

Janusz MIĘKUS\*, Robert PAPROCKI\*

## Przegląd aktualnego stanu rozwoju rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej na świecie\*\*

SŁOWA KLUCZOWE: źródła rozproszone: silniki tłokowe, turbiny gazowe, ogniwa paliwowe, układy fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe

### Wprowadzenie

Splot różnego rodzaju uwarunkowań (technicznych, ekonomicznych, środowiskowych i politycznych) funkcjonowania sektorów elektroenergetycznych na świecie spowodował, że ostatnio w obszarze wytwarzania energii elektrycznej największy rozwój dotyczy tak zwanych źródeł rozproszonych.

Za źródła rozproszone uważa się małe (od dziesiątek kW do 50—100 MW), modułarne technologie wytwórcze przyłączone z reguły do sieci dystrybucyjnych celem dostarczania energii elektrycznej pobliskim odbiorcom i poprawiania niezawodności oraz jakości tej dostawy, a przez to odsuwania na przyszłość inwestycji w sieci przesyłowe i dystrybucyjne. Powyższa definicja nie jest wyczerpująca, gdyż pojęcie wytwarzania rozproszonego rozumiane jest różnie w różnych krajach. Na przykład w Niemczech identyfikuje się ją z dotychczasowym pojęciem producentów niezależnych (IPP), co sprawia, że zakres mocy źródeł rozszerza się do rzędu 300 MW. Według

---

\* Mgr inż. — PSE International Sp. z o.o., Warszawa.

\*\* Praca była publikowana w Materiałach XIII Konferencji z cyklu „Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej” pt.: Funkcjonowanie kompleksu paliwowo-energetycznego w świetle Prawa Energetycznego oraz nowych przepisów ochrony środowiska.

Recenzował doc. dr hab. inż. Eugeniusz MOKRZYCKI

CIGRE cechą tych źródeł jest ponadto niepodleganie procedurom centralnego planowania i sterowania. Z kolei według EPRI wytwarzanie rozproszone to jeden z elementów szerszego pojęcia zasobów rozproszonych, do którego oprócz technologii wytwórczych zalicza się technologie magazynowania energii elektrycznej, jej dystrybucji i przedsięwzięcia wpływające na popyt odbiorców (Malko, Pupka 1999; Malko i in. 1999).

Z powyższego widać, że pojęcie źródeł rozproszonych nie jest całkiem nowe, gdyż można do nich zaliczyć liczne źródła energii elektrycznej pracujące od wielu lat. Przykładowo w Polsce do tej kategorii źródeł zaliczyć można pracujące od zarania polskiego systemu elektroenergetycznego elektrociepłownie przemysłowe czy też obiekty tak zwanej małej energetyki wodnej. Wydaje się jednak, że dopiero rozwój małych źródeł opalanych gazem ziemnym związany z opanowaniem technologii z zakresu turbin gazowych spowodował, że wprowadzono pojęcie wytwarzania rozproszonego i zwrócono większą uwagę na tę opcję pokrycia zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną (Denny 1999).

O dynamicznym, w ostatnich latach, rozwoju źródeł rozproszonych, który przez niektórych porównywany jest już do rewolucji informatycznej polegającej na zastąpieniu przez komputery osobiste wielkich scentralizowanych systemów opartych na komputerach typu „mainframe”, zdecydowały następujące okoliczności:

- ◆ postęp w zakresie energooszczędnych technologii użytkowania energii zmniejszający zapotrzebowanie na budowę systemowych źródeł energii elektrycznej o znacznych wartościach mocy zainstalowanej;
- ◆ nowe generacje dojrzałych technologicznie źródeł średniej i małej mocy dzięki zaletom inwestycyjnym (krótki czas budowy i mniejsze ryzyko inwestycyjne) i eksploatacyjnym (wysoka sprawność i mniejsze koszty przy pracy w skojarzeniu) okazały się rozwiązaniami konkurencyjnymi rynkowo;
- ◆ dążenie do zrównoważonego rozwoju (również w zakresie energetyki) zwiększyło atrakcyjność lokalnych, zwłaszcza odnawialnych, zasobów energetycznych, co znalazło odzwierciedlenie w odpowiednich dyrektywach Unii Europejskiej (np. Biała Księga Komisji Europejskiej z grudnia 1997: „Energia dla przyszłości — odnawialne źródła energii”), a także rozporządzeniach polskiego Prawa Energetycznego, które przewidują możliwość promowania rozwoju tych źródeł, jednocześnie wśród społeczeństw krajów rozwiniętych rośnie zapotrzebowanie na tak zwaną „zieloną energię” ze źródeł odnawialnych;
- ◆ procesy demonopolizacji i prywatyzacji w sektorze elektroenergetyki spowodowały zainteresowanie inwestorów budową źródeł o średniej i małej mocy, zlokalizowanych blisko odbiorców, co pozwala uniknąć części kosztów przesyłu i dystrybucji;
- ◆ problemy z akceptacją wielkich inwestycji energetycznych przez społeczności lokalne skłaniają do budowy obiektów o mniejszej skali, nie wymagających rozległej infrastruktury technicznej (zwłaszcza sieciowej), dla których łatwiej jest znaleźć lokalizacje;
- ◆ w przypadku skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej małe źródła nie wymagają budowy dużych scentralizowanych sieci ciepłowniczych.

