

ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII - MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA W WARUNKACH POLSKICH

Antoni Dmowski

Łukasz Rośliniec

Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska, Warszawa

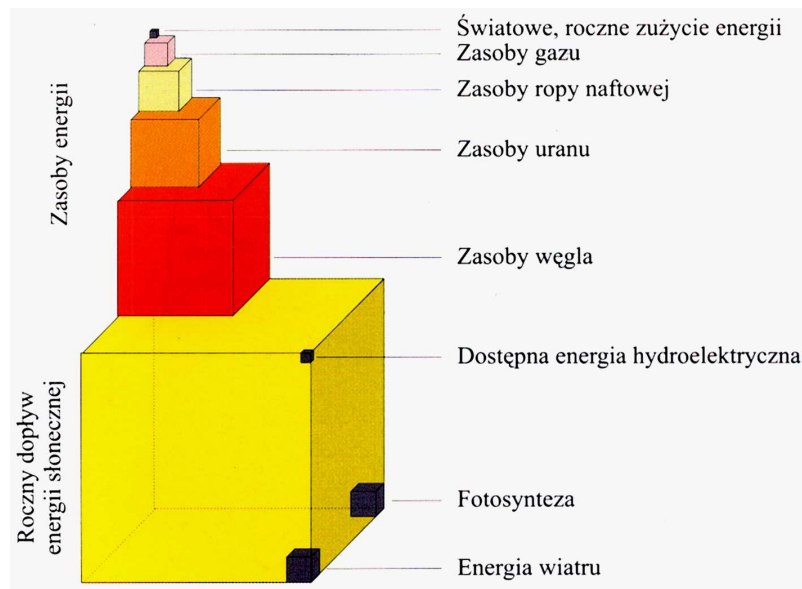
WSTĘP

W dobie postępu technicznego opanowującego cały świat możemy zauważyć ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Wyzwaniem nowoczesności jest elektronizacja i informatyzacja ogarniająca niemal wszystkie dziedziny działalności człowieka. Każdy produkt jest wytwarzany przy użyciu różnych rodzajów energii. Ludzie od dawien dawna starali się wykorzystać energię na własne potrzeby, które rosły w miarę rozwoju cywilizacji. Taki wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną i pokrywanie go w większości ze źródeł opartych na paliwach kopalnych (dziś wciąż najtańszych) powoduje coraz większe uszczuplenie zasobów naturalnych. Dodatkowo użytkowanie paliw kopalnych ma negatywny wpływ na środowisko naturalne i pociąga za sobą poważne konsekwencje.

Mając na uwadze to oraz dodatkowo kryzys energetyczny, który spowodował wzrost najpierw cen ropy naftowej, a następnie wszystkich innych paliw, jak również względy ochrony środowiska, zwiększa się zainteresowanie nowymi, niekonwencjonalnymi źródłami i technologiami wytwarzania energii, które mogłyby zastąpić aktualnie eksploatowane. W tym celu należy rozpatrzyć możliwość budowy układów wykorzystujących odnawialne źródła energii OZE.

Pierwotnymi źródłami energii na Ziemi są promieniowanie słoneczne, a także reakcje rozpadu pierwiastków ciężkich zachodzące w jądrze planety. Promieniowanie słoneczne może służyć bezpośredniej produkcji energii elektrycznej. Możliwe jest to dzięki ogniwom fotowoltaicznym. Energia elektryczna wytwarzana w elektrowniach wiatrowych, a także w elektrowniach wodnych jest głównie pochodną energii promieniowania słonecznego. Energia promieniowania słonecznego ogrzewa masy powietrza atmosferycznego nierównomiernie, powoduje to tworzenie się różnicy ciśnień i w efekcie powstają ruchy cyrkulacyjne powietrza. Szacuje się, że około 1-2% energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi ulega konwersji w energię kinetyczną wiatru. Dodatkowo promieniowanie słoneczne ogrzewa wody powierzchniowe, które parując zapoczątkowują proces cyrkulacji wody w środowisku. Zjawisko to wykorzystywane jest w elektrowniach wodnych. Energia docierająca ze słońca jest także wykorzystywana przez rośliny zielone w procesie fotosyntezy. Zmagazynowana w wyprodukowanych związkach organicznych energia może być użytkowana w elektrowniach opalanych biomasą, biopaliwami oraz biogazem.

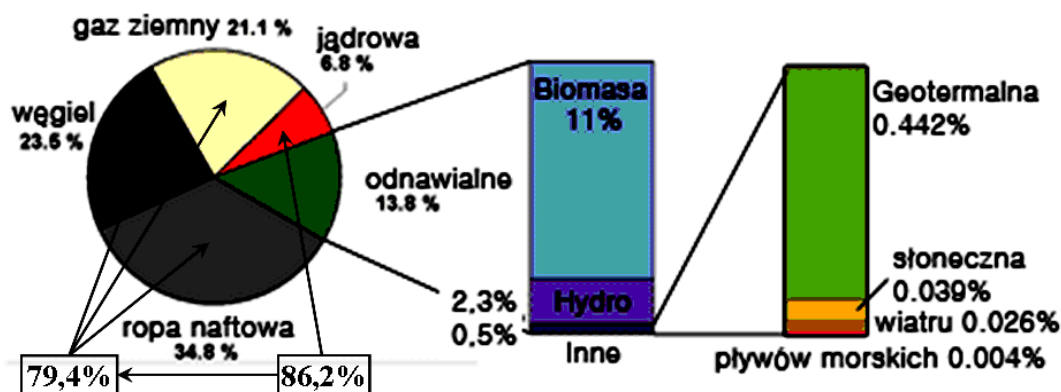
Intrygujący jest fakt, że ilość energii docierająca w ciągu roku do powierzchni Ziemi jest wielokrotnie większa niż wszystkie zasoby energii odnawialnej i nieodnawialnej zgromadzone na Ziemi razem wzięte [1]. Sytuację tą ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Porównanie ilości energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi i innymi istniejącymi zasobami.

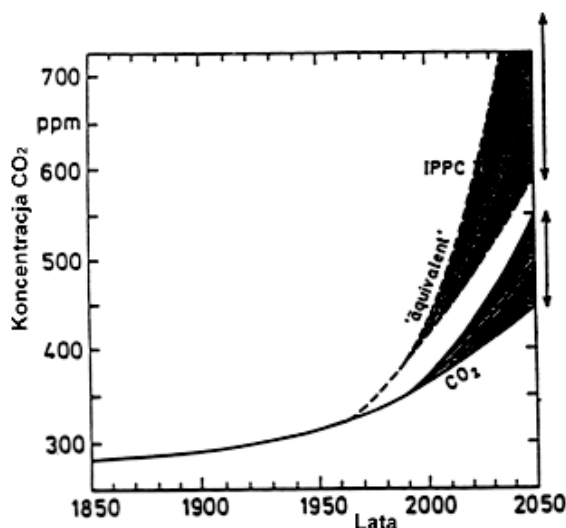
Dokonując przeglądu ilości energii słonecznej padającej na powierzchnię Ziemi należy mieć na uwadze, jak ta energia jest transformowana w atmosferze i na powierzchni planety. Z ogólnej ilości przychodzącej energii 30% jest odbijane z powrotem do przestrzeni kosmicznej, 47% zużywane jest na ogrzanie Ziemi, atmosfery i oceanów, 23% jest absorbowane w cyklu hydrologicznym (parowanie, opady), a tylko 400 TW (około 0,2%) wprawia w ruch powietrze i fale morskie. Stosunkowo mało energii jest źródłem takich zjawisk, jak wiatr. Zaledwie 100 TW jest absorbowane przez rośliny w procesach fotosyntezy. Dzięki temu procesowi - trwającemu setki milionów lat - z odpadów roślin i zwierząt powstały zasoby paliw kopalnych, które są jak dotychczas podstawową bazą surowców energetycznych.

