

REGULACJA ROZPROSZONYCH ŹRÓDEŁ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W INSTALACJACH ON/OFF GRID

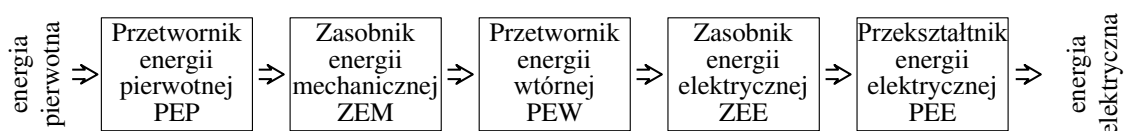
NOCOŃ Adrian

Streszczenie: W raporcie skrótowo przedstawiono technologie wytwarzania energii elektrycznej stosowane w źródłach rozproszonych, ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości dynamicznych (regulacyjnych) oraz wpływu ich pracy na odbiorniki energii i system elektroenergetyczny. Ponadto zaprezentowano wyniki badań związanych z właściwościami regulacyjnymi źródeł rozproszonych. Analizowano pracę on grid źródła w sieci niskiego napięcia, przejście fragmentu sieci (z zainstalowanymi kilkoma źródłami rozproszonymi) do pracy wyspowej oraz badano stany przejściowe trzech rodzajów zespołów wytwórczych pracujących autonomicznie (off grid).

Wprowadzenie. Wprowadzone zmiany w prawie energetycznym, poszukiwanie nowych obszarów działalności gospodarczej oraz rosnąca świadomość ekologiczna zaowocowały rozwojem energetyki rozproszonej. Szczególnie ważne w tym kontekście wydają się uproszczenia procedury przyłączania mikroźródeł, czyli źródeł energii elektrycznej o mocach do 40 kW, do sieci niskiego napięcia¹.

Pod pojęciem rozproszonych źródeł energii elektrycznej najczęściej rozumie się źródła o niewielkich mocach przyłączone do sieci dystrybucyjnej, w tym odnawialne źródła energii [5, 6, 7, 9, 10, 14, 26, 27, 29, 37, 39, 40, 44, 45, 46, 50, 51]. Jednym z podstawowych kryteriów podziału źródeł energii elektrycznej na źródła rozproszone i źródła wielkoskalowe jest jednostkowa moc danego źródła. Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto zmodyfikowaną wersją podziału opracowanego w ramach projektu badawczego zamawianego PBZ-MEiN-1/2/2006 „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju”, przy czym podział ten różni się od podziału zaproponowanego w dokumentach CIGRE. Do źródeł rozproszonych zalicza się źródła energii elektrycznej o mocach jednostkowych nie przekraczających 50 MW, przy czym wyróżnia się mikroźródło dla mocy jednostkowej od 0 do 40 kW², źródło średniej mocy (50 kW – 1 MW) oraz źródło dużej mocy (1 – 50 MW).

Kolejnym kryterium podziału rozproszonych źródeł energii elektrycznej jest zastosowana technologia przetwarzania energii. Ogólny schemat toru przetwarzania energii w źródle rozproszonym przedstawia rys. 1 [5, 6, 7, 9, 10, 14, 26, 27, 29, 37, 39, 40, 44, 45, 46, 50, 51]. W zależności od technologii w źródle mogą występować wszystkie lub tylko niektóre elementy toru przetwarzania energii. Wyróżnić można źródła z pośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną oraz źródła z bezpośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną. Obydwa rodzaje źródeł mogą być wyposażone z zasobniki energii.



Rys. 1. Tor przetwarzania energii elektrycznej w źródle rozproszonym.

¹ W najprostszej wersji, dla odbiorców końcowych nie prowadzących działalności gospodarczej, chcących przyłączyć źródło o mocy nie większej niż moc przyłączeniowa, procedura sprowadza się do montażu mikroźródła, zgłoszenia tego faktu operatorowi i przyłączenia go do sieci po podpisaniu umowy.

² Dodatkowo w mikroźródłach można wyróżnić moc 10 kW jako wartość graniczną stosowności jednostek wytwórczych z generatorami asynchronicznymi.