Rozważając rozwój wytwarzania rozproszonego nie należy jednak postrzegać go jako konkurencji dla istniejących dużych elektrowni systemowych, które długo jeszcze stanowią będą podstawowe źródło energii elektrycznej. Podobnie w krajach, w których występuje duży przyrost zapotrzebowania na energię elektryczną trudno oczekiwać, aby wytwarzanie rozproszone wygrało

konkurencję z dużymi źródłami systemowymi. Przyszłość źródeł rozproszonych leży więc w zagospodarowaniu pewnych specyficznych nisz rynku energii elektrycznej, takich jak pokrywanie obciążeń szczytowych przez turbiny gazowe zlokalizowane wewnątrz sieci dystrybucyjnej, źródła rezerwowe gwarantujące bezprzerwowe zasilanie czy też skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła przy małym zapotrzebowaniu na to ostatnie.

Także w Polsce nowe uregulowania prawne dotyczące sektora elektroenergetyki oraz jego zobowiązania w zakresie ochrony środowiska powodują, że w najbliższych latach można spodziewać się rozwoju niektórych z rodzajów źródeł rozproszonych. Występujące w kraju uwarunkowania (warunki naturalne, postęp technologiczny, ograniczenia ekologiczne) sprawiają, że w szczególności, poza obecną już małą energetyką wodną, można oczekiwać powstawania źródeł skojarzonych opartych głównie na turbinach gazowych o mocy od dziesiątek kW do dziesiątek MW. O szybkości rozwoju źródeł rozproszonych w Polsce zadecyduje z pewnością ich ekonomiczna konkurencyjność, która w przypadku źródeł opalanych gazem ziemnym zależy głównie od składowej paliwowej kosztów (Rastler 1999).

W dalszej części artykułu przedstawiono obecny stan rozwoju najważniejszych z rodzajów źródeł rozproszonych, po czym pokrótce omówiono problemy, jakie mogą się pojawić w przypadku szybkiego rozwoju tej kategorii źródeł w systemie.

## 1. Technologie rozproszonego wytwarzania

Do technologii wytwórczych wykorzystywanych w źródłach rozproszonych zalicza się:

- ◆ silniki tłokowe,
- ◆ turbiny gazowe,
- ◆ układy skojarzonego wytwarzania oparte na turbinach gazowych i silnikach tłokowych,
- ◆ ogniwa paliwowe,
- ◆ układy fotowoltaiczne,
- ◆ turbiny wiatrowe,
- ◆ technologie geotermalne,
- ◆ małe elektrownie wodne,
- ◆ technologie wykorzystujące biomasę oraz odpady,
- ◆ technologie wykorzystujące pływy i falowanie mórz.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry kilku najbardziej obiecujących technologii rozproszonego wytwarzania w porównaniu do tradycyjnych źródeł systemowych w warunkach amerykańskich (Rastler 1999).

### 1.1. Silniki tłokowe

Silniki tłokowe są najbardziej dojrzałym rodzajem źródeł rozproszonych. Ze względu na swoje małe moce, modularność, niskie koszty kapitałowe i krótkie czasy budowy nadają się do małych systemów elektroenergetycznych. Charakteryzują się szybkim rozruchem, nadążaniem za obciążeniem, nie najgorszą sprawnością przy częściowym obciążeniu oraz zwykle dużą nie-

TABELA 1. Podstawowe parametry niektórych technologii wytwarzania energii elektrycznej (Rastler 1999)

