



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Elektrotechniki i Automatyki



Imię i nazwisko autora rozprawy: Agata Szultka

Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Sterowanie pracą sieci elektroenergetycznej z wykorzystaniem elektrochemicznych zasobników energii**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Control of the power network using electrochemical energy storage units**

Promotor
<i>podpis</i>
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny, prof. zw. PG
Promotor pomocniczy
<i>podpis</i>
Dr inż. Robert Małkowski

Gdańsk, rok 2019

SPIS TREŚCI

ABSTRACT	3
1. WSTĘP	4
2. TEZA I CEL PRACY	5
Teza pracy:.....	5
Cel pracy:.....	5
Zakres rozprawy:.....	5
3. PRZEGLĄD ZASOBNIKÓW ENERGII PRZEZNACZONYCH DO WSPÓŁPRACY Z SIECIĄ DYSTRYBUCYJNĄ.....	6
3. 1. Rodzaje zasobników energii	6
3. 2. Przekształtnik zasobnika energii.....	6
4. PROBLEMY W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ ORAZ MOŻLIWOŚCI ICH ELIMINACJI POPRZEZ WYKORZYSTANIE ZASOBNIKÓW ENERGII	7
5. ALORYTM GENETYCZNY OKREŚLANIA LOKALIZACJI ZASOBNIKÓW ENERGII.....	8
5. 1. Uzasadnienie wyboru metody poszukiwawczej do lokalizacji zasobników energii w sieci.....	8
5. 2. Opis algorytmu genetycznego wykorzystanego do określenia lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej	8
5. 3. Analiza pracy sieci SN z wykorzystaniem opracowanego algorytmu lokalizacyjnego.....	11
6. FUNKCJA CELU ALGORYTMU LOKALIZACYJNEGO I JEJ KOMPONENTY	17
7. STEROWANIE ROZMYTE ZASOBNIKIEM ENERGII.....	19
8. ANALIZA PRACY UKŁADU REGULACJI PRZEPROWADZONA NA PRZYKŁADOWYM MODELU SIECI DYSTRYBUCYJNEJ.....	23
8. 1. Opis analizowanej sieci nn	23
8. 2. Wyniki symulacji.....	25
9. PODSUMOWANIE.....	32
BIBLIOGRAFIA:.....	33

ABSTRACT

This doctoral dissertation presents the possibilities of using electrochemical energy storage to improve the operation of the distribution network. The analysis was performed in the Power Factory reflow program using medium voltage and low voltage distribution network models. The purpose of the work is the optimal use of energy storage in the network, thanks to their appropriate location and control. The genetic algorithm developed in the Power Factory DPL language was used to select the location of the energy storage. A controller created on the basis of fuzzy logic was used to control energy storage units.

The dissertation provides a review of the literature on the possibilities of using energy storage in the network, methods of location selection and ways to control energy storage. The impact of introducing active and reactive power on the voltage level in individual nodes in the network was discussed. The genetic algorithm used to select the location of energy storage in the network and the energy storage regulator were presented. The purpose function of the localization algorithm has also been described. The doctoral dissertation contains the results of simulation of medium voltage network operation taking into account the appropriate location of energy storage units in relation to the criterion of improving the voltage level in the network. The analysis of low voltage network operation was carried out both with the proper location of energy storage devices in the network and their proper control. It has been shown that the proper location and control of energy storage units has an impact on reducing the costs associated with failure to meet the required voltage level in the network and power losses, and also allows the installation of energy storage units with a total lower rated power and lower capacity.

Key words: energy storage units, genetic algorithm, fuzzy logic, middle and low voltage grid analysis

1. WSTĘP

Operatorzy sieci dystrybucyjnych zmagają się z licznymi wyzwaniami. Jednym z nich jest dostarczenie coraz większej mocy odbiorcom, przy utrzymaniu wymaganych parametrów jakościowych energii. Innym wyzwaniem są odnawialne źródła energii (OZE) instalowane w głębi sieci dystrybucyjnych, które w ostatnich latach stanowią przyczynę problemów związanych z niedotrzymaniem wymaganej wartości napięcia. Panele fotowoltaiczne (które są przykładowym OZE) coraz częściej pojawiają się u odbiorców w roli mikroźródeł. Największa produkcja energii elektrycznej przez źródła fotowoltaiczne występuje często w okresie małego obciążenia sieci. Zjawisko to jest przyczyną problemów napięciowych, przede wszystkim spotykanych w sieci niskiego napięcia (nn). Ponadto energia produkowana przez OZE niekiedy nie może być wprowadzona do sieci ze względu na zbyt wysoką wartość napięcia w węźle przyłączenia. Częstym problemem pojawiającym się w sieci nn jest asymetria napięciowa, najczęściej wynikająca z niesymetrycznego poboru lub generacji mocy.

W celu wyeliminowania wyżej wymienionych problemów można dokonać przebudowy sieci, np. poprzez skracanie obwodów lub zwiększenie przekroju poprzecznego przewodów elektroenergetycznych. Jednak to rozwiązanie jest czasochłonne, kosztowne i nie wyklucza wystąpienia dalszych problemów związanych z instalacją kolejnych OZE. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie zasobników energii, które pozwalają zarządzać przepływem mocy czynnej i biernej w sieci elektroenergetycznej.

Zasobniki energii, poprzez możliwość gromadzenia w nich energii mogą przyczynić się do eliminacji negatywnego wpływu stochastycznej zmienności mocy generowanej przez OZE. W konsekwencji mogą ograniczyć problemy napięciowe poprzez wyrównanie bilansu mocy czynnej i biernej, a także obniżyć szczyty obciążenia sieci, zmniejszając jednocześnie straty mocy oraz eliminując przeciążenia elementów przesyłowych [1]. Jednakże koszt związany z instalacją zasobników energii pozostaje nadal wysoki. Racjonalne jest zatem skupienie się na efektywnym ich wykorzystaniu, tj. spełnieniu założonych celów przy jak najniższym koszcie instalacji. Czynnikiem wpływającym na efektywne wykorzystanie zasobników energii jest odpowiedni dobór ich mocy, pojemności jak i lokalizacji w sieci [2]. Innym ważnym elementem optymalizacji jest właściwe sterowanie zasobnikami energii, które pozwala na wydajną pracę zasobnika energii poprzez odpowiednie zarządzanie generowaną/pobieraną mocą czynną i bierną [1].

Znaczna część niniejszej pracy jest poświęcona zagadnieniu związanym z poszukiwaniem optymalnej lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej, a także ich parametrów. Optymalizacja polega tu na maksymalizowaniu funkcji celu F , której składowe są przeliczane do jednego parametru – kosztów. Funkcja celu F złożona jest z następujących składowych: składowej odpowiedzialnej za koszt inwestycji związany z instalacją zasobników energii, składowej odpowiadającej kosztom niedotrzymania wymaganego poziomu napięcia w sieci, składowej związanej ze stratami mocy czynnej oraz składowej odpowiedzialnej za koszt związany z przeciążeniem elementów przesyłowych sieci elektroenergetycznej.

Optymalizację lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej zrealizowano przy użyciu algorytmu genetycznego (AG) zaimplementowanego w programie Power Factory [3], [4].

Rozprawa obejmuje także opracowanie wieloparametrowego regulatora zasobnika energii. W opracowanym algorytmie sterowania zasobnikiem energii, zmiennymi wejściowymi są: poziom napięcia w węźle przyłączenia zasobnika energii, profil obciążenia linii zasilającej dany węzeł oraz stan naładowania/rozładowania zasobnika energii. Zmiennymi wejściowymi są zadana moc czynna i bierna dla zasobnika energii. Regulator opracowano z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej w programie Power Factory.

W pracy doktorskiej analizom podlegały sieci dystrybucyjne średniego napięcia (SN) i niskiego napięcia (nn), w których zamodelowano dobową, dyskretną zmienność obciążenia sieci. W pierwszej kolejności analiza została przeprowadzona na testowej sieci SN, na której przetestowano algorytm lokalizacyjny. W kolejnym etapie przebadano przykładową sieć nn, w której występują OZE.

2. TEZA I CEL PRACY

Teza pracy:

Poprawę jakości pracy sieci dystrybucyjnej można osiągnąć poprzez właściwą lokalizację zasobników energii oraz odpowiednie ich sterowanie.

Cel pracy:

Celem rozprawy jest:

- wykazanie, że skuteczna poprawa wskaźników jakościowych energii elektrycznej może być zrealizowana przy wykorzystaniu elektrochemicznych zasobników energii,
- wykazanie, że uwzględnienie kryteriów regulacji zasobników w procesie określania lokalizacji istotnie wpływa na efektywności ich wykorzystania,
- opracowanie algorytmu lokalizacji zasobników,
- opracowanie algorytmu sterowania zasobnikiem energii.

Zakres rozprawy:

1. Badania literaturowe.
2. Opracowanie modelu sieci dystrybucyjnej ze zmiennym obciążeniem w programie Power Factory, w tym zamodelowanie stochastycznej zmienności generowanej mocy przez OZE.
3. Analiza sieci pod względem parametrów jakościowych energii i obciążenia poszczególnych elementów sieci.
4. Określenie odpowiedniej lokalizacji zasobników energii przy wykorzystaniu Algorytmu Genetycznego.
5. Opracowanie regulatora zasobnika energii na bazie logiki rozmytej.
6. Weryfikacja efektywności opracowanego układu sterowania siecią z zasobnikami energii.

3. PRZEGLĄD ZASOBNIKÓW ENERGII PRZEZNACZONYCH DO WSPÓŁPRACY Z SIECIĄ DYSTRYBUCYJNĄ

3.1. Rodzaje zasobników energii

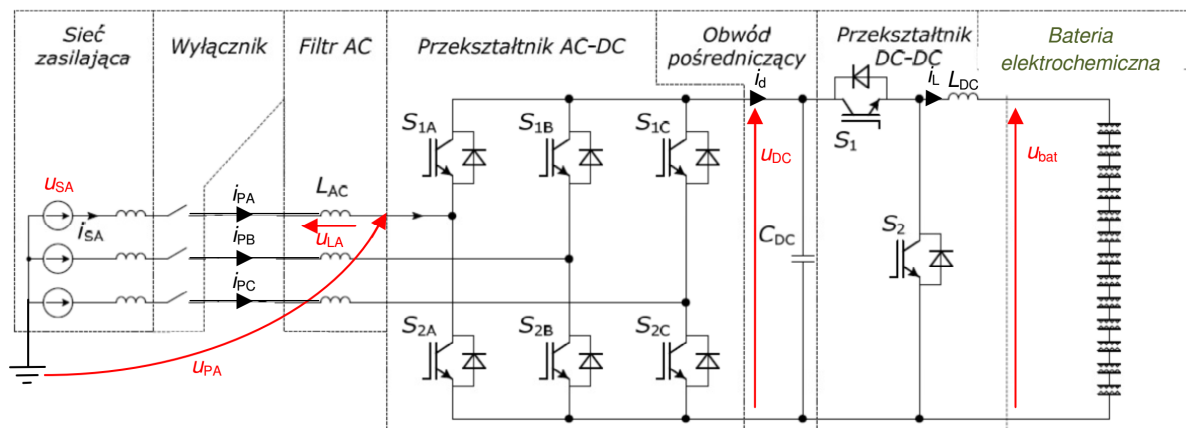
W ostatnich latach nastąpił znaczny postęp w rozwoju magazynów energii [5], [6]. Wyróżnić można następujące typy zasobników energii:

- kinetyczne zasobniki energii (*ang. Flywheel Energy Storage*),
- ogniwa paliwowe,
- elektrownie szczytowo-pompowe,
- pneumatyczne zasobniki energii – CAES (*ang. Compressed Air Energy Storage*),
- superkondensatory (*ang. Supercapacitors*),
- nadprzewodnikowe zasobniki energii – SMES (*ang. Superconductive Megnetic Energy Storage*),
- bateryjne zasobniki energii [7].

W pracy doktorskiej rozważane są wolnozmiennne stany pracy sieci – związane ze zmiennością mocy generowanej i pobieranej, wobec tego w dalszej analizie założono wykorzystanie baterii akumulatorowych. Ze względu na właściwości fizyczne do dalszej analizy przyjęto parametry (gęstość mocy i gęstość energii) zasobników energii odpowiadające akumulatorom litowo-jonowym.

3.2. Przekształtnik zasobnika energii

Magazyn energii, jakim może być np. bateria elektrochemiczna, przyłączany jest do sieci elektroenergetycznej przez układ energoelektroniczny. Na rysunku 3.1 przedstawiony jest schemat podłączenia zasobnika energii do sieci. Dzięki istnieniu układu energoelektronicznego możliwe staje się dostarczanie do sieci zarówno mocy czynnej, jak i biernej.



Rys. 3.1. Schemat podłączenia zasobnika energii do sieci [8]

Ograniczeniem układu, który należy uwzględnić w analizie jest maksymalny prąd I_{max} zasobnika energii. Na wartość maksymalnego prądu ładowania / rozładowania I_{max} zasobnika energii, którego wartość ma przełożenie na moc pozorną układu, mają wpływ następujące czynniki: napięcie sieci u_{SA} , napięcie kondensatora u_{DC} , pojemność kondensatora C_{DC} , indukcyjność dławików L_{AC} , maksymalny prąd ładowania / rozładowania baterii ograniczany przez jej wewnętrzny system bezpieczeństwa – BMS (*ang. Battery Management System*) [9], [10]. W dalszej części pracy przyjęto ograniczenie mocy pozornej zasobnika energii, opisane wzorem (3.1), gdzie moc pozorna układu S_{ZE} nie może przekraczać jego mocy pozornej maksymalnej S_{max} .

$$S_{ZE} \leq S_{max} \quad (3.1)$$

4. ZASTOSOWANIE ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

Wyróżnić możemy następujące możliwości zastosowania zasobników energii do współpracy z siecią elektroenergetyczną:

- wyrównywanie obciążenia, redukcja szczytów obciążenia,
- ograniczenie strat w sieci elektroenergetycznej,
- sterowanie poziomem napięcia,
- eliminacja asymetrii obciążenia oraz wyższych harmonicznych,
- współpraca z odnawialnymi źródłami energii,
- zasilanie awaryjne,
- eliminacja przeciążenia elementów przesyłowych sieci,
- praca programowa [1], [2], [11].

W niniejszej pracy uwagę poświęcono zagadnieniu związanym z jakością energii elektrycznej. Jakość energii elektrycznej definiowana jest poprzez następujące parametry: wartość napięcia, współczynnik THD (mówiący o zawartości wyższych harmonicznych), współczynnik asymetrii oraz współczynnik długookresowego migotania światła P_{LT} . W rozprawie doktorskiej skupiono się na poprawie wartości napięcia. Jest to warunek m. in. w sieciach nn, w których źródła fotowoltaiczne często są przyczyną wzrostu wartości napięcia lub w wyniku zbyt dużego obciążenia sieci – spadku wartości napięcia poza dopuszczalną granicę określoną w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD). Dla sieci SN i nn, 95% z 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia musi zawierać się w zakresie $\pm 10\% U_n$ (napięcia znamionowego sieci).

