

## OPTYMALNA STRUKTURA INSTALACJI WYTWARZANIA I MAGAZYNOWANIA ENERGII W KLASTRZE ENERGII

Bogdan CZARNECKI

Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
tel.: 58 349 8220 e-mail: b.czarnecki@ien.gda.pl

**Streszczenie:** Ustawa o odnawialnych źródłach energii (OZE) wprowadza pojęcie klastrów energii jako narzędzia wspierającego rozwój rozproszonej mikrogeneracji OZE. W artykule zaproponowano model typowego klastra energii oraz metodykę wielokryterialnej analizy optymalnej struktury instalacji wytwarzania i magazynowania energii w obrębie klastra, która uwzględnia realizację celów ustawowych oraz postulatów technicznych, w szczególności wpływ klastrów na warunki dobowego bilansowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) i efektywność energetyczną. W oparciu o powyższe założenia przeprowadzono symulacje mające za zadanie wyznaczenie optymalnej struktury instalacji wytwarzania i magazynowania energii w klastrze, uwzględniające wielokryterialną funkcję celu realizowaną przez klastr. Symulacje przeprowadzono dla wielu modelowych klastrów różniących się charakterystyką zapotrzebowania odbiorców na moc. Uzyskane wyniki wskazują, że dla większości modelowanych klastrów energii, niezależnie od ich wielkości, optymalna proporcja pomiędzy mocą zainstalowaną PV i GW wynosi ok. 3:2, a proporcja pomiędzy mocą i pojemnością zasobnika wynosi ok. 1:6.

**Słowa kluczowe:** klastr energii, bilansowanie systemu, elastyczność systemu elektroenergetycznego.

### 1. WSTĘP

Zgodnie z ustawą o OZE mikroinstalacje OZE podlegają szczególnej ochronie, m.in. ze względu na bardzo uproszczony proces pozyskiwania zgody na przyłączenie i pierwszeństwo w dostępie do sieci. Przede wszystkim jednak przewidywane jest dofinansowanie ze środków publicznych inwestycji związanych z mikroinstalacjami OZE, jeżeli powstają one w ramach klastra energii. Przyjmując, że wsparcie ze środków publicznych tego typu inwestycji jest celowe, to dofinansowanie powinno być realizowane w taki sposób, by nie generować dodatkowych kosztów funkcjonowania KSE, wiązanych z dobowym bilansowaniem podaży i popytu oraz zapewnieniem wymaganego poziomu rezerw mocy.

Wymagałoby to ustanowienia na poziomie aktów wykonawczych do ustawy o OZE kryteriów oceny klastra energii, zawierających w szczególności aspekty optymalizacji struktury instalacji wytwarzania i magazynowania energii w klastrze.

### 2. UWARUNKOWANIA FUNKCJONOWANIA KLASTRÓW ENERGII

Kompleksowa nowelizacja Ustawy o odnawialnych źródłach energii (OZE) [1] wprowadziła m.in. pojęcie klastra energii. Klastr jest porozumieniem cywilnoprawnym zorientowanym na równowagę wytwarzania i zapotrzebowania oraz dystrybucji i obrotu energią z OZE w sieciach o napięciu znamionowym poniżej 110 kV. Członkami klastra energii mogą być osoby fizyczne, osoby prawne, jednostki naukowe, instytuty badawcze oraz jednostki samorządu terytorialnego. Szczególna rola przypisana jest Podmiotowi będącemu Koordynatorem Klastra energii, mogącemu reprezentować Klastr na zewnątrz. Działalność w ramach klastra energii musi być ograniczona terytorialnie. Zgodnie z Ustawą, nieprzekraczalnym obszarem działania klastra jest powiat lub 5 sąsiednich gmin.

Podstawowym celem działania Klastra jest lokalne pokrywanie zapotrzebowania na moc i energię poprzez bieżące bilansowanie podaży i popytu [4]. W przyszłości Klastry mogą przyczynić się do zwiększenia elastyczności KSE poprzez tworzenie lokalnych obszarów bilansowania (tzw. Web-of-Cells, WoC), współdziałających z operatorami sieci dystrybucyjnych. Dynamiczny rozwój technologii ICT stwarza możliwości agregacji podmiotów wewnątrz Klastra oraz wielu Klastrów w celu oferowania OSP/OSD usług regulacyjnych [2],[3]. W chwili obecnej jednak, mając na uwadze ograniczoną regulacyjność dostępnych na rynku typowych mikroinstalacji OZE, rozwój klastrów energii może rodzić szereg trudności dla funkcjonowania KSE.