Biorąc pod uwagę stosowane obecnie technologie źródeł rozproszonych ogólny ich podział zestawiono w tabeli 1, przy czym dokładniejszą charakterystykę poszczególnych technologii przedstawiono w dalszej części pracy.

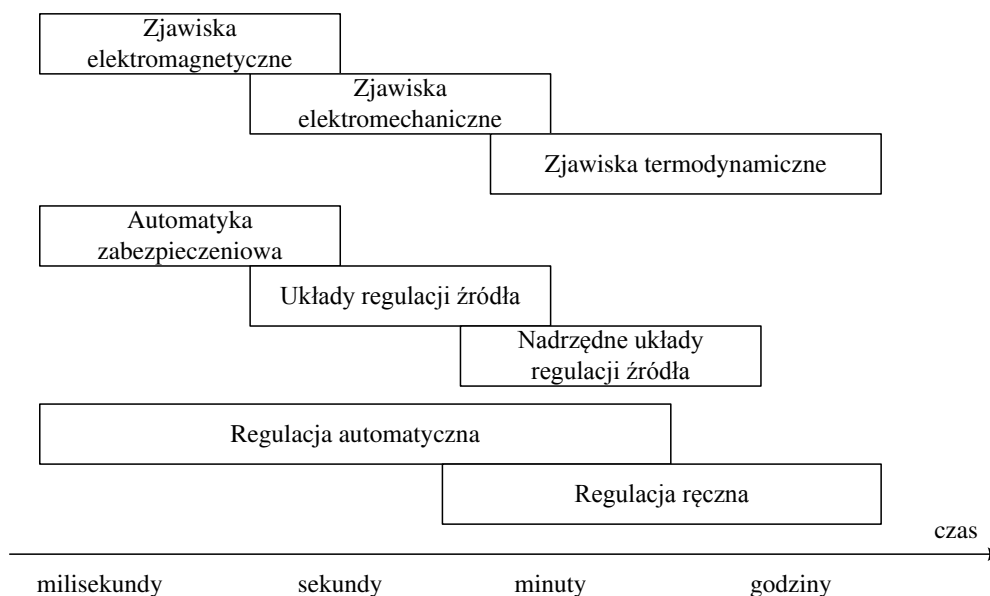
Tabela 1. Ogólna klasyfikacja elementów źródeł rozproszonych

Lp.	PEP	ZEM	PEW	ZEE	PEE
1	Silnik o spalaniu wewnętrznym	-	Generator synchroniczny	-	-
2		Koło zamachowe		-	-
3		-		-	Falownik
4		-		Akumulatory	
5		-	Generator asynchroniczny	-	-
6		-		-	Falownik
7		-		Akumulatory	
8	Silnik o spalaniu zewnętrznym	-	Generator synchroniczny	-	-
9		-		Akumulatory	Falownik
10	Turbina gazowa	-	Generator synchroniczny	-	-
11	Turbina wodna	-	Generator synchroniczny	-	-
12		-		-	Falownik
13		-		Akumulatory	
14		-	Generator asynchroniczny	-	-
15		-		-	Falownik
16		-		Akumulatory	
17	Turbina wiatrowa	-	Generator synchroniczny	-	-
18		-		-	Falownik
19		-		Akumulatory	
20		-	Generator asynchroniczny	-	-
21		-		-	Falownik
22		-		Akumulatory	
23	Ogniwo	-	-	-	Falownik
24	fotowoltaiczne	-	-	Akumulatory	
25	Ogniwo paliwowe	-	-	-	Falownik
26	Baterie akumulatorów	-	-	-	Falownik

Niezależnie od zastosowanej technologii wytwarzania energii elektrycznej, dane źródło może być lub nie być połączone z systemem elektroenergetycznym [34]. Praca wyspowa źródła – *off grid*, inaczej nazywana autonomiczną, samotną lub na sieć wydzieloną, charakteryzuje się tym, że ze źródłem nie jest połączone żadne inne źródło energii elektrycznej. Natomiast praca równoległa – *on grid* – charakteryzuje się tym, że w sieci występują co najmniej dwa źródła energii elektrycznej wzajemnie ze sobą powiązane. W takim przypadku dla danego źródła można mówić o pracy na sieć sztywną lub na sieć elastyczną. W pracy na sieć sztywną, parametry napięcia sieci (wartość skuteczna napięcia i częstotliwość) nie zależą od stanu źródła, czyli są wymuszone przez inne źródła pracujące w tej sieci. Oczywiście przypadek ten jest czysto teoretyczny, chociażby ze względu na istnienie impedancji linii łączącej źródło i sieć elektroenergetyczną, powodującej spadki napięcia, czyli zmiany napięcia w miejscu przyłączenia źródła. Drugim przypadkiem jest praca na sieć elastyczną, w której stan źródła ma wpływ na parametry sieci. W niektórych przypadkach, gdy wpływ źródła na sieć jest znikomy, dla uproszczenia analizy można przyjąć, że dane źródło współpracuje z siecią sztywną.