Sterowanie napięciem w sieci nn można realizować poprzez zmianę napięcia zasilającego sieć średniego napięcia (SN) pod obciążeniem, zmianę przekładni transformatorów SN/nn w stanie beznapięciowym lub poprzez instalację dodatkowych środków technicznych powiększających stabilność napięciową w sieci, jak np. baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej, kondensatory szeregowo do kompensacji reaktancji linii, autotransformatory dodawcze. Innym zabiegiem wpływającym na poziom napięcia w sieci jest jej przebudowa, polegająca na: wyprowadzeniu nowych linii od stacji zasilającej, wymianie przewodów na przewody o większym przekroju lub dobudowie nowych stacji SN/nn i skróceniu długości linii nn. Kolejnym sposobem jest odpowiednie zarządzanie rozplływem mocy czynnej i biernej w sieci, którą można osiągnąć poprzez instalację zasobników energii w sieci elektroenergetycznej lub innych sterowalnych źródeł mocy [12].

5. ALORYTM GENETYCZNY OKREŚLANIA LOKALIZACJI ZASOBNIKÓW ENERGII

5.1. Uzasadnienie wyboru metody poszukiwawczej do lokalizacji zasobników energii w sieci

Tematyka lokalizacji i parametryzacji zasobników energii w sieci elektroenergetycznej jest zagadnieniem złożonym, zwłaszcza gdy analizie podlegają rozległe sieci dystrybucyjne. W takim przypadku metody analityczne mogą być niewystarczające w celu rozwiązania zagadnienia doboru lokalizacji i wielkości zasobników energii. Metody eksperckie mogą zawęzić dziedzinę rozwiązań, ale nie gwarantują uzyskania najlepszego wyniku. Programowanie matematyczne bazuje na uproszczonych modelach, które nie zawsze odzwierciedlają w pełni rzeczywistość, zwłaszcza gdy optymalizowane zmienne są nieliniowe. Zastosowanie metod heurystycznych jest efektywnym rozwiązaniem, które można zastosować do lokalizacji zasobników energii w sieci elektroenergetycznej. Zastosowanie tych metod nie jest skomplikowane, nie wymaga uproszczenia modelu, rozwiązanie poszukiwane jest w całej dziedzinie, a czas poszukiwania rozwiązania przez algorytmy oparte na metodach heurystycznych jest czasem akceptowalnym. Mając na uwadze powyższe, do opracowania algorytmu doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii w sieci wykorzystano algorytm genetyczny.

5.2. Opis algorytmu genetycznego wykorzystanego do określenia lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej

Opracowany algorytm genetyczny służący do wyboru lokalizacji i typu zasobnika energii został w pierwszej kolejności wykorzystany do lokalizacji zasobników energii w sieci SN. Badana sieć SN jest siecią symetryczną, w której duże wartości mocy odbiorów powodują widoczne spadki napięcia w sieci. Lokalizacja zasobników energii oparta jest na maksymalizacji funkcji celu F (w dalszej części pracy opisana wzorem 5.5), na której wartość negatywnie wpływają (tj. pomniejszają jej wartość) koszty związane z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia w sieci oraz koszty związane z instalacją zasobników energii. Osobniki najlepiej przystosowane osiągają najwyższe wartości funkcji celu. Optymalizacja jest przeprowadzona na bazie dobowej zmienności obciążenia, gdzie zamodelowano zmianę mocy odbiorów co godzinę, stąd $T = 24$ (T – okres analizy).

Przyjęto, że populacja \mathbf{P} składa się z k_{\max} osobników (k jest numerem kolejnego osobnika populacji). Każdy osobnik składa się z jednego chromosomu o n -genach. Macierz reprezentująca populację \mathbf{P} opisano wzorem (5.1).

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} i_{1,1} & \dots & i_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{k_{\max},1} & \dots & i_{k_{\max},n} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Wartość genu i odpowiada konkretnemu węzłowi sieci, w którym jest możliwość przyłączenia zasobnika energii. Wartości jakie mogą być przypisane genom, są liczbami całkowitymi i naturalnymi oraz odpowiadają zdefiniowanemu typowi zasobnika energii.

Funkcja celu F (funkcja przystosowania) obliczana jest dla każdego osobnika z populacji (5.2):

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_k \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Wartość funkcji celu wyznaczana jest na podstawie obliczeń rozptylowych obliczanych dla dyskretnych chwil czasu $t = < 0, T >$. Można ją przedstawić w postaci sumy funkcji cząstkowych F_t obliczanych po każdym rozptywie mocy (5.3):

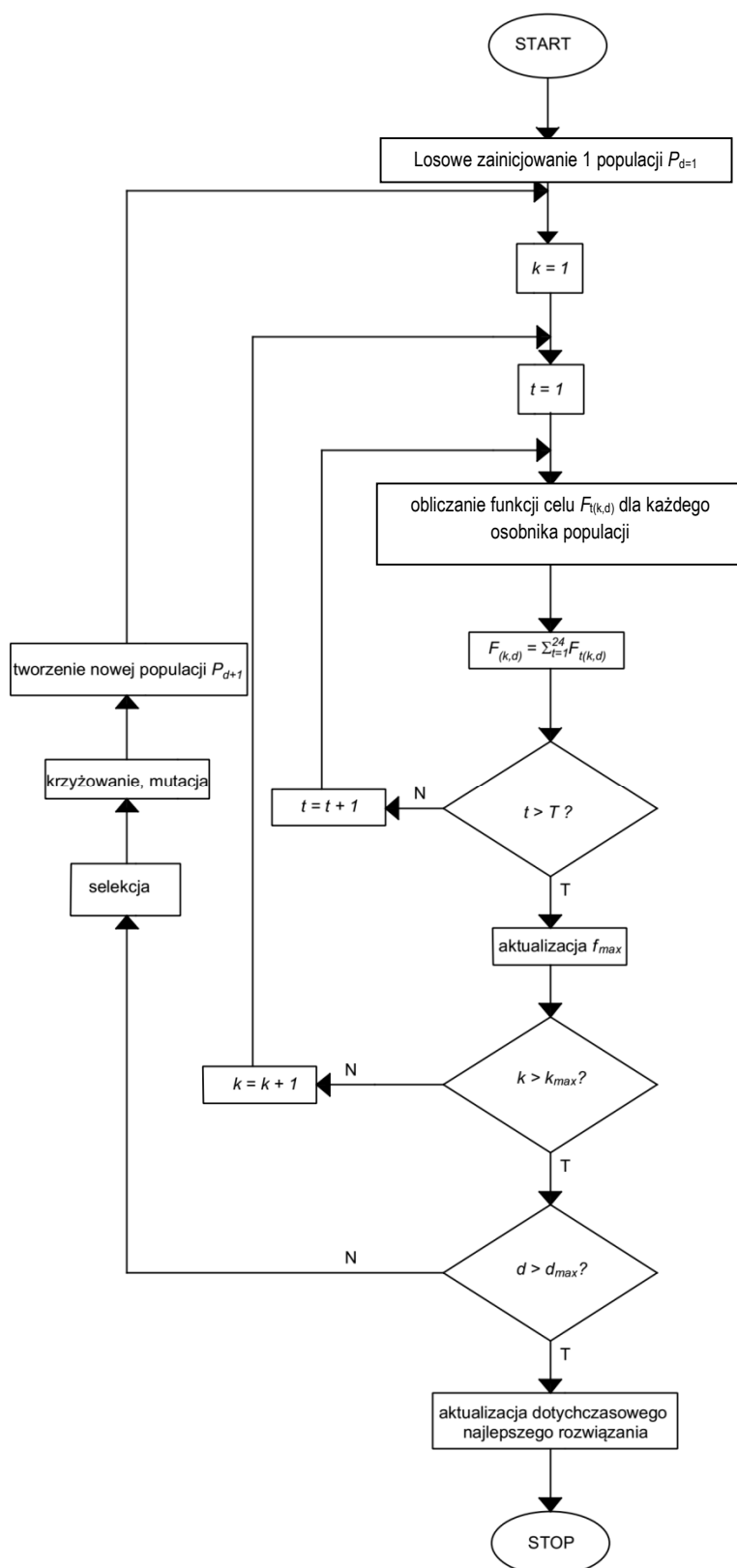
$$F_k = \sum_{t=1}^T F_{kt} \quad (5.3)$$

Selekcja przeprowadzana jest przy użyciu tzw. metody ruletki, w wyniku której następuje przypadkowy wybór osobników z uwzględnieniem wartości ich funkcji przystosowania. Osobniki charakteryzujące się najwyższą funkcją przystosowania mają największe szanse na współudział w tworzeniu nowego pokolenia. Nowe osobniki są tworzone z wykorzystaniem operatorów genetycznych takich jak: krzyżowanie i mutacja. Sukcesja jest częściowa, tzn. po dokonaniu sortowania odrzucone są osobniki o najniższym stopniu przystosowania. Stopień przystosowania danego osobnika określony jest przez wartość funkcji F_k . Warunkiem zatrzymania działania algorytmu jest osiągnięcie maksymalnej liczby generacji d_{max} . Najlepszy osobnik, którego funkcja przystosowania osiągnęła najwyższą wartość f_{max} wybierany jest ze wszystkich populacji, występujących w całym okresie reprodukcji (5.4):

$$f_{max} = \max \begin{bmatrix} f_{1,1} & \dots & f_{k,max,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{1,d,max} & \dots & f_{k,max,d,max} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Po wyborze najlepszego osobnika, wartości genów w jego chromosomie są przypisywane ostatecznemu rozwiązaniu.

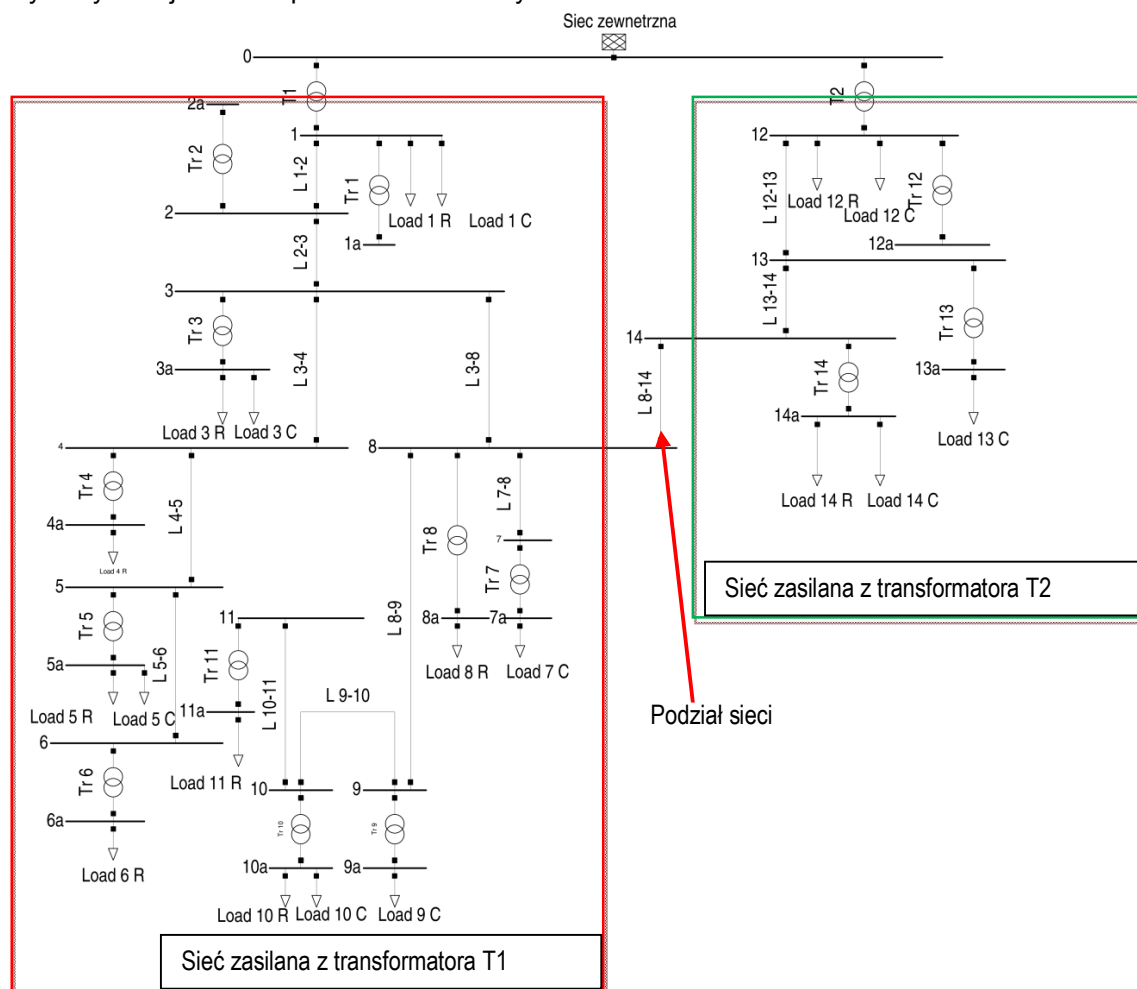
Schemat blokowy działania opisanego Algorytmu Genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej

5.3. Analiza pracy sieci SN z wykorzystaniem opracowanego algorytmu lokalizacyjnego

Weryfikacja działania algorytmu genetycznego wykorzystanego do lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej została przeprowadzona na testowej sieci SN. Poglądowy schemat wykorzystanej sieci SN przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Schemat analizowanej sieci SN

Celem funkcji przystosowania w tym przypadku jest uzyskanie jak najmniejszych odchyłek napięcia w węzłach odbiorczych, przy jednoczesnym zminimalizowaniu kosztu związanego z instalacją zasobników energii (ich odpowiednia lokalizacja w sieci może przełożyć się na potrzebę zainstalowania mniejszej sumarycznej mocy i liczby urządzeń). W ten sposób w skład funkcji celu F wchodzi dwa niezależne składniki, które są sprowadzone do jednego wymiaru – kosztów. Pierwszy składnik W_{UT} (zależność 5.6) związany jest z minimalizacją kosztów związanych z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia, drugi K z sumarycznym kosztem zainstalowanych zasobników energii, co opisuje zależność (5.5).

$$F = \sum_{t=1}^T \left(C - \sum_{n=1}^N W_{UT_t} \right) - \frac{K}{t_p} \quad (5.5)$$

gdzie:

- t_p – okres eksploatacji zasobników energii – w analizie przyjęto przewidywany okres eksploatacji zasobników energii równy 5 lat (czyli $t_p = 365 \cdot 5$),
- n – kolejna węzeł w sieci,
- N – ilość węzłów w sieci,

- K - całkowity koszt zasobników energii,
- W_{UT} - koszt związany w niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia w sieci.
- T - liczba scenariuszy obciążenia.

