

Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w systemach hybrydowych

J. Paska, M. Sałek, T. Surma

Wiadomości Elektrotechniczne. Nr 12, 2005. ss. 3-13.
ISSN 0043-5112.

III nagroda w Konkursie im. Prof. Mieczysława Pożarskiego na najlepsze artykuły opublikowane w czasopismach SEP w 2005 r.

Słowa kluczowe: wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła, hybrydowe systemy wytwórcze, odnawialne źródła energii

Streszczenie. Z wykorzystaniem zasobów odnawialnych do produkcji energii elektrycznej (i/lub ciepła) i jej rozproszonym wytwarzaniem wiąże się pojęcie hybrydowych systemów (układów) wytwórczych (HSW), przez które rozumie się połączenie różnych technologii wykorzystania odnawialnych zasobów energii, konwencjonalnych technologii wytwarzania energii elektrycznej (i/lub ciepła), urządzeń do magazynowania energii (zasobników energii) oraz złożonych systemów nadzoru i sterowania. Systemy HSW w wielu przypadkach mogą okazać się bardziej opłacalne ekonomicznie, a ich zastosowanie może być bardziej przyjazne dla środowiska. W artykule przedstawiono istotą hybrydowych systemów wytwórczych, ich rodzaje, przykłady rozwiązań elektrowni hybrydowych wykorzystujących odnawialne zasoby energii wiatru i Słońca tj. elektrowni słoneczno-wiatrowej, słonecznej z ogniwem paliwowym oraz elektrowni wiatrowej z zasobnikiem energii.

1. WPROWADZENIE

Energetyka rozproszona (generacja rozproszona, wytwarzanie rozproszone, ang. *distributed generation, dispersed generation, embedded generation*) [7-9] jest stosunkowo nową dziedziną (w obecnym jej rozumieniu) - zatem terminologia nie jest jeszcze ugruntowana i powszechnie akceptowana. Dla przykładu: wg Grupy Roboczej 37-23 CIGRE (WG 37-23) generacja rozproszona oznacza źródła o mocach nie przekraczających 50-100 MW, których rozwój nie jest planowany centralnie, nie podlegające też obecnie centralnemu dysponowaniu mocą, przyłączone najczęściej do elektroenergetycznej sieci rozdzielczej [5]. Próbę uogólnienia definicji energetyki rozproszonej stanowi następująca jej wersja: Energetyka (generacja) rozproszona - małe (o mocy znamionowej do 50-150 MW) jednostki lub obiekty wytwórcze, przyłączone bezpośrednio do elektroenergetycznych sieci rozdzielczych lub zlokalizowane w sieci odbiorcy (za urządzeniem kontrolno-rozliczeniowym), często produkujące energię elektryczną z energii odnawialnych lub niekonwencjonalnych, równie często w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła.

Wśród jednostek energetyki rozproszonej dość dużym zainteresowaniem cieszą się tzw. hybrydowe systemy (układy) wytwórcze energii elektrycznej lub energii elektrycznej i ciepła,

za które uważa się: hybrydowe systemy (układy) wytwórcze - małe zespoły współpracujących jednostek wytwórczych energii elektrycznej (lub ciepła) albo energii elektrycznej i ciepła, o zróżnicowanych nośnikach energii pierwotnej (odnawialne i nieodnawialne) i/lub zawierające układ(y) do magazynowania energii, przy czym sterowanie i koordynacja ich współpracy odbywa się przy wykorzystaniu zaawansowanych układów energoelektronicznych.

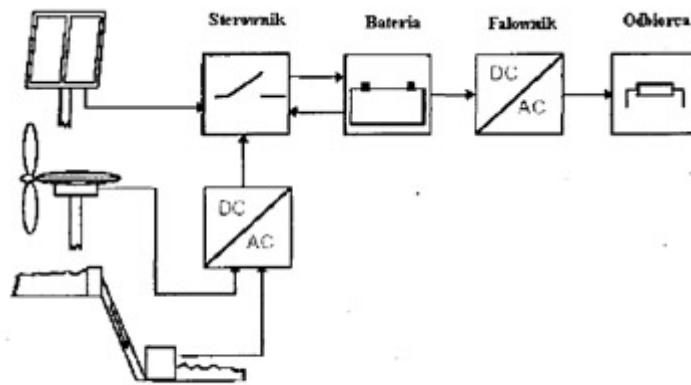
Pojęcie układu hybrydowego wprowadzono także w rozporządzeniu Ministra Gospodarki [19]: **układ hybrydowy** - jednostka wytwórcza wytwarzająca energię elektryczną albo energię elektryczną i ciepło, w której w procesie wytwarzania energii elektrycznej lub ciepła wykorzystywane są nośniki energii wytwarzane oddzielnie w odnawialnych źródłach energii i w źródłach energii innych niż odnawialne oraz zużywane wspólnie w tej jednostce wytwórczej do wytworzenia energii elektrycznej lub ciepła.

Powyższa definicja jest niespójna z określeniem odnawialnego źródła energii z Ustawy „Prawo energetyczne”: **odnawialne źródło energii** ~ źródło wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energią pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątek roślinnych i zwierzęcych.

2. RODZAJE HYBRYDOWYCH SYSTEMÓW WYTWÓRCZYCH

Trzy podstawowe technologie stosowane w systemach hybrydowych to: spalinowe zespoły prądotwórcze (np.: z silnikami Diesla), małe elektrownie wiatrowe oraz baterie słoneczne; mogą one pracować w kombinacjach podwójnych (po dwa) lub być wykorzystywane wszystkie. HSW z dwoma rodzajami zastosowanych technologii nazywamy „podwójnym” (bivalent) a system z wieloma źródłami - „wielorakim” (multivalent). Generalnie można stwierdzić, że w systemach hybrydowych są lub będą stosowane elektrownie zasilane biomasy jako paliwem, w szczególności małe jednostki modularne (do 5 MW), małe elektrownie wodne oraz ogniwa paliwowe, łącznie z bateriami słonecznymi i turbinami wiatrowymi.