Do podstawowych cech źródła, należą jego zdolności regulacyjne (dynamiczne), przy czym zdolności te zależą od przyjętej technologii wytwarzania energii elektrycznej i od właściwości układu regulacji i zabezpieczeń [1, 2, 4, 8, 10, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24,

25, 31, 32, 33, 38, 41, 48, 52]. Jednym z podstawowych kryteriów podziału zjawisk dynamicznych jest ich czas trwania. Graficzną interpretację horyzontów czasowych zjawisk dynamicznych przedstawiono na rys. 2., przy czym stany przejściowe źródła z bezpośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną (w tym proces włączenia i wyłączenia źródła) zazwyczaj zachodzą szybciej niż stany przejściowe źródła z pośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną.



Rys. 2. Horyzonty czasowe zjawisk dynamicznych zachodzących w źródłach rozproszonych.

Charakterystyka źródeł rozproszonych z pośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną

W źródłach rozproszonych z pośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną zachodzą dwie lub trzy przemiany energetyczne, przy czym energią pierwotną jest energia chemiczna paliwa spalane w silniku lub poza nim, energia słoneczna, energia wody, energia gorącego gazu lub energia wiatru.

Pierwsza z przemian, nie zawsze występująca w źródłach rozproszonych, to przemiana energii pierwotnej na energię cieplną. Druga to przemiana energii cieplnej (lub pierwotnej) w energię mechaniczną. Dla uproszczenia w dalszej części, niezależnie od technologii, obie przemiany potraktowano łącznie przyjmując, że w źródle z pośrednim przetwarzaniem energii zachodzi przemiana energii pierwotnej w energię mechaniczną. Wśród obecnie stosowanych technologii, do przetwarzania energii pierwotnej na energię mechaniczną wykorzystuje się między innymi [3, 5, 7, 9, 10, 12, 29, 37, 40, 45, 46, 50, 51]:

- **Silnik tłokowy o spalaniu wewnętrznym.** Fundamentalnym zjawiskiem decydującym o właściwościach silnika spalinowego jest proces spalania mieszanki. Z procesem spalania związana jest również nieliniowa zależność mocy i prędkości obrotowej silnika. Nieliniowość ta zależy od rodzaju silnika. Mimo bardzo burzliwych procesów fizykochemicznych zachodzących w czasie spalania praca silnika tłokowego o spalaniu wewnętrznym jest zazwyczaj stabilna, tym samym moc mechaniczna dostarczana do kolejnego przetwornika ma stałą w czasie wartość. Moce źródeł rozproszonych wyposażonych w silniki tłokowe sięgają kilkuset kW. Źródła rozproszone z silnikami tłokowymi pracują, w zależności od zastosowanego paliwa, jako źródła awaryjne (zasilanie olejem napędowym lub etyliną) lub

jako źródła o pracy ciągłej, w tym w układach kogeneracyjnych (zasilane biogazem lub gazem ziemnym). Regulacja silnika polega na zmianie ilości dostarczanego paliwa, a jej dynamika jest ograniczona bezwładnością układu paliwowego i bezwładnością samego silnika zależną od jego mocy.