W skład klastra energii mogą wchodzić następujące zasoby, wzajemnie powiązane techniczno-organizacyjnie:

1. Typowi (komunalno-bytowi, przemysłowi) odbiorcy energii, decydujący o dobowo-sezonalnym profilu zapotrzebowania na moc w klastrze energii.
2. Sterowalne, stabilne i prognozowalne źródła energii, np. elektrociepłownie (CHP), elektrownie wodne zbiornikowe, oraz biogazownie (w szczególności, jeżeli posiadają możliwość magazynowania wody lub biogazu). Szczególnym przypadkiem takich źródeł są zasobniki energii, które mogą pracować jako sterowalne źródło wytwórcze lub sterowalny odbiorca.
3. Źródła niestabilne, o ograniczonych możliwościach prognozowania mocy oddawanej do sieci produkcji, regulowane wyłącznie najczęściej w zakresie

ograniczania mocy oddawanej do sieci, m.in. OZE zależne od warunków atmosferycznych (GW, PV).

4. Sterowalni Odbiorcy (najczęściej przemysłowi), mogący w ciągu zadanego okresu czasu zmienić (zmniejszyć) zużycie energii, np. ciepłownie.
5. Jako potencjalny przyszły element składowy klastra energii można traktować elektromobilność w wariancie pasywnym (zdalne sterowanie procesem ładowania) lub aktywnym (pobieranie/oddawanie mocy do sieci).

O pracy sterowalnych elementów tworzących klastrów energii decyduje Koordynator (agregator) klastra energii, który zgodnie z realizowanymi przez siebie celami optymalizuje pracę wszystkich jednostek. Koordynatorem Klastra może być podmiot władający zasobami regulacyjnymi lub posiadający wiedzę rynkową/ techniczną o stanie sieci, umożliwiającą optymalne dysponowanie zasobami regulacyjnymi.

Inwestycje związane z wytwarzaniem energii z OZE są objęte pomocą publiczną w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko. Ze względu na fakt, że rozwój klastrów energii będzie uwarunkowany zakresem wsparcia ze środków publicznych, optymalizacja struktury Klastra powinna przede wszystkim uwzględniać postulowane cele strategiczne rozwoju elektroenergetyki w Polsce, w szczególności:

- Maksymalizację lokalnego pokrycia zapotrzebowania odbiorców na moc w oparciu o lokalną generację OZE.
- Poprawę efektywności energetycznej, rozumianą jako minimalizację strat energii w sieci elektroenergetycznej na i poza obszarem klastra energii.
- Redukcję emisji CO<sub>2</sub>
- Maksymalizację udziału OZE w rocznym bilansie zużycia energii elektrycznej

Z punktu widzenia jakości i niezawodności dostaw energii oraz kosztów funkcjonowania sektora elektroenergetyki celowe jest sformułowanie dodatkowych postulatów technicznych charakteryzujących klastrów energii :

- Poprawa warunków dobowego bilansowania KSE poprzez dopasowanie profili generacji i zapotrzebowania w obszarze klastra
- Minimalizacja zmienności zapotrzebowania Klastra na moc.
- Maksymalizacja wykorzystania zasobów regulacyjnych, w szczególności nowopowstających w oparciu o przepisy ustawy, np. magazynów energii.

Obecnie brak jest technicznych możliwości sterowania przez OSD rozproszoną generacją OZE, która w przeważającej większości przypadków konstrukcyjnie nie jest przystosowana do sterowania zdalnego mocą czynną, akceptując co najwyżej polecenia załączenia/wyłączenia całej instalacji.

