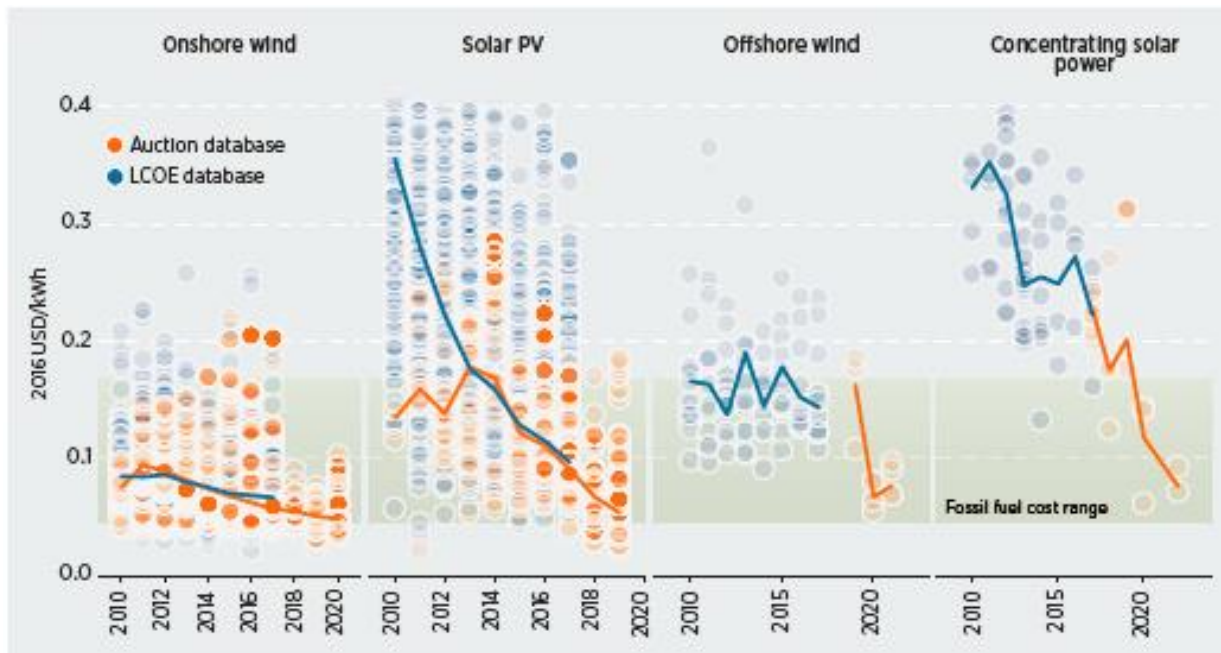
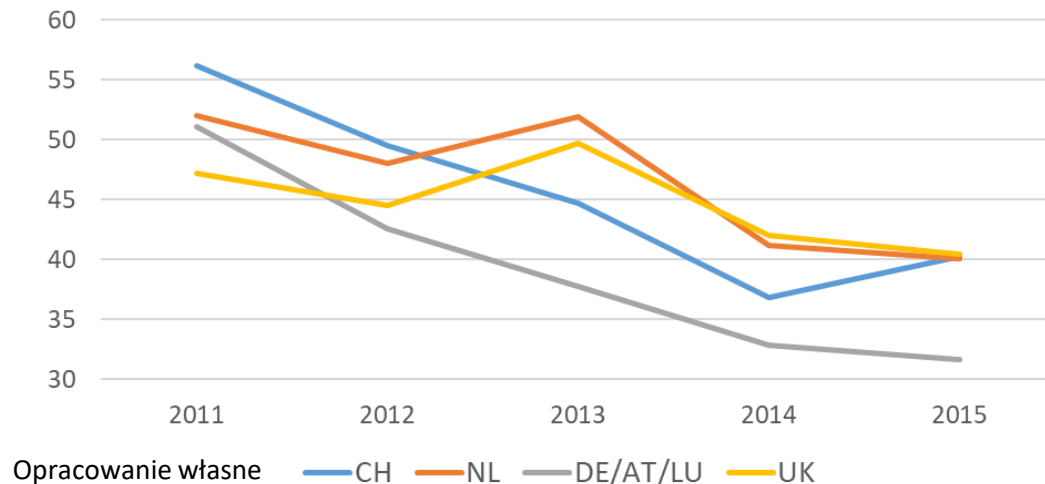
Jarosław Bogacz

Konferencja Rynek Energii Elektrycznej 2018, 26 Kwietnia 2018 r.