W Polsce, w ustawie Prawo Energetyczne [2] odnawialne źródła energii zostały zdefiniowane jako „źródła wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątek roślinnych i zwierzęcych”. Odnawialne źródła energii nigdy nie są odnawialnymi w całej swej rozciągłości, wiele z nich jest z praktycznego punktu widzenia raczej wyczerpywalne, jak drewno jako paliwo czy też strumień wody w rzekach, posiadając ograniczoną możliwość wykorzystania. Rozwijanie technologii wytwarzania i przetwarzania energii odnawialnej, w połączeniu z rozwojem energooszczędnych technologii użytkowania wszystkich rodzajów energii, jest jedynym racjonalnym kierunkiem rozwojowym pozwalającym na zmniejszenie intensywności eksploatacji kopalnych surowców energetycznych, wydłużenie okresu ich wystarczalności i danie ludzkości więcej bezcennego czasu na rozwiązanie problemu pułapki energetycznej, w której się znalazła. Uwarunkowania prawne (opisane między innymi w prawie energetycznym) oraz naturalne dążenie do zrównoważonego rozwoju powodują, że odsetek energii elektrycznej wyprodukowanej ze źródeł odnawialnych będzie rósł. Obecnie udział różnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej przedstawia się w przybliżeniu tak jak pokazano to na rysunku 2.



Rys. 2. Udział poszczególnych źródeł energii pierwotnej w światowej produkcji energii [1].

Głównym motorem napędowym budowy nowych elektrowni opartych o źródła odnawialne jest protokół z Kioto, a w szczególności zapisy o obniżeniu emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Obniżenie emisji ma pociągnąć za sobą spowolnienie rozwoju efektu cieplarnianego. Dwutlenek węgla jest związkami, który odbija promieniowanie podczerwone. Powoduje to utrudnienia w emisji tego promieniowania z powierzchni ziemi do kosmosu. Emisja tego promieniowania jest główną metodą oddawania energii przez ziemię. Utrudnienia w tym procesie powodują zaburzenie bilansu energetycznego ziemi, efektem którego jest wzrost średniej temperatury na ziemi, co z kolei pociąga za sobą szereg konsekwencji zarówno w środowisku naturalnym jak i w procesach zachodzących w skorupie ziemi. Wzrost koncentracji dwutlenku węgla w latach minionych, a także jego prognozy przedstawione są na rysunku. 3.



Rys. 3. Wzrost koncentracji CO₂ w przedziale od 1850 roku do 2050 roku.

Krytyczna wydaje się sytuacja, która zakłada szybki rozwój krajów „trzeciego świata”, w których obecnie zużycie energii przez statystycznego mieszkańca nie jest wysokie. Jeśli jednak rozwój gospodarczy i cywilizacyjny tych krajów przyspieszy, można spodziewać się dynamicznego wzrostu koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze, co z kolei doprowadzić może do szybkiego wzrostu średniej temperatury na ziemi.

Na krajach wysoko-uprzemysłowionych do których bezsprzecznie zalicza się Polska, spoczywa więc obowiązek obniżenia emisji CO₂ do środowiska. Wynikiem tych dążeń są działania podejmowane szczególnie przez Unię Europejską mające na celu promowanie energetyki odnawialnej.

Wśród głównych metod wspierania rozwoju OZE wyliczyć należy:

- dopłaty na inwestycje związane z budową elektrowni wykorzystujących OZE,
- wprowadzenie tzw. zielonych certyfikatów i nałożenie tym samym na spółki obrotu energią obowiązku zakupu części energii ze źródeł odnawialnych i niekonwencjonalnych,
- obniżanie limitów (w krajach członkowskich) na emisję CO₂.

Efektom działań instytucji unijnych jest zwiększenie atrakcyjności inwestycji w OZE. Z polskiego punktu widzenia ważne jest, aby nastąpił szybki wzrost energii produkowanej z OZE. Związane jest to ze zmniejszającymi się stale limitami emisji dwutlenku węgla, które są nam przydzielane. Jeśli sytuacja w polskim sektorze energetycznym nie zmieni się, w przyszłości bez wątpienia wystąpi konieczność zakupu limitów emisji od krajów, które swoich limitów nie wykorzystują do końca. Warto pamiętać także, że dzięki dopłatom oraz zielonym certyfikatom energetyka odnawialna stała się dla polskich przedsiębiorców bardzo interesującym i obdarzonym niskim ryzykiem źródłem dochodu. Daje to nadzieje na szybki rozwój tego sektora w Polsce.

Źródła odnawialne są zatem nie tylko nadzieją na spowolnienie zużycia złóż surowców kopalnych, nie tylko pomagają chronić środowisko naturalne, są też inwestycją w przyszłość z ekonomicznego punktu widzenia. Niestety rozwój energetyki odnawialnej wiąże się także z pewnymi ograniczeniami. ze względu na różne parametry eksploatacyjne źródeł odnawialnych, każde z nich niesie za sobą inne profity oraz niebezpieczeństwa.

ELEKTROWNIE WODNE

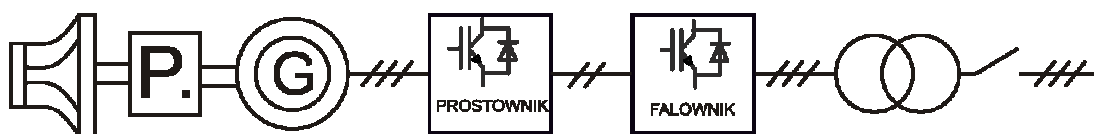
Elektrownie wodne ze względu na rodzaj zbiorników wody oraz konstrukcji turbiny posiadają różne parametry eksploatacyjne. Najbardziej uciążliwe dla systemu są elektrownie przepływowe, czyli takie w których tzw. górny zbiornik nie pozwala na gromadzenie dużych ilości wody. Oznacza to, że poziom wody w górnym zbiorniku musi być utrzymywany przez elektrownie, w miarę możliwości, na stałym poziomie. Owocuje to bardzo niekorzystnymi fluktuacjami energii produkowanej w takiej elektrowni, a także częstymi i uciążliwymi dla sieci elektrycznej łączeniami elektrowni do tej właśnie sieci. Ważne jest, aby łączenia te, jak i inne zjawiska zachodzące w elektrowni wodnej, nie powodowały obniżenia jakości energii elektrycznej u odbiorców przyłączonych do sieci w okolicy elektrowni. Jakość energii jest widziana tu jako parametry napięcia w miejscu przyłączenia. Mowa tu w szczególności o: częstotliwości i wartości skutecznej napięcia, asymetrii napięć, poziomemu odkształcenia napięć, migotania wartości skutecznej napięcia (tzw. flicker) a także zaników, zapadów i przepięć [3]. Istotny wpływ na te parametry ma charakter prądu oddawanego przez elektrownie do sieci. Prąd ten z kolei zależy od zastosowanego generatora oraz układu wyprowadzenia mocy z elektrowni.

W elektrowniach wodnych stosuje się głównie dwa typy generatorów:

Generator synchroniczny – główną zaletą stosowania tego typu generatorów jest możliwość regulacji mocy biernej dostarczanej lub odbieranej przez generator za pomocą prądu wzbudzenia. Większość generatorów pracuje w trybie produkcji mocy biernej indukcyjnej, co jest spowodowane tym, że większość odbiorników ma charakter indukcyjny. Współczynnik mocy takiego generatora w większości wypadków mieści się w przedziale 0,9÷0,95, jednak zdarza się, że konieczna jest praca przy niższych wartościach. Dodatkową zaletą wykorzystania generatora synchronicznego jest

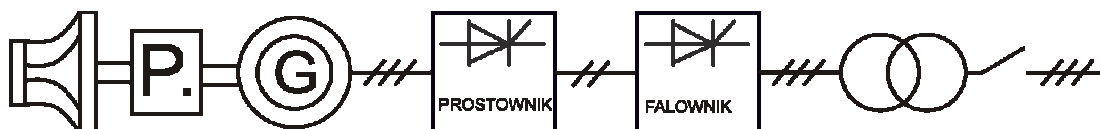
możliwość pracy na system wydzielony, związane jest to z koniecznością wyposażenia układu w regulatory sterujące nastawami zaworów i nachyleniami łopatek w celu kontroli prędkości obrotowej generatora, która odpowiada za utrzymywanie stałej częstotliwości indukowanego napięcia. Konieczne jest także wyposażenie układu w regulator prądu wzbudzenia, który odpowiada za wartość napięcia wyjściowego generatora oraz za bilans energii biernej pomiędzy odbiornikami i generatorem, a co za tym idzie za poziom napięcia w sieci przez niego zasilanej. Synchronizacja generatora synchronicznego z systemem elektroenergetycznym wiąże się z krótkotrwałym przepływem prądów wyrównawczych o niewielkiej energii i nie pociąga to za sobą konsekwencji w systemie. Ponadto generatory takie symetryzują napięcie i zmniejszają jego odkształcenia.

Niestety generator synchroniczny nie pozwala na płynną regulację prędkości obrotowej turbiny. Powoduje to zmniejszenie efektywności wykorzystania energii wody, a w skrajnych przypadkach może prowadzić do zjawiska kawitacji, a nawet do uszkodzeń turbiny. Z tego powodu coraz częściej w układach elektrowni wodnych z generatorami synchronicznymi stosuje się przekształtniki energoelektroniczne w torze mocy elektrowni i generatory asynchroniczne klatkowe lub coraz częściej generatory synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi. Pozwalają one nie tylko na płynną kontrolę prędkości obrotowej turbiny, ale także przekształtniki wykorzystujące tranzystory dużych mocy pozwalają osiągać bardzo dobre parametry jakości prądu. Schemat przykładowej konfiguracji takiego układu przedstawiono na rysunku 4.



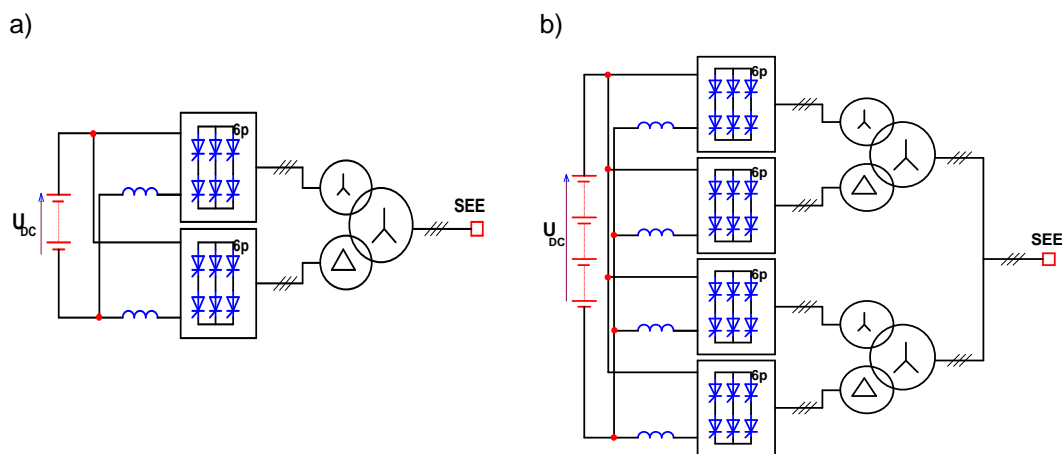
Rys. 4. Schemat blokowy elektrowni wodnej z tranzystorowym przemiennikiem częstotliwości w torze mocy.

Wraz ze wzrostem mocy elektrowni zmienia się topologia przemiennika, w układach najmniejszych mocy stosuje się wykonanie proste, a w układach większych mocy wykorzystuje się przekształtniki wielopoziomowe. Związane jest to z ograniczeniami mocy, którą można przesyłać przez tranzystory mocy. W układach bardzo dużych mocy stosuje się układy tyrystorowe (schemat blokowy takiego układu przedstawiony jest na rysunku 5). Układy pozwalają osiągać znacznie większe moce, jednak mają one gorsze parametry oddawanego prądu. Jest on bowiem odkształcony i posiada składową bierną.

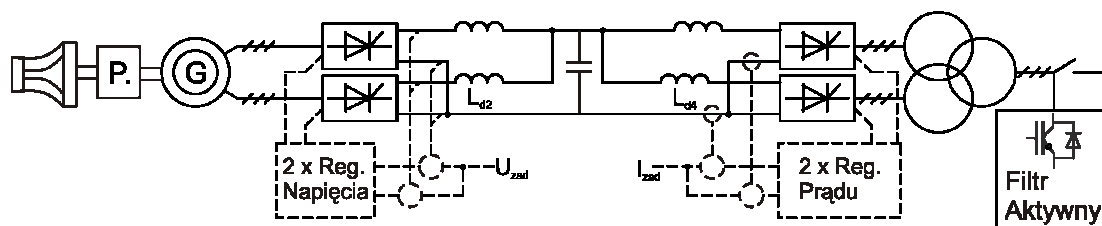


Rys. 5. Schemat blokowy elektrowni wodnej z tyrystorowym przemiennikiem częstotliwości w torze mocy.

W celu poprawienia parametrów prądu oddawanego do sieci, stosuje się układy wielopulsowe. Schemat takich układów przedstawia rysunek 6. Takie topologie pozwalają wydanie zmniejszyć współczynnik odkształcenia prądu THDi, jednak nawet w wykonaniu 24 – pulsowym współczynnik ten może osiągać nawet 4-6 %, dodatkowo nierozwiązany pozostaje problem przepływu mocy biernej. Z tego powodu, w nowoczesnych rozwiązaniach stosuje się filtr aktywny, który nie tylko kompensuje moc bierną ale także poprawia współczynnik odkształcenia prądu. Schemat blokowy takiego układu zaprezentowano na rysunku 7. W takim wykonaniu prąd oddawany do sieci jest nieznacznie tylko odkształcony, ale także nie posiada składowej biernej. Pogorszenie jakości energii występuje w takim przypadku dość często w stanach dynamicznych, jednak są to procesy krótkotrwałe i nie są uciążliwe dla sieci elektrycznej.

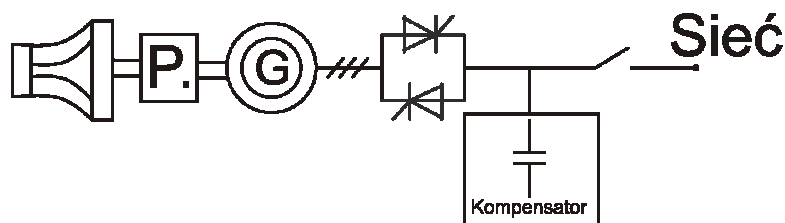


Rys. 6. Falowniki tyrystorowe w układzie równoległym; a) 12-pulsowym (12p); b) 24-pulsowym (24p).



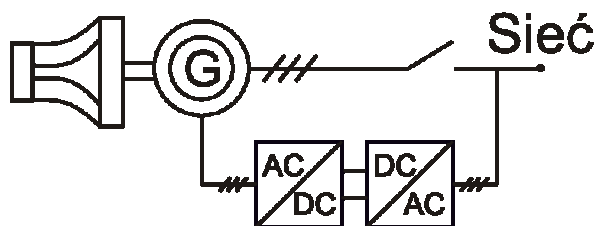
Rys. 7. Schemat blokowy elektrowni wodnej z tyrystorowym przemiennikiem napięcia oraz filtrem aktywnym [4].