Celem proponowanej optymalizacji struktury instalacji wytwarzania i magazynowania energii w Klastrze jest zastąpienie bezpośredniego sterowania pracą rozproszonych źródeł energii technikami pośrednimi (mechanizmami wsparcia rozwoju OZE ze środków publicznych) w taki sposób, by oprócz celów strategicznych udziału OZE w bilansie energetycznym kraju, generacja pochodząca od rozproszonych mikro-OZE wspierała dotrzymanie standardów jakości i niezawodność dostaw energii oraz obniżała koszty energii dla odbiorców końcowych.

### 3. PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

Założono, że model klastra energii powinien być skalowalny, tzn. umożliwiający symulację pracy klastra bez względu na strukturę zapotrzebowania na moc i strukturę wytwarzania energii. Kluczowym elementem dla budowy modelu klastra energii jest również powszechna dostępność danych pomiarowych na których oparto modelowanie i optymalizację Klastra.

W związku z powyższym dla potrzeb modelowania klastra energii przyjęto, że :

- Zapotrzebowanie odbiorców na moc, w szczególności jego zmienność dobowo-sezonowa jest podstawowym i nie podlegającym optymalizacji elementem składowym bilansu mocy. Horyzont czasowy modelowania zapotrzebowania odbiorców na moc powinien obejmować co najmniej rok kalendarzowy, a dane powinny mieć co najmniej rozdzielczość godzinową. Dla potrzeb symulacji wykorzystano roczne profile zapotrzebowania na moc w 41 stacjach SN/nn traktowanych jako oddzielne klastry energii. Źródłem danych wykorzystanych w symulacji był system AMI.
- Roczne profile mocy oddawanej do sieci przez niektóre OZE mają indywidualny charakter, związany z dostępnością zasobów odnawialnych w konkretnej lokalizacji. Należą do nich generacja elektrowni wodnych i biogazowych. Jeżeli istnieją, należy je uwzględniać analogicznie do zapotrzebowania odbiorców na moc. Ewentualne zdolności regulacyjne (magazynowanie biogazu lub wody) należy modelować analogicznie jak zasobniki energii. W symulacji nie uwzględniono takich źródeł ze względu na brak danych.
- Pozostałe OZE, t.j. generacja wiatrowa i słoneczna są skalowalne ze względu na fakt, że zasoby energii odnawialnej zazwyczaj przewyższają zapotrzebowanie odbiorców na moc, a liczba instalacji nie podlega ograniczeniom. W związku z powyższym moc zainstalowana instalacji może podlegać optymalizacji (można ją kształtować np. poprzez dofinansowanie inwestycji adekwatnie do wyników optymalizacji). W symulacji przyjęto, że moc zainstalowana w obydwu powyższych kategoriach OZE może osiągnąć do 500% szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc.
- Dla estymacji mocy oddawanej do sieci przez niestabilne mikro-OZE wykorzystano dane pomiarowe z systemu DOL (prędkość wiatru i natężenie promieniowania słonecznego mierzone na wysokości 10 m.n.p.g.) oraz typowe charakterystyki mocy OZE w funkcji dostępności energii pierwotnej. Pomiary stacji pogodowej DOL pozwalają na zachowanie korelacji pomiędzy generacją PV i GW w obrębi doby. Założono, że mierzone parametry warunków atmosferycznych są identyczne na terenie całego klastra.
- Zasoby regulacyjne w modelu klastra energii modelowano w postaci zasobnika energii. Przyjęto, że technologia magazynowania nie jest istotna z punktu widzenia modelowania klastra. Zakres regulacyjności opisano parametrami mocy i pojemności zasobnika. W celu zapewnienia skalowalności modelu klastra i porównywalności wyników symulacji dla różnych klastrów energii, moc zasobnika modelowano jako procent szczytowego zapotrzebowania odbiorców na

moc (% PODB\_MAX) a pojemność jako krotność szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc (ilość energii którą zasobnik może zmagazynować wyrażona jako ilości godzin jego pracy z mocą równą szczytowemu zapotrzebowaniu odbiorców na moc).