- **Silnik cieplny o spalaniu zewnętrznym.** Właściwości tłokowego silnika o spalaniu zewnętrznym praktycznie nie są uzależnione od zjawisk zachodzących podczas spalania paliwa. Decydujące znacznie mają parametry gazu (spalin) lub pary zasilającej silnik. Zazwyczaj źródła z silnikiem cieplnym o spalaniu zewnętrznym (np. tłokowym silnikiem parowym) pracują stabilnie nie zmieniając swoich parametrów. Moce jednostkowe takich źródeł sięgają kilku MW³. Regulacja takiego silnika polega na zmianie ilości i parametrów dostarczanego gazu, co wiąże się z procesem termodynamicznym zachodzącym w zewnętrznym układzie wytwarzania gazu. Dynamika regulacji w tym przypadku, może być zatem mniejsza niż dla silnika o spalaniu wewnętrznym.

- **Turbinę gazową.** W turbinie tej następuje przemiana energii kinetycznej ruchu medium lub energii potencjalnej medium pod dużym ciśnieniem na ruch obrotowy turbiny. Turbiny gazowe mogą pracować jako urządzenia niezależne lub w układach złożonych współpracując z turbinami parowymi ewentualnie z silnikami tłokowymi. Ze względu na stałe zasilanie turbiny gazowej w medium napędowe, źródła rozproszone wyposażone w takie turbiny pracują stabilnie przy ustalonych parametrach pracy. Moce jednostkowe turbin gazowych stosowanych w źródłach rozproszonych (w zależności od rodzaju turbiny) zawarte są w przedziale od kilkudziesięciu kW do 50 MW. Regulacja parametrów pracy turbiny gazowej polega, podobnie jak dla silnika cieplnego o spalaniu zewnętrznym, na zmianie ilości i parametrów dostarczanego gazu. Wiaże się zatem z procesami termodynamicznymi zachodzącymi w układzie wytwarzania gazu i jest o nich silnie uzależniona.

- **Turbinę wodną.** Turbina wodna przetwarza energię kinetyczną wody na energię mechaniczną. Niezależnie od rodzaju turbiny jej moc nieliniowo zależy od spadku wody. Dynamika wytwarzania mocy w turbinie wodnej zależy od dynamiki mas wody w ruchu oraz dynamiki układów regulacji współpracujących z turbiną, przy czym fluktuacje strumienia wody zazwyczaj są niewielkie, a zatem turbiny wodne są stabilnymi źródłami energii mechanicznej. Moce jednostkowe stosowanych w źródłach rozproszonych turbin wodnych wahają się w granicach od kilkunastu kW do 50 MW. Ze względu na dużą bezwładność mas wody, regulacja turbiny wodnej jest zazwyczaj powolna i wiąże się ze znacznym wydatkiem energetycznym (np. konieczność zmiany położenia masywnych zaworów).

- **Turbinę wiatrową.** Turbina wiatrowa służy do przetwarzania energii kinetycznej mas powietrza (wiatru) na energię mechaniczną. Przetwarzanie to zachodzi z wykorzystaniem zjawisk aerodynamicznych. Moc mechaniczna na wale turbiny wiatrowej silnie i nieliniowo zależy od prędkości wiatru. W związku z tym moc dostarczana do systemu elektroenergetycznego przez siłownię wiatrową jest uzależniona od siły wiatru, co przy uwzględnieniu zmieniających się warunków pogodowych powoduje niestabilną pracę źródła rozproszonego z turbiną wiatrową. Regulacja turbiny wiatrowej polega na zmianie parametrów przetwarzania siły wiatru na energię mechaniczną (np. zmiana kąta natarcia łopat turbiny), a jej możliwości są silnie powiązane z aktualnymi parametrami wiatru. Z tych powodów procesy regulacyjne zazwyczaj zachodzą wolno.

Drugą przemianę energetyczną w omawianych źródłach rozproszonych (przemianę energii mechanicznej na energię elektryczną) realizuje generator synchroniczny lub asynchroniczny. Oba rodzaje generatorów dokonują przemiany energii mechanicznej na elektryczną z udziałem pola magnetycznego przy wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej.

³ Przykładem zastosowania źródeł z silnikiem cieplnym o spalaniu zewnętrznym może być przemysł papierniczy, w którym do zasilania silnika wykorzystuje się parę odpadową z procesu produkcji papieru.