W krajowym systemie elektroenergetycznym koszty związane z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia podzielone są na trzy przedziały. Gdy wartość napięcia mieści się w wymaganym przedziale U_{minA} i U_{maxA} , to koszt niedotrzymania jest równy zero. Gdy napięcie mieści się w przedziale $\langle U_{minB}; U_{minA} \rangle$ lub $\langle U_{maxA}; U_{maxB} \rangle$, wówczas koszty opisane są wzorem 5.6. Wzór 5.7 jest używany w przypadku przekroczenia wartości napięcia U_{minB} lub U_{maxB} [13], [14].

$$W_{UT} = \begin{cases} \left(\frac{\Delta U}{\Delta U^*}\right)^2 \cdot A_t \cdot C_t & , \text{ gdy } U \in \langle U_{minB}, U_{minA} \rangle \cup \langle U_{maxA}, U_{maxB} \rangle \\ A_t \cdot C + b_{rT} \cdot t_r & , \text{ gdy } U \in \langle 0, U_{minB} \rangle \cup \langle U_{maxB}, \infty \rangle \end{cases} \quad (5.6)$$

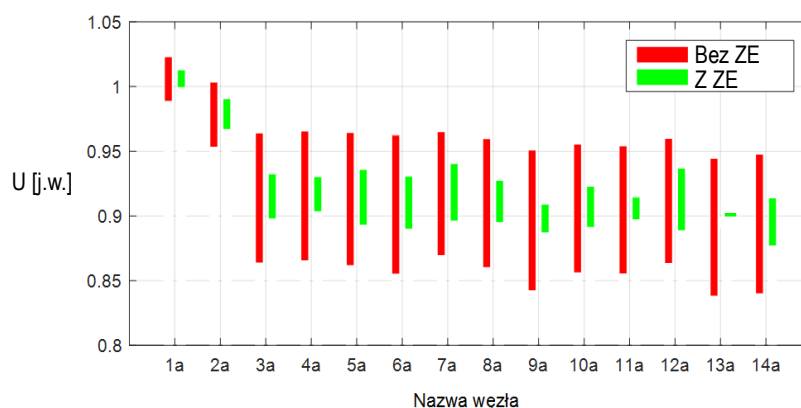
$$(5.7)$$

$$\Delta U^* = (U_{minA} - U_{minB})/U_n$$

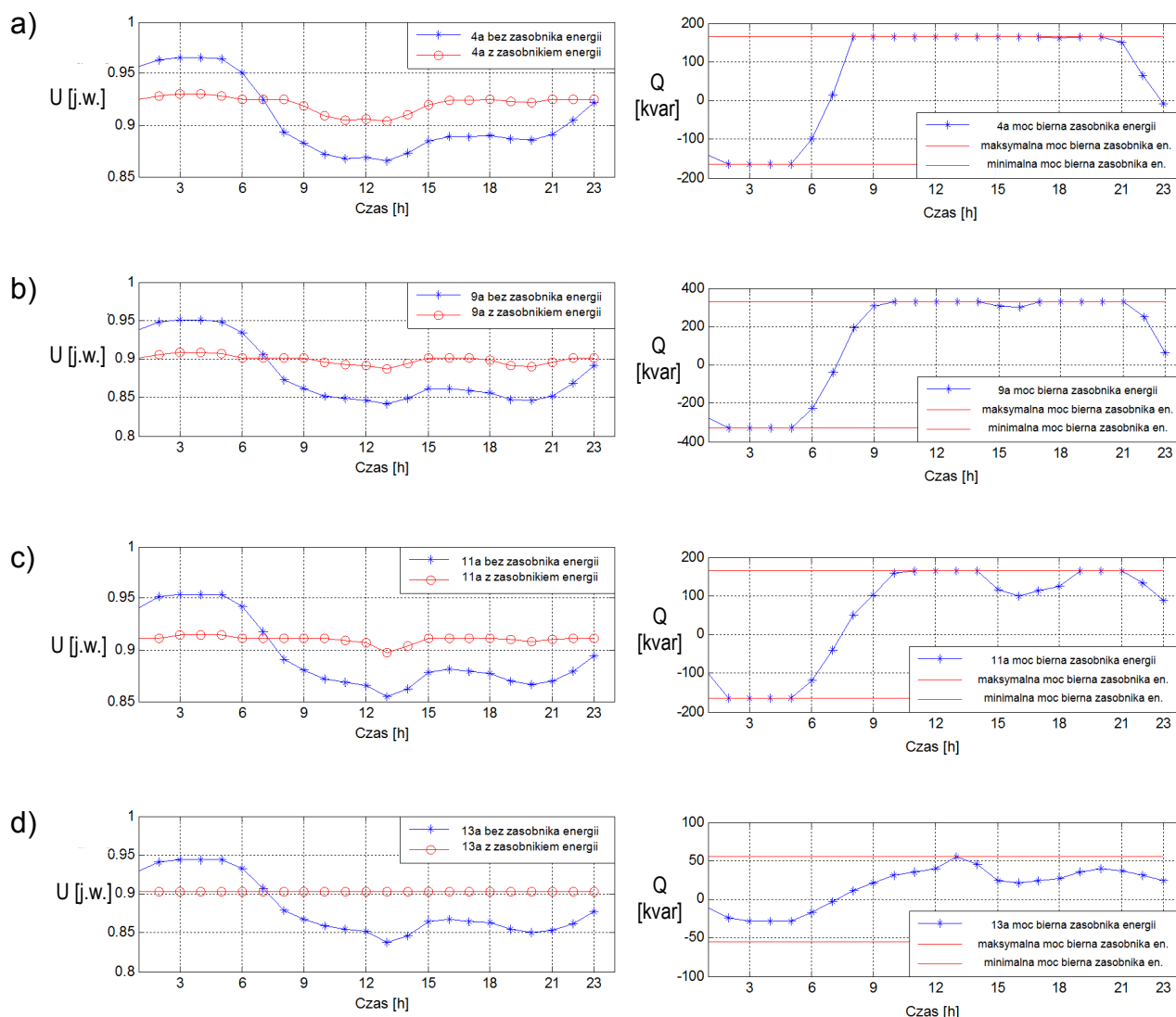
gdzie:

- ΔU - odchyłka napięcia od wartości znamionowej,
- A_t - energia elektryczna [MWh] pobierana w danym węźle podczas analizowanego okresu,
- C - średnia cena energii elektrycznej. Do obliczeń została przyjęta średnia cena za rok 2016: 171,14 [zł/MWh],
- b_{rt} - dodatkowa opłata za niedotrzymanie wymaganego poziomu napięcia. W 2016 r. opłata wynosiła: 10,00 [PLN/h],
- t_r - czas trwania niedotrzymania napięcia.

Na rys. 5.3 i 5.4 przedstawiono poziomy napięć w wybranych węzłach w sieci dystrybucyjnej przed i po zainstalowaniu w niej zasobników energii oraz wartości mocy bierniej wprowadzanej przez wybrane zasobniki energii do sieci. Zasobniki energii działają z kryterium dostarczania mocy bierniej (ze względu na współczynnik R/X sieci), przy uwzględnieniu ograniczenia związanego z minimalną lub maksymalną mocą pozorną zasobników energii.



Rys. 5.3. Minimalny i maksymalny poziom napięcia w węzłach analizowanej sieci



Rys. 5.4. Dobowa zmienność napięcia w wybranych węzłach sieci i moc bierna dostarczana lub pobierana przez zasobnik energii zlokalizowany w danym węźle, a) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 4a, b) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 9a, c) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 11a, d) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 13a.

W celu regulacji napięcia w sieci SN zastosowano kryterium mocy biernej z uwagi na charakterystykę sieci, której współczynnik R/X wynosił ($R/X \ll 1,0$). Wprowadzanie mocy biernej przez zasobniki energii jest możliwe, ale powinno to stanowić dodatkową funkcjonalność poza pobieraniem / dostarczaniem mocy czynnej. Typowo do sterowania mocą bierną służą inne urządzenia, tj. filtry aktywne, czy kondensatory.

W celu weryfikacji działania algorytmu genetycznego pod kątem możliwości wprowadzania mocy czynnej wykonano kolejną analizę. Założenia dotyczące liczby i parametrów zasobników energii są takie same jak w poprzedniej analizie. Funkcja celu F także nie została zmieniona. Analizę przeprowadzono dla dwóch sieci o różnej wartości współczynnika R/X , gdzie $R/X_1 < R/X_2$. Schemat sieci przyjęty do badań odpowiada schematowi sieci na rys. 5.1. Zmianie uległy jedynie parametry elementów sieci (linie napowietrzne zostały zastąpione liniami kablowymi). W celu porównania wpływu zmiany poboru mocy czynnej, jak i biernej w sieci 1 oraz w sieci 2, w analizie zastosowano dwa rodzaje regulacji dla zasobników energii:

- P_{crit} – w którym zasobniki energii mogły dostarczać tylko moc czynną,
- Q_{crit} – w którym zasobniki energii mogły dostarczać tylko moc bierną.

W ten sposób otrzymano następujące warianty analizy:

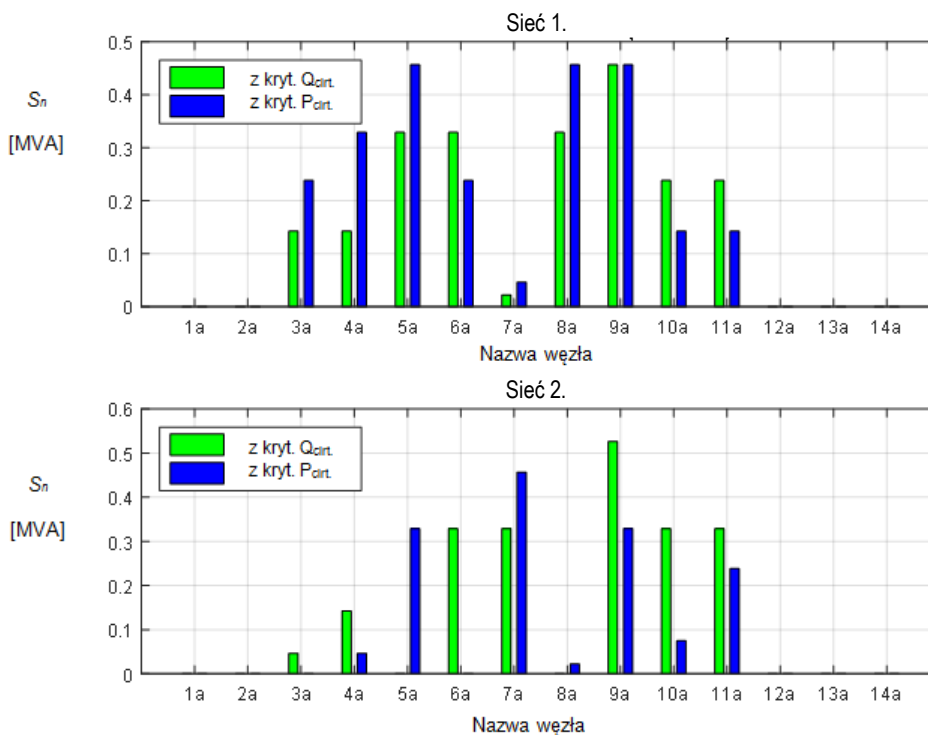
1. Dla sieci 1 o R/X_1 z kryterium regulacji zasobników energii P_{crit} ,
2. Dla sieci 1 o R/X_1 z kryterium regulacji zasobników energii Q_{crit} ,
3. Dla sieci 2 o R/X_2 z kryterium regulacji zasobników energii P_{crit} ,
4. Dla sieci 2 o R/X_2 z kryterium regulacji zasobników energii Q_{crit} .

Należy zaznaczyć, że w przypadku zastosowania regulacji P_{crit} należało uwzględnić pojemność zasobnika energii i stan naładowania zasobnika energii. Wprowadzało to dodatkowe ograniczenie w procesie decyzyjnym, w porównaniu do przypadku dla regulacji Q_{crit} .

Sumaryczna moc zasobników energii S_{sum} zainstalowanych w sieci dla każdego z przypadków wynosi:

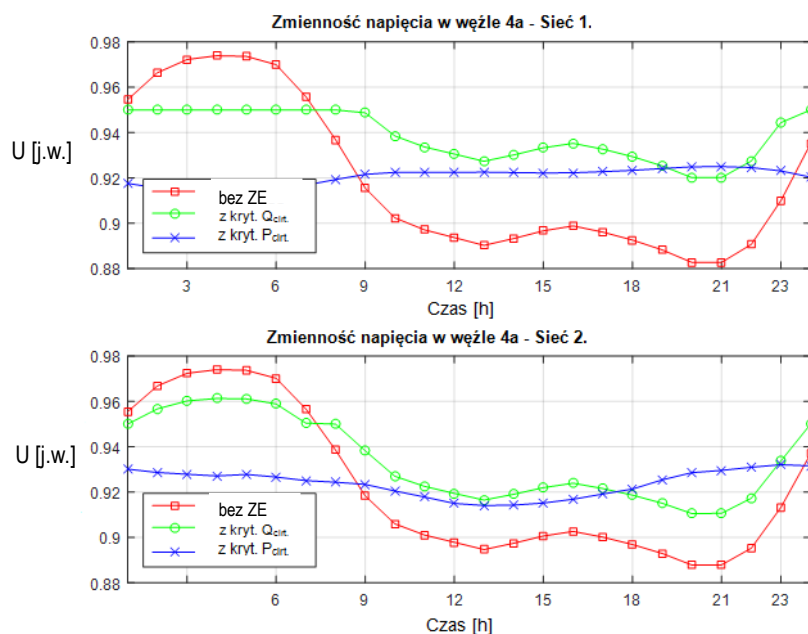
1. Wariant 1: $S_{sum} = 2506,63$ kVA,
2. Wariant 2: $S_{sum} = 2227,07$ kVA,
3. Wariant 3: $S_{sum} = 1495,83$ kVA,
4. Wariant 4: $S_{sum} = 2030,82$ kVA.

Na rysunku 5.5 przedstawiono przypisanie odpowiedniej mocy zasobników energii do poszczególnych węzłów w sieci, dla omawianych wariantów.