#### 4. METODYKA SYMULACJI KLASTRA ENERGII

Do przeprowadzenia symulacji zostały wykorzystane algorytmy ewolucyjne, co zostało podyktowane trudnością wyznaczenia w postaci analitycznej funkcji celu optymalizacji wielokryterialnej oraz możliwością występowania wielu lokalnych maksimów funkcji celu (kombinacji parametrów charakteryzujących klastr). Algorytmy ewolucyjne stanowią atrakcyjne narzędzie optymalizacji zwłaszcza dla problemów dla których nie ma opracowanych specjalizowanych metod optymalizacji [5], [6]. Do realizacji wyżej sformułowanego zadania został wybrany pakiet obliczeniowo-symulacyjny Matlab z pakietem narzędziowym Global Optimization Toolbox.

Przyjęty model optymalizacji zakłada, że pojedynczy osobnik, oprócz indywidualnego rocznego (z rozdzielczością godzinową) profilu zapotrzebowania na moc, charakteryzuje się czterema cechami których wartość podlega optymalizacji:

1. mocą zainstalowaną OZE PV [kW], wyrażoną jako % szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc.
2. mocą zainstalowaną OZE GW [kW], wyrażoną jako % szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc.
3. mocą zasobnika energii [kW] wyrażoną jako % szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc.
4. pojemnością zasobnika energii [kWh] modelowaną jako godzinowa krotność szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc.

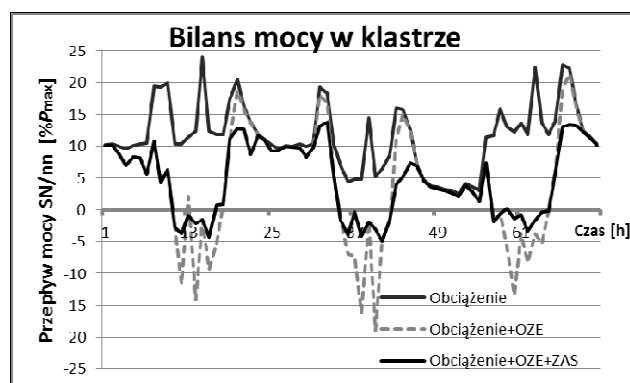
Wyznaczanie optymalnych parametrów klastra energii było przeprowadzane jako iteracyjnie powtarzana sekwencja działań. Punktem wyjścia dla optymalizacji są pomiary rocznego zapotrzebowania na moc w węźle SN/nn, rejestrowane z rozdzielczością godzinową, oraz cztery cechy modelu genetycznego : moc zainstalowana OZE (PV i GW) oraz parametry zasobnika energii (moc, pojemność). Algorytm genetyczny inicjuje (pierwsze pokolenie) lub modyfikuje (kolejne pokolenia) cechy osobnicze. Dla wszystkich osobników w danym pokoleniu :

1. Na podstawie danych zapotrzebowania klastra energii na moc oraz modelowanych stochastycznie czterech cech osobniczych, wyznaczone są wartości bezwzględne mocy zainstalowanej OZE [kW] oraz parametry zasobnika energii : [kW], [kWh].
2. W oparciu o moce zainstalowane OZE i znormalizowane roczno-godzinowe serie danych o nasłonecznieniu i wietrzności wyznaczone są moce oddawane do sieci przez OZE [kW]
3. W oparciu o zapotrzebowanie odbiorców na moc i generację OZE modelowany jest roczny bilans energetyczny klastra z rozdzielczością godzinową.
4. Wyznaczany jest roczny harmonogram pracy zasobnika energii który maksymalizuje jeden z parametrów funkcji celu. Przyjęto założenie, że nadmiar energii generowanej przez OZE w stosunku do zapotrzebowania odbiorców jest akumulowany w zasobniku energii. W przypadku braku pokrycia zapotrzebowania odbiorców na moc przez lokalną generację OZE, zasobnik jest rozładowywany.

5. Wyznaczana jest wartość wielokryterialnej funkcji celu [7]. Algorytm genetyczny dokonuje porównania wartości funkcji celu poszczególnych osobników w danym pokoleniu i dla wybranych osobników modyfikuje ich cechy osobnicze (krzyżowanie osobników pomiędzy sobą, mutacje, etc.).
6. Dla tak utworzonego nowego pokolenia osobników wykonywana jest sekwencja działań od 1. do 5. Algorytm kończy działanie po osiągnięciu jednego z zadanych parametrów terminacji procesu (m.in. zbieżność wyników z pokolenia na pokolenie). Wyłaniany jest osobnik o cechach pozwalających osiągnąć najlepszą wartość funkcji celu.