Niezależnie od rodzaju generatora może on dokonywać przemiany przy stałej lub zmiennej częstotliwości generowanego napięcia. Przy czym energia elektryczna wytworzona w generatorze pracującym ze zmienną częstotliwością, aby mogła zostać wykorzystana przez wydzielone odbiorniki prądu przemiennego (dla pracy *off grid*) lub zostać dostarczona do systemu elektroenergetycznego (dla pracy *on grid*), musi zostać przetworzona na energię o stałym napięciu i częstotliwości. Dostosowanie parametrów energii elektrycznej do parametrów sieci lub odbiorników wydzielonych zachodzi w przekształtniku energii elektrycznej, najczęściej przekształtniku energoelektronicznym. Właściwości regulacyjne obu rodzajów generatorów różnią się zasadniczo. Regulacja generatora synchronicznego polega na zmianach momentu napędowego i zmianach wartości prądu wzbudzenia. Dynamika obu tych procesów zależy od mocy generatora (zazwyczaj, im większy generator tym proces regulacji zachodzi wolniej). Natomiast generatory asynchroniczne praktycznie nie podlegają regulacji. Wyjątkiem jest generator asynchroniczny pierścieniowy dwustronnie zasilany, w którym poprzez zmiany prądu doprowadzanego do uzwojenia wirnika można wpływać na parametry pracy generatora.

Niezależnie od zastosowanych przetworników energii w źródle rozproszonym może zostać zastosowany zasobnik energii (rys. 1) lub przekształtnik energii. Do zasobników energii można zaliczyć koła zamachowe służące do magazynowania energii mechanicznej oraz akumulatory i superkondensatory służące do magazynowania energii elektrycznej. Zastosowanie zasobnika energii zwiększa pewność dostawy energii elektrycznej w sytuacji chwilowego braku energii pierwotnej. Ponadto w niektórych przypadkach może umożliwić samorozruch źródła

Charakterystyka źródeł rozproszonych z bezpośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną

Do źródeł z bezpośrednim przetwarzaniem energii pierwotnej na energię elektryczną zalicza się między innymi [6, 7, 9, 10, 16, 29, 35, 36, 47, 49]:

- **Ogniwa fotowoltaiczne.** W ogniwie fotowoltaicznym zachodzi bezpośrednia przemiana energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. U podstaw działania ogniwa leży zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne zachodzące złącza półprzewodnikowym. Moc produkowana w ogniwie zależy od ilości promieniowania słonecznego docierającego do jego powierzchni. Zmienne warunki pogodowe powodują zmiany mocy produkowanej w ogniwie, w związku z tym ogniwa fotowoltaiczne często współpracują z zasobnikami energii (np. bateriami akumulatorów) co stabilizuje ich pracę. Ogniwo fotowoltaiczne produkuje energię elektryczną o napięciu stałym, zatem aby mogło współpracować z odbiornikiem prądu przemiennego lub systemem elektroenergetycznym musi być wyposażone w przekształtnik energoelektroniczny. Właściwości dynamiczne ogniw fotowoltaicznych związane są z warunkami pogodowymi (zmianami natężenia światła słonecznego) oraz, dla ogniw współpracujących z przekształtnikami, z właściwościami dynamicznymi przekształtnika i jego układu regulacji. Zmiany natężenia światła powodują powolne zmiany parametrów źródła, natomiast zjawiska związane z działaniem przekształtnika i układu regulacji zazwyczaj zachodzą w stosunkowo krótkim czasie.

- **Ogniwa paliwowe.** Ogniwo to generuje energię elektryczną wykorzystując zjawiska towarzyszące reakcji utleniania paliwa, które stale jest do ogniwa dostarczane. W źródłach rozproszonych najczęściej stosowane są ogniwa zasilane wodorem. Ogniwo paliwowe jest jednym z najstabilniejszych źródeł energii elektrycznej. Jego możliwości współpracy z systemem elektroenergetycznym i odbiornikami zależą od zastosowanego układu sterowania procesem przetwarzania energii. Moce jednostkowe ogniw paliwowych sięgają 5 MW.

Ogniwa paliwowe o mniejszych mocach (rzędu kilowatów) stosowane są jako elementy uzupełniające złożonych systemów energetyki odnawialnej (np. systemy hybrydowe złożone z mikro biogazowni, siłowni wiatrowej, kolektorów słonecznych i ogniwa paliwowego, w których energia magazynowana jest w postaci wodoru) lub jako źródła awaryjnego zasilania. Podobnie jak ogniwa fotowoltaiczne, ogniwa paliwowe współpracują z przekształtnikami energoelektronicznymi, które mają zasadnicze znaczenie dla dynamiki całego układu.