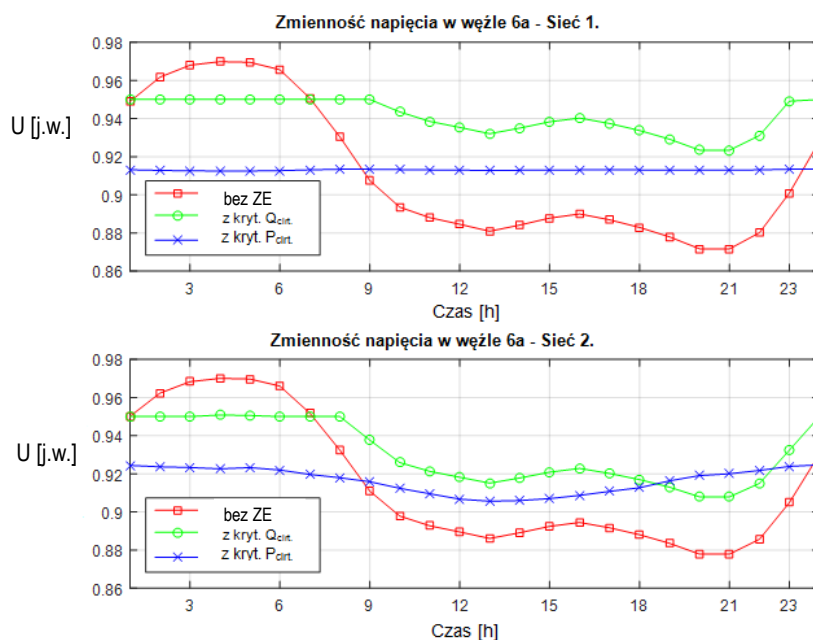


Rys. 5.5. Przypisane mocy znamionowej zasobników energii przez algorytm lokalizacyjny dla dwóch rodzajów regulacji P_{crit} i Q_{crit} , dla dwóch sieci różniących się współczynnikiem R/X

Na rysunkach 5.6 i 5.7 przedstawiono zmienność napięcia w wybranych węzłach obu analizowanych sieci. Na każdym z wykresów przedstawiono krzywe obrazujące zmienność napięcia w danym węźle, dla wariantu kiedy nie ma w sieci zasobników energii, dla wariantu kiedy lokalizacja nastąpiła z kryterium regulacji zasobników energii P_{crit} oraz Q_{crit} .



Rys. 5.6. Zmienność napięcia w węźle nr 4a dla sieci nr 1 i 2



Rys.5.7. Zmienność napięcia w węźle nr 6a dla sieci nr 1 i 2

Dla sieci nr 1 ($R/X_1 < R/X_2$) wymagany poziom napięcia w węzłach można było osiągnąć instalując mniejszą ilość zasobników energii (pod względem sumy ich mocy znamionowych) – 2506,63 kVA dla sterowania poziomem napięcia z wykorzystaniem dostarczania/odbierania mocy biernej, niż dla sterowania poziomem napięcia związanego z dostarczaniem/odbieraniem mocy czynnej P_{crit} – 2227,07 kVA. Dla sieci nr 2 wymagany poziom napięcia w węzłach można było osiągnąć instalując mniejszą ilość zasobników energii dla sterowania P_{crit} – 1495,85 kVA (dla Q_{crit} –

2030,82 kVA). Wiąże się to z tym, że większą efektywność w regulacji napięcia dla sieci nr 1 uzyskano stosując sterowanie mocą bierną zasobników energii $Q_{crit.}$, a dla sieci nr 2 stosując sterowanie mocą czynną zasobników energii $P_{crit.}$. Sieć nr 2 charakteryzuje się tym, że w tej sieci istotniejsza z punktu sterowania poziomem napięcia w sieci jest moc czynna.

Z analizy wyników badań wynika, że wykorzystanie możliwości wprowadzania mocy biernej przez zasobniki energii do sieci może przynieść wymierne korzyści pod względem regulacji napięcia w sieci. Z tego względu warto wziąć pod uwagę zarówno kryterium wprowadzania mocy czynnej jak i biernej do regulacji napięcia w sieci. Oba rodzaje regulacji stanowią element algorytmu działania regulatora zasobnika energii przedstawionego w dalszej części rozprawy. W związku z tym, że docelowo analizowane są sieci nn (współczynnik $R/X_{nn} \gg 1,0$), w których występują zakłócenia związane z nadmiernym obciążeniem sieci lub wprowadzania mocy przez generację rozproszoną, kryterium nadrzędnym dla sieci nn jest P_{crit} (kryterium mocy czynnej). Dopiero, gdy kończą się możliwości wprowadzania mocy czynnej (np. ze względu na stan rozładowania zasobnika energii) brana jest pod uwagę możliwość wymiany mocy biernej.

6. FUNKCJA CELU ALGORYTMU LOKALIZACYJNEGO I JEJ KOMPONENTY

Z praktyki związanej z eksploatacją sieci dystrybucyjnej wynika, że obecnie w sieciach SN i nn głównymi problemami statycznymi są problemy związane z niedotrzymaniem wymaganej wartości napięcia oraz problemy z przeciążeniem elementów przesyłowych. Te wymagania zostały uwzględnione jako składowe funkcji celu w dalszych badaniach. Dodatkowym elementem składowym funkcji celu jest ograniczenie strat mocy czynnej w sieci. Wymagania te powinny być spełnione przy jak najniższym koszcie związanym z instalacją zasobników energii. Celem optymalizacji jest zmaksymalizowanie wartości funkcji celu opisanej poniższym wzorem (6.1):

$$F = C - \sum_{t=1}^T (p_1 + p_3 + p_4) - p_2 \quad (6.1)$$

gdzie:

- p_1 - składowa funkcji celu odpowiedzialna za koszt niedotrzymania wymaganego poziomu napięcia w sieci [PLN],
- p_2 - składowa funkcji celu odpowiedzialna za koszt instalacji zasobników energii w sieci [PLN],
- p_3 - składowa funkcji celu odpowiedzialna za straty mocy w sieci [PLN],
- p_4 - składowa funkcji celu odpowiedzialna za koszt związany z przeciążeniem elementów przesyłowych sieci [PLN],
- C - stała wykorzystana, aby funkcja przyjmowała wartości dodatnie.

Składowa funkcji celu odpowiedzialna za poziom napięcia w badanej sieci pozostaje niezmienna – taka jak w przypadku poprzednich analiz, określona ogólnym wzorem (6.2):

$$p_1 = \sum_{n=1}^N W_{UT} \quad (6.2)$$

gdzie:

- W_{UT} - koszt związany z niedotrzymaniem napięcia w węźle n ,
- N - liczba węzłów w sieci.

Koszt zasobników energii jest związany z wyborem odpowiedniego typu zasobnika energii. W tabeli 6.1. zestawiono koszty zasobników energii przewidzianych do pracy w sieci nn.

Tabela 6.1. Parametry techniczne oraz koszt zasobników energii wykorzystanych w analizie pracy sieci nn [15]

Nr zasobnika	Moc [kW]	Pojemność [kWh]	Koszt [PLN]
1	4,0	7,5	33 020
2	4,8	9,0	37 540
3	5,6	10,5	41 665
4	6,4	12,0	45 770
5	8,2	13,5	49 670
6	9,0	14,0	53 370

Koszt związany z instalacją zasobników energii jest związany z wyborem mocy i pojemności zasobników energii oraz ich miejsca zainstalowania. W związku z tym, że analiza pracy sieci obejmuje 1 dobę, koszt instalacji zasobnika w danym węźle jest podzielony przez przewidywany okres eksploatacji zasobnika energii (dla nowoczesnych baterii litowo-jonowych średni przewidywany czas eksploatacji to ok. 10 lat, tj. $t_p = 365 \cdot 10$). Sumaryczny koszt instalacji zasobników energii w sieci obejmuje sumę kosztów wszystkich urządzeń przeznaczonych do magazynowania energii w N węzłach.

$$p_2 = \sum_{n=1}^N \frac{K + w_n}{t_p} \quad (6.3)$$

gdzie:

- W_n - koszt instalacji zasobnika w węźle n ,
- K - koszt danego typu zasobnika energii,
- t_p - czas eksploatacji zasobnika energii w odniesieniu do czasu trwania analizy.

Straty mocy czynnej w sieci elektroenergetycznej ΔP pomnożone przez cenę energii elektrycznej C_t oraz czas t można wprost odnieść do kosztów. Straty energii obejmują sumaryczne straty energii w sieci składającej się z L elementów przesyłowych.

$$p_3 = \sum_{l=1}^L \Delta P_l \cdot C_t \cdot t \quad (6.4)$$

gdzie:

- ΔP_l - straty mocy czynnej w elemencie sieci l ,
- L - liczba elementów sieci,
- t - czas pomiędzy kolejnymi dyskretnymi wartościami obciążenia.

Przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale określonej dla danego typu izolacji przewodu elektroenergetycznego powoduje zmniejszenie projektowanej trwałości izolacji według zależności wykładniczej opisaną krzywą Arrheniusa. Zależność ta jest zawarta w składowej p_4 , która jest opisana wzorem (6.5) i ma zastosowanie w przypadku linii elektroenergetycznych.

$$p_4 = \sum_{i=1}^L a \quad (6.5)$$

gdzie

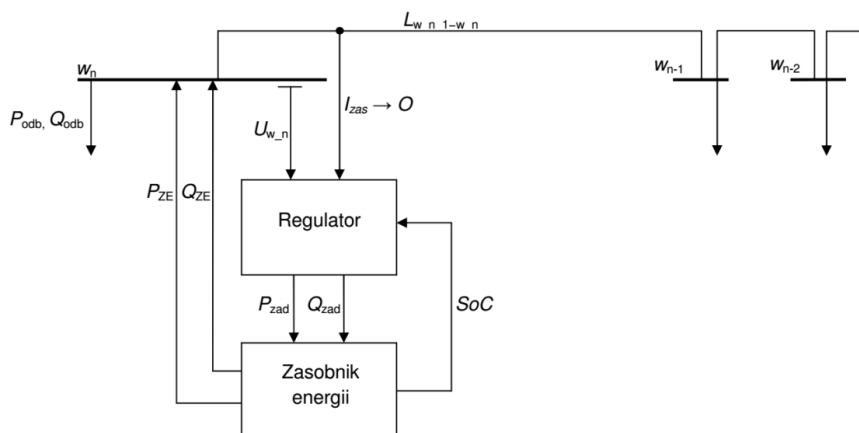
$$a = \begin{cases} \left[\frac{C_{TP} \cdot l \cdot \left(1 - 127768 e^{-8,715 \frac{L_{obc_i}}{100\%}} \right)}{T} \right] \cdot t_i & , \text{gdzie } (L_{obc_i} > 100\%) \\ 0 & , \text{gdzie } (L_{obc_i} < 100\%) \end{cases} \quad (6.6)$$

gdzie:

- C_{TP} - jednostkowa cena danego typu przewodu [PLN/km],
- L - liczba elementów przesyłowych w sieci,
- l - długość przewodu [km],
- L_{obc} - obciążenie elementu [%],
- T - analizowany okres [h],
- t_i - okres trwania przeciążenia [h],
- a - zmienna pomocnicza.

7. STEROWANIE ROZMYTE ZASOBNIKIEM ENERGII

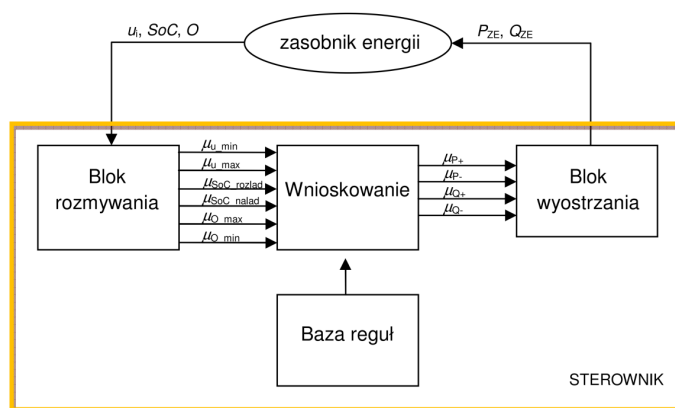
Dotychczas nie została przeanalizowana sytuacja, w której zasobnik może dostarczać moc czynną i bierną jednocześnie. W tym celu został opracowany regulator zasobnika energii. Schemat układu regulacji zasobnika energii przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Schemat układu regulacji zasobnika energii

Daną wejściową regulatora zasobnika energii jest wartość napięcia w sieci $U_{w,n}$ (wybrano pomiar napięcia w punkcie przyłączenia zasobnika do sieci, ale również możliwy jest pomiar napięcia wykonany w dowolnym węźle sieci). Kolejną zmienną wejściową jest obciążenie linii zasilającej O (wartości obciążenia linii zasilającej zostały przeliczone do jednostek względnych przy uwzględnieniu założonego dobowego profilu obciążenia, możliwy także jest wybór dowolnej linii w sieci – nie koniecznie linii zasilającej). W procesie regulacji brany jest pod uwagę również stan naładowania zasobnika energii SoC . Zmiennymi wyjściowymi regulatora zasobnika energii są wartości zadane mocy czynnej i biernej P_{zad} i Q_{zad} . Po otrzymaniu informacji o zadanych wielkościach mocy P_{zad} i Q_{zad} zasobnik energii dostosowuje do nich swoją moc wyjściową P_{ZE} i Q_{ZE} . Model regulatora został opracowany w programie rozpliwowym Power Factory, z użyciem wewnętrznego języka programowania DPL.

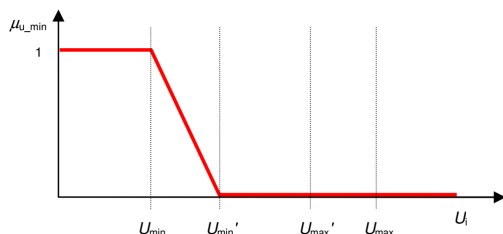
Do sterowania zasobnikiem energii wykorzystano regulator zrealizowany w oparciu o logikę rozmytą. Dane wejściowe ulegają fuzyfikacji zgodnie z charakterystykami opisanymi poniżej (rys. 7.3÷7.8). Następnie dane poddane są dalszej analizie, która jest przeprowadzona z wykorzystaniem Bazy Reguł w Bloku Wnioskowania. W wyniku wnioskowania określone są rozmyte wartości μ_P i μ_Q , które muszą przejść proces wyostrzania. Dopiero ostre wartości zadane mocy czynnej P_{zad} i mocy biernej Q_{zad} trafiają jako sygnał zadany do zasobnika energii. Schemat działania regulatora rozmytego jest zobrazowany na rys. 7.2.



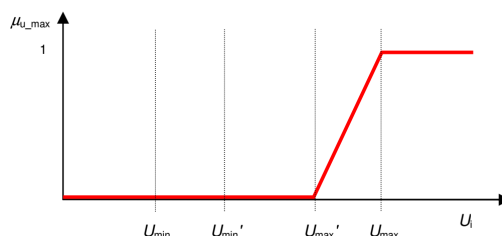
Rys. 7.2. Schemat regulatora rozmytego dla zasobnika energii

Funkcje przynależności dla poszczególnych zmiennych wejściowych przyjmują następujące kształty i wartości:

- μ_U - funkcja przynależności dla napięcia U_i [j.w.] w węźle przyłączenia zasobnika energii. Funkcja przynależności dla wartości rozmytych napięcia "zbyt niskiego" została przedstawiona na rys. 7.3, funkcja przynależności dla wartości rozmytych napięcia "zbyt wysokiego" została przedstawiona na rys. 7.4.

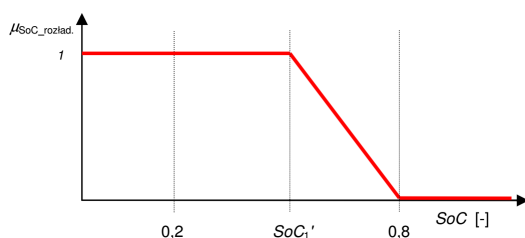


Rys. 7.3. Funkcja przynależności dla napięcia "zbyt niskiego" w węźle i

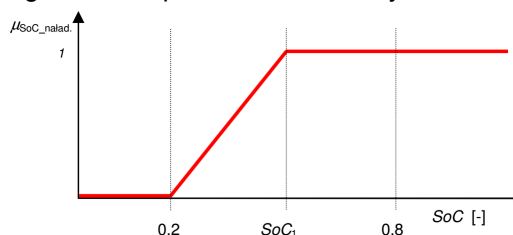


Rys. 7.4. Funkcja przynależności dla napięcia "zbyt wysokiego" w węźle i

- μ_{SoC} - funkcja przynależności dla stanu naładowania danego zasobnika energii SoC [j.w.] - przyjęte zostało założenie, że zasobnik energii jako bateria elektrochemiczna może pracować w zakresie od 20% do 80% swojej pojemności ($SoC_{min} = 0,2$, $SoC_{max} = 0,8$). Funkcja przynależności dla wartości rozmytych stanu naładowania zasobnika określonego jako "rozładowany" została przedstawiona na rys. 7.5, funkcja przynależności dla stanu naładowania zasobnika określonego "naładowanego" została przedstawiona na rys. 7.6.

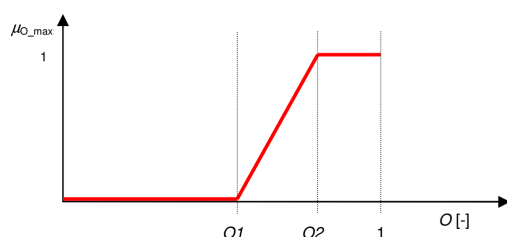


Rys. 7.5. Funkcja przynależności dla stanu zasobnika "rozładowany"

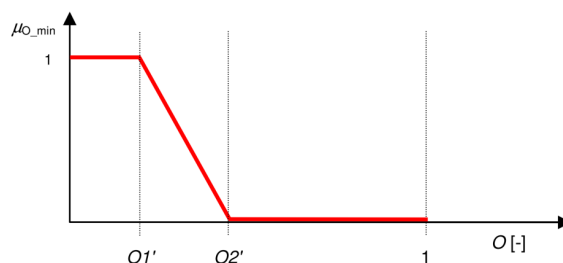


Rys. 7.6. Funkcja przynależności dla stanu zasobnika "naładowany"

- μ_O - funkcja przynależności dla stanu obciążenia linii O [j.w.]. Parametry funkcji przynależności stanu obciążenia linii mogą przyjmować wartości ujemne. Zakres zmienności parametrów O_1 , O_2 , O_1' , O_2' wynosił od -1 do 1. Funkcja przynależności dla wartości rozmytych obciążenia linii określonej jako "obciążona" została przedstawiona na rys. 7.7, a funkcja przynależności dla obciążenia linii określonej jako "nieobciążona" została przedstawiona na rys. 7.8.

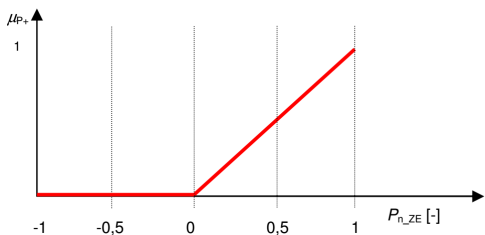


Rys. 7.7. Funkcja przynależności dla stanu linii "obciążona"

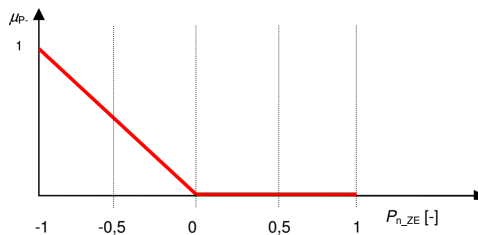


Rys. 7.8. Funkcja przynależności dla stanu linii "nieobciążona"

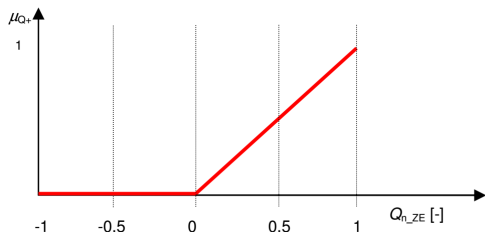
Zmiennymi wyjściowymi regulatora zasobnika energii są: moc czynna i moc bierna. Funkcje przynależności dla tych zmiennych są następujące, opisane na rys. 7.9÷7.12.



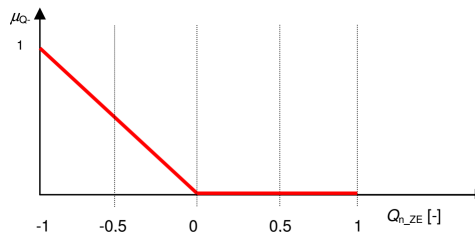
Rys. 7.9. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "dostarczaj moc czynną do sieci"



Rys. 7.10. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc czynną z sieci"



Rys. 7.11. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "dostarczaj moc bierną do sieci"



Rys. 7.12. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc bierną z sieci"

Blok decyzyjny składa się z bazy reguł i maszyny wnioskującej. Baza reguł opisuje relacje pomiędzy poszczególnymi zmiennymi wejściowymi i przekłada je na odpowiednie decyzje na wyjściu sterownika. Baza reguł dla regulatora zasobnika energii jest następująca:

1. **JEŻELI** napięcie jest "zbyt niskie" **I** zasobnik jest "naładowany" **TO** "dostarczaj moc czynną do sieci",
2. **JEŻELI** napięcie jest "zbyt niskie" **I** zasobnik jest "rozładowany" **TO** "dostarczaj moc bierną do sieci",
3. **JEŻELI** napięcie jest "zbyt wysokie" **I** zasobnik jest "rozładowany" **TO** "pobieraj moc czynną z sieci",
4. **JEŻELI** napięcie jest "zbyt wysokie" **I** zasobnik jest "naładowany" **TO** "pobieraj moc bierną z sieci",
5. **JEŻELI** napięcie jest **NIE** "zbyt wysokie" **I** zasobnik jest "naładowany" **I** sieć jest "obciążona" **TO** "dostarczaj moc czynną do sieci",
6. **JEŻELI** napięcie jest **NIE** "zbyt niskie" **I** zasobnik jest "rozładowany" **I** sieć jest "niedociążona" **TO** "pobieraj moc czynną z sieci".

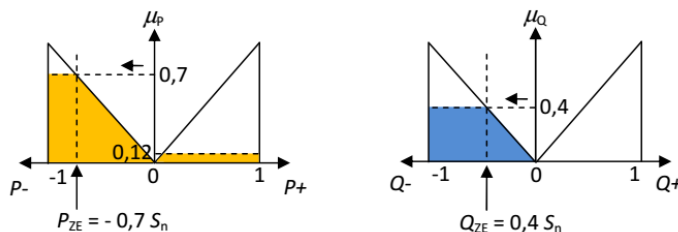
Maszyna wnioskująca działa na zasadzie rozmytej implikacji Mamdaniego dla reguł nr 1÷4, która jest określona dla przykładu reguły nr 1 wzorem (7.1). W rozprawie wybrano implikację Mamdaniego ponieważ, dostarczanie / odbieranie mocy jest zależne w równym stopniu od wartości funkcji przynależności μ_U oraz μ_{SoC} .

$$\mu_{u_{min} \rightarrow SoC_{nalad}}(U_i, SoC) = \min(\mu_{u_{min}}(U_i), \mu_{SoC_{nalad}}(SoC)) \quad (7.1)$$

Dla reguł nr 5 i 6 użyta jest rozmyta implikacja Larsena opisana wzorem (7.2) dla funkcji przynależności μ_U i μ_{SoC} oraz implikacja Mamdaniego, dla wyniku z implikacji Larsena oraz funkcji przynależności μ_O .

$$\mu_{u_{min} \rightarrow SoC_{nalad}}(U_w, SoC) = \mu_{u_{min}}(U_w) \cdot \mu_{SoC_{nalad}}(SoC) \quad (7.2)$$

W celu wyostrzenia wartości rozmytych (defuzyfikacji) posłużono się metodą pierwszego maksimum, liczonego od osi $P = 0$, $Q = 0$. Ostra wartość P_{ZE} i Q_{ZE} jest wynikiem osiągnięcia maksimum funkcji przynależności μ_P i odpowiednio μ_Q dla najmniejszej bezwzględnej wartości P i Q . Rysunek 7.13 przedstawia ostatni blok rozmytego procesu sterowania – blok wyostrzania, dla omawianego przykładu.



Rys. 7.13. Proces wyostrzania wartości rozmytych

Strojenie regulatora odbywa się poprzez odpowiedni dobór wartości dla wielkości występujących we wzorach funkcji przynależności (zmiana parametrów liczb rozmytych) lub na zmianie parametrów odniesienia (zbioru liczb rozmytych). W tym przypadku, do określenia odpowiednich parametrów funkcji przynależności, rozważane są następujące przypadki:

- dla funkcji przynależności μ_{SoC_lad} i μ_{SoC_rozlad} dobierane są odpowiednie wartości stałych SoC_1 i SoC_1' ,
- dla funkcji przynależności μ_{O_max} i μ_{O_min} dobierane są odpowiednie wartości stałych O_1 , O_2 , O_1' i O_2' ,
- dla funkcji przynależności μ_{u_min} i μ_{u_max} wartości są określone niezależnie, w zależności od wymagań napięciowych stawianych danej sieci.

W celu doboru odpowiednich wartości stałych SoC_1 i SoC_1' oraz O_1 , O_2 , O_1' i O_2' wykorzystano algorytm ewolucyjny. Działanie algorytmu ewolucyjnego, który został wykorzystany do odpowiedniego doboru parametrów regulatorów zasobników energii bazuje na podobnej zasadzie, jak działanie algorytmu genetycznego do doboru konfiguracji zasobników energii w sieci. Różnica polega na tym, że omawiany wcześniej algorytm genetyczny działał na liczbach całkowitych, zaś algorytm ewolucyjny działa na liczbach rzeczywistych

Optymalizacja doboru parametrów regulatorów zasobników energii jest przeprowadzona z wykorzystaniem dobowej zmienności obciążenia (podobnie jak algorytm lokalizacyjny) i zakłada minimalizację odchyłki napięcia we wszystkich węzłach w sieci podczas badanego okresu. Minimalizacja wartość odchyłki napięcia ΔU_i od wartości dopuszczalnych U_{min} i U_{max} stanowi funkcję celu M algorytmu ewolucyjnego. Funkcja celu M jest opisana wzorami (7.3) i (7.4).

$$M = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N \Delta U_i \right) \right\} \quad (7.3)$$

$$\Delta U_i = \begin{cases} \Delta U_i = (U_{min} - U_i) & , \text{ gdy } (U_i < U_{min}) \\ \Delta U_i = (U_i - U_{max}) & , \text{ gdy } (U_i > U_{max}) \\ \Delta U_i = 0 & , \text{ gdy } ((U_i > U_{min}) \wedge (U_i < U_{max})) \end{cases} \quad (7.4)$$

gdzie:

- U_i – wartość napięcia w węźle i ,
- U_{max} – maksymalne dopuszczalne napięcie w sieci,
- U_{min} – minimalne dopuszczalne napięcie w sieci,
- ΔU_i – odchyłka napięcia od wartości dopuszczalnej w węźle i ,
- T – analizowany okres czasu,
- M – wartość funkcji celu optymalizacji doboru parametrów regulatora zasobnika energii,
- N – liczba węzłów w sieci.

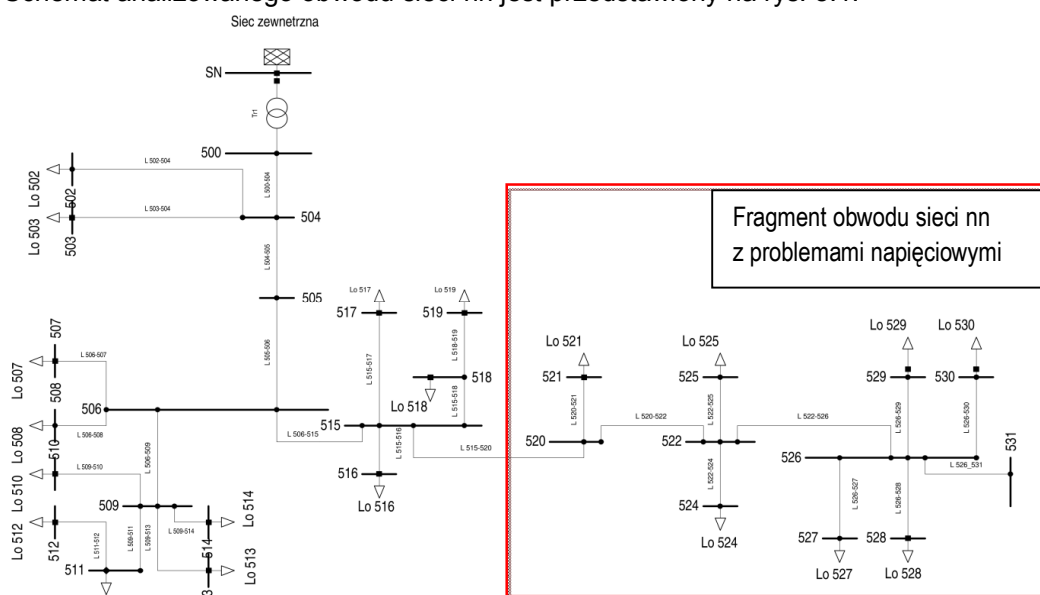
8. ANALIZA PRACY UKŁADU REGULACJI PRZEPROWADZONA NA PRZYKŁADOWYM MODELU SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

8.1. Opis analizowanej sieci nn

Do analizy wybrano przykładowy, rzeczywisty fragment sieci nn składający się z 19 węzłów. W sieci zamodelowano generację mocy węzłów z przedziału $(3 \div 40)$ kW. Źródła znajdują się na końcu obwodu u 6 odbiorców. Do analizy wykorzystano dwa przykładowe profile obciążenia (A i B). Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem quasi-dynamicznej zmienności obciążenia. Sieć jest siecią wiejską, gdzie założono, że odległości pomiędzy kolejnymi odbiorcami mogą wynosić nawet do 400 m.