Symulacje przeprowadzono dla obciążeń zarejestrowanych przez okres roku w 41 stacjach SN/nn. Wykorzystano identyczny zestaw pomiarów meteorologicznych natężenia promieniowania słonecznego i prędkości wiatru zarejestrowanych przez system DOL. W celu umożliwienia porównania optymalnych parametrów analizowanych klastrów energetycznych, wszystkie wyniki zostały znormalizowane w oparciu o maksymalne zarejestrowane w danym klastrze zapotrzebowanie na moc w analizowanym okresie czasu. Poszczególne klastry różniły się pomiędzy sobą wielkością szczytowego zapotrzebowania na moc, ilością energii zużywanej w ciągu roku oraz dobowo-sezonowymi profilami zapotrzebowania na moc, co wynikało z typu odbiorców w danym klastrze.

Na rysunku 1 przedstawiono wpływ generacji OZE i pracy zasobnika energii na współczynnik dopasowania zapotrzebowania na moc w klastrze (nietypowe zapotrzebowanie przemysłowe, 3 szczyty w obrębie doby).



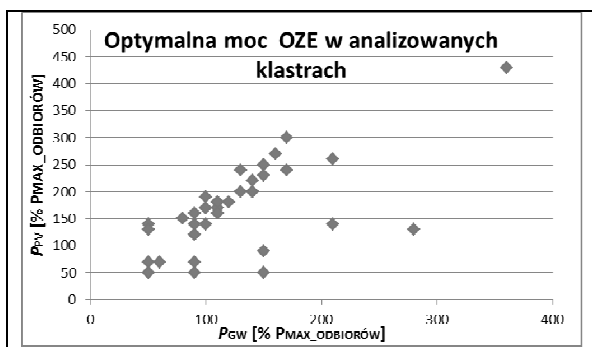
Rys. 1. Wpływ OZE i zasobnika na dopasowanie profilu zapotrzebowania odbiorców na moc

Profil czerwony odpowiada zapotrzebowaniu odbiorców na moc i ma wartość dodatnią (przepływ mocy z sieci SN do nn). Profil zielony (przerwany) odpowiada sumie zapotrzebowania odbiorców na moc i generacji OZE (w rozpatrywanym przypadku dominuje generacja PV w środku dnia). Może przyjmować wartości ujemne, co świadczy o przepływie mocy z sieci nn w kierunku SN i wynika z nadmiaru mocy generowanej w klastrze przez OZE w stosunku do zapotrzebowania odbiorców na moc. Profil czarny odpowiada sumie zapotrzebowania odbiorców na moc, generacji OZE oraz mocy pobieranej lub oddawanej do systemu przez zasobnik. Zadaniem zasobnika jest zapobieganie przepływowi mocy z klastra do sieci SN w godzinach, gdy generacja OZE przewyższa zapotrzebowanie odbiorców na moc, oraz redukcja szczytowych przepływów mocy z sieci SN do nn (klastra) w godzinach, gdy zapotrzebowanie odbiorców na moc w klastrze przewyższa

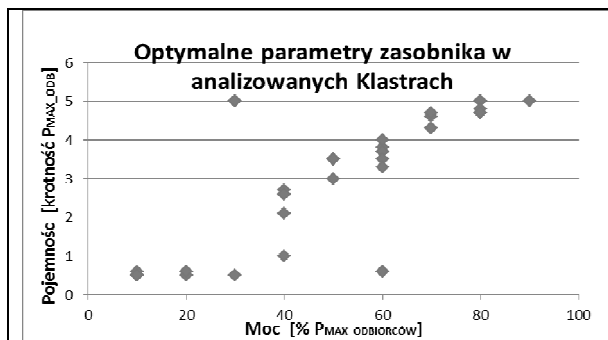
generację OZE. Ze względu na ograniczone zasoby magazynu (moc oraz pojemność), priorytet pracy jest przydzielany godzinom o największych odchyleniach profilu mocy w kierunkach poboru/oddawania mocy z/do KSE.