W skład typowego systemu hybrydowego, wykorzystującego wyłącznie zasoby odnawialne, wchodzi źródła korzystające z energii słonecznej, wiatru oraz wody. Zasadą działania takiego układu pokazano na rys. 1. Energia elektryczna generowana z energii wody lub wiatru jest otrzymywana w postaci prądu przemiennego (AC), który może być przekształcony na prąd stały w celu ładowania akumulatorów. Akumulatory są chronione przed rozładowaniem oraz przeładowaniem przez system kontrolujący. Przekształtniki są stosowane do zmiany niskiego napięcia stałego na napięcie zmienne 110 V lub 220 V, w zależności od standardu używanego w danym rejonie.



Rys. 1. Schemat blokowy typowego systemu hybrydowego z wyłącznym wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii

Systemy te są zwykle stosowane w rejonach odległych lub w przypadkach, gdy napotyka się trudności w transporcie paliwa do generatorów konwencjonalnych. Takie jednostki, zasilające na przykład przekaźniki telekomunikacyjne, często posiadają obciążenia stałoprądowe. Systemy te należą do najdroższych ze względu na konieczność przewymiarowania odnawialnych źródeł energii oraz zastosowania układów magazynowania energii.

W porównaniu z instalacjami z wyłącznym wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, instalacje z generatorami energii elektrycznej, zasilanymi paliwami kopalnymi, mają szereg ważnych właściwości:

- pojemności baterii akumulatorów mogą być zredukowane,
- zdolność do pracy może osiągnąć 100% przy znacznie mniejszych zdolnościach wytwórczych elementów składowych (PWiatru/wody),
- zwiększenie kosztów bieżącego utrzymania instalacji oraz paliwa,
- zwiększenie hałasu oraz innych zanieczyszczeń środowiska,
- zredukowanie kosztów remontów kapitalnych.

Projektanci i producenci rozpatrują rozmaite możliwości połączenia różnych technologii w celu zwiększenia sprawności oraz osiągnięć hybrydowych układów wytwórczych.

Przykładowe systemy hybrydowe zawierają:

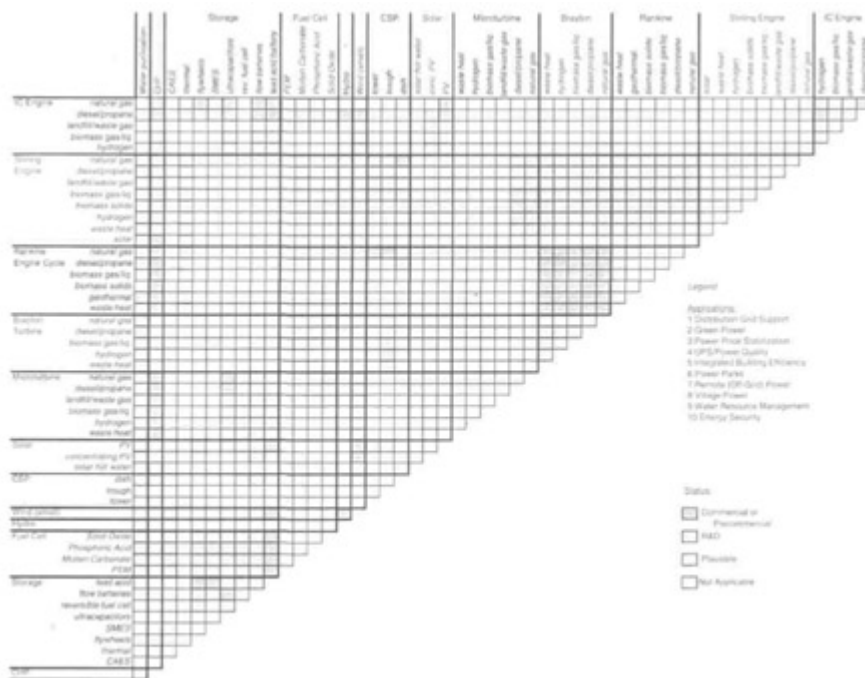
- ogniwa paliwowe SOFC połączone z turbiny gazową lub mikroturbiną,
- silniki Stirlinga połączone ze słonecznym koncentratorem parabolicznym,
- turbiny wiatrowe z baterie akumulatorów oraz generatorami rezerwowymi z silnikami Diesla,
- silniki (i inne układy napędowe) połączone z układami magazynującymi energię w masach wirujących.

Hybrydowe systemy wytwórcze zawierają dwa lub więcej źródeł po to by następowało wzajemne kompensowanie zalet i wad tych źródeł. Na rys. 2 przedstawiono w postaci tablicy te kombinacje hybrydowe, które są już dostępne komercyjnie, są na etapie projektowania, lub są co najmniej godne rozważenia.

3. PRZYKŁADY HYBRYDOWYCH SYSTEMÓW WYTWÓRCZYCH

Wykorzystanie odnawialnych zasobów energii oznacza wykorzystanie energii słońca, wiatru i przepływającej wody do produkcji energii elektrycznej. Podstawową ich wadą jest silna

zależność ilości produkowanej energii od aktualnych warunków pogodowych, w wyniku czego prognozowanie produkcji energii przez te źródła jest bardzo kłopotliwe. Chcąc zwiększyć możliwości wykorzystania tych źródeł zaczęto stosować układy hybrydowe. Układy hybrydowe są kombinacje kilku technologii uzyskiwania energii elektrycznej, np.: panelu fotowoltaicznego i generatora z silnikiem spalinowym. Systemy hybrydowe, dla zapewnienia efektywnego wykorzystania różnych sposobów wytwarzania energii, mają zazwyczaj bardziej skomplikowane układy sterowania i kontroli (często wykorzystujące zaawansowaną technologię mikroprocesorowa).

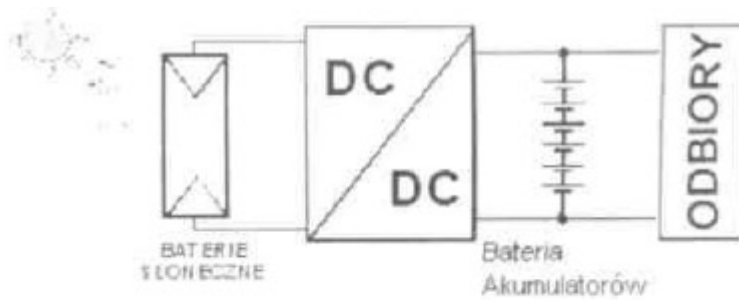


Rys. 2. Przegląd kombinacji układów hybrydowych [4]

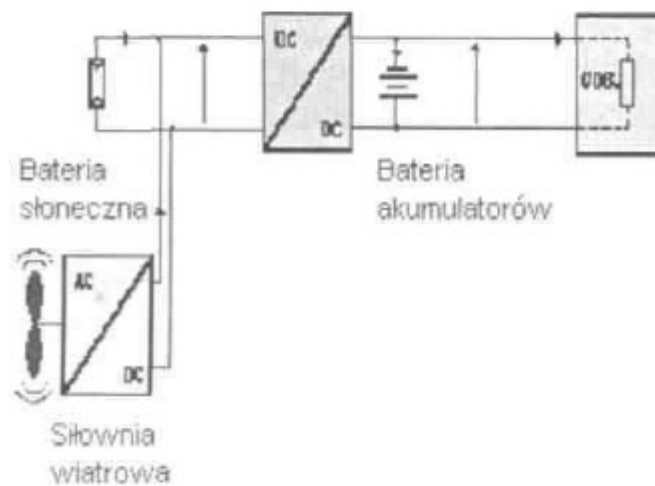
3.1. Elektrownia słoneczna z baterią akumulatorów

Jedną z pierwszych idei było połączenie baterii słonecznej z baterie akumulatorów. Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy takiej elektrowni, pracującej na odbiornik wydzielony stałopradowy. W układzie bateria akumulatorów pracuje jako zasobnik energii, umożliwiając zasilanie odbiornika w okresach niedostatecznej wydajności energetycznej baterii słonecznej (niskie nasłonecznienie, godziny nocne).

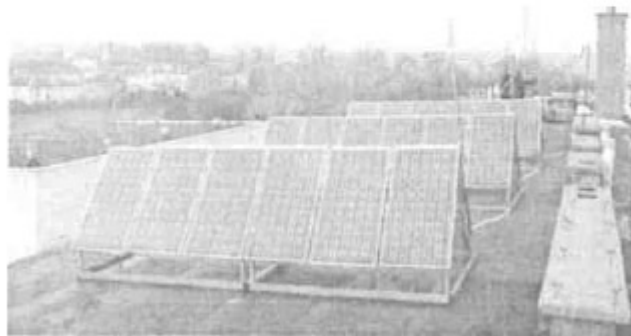
Zalety tego rozwiązania jest prosta budowa i proste sterowanie. Wadą układu jest to, że bateria słoneczna, nawet wraz z baterie akumulatorów, nie jest w stanie zasilć odbiornika w ciągu całej doby, gdyż ilość energii produkowanej w tym układzie jest silnie zależna od warunków nasłonecznienia i pory roku. Układ jest w stanie magazynować i oddawać energię elektryczną tylko w krótkich okresach czasu. Nadaje się do zasilania takich odbiorników, gdzie ciągłość zasilania nie jest sprawą priorytetową.



Rys. 3. Schemat blokowy elektrowni słonecznej z baterią akumulatorów



Rys. 4. Schemat blokowy elektrowni słoneczno-wiatrowej



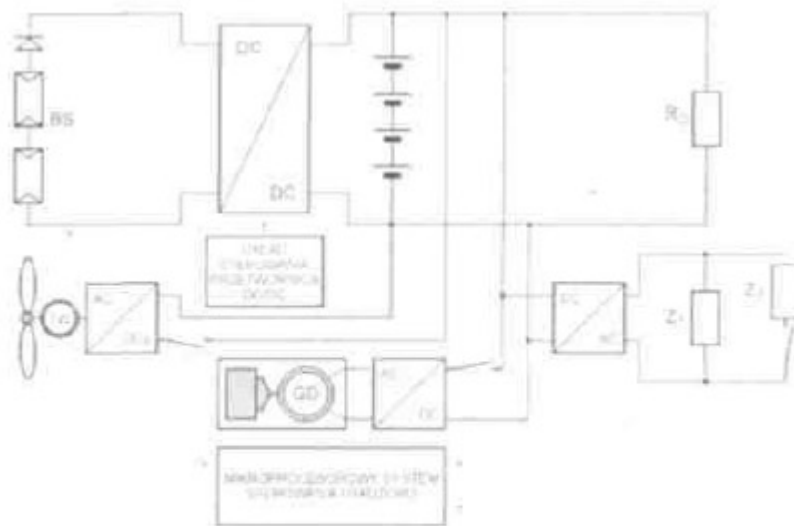
Rys. 5. Widok hybrydowej elektrowni słoneczno-wiatrowej

3.2. Elektrownia słoneczna z generatorem wiatrowym

Inną ideą było połączenie dwóch źródeł odnawialnych: baterii ogniw słonecznych z generatorem wiatrowym. Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy elektrowni słoneczno-wiatrowej, z baterie akumulatorów, pracującej na odbiornik wydzielony stałoprądowy [1]. Na rys. 5 przedstawiono rzeczywistą instalację, zbudowaną na Politechnice Warszawskiej.

3.3. Elektrownia słoneczna z generatorem wiatrowym i generatorem prądu przemiennego z silnikiem Diesla

Kolejną możliwością jest połączenie trzech źródeł: baterii słonecznej (BS), generatora wiatrowego (TW) i generatora prądu przemiennego napędzanego silnikiem Diesla (GD). Na rys. 6 przedstawiono schemat blokowy takiej elektrowni. Przy niesprzyjających warunkach atmosferycznych (bateria słoneczna i generator wiatrowy nie pracują) odbiornik jest zasilany z agregatu prądotwórczego, w skład którego wchodzi: silnik Diesla i sprzęgnięty z nim generator prądu przemiennego.

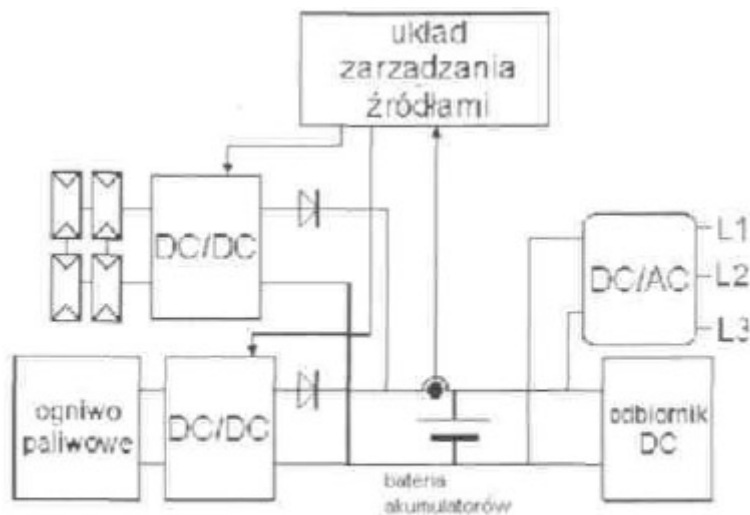


Rys. 6. Schemat blokowy hybrydowej elektrowni słoneczno-wiatrowej z generatorem prądu przemiennego napędzanym silnikiem Diesla

W celu zapewnienia pełnego wykorzystania elektrowni słonecznej, niezależnie od pory roku i intensywności oświetlenia słonecznego, zaproponowano tu rozszerzenie elektrowni o dołączenie dwóch dodatkowych źródeł energii. Autorzy tego rozwiązania zaproponowali maksymalne wykorzystanie źródła słonecznego, turbina wiatrowa ze względu na zużywanie się części mechanicznych zostanie włączona w celu szybkiego doładowania baterii akumulatorów przy braku dostatecznego oświetlenia słonecznego, a generator napędzany silnikiem Diesla jest włączany tylko w przypadku głębokiego rozładowania baterii i będzie wyłączony po pełnym naładowaniu baterii akumulatorów. Wadą układu są duże koszty całej instalacji. Nadzór nad pracą całego systemu sprawuje mikroprocesorowy system sterowania i nadzoru. Sprawność takiego układu zależy od użytych przetwornic energoelektronicznych.

3.4. Elektrownia słoneczna z ogniwo paliwowym

Inne rozwiązanie polega na przebudowie hybrydowej elektrowni słoneczno-wiatrowej: zamianie generatora wiatrowego na nowe źródło energii - ogniwo paliwowe i dodaniu układu zarządzania źródłami (rys. 7) [1-2]. Elektrownia została zoptymalizowana pod kątem zapewnienia ciągłego zasilania odbiornika, maksymalizacji wykorzystania energii promieniowania słonecznego oraz minimalizacji zużycia paliwa - wodoru - przez ogniwo paliwowe. Elektrownia składa się z następujących elementów: baterii akumulatorów, systemu automatycznego nadzoru, układu zarządzania źródłami. System automatycznego nadzoru ma za zadanie zbierać informacje o obiekcie i przekazywać je zdalnie do użytkownika.



Rys. 7. Struktura elektrowni słonecznej z ogniwem paliwowym i układu zasilania odbiornika

Zastosowanie ogniwa paliwowego pozwoliło na uniezależnienie zasilania od warunków zewnętrznych, które mają charakter losowy i na które użytkownik nie ma wpływu. Opisana elektrownia słoneczna z ogniwem paliwowym daje gwarancję stałego zasilania odbiornika. Odpowiednie sterowanie źródłami umożliwia optymalne wykorzystanie energii słonecznej.

3.5. Elektrownie wiatrowe z zasobnikiem energii

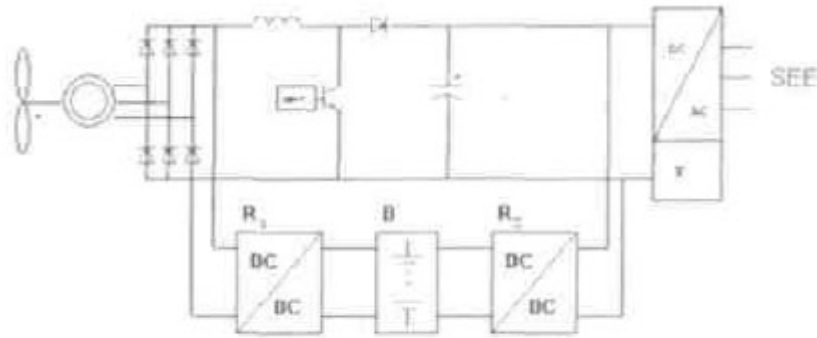
Podstawowe wady elektrowni wiatrowych, takie jak:

- zależność ilości produkowanej energii od prędkości wiatru,
- mała dyspozycyjność elektrowni wiatrowej zależna od pory dnia i pory roku,
- natychmiastowe odłączenie od sieci w przypadku przekroczenia dopuszczalnej prędkości wiatru (gwałtowne stany przejściowe) itp.,

są przyczyną, że elektrownie wiatrowe źle współpracują z sieciami nn.

Dołączając do najprostszej wersji elektrowni wiatrowej układ z chemicznym zasobnikiem energii (akumulatorem) można zbudować układ w pełni dyspozycyjnego źródła rozproszonego. Zasobnik energii współpracujący z elektrownią wiatrową pozwoli w pełni wykorzystać energię produkowaną przez elektrownię (nadwyżki energii będą magazynowane w zasobniku). Dyspozycyjność można jeszcze zwiększyć dołączając do układu elektrowni hybrydowej dodatkowe źródła energii. Mogą nimi być generatory z turbinami lub silnikami spalinowymi. Mogą także być zainstalowane nowoczesne układy z ogniwami paliwowymi.

Schemat elektrowni hybrydowej w skład, której wchodzi elektrownia wiatrowa i baterijny zasobnik energii przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Schemat elektrowni wiatrowej z zasobnikiem energii

W skład układu z rys. 8 wchodzi następujące dodatkowe bloki: R_L - blok regulatora prądu ładowania baterii chemicznej, R_z - blok regulatora prądu zasilania falownika z baterii, B - blok baterii.

Na rys. 9 przedstawiono przykładowy schemat blokowy elektrowni hybrydowej z zasobnikiem, do którego można dołączyć turbosespoły wiatrowe z generatorami asynchronicznymi lub generatorami dwustronnie zasilanymi. W przedstawionej propozycji elektrowni hybrydowej dołączono dodatkowe źródło energii oraz dodatkowy prostownik umożliwiając ładowanie baterii z sieci elektroenergetycznej.

W układzie, którego schemat pokazano na rys. 9, można wyróżnić następujące stany pracy: Obie elektrownie wiatrowe pracują dostarczając całą energię potrzebną do zasilania odbiorników.

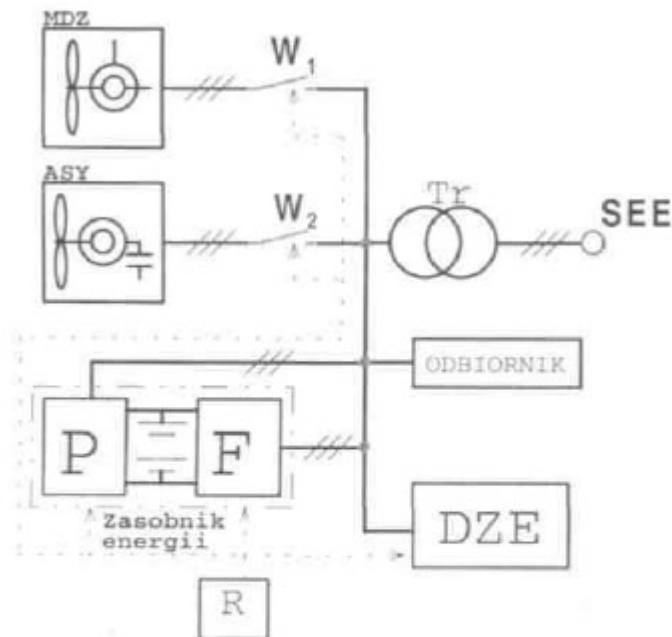
Elektrownie wiatrowe produkują więcej energii niż potrzeba do zasilania odbiorników przyłączonych w węzle systemu elektroenergetycznego. Występująca w tym przypadku nadwyżka energii może być przekazywana do zasobnika lub do sieci rozdzielczej, np. 15 kV. Elektrownie wiatrowe produkują mniej energii niż potrzeba do zasilania przyłączonych do węzła odbiorników. Różnicę pobiera się z zasobnika lub systemu elektroenergetycznego.

Elektrownie wiatrowe nie produkują w ogóle energii, np. z powodu braku wiatru. Symbolizuje to wyłączone wyłączniki W1 i W2. Odbiorniki są zasilane z zasobnika.

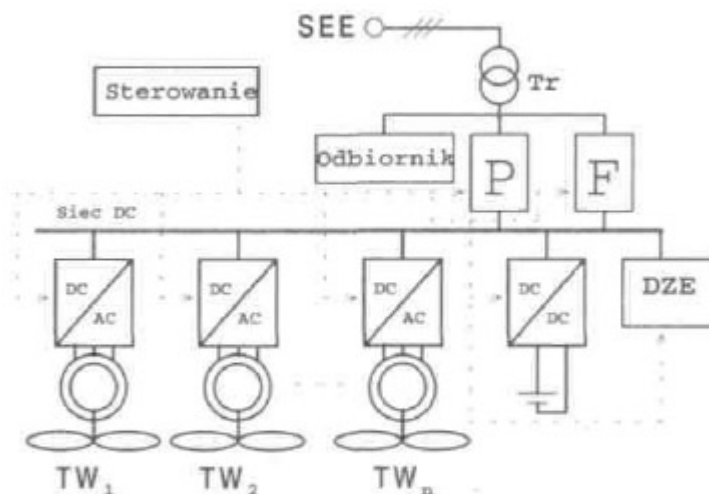
Obie elektrownie wiatrowe nie pracują, odbiorniki są zasilane z sieci i w czasie „doliny energetycznej” akumulatory zasobnika są ładowane przez prostownik z sieci elektroenergetycznej. Natomiast w czasie „szczytu energetycznego” brakująca energia elektryczna jest pobierana z zasobnika i przesyłana do systemu elektroenergetycznego.

Ze względu na ograniczony czas wykorzystywania zasobnika przewidziano opcjonalne włączanie do pracy źródła dodatkowego DZE. Źródło to może być włączone w obwód prądu stałego zasobnika. Może nim być generator z turbiny lub silnikiem spalinowym z niestabilizowaną prędkością obrotową. Może to też być ogniwo paliwowe. Przyłączenie takich źródeł do sieci elektroenergetycznej za pośrednictwem energo-elektronicznych układów przetwarzania jest dużo prostsze technicznie i tańsze niż przyłączenie tych źródeł bezpośrednio do sieci prądu przemiennego. Na rys. 10 przedstawiono nową koncepcję farmy wiatrowej, w której dla przesyłu energii między poszczególnymi elektrowniami wiatrowymi a centralnym falownikiem, umożliwiającym włączenie całej farmy do sieci

elektroenergetycznej, użyto linii prądu stałego. Największą zaletą takiego rozwiązania jest stosunkowo łatwa możliwość przyłączenia innych dodatkowych źródeł energii.



Rys. 9. Schemat blokowy elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym, generatorem dwustronnie zasilanym i bateryjnym zasobnikiem energii; MDZ – generator dwustronnie zasilany, ASY – generator asynchroniczny, Tr – transformator sieciowy, P – prostownik bateryjny, F – falownik, R – system sterowania i nadzoru, DZE – dodatkowe źródło energii, $W_{1,2}$ – wyłączniki, SEE – system elektroenergetyczny



Rys. 10. Uproszczony schemat farmy wiatrowej z linią prądu stałego; $TW_{1,2,\dots,n}$ – turboszpół wiatrowy, Tr – transformator sieciowy, P – prostownik, F – falownik, DZE – dodatkowe źródło energii, SEE – system elektroenergetyczny

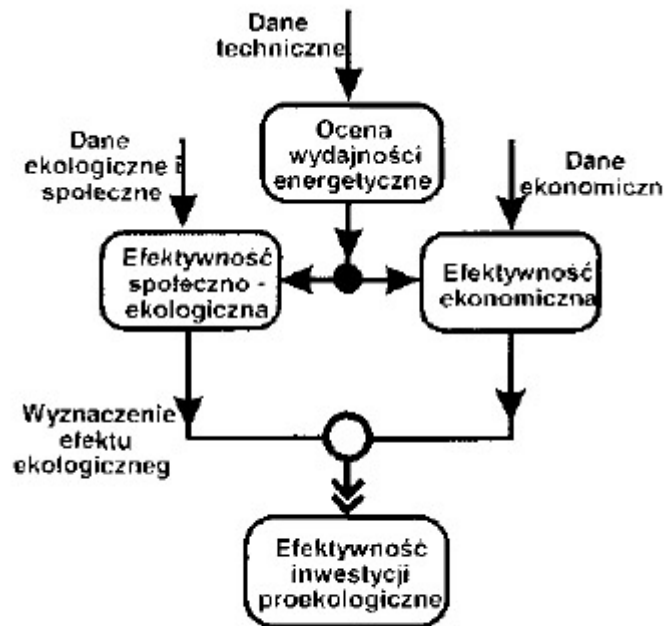
Przeprowadzone analizy działania układów elektrowni wiatrowych z różnego rodzaju generatorami pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Dowolna elektrownia wiatrowa oraz zasobnik energii mogą być dołączone do węzła systemu elektroenergetycznego. Zastosowanie zasobnika energii umożliwi poprawienie jakości energii" w węźle. Jednocześnie znacznemu zmniejszeniu ulegnie wartość gradientu zmian mocy.
2. Możliwość magazynowania energii w zasobniku spowoduje, że źródło hybrydowe stanie się źródłem zdecydowanie bardziej dyspozycyjnym.
3. Najprostszą wersją układu połączeń wiatrowej elektrowni hybrydowej jest układ z wolnoobrotowym generatorem synchronicznym oraz dwoma energoelektronicznymi zespołami przetwornic: AC/DC (prostownik) i DC/AC (falownik). W rozwiązaniu tym zasobnik energii w postaci baterii akumulatorów może być włączony do obwodu pośredniczącego, między przetwornice AC/DC i DC/AC, za pośrednictwem prostych regulatorów prądu stałego. Układy z generatorami synchronicznymi i maszyną dwustronnie zasilaną są w tym przypadku bardziej złożone, ponieważ są wymagane osobne prostowniki (człony AC/DC) i falowniki (człony DC/AC) tylko do obsługi baterii akumulatorów zasobnika.
4. Jeżeli zasobnik energii posiada oddzielne układy ładowania i przekazywania energii do sieci elektroenergetycznej (węzła przyłączenia) to może on brać udział w „uśrednianiu” energii doprowadzonej do węzła systemu, do którego dołączono elektrownię. Oznacza to, że w „dolinach energetycznych” energia może być magazynowana w zasobniku, natomiast w czasie szczytu obciążenia energia może być dodatkowo pobierana z zasobnika.
5. Układy zasobników energii elektrycznej mogą współpracować nie tylko z pojedynczymi elektrowniami, ale także z całą farmą wiatrową. Przez dołączenie zasobnika można poprawić: jakość energii" dostarczanej przez farmę, uczynić ją bardziej dyspozycyjną oraz zapewnić zasilanie odbiorników dołączonych do wspólnego węzła przy braku energii w systemie i braku energii wiatru. Takie rozwiązanie jest możliwe nie tylko dla farmy, ale także dla pojedynczej elektrowni współpracującej z zasobnikiem.

4. OCENA EFEKTYWNOŚCI HYBRYDOWYCH SYSTEMÓW WYTWÓRCZYCH

Obecne czasy zmuszają potencjalnych inwestorów do przeprowadzenia szeregu analiz, na podstawie których szacuje się opłacalność danej inwestycji (w tym przypadku opłacalność budowy systemu hybrydowego) i jej wpływ na środowisko naturalne.

W wysokorozwiniętych krajach zachodnich wprowadzono bardzo szeroki zakres oceny oddziaływania przedsięwzięć inwestycyjnych na środowisko. Są to oceny o charakterze interdyscyplinarnym. Uwzględnia się w tej ocenie w równym stopniu aspekty mierzalne, jak też i niewymierne. Zmierzają do ocen zintegrowanych, obejmujących ocenę społeczną, techniczną, środowiskową, czy analizę ryzyka, przy wykorzystaniu wielu metod i technik analizy [15, 20].



Rys. 11. Schemat metodyki oceny efektywności pozyskiwania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych

Przyjmując za cel zastosowania metody kompleksową ocenę ogólnogospodarczej, długookresowej efektywności inwestycji w źródła wytwórcze można tę metodę przedstawić jak na rys. 11.

Dokonując oceny technicznej należy wyznaczyć roczną wydajność energetyczną systemu hybrydowego. Jest to niezbędne do dalszej oceny ekonomicznej, gdyż na tej podstawie można oszacować wielkość przychodów ze sprzedaży. Jest to również konieczne dla wyznaczenia efektywności społeczno-ekologicznej, ponieważ od wielkości produkcji zależą korzyści ekologiczne.

Szacując efektywność ekonomiczną możemy się posłużyć metodami statycznymi, takimi jak: okres zwrotu (*Payback Period*), księgową stopą zwrotu (*Accounting Rate of Return*) oraz metodami dynamicznymi, do których należą: metoda wartości zaktualizowanej netto (NPV - *Net Present Value*), wewnętrzna stopa zwrotu (IRR - *Internal Rate of Return*), wskaźnik zyskowności (PI - *Profitability Index*) [18]

Miary statyczne są łatwe do zastosowania, jednak nie uwzględniają zmiany wartości pieniądza w czasie. Służą zwłaszcza do wstępnej selekcji projektów inwestycyjnych i są stosowane głównie na etapie studiów przedrealizacyjnych. Miary dynamiczne są najbardziej precyzyjnym narzędziem oceny opłacalności ekonomicznej przedsięwzięć uwzględniającym rozłożenie w czasie przewidywanych wpływów i wydatków związanych z inwestycją. Jednak metody te (statyczne i dynamiczne) nie uwzględniają efektu ekologicznego, który należy brać pod uwagę w ocenie efektywności inwestycji proekologicznych.

Dla tego typu inwestycji warto zastosować metodę dynamicznego kosztu jednostkowego (DGC - *dynamie generation cost*). Wskaźnik DGC jest wyrażony w złotych na jednostkę efektu energetycznego [15]:

$$DGC = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{KI_t + KE_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{EE_t}{(1+i)^t}} \quad (1)$$

gdzie: KI_t - nakłady inwestycyjne poniesione w danym roku, KE_t - koszty eksploatacyjne poniesione w danym roku, i - stopa dyskonta, EE_t - efekt energetyczny w danym roku.

Oceny efektywności społeczno-ekologicznej można dokonać wyznaczając efekt ekologiczny. Przez efekt ekologiczny należy rozumieć korzyści powstałe w środowisku w związku z zastąpieniem energii pochodzącej z węgla energią ze źródeł odnawialnych.

W procedurze wyznaczania efektu ekologicznego przyjęto następujące założenia [21]:

- do głównych czynników szkodliwych powstających w procesach wytwarzania energii zaliczono: CO_2 , SO_2 , NO_x ; związki te emitowane do atmosfery wywierają największy wpływ na środowisko i generują wysokie straty ekologiczne,
- efekt ekologiczny wykorzystania energii odnawialnej jest odnoszony do energii z węgla, tj. energii elektrycznej i ciepła, tym samym wymiar strat ekologicznych spowodowany zużyciem węgla staje się podstawą wyceny efektu ekologicznego w przypadku zastąpienia energii z węgla energią odnawialną,
- efekt ekologiczny obejmuje tę część szkód ekologicznych, które są spowodowane przez energetykę,
- szkody ekologiczne wywołane wytwarzaniem energii z węgla utożsamia się z kosztami zewnętrznymi obciążającymi jednostkę wytwarzanej energii, wyrażonymi w zł/(kW-h) lub zł/GJ.

Wytwarzanie energii z zasobów odnawialnych jest również związane z pewnym ujemnym wpływem na środowisko, a zatem efekt ekologiczny powinien być skorygowany o wielkości tych kosztów. Efekt ten można przedstawić następująco [21]:

$$EO_i = KZW - KZO_i \quad (2)$$

gdzie: EO_i - efekt ekologiczny z tytułu wykorzystania energii odnawialnej z i-tego źródła odnawialnego, KZW - koszt zewnętrzny obciążający energię wytworzoną z węgla, KZO_i - koszt zewnętrzny obciążający energię wytworzoną z i-tego źródła odnawialnego.

Niezwykle trudną do oszacowania jest wielkość kosztu zewnętrznego, zarówno obciążającego energię wytworzoną z węgla, jak i z i-tego źródła odnawialnego, gdyż należy tu uwzględnić nie tylko straty wymierne ale również te niewymierne. Można tego dokonać przy pomocy metody macierzowej, gdzie dobiera się odpowiednie współczynniki ważności. Wszystkie

elementy macierzy zarówno wymierne jak i niewymierne są wyrażone według jednolitej skali punktowej, a więc w aspekcie rangowym są porównywalne. Dzięki temu wartość strat wymiernych pozwala określić wartość strat niewymiernych [15].

5. WNIOSKI

Obserwując szybki rozwój energetyki rozproszonej można stwierdzić, że systemy elektroenergetyczne będą ewoluowały do postaci, w której do minimum skracane będą drogi przesyłu energii elektrycznej (i/lub ciepła). Eliminowane będą zbędne przemiany energetyczne oraz zagospodarowywane będą wszelkie dostępne formy energii (np. źródła odnawialne, energia odpadowa itp.). Budowa hybrydowych systemów wytwórczych o średniej i małej mocy, bazujących na odnawialnych źródłach energii pierwotnej, które będą zlokalizowane blisko odbiorców, pozwoli uniknąć części kosztów przesyłu i dystrybucji. Niebagatelne znaczenie ma rola tego typu układów w zakresie ochrony środowiska, gdyż wiele z tych źródeł nie emituje żadnych zanieczyszczeń do atmosfery.

Hybrydowe systemy wytwórcze stwarzają także możliwości produkcji ciepła, zarówno w postaci wytwarzania rozdzielonego, jak też skojarzonego. Możliwości takie istnieją w przypadku zastosowania w HSW takich technologii jak: silniki tłokowe (spalinowe lub parowe), silniki Stirlinga, małe turbiny gazowe i mikroturbiny, ogniwa paliwowe (średnio- i wysokotemperaturowe), elektrownie słoneczne heliologiczne, wykorzystanie biomasy i biogazu, wykorzystanie ciepła geotermalnego.

LITERATURA

- [1] Biczek P.: Optymalne wykorzystanie pierwotnych nośników energii na przykładzie hybrydowej elektrowni słonecznej z ogniwami paliwowymi. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska - Wydział Elektryczny. Warszawa 2003.
- [2] Biczek P., Paska J.: Hybrydowa elektrownia słoneczna z ogniwem paliwowym jako przykład optymalnego wykorzystania w energetyce rozproszonej pierwotnych nośników energii. Elektroenergetyka - Technika, Ekonomia, Organizacja 2003, nr 4.
- [3] Biczek P., Kłos M., Paska J.: Hybrydowe systemy wytwarzania energii elektrycznej z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii i ogniw paliwowych. VII Międzynarodowa Konferencja N-T „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”. Elektrownia „Kozienice” S.A., 10-12 marca 2004.
- [4] Handbook of Hybrid Power Systems - Distance Learning Tool. HYPOS-DILETR Project, 2005.
- [5] Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system. Working Group 37.23. CIGRE. Paris, February 1999.
- [6] Kłos M.: Aspekty techniczne i ekonomiczne magazynowania energii elektrycznej na przykładzie elektrowni wiatrowej. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska - Wydział Elektryczny. Warszawa 2006.
- [7] Paska J.: Technologie generacji rozproszonej. Elektroenergetyka - Technika, Ekonomia, Organizacja 2002, nr 4.
- [8] Paska J.: Możliwości wykorzystania ogniw paliwowych w generacji rozproszonej. Rynek Energii 2002, nr6.
- [9] Paska J.: Techniczne i ekonomiczne aspekty generacji rozproszonej. VI Międzynarodowa Konferencja N-T „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”. Elektrownia „Kozienice” S.A., 12-14 marca 2003.
- [10] Paska J.: Wytwarzanie energii elektrycznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki

Warszawskiej. Warszawa 2005.

[11] Paska J.: Renewable Energy Sources, Distributed Generation and Hybrid Power Systems in Works of WUT Institute of Electrical Power Engineering. 8th' International Symposium "Höfler's Days". Portoroz-Slowenia, 6-8 November, 2005.

[12] Paska J., Biczel P.: Hybrid Photovoltaic - Fuel Celi Power Plant. IEEE St. Petersburg PowerTech'2005. St. Petersburg, Russia. June 27-30, 2005.

[13] Paska J., Kłos M.: Hybrydowe systemy wytwórcze energii elektrycznej. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce - APE'05". Gdańsk-Jurata, 8-10 czerwca 2005.

[14] Paska J., Biczel P., Kłos M.: Experience with Hybrid Power Generating Systems. 8th International Conference „Electrical Power Quality and Utilization - EPQU'05". (under auspices of IEEE, KE PAN, SEP) Cracow-Poland, September 21-23, 2005.

[15] Paska J., Dzik R., Kłos M., Sałek M.: Hybrydowe układy wytwórcze energii elektrycznej - zintegrowane podejście techniczno-ekonomiczno-ekologiczne. VIII Międzynarodowa Konferencja N-T „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce". Elektrownia „Kozienice" S.A., 2-4 marca 2005.

[16] Paska J., Sałek M., Surma T.: Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła. Elektrotechniczne 2005, nr 12.

[17] Paska J., Surma T., Sałek M.: Generacja rozproszona a lokalne rynki energii elektrycznej. Rynek Energii 2004, nr 3.

[18] Pazio W.: Analiza finansowa i ocena efektywności projektów inwestycyjnych przedsiębiorstw. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2002.

[19] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 grudnia 2005 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej oraz zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii. Dz. U. Nr 261, poz. 2187.

[20] Reński A., Słomiński D.: Tendencje rozwojowe małych układów skojarzonych w Polsce i na Świecie. Rynek Energii 2005, nr 5.

[21] Solińska M., Soliński I: Efektywność ekonomiczna proekologicznych inwestycji rozwojowych w energetyce odnawialnej. Wydawnictwo AGH, Kraków 2003.

GENERATING OF ELECTRICITY AND HEAT IN HYBRID POWER SYSTEMS

Key words: generation of electricity and heat, hybrid power generating systems, renewable energy sources

Summary. In this paper main features of hybrid power systems, exemplary solutions of hybrid power systems: hybrid solar-wind power plant; hybrid solar power plant with fuel celi; and hybrid wind power plant with energy storage; are discussed. These last solutions enable optimal utilization of primary energy of wind and Sun. Also the basis of integrated methodology for efficiency assessment of hybrid power systems is presented.