1. Ekonomia wytwarzania energii w OZE
2. Wpływ OZE na ceny na RB i popyt RUS
3. Rozporządzenie KE ustanawiające wytyczne dotyczące pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej
4. Koszty wytwarzania i rezerw mocy
5. Optymalizacja Usług Systemowych
6. Odpowiedzi na pytania recenzentów

# Ekonomika wytwarzania energii w OZE

Ceny energii na rynku spot w EUR/MWh (UK w GBP/MWh)



International Renewable Energy Agency: Renewable Power Generation Costs in 2017

- **Spadek cen energii na rynkach hurtowych – do 40 % dla okresu 2011-2015**, w latach 2016-2018 stabilizacja cen (ok. 30 EUR/MWh w Niemczech)
- Jedna z głównych przyczyn – wzrost produkcji z odnawialnych źródeł niesterowalnych
- **MAE prognozuje, że połowa mocy odnawialnych, która powstanie i zostanie zadeklarowana do budowy w okresie 2017-2022 nie będzie wymagała mechanizmów wsparcia**
  - ✓ Arabia Saudyjska – aukcja 2017 r., farma fotowoltaiczna o mocy 300 MW ze zobowiązaniem dostarczenia energii przez 20 lat za 17,9 USD/MWh (rozpoczęcie produkcji w styczniu 2019 r.),
  - ✓ Chile z najniższą ceną 21,5 USD/MWh i średnią ceną 32,5 USD/MWh i obowiązkiem dostarczenia energii od 2024 r.,
  - ✓ Niemcy – cena średnia 49,1 EUR/MWh, najniższa 42,9 EUR/MWh - październik 2017 r. (wyniki próbnych aukcji organizowanych w kwietniu 2015 r. – cena średnia to 91,7 EUR/MWh).