## 5. WYNIKI SYMULACJI

Rysunek 2 przedstawia optymalny stosunek mocy zainstalowanej źródeł OZE w technologiach PV i GW odniesionych do szczytowego zapotrzebowania na moc odbiorców Klastrach. Może się ona znacznie różnić pomiędzy analizowanymi Klastrami. W analizowanych 49-ciu Klastrach optymalna moc zainstalowana OZE może zmieniać się w szerokim zakresie i zarówno dla PV jak GW przyjmować wartości od 50% do 350% szczytowego zapotrzebowania odbiorców na moc. Dającą się zaobserwować dla większości Klastrow prawidłowość, to stała proporcja pomiędzy mocą zainstalowaną PV i GW równa ok. 3:2.



Rys. 2. Optymalny stosunek mocy zainstalowanej źródeł OZE w technologiach PV i GW w analizowanych klastrach



Rys. 3 Optymalna pojemność zasobnika w funkcji jego mocy zainstalowanej

Na rysunku 3 zestawiono optymalne parametry zasobników wyznaczone dla analizowanych Klastrow. Optymalna moc zasobnika w zależności od klastra przyjmuje

wartość od 10% do 90% maksymalnego zapotrzebowania na odbiorców moc a optymalna pojemność może zmieniać się w zakresie od 0.5 do 6 godzin pracy zasobnika z mocą szczytowego zapotrzebowaniu odbiorców na moc. Prawidłowość którą można obserwować dla większości klastrow, to proporcja pomiędzy mocą i pojemnością zasobnika równa ok. 1:6.

## 6. WNIOSKI

Uzyskane wyniki wskazują, że dla większości modelowanych klastrow energii, niezależnie od ich wielkości, optymalna proporcja pomiędzy mocą zainstalowaną PV i GW wynosi ok. 3 : 2, natomiast proporcja pomiędzy mocą i pojemnością zasobnika energii wynosi ok. 1:6 . Dofinansowanie instalacji wytwarzania i magazynowania energii ze środków publicznych powinno uwzględniać powyższą prawidłowość oraz dopasowanie mocy instalacji do indywidualnych charakterystyk zapotrzebowania odbiorców na moc w klastrze energii.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Kancelaria Sejmu, tekst jednolity opracowany na podstawie DZ. U. z 2015 r. poz. 478, 2365, z 2016 r. poz. 925;
2. ENERGETYKA DYSTRYBUCJA I PRZESYŁ; Raport PTPIREE 2017
3. Pakulski T., Klucznik J.: Expected Range of Cooperation Between Transmission System Operators and Distribution System Operators After Implementation of ENTSO-E Grid Codes; ActaEnergetica 2/23 (2015)
4. Popczyk J.: Potencjalna (fundamentalna) rola klastrow energii w transformacji (polskiej) energetyki; Konferencja: Bezpieczeństwo energetyczne – filary i perspektywy rozwoju; Rzeszów kwiecień 2017
5. Goldberg D. E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995. ISBN 83-204-1852-6.
6. Abras J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001, 2004. ISBN 83-204-2970-6.
7. Bronk L., Czarnecki B. i inni , Opracowanie metodyki i badanie wymaganych parametrów technicznych wirtualnej elektrowni opartej na odnawialnych źródłach energii, działającej w warunkach rynku energii, Instytut Energetyki o/Gdańsk , Zadanie Badawcze OGS-87/18, 2018

## OPTIMAL ENERGY MIX IN ENERGY CLUSTER

The Act on renewable energy sources introduces the concept of energy clusters as a tool supporting the development of a dispersed micro-generation of RES. The article proposes a model of a typical energy cluster and methodology for multi-criteria analysis of the optimal structure of energy production sources within the cluster, which takes into account the statutory goals of the cluster and a number of technical postulates, in particular its impact on the energy system balancing conditions, energy efficiency, pollution emissions.

Based on the above assumptions, with the use of artificial intelligence methods using genetic algorithms, simulations have been carried out to determine the optimal structure of energy generation mix in the cluster. Simulations have been carried out for many models of the clusters, that differ in the profiles of consumers' demand for power. Then the results were compared and general conclusions were formulated.

**Keywords:** energy cluster, system balancing, power system flexibility.