W związku z powyższym do analizy przyjęto sieć trójfazową obciążoną symetrycznie - odchyłka pomiędzy napięciami poszczególnych faz nie przekracza wartości 2%.

Schemat analizowanego obwodu sieci nn jest przedstawiony na rys. 8.1.

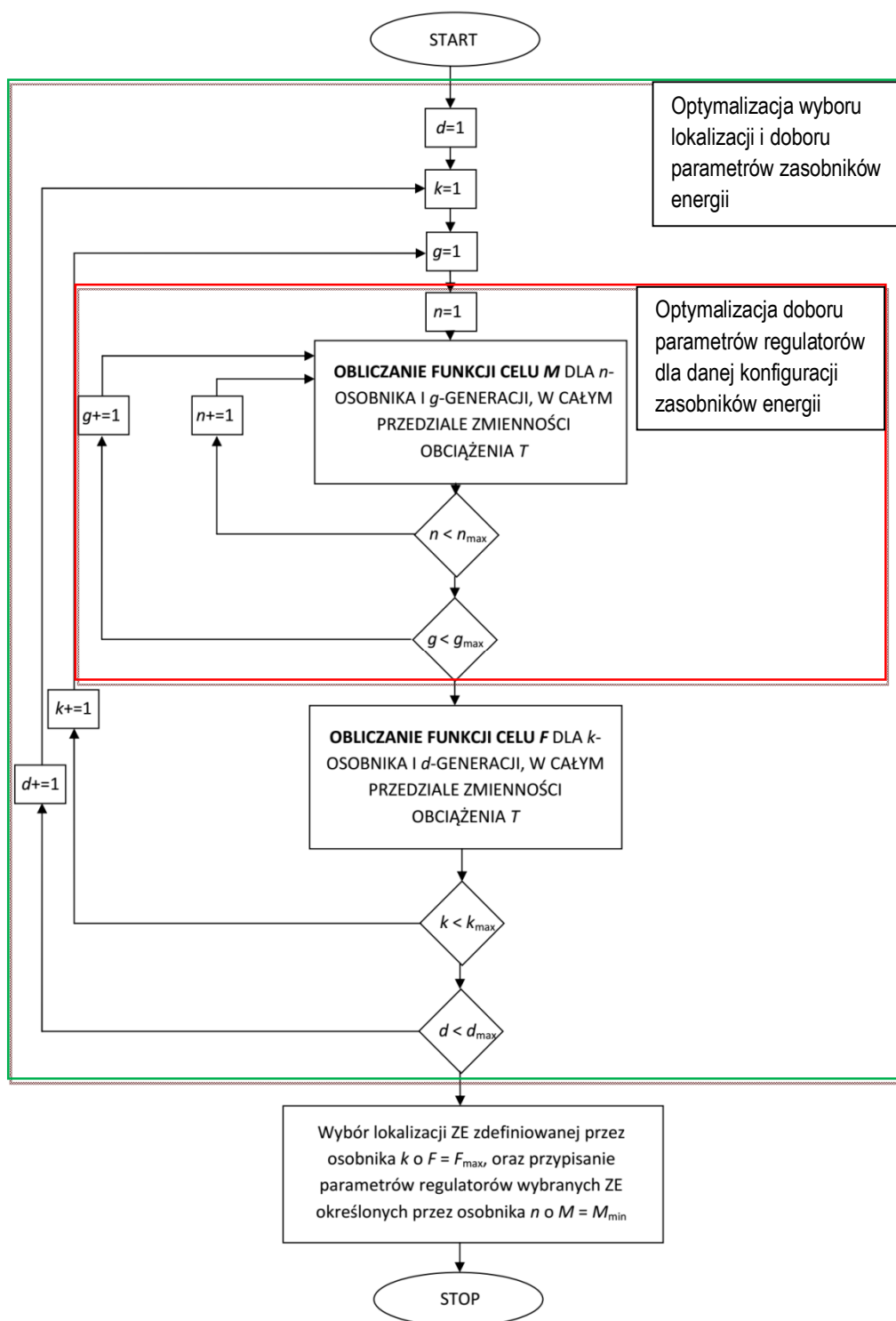


Rys. 8.1. Schemat analizowanej sieci nn

W analizie został zbadany wpływ generacji mocy przez OZE na poziomy napięcie w poszczególnych węzłach sieci nn oraz na obciążenie elementów przesyłowych sieci. W celu stabilizacji poziomu napięcia w sieci zaproponowano zastosowanie dostępnych aktualnie na rynku zasobników energii (tab. 6.1). Przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu lokalizacyjnego, który w analizie uwzględniał wszystkie składowe funkcji celu F opisanej wzorem (6.1), określono korzystną konfigurację zasobników energii w sieci nn. Instalację zasobników energii rozważono w każdym węzle sieci.

Pierwsza składowa funkcji celu algorytmu wyboru lokalizacji i doboru parametrów opierała się o zminimalizowanie kosztów związanych z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia w sieci. Wartości $U_{\min A}$ oraz $U_{\min B}$ zostały określone zgodnie z wymaganiami określonymi w [14] i przyjmują one następujące wartości: $U_{\min A} = 0,90$, $U_{\min B} = 0,80$. Wartość $U_{\min B} = 0,80$ określa granicę przy której jest jeszcze możliwość wykorzystania energii elektrycznej. Zgodnie z [14] górne wartości $U_{\max A}$ oraz $U_{\max B}$ powinny wynosić odpowiednio: $U_{\max A} = 1,10$, $U_{\min B} = 1,20$. Jednakże ze względu na występowanie źródeł energii elektrycznej wartości $U_{\max A}$ oraz $U_{\max B}$ zostały założone w symulacji na poziomie niższym niż wymagane jest to w [14] i wynoszą one odpowiednio: $U_{\max A} = 1,08$, $U_{\max B} = 1,10$. Celem ustalenia takich wartości jest zapewnianie prosumentom możliwości wprowadzenia mocy do sieci przez źródła odnawialne. W przypadku osiągnięcia wartości w węzle równej $1,10 U_n$ następuje samoczynne odłączenie się instalacji fotowoltaicznej od sieci elektroenergetycznej i uniemożliwienie dostarczenia dalszej mocy. Z punktu widzenia prosumenta napięcie w sieci, które jest równe $1,10 U_n$ ma tą samą użyteczność jak $1,20 U_n$. Koszt energii elektrycznej w analizie wynosi $C_t = 200$ PLN/MWh, współczynnik $b_t = 10$ PLN/h. Założono, że czas eksploatacji zasobników energii t_p wynosi 10 lat.

Schemat blokowy algorytmu związany z doбором lokalizacji i parametrów fizycznych zasobnika energii oraz parametrów regulatorów dla poszczególnych zasobników energii przedstawiono na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Schemat blokowy doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii oraz parametrów ich regulatorów, gdzie n_{max} – ilość osobników populacji dla algorytmu ewolucyjnego wykorzystanego do doboru parametrów regulatorów zasobników energii, g_{max} – liczba generacji dla algorytmu ewolucyjnego wykorzystanego do doboru parametrów regulatorów zasobników energii, k_{max} – ilość osobników populacji dla algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci, d_{max} – liczba generacji dla algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci.

Algorytm przedstawiony na rys. 8.2 przedstawia proces optymalizacji wyboru lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii w sieci elektroenergetycznej przy uwzględnieniu doboru optymalnych parametrów regulatorów dla każdej konfiguracji zasobników energii. Optymalizacja doboru optymalnych parametrów regulatorów stanowi część optymalizacji wyboru lokalizacji zasobników energii i doboru ich parametrów. Wynikiem optymalizacji jest wybór konfiguracji zasobników energii w sieci dla której wartość funkcji celu F osiągnie wartość najwyższą F_{\max} . Dla tej konfiguracji zasobników energii w sieci przypisane są wartości parametrów regulatorów zasobników energii określone dla funkcji celu M , która osiągnęła wartość minimalną M_{\min} .

8. 2. Wyniki symulacji

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki symulacji dla dwóch różnych profili obciążenia: A i B. Przedstawione zostały dobowe wykresy poziomów napięcia dla określonych węzłów (głównie dla tych węzłów, w których zaobserwowano problemy napięciowe). Ponadto przedstawiono zmienność mocy czynnej i biernej oraz aktualnego stanu naładowania zasobników energii.

Na wykresach obrazujących wartości napięć w węzłach oraz obciążenie elementów zawarte są przebiegi dla dwóch sytuacji, gdy nie ma w sieci zasobników energii oraz dla sytuacji, gdy w sieci są zainstalowane zasobniki energii (po odpowiednim doborze lokalizacji, parametrów oraz parametrów ich regulatorów).

Analiza zawiera wyniki dla dwóch różnych profili obciążenia sieci A i B:

- Wyniki doboru lokalizacji oraz parametrów regulatorów zasobników energii dla profilu A, przedstawiono w tab. 8.1 i tab. 8.2 oraz na rys. 8.3÷8.8.
- Wyniki doboru lokalizacji oraz parametrów regulatorów zasobników energii dla profilu B, przedstawiono w tab. 8.3 i tab. 8.4 oraz na rys. 8.9÷8.15.

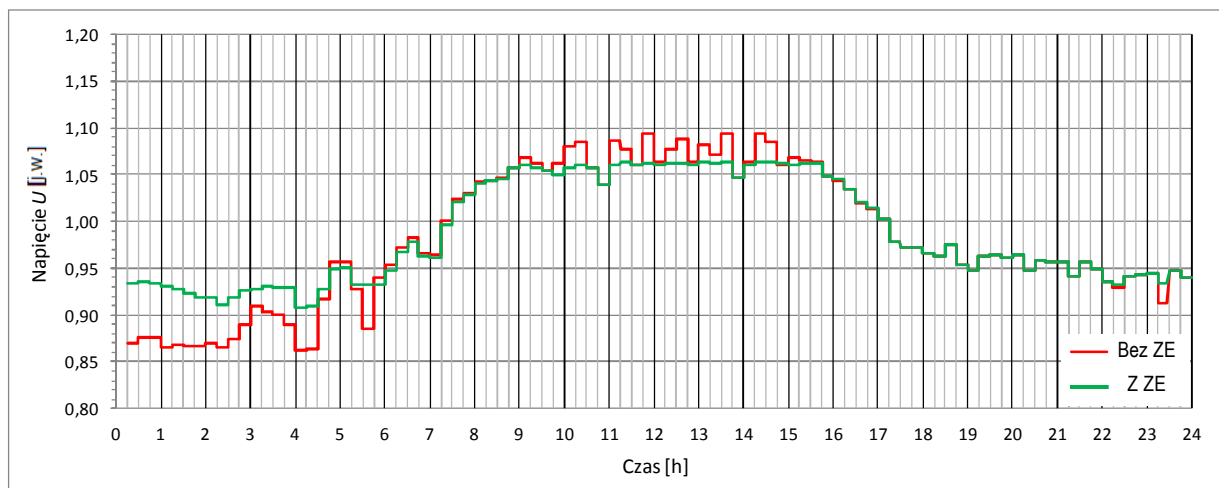
W tabeli 8.1 przedstawiono wynik wyboru lokalizacji oraz parametrów technicznych zasobniki energii dla analizowanej sieci (profil obciążenia: A).

Tabela 8.1. Wynik doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii dla analizowanej sieci nn (profil obciążenia: A)

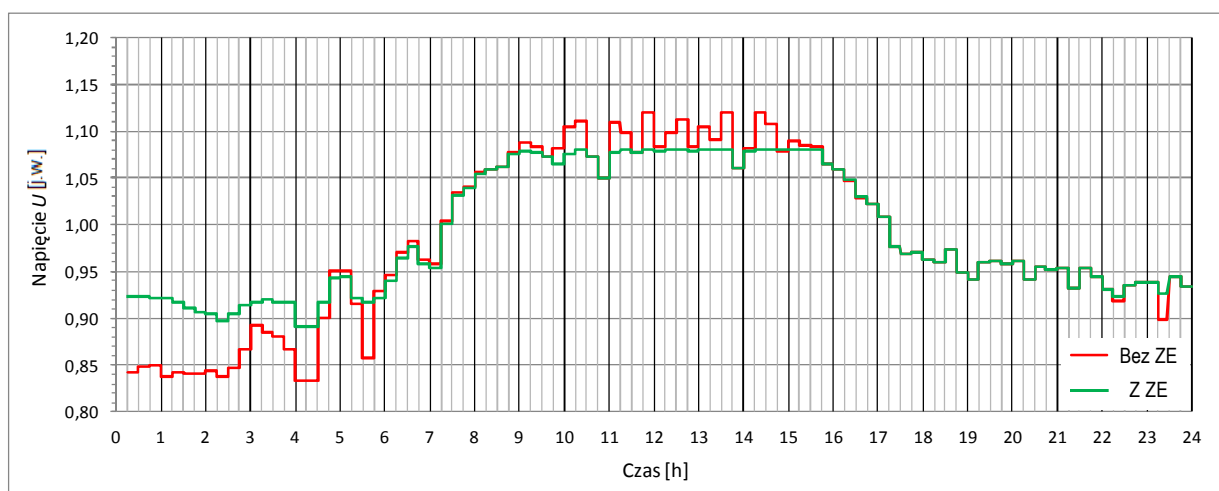
Nr węzła	522	526	528	529	530
Moc [kW]	4,8	4,8	8,2	6,4	6,4
Pojemność [kWh]	9,0	9,0	13,5	12,0	12,0

Tabela 8. Parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii (profil obciążenia: A)

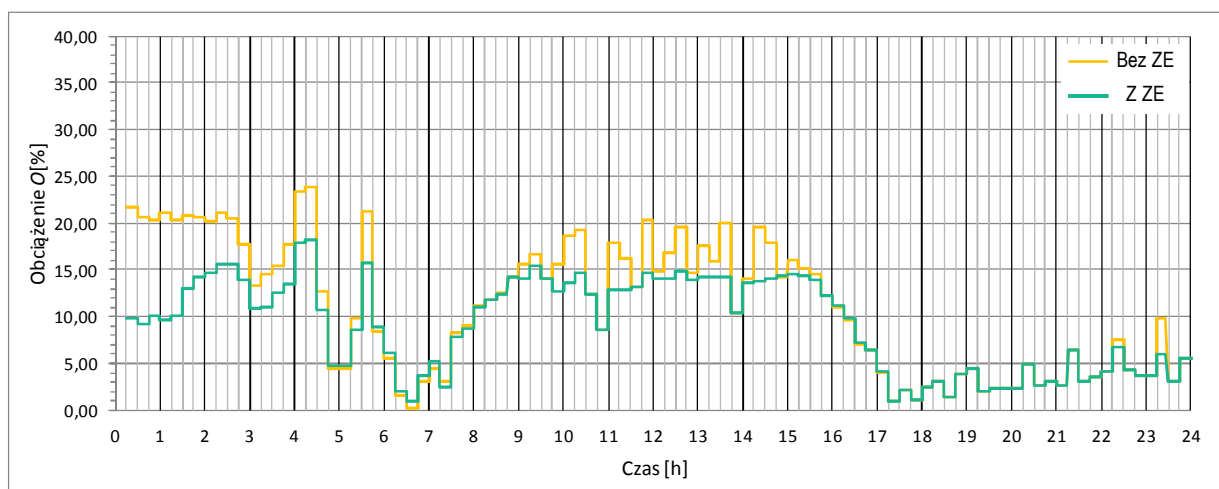
Nazwa zasobnika energii	ES_521	ES_526	ES_528	ES_529	ES_530
SoC ₁	0,641	0,685	0,614	0,577	0,522
SoC ₁ '	0,683	0,700	0,663	0,682	0,651
O ₁	0,716	-0,853	-0,308	-0,685	-0,392
O ₂	0,856	-0,808	-0,299	-0,169	0,105
O ₁ '	0,899	0,452	0,667	0,054	0,441
O ₂ '	0,890	0,474	0,745	0,406	0,560



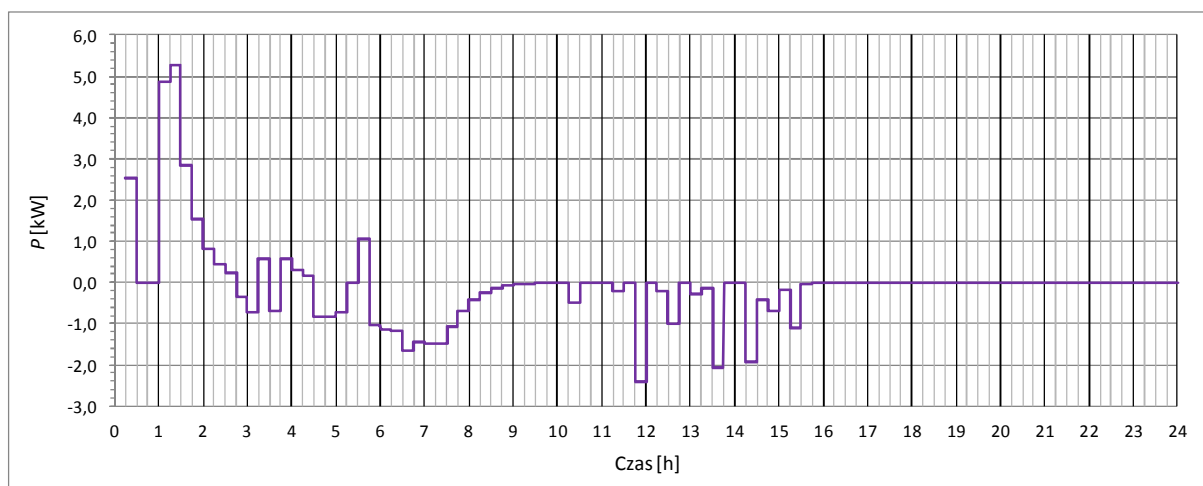
Rys. 8.3. Zmienność napięcia w przykładowym węźle 522 (profil A)



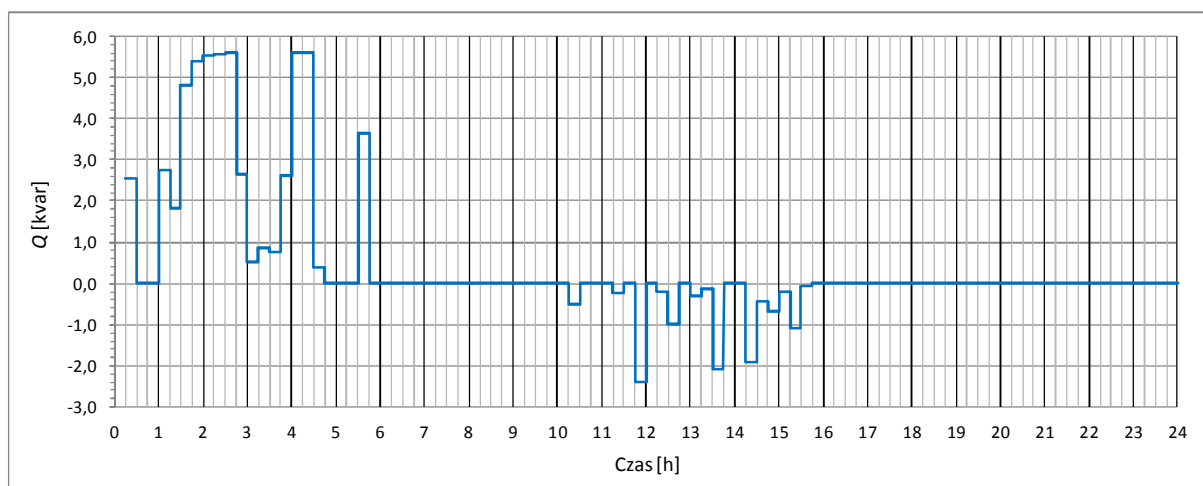
Rys. 8.4. Zmienność napięcia w przykładowym węźle 526 (profil A)



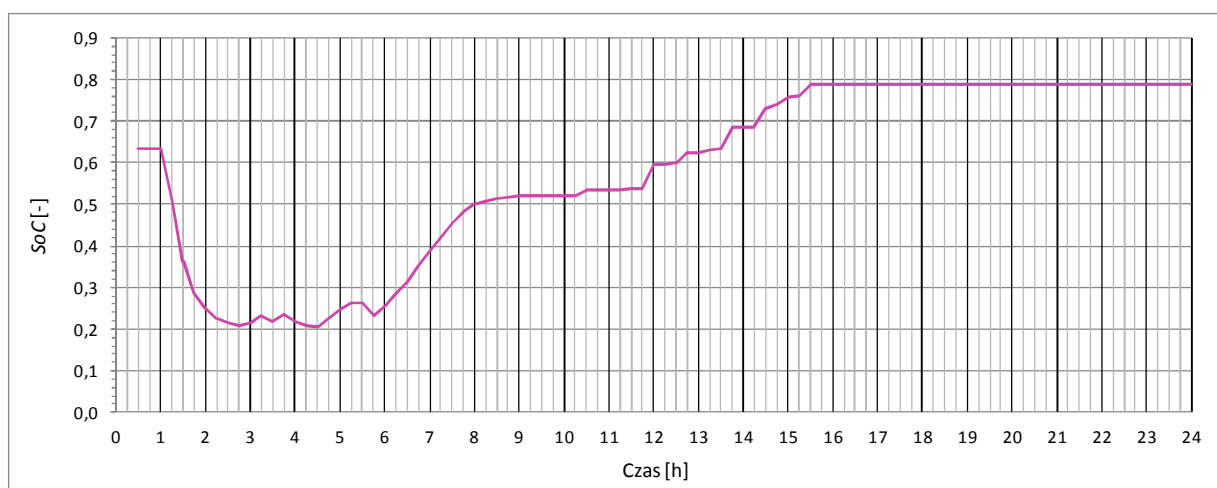
Rys. 8.5. Zmienność obciążenia w przykładowej linii 522-526 (profil A)



Rys. 8.6. Zmienność mocy czynnej przykładowego zasobnika energii ES_530 (profil A)



Rys. 8.7. Zmienność mocy biernej przykładowego zasobnika energii ES_530 (profil A)



Rys. 8.8. Stan naładowania przykładowego zasobnika energii ES_530 (profil A)

Zasobniki energii w procesie doboru lokalizacji, zostały przydzielone do węzłów, w których występują problemy napięciowe związane z poborem i generacją mocy. Odpowiednia ich konfiguracja pozwala na zoptymalizowanie poniesionych kosztów związanych z instalacją urządzeń w sieci, a także

jednocześnie zapewnia uzyskanie akceptowalnego poziomu napięcia w węzłach w analizowanej sieci. Dzięki dobraniu odpowiednich parametrów regulatora dla każdego zasobnika energii można uzyskać efekt "współpracy" ze sobą zainstalowanych urządzeń. Nie wszystkie urządzenia oddają i pobierają moc czynną w tym samym czasie, a ich działanie jest zoptymalizowane, aby uzyskać jak największą efektywność. Dodatkowo, możliwość dostarczania mocy biernej do sieci przez zasobniki energii powoduje maksymalizację wykorzystania urządzenia.

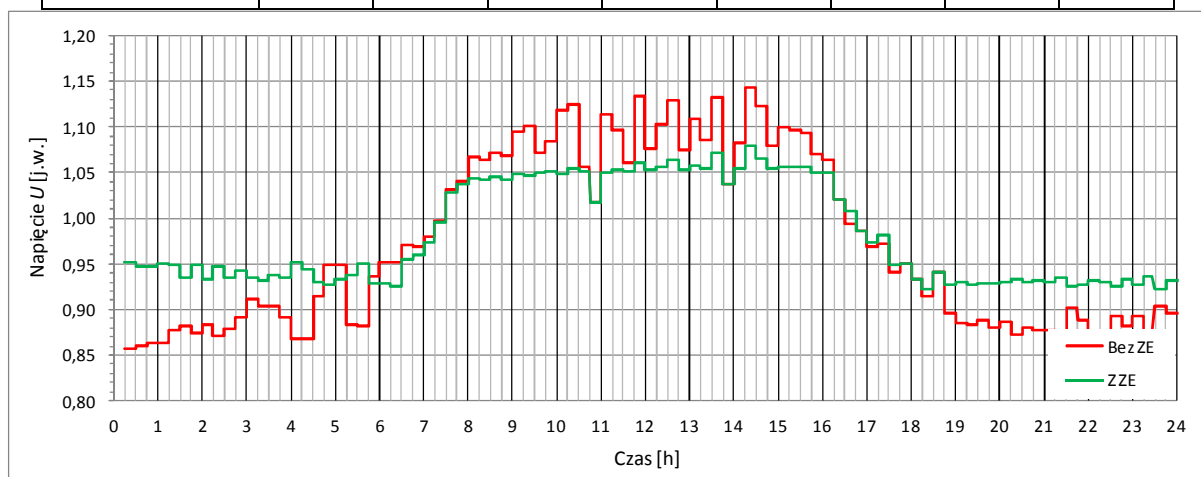
Poniżej znajdują się wyniki przeprowadzonej symulacji dla profilu obciążenia B.

Tabela 8.3. Wynik doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii dla analizowanej sieci nn (profil obciążenia: B)

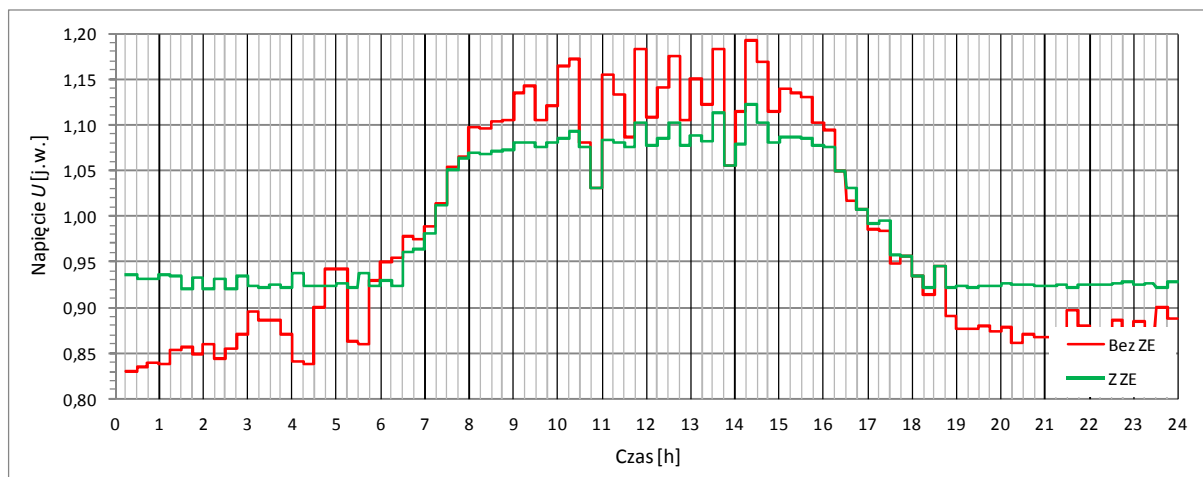
Nr węzła	520	521	524	525	526	527	528	529
Moc [kW]	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	8,2
Pojemność [kWh]	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	13,5

Tabela 8.2. Parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii (profil obciążenia: B)

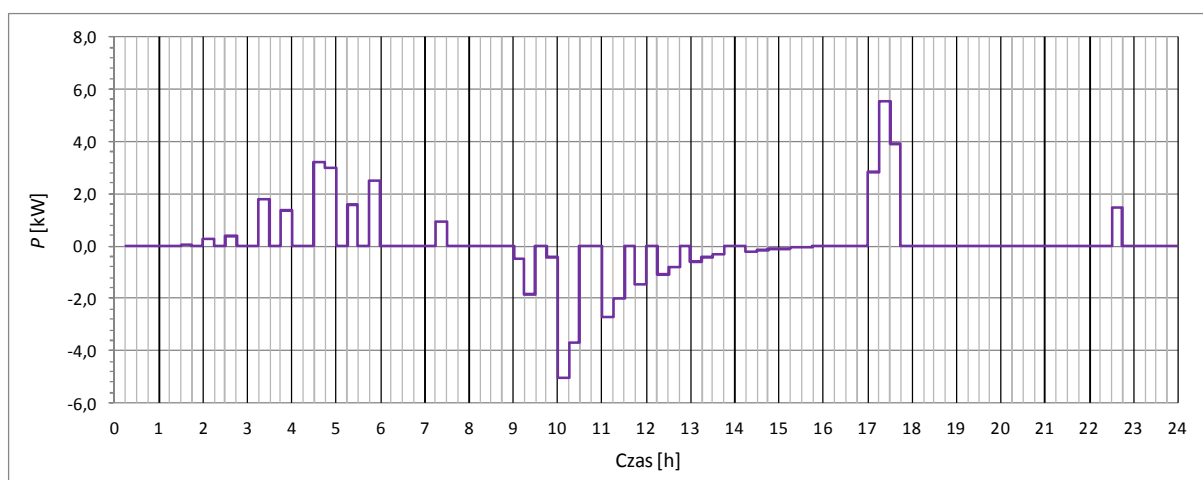
Nazwa zasobnika energii	ES_520	ES_521	ES_524	ES_525	ES_526	ES_527	ES_528	ES_529
SoC ₁	0,511	0,592	0,468	0,3	0,491	0,3	0,606	0,3
SoC ₁ '	0,524	0,600	0,646	0,628	0,491	0,462	0,7	0,3
O ₁	0,288	-0,863	0,097	-0,034	0,069	0,758	0,154	-0,052
O ₂	0,334	0,393	0,521	0,003	0,118	0,896	0,672	-0,018
O ₁ '	0,711	0,812	0,527	0,013	0,142	0,924	0,743	0,007
O ₂ '	0,740	0,915	0,531	0,044	0,148	0,924	0,758	0,319



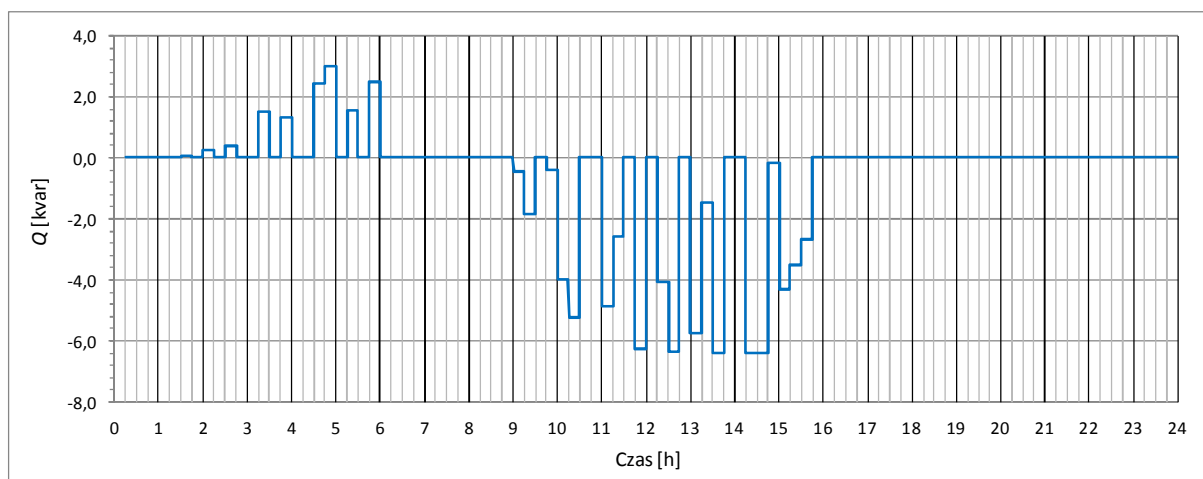
Rys. 8.9. Zmienność napięcia w węźle 522 (profil B)



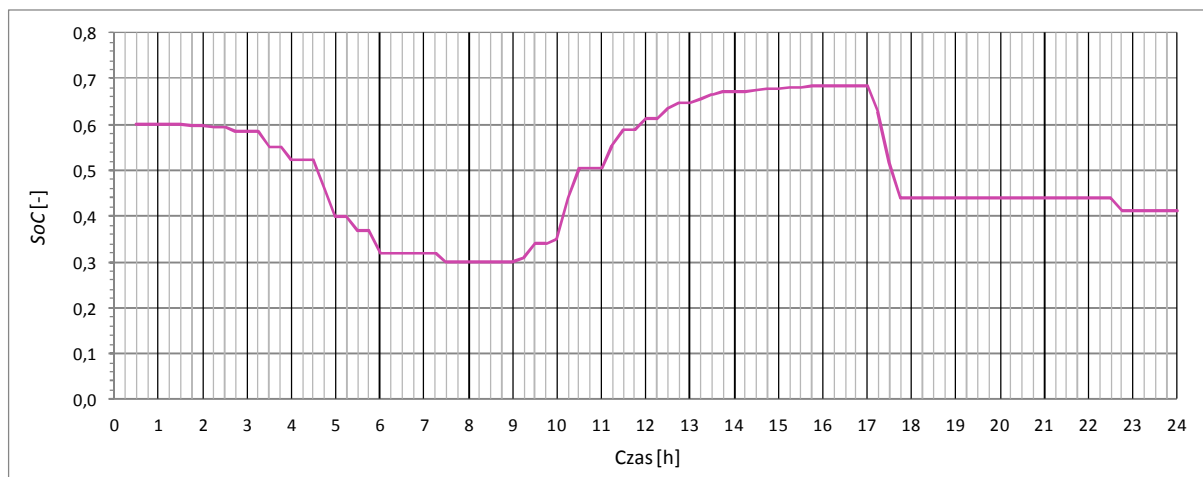
Rys. 8.10. Zmienność napięcia w węźle 526 (profil B)



Rys. 8.11. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_529 (profil B)



Rys. 8.12. Zmienność mocy bierniej zasobnika energii ES_529 (profil B)



Rys. 8.13. Stan naładowania zasobnika energii ES_529 (profil B)

W tabeli 9.3 przedstawiono zestawienie udziału poszczególnych czynników w sumarycznych kosztach, które podlegają optymalizacji. Porównane zostały koszty poszczególnych czynników dla przypadku, gdy nie ma zasobników energii w sieci oraz koszty po wyborze optymalnej lokalizacji zasobników energii w sieci i zastosowaniu odpowiedniej regulacji.

Tabela 8.3. „Dobowy” koszt pracy sieci "bez zasobników energii" oraz "z zasobnikami energii" dla profilu A i profilu B

		Profil A		Profil B	
		BEZ ZE	Z ZE	BEZ ZE	Z ZE
p_1	Koszt niedotrzymania odpowiedniego napięcia w sieci	114,57 PLN	0,31 PLN	290,34 PLN	20,45 PLN
P_2	Koszt zasobników energii Dla $t_p = 10$ (lat) $\cdot 365$ dni = 3650	0 PLN	59,25 PLN	0 PLN	115,96 PLN
P_3	Koszt związany ze stratami mocy w sieci	35,32 PLN	31,89 PLN	41,32 PLN	34,34 PLN
P_4	Koszt związany z przeciążeniem elementów przesyłowych	0 PLN	0 PLN	0 PLN	0 PLN
	RAZEM	149,89 PLN	91,45 PLN	331,66 PLN	170,75 PLN
	OSZCZĘDNOŚCI [PLN / DZIEŃ]	58,44 PLN		160,91 PLN	

Z analizy wyników przedstawionych w tab. 9.3 wynika, że w obu przypadkach czynnikiem kluczowym (dla przyjętych w symulacji założeń) – generującym najwięcej kosztów, jest niedotrzymanie wymaganej wartości napięcia. Poprawę poziomu napięcia, a tym samym redukcję kosztów można osiągnąć poprzez instalację zasobników energii w sieci. Warto zwrócić uwagę na fakt, że im większe

są koszty związane z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia, tym bardziej opłaca się instalować zasobniki energii w sieci.

Przy lokalizacji zasobników energii szczególną uwagę powinno się zwrócić na profil obciążenia sieci. Dla analizowanego profilu A i B obciążenia okazuje się, że optymalne lokalizacje zasobników energii (tab. 8.1 i tab. 8.3) w sieci są różne oraz różne są także parametry regulatorów zasobników energii (tab. 8.2 i tab. 8.4). Zmiana parametrów regulatorów w zależności od przyjętego profilu obciążenia nie jest kosztowna. W związku z tym, parametry regulatorów powinny być każdorazowo odpowiednio ustawiane, w zależności od przewidywanego profilu obciążenia. Zabieg taki pozwoli na bardziej efektywne wykorzystanie zasobników energii. Z kolei przy wyborze lokalizacji zasobników energii powinno się przeanalizować kilka profili obciążenia i dobrać jedną odpowiednią lokalizację. Przykładowo przy wyborze lokalizacji dla zasobników energii współpracujących ze źródłami fotowoltaicznymi należało by uwzględnić co najmniej profil obciążenia w dni słoneczne robocze oraz profil obciążenia w dni słoneczne weekendowe.

9. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy wykazano, że zastosowanie elektrochemicznych zasobników energii wpływa na poprawę jakości energii elektrycznej oraz na poprawę pracy sieci dystrybucyjnej. W pracy doktorskiej został przedstawiony opracowany algorytm wyboru lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii, regulator zasobnika energii oraz algorytm doboru parametrów regulatora zasobnika energii. Wykazano, że wybór lokalizacji zasobników energii oraz dobór parametrów regulatorów zasobników energii pozwalający na optymalne pobieranie/dostarczanie przez nie mocy czynnej i biernej wpływa na efektywność ich wykorzystania, a także optymalizuje pracę sieci pod względem określonych kryteriów. W związku z tym, zostały osiągnięte założone cele rozprawy i tym samym udowodniono tezę zawartą we wstępie.

W wyniku przeprowadzonych badań zdefiniowano funkcję celu mającą ograniczyć sumaryczne koszty pracy sieci na które składały się: koszty związane z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia w sieci, koszty związane z instalacją zasobników energii, koszty strat energii w sieci na elementach przesyłowych oraz koszty związane z przeciążeniem elementów przesyłowych. Rozwiązanie problemu optymalizacyjnego doboru odpowiednich parametrów i lokalizacji zasobników energii zrealizowano z użyciem poszukiwawczej metody heurystycznej, tj. algorytmu genetycznego.

Analiza działania algorytmu lokalizacyjnego została przeprowadzona w oparciu o model sieci SN wykonany w programie Power Factory. Omawiany algorytm lokalizacyjny został zaimplementowany w programie Power Factory w wewnętrznym języku programowania (*DPL – ang. DigSILENT Programming Language*). Na bazie dobowej zmienności obciążenia została przeprowadzona analiza poszukiwania najlepszej konfiguracji zasobników energii w sieci w oparciu o wybrane kryterium napięciowe oraz kosztowe. Przeprowadzono analizę dla dwóch sieci dystrybucyjnych o różnym współczynniku R/X . Wykazano, że dla sieci o niskim współczynniku R/X korzystniejsze jest sterowanie mocą bierną, a w sieci o wysokim współczynniku R/X mocą czynną.

W kolejnym etapie pracy opracowano model regulatora zasobnika energii na bazie logiki rozmytej, który zarządza dostarczaną mocą czynną i bierną zasobnika. W celu doboru parametrów regulatora wykorzystano samodzielnie opracowany algorytm ewolucyjny. Analiza działania pracy regulatora została przeprowadzona na uproszczonym modelu sieci nn, z quasi-dynamiczną dobową zmiennością obciążenia. W analizowanej sieci występowały problemy napięciowe wynikające z dużego obciążenia sieci oraz generacji mocy przez źródła fotowoltaiczne. Wykazano, że odpowiedni dobór parametrów regulatora pozwala na efektywne jego wykorzystanie w celu poprawy poziomu napięcia w sieci.

Przeprowadzono także analizę dla przykładowej sieci nn, w której zamodelowano quasi-dynamiczną dobową zmienność mocy odbiorów z uwzględnieniem generacji mocy przez źródła fotowoltaiczne. W celu eliminacji problemów napięciowych w sieci, zainstalowano w niej zasobniki energii. W celu doboru parametrów zasobników energii i ich umiejscowienia w sieci wykorzystano autorski algorytm lokalizacyjny. Sterowanie działaniem zasobników energii zostało zrealizowane przy użyciu autorskiego regulatora zasobnika energii. Dobór parametrów regulatorów zasobników energii zrealizowano za pomocą algorytmu ewolucyjnego. Wykazano, że dzięki instalacji zasobników energii w badanej sieci można poprawić profil napięcia w węzłach, odciążyć elementy przesyłowe oraz ograniczyć straty. W wyniku poprawy profilu napięcia uzyskano możliwość wprowadzenia do sieci odpowiednio dużej mocy przez źródła fotowoltaiczne.

Powyższa analiza pracy sieci została przeprowadzona dla dobowej zmienności obciążenia. W celu prawidłowego doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii w sieci wymagane byłoby uwzględnienia w analizie co najmniej kilku charakterystycznych profili obciążenia sieci (który uwzględniałby m.in. stan nasłonecznienia, zmienność profili obciążenia w zależności od dnia tygodnia oraz pory roku). Istotne jest także, aby dla każdego profilu obciążenia odpowiednio zdefiniować nastawy regulatorów zasobników energii, co zoptymalizuje ich wykorzystanie. Propozycją dalszych badań jest przystosowanie algorytmu lokalizacyjnego oraz rozszerzenie możliwości sterowania zasobnikiem energii w kontekście współpracy z siecią niesymetryczną.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] R. Pawelek, R. Mienski, and I. Wasiak: "Energy storage application in low-voltage microgrids for energy management and power quality improvement", *Gener. Transm. Distrib. IET*, vol. 8, no. 3, pp. 463–472, 2014.
- [2] T. Capuder, P. S. Georgilakis, N. D. Hatzigiorgiou, D. Škrlec, and M. Zidar: "Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 645–652, 2016.
- [3] A. Dzion and S. Szultka: "Metody doboru miejsc zainstalowania zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia", *Autom. Elektr. Zakłócenia*, vol. 7, pp. 16–21, 2016.
- [4] R. Małkowski and A. Szultka: "Selection of optimal location and rated power of capacitor banks in distribution network using genetic algorithm", in *Electric Power Engineering (EPE), 2017 18th International Scientific Conference on*, 2017, pp. 1–6.
- [5] V. Efthimiou, I. Hadjipaschalis, and A. Poullikkas: "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, 2009.
- [6] A. A. Akhil *et al.*, *DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA*. Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, 2013.
- [7] J. Paska: "Rozproszone źródła energii", Warszawa: Oficyna Wydawnicza politechniki Warszawskiej, 2017.
- [8] M. Bishop, C. Hao, D. G. Oikarinen, and X. Xu: "Application and modeling of battery energy storage in power systems", *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 3, pp. 82–90, 2016.
- [9] M. Zygmantowski, "Analiza porównawcza właściwości wybranych wielopoziomowych przekształtników energoelektronicznych przeznaczonych do układów kondycjonowania energii elektrycznej". Rozprawa Doktorska, Gliwice, 2009.
- [10] O.-M. Midtgard and I. Ranaweera: "Centralized control of energy storages for voltage support in low-voltage distribution grids", in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on*, 2016, pp. 1–6.
- [11] R. Małkowski, A. Szultka, S. Szultka: "Wskaźniki jakościowe wykorzystywane w metodach optymalizacyjnych stosowanych przy wyborze lokalizacji oraz parametrów zasobników energii w sieciach dystrybucyjnych", *APE* 2017.
- [12] A. Kulmala, S. Repo, and J. Tuominen: "Comparison of the low voltage distribution network voltage control schemes", in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, pp. 1–6.
- [13] Information of the President of the Energy Regulatory Office No. 45/2016 the average selling price of electricity on the market competitive in the second quarter of 2016 years.
- [14] BIULETYN BRANŻOWY URE - Energia elektryczna, no. 187 (2213), 2016 r.
- [15] www.fornius.com - data dostępu: 10.03.2019 r.