Wybrane problemy regulacji źródeł rozproszonych

Niezależnie od stanu pracy źródła rozproszonego (on czy off grid) ma ono wpływ na pracę systemu elektroenergetycznego lub jego wydzielonej części (praca wyspowa kilku źródeł rozproszonych) [5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 30, 34, 40, 41, 42, 43, 44, 45]. Dla pracy on grid wpływ ten wynika z bezpośredniego przyłączenia źródła do systemu i jest tym większy, im źródło jest z systemem silniej powiązane i ma większą moc. Natomiast dla pracy off grid wpływ na system związany jest z jego obciążeniem, a dla źródła i jego obciążenia pojawiają się problemy związane z interakcją źródło – odbiorniki (w szczególności interakcją układów regulacji zainstalowanych w źródle i odbiorniku).

Przepływ mocy w systemie elektroenergetycznym i warunki napięciowe

System elektroenergetyczny został zbudowany w taki sposób, aby energia z dużych, scentralizowanych jednostek wytwórczych (źródeł wielkoskalowych) przesyłana przez sieć przesyłową była dostarczana siecią dystrybucyjną do rozproszonych odbiorców. Przesył energii w takim systemie odbywa się w jednym kierunku od centralnego wytwórcy do rozproszonego odbiorcy. Przyłączenie do systemu źródeł rozproszonych, w szczególności źródeł niewielkich mocy pracujących w sieci dystrybucyjnej, powoduje, że przepływ przestaje być jednokierunkowy, tzn. sieć dystrybucyjna zasilana jest nie tylko od strony sieci przesyłowej. Taki stan pracy systemu wymaga odmiennej od dotychczasowej filozofii zabezpieczania systemu, a w szczególności sieci dystrybucyjnej. Dwustronne zasilanie linii jest charakterystyczne dla sieci przesyłowej najwyższych napięć. Pojawia się, zatem potrzeba przeniesienia filozofii pracy sieci przesyłowej na sieć dystrybucyjną w tym sieć niskiego napięcia, łącznie z procedurami regulacji źródeł wytwórczych.

Wielostronne zasilanie, zwłaszcza w sieci dystrybucyjnej powoduje zmianę warunków napięciowych. Bez źródeł rozproszonych linie sieci dystrybucyjnej (głównie promieniowe – otwarte) są tak dobrane, aby napięcie na ich końcu przy pełnym obciążeniu nie wykraczało poza dopuszczalne granice. Przyłączenie źródła rozproszonego powoduje zakłócenie tego warunku, poprzez podniesienie napięcia w punkcie przyłączenia źródła a w konsekwencji, we wszystkich węzłach sieci za źródłem rozproszonym (sytuacja się komplikuje w przypadku źródeł niestabilnych, dla których zmiany napięcia w punkcie przyłączenia źródła mogą mieć charakter przypadkowy, np. dla siłowni wiatrowej). Przeciwdziałanie takim zjawiskom zazwyczaj polega na odpowiedniej regulacji źródła rozproszonego i doborze punktu pracy transformatora zasilającego dany fragment sieci [6, 9, 12, 13, 15, 44].

Problemy związane z utrzymaniem napięcia sieci na dopuszczalnym poziomie dotyczą również pracy *off grid* źródła (praca autonomiczna z jednym odbiornikiem oraz praca na sieć wydzieloną) i związane są z właściwościami regulatora napięcia zainstalowanego w źródle

oraz interakcji źródło – odbiornik wynikającej ze zmian parametrów pracy odbiornika wywołanymi zmianami napięcia źródła [20].

Stany przejściowe źródeł rozproszonych dla pracy on-grid

Wpływ źródeł rozproszonych na system elektroenergetyczny w stanach przejściowych zależy od kilku czynników, między innymi od mocy źródła (źródeł) przyłączonego do systemu, od miejsca przyłączenia źródła oraz od właściwości dynamicznych źródła (właściwości elementów składowych źródła i ich układów regulacji) [6, 9, 12, 13, 15, 17, 44]. Przy czym można przyjąć, że im mniejszej mocy źródło tym oddziaływanie na system będzie mniejsze.