Generator asynchroniczny klatkowy – cechuje się niższym kosztem zakupu oraz utrzymania. Jest to związane z brakiem konieczności instalowania wzbudnicy i układów regulacji napięcia, mocy biernej oraz prędkości obrotowej. Generator asynchroniczny nie daje możliwości pracy na system wydzielony, nie pozwala także na kontrolę mocy biernej produkowanej lub odbieranej. Dużą wadą rozwiązań wykorzystujących generator asynchroniczny jest konieczność dostarczania do niego mocy biernej indukcyjnej co prowadzi za sobą konieczność kompensacji tej mocy. Jeśli generator jest dołączony do sieci elektroenergetycznej przy pomocy kabla, to może okazać się, że pojemność kabla jest wystarczająca do kompensacji pobieranej przez generator mocy biernej. W większości przypadków konieczne jest jednak zainstalowanie baterii kondensatorów jako dodatkowego kompensatora. Bateria ta musi zostać odłączona od sieci energetycznej w tym samym momencie co generator asynchroniczny, żeby uniknąć przepięć niebezpiecznych dla innych urządzeń. Załączanie generatora asynchronicznego do sieci powoduje przepływ prądów rozruchowych o znacznej wartości dochodzących do wartości osiem razy większych od prądów nominalnych generatora. Częste łączenie elektrowni wodnej wykorzystującej generator asynchroniczny klatkowy, powoduje częste i uciążliwe zapady napięcia. Aby zniwelować tą wadę stosuje się tyrystorowy układ miękkiego startu, często współpracujący także z układem kompensatora. Rozwiązanie takie przedstawione jest schematycznie na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat blokowy elektrowni wodnej z generatorem asynchronicznym układem soft start i kompensatorem mocy biernej.

Generator asynchroniczny klatkowy, może oddawać energię elektryczną tylko gdy prędkość jego wału jest wyższa od prędkości synchronicznej. Oznacza to, że przy niewielkiej ilości wody generator pracować nie może. Wykorzystanie generatora asynchronicznego podwójnie zasilanego pozwala zniwelować część wad generatora klatkowego. Schemat blokowy układu wyprowadzenia mocy z elektrowni wodnej z generatorem dwustronnie zasilanym zaprezentowany jest na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat blokowy elektrowni wodnej z generatorem asynchronicznym dwustronnie zasilanym.

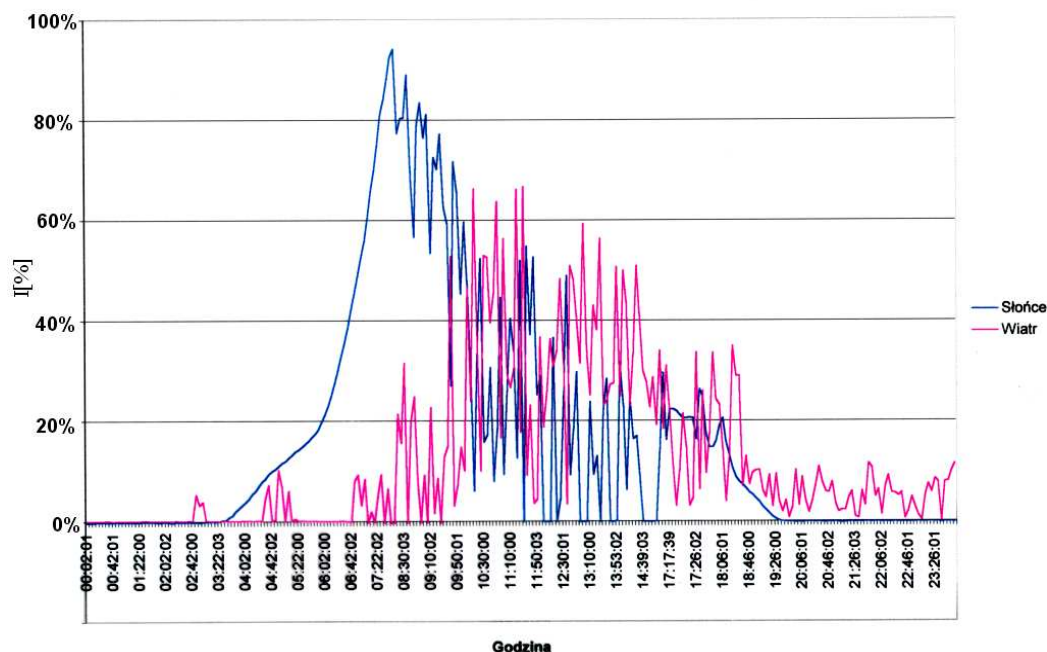
Generator taki oprócz możliwości płynnego kontrolowania prędkości turbiny (w pewnym zakresie), pozwala także na kontrolowanie mocy biernej, ponieważ wzbudzenie generatora wykonane jest za pomocą obwodu wirnika i przekształtnika energoelektronicznego. Układ ten posiada także znacznie lepsze własności łączeniowe.

Elektrownie wodne posiadają wiele cech, które powodują że elektrownie wodne wypadają szczególnie korzystnie na tle innych źródeł odnawialnych. Barierą do ich rozwoju jest nieduża ilość miejsc w których mogą być one instalowane. Brak cieków wodnych o odpowiednich parametrach spowodował znacząco rozwój energetyki wodnej w Polsce.

ELEKTROWNIE WIATROWE

Problemy występujące w elektrowniach wiatrowych pokrywają się w zasadzie z problemami w elektrowniach wodnych. Jednak pewne problemy w przypadku elektrowniach wiatrowych osiągają większe znaczenie, co związane jest ze specyfiką tego typu elektrowni. Elektrownie wiatrowe (szczególnie te położone na łądzie) charakteryzują się bardzo dużą niestabilnością mocy produkowanej w czasie. Przykładowy zapis fluktuacji prądu z elektrowni wiatrowej i słonecznej znajduje się na rysunku 10. Łatwo można zauważyć, że w trakcie dnia wystąpić musi kilka synchronizacji elektrowni z systemem. W zależności od wykonania elektrowni, synchronizacje te mogą być mniej lub bardziej uciążliwe dla odbiorców przyłączonych do sieci w okolicy elektrowni. W przypadku elektrowni wiatrowych te synchronizacje są znacznie częstsze niż w przypadku elektrowni wodnych (nawet przepływowych).

Czerwiec 06

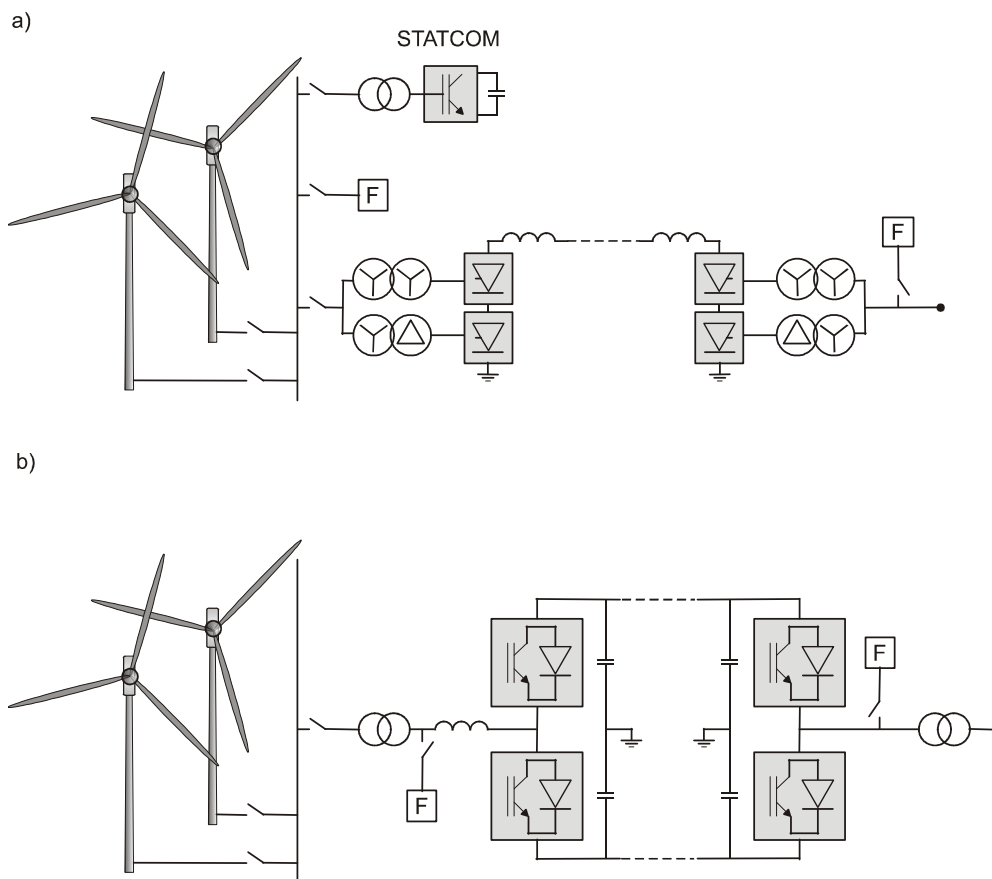


Rys. 10. Zapis zmian wartości prądu elektrowni wiatrowej i słonecznej w ciągu dnia [5].

Częsta synchronizacja z systemem oraz konieczność płynnej regulacji prędkości turbiny powodują, że częściej niż w przypadku elektrowni wodnych stosuje się w elektrowniach wiatrowych energoelektroniczny przemiennik częstotliwości w torze mocy. Urządzenie to oczywiście zwiększa nakłady inwestycyjne, jakie trzeba ponieść na budowę elektrowni, koszt ten w zdecydowanej większości przypadków nie przekracza jednak 10% nakładów na całą elektrownię. W skrajnych przypadkach przekształtnik taki pozwala dwukrotnie zwiększyć ilość energii produkowanej w elektrowni wiatrowej.

W przypadku energetyki wiatrowej pojedyncze turbiny łączy się często w farmy wiatrowe. Pozwala to obniżyć nakłady na infrastrukturę sieciową, a także na dzierżawę gruntów. Skrajnym przypadkiem takiego rozwiązania są farmy wiatrowe położone w morzu. W przypadku takiego rozwiązania elektrownie łączone są z siecią elektryczną za pomocą kabli podmorskich.

Kable te posiadają często znaczną długość wynikającą ze znacznego oddalenia takiej farmy od miejsca przyłączenia. Pojemność kabla powoduje utrudnienia w przesyłaniu energii, gdyż okazuje się, że kabel taki jest źródłem mocy biernej i podłączony do napięcia sam powoduje przepływ prądów znacznej wartości. Dlatego w rozwiązaniach farm wiatrowych stosuje się przesyłanie energii prądem stałym, a korzyści płynące z takiego rozwiązania sprawiają, że przesyłanie prądem stałym staje się coraz bardziej popularne także w układach z innymi źródłami. Schematy blokowe dwóch rodzajów farm wiatrowych wykorzystujących przesyłanie energii prądem stałym zaprezentowano na rysunku 11.



Rys. 11. Dwa rodzaje transmisji HVDC: a) klasyczny system b) system z napięciowym tranzystorowym przekształtnikiem energoelektronicznym [6].

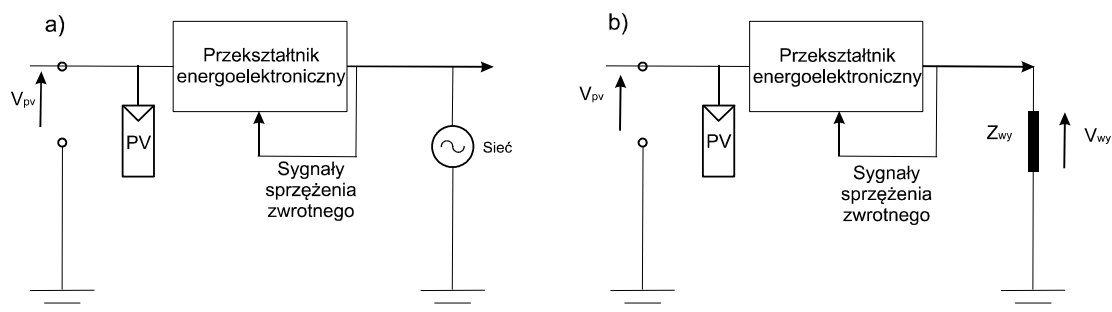
Koncepcja na rysunku **a** zakłada użycie przekształtników tyrystorowych, które wspomagane są po stronie farmy wiatrowej urządzeniem typu STATCOM. Urządzenie to pozwala kompensować moc bierną i utrzymywać połączone ze sobą elektrownie w synchronicznej pracy. Na rysunku **b** zaprezentowano natomiast topologię wykorzystującą przekształtniki tranzystorowe. Jest to rozwiązanie droższe, jednak bardziej elastyczne i nie wymaga ono dodatkowych urządzeń do kompensacji mocy biernej lub do kompensacji odkształceń prądu. Także po stronie sieci takie rozwiązanie niesie za sobą widoczne zalety, szczególnie z punktu widzenia jakości energii elektrycznej. Warto wspomnieć tu że takie rozwiązania mają już znaczącą moc. Dochodzącą do kilkudziesięciu MW.

Problemem w tego typu rozwiązaniach jest łączenie turbin po stronie przemiennie-prądowej, obniża to wydajność całej farmy. Dlatego stosuje się także rozwiązania gdzie każdy generator łączy jest z siecią DC osobno przez własny prostownik. Pozwala to na lepszą kontrolę prędkości obrotowej turbin wiatrowych, a co za tym idzie na podniesienie wydajności.

ELEKTROWNIE SŁONECZNE

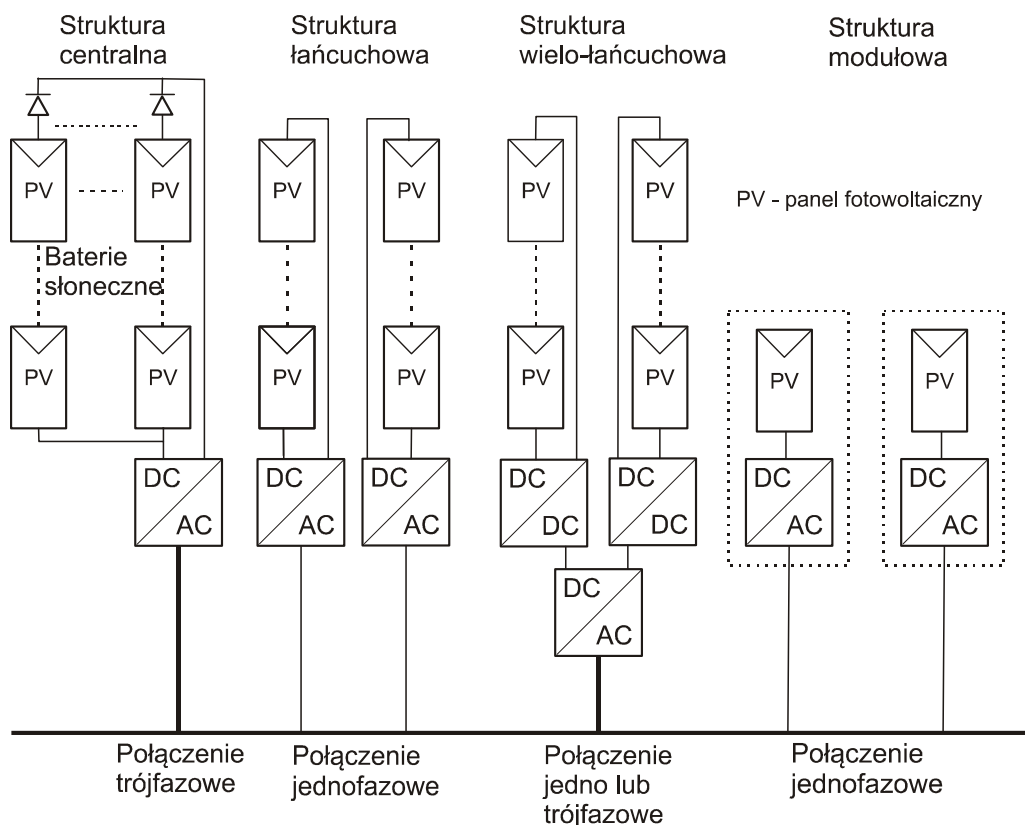
Układy wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o źródła fotowoltaiczne mają z reguły mniejsze moce niż układy w elektrowniach wiatrowych. Związane jest to z dużymi nakładami na budowę takich elektrowni, a także niską sprawnością ogniw. Aby instalacja fotowoltaiczna miała nominalną moc szczytową o dużej wartości potrzebny jest duży obszar na budowę instalacji. Najczęściej są to moce od kilkuset watów do kilku kilowatów. Elektrownie słoneczne osiągają dzisiaj moce w granicach 1 MW, aczkolwiek wdrażane są projekty scentralizowanych źródeł o dużej mocy opartych o ogniwa fotowoltaiczne. Przykładem jest instalacja Pocking Solar Park w Bawarii o mocy szczytowej 10 MW.