Technologia	Moc bloku [kW]	Sprawność [%]	Nakłady inwestycyjne [USD/kW]	Koszty eksploatacji i remontów [USc/kW·h]
Konwencjonalne elektrownie węglowe	300 000—400 000	36—39	900—1300	0,9—1,2
Elektrownie gazowe z cyklem kombinowanym	400 000	55—60	650—900	0,6—0,9
Turbiny gazowe	1 000—50 000	28—42*	350—450	0,4—4,0
Silniki tłokowe	500—5 000	35—50*	600—1100	1,0—6,0
Mikroturbiny gazowe	25—300	20—40*	750, 450*	0,3—1,0*
Ogniwa paliwowe	5—3 000	40—70*	3 000, 500*	0,5—1,0*
Elektrownie wiatrowe	700—5 000	—	1 500, 1 000*	1,0—1,5
Ogniwa słoneczne	1—100	—	6 500, 1 500*	0,5*—2,0

\* Wartość docelowa.

zawodnością. Mogą być one wykorzystywane jako źródła rezerwowe (szeroko stosowane w kraju) lub szczytowe, ale także przeznaczone do pracy podszczytowej i podstawowej oraz w układach skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Modularne jednostki do 5 MW montowane na przejezdnych podwoziach mogą być przemieszczane sezonowo pomiędzy stacjami elektroenergetycznymi posiadającymi odpowiednie przyłącza w zależności od potrzeb na moc szczytową. W przeciwieństwie do większości technologii wytwarzania energii elektrycznej, silniki tłokowe charakteryzują się negatywnym efektem skali. Do wad silników tłokowych należą emitowane do atmosfery zanieczyszczenia oraz hałas.

W zależności od zastosowanej techniki zapłonu różni się silniki z zapłonem samoczynnym oraz silniki z zapłonem iskrowym. Historycznie rzecz biorąc najpopularniejszym rodzajem silników tłokowych używanych do produkcji energii elektrycznej były i są, należące do tych pierwszych, silniki z cyklem Diesla spalające ropę, znane pod nazwą silników Diesla. Największe jednostki tego typu (5—65 MW) są używane głównie do napędu statków. Pomimo że do produkcji energii elektrycznej używa się także jednostki o mocy 10—50 MW, to z reguły do tego celu stosuje się układy o mniejszych mocach. Chociaż silniki Diesla emitują duże ilości zanieczyszczeń do atmosfery, to z reguły ich rezerwowa rola, a stąd krótkie czasy pracy, umożliwiają ich zastosowanie. Istnieją silniki z zapłonem samoczynnym pracujące na dwóch paliwach: gazie ziemnym i ropie naftowej, przy czym wykorzystanie tego pierwszego jako głównego paliwa znacznie obniża emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Większość istniejących silników Diesla można przystosować do pracy na podwójnym paliwie, co umożliwia zmianę charakteru pracy ze szczytowego na podszczytowy, a nawet podstawowy. Zwiększone wymagania co do ochrony środowiska spowodowały w ostatnich dwóch dekadach rozwój silników z zapłonem iskrowym opalanych gazem ziemnym. Obecnie dostępne są niskoemisyjne silniki tego typu o mocach do 6 MW. W porównaniu do silników z zapłonem samoczynnym pracują one przy niższych stopniach sprężania, co pozwala na uniknięcie samozapłonu. W związku z tym i w wyniku zasysania paliwa gazowego silniki te mają moc rzędu 60—80% w porównaniu do swoich odpowiedników dieslowskich, co

sprawia, że wymagają większych nakładów inwestycyjnych. Jednocześnie praca przy niższych ciśnieniach w cylindrach i przy mniejszych obciążeniach łożysk oraz spalanie gazu zamiast ropy sprawiają, że silniki z zapłonem iskrowym mają dłuższe czasy eksploatacji w porównaniu do silników Diesla. Silniki tłokowe dzielą się ponadto, w zależności od zastosowanego cyklu pracy, na dwusuwowe i czterosuwowe oraz w zależności od prędkości wału korbowego na wysoko- (1200—3600 obr/min), średnio- (275—1000 obr/min) i niskoobrotowe (58—275 obr/min).

## 1.2. Turbiny gazowe

Turbiny gazowe uważane są za drugie po silnikach tłokowych źródła rozproszone jeżeli chodzi o techniczną dojrzałość. W nowoczesnych wersjach tych urządzeń zademonstrowano wysokie parametry niezawodności i dyspozycyjności przewyższając w ten sposób problemy, na które napotkano w pierwszych wersjach. Turbiny gazowe mogą pracować jako źródła rezerwowe w przypadkach, gdy wymagana moc przekracza praktyczne granice możliwości silników tłokowych. Moce turbin gazowych zawierają się w przedziale od 750 do 27 MW. Mogą one być opalane gazem ziemnym, olejem lub pracować w układzie dwupaliwowym. Wyróżnia się dwa rodzaje turbin gazowych:

- ◆ tzw. heavy frame (ze względu na masywne obudowy i wirniki) — przemysłowe, obecnie dominujący rodzaj turbin konstruowanych z myślą o niskim koszcie, wysokiej niezawodności i łatwości w eksploatacji,
- ◆ tzw. aeroderivative, czyli turbiny zaadaptowane z silników lotniczych, o lżejszej konstrukcji i większym stopniu sprężania, co skutkuje większą sprawnością i niższą temperaturą spalin wylotowych.