Dokonując analizy możliwych miejsc przyłączenia źródeł rozproszonych, można wyróżnić następujące charakterystyczne przypadki oddziaływań dynamicznych źródeł na system elektroenergetyczny:

- Źródło rozproszone przyłączone daleko⁴ od innych źródeł, w tym innych źródeł rozproszonych i źródeł wielkoskalowych. W takim przypadku występuje słabe powiązanie dynamiki źródła z dynamiką systemu, a zatem nie są w dostateczny sposób tłumione kołysania mocy chwilowej źródła⁵. Sytuacja taka może zaistnieć, gdy źródło o niewielkiej mocy przyłączone zostanie do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia (np. sieci wiejskiej). Powoduje to, że każde zakłócenie występujące w pobliżu źródła rozproszonego wywołuje zaburzenia jego pracy mogące niekorzystnie wpływać na stabilność źródła i warunki napięciowe w sieci. Źródło takie (przy odpowiednich założeniach) może być uznane za źródło pracujące autonomicznie. W takim przypadku poprawę stabilności pracy źródła, a w konsekwencji warunków zasilania panujących w pobliżu źródła, można uzyskać między innymi poprzez odpowiednio dobrany układ regulacji źródła lub poprzez wzmocnienie powiązania źródła z systemem.

- Źródło rozproszone przyłączone blisko źródeł wielkoskalowych. Sytuacja taka zachodzi najczęściej w przypadku źródeł rozproszonych stosunkowo dużych mocy (lub zespołu źródeł, np. farm wiatrowych) przyłączonych do sieci przesyłowej lub sieci dystrybucyjnej najwyższych napięć. Przyłączenie takie najczęściej nie wywołuje niekorzystnych zjawisk. Jednakże częstszym przypadkiem jest sytuacja, w której to praca źródła rozproszonego może być zagrożona przez pracę systemu, np. poprzez wpływ automatyki SPZ (samoczynne ponowne załączenie) na dynamikę źródła rozproszonego.

- Źródło rozproszone przyłączone blisko źródeł energetyki zawodowej (elektrownie, elektrociepłownie) lub przemysłowej (elektrownie przyzakładowe, np. kopalnie) o niewielkich mocach. Ten rodzaj współpracy źródła rozproszonego z systemem jest zbliżony do wyżej opisanego. Jednakże w tym przypadku moce źródeł rozproszonych porównywalne są z mocami źródeł energetyki zawodowej lub przemysłowej (najczęściej są to źródła z turbinami parowymi i generatorami synchronicznymi). W związku z tym interakcje źródeł mogą mieć dużo większe znaczenie dla stabilnej pracy wszystkich współpracujących źródeł. Problemem współpracy źródła rozproszonego ze źródłem energetyki zawodowej lub przemysłowej jest fakt, że te drugie źródła najczęściej nie są wyposażone w pełni

⁴ Określenia miejsca przyłączenia źródła (blisko lub daleko innych źródeł) należy rozumieć jako siłę powiązania danego źródła z systemem. Przykładowo dla przyłączenia bliskiego innym źródłom występuje silne powiązanie poprzez sieć (upraszczając można założyć że połączenie między źródłami ma niewielką impedancję) a zatem znaczna interakcja źródeł.

⁵ Oczywiście zakres kołysań mocy chwilowych oraz innych zjawisk dynamicznych zależy od technologii zastosowanych w źródle.

funkcjonalne układy regulacji - nie posiadają stabilizatorów systemowych. W konsekwencji stanów przejściowych źródeł rozproszonych (np. awaryjne ich wyłączenie) może następować utrata stabilności przez źródła przemysłowe.