Ogólnie, ogniwa fotowoltaiczne mogą być połączone z siecią elektroenergetyczną i transmitować energię do niej lub mogą pracować jako instalacja wyspowa. Te dwie aplikacje systemów fotowoltaicznych pokazane są na rysunku 12.



Rys. 12. Aplikacje systemów fotowoltaicznych: a) transmisja energii do sieci b) zasilanie obszaru wyspowego.

Można dokonać kilku klasyfikacji topologii przekształtników używanych w systemach fotowoltaicznych tj. odnośnie liczby stopni przekształcania energii, użycia transformatorów (separacji galwanicznej) i rodzaju przekształtnika łączącego źródło z systemem elektroenergetycznym. Jednakże, przed dyskusją topologii przekształtników, należy najpierw zdefiniować struktury falowników stosowanych w ogniwach fotowoltaicznych. Należą do nich: struktura centralna, łańcuchowa i modułowa falowników – zaprezentowane na rysunku 13 [7].



Rys. 13. Struktury falowników fotowoltaicznych.

W strukturze centralnej falowników elektrownia fotowoltaiczna (typowo > 10kW) jest ułożona w wiele równoległych łańcuchów, połączonych po stronie napięcia stałego do jednego centralnego falownika. Falownik taki charakteryzuje się wysoką wydajnością i niskim kosztem na kilowat przetwarzanej energii. Jednakże, ilość energii uzyskiwanej z elektrowni fotowoltaicznej spada z powodu różnicy parametrów użytych ogniw i możliwości częściowego zacielenia ogniw. Również niezawodność elektrowni może być ograniczona z powodu zależności generacji energii od jednego komponentu. Awaria centralnego falownika skutkuje wyłączeniem całej elektrowni fotowoltaicznej. Nominalna moc takiego rozwiązania zawiera się w zakresie do kilkuset kW.

W strukturze łańcuchowej, podobnie jak w strukturze centralnej, elektrownia fotowoltaiczna podzielona jest na kilka równoległych łańcuchów ogniw. Każdy łańcuch ogniw jest przypisany to wyznaczonego falownika zwanego falownikiem łańcuchowym. Falowniki łańcuchowe mają możliwość śledzenia maksymalnego punktu mocy (z ang. MPP) każdego łańcucha. To podwyższa ilość uzyskiwanej energii poprzez redukcję wpływu różnicy parametrów użytych ogniw i straty energii spowodowane częściowym osłonięciem strumienia światła. Lepsze parametry techniczne zwiększają również niezawodność struktury. Struktury łańcuchowe są obecnym standardem systemów fotowoltaicznych połączonych z siecią.

W zakresie większych mocy można stosować struktury wielo-łańcuchowe. Pozwala to na łączenie kilku łańcuchów z oddzielnymi systemami śledzenia maksymalnego punktu mocy (przekształtnik DC/DC) do jednego przekształtnika DC/AC. Struktura wielo-łańcuchowa pozwala na integrację łańcuchów ogniw różnych technologii i o różnych kierunkach (wschodni, zachodni, północny, południowy). Takie rozwiązanie optymalizuje wydajność pracy każdego łańcucha z osobna.

Nominalna moc tego typu aplikacji zawiera się w zakresie do 3 kW do 10 kW. W strukturze modułowej każde ogniwo fotowoltaiczne ma swój falownik. Rozwiązanie to optymalizuje zdolność przystosowania się falownika do charakterystyki ogniwa fotowoltaicznego, ponieważ każde ogniwo ma własny układ śledzenia maksymalnego punktu mocy. Pomimo tego, iż rozwiązanie takie optymalizuje ilość uzyskiwanej energii, ma niższą wydajność niż struktura łańcuchowa. Układ bazujący na falowniku zintegrowanym z ogniwem fotowoltaicznym charakteryzuje się większą ilością okablowania po stronie napięcia przemiennego. Ponieważ każdy moduł musi być połączony z siecią, podwyższa to koszty utrzymania takiej instalacji. Nominalna moc takiego rozwiązania zawiera się w zakresie 50 W – 400 W.

Podstawowym elementem każdej elektrowni słonecznej współpracującej z systemem elektroenergetycznym jest falownik fotowoltaiczny. Wykonywane są one w wielu różnych topologiach, jednak wszystkie mają podobne cechy. Charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami jakości energii oraz dużą sprawnością. Problemem źródeł fotowoltaicznych nie jest więc jakość energii. Podstawową wadą elektrowni fotowoltaicznych jest ich cena, która szczególnie w polskich warunkach uniemożliwia stosowanie ich na szeroką skalę przy produkcji energii na potrzeby systemu elektroenergetycznego. Jedynie w przypadku zasilania odbiorników niewielkiej mocy znacznie oddalonych od sieci elektrycznej okazuje się, że budowa systemu fotowoltaicznego z bateriami chemicznymi staje się bardziej opłacana niż budowa długich linii zasilających. Dodatkową wadą systemów fotowoltaicznych jest najwyższa spośród wszystkich źródeł niestabilność mocy produkowanej, oraz najbardziej dynamiczne zmiany tej produkcji. Ogniwa mogą w dni zachmurzone w ciągu kilku sekund zmieniać swoją moc wyjściową o 10 razy. Proces ten może się powtarzać setki razy w ciągu dnia.

INNE TECHNOLOGIE ODNAWIALNE

W warunkach polskich interesującym kierunkiem rozwoju sektora źródeł odnawialnych wydaje się być energetyka oparta o biomasę. W Polsce znajduje się wiele nieużytków rolnych, które mogłyby posłużyć do produkcji wikliny szybko pnącej, rzepaku, wierzby energetycznej lub innych roślin niosących korzyści przy produkcji energii. Do wykorzystania są także ogromne pokłady odpadów z produkcji rolniczej, takich jak gnijące owoce odchody zwierząt. Instalacje takie okazują się jednak mało-opłacalne ze względu na koszt biopaliw. Dodatkowo są one obciążone dużym ryzykiem, ponieważ rynek produktów rolniczych charakteryzuje się dużą dynamiką, dochodzi w nim do ciągłych zmian w produkcji. Okazywało się już w przeszłości, że instalacja wykorzystująca jakiś rodzaj biomasy, po zmianie produkcji przez okolicznych rolników, musiała sprowadzać surowiec ze znacznie oddalonych terenów. Naturalnie sytuacja taka powoduje znaczne podniesienie kosztów pozyskania danego biopaliwa.

Główne korzyści z elektrowni opartych o biopaliwa, to możliwość regulowania mocy czynnej na skutek zmian ilości doprowadzanego do komory spalania paliwa. W źródłach takich jak elektrownie wodne, wiatrowe i fotowoltaiczne, produkowana moc czynna zależy od warunków pogodowych i (za wyjątkiem części elektrowni wodnych) nie możliwa jest kontrola mocy produkowanej. Dodatkowo silniki tłokowe lub turbiny gazowe, używane w produkcji energii elektrycznej z biogazu i biopaliwa, osiągają najlepszą wydajność przy różnych wartościach prędkości obrotowej. Dlatego też stosuje się często stosuje się energoelektroniczne przemienniki częstotliwości, pozwalające zoptymalizować produktywność elektrowni. Jak już wspomniano wcześniej układy te posiadają bardzo dobre parametry prądu, więc elektrownie takie nie są uciążliwe dla systemu elektroenergetycznego.

W Polsce praktycznie brak jest warunków do rozwoju elektrowni opartych o źródła geotermalne. Różnica temperatur między otoczeniem, a źródłami ciepła geotermalnego nie przekracza często 70°C.

Jest to wartość praktycznie uniemożliwiająca wykorzystanie tego źródła do produkcji energii elektrycznej.

Na świecie prowadzone są także badania nad wykorzystaniem fal i pływów morskich do produkcji energii elektrycznej. Niestety jak do tej pory są to jednak głównie projekty badawcze, a wprowadzenie ich w szerszym zakresie do przemysłu hamowane jest przez wysokie nakłady inwestycyjne na takie źródła.

ZAGROŻENIE DLA POLSKI – POGORSZENIE JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ U ODBIORCÓW

Źródła odnawialne nie używające przekształtników w torze mocy charakteryzują się złymi parametrami jakości energii. Zwiększanie liczby źródeł odnawialnych wykonanych bez użycia układów energoelektronicznych mających na celu poprawę parametrów prądu, może w przyszłości doprowadzić do utrudnień w odbiorze energii elektrycznej. Już przy obecnym udziale źródeł odnawialnych w systemie elektroenergetycznym szczególnie na Pomorzu uwidaczniają się problemy związane z jakością energii, na którą negatywny wpływ mają stawiane na Pomorzu w dużych ilościach elektrownie wiatrowe. W takiej sytuacji nieuniknione wydają się inwestycje na rozbudowę systemu przesyłowego. Takiego obrotu sprawy można uniknąć, gdy zastosuje się nowoczesne układy wytwórcze posiadające poprawione parametry prądu generowanego do sieci. Układy takie pozornie są droższe od układów klasycznych, niosą one jednak często za sobą znaczne poprawienie wydajności źródła dzięki czemu wyższe nakłady inwestycyjne mogą w szybkim czasie się zwrócić.

ZAGROŻENIE DLA POLSKI – POGORSZENIE STABILNOŚCI CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ SEE

System elektroenergetyczny do poprawnej pracy musi mieć zbilansowaną moc. To znaczy moc odbiorców i strat musi być równa mocy źródeł przyłączonej do systemu. W przeciwnym razie, gdy dochodzi do nadwyżek produkcji następuje zwiększenie częstotliwości systemu, a w momencie niedoborów produkcji energii elektrycznej częstotliwość systemu spada. W skrajnych przypadkach niezbilansowanie może doprowadzić do lawinowego odłączenia jednostek wytwórczych w systemie. Problemem z punktu widzenia systemu są nagłe wahania (znacznej wartości) mocy produkowanej lub odbieranej. W trakcie normalnej pracy prognozy mocy odbieranej nie różnią się więcej niż 5% od mocy rzeczywiście odbieranej. W związku z tym bilansowanie mocy czynnej nie stwarza problemów, można dokładnie grafikować wytwarzanie energii. Jednak dynamiczne zmiany mogą prowadzić do poważnych awarii systemowych.

Częstotliwość systemu nie może być zbyt wysoka. Pracujące synchronicznie z systemem turbiny w elektrowniach ciepłych (które stanowią zdecydowaną większość elektrowni przyłączonych do systemu w Polsce) nie mogą poruszać się zbyt szybko, w związku z ograniczeniami naprężeń szczególnie w części niskoprężnej turbiny. Duża siła odśrodkowa działająca na relatywnie długie łopaty w części niskoprężnej może doprowadzić do ich zniszczenia. W takiej sytuacji można awaryjnie odłączać jednostki wytwórcze, obniżając w ten sposób moc produkowaną. Powoduje to znaczne straty energii, pozwala jednak uniknąć awarii systemowej.

Większym problemem są niedobory produkcyjne względem zapotrzebowania. W sytuacji takiej system elektroenergetyczny obniża swoją częstotliwość. Przy obniżonej częstotliwości wał turbiny parowej w elektrowni ciepłej musi być obciążony większym momentem siły, aby moc przenoszona nie zmieniła się. Wiąże się to większymi naprężeniami wewnątrz wału, co może prowadzić do jego

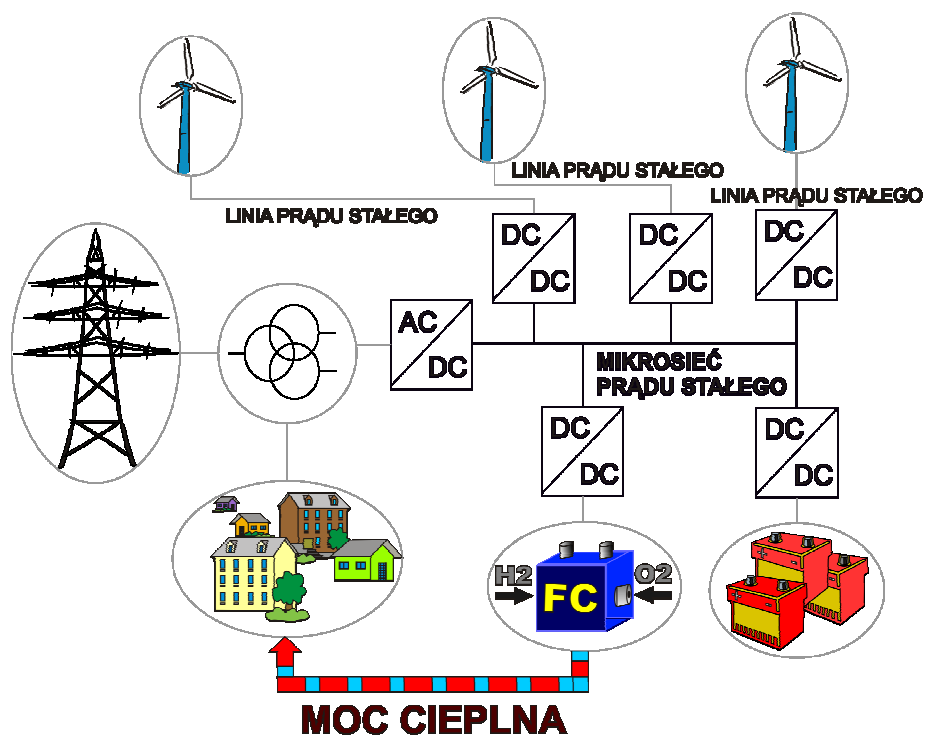
uszkodzenia. Aby uniemożliwić zniszczenie wału, stosuje się w elektrowniach zabezpieczenia, odłączające turbinę przy zbyt niskiej prędkości. W momencie gdy brak jest źródeł mogących wspomóc system wytwarzając brakującą energię, może dojść do lawinowego wyłączania się kolejnych źródeł a co za tym idzie do dużej awarii systemowej. Rozwiązaniem byłoby odłączanie napięcia od odbiorców. Rozwiązanie takie jest jednak obciążone dużym ryzykiem, bowiem wielu odbiorców wymaga ciągłości dostaw energii, w przeciwnym razie może dojść do bardzo dużych strat głównie finansowych. Poza tym trudniej jest zautomatyzować proces odłączania odbiorców tak, aby otworzyć możliwość utrzymania systemu w pracy.

W dniu dzisiejszym niebezpieczeństwo wystąpienia fluktuacji mocy o tak znacznej wartości (takiej która doprowadzić może do awarii systemowej) jest nieznaczne. Jednak jak pokazuje przykład niemiecki, rozbudowa sektora energetyki odnawialnej może doprowadzić do trudności z utrzymywaniem systemu w stabilnym punkcie pracy. Brakuje bowiem dobrego taniego systemu magazynowania energii, który byłby wystarczająco szybki, aby mógł reagować na zmiany mocy produkowanej w elektrowniach wiatrowych. 18% mocy zainstalowanej niemieckiego systemu elektroenergetycznego to elektrownie wiatrowe. Udział tych źródeł w systemie jest więc znaczny. Doprowadziło to w przeszłości do kilku niebezpiecznych sytuacji, w których system był bliski awarii. Ciągłe problemy z zachowaniem bilansu po stronie niemieckiej prowadzą do tego, że linie łączące polski system z niemieckim trudno jest używać do przesyłania energii zgodnie z zawartymi umowami handlowymi. Linie te biorą udział w ciągłym bilansowaniu systemu niemieckiego i prąd przez nie płynący wynika z utrzymywania stabilnego punktu pracy a nie z kierunku jaki życzył by sobie operator.

Rozwiązaniem tego problemu mogą być dynamiczne zasobniki energii, zalicza się do nich: baterie chemiczne (litowo jonowe, kwasowo ołowiowe, sól siarka), cewki nadprzewodzące, koła zamachowe. Wszystkie te zasobniki posiadają wspólną cechę, która predysponuje je do współpracy z elektrowniami wiatrowymi, słonecznymi, a także z małymi elektrowniami wodnymi, pozwalają one w krótkim czasie dostarczyć niedobór energii, lub odebrać nadwyżkę.

Układy te są zasobnikami dynamicznymi, tzn. zmiany mocy wyjściowej są bardzo szybkie, co pozwala na odpowiednio szybkie reagowanie na zmiany mocy produkowanej z wiatru. Dzięki temu podnosi się wartość mocy rezerwowej w systemie i ułatwione jest bilansowanie mocy w systemie. Dodatkowo zasobnik bezpośrednio współpracujący z OZE pozwala uniknąć częstych odłączeń i synchronizacji z systemem elektroenergetycznym, co ma korzystny wpływ na jakość energii produkowanej w źródłach odnawialnych. Zasobniki energii mogą być także stosowane w układach farm wiatrowych, bilansując wahania całej farmy [4].

Jedną z koncepcji jest wykorzystanie wysokotemperaturowych ogniw SOFC do budowy układów wytwarzania skojarzonego. Produkcja energii elektrycznej i ciepłej na raz podnosi bowiem znacznie efektywność wykorzystania paliwa. Przykładem takiej koncepcji jest układ zaprezentowany na rysunku 14. Dodatkowy zasobnik energii w postaci baterii chemicznej pozwoli na uzupełnianie bilansu przy zmianach o bardzo dynamicznych. Bateria chemiczna ma także zarezerwować pewien czas, który umożliwi rozruch ogniwa paliwowego w sytuacji gdy było ono wyłączone. Ciepło i energia elektryczna dostarczana jest, w takiej sytuacji, do lokalnych odbiorców. Pozwala to znacznie zmniejszyć straty na przesyłaniu energii elektrycznej i ciepła.



Rys. 14. Farma wiatrowa współpracująca z wysokotemperaturowym ogniwem paliwowym i zasobnikiem bateryjnym.

W dniu dzisiejszym koszt takich instalacji jest jednak zbyt duży i nie stosuje się ich powszechnie. Należy pamiętać także, że zasobniki energii muszą współpracować z przekształtnikami energoelektronicznymi, co także podnosi koszt całej instalacji. Jednak rozwój źródeł odnawialnych musi iść w parze z budową układów zasobnikowych opartych o zasobniki dynamiczne. Znajdzie to na pewno przełożenie w cenie energii elektrycznej.

ZAGROŻENIE DLA POLSKI – KONIECZNOŚĆ ZAKUPU DODATKOWYCH LIMITÓW NA EMISJĘ CO₂

Zmniejszające się w szybkim tempie limity na emisję CO₂, najbardziej dotyczą elektroenergetykę. Po obniżeniu limitów przez Unię Europejską, ministerstwo gospodarki stara się zmianę tę skompensować głównie zmniejszając limit dla elektrowni. Ma to związek z szerszymi możliwościami produkcji i zakupu energii elektrycznej niż towarów w innych branżach. Jeśli sytuacja związana z emisjami nie ulegnie w Polsce dynamicznym zmianom idącym w kierunku obniżenia emisji, dojdzie z pewnością do dużych podwyżek cen energii elektrycznej. Ważne jest, aby podwyżki te nie wiązały się z zakupem dodatkowej emisji od krajów, które mają nadwyżkę limitów CO₂ w porównaniu z produkcją, lub nie wiązały się z koniecznością zakupu energii elektrycznej od naszych sąsiadów. Wiązałyby się to z wypływaniem znacznej ilości środków finansowych, które można zatrzymać w Polsce.

Jednym ze sposobów utrzymania tych pieniędzy w Polsce jest rozbudowa sektora energetyki odnawialnej. Aby nie hamować naturalnego rozwoju OZE w Polsce musi nastąpić szereg inwestycji

na w systemie przesyłowym, ale także muszą być wprowadzone uproszczenia legalizacyjne. Jednak gdyby energetyka odnawialna rozwijała się prawidłowo, w pewnym momencie stosowanie zasobników energii stanie się konieczne. Podniesie to koszt energii, ale także podniesie pewność zasilania odbiorców i bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju.

Istotną rolę w poprawie sytuacji na polskim rynku elektroenergetycznym może odegrać energetyka jądrowa. Wśród głównych dostawców niewykorzystanych limitów emisji CO₂ wlicza się Francję, której system wytwórczy oparty jest o elektrownie jądrowe. Dzięki temu system francuski jest praktycznie bezemisyjny. Francuzi spodziewają się, że w związku z tym będą odbierać znaczne korzyści ze sprzedaży limitów do krajów ościennych. Budowa kilku elektrowni atomowych w Polsce znacznie poprawiłaby sytuację z limitami emisji CO₂. Dodatkowo wymiana, modernizacja i budowa nowych elektrowni opalanych węglem także mogłaby mieć pozytywny wpływ na zniwelowanie uciążliwości produkcji CO₂ w Polsce. Niestety bloki energetyczne w polskich elektrowniach charakteryzują się niższą sprawnością. Modernizacja i wykonywanie nowych bloków w nowoczesnych technologiach opartych o parametry nadkrytyczne pary, mogłoby doprowadzić do znacznego zwiększenia sprawności polskich elektrowni, a co za tym idzie do zniwelowania szkodliwych emisji.

Pamiętać jednak należy, że rozwój energetyki odnawialnej jest nieunikniony nawet przy budowie dużej ilości elektrowni systemowych o obniżonej emisji. Elektrownie oparte o odnawialne źródła są promowane nie tylko przez nakładanie limitów emisji CO₂, ale głównie przez obowiązek zakupu zielonych certyfikatów przez spółki obrotu energią. Gdy w Polsce będzie niedostatek źródeł odnawialnych, nastąpi konieczność zakupu certyfikatów w krajach połączonych z naszym systemem.

Literatura

- [1] M. Bartosik: *Globalny kryzys energetyczny - mit czy rzeczywistość?* Wybrane możliwości działań antykryzysowych w elektrotechnice. "X Międzynarodowa Konferencja „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce” Zakopane 2007
- [2] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo Energetyczne (Dz. U. z 2006r. Nr 89, poz. 625, z późn. zm.)
- [3] Ann-Marie Borbely, Jan F. Kreider: *Distributed Generation The Power Paradigm for the New Millennium*, CRC Press, Boca Raton, Floryda 2000
- [4] A. Dmowski, M. Kłos, Ł. Rosłaniec: *Symulacja komputerowa współpracy dynamicznego zasobnika z elektrownią wiatrową*, konferencja „Elektrownie Ciepłe” Bełchatów 2009
- [5] P. Biczek: *Optymalne wykorzystanie pierwotnych nośników energii na przykładzie hybrydowej elektrowni słonecznej z ogniwami paliwowymi*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 2003
- [6] S. Meier: *Novel voltage source converter based HVDC transmission system for offshore wind farms*, Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng., Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, 2005
- [7] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, Z. Chen, and M. Liserre: *Power converters and control of renewable energy systems*, in Proc. 6th Int. Conf. Power Electron., Oct. 18–22, 2004, vol. 1, pp. 1–20