# Rozporządzenie KE ustanawiające wytyczne dotyczące pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej (1)

---

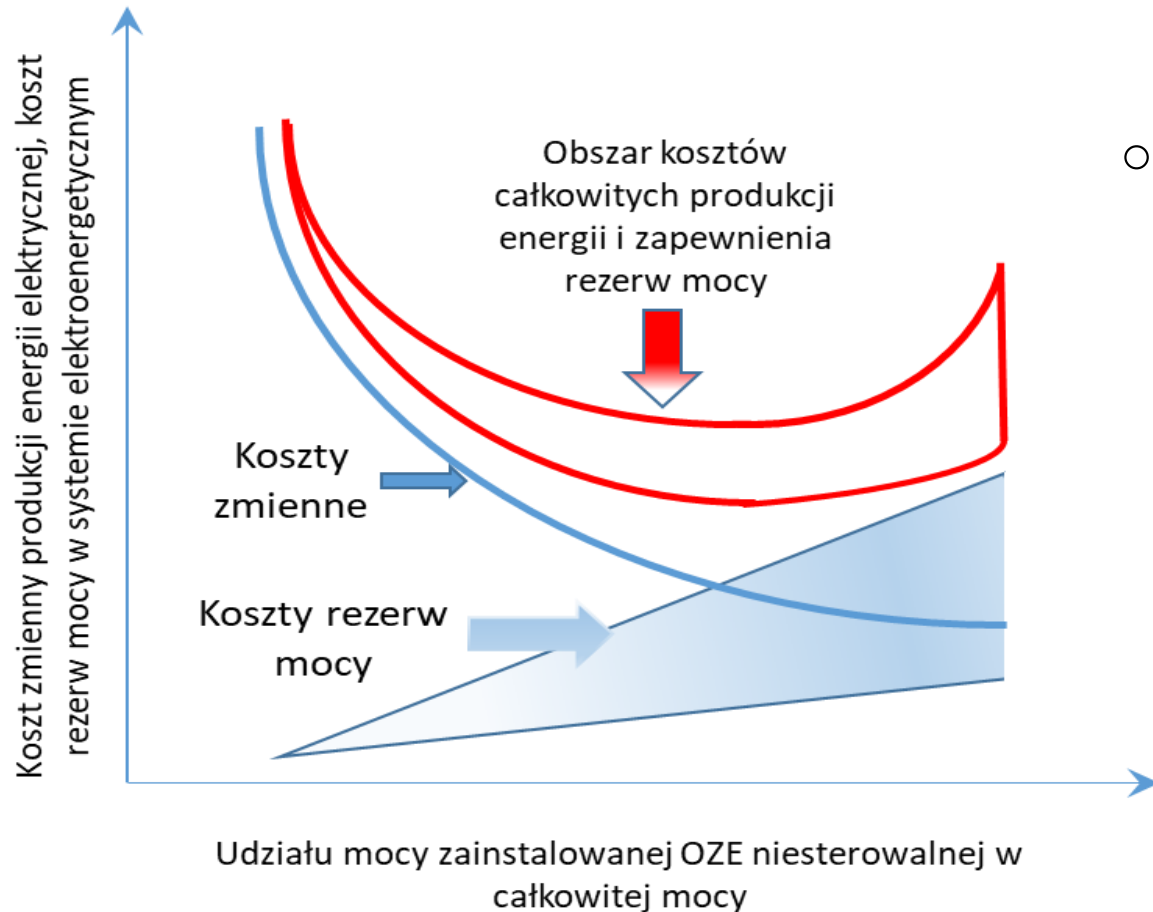
- Podkreśla się, że **skuteczność działań w obszarze zapewnienia Regulacyjnych Usług Systemowych (RUS) jest uzależniona w dużej mierze od koordynacji pomiędzy operatorami sieciowymi oraz od ustalenia jednolitych kryteriów** dla wszystkich podmiotów zapewniających usługi regulacyjne (zarówno wytwórców, jak i odbiorców).
- Rezerwy mocy są zdefiniowane jako:
  - ✓ **rezerwy utrzymania częstotliwości** (*frequency containment reserves* - skrót FCR),
  - ✓ **rezerwy odbudowy częstotliwości** (*frequency restoration reserves* - skrót FRR),
  - ✓ **rezerwy zastępcze** (*replacement reserves* - skrót RR).
- Definiuje się również pojęcie **jednostki zapewniającej rezerwę jako moduł wytwarzania energii lub jednostkę odbiorczą**, bądź zespół modułów wytwarzania energii lub jednostek odbiorczych, które są przyłączone w tym samym punkcie sieciowym oraz spełniają wymogi w zakresie zapewnienia rezerw FCR, FRR lub RR

# *Rozporządzenie KE ustanawiające wytyczne dotyczące pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej (2)*

---

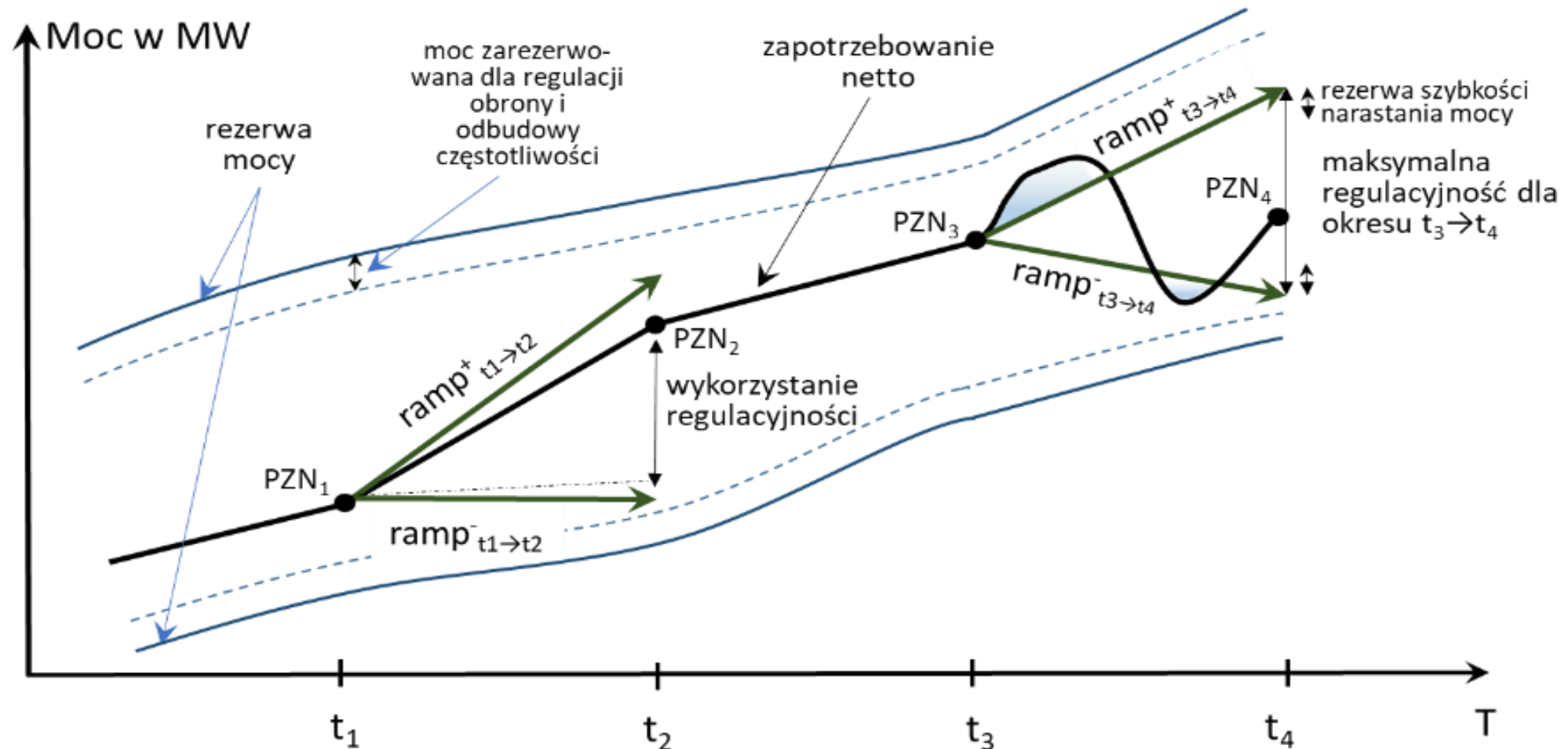
- **Każdy OSP ma prawo do wdrożenia procesu transgranicznego wykorzystania aktywacji usług FRR i RR w ramach tych samych lub pomiędzy różnymi obszarami synchronicznymi**
- **Dodatnia i ujemna rezerwa mocy FRR musi być utrzymywana na poziomie co najmniej dodatniego i ujemnego incydentu wymiarującego, który jest określany na podstawie incydentu referencyjnego**
- Wielkość dodatniej i ujemnej RR jest ustalana na poziomie pozwalającym na odbudowę wymaganej wielkości FRR, z uwzgl. celu dotrzymania parametrów jakości uchybu regulacyjnego odbudowy częstotliwości w danym okresie
- **Wszyscy OSP z danego bloku gwarantują, aby dodatni i ujemny zakres rezerw mocy FRR lub kombinacji rezerw mocy FRR i RR był wystarczający do pokrycia odpowiednio dodatnich i ujemnych niezbilansowań bloku LFC przez co najmniej 99% czasu bazując na danych historycznych.**
- **Operatorzy systemów przesyłowych mogą zmniejszyć dodatni i/lub ujemny zakres rezerwy FRR poprzez współdzielenie rezerwy mocy FRR. Zmniejszenie:**
  - ✓ maksymalnie o wartość wynikającą z różnicy wartości incydentu wymiarującego oraz rezerwy mocy FRR potrzebnej do pokrycia niezbilansowania bloku LFC przez 99% czasu w oparciu o dane historyczne,
  - ✓ dodatniej rezerwy mocy nie może przekroczyć 30% wartości dodatniego incydentu wymiarującego
- **Wymiana pomiędzy obszarami synchronicznymi jest możliwa przy pokryciu co najmniej 50% całkowitej rezerwy mocy dla FRR i oddzielnie dla RR przed zastosowaniem możliwych zmniejszeń wynikających ze współdzielenia rezerw przez bloki rezerw należące do obszaru LFC**

# Koszty wytwarzania i rezerw mocy



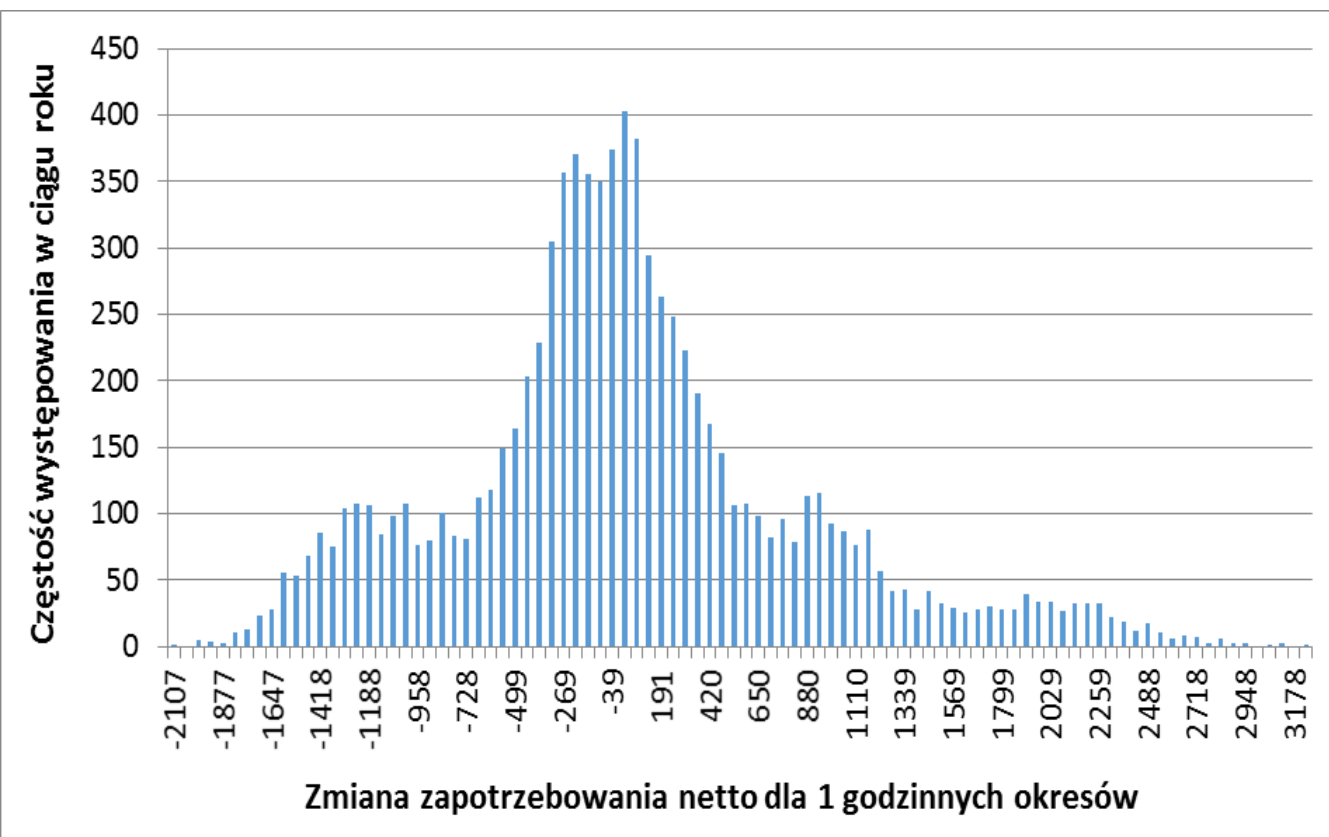
- Jeżeli przyjąć założenie, że całkowity koszt produkcji energii ze źródeł odnawialnych będzie niższy niż koszt produkcji ze źródeł konwencjonalnych, to:
  - ✓ **koszty produkcji energii elektrycznej będą się zmniejszały** w miarę wzrostu mocy zainstalowanej w technologiach z zerowym kosztem zmiennym,
  - ✓ **koszty zapewnienia rezerwy mocy będą wzrastały** i będą zależały od struktury mocy instalowanej w źródłach odnawialnych niesterowalnych.
  - ✓ **koszty całkowite: produkcji energii elektrycznej i zapewnienia rezerw mocy (obszar potencjalnych wartości)**

Zapewnienie w wyniku optymalizacji określonej szybkości narastania lub zmniejszania produkcji energii w SE, co wynika ze wzrastającej zmienności zapotrzebowania netto w SE. Na rysunku przedstawiono poglądową sytuację



## Szybkości narastania i zmniejszania mocy dostępnej w SE

- ✓ duże zróżnicowanie częstości wykorzystania określonych poziomów regulacyjności trójnej w KSE.
- ✓ regulacja w granicach do  $\pm 700$  MW jest wystarczająca dla 65% przypadków.
- ✓ efektywne jest zróżnicowanie poziomu zakupu usług regulacyjności trójnej i szybkości zmian mocy, w zależności od prognozowanego przez OSP zapotrzebowania – RDN i RDB



Reasumując, w funkcji celu uwzględniono:

$r_{tz}^+$ ,  $r_{tz}^-$  - wymagana szybkość zmian produkcji dla chwili czasowej  $t$  przez zasób z odpowiednio w kierunku narastania oraz zmniejszania produkcji, wyrażona w MW/1 przedział czasowy  $t$ ,

$k_{tz}^{RT+}$ ,  $k_{tz}^{RT-}$  - koszt zakupu zasobu szybkości zmian produkcji dla chwili czasowej  $t$  przez zasób z odpowiednio w kierunku narastania oraz zmniejszania produkcji, wyrażona w zł/MW/1 przedział czasowy  $t$ ;



Rozpatrując zagadnienie optymalizacji usług systemowych pomija się:

- ✓ ograniczenia przesyłowe (rozpatruje się stan idealnej tzw. miedzianej płyty)
- ✓ niezbędny rozwój, modernizację i odtworzenie infrastruktury sieciowej przesyłowej i dystrybucyjnej.

**Funkcja celu pozwalająca na: i) realizację optymalizacji tzw. metodą dokładną**, tj. metodą uwzględniającą w zadaniu UC i rozdziale obciążeń na jednostki wytwórcze zagadnienia zapewnienia odpowiedniej regulacyjności w SE, ii) **spełnienie ograniczeń**, ma postać przedstawioną poniższą zależnością

$$\min \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z \left[ K_{I(e+RM)_{lz}} + K_{I(RM)_{lz}} + K_{S_{lz}} + k_{zm_{tlz}} \cdot p_{tlz} + I_{ltz} \cdot k_{u_{ltz}} + P_l^{RP} \cdot k_l^{RP} \right. \right. \\ \left. \left. + P_l^{RW} \cdot k_l^{RW} + P_{tz}^{RT+} \cdot k_{tz}^{RT+} + P_{tz}^{RT-} \cdot k_{tz}^{RT-} + r_{tz}^+ \cdot k_{tz}^{RT+} + r_{tz}^- \cdot k_{tz}^{RT-} \right] \right\}$$

**Wymagana szybkość narastania lub zmniejszania produkcji energii w SE dla okresu od chwili czasowej  $t_1$  do chwili  $t_2$ , składająca się z sumy szybkości narastania lub zmniejszania produkcji energii elektrycznej przez poszczególne zasoby z będące dostępne operacyjnie dla OSP w przedmiotowym okresie, powinna być określona na podstawie:**

- ✓ Różnic zapotrzebowania netto w chwilach czasowych  $t_1$  i  $t_2$ ;
- ✓ Rezerwy szybkości narastania i zmniejszania produkcji odzwierciedlającej niepewność prognozowania zapotrzebowania netto widzianą z perspektywy chwili czasowej  $t_1$  (oznaczono symbolem  $\Delta r_{ZN}$ ) - może być określona na podstawie obserwacji historycznych dla okresów podobnych;
- ✓ Rezerwy szybkości narastania i zmniejszania produkcji odzwierciedlającej ryzyko pomniejszenia zasobów zapewniających wymaganą szybkość zmian mocy widziane z perspektywy chwili czasowej  $t_1$  (oznaczono symbolem  $\Delta r_{ZB}$ ) - można określić poprzez symulację wyłączenia awaryjnego zasobu z o największej wartości iloczynu regulacyjności oraz szybkości zmian mocy.

W funkcji celu muszą zostać uwzględnione ograniczenia: (1) dla spełnienia warunku szybkości narastania produkcji i (2) - określającą spełnienie warunku szybkości zmniejszania produkcji.

$$\Lambda_{t_1 \rightarrow t_2} \wedge \Lambda_{PZN_{t_2} > PZN_{t_1}} \frac{\frac{\sum_{z=1}^Z r_{t_1 z}^+}{(PZN_{t_2} - PZN_{t_1})} + r_{ZN t_1}^+ + r_{ZB t_1}^+}{t_2 - t_1} - 1 \geq 0 \quad (1)$$

$$\Lambda_{t_1 \rightarrow t_2} \wedge \Lambda_{PZN_1 > PZN_{t_2}} \frac{\frac{\sum_{z=1}^Z r_{t_1 z}^-}{(PZN_{t_1} - PZN_{t_2})} + r_{ZN t_1}^- + r_{ZB t_1}^-}{t_2 - t_1} - 1 \geq 0 \quad (2)$$

- ✓ Moc rezerwowane dla usług regulacji trójnej – zróżnicowanie wartości w zależności od przedziału czasowego
- ✓ Moc usługi zależna od prognozowanego poziomu produkcji w źródłach niestabilnych i poziomu zapotrzebowania na energię
- ✓ Uwzględnienie rezerwy na niepewności prognozowania  $\Delta PZN$  oraz ryzyko wystąpienia awarii zasobu  $\Delta PZB$

$$\Lambda_{t_1 \rightarrow t_2} \wedge \Lambda_{PZN_{t_2} > PZN_{t_1}} \frac{\sum_{z=1}^Z P_{tz}^{RT+}}{(PZN_{t_2} - PZN_{t_1}) + \Delta PZN_{t_1}^+ + \Delta PZB_{t_1}^+} - 1 \geq 0 \quad (3)$$

$$\Lambda_{t_1 \rightarrow t_2} \wedge \Lambda_{PZN_{t_1} > PZN_{t_2}} \frac{\sum_{z=1}^Z P_{tz}^{RT-}}{(PZN_{t_1} - PZN_{t_2}) + \Delta PZN_{t_1}^- + \Delta PZB_{t_1}^-} - 1 \geq 0 \quad (4)$$

- ✓ Miarą wystarczalności szybkości zmian mocy SE może być np. Insufficient Ramping Resource Expectation (IRRE). Jeżeli oznaczyć przez  $Ramp_{POSt}^+$  i  $Ramp_{NEGt}^+$  odpowiednio spełnienie i brak spełnienia warunku określonego zależnością (1) w zakresie szybkości przyrostu mocy w SE w określonej chwili czasowej t, to wskaźnik IRRE można zapisać w postaci zależności (5).

$$IRRE^+ = 1 - \sum_{t=1}^T \frac{Ramp_{NEGt}^+}{Ramp_{POSt}^+ + Ramp_{NEGt}^+} \quad (5)$$

1. Czy doświadczenia innych krajów wykorzystujących źródła odnawialne potwierdzają potrzeby zwiększenia zasobów rezerw mocy.
2. Jaką rolę pełnią połączenia międzysystemowe dla krajów z dużym udziałem źródeł odnawialnych? Proszę o przedstawienie przykładów.

a) Belgia: usługi systemowe: rezerwa pierwotna, wtórna, trójna, pokrycie strat sieciowych, black start. Max. zapotrzebowanie 14 GW, połączenia transgraniczne – 3,0 – 3,5 GW, wiatr i PV = 5-6 GW.

Evolution of ancillary services needs to balance the Belgian control area towards 2018, May 2013, s. 7

*The massive penetration of variable renewable energy sources (VRE) such as wind and PV, for which the output is defined by weather conditions and not by system off-take, increases the need for system flexibility to enable BRPs to balance their perimeter. VRE can however also offer part of the required flexibility to the grid, subject to availability.*

b) Dania: usługi systemowe: rezerwa pierwotna, wtórna (automatyczna i manualna), usługi pomocnicze. Max. zapotrzebowanie: 6 GW, połączenia transgraniczne 6,4 GW, wiatr = 5,3 GW. Modernizacja konwencjonalnych jednostek wytwórczych (zmniejszenie mocy minimalnej, większa szybkość zmian produkcji, skrócenie czasu rozruchu). Wykorzystania zmniejszenia produkcji energii elektrycznej w elektrociepłowniach przy dużej produkcji w elektrowniach wiatrowych.

- b) Kalifornia: Operator CAISO działający w USA od listopada 2016, oprócz typowych usług regulacyjnych kupuje dwa produkty dla rynku 15 minutowego w zakresie szybkości zmian mocy SE, tj.: Flexible Ramp Up i Flexible Ramp Down. Max. zapotrzebowanie: 50 GW, wiatr 6 GW, PV 8,6 GW.

Figure E.2 Average daily regulation procurement costs (January – March)