- Źródło rozproszone przyłączone blisko innych źródeł rozproszonych. W odróżnieniu od wyżej opisanych przypadków, taka sytuacja zachodzi w systemie o dużym nasyceniu źródłami rozproszonymi. Przy czym może ona zachodzić globalnie (w tym dla fragmentu systemu pracującego jako wydzielona wyspa) lub lokalnie w systemie, niezależnie od mocy źródeł i rodzaju sieci do jakiej źródła przyłączono. Interakcja źródeł rozproszonych może prowadzić do awarii systemowych łącznie z rozpadem systemu. Powodem tego jest nieskorelowanie parametrów poszczególnych układów regulacji, a tym samym wzmacnianie kołysań elektromechanicznych występujących w obszarze oddziaływań współdziałających źródeł. Przepadek taki może zachodzić nawet w niewielkiej skali, np. na obszarze sieci średniego napięcia zakładu przemysłowego, w którym pracuje kilka źródeł rozproszonych z błędnie dobranymi parametrami układów regulacji.

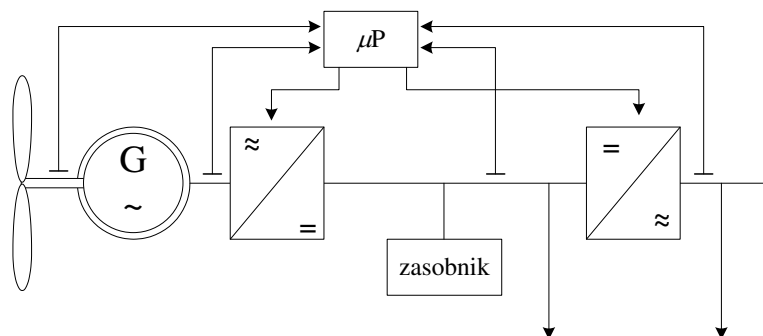
Stany przejściowe źródeł rozproszonych dla pracy off-grid

Źródło rozproszone pracujące poza siecią (*off grid*), może podlegać ciągłym zmianą obciążenia, które w konsekwencji prowadzą do zmiany parametrów energii elektrycznej, w tym napięcia i częstotliwości. Większość odbiorników wymaga zasilania o stałych parametrach⁶, w związku z tym konieczne jest stałe korygowanie tych zmian. W celu zapewnienia dostatecznie szybkiej korekcji zmian parametrów napięcia, w źródłach rozproszonych zazwyczaj stosuje się układy regulacji automatycznej [6, 9, 12, 13, 15, 17, 20, 22, 44].

Sposób regulacji parametrów napięcia źródła rozproszonego w głównej mierze zależy od zastosowanej technologii przetwarzania energii pierwotnej na energię elektryczną. Można wyróżnić dwie podstawowe grupy źródeł, różniące się zasadniczo właściwościami dynamicznymi. Do pierwszej grupy zalicza się źródła, w których elementem wyjściowym źródła jest przekształtnik energoelektroniczny (por. tabela 1). Drugą grupę stanowią źródła z generatorami synchronicznymi i asynchronicznymi do zacisków, których przyłączone są odbiorniki.

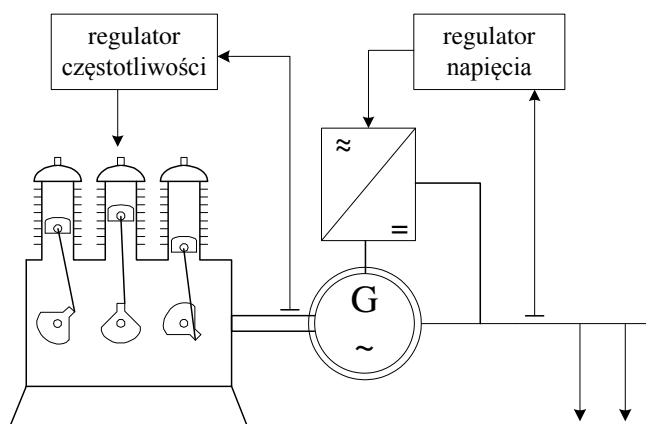
Dla źródeł, w których pomiędzy przetwornikami energii a odbiornikami zainstalowano przekształtnik energii elektrycznej, w literaturze nazywany przekształtnikiem sieciowym, układ regulacji parametrów napięcia wpływa na tenże przekształtnik (przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 3). W związku z tym parametry dynamiczne całego źródła w głównej mierze uzależnione są od parametrów przekształtnika i jego układu regulacji. Obecnie zastosowanie szybkich zaworów energoelektronicznych i mikroprocesorowych układów regulacji, gwarantuje bardzo szybką regulację i stabilność pracy takiego źródła.

⁶ Można wyