

Wiesław GOC, Maksymilian PRZYGRÓDZKI
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

UKŁAD AUTOPRODUCENCKI A KOSZTY NIEZAWODNOŚCI POKRYCIA ZAPOTRZEBOWANIA ODBIORCY

Streszczenie. Tematyka źródeł rozproszonych jest silnie związana z procesem decentralizacji i urynkowania elektroenergetyki. Szeroka gama ofert ze strony producentów źródeł rozproszonych, wykonawstwo „pod klucz”, możliwość indywidualnego doboru względem zapotrzebowania powodują, że źródła te stają się ciekawą propozycją dla każdego zainteresowanego odbiorcy. Wynikający stąd wzrost znaczenia źródeł rozproszonych wpływa na zmianę dotychczasowych poglądów na rolę systemu w procesie pokrycia zapotrzebowania. Podejście zdecentralizowane (źródła rozproszone) staje się naturalną alternatywą podejścia systemowego (scentralizowanego), co wskazuje na nowe zagadnienia m.in. w obszarze niezawodności pokrycia zapotrzebowania. W artykule rozważono możliwość poprawy niezawodności pokrycia zapotrzebowania poprzez wprowadzenie układu autoproducentkiego, który jest jedną z form zdecentralizowanego pokrycia zapotrzebowania.

AUTO-PRODUCTION SYSTEM AND THE RELIABILITY COST OF COVER CUSTOMER DEMAND

Summary. The subject of distributed generation is strongly connected with the process of decentralization and energy market's introducing. The producers' proposals with ready-to-work units, possibility of individual selection with respect to demand etc., make distributed generation an interesting offer to customer. The increase of distributed generation importance causes to change view of power system's rule in the process of covering demand. Decentralized approach (distributed generation) is a natural alternative of system approach (centralized) what indicates new problems among other things in area of electricity supply reliability. There is considered in the paper the possibility of improve the demand's covering reliability through introducing an auto-production system, one of the form of distributed generation.

1. WPROWADZENIE

Duże znaczenie energii elektrycznej w przemyśle, teleinformatyce, handlu a także w gospodarstwach domowych pociąga za sobą wzrost wymagań związanych z pewnością zasilania. Wzrost pewności zasilania jako jeden z aspektów jakości energii elektrycznej jest zależny od wielu elementów funkcjonalnych. Jako najbardziej istotne można wymienić: wystarczalność systemu wytwórczego, przesyłowego i dystrybucyjnego oraz bezpieczeństwo jego pracy [7]. Przez pojęcia te rozumie się odpowiednio zdolność systemu do pokrywania

zagregowanego zapotrzebowania mocy i energii odbiorców oraz zdolność systemu do funkcjonowania i realizowania swych funkcji pomimo występowania różnych zakłóceń. Osiągnięcie tak zdefiniowanych celów w aspekcie poprawy pewności zasilania realizowane jest poprzez stosowanie odpowiednich zabezpieczeń, budowę wielostronnych połączeń sieciowych, tworzenie zamkniętych układów pracy sieci, dywersyfikację bazy paliwowej, redundancję urządzeń sieciowych i wytwórczych. W opozycji tych działań w ostatnich latach nastąpił znaczny wzrost liczby źródeł, których rola w zakresie poprawy ciągłości zasilania jest niebagatelna [5], należących do tzw. generacji rozproszonej.

Mianem generacji rozproszonej przyjęto określać źródła o małej mocy zainstalowanej, przyłączone do sieci dystrybucyjnej, nie podlegające centralnemu planowaniu, nie sterowane centralnie w zakresie obciążania mocą wytwarzaną [9]. Źródła te ze względu na technologie wykorzystania paliw można podzielić na konwencjonalne i niekonwencjonalne, w tym źródła odnawialne. Coraz szersze zastosowanie znajduje skojarzona produkcja energii elektrycznej i ciepła [1]. Jednym z możliwych układów pracy tych źródeł jest układ autoproducentki. Jego cechą charakterystyczną jest to, że służy pokryciu jedynie części zapotrzebowania na energię elektryczną zasilanego obiektu. Źródło wchodzące w skład tego układu ze względu na jego rolę i relacje własnościowe można nazwać źródłem własnym odbiorcy. Tryb pracy źródła własnego wynika z zastosowanych rozwiązań technicznych oraz z charakteru obciążenia samego odbiorcy. Istotną cechą zastosowania źródła własnego jest to, że może ono pracować samodzielnie – bez współpracy z siecią zewnętrzną. Stąd wynika jedna z zalet układu autoproducentki w postaci zwiększenia pewności zasilania w porównaniu z układem tradycyjnym – wyłącznie zasilania z zewnętrznej sieci elektroenergetycznej.

Uwzględnienie źródła własnego w pokryciu zapotrzebowania na energię elektryczną pozwala na modyfikację typowego – sieciowego ujęcia niezawodności. Podejście zdecentralizowane (źródło własne) staje się naturalną alternatywą podejścia systemowego (scentralizowanego). Przy zasilaniu odbiorcy z wykorzystaniem układu autoproducentki uwzględnić można bilansowanie zapotrzebowania (lub jego części) poprzez produkcję energii w źródle własnym, co wpływa na zmianę niezawodności pokrycia zapotrzebowania. Warto jednak podkreślić, że o zastosowaniu rozważanych w artykule źródeł własnych decydują przede wszystkim z ich konkurencyjności względem innych możliwości dostawy energii [8]. Nie są to zatem źródła awaryjne pracujące krótko w ciągu roku. Źródło własne pracujące w układzie autoproducentki wykorzystywane jest zwykle w podstawie obciążenia odbiorcy, co podnosi ekonomię jego pracy. Zatem poprawa niezawodności całego układu jest produktem ubocznym jego pracy.

2. KOSZT NIEZAWODNOŚCI DOSTAW ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z SIECI

Sieci elektroenergetyczne składają się z wielu urządzeń i narażone są na działanie różnych czynników, które powodują zakłócenia w ich pracy. Następstwem tych zakłóceń mogą być przerwy w zasilaniu i ograniczenia dostaw energii powodujące straty ekonomiczne u odbiorców [7]. Ciągłość zasilania z sieci zależy zarówno od parametrów zawodnościowych poszczególnych elementów sieci, jak i od całego układu zasilania. Niezawodność zasilania odbiorcy – nie posiadającego własnego źródła – zależy od:

- bezpośredniego połączenia ze stacją elektroenergetyczną, do której jest przyłączony,
- liczby przyłączy i ich współzależności,
- rozwiązania konstrukcyjnego stacji elektroenergetycznej i jej połączeń z pozostałą częścią systemu,
- pozostałej części systemu elektroenergetycznego.

O niezawodności zasilania decydują awaryjność elementów wymienionych podukładów, ich struktura i współzależność działania. Pojawiające się w układzie zakłócenia mogą prowadzić do przerw w zasilaniu odbiorcy, które w rozpatrywanym okresie stanowią

o niezawodności. Charakterystycznym układem zasilania odbiorcy z sieci elektroenergetycznej jest:

- zasilanie jednostronne,
- zasilanie wielostronne.

Układ zasilania wielostronnego (zwykle dwustronnego) jest typowym sposobem poprawy ciągłości zasilania. W takim układzie ze względu na równoległe łączenie struktur sieciowych następuje zwiększenie niezawodności działania układu zasilającego odbiorcę.

W sieciach elektroenergetycznych obliczenia niezawodności wykonuje się dla punktów odbiorczych (węzłów) wyznaczając następujące współczynniki [2, 3]:

Q – współczynnik zawadności:

$$Q = \frac{T_a}{T}, \quad (1)$$

R – współczynnik niezawadności:

$$R = 1 - Q, \quad (2)$$

gdzie przez T_a oznaczono łączny czas trwania przerw w zasilaniu w okresie T ;

D – oczekiwaną liczbę przerw w analizowanym okresie, przy czym pomiędzy D i Q zachodzi:

$$t_a \approx \frac{QT}{D}, \quad (3)$$

gdzie t_a oznacza średni czas trwania jednej przerwy w zasilaniu;

A_{nd} – energię niedostarczoną odbiorcy:

$$A_{nd} = Q A, \quad (4)$$

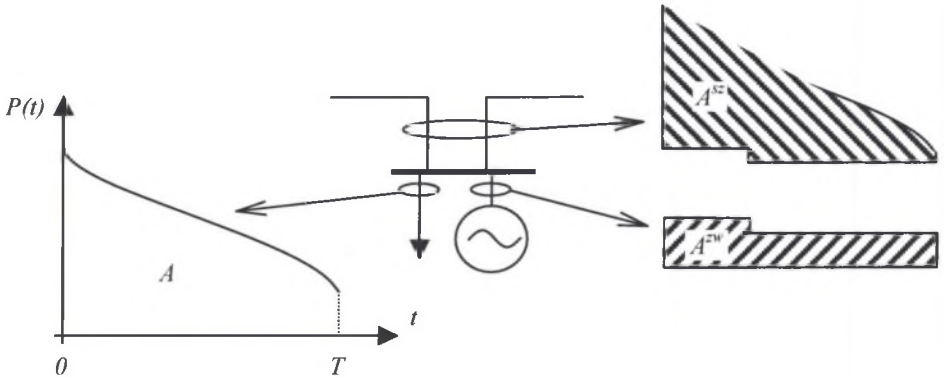
K_{NA} – koszt energii niedostarczonej:

$$K_{NA} = k_a A_{nd}. \quad (5)$$

Koszt energii niedostarczonej określony jest przez wartość strat ekonomicznych, jakie ponosi odbiorca w wyniku niespodziewanych przerw w zasilaniu. Wartość ta jest trudna do określenia, zależy bowiem od szeregu czynników zmiennych w czasie, np. zmienna wrażliwość procesu technologicznego. Stosowanym sposobem szacunku tych kosztów strat są badania ankietowe bądź badania zależności wypadkowego efektu (np. PKB – produkt krajowy brutto) od zużytej energii. W ten sposób uzyskuje się orientacyjny jednostkowy koszt niedostarczonej energii, zwany też równoważnikiem niedostarczonej energii – k_a . Równoważnik ten wprowadzono do powyższej zależności (5).

3. KOSZT NIEZAWADNOŚCI DOSTAW ENERGII ELEKTRYCZNEJ W UKŁADZIE AUTOPRODUCENCKIM

Na pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorcy w systemie autoproducentkim składa się zakup energii z sieci elektroenergetycznej oraz energia wytwarzana w źródle własnym. Zasadę tę przedstawiono na rys. 1 na tle krzywej uporządkowanej obciążenia odbiorcy. Na rysunku tym jako A^{sz} oznaczono energię elektryczną dostarczoną z sieci zewnętrznej, natomiast energię elektryczną wytworzoną w źródle własnym oznaczono jako A^{zb} .



Rys. 1. Przykład pokrycia zapotrzebowania w systemie autoproducentkim
 Fig. 1. An example of demand's covering in auto-production system

Energia dostarczana odbiorcy w układzie przedstawionym na powyższym rysunku może być zapisana w postaci zależności (6), w której przez $P(t)$ oznaczono chwilowe zapotrzebowanie odbiorcy na moc elektryczną czynną.

$$A = \int_0^T P(t) dt = A^{sz} + A^{zw} + A_{nd}. \quad (6)$$

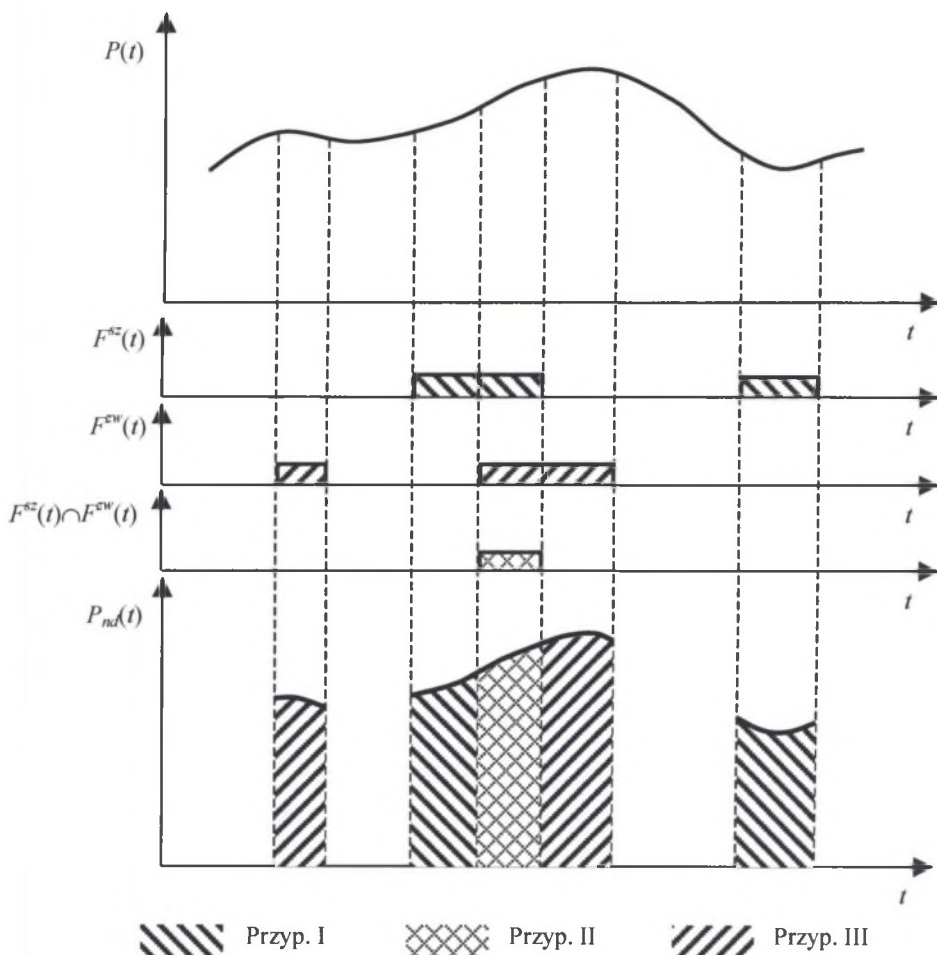
Na podstawie przedstawionych na rys. 1 „dróg” dostaw energii elektrycznej dla odbiorcy – autoproducenta można wstępnie określić przypadki zakłóceń w pokryciu jego zapotrzebowania, co sumarycznie reprezentuje składnik A_{nd} we wzorze (6). Brak pokrycia zapotrzebowania w systemie autoproducentkim wynika z zawodności dostaw energii elektrycznej z sieci zewnętrznej oraz z zawodności wytwarzania energii w źródle własnym. Dlatego też rozpisując wielkość A_{nd} można wyróżnić dwa składniki energii niedostarczonej (pomijając składnik wynikający z zawodności elementów wspólnych dla obu dróg dostaw):

$$A_{nd} = A_{nd}^{sz} + A_{nd}^{zw}. \quad (7)$$

Uwzględniając awaryjność oraz przestoje planowe urządzeń można wyróżnić trzy potencjalne przypadki, w których występuje ograniczenie lub całkowity brak zasilania w układzie przedstawionym schematycznie na rys. 1. Przypadki te można opisać jako:

- przypadek I – związany z brakiem zasilania ze strony sieci zewnętrznej (niezerowa wartość funkcji $F^{sz}(t)$),
- przypadek II – związany z jednoczesnym brakiem zasilania ze strony sieci oraz ze strony źródła własnego (niezerowa wartość funkcji $F^{sz}(t)$ oraz funkcji $F^{zw}(t)$),
- przypadek III – związany z brakiem zasilania ze strony źródła własnego odbiorcy (niezerowa wartość funkcji $F^{zw}(t)$).

Możliwości wystąpienia tych przypadków zobrazowano graficznie na rys. 2. Na rysunku tym przedstawiono przebieg zapotrzebowania $P(t)$ odbiorcy oraz zerowej wartości funkcji zakłóceń odpowiednio dotyczących sieci $F^{sz}(t)$ i źródła własnego $F^{zw}(t)$. Wartości te wskazują na zakłócenia w dostawach energii dla każdej z dróg zasilania. Część wspólna określa energię niedostarczoną do odbiorcy.



Rys. 2. Przypadki wystąpienia zakłóceń w dostawach energii elektrycznej dla odbiorcy
 Fig. 2. Cases of failure occurring in customer supply

Wyszczególnienie przedstawionych na rys. 2 przypadków jest konieczne ze względu na różny w ocenie dodatkowy koszt energii bądź koszt strat ekonomicznych w każdym z nich. Dalej omówiono kolejno wprowadzone przypadki.

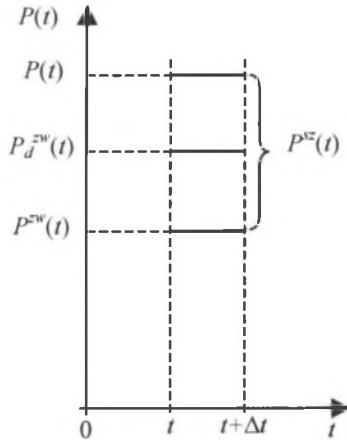
3.1. Przypadek I

W przypadku I z uwagi na zajście zdarzenia prowadzącego do braku zasilania ze strony sieci zewnętrznej można rozpatrywać wytworzenie dodatkowej ilości energii elektrycznej w źródle własnym. Tak wyróżniony przypadek odpowiada:

- przerwie awaryjnej z sieci zasilającej,
- planowemu wyłączeniu sieci zasilającej.

W obu tych przypadkach źródło własne może pracować. Jego wydajność pozwala na pokrycie pełnego bądź części zapotrzebowania odbiorcy. Decyduje o tym chwilowy bilans mocy w układzie. Analiza takiego przypadku prowadzi do określenia energii niedostarczonej z sieci na skutek jej awaryjności (wyłączenia). Energię niedostarczoną wyznacza powstały na skutek braku zasilania ze strony sieci deficyt mocy po stronie odbiorcy. Dzieje się tak przy niewystarczających zdolnościach produkcyjnych źródła. W przeciwnym razie źródło łagodzi

bądź nawet likwiduje skutki takiego deficytu. Bilans mocy czynnej chwilowej w układzie autoproducentckim w momencie wystąpienia opisywanego zdarzenia przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Bilans mocy chwilowej układu autoproducentckiego
Fig. 3. The balance of instantaneous power in auto-production system

Na podstawie rys. 3 można sformułować chwilową wartość współczynnika zdolności wytwórczej warunkującego stopień zbilansowania deficytu mocy elektrycznej czynnej powstałego w układzie autoproducentckim. Deficyt ten jest określony wynikiem bilansu mocy obciążenia źródła własnego odbiorcy względem zapotrzebowania przy uwzględnieniu dyspozycyjności tego źródła.

$$w_r(t) = \frac{P_d^{zw}(t) - P^{zw}(t)}{P(t) - P^{zw}(t)}, \quad (8)$$

gdzie:

- $w_r(t)$ – współczynnik zdolności wytwórczej w chwili t ,
- $P_d^{zw}(t)$ – moc czynna dyspozycyjna źródła własnego w chwili t ,
- $P^{zw}(t)$ – moc czynna obciążenia źródła własnego w chwili t ,
- $P(t)$ – zapotrzebowanie odbiorcy na moc czynną w chwili t .

Znając wartość współczynnika zdolności wytwórczej w chwili wystąpienia przerwy w zasilaniu ze strony sieci elektroenergetycznej można określić energię elektryczną niedostarczoną w przypadku I w badanym okresie T . Do wyznaczenia tej wartości energii można posłużyć się zależnością (9).

$$A_{nd} = \begin{cases} 0 & \text{dla } w_r \geq 1 \\ A_D^{zw} & \text{dla } 0 < w_r < 1, \\ A_{nd}^{sz} & \text{dla } w_r = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

gdzie:

- A_D^{zw} – dodatkowa ilość energii elektrycznej wytworzona w źródle własnym przy awarii sieci zewnętrznej, określona wzorem:

$$A_D^{zw} = \int_0^T w_r(t) P^{sz}(t) dt, \quad (10)$$

A_{nd}^{sz} – energia elektryczna niedostarczona w związku z awarią sieci zewnętrznej, określona wzorem:

$$A_{nd}^{sz} = \int_0^T P^{sz}(t) dt. \quad (11)$$

Energia niedostarczona z sieci, a pokryta przez źródło własne, rozliczana jest po koszcie wytwarzania energii w tym źródle (k_w^{zw}). Jeżeli źródło nie jest w stanie pokryć powstałego deficytu ($w_r < 1$), to pozostała jego część składa się na koszt strat wywołanych brakiem zasilania u odbiorcy. Sumaryczny koszt energii (niedostarczonej oraz wytworzonej w źródle własnym) wynikający z przypadku I można wyrazić zależnością (12):

$$K_{NA} = \begin{cases} k_w^{zw} A_{nd}^{sz} & \text{dla } w_r \geq 1 \\ k_a (A_{nd}^{sz} - A_D^{zw}) + k_w^{zw} A_D^{zw} & \text{dla } 0 < w_r < 1. \\ k_a A_{nd}^{sz} & \text{dla } w_r = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Z powyższego rozważania wynika, że określona w przypadku I ilość faktycznie niedostarczonej energii elektrycznej dla odbiorcy zależy od bieżącej zdolności wytwórczej źródła. W praktyce źródło zwykle jest dobierane ze względów ekonomicznych do pracy w podstawie obciążenia, a więc zachodzi przypadek, w którym $w_r \in (0, 1)$.

3.2. Przypadek II

Wystąpienie sytuacji przedstawionej jako przypadek II związane jest z jednoczesnym wystąpieniem zdarzenia, w którym nie jest możliwe wytwarzanie energii elektrycznej w źródle własnym jak i pobór energii z sieci zewnętrznej. Analiza takiego przypadku prowadzi do określenia energii niedostarczonej odbiorcy na skutek jednoczesnych zakłóceń na obu drogach zasilania. Energię niedostarczoną w tym przypadku można zatem ocenić jako:

$$A_{nd} = \int_0^T F^{sz, zw}(t) P(t) dt, \quad (13)$$

gdzie przez $F^{sz, zw}$ przybliżono iloczyn funkcji zakłóceń na obu drogach zasilania oraz występowanie członu zależnego. Może bowiem istnieć współzależność zakłóceń obu dróg zasilania (tj. z sieci energetyki i źródła własnego oraz jego połączeń).

W tym przypadku energia niedostarczona zarówno przez źródło własne jak i niedostarczona z sieci wiąże się z kosztem strat ekonomicznych u odbiorcy spowodowanym brakiem zasilania. Koszt ten można oszacować na podstawie zależności (5).

3.3. Przypadek III

Analiza przypadku III prowadzi do określenia energii niedostarczonej ze źródła własnego na skutek jego awaryjności. Roczną energię niedostarczoną ze źródła własnego można w takim przypadku przedstawić wg zależności (14).

$$A_{nd}^{zw} = \int_0^T F^{zw}(t) P(t) dt. \quad (14)$$

Energia ta zostaje pokryta zastępczo z sieci elektroenergetycznej. Można tu rozpatrzeć dodatkowo dwie sytuacje:

- przepustowość sieci zasilającej jest wystarczająca do pokrycia bieżącego zapotrzebowania odbiorcy,
- przepustowość sieci jest ograniczona i mniejsza od zapotrzebowania.

Ograniczeniem w tym przypadku może być zdolność przesyłowa układu zasilania odbiorcy. Do sytuacji, w której obciążenie odbiorcy po odłączeniu źródła własnego przekracza możliwości przepustowe sieci, może dojść, jeżeli przyrost zapotrzebowania (w procesie rozwoju sieci) po stronie odbiorcy bilansowany był poprzez produkcję w źródle własnym. W takim przypadku sieć zewnętrzna nie została przygotowana na przenoszenie pełnych obciążeń odbiorcy.

Bieżące zdolności przesyłowe układu zasilania zdefiniowano wg zależności (15). W kolejnych zależnościach, w przypadku większej niż jeden liczby ciągów zasilania, przyjęto wartość w_p jako sumę zdolności wszystkich ciągów. Wartość współczynnika w_p powinna być większa od 0. Przypadek $w_p=0$ byłby równy pracy źródła własnego w układzie izolowanym, co wyklucza przyjęte założenie dotyczące współpracy źródła z siecią i nie jest analizowany.

$$w_p(t) = \frac{\sqrt{3}U_n I_{dop}}{P(t)} \cos \varphi(t), \quad (15)$$

gdzie:

- $w_p(t)$ – współczynnik przepustowości,
- U_n – napięcie nominalne układu zasilającego odbiorcę,
- I_{dop} – prąd dopuszczalny obciążenia układu,
- $P(t)$ – moc czynna obciążenia odbiorcy,
- $\cos \varphi(t)$ – współczynnik mocy odbiorcy.

Przy uwzględnieniu zdolności przesyłowej układu zasilania węzła, do którego przyłączony jest odbiorca, energię niedostarczoną w rozważanym przypadku można wyrazić zależnością (16).

$$A_{nd} = \begin{cases} 0 & \text{dla } w_p \geq 1 \\ A_{nd}^{zw} - A_D^{sz} & \text{dla } 0 < w_p < 1 \end{cases} \quad (16)$$

gdzie przez A_D^{sz} oznaczono wielkość energii elektrycznej pobraną dodatkowo z sieci elektroenergetycznej po wypadnięciu źródła własnego. Wielkość tę, przy przepustowości ciągu $w_p < 1$, można obliczyć z zależności (17). W przypadku gdy $w_p \geq 1$, to z sieci pobierana jest cała energia przewidziana pierwotnie do wytwarzania w źródle własnym, ilościowo równa wielkości energii obliczonej na podstawie zależności (14).

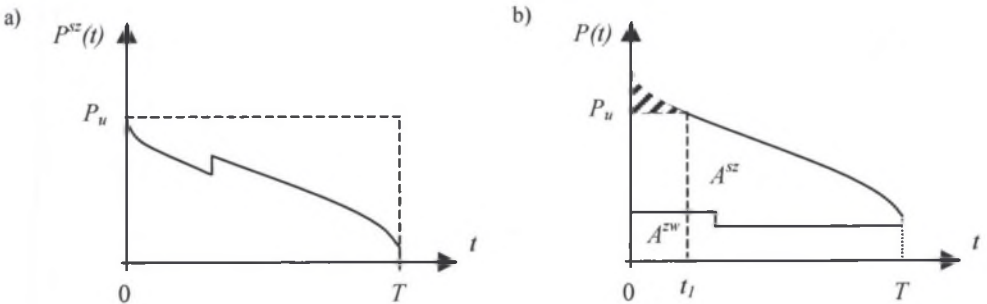
$$A_D^{sz} = \int_0^T w_p(t) P(t) dt. \quad (17)$$

Energia niedostarczona przez źródło własne, a pokryta przez dodatkowy pobór energii z sieci, zostaje zakupiona po rynkowych cenach bilansujących (Cena Rozliczeniowa Odchyleń na rynku bilansującym – ozn. c_{CRO}). Koszt energii (niedostarczonej oraz dodatkowo pobranej z sieci) można obliczyć na podstawie zależności (18).

$$K_{NA} = \begin{cases} c_{CRO} A_{nd}^{zw} & \text{dla } w_p \geq 1 \\ k_a (A_{nd}^{zw} - A_D^{sz}) + c_{CRO} A_D^{sz} & \text{dla } 0 < w_p < 1 \end{cases} \quad (18)$$

Z przedstawionego rozważania wynika, że w kosztach przypadku III można określić koszt energii niedostarczonej do odbiorcy oraz zwiększenie kosztów zakupów energii elektrycznej z sieci zewnętrznej – przy braku generacji w źródle własnym – poprzez uwzględnienie rozliczenia z właściwym operatorem [6].

Przy uwzględnieniu zawodności funkcjonowania źródła własnego i poprawnej pracy sieci przesyłowej może pojawić się jeszcze jeden składnik, wynikający z ponoszenia dodatkowych opłat przesyłowych. Opłaty te, w zależności od struktury opłat przesyłowych, mogą być związane ze składnikiem stałym i zmiennym. Ponieważ składnik zmienny opłaty przesyłowej związany jest z energią elektryczną kupowaną z sieci elektroenergetycznej proporcjonalnie do dodatkowej ilości energii kupowanej z sieci zewnętrznej, w przypadku awarii źródła następuje zwiększenie kosztu zmiennego opłaty przesyłowej dla odbiorcy. Składnik stały opłaty przesyłowej związany jest z mocą umowną odbiorcy [4, 6]. Moc umowna jest mocą czynną określoną w umowie o świadczenie usług przesyłowych lub umowie sprzedaży energii. W przypadku systemu autoproducentkiego z uwagi na pokrywanie części zapotrzebowania w źródle własnym odbiorca może określić moc umowną nie według maksymalnego zapotrzebowania, a na poziomie wynikającym z przewidywanego poboru mocy z sieci, który to pobór jest mniejszy od mocy zapotrzebowania odbiorcy (z uwagi na pracę źródła własnego). W takim przypadku przy braku produkcji w źródle własnym następuje przekroczenie mocy umownej. Przekroczenie takie jest zwykle związane z dodatkowymi opłatami. Opłaty te są określone przez wartość przekroczenia jak i przez czas trwania przekroczenia, a więc energię wynikającą z tego przekroczenia. Rozliczeniu podlega moc, ponieważ w rzeczywistości energii tej nie mierzy się (brak odpowiedniego układu). Graficzną interpretację takiej sytuacji przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Interpretacja mocy umownej: a) na tle mocy pobieranej z sieci zewnętrznej; b) na tle zapotrzebowania odbiorcy

Fig. 4. The interpretation of contracted power: a) against grid supply power, b) against customer demand

Zakreskowane pole na rys. 4 wynika z wartości mocy przekroczenia i czasu trwania przekroczenia. Opłata za przekroczenie wartości mocy umownej w kolejnych godzinach obciążenia przy całkowitej niezdatności źródła własnego odbiorcy jest proporcjonalna do tego przekroczenia, którego wartość dla danej chwili czasowej można zapisać jako:

$$P_u(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } P(t) - P_u \leq 0 \\ P(t) - P_u & \text{dla } P(t) - P_u > 0 \end{cases} \quad (19)$$

Koszt wynikający z potencjalnego przekroczenia wartości mocy umownej związany jest z wielkością przekroczenia, stawki opłaty za przekroczenie oraz zdarzenia związanego z wyłączeniem źródła, co ujmuje całościowo poniższa zależność:

$$O_{pu} = k_{pu} \int_0^T F^{zw}(t) P_u(t) dt, \quad (20)$$

gdzie:

O_{pu} – opłata za przekroczenie mocy umownej,

k_{pu} – stawka opłaty za przekroczenie mocy umownej.

Przedstawione zależności, a w szczególności wzory (9), (13) i (16) pozwalają na ocenę energii niedostarczonej, będącej składnikiem równania (6). Warto w tym miejscu podkreślić, że dzięki wprowadzeniu układu autoproducentkiego wartość energii niedostarczonej, która powoduje na skutek braku zasilania straty ekonomiczne u odbiorcy końcowego, może być znacząco zredukowana. Z pewnością straty te mogą wystąpić w sytuacji przedstawionej w przypadku II, ale są one znacznie mniejsze niż w układzie zasilania wyłącznie z sieci elektroenergetycznej. W pozostałych dwóch rozpatrywanych przypadkach pracy układu autoproducentkiego straty te nie wystąpią, chyba że nie są spełnione jeszcze inne warunki – ze strony sieci takie jak zdolność przesyłowa, czy ze strony źródła własnego jak wystarczający stopień rezerwy mocy czynnej w tym źródle. Zatem w przypadkach I i III występujących w układzie autoproducentkim zamiast strat z powodu przerw w zasilaniu (kosztów energii niedostarczonej) mogą wystąpić jedynie koszty zakupu dodatkowej ilości energii, koszty bilansowania, koszty zwiększenia opłat przesyłowych lub też koszty związane ze zwiększeniem produkcji w źródle własnym. Zwykle czynniki te mają mniejszą wartość niż koszty energii niedostarczonej.

Poniżej przedstawiono przykład, w którym rozważono wielkość jak i koszt energii niedostarczonej oraz wynikające stąd koszty dodatkowe w układzie autoproducentkim oraz w układzie sieciowym zasilania odbiorcy (bez źródła własnego).

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W celu ilustracji przedstawionych powyżej rozważań przeprowadzono symulację ograniczeń w dostawach energii elektrycznej do odbiorcy końcowego. Przyjęto, że moc szczytowa badanego odbiorcy wynosi 1,4 MW, moc obciążenia podstawowego wynosi 1 MW, a roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną jest równe 9 883 MWh. Obliczenia przeprowadzono w dwóch układach sieciowych zasilania odbiorcy. W pierwszym układzie odbiorca zasilany jest wyłącznie z sieci zewnętrznej, stąd brak zasilania narzuca odbiorcę bezpośrednio na straty ekonomiczne. W drugim układzie uwzględniono źródło własne odbiorcy (układ autoproducentki), przy czym jego zadaniem jest pokrywanie podstawowego obciążenia odbiorcy. W ramach układu autoproducentkiego rozpatrzono cztery przykłady pracy źródła:

- Przykład 1 – moc czynna dyspozycyjna źródła własnego wynosi 1,5 MW i nie ma ograniczeń w dostawie energii elektrycznej z sieci zewnętrznej z uwagi na przepustowość ciągów zasilających odbiorcę. W tej sytuacji przyjęto, że źródło pokrywa w 100% zapotrzebowanie odbiorcy.
- Przykład 2 – moc czynna dyspozycyjna źródła własnego wynosi 1 MW i jest ona równa mocy obciążenia podstawowego odbiorcy. Nie ma ograniczeń w dostawie energii elektrycznej z sieci zewnętrznej. Przyjęto, że źródło pokrywa obciążenie podstawowe odbiorcy, natomiast obciążenie podszczytowe i szczytowe pokrywane jest z sieci zewnętrznej.

- Przykład 3 – moc czynna dyspozycyjna źródła własnego wynosi 1 MW, natomiast źródło pracuje z 50% obciążeniem. Nie ma ograniczeń w dostawie energii elektrycznej z sieci zewnętrznej.
- Przykład 4 – moc czynna dyspozycyjna źródła własnego wynosi 1,5 MW. Przyjęto, że źródło pokrywa w 100% zapotrzebowanie odbiorcy. Możliwości przesyłowe sieci zewnętrznej pozwalają na pokrycie maksymalnie tylko 0,5 MW obciążenia odbiorcy, co ogranicza maksymalny pobór mocy z sieci zewnętrznej o blisko 2/3 obciążenia szczytowego. Warto dodać, że sytuacja przedstawiona w tym przykładzie ma dość hipotetyczny charakter, a jej podstawowym celem jest ilustracja potencjalnego wzrostu kosztu strat ekonomicznych po stronie odbiorcy przy niedoinwestowaniu przyłącza do sieci elektroenergetycznej.

Przedstawione w kolejnych przykładach sytuacje wynikają z doboru źródła własnego ze względu na jego pracę w warunkach normalnych, jego charakteru pracy oraz stanu sieci zewnętrznej (przepustowości sieci).

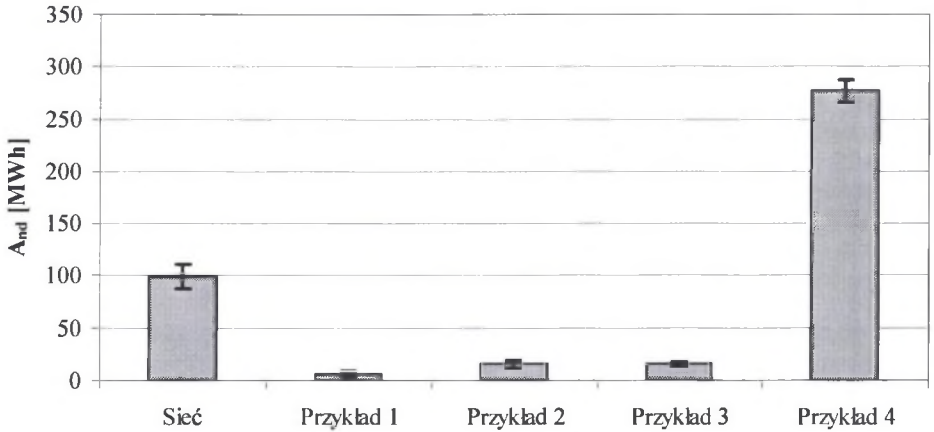
W ramach obliczeń przeprowadzono symulację pracy sieci i źródła własnego w okresie rocznym. Dla sieci zewnętrznej przyjęto współczynnik zawodności zasilania rzędu 10^{-2} , natomiast dla źródła własnego rzędu $5 \cdot 10^{-2}$. Jako źródło własne przyjęto układ kogeneracyjny oparty na silniku zasilanym gazem ziemnym, co pozwoliło na oszacowanie kosztów zmiennych pracy źródła. Ceny zakupu energii elektrycznej na rynku bilansującym przyjęto na podstawie publikowanych wartości rzeczywistych [10]. Bieżącą wartość ceny rozliczeniowej odchyłań określono losowo przy wykorzystaniu rozkładu beta, odwzorowującego rozkład cen na rynku bilansującym.

Obliczenia symulacyjne zostały powtórzone dwudziestokrotnie w celu uzyskania kolejnych wartości energii niedostarczonej oraz związanego z nią kosztu w rozważanych układach zasilania i poszczególnych przypadkach. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń oszacowano wartość średnią i odchylenie standardowe dla energii elektrycznej niedostarczonej oraz dla kosztu strat ekonomicznych i/lub kosztu zakupów dodatkowych. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci tabelarycznej (tab. 1) oraz w postaci wykresów (rys. 5 i 6). Na rysunku 7 przedstawiono poszczególne wyniki z kolejnych pętli obliczeniowych w układzie: ilość energii niedostarczonej – koszt energii.

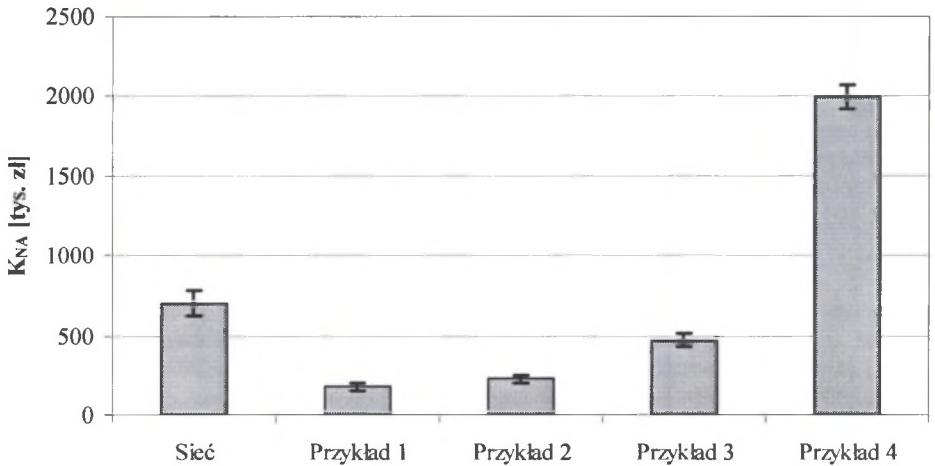
Tabela 1

Zestawienie oszacowanych średnich wartości energii niedostarczonej oraz jej kosztu

Wielkość	Jednostka	Sieć zewnętrzna	Układ autoproducentki			
			Przykład 1	Przykład 2	Przykład 3	Przykład 4
A_{nd}	MWh	99,5	5,8	15,4	15,5	276,4
K_{NA}	tys. zł	696,7	177,0	226,8	471,8	1 995,5

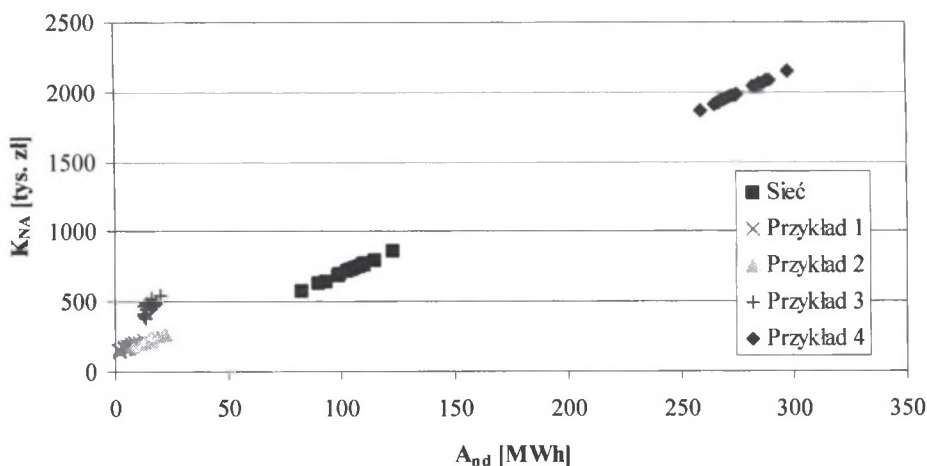


Rys. 5. Oszacowana ilość energii niedostarczonej oraz odchylenia standardowego
 Fig. 5. Estimating quantity of unsupply energy and its standard deviation



Rys. 6. Oszacowana wartość kosztu energii niedostarczonej oraz odchylenia standardowego
 Fig. 6. Estimating value of unsupply energy cost and its standard deviation

Wykorzystując jedynie możliwość pokrycia zapotrzebowania za pomocą sieci zewnętrznej, każde zakłócenie w jej pracy pogarsza ciągłość zasilania odbiorcy. Wiąże się to zwykle z wysokimi kosztami strat ekonomicznych odbiorcy. W przykładzie przybliżono koszt niepokrytego zapotrzebowania poprzez ocenę uśrednionych strat w kraju z tytułu ubytku jednej jednostki energii. Przy obecnym poziomie produktu krajowego brutto szacunek ten wskazuje na kwotę 7 000 zł za każdą niedostarczoną MWh energii. Taką też wartość wyznacza nachylenie prostej skupiającej wyniki symulacji zestawione na rys. 7 pod nazwą „sieć”.



Rys. 7. Zestawienie wyników symulacji ilości energii niedostarczonej oraz jej wartości
 Fig. 7. Comparison of simulation results with unsupply energy and its costs

Energia niedostarczona w układzie autoproducentckim jest znacznie mniejsza niż w układzie zasilania wyłącznie z sieci zewnętrznej, co przedstawiają wyniki obliczeń w przykładach 1 do 3 (rys. 5 i 7). Najniższy wynik osiągnięto w przykładzie 1. W prezentowanej sytuacji źródło pokrywa całość zapotrzebowania na energię elektryczną, natomiast sieć spełnia rolę zasilania rezerwowego. W przypadku zakłóceń w pracy źródła własnego następuje dodatkowy zakup z rynku bilansującego za pośrednictwem sieci. Zatem energia elektryczna niedostarczona związana jest jedynie z jednoczesnymi zakłóceniami w pracy zarówno źródła, jak i sieci. Podobny układ zasilania przedstawiono w przykładzie 4, z tym wyjątkiem, że przepustowość sieci zewnętrznej nie zapewnia możliwości pokrycia pełnego zapotrzebowania odbiorcy. Powoduje to znaczne straty u odbiorcy przy zakłóceniach w pracy źródła własnego. Efektem jest znaczna ilość energii niedostarczonej w porównaniu z pokryciem zapotrzebowania w pozostałych z prezentowanych przypadków. Układ taki nie mógłby funkcjonować autonomicznie (tylko przy zasilaniu z sieci), gdyż zasilanie ze strony sieci pozwoliłoby na pokrycie jedynie 1/3 zapotrzebowania odbiorcy. Koszty strat są w tym układzie zdeterminowane kosztami jednostkowymi energii niedostarczonej.

Przypadki 2 i 3 badane w układzie autoproducentckim różnią się wypadkowym kosztem energii elektrycznej niedostarczonej, natomiast w stosunku do przypadku 1 również ilością energii niedostarczonej. Jest to wynikiem przyjętego sposobu pracy źródła w układzie normalnym. W obu tych przypadkach moc czynna dyspozycyjna źródła jest równa 1 MW. Pozwala to na pokrycie zapotrzebowania podstawowego, ale nie szczytowego. Z tego też powodu zakłócenia w pracy sieci zewnętrznej przy obciążeniu szczytowym mogą być pokryte przez źródło własne tylko do wartości 1 MW, a pozostała wartość obciążenia wyznacza energię niedostarczoną. Różnica w kosztach energii niedostarczonej w obu tych przypadkach wynika ze sposobu jej pokrycia. Koszty wypadkowe (zobrazowane poprzez aproksymację uzyskanych wyników wg rys. 7) w przypadku 3 są wyższe, ponieważ przy awarii sieci zewnętrznej źródło zwiększa swoją produkcję, co wiąże się z uwzględnieniem kosztu zmiennego w łącznym koszcie energii niedostarczonej (bądź wytworzonej dodatkowo). W przypadku 2 źródło obciążone jest zgodnie z mocą dyspozycyjną i przy zakłóceniu pracy sieci nie ma możliwości przyrostu obciążenia (a więc i kosztu wytwarzania dodatkowego).

5. PODSUMOWANIE

Jednym z efektów związanych z rozwojem źródeł rozproszonych może być poprawa niezawodności pokrycia zapotrzebowania odbiorcy końcowego. Szczególnie użyteczną rolę pełnią tutaj specyficzne układy określone mianem autoproducentkich. Wykorzystanie przez odbiorcę jednej lub więcej własnych jednostek wytwórczych pozwala na zredukowanie przerw w zasilaniu do minimum. Oczywiście jest, że zastosowanie większej liczby jednostek wytwórczych podraża koszty związane z inwestowaniem w źródła własne jak i ich eksploatacją, niemniej jednak decyzja taka musi być poparta stosownym rachunkiem ekonomicznym i jednym z jej celów jest zrównoważenie kosztu strat powstających w przypadku braku zasilania. Warto również zauważyć, że wykorzystanie źródła własnego może być substytutem zwiększania liczby ciągów zasilających odbiorcę, a tym samym weryfikować tempo rozwoju sieci elektroenergetycznej. W ogólnym przypadku źródła rozproszone będą powodować zmianę przepływów w sieciach przesyłowych, co znajduje odzworowanie w zmianie niezawodności dostaw z sieci ale również wpływać będzie na odłożenie w czasie rozwojowych inwestycji sieciowych. Z drugiej jednak strony przejęcie obciążenia odbiorcy w dłuższej perspektywie przez źródło własne powoduje, że może nastąpić niedoinwestowanie układu sieciowego, a stąd ograniczenie przepustowości sieci w związku z pokryciem obciążenia odbiorcy. Dlatego też szczególnie ważne jest uwzględnienie wpływu źródeł rozproszonych na sieć oraz zagadnienie równomiernego rozwoju systemu w warunkach niepewności.

Odsebną grupą zagadnień są układy, w których źródła rozproszone pełnią rolę źródeł rezerwowych (awaryjnych). Ich zadaniem jest poprawa bezpieczeństwa pracy całego układu zasilania, a w efekcie poprawa niezawodności dostaw energii. W takich układach posiadanie źródła własnego jest szczególnie zasadne. Przedstawione w artykule rozważania dotyczyły jednak źródeł własnych, których podstawową rolą jest „autoprodukcja”. Stąd wpływ autoprodukcji i źródeł własnych na niezawodność pokrycia zapotrzebowania odbiorcy oraz na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego będzie analizowany w ramach dalszych badań.

LITERATURA

1. Analiza wpływu rozproszonego wytwarzania na rozwój KSE do 2020 roku. Praca wykonana na podstawie umowy nr RB/BR/5/00 z PSE SA. Warszawa, maj 2000.
2. Bargiel J., Goc W., Sowa P., Teichman B.: The Currently Applied Method and Program of Estimating Reliability of the Polish Power Grid (PPG). Proceedings of International Scientific Conference Power Quality'99. Chicago, 9-11 November 1999.
3. Bargiel J., Goc W., Teichman B.: Dane do oceny niezawodności sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. „Elektryka” z. nr 174. Gliwice 2000.
4. Buchta F., Przygodzki M.: Zarys metodyki oceny konkurencyjności energii elektrycznej wytwarzanej lokalnie i kupowanej z sieci. Mat. Międzynarod. Konf. Nauk. APE'03. Jurata, 11-13 czerwca 2003.
5. Cowart R., Harrington Ch.: Distributed resources and electric system reliability. February 2001.
6. Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej. Regulamin rynku bilansującego energii elektrycznej w Polsce. PSE SA – OSP. Warszawa, 19 lipca 2001.
7. Paska J.: Ocena niezawodności podsystemu wytwórczego systemu elektroenergetycznego. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej „Elektryka”. Zeszyt nr 120. Warszawa 2002.
8. Przygodzki M.: Ocena konkurencyjności energii elektrycznej wytwarzanej lokalnie i kupowanej z sieci. Rozprawa doktorska (promotor: prof. dr hab. inż. R. Janiczek). Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny. Gliwice 2004.
9. Report of CIRED Working Group No 4 on Dispersed Generation. Nice, 2 June 1999.
10. Witryna internetowa: www.cired.pl