Turbiny gazowe charakteryzują się umiarkowanymi nakładami inwestycyjnymi, elastycznością jeżeli chodzi o paliwo, krótkimi czasami budowy, małą zajętością terenu, szybkim rozruchem, wysoką niezawodnością i niewielkimi emisjami zanieczyszczeń do atmosfery. Do ich wad należą duże jednostkowe zużycie ciepła, w szczególności przy częściowym obciążeniu, i szybkie zmiany osiąągów przy zmianie temperatury otoczenia. Ponadto, w przypadku poważniejszych uszkodzeń okres naprawy może trwać do dwóch tygodni. W przypadku turbin aeroderivative niższa temperatura spalin wylotowych sprawia, że układy kombinowane budowane w oparciu o te turbiny osiąągają mniejsze sprawności.

Zaawansowane turbiny gazowe pracują w trzech podstawowych konfiguracjach: z obiegiem rekuperacyjnym ciepła (dzięki któremu sprężone powietrze podawane do komory spalania jest ogrzewane przez ciepło spalin wylotowych), ze sprężaniem z chłodzeniem międzystopniowym oraz kombinacją tych dwóch układów. Obecne prace nad postępowaniem w zakresie turbin gazowych dotyczą głównie pierwszej i trzeciej konfiguracji. Większość prac rozwojowych w zakresie źródeł rozproszonych dotyczy turbin typu aeroderivative, gdyż rozwój turbin przemysłowych skupiony jest głównie na dużych jednostkach, które wykraczają poza skalę źródeł rozproszonych. Dotyczą one rekuperacyjnego obiegu ciepła oraz ulepszeń materiałowych.

Kilka firm amerykańskich, europejskich i japońskich prowadzi prace nad rozwojem nowego rodzaju turbin gazowych o mocach do 500 kW — tak zwanych mikroturbin. W przeciwieństwie do „małych” turbin gazowych o mocy większej od 1 MW mikroturbiny charakteryzują się zinte-

growanym układem sprężarka-turbina-alternator, pracą przy dużo większych prędkościach wału i mniejszym stopniem sprężania. Z reguły mają one 30-procentową sprawność, którą uzyskuje się dzięki znacznemu odzyskowi ciepła. Prototypowe urządzenia okazują się mieć niski poziom hałasu w porównaniu do konwencjonalnych silników tłokowych, stanowiących alternatywę dla mikroturebin. Po pomyślnym rozwiązaniu zagadnień związanych z niezawodnością i ekonomiką mikroturebiny mogą znaleźć szerokie zastosowanie w obszarze rozproszonego wytwarzania.

### **1.3. Układy skojarzonego wytwarzania oparte na turbinach gazowych i silnikach tłokowych**

Turbiny gazowe i silniki tłokowe stanowią również podstawę dla układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej. Duże turbiny gazowe typu heavy frame charakteryzują się wyższą temperaturą spalin wylotowych w porównaniu do turbin typu aeroderivative, wobec czego nadają się bardziej do zastosowań w cyklach kombinowanych o dużej mocy wymagających pary o wysokiej jakości. Z kolei turbiny typu aeroderivative mają wyższy stosunek mocy elektrycznej do ciepłej, przez co zalecane są do zastosowań, w których należy maksymalizować wytwarzanie energii elektrycznej przy ograniczeniach poboru ciepła. W przypadku układów skojarzonych opartych na silnikach tłokowych ich charakter zależy od rodzaju silnika, jego wielkości i prędkości, paliwa, wymaganej formy energii ciepłej (para, ciepła woda) oraz rodzaju układu odzyskiwania ciepła. Stosunek mocy elektrycznej do użytecznej mocy ciepłej jest większy (zwykle dwa razy) dla silników Diesla w porównaniu do silników z zapłonem iskrowym.

Jeżeli chodzi o wybór pomiędzy turbiną gazową a silnikiem tłokowym, to dla zastosowań o mniejszej mocy elektrycznej (do 5 MW) te ostatnie wydają się bardziej atrakcyjne (aczkolwiek szybki w ostatnich latach rozwój mikroturebin sprawił, że jednoczesna produkcja energii elektrycznej i ciepłej w oparciu o nie jest coraz bardziej opłacalna), podczas gdy dla mocy powyżej 15 MW turbiny gazowe stają się zdecydowanie atrakcyjniejsze. Z punktu widzenia wymaganych parametrów pary turbiny gazowe są preferowane w przypadku zapotrzebowania na parę o wysokim ciśnieniu, silniki tłokowe natomiast w przypadku zapotrzebowania na parę o niskim ciśnieniu lub gorącą wodę. W porównaniu do turbin gazowych silniki tłokowe mają lepsze osiągi pracy przy mniejszym obciążeniu, co ma znaczenie przy zmiennym zapotrzebowaniu na energię ciepłą.

W przypadku prostego układu skojarzonego wytwarzania opartego na turbinie gazowej ciepło spalin wylotowych z turbiny gazowej jest odzyskiwane w kotle odzysknicowym (wytwornicy pary). Ilość i jakość (temperatura i ciśnienie) pary wytwarzanej w kotle odzysknicowym są ograniczone ilością i temperaturą spalin. Istnieją konstrukcje kotłów odzysknicowych umożliwiające wytwarzanie pary o różnych ciśnieniach. Ponieważ spaliny wylotowe z turbiny mają zawartość tlenu na poziomie od 13 do 16%, możliwe jest również dopalanie w kotle odzysknicowym celem polepszenia parametrów (ilości) wytwarzanej pary. Układ, w którym para z kotła odzysknicowego wykorzystywana jest do napędzania turbiny parowej nazywany jest układem kombinowanym. Możliwe jest stosowanie w tych układach turbin parowych kondensacyjnych, upustowych lub przeciwpięrnych. Potrzebne ciepło może w takich układach być pozyskiwane ze spalin wylotowych z turbiny gazowej, pary wytworzonej w kotle, pary z upustów turbiny parowej, czy też

kondensatu turbiny przeciwprężnej (w zależności od wymaganych parametrów cieplnych). Podobnie jak w układzie prostym, możliwe jest dopalanie w kotle odzysknicowym, jednakże zmniejsza ono całkowitą sprawność cyklu.

Silniki tłokowe, w przeciwieństwie do turbin gazowych, nie pozbywają się wszystkiego ciepła przez spaliny wylotowe: reszta ciepła przekazywana jest wodzie chłodzącej płaszcz silnika oraz układ olejowy. W wyniku tego tylko połowa lub nawet mniej ciepła dostępna jest przy wysokiej temperaturze. Dlatego też układy skojarzone oparte na silnikach tłokowych znajdują zastosowanie tam, gdzie potrzebne są mniejsze moce cieplne. Chociaż mają one ograniczone możliwości jeżeli chodzi o wytwarzanie pary, charakteryzują się większą całkowitą sprawnością (typowo 75—85%) w porównaniu do układów opartych na turbinie gazowej (typowo 65—75%). Ograniczenia w mocy cieplnej powodują także, że mają one znacznie większy współczynnik mocy elektrycznej do cieplnej.

## 1.4. Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe to ciągle rozwijająca się technologia wytwarzania energii elektrycznej szczególnie ukierunkowana na wytwarzanie rozproszone. W ogniwach paliwowych dokonuje się elektrochemiczna przemiana paliwa gazowego (jak wodór czy gaz ziemny) i tlenu w energię elektryczną. Pojedyncze ogniwo wytwarza napięcie jedynie rzędu 0,5—0,9 V. Dlatego też z reguły ogniwo paliwowe składa się z wielu małych ogniw połączonych ze sobą szeregowo celem osiągnięcia żadanego poziomu napięcia.

Ogniwa paliwowe poprzez to, że pozyskują energię elektryczną bezpośrednio z paliw gazowych osiągają duże sprawności nawet w przypadku małych jednostek rzędu kilkuset kilowatów. Są one z reguły bezemisyjne, gdyż energia elektryczna produkowana jest w nich bez procesu spalania. Charakteryzują się także cichą pracą oraz dużą niezawodnością, gdyż nie mają ruchomych elementów.

Ogniwa paliwowe dzieli się w zależności od zastosowanego w nich elektrolitu. I tak ogniwa z elektrolitem w postaci kwasu fosforowego (PAFC), które stanowiły pierwszą generację ogniw paliwowych, są już w stadium początkowej komercjalizacji. Ogniwa paliwowe z elektrolitem w postaci stopionego węglanu (MCFC) oraz te z elektrolitem w postaci ceramicznych tlenków (SOFC), które reprezentują odpowiednio drugą i trzecią generację, doczekają się z pewnością swej komercjalizacji w ciągu najbliższych kilku lat. W niedalekiej przyszłości spodziewana jest także komercjalizacja ogniw z elektrolitem w postaci polimeru (PEM), które rozwijane są głównie z myślą o zastosowaniach w transporcie, ale które mogą znaleźć zastosowanie także do produkcji energii elektrycznej.

Ogniwa PEM i PAFC pracują przy niskich temperaturach (odpowiednio 80—105°C i 175—230°C), w których paliwo musi najpierw zostać zamienione na wodór, a ciepło odpadowe ma słabe parametry. Ogniwa MCFC i SOFC, pracujące przy wysokich temperaturach (odpowiednio 650—700°C oraz 760—980°C), pozwalają na bezpośrednie stosowanie paliw węglowodorowych, a ciepło odpadowe ma dobre parametry, przez co są one prostsze w budowie i mają wyższą sprawność. Jednakże wysokie temperatury ich pracy stanowią wyzwanie, szczególnie w zakresie używanych w nich materiałów.

Poza temperaturą pracy na koszty i eksploatację ogniw paliwowych ma wpływ stan skupienia elektrolitu: ciekły w przypadku PAFC i MCFC oraz stały w przypadku SOFC i PEM. Elektrolity ciekłe wykazują zwykle większą przewodność jonową, przez co mają mniejsze rezystancje. Mogą one stanowić skuteczną barierę pomiędzy paliwem a gazami utleniającymi oraz z łatwością kompensować naprężenia cieplne. Jednocześnie jednak charakteryzują się one korozyjnością, co skracca okres eksploatacji ogniwa i zwiększa koszty jego remontów. Ponadto, są one podatne na przecieki i odparowania, a ich płynny charakter ogranicza rozmiary ogniwa i geometryczne ułożenie stosu.

## 1.5. Ogniwa fotowoltaiczne

Elektrownie słoneczne przetwarzają energię słoneczną w elektryczną z wykorzystaniem materiału półprzewodnikowego, w którym indukowany jest prąd stały. Chociaż efekt fotowoltaiczny znany był już od 1939 roku, to jego praktyczne zastosowania datują się od lat siedemdziesiątych, kiedy to ogniwa fotowoltaiczne wykorzystano w amerykańskim programie badań kosmosu. Elektrownie słoneczne składają się z pojedynczych ogniw fotowoltaicznych tworzących moduły połączone elektrycznie i mechanicznie. Moduły te mogą być statyczne bądź ruchome i wówczas ustawiać się pod najlepszym kątem nasłonecznienia. Z prądu stałego za pomocą falowników otrzymuje się prąd zmienny.

Dwa podstawowe rozwiązania stosowane w elektrowniach słonecznych to: układ stałych, płaskich płyt i układ z koncentratorem. W pierwszym przypadku, który dominuje w obecnych zastosowaniach, w miarę tanie ogniwa słoneczne ustawione są na stałe w średnim kierunku padania promieni słonecznych. W układach z koncentratorem ogniwa fotowoltaiczne są bardziej zaawansowane, a zbudowane z nich moduły mogą nadążać za najlepszym kątem padania promieni słonecznych.

Największymi zaletami ogniw słonecznych jest brak potrzeby dostarczania paliwa oraz brak emisji zanieczyszczeń, do najważniejszych zaś wad należy zaliczyć: wysokie koszty produkcji ogniw, duże wymagania jeśli chodzi o teren oraz zmienną dyspozycyjność zależną od nasłonecznienia.

## 1.6. Elektrownie wiatrowe

W elektrowniach wiatrowych łopatki turbiny wiatrowej wykorzystując energię wiatru napędzają wirnik generatora. W ciągu ostatnich dziesięciu lat technologia turbin wiatrowych wkroczyła z fazy demonstracyjnej w etap komercyjnych zastosowań. Rozwiązano wiele problemów niezawodnościowych, jakie napotkano na początku rozwoju tej technologii. Pojedyncze turbiny wiatrowe mogą być łączone w mniejsze lub większe grupy, zwane farmami wiatrowymi.

Dwa podstawowe rodzaje turbin wiatrowych różnią się położeniem osi wirowania wału wirnika i obejmują turbiny z osią poziomą i turbiny z osią pionową. Obecnie faworyzowane w komercyjnych zastosowaniach turbiny z osią poziomą mają trochę większą sprawność i mogą być instalowane na wyższych wysokościach (licząc od powierzchni ziemi), a przez to pozyskiwać

więcej energii wiatru o większej prędkości. Turbiny z osią pionową mają niższe koszty łopatek oraz są łatwiejsze w konserwacji.

Do zalet elektrowni wiatrowych, jak każdego źródła odnawialnego, należą brak emisji i brak potrzeby dostarczania paliwa oraz modularność. Z kolei wadami elektrowni wiatrowych jest ich niekorzystny wpływ na krajobraz, wymagania co do wielkości zajętego terenu oraz nieciągłość pracy.

## 2. Techniczne aspekty wprowadzania źródeł rozproszonych do systemu

W przypadku zastosowania w systemie elektroenergetycznym źródeł rozproszonych na szeroką skalę należy rozważyć ich wpływ w następujących obszarach (Denny 1999):

- ◆ niezawodność systemu; w zależności od procentowego udziału źródeł rozproszonych, niezawodności poszczególnych jednostek oraz przyszłych rezerw mocy niezawodność systemu może wzrosnąć lub zmaleć w porównaniu do obecnej sytuacji;
- ◆ regulacja częstotliwości; zastosowanie źródeł rozproszonych może spowodować potrzebę instalowania lokalnych urządzeń regulujących częstotliwość, ponadto, być może potrzebne będą nowe techniki utrzymywania częstotliwości w połączonych systemach elektroenergetycznych;
- ◆ sterowanie; w przypadkach zastosowania rozproszonych systemów sterowania mogą wystąpić konflikty z nadrzędnymi systemami sterowania;
- ◆ modelowanie systemu; obecne metody analiz stabilności systemu są oparte na założeniach, które mogą nie przystawać do systemów z dużym udziałem źródeł rozproszonych, dlatego też może okazać się konieczne opracowanie nowych metod i narzędzi do analiz stabilności;
- ◆ planowanie; może okazać się, że przy dużym udziale źródeł rozproszonych potrzebne będą nowe metody i narzędzia do planowania rozwoju systemu;
- ◆ jakość energii elektrycznej; badania wpływu napędów o zmiennej prędkości oraz innych urządzeń energoelektronicznych na jakość energii elektrycznej będą musiały być rozszerzone także na wpływ źródeł rozproszonych, wobec tego będą potrzebne nowe metody i narzędzia do analizy i sterowania jakością energii elektrycznej w systemie;
- ◆ planowanie remontów, dobór bloków i rozdział obciążeń; obecnie używane do tych zadań metody i narzędzia powinny zostać poddane weryfikacji i ewentualnej modyfikacji w świetle wprowadzania źródeł rozproszonych do systemu;
- ◆ bezpieczeństwo pracy systemu; narzędzia do oceny bezpieczeństwa pracy systemu powinny zostać odpowiednio zmodyfikowane celem uwzględnienia obecności w systemie źródeł rozproszonych (przykładowo lista potencjalnych zakłóceń powinna być uzupełniona o awarie źródeł rozproszonych);
- ◆ prognozowanie obciążenia; metody wykorzystywane do tego celu powinny brać pod uwagę zwiększone zastosowanie źródeł rozproszonych, należałoby tu wykorzystać metody oparte na sztucznej inteligencji (sieci neuronowe);
- ◆ zabezpieczenia; występowanie źródeł rozproszonych na końcach linii promieniowych skomplikuje z pewnością zagadnienia zabezpieczeniowe, jednak coraz większe możliwości nowych zabezpieczeń opartych na technice mikroprocesorowej mogą pomóc w rozwiązaniu

tych wyrafinowanych problemów; w przypadku szerszego zastosowanie źródeł rozproszonych zmianie ulec będzie musiało tradycyjne podejście do zabezpieczania linii i generatorów.

Z powyższego widać, że z punktu widzenia operatorów sieci dystrybucyjnych i przesyłowych szybki rozwój źródeł rozproszonych stworzy w przyszłości nowego rodzaju problemy, dotyczące praktycznie każdego obszaru działalności tych przedsiębiorstw, do których rozwiązania powinny się one przygotować w odpowiednim czasie. Aspekty te przedstawione są szczegółowo w *Technical Assessment Guide...* (1997) oraz z pracy Malko, Wilczyńskiego i Wojciechowskiego (1999).

## Literatura

- BARTNIK R., WRONKOWSKI H., SKOREK J., KALINA J., 1999 — Analiza porównawcza efektywności ekonomicznej skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w prostym i kombinowanym układzie z turbiną gazową małej mocy. *Energetyka*, 3/1999.
- DENNY F.I. 1999 — Determination of distributed resources benefits in a restructured industry using system analysis method, CIREN, Nice.
- Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system. CIGRE Working Group 37.23, Paris, February 1999.
- MALKO J., PUPKA J. 1999 — Rozwój lokalnych źródeł energii elektrycznej — kogeneracja zawodowa, generacja rozproszona. Konferencja Rynek Energii Elektrycznej, Kazimierz Dolny.
- MALKO J., WILCZYŃSKI A., WOJCIECHOWSKI H. 1999 — Generacja rozproszona na rynku lokalnym — nowe problemy sterowania i eksploatacji. Konferencja APE '99, Jurata (w druku).
- MOORE T., 1998 — Emerging markets for distributed resources. *EPRI Journal*, Palo Alto, March/April.
- RASTLER D., 1999 — Distributed energy resources: strategic options to meeting customer needs. *EPRI*, June 1999.
- Technical Assessment Guide, Distributed Resources 1997, raport EPRI TR-105124-R1, vol. 5, Palo Alto, November, 1997.

## Streszczenie

Splot różnego rodzaju uwarunkowań (technicznych, ekonomicznych, środowiskowych i politycznych) funkcjonowania sektorów elektroenergetycznych na świecie spowodował, że ostatnio w obszarze wytwarzania energii elektrycznej największy rozwój dotyczy tak zwanych źródeł rozproszonych. Za źródła rozproszone uważa się małe (od dziesiątek kW do 50—100 MW), modularne technologie wytwórcze przyłączone z reguły do sieci dystrybucyjnych celem dostarczania energii elektrycznej pobliskim odbiorcom i poprawiania niezawodności i jakości tej dostawy, a przez to odsuwania na przyszłość inwestycji w sieci przesyłowe i dystrybucyjne. Powyższa definicja nie jest wyczerpująca, gdyż pojęcie wytwarzania rozproszonego rozumiane jest różnie w różnych krajach. Do technologii wykorzystywanych w źródłach rozproszonych zalicza się: silniki tłokowe, turbiny gazowe, układy skojarzonego wytwarzania oparte na turbinach gazowych i silnikach tłokowych, ogniwa paliwowe, układy fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, technologie geotermalne, małe elektrownie wodne, technologie wykorzystujące biomasę, technologie wykorzystujące pływy i falowanie mórz. Także w Polsce nowe uregulowania prawne dotyczące sektora elektroenergetyki oraz jego zobowiązania w zakresie ochrony środowiska powodują, że w najbliższych latach można spodziewać się rozwoju niektórych z powyższych rodzajów źródeł, a w szczególności źródeł skojarzonych opartych

głównie na turbinach gazowych o mocy od dziesiątek kW do dziesiątek MW. W artykule przedstawiono aktualny stan rozwoju źródeł rozproszonych na świecie, przy czym szczególna uwaga skierowana jest na wspomniane wyżej źródła skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

Janusz MIĘKUS, Robert PAPROCKI

## The worldwide development status of distributed electricity generation — the review

**KEY WORDS:** distributed electricity sources: internal combustion engines, gas turbines, fuel cells, photovoltaic systems, wind turbines

### Summary

The series of different conditions (technical, economical, environmental and political) influencing the power systems worldwide has made that nowadays most of the development in the area of electricity generation relates to the so called distributed electricity sources. Distributed generation means utilization of small (from tens of kW to tens of MW), modular power generating technologies dispersed throughout a utility's distribution system in order to provide power closer to customers, thereby improving power reliability and quality and deferring transmission and distribution upgrading. This definition is not a common one since the concept of distributed generation is perceived differently depending on the countries. Power generation technologies employed in distributed sources include:

- ◆ internal combustion engines,
- ◆ gas turbines,
- ◆ combined heat and power plants based on gas turbines or internal combustion engines,
- ◆ fuel cells,
- ◆ photovoltaic systems,
- ◆ wind turbines,
- ◆ geothermal technology,
- ◆ small hydro power plants,
- ◆ biomass technology,

Also in Poland new legal framework relating to the power sector and its commitments in the area of environment protection cause, that in the coming years we can expect development of some of the above mentioned sources, and especially cogeneration plants based mainly on gas turbines from tens of kW to tens of MW. The current development status of distributed generation in the world is presented in the paper, with a special emphasis on the cogeneration technologies. The possible new challenges, which can emerge simultaneously with the possible fast development of distributed generation are also indicated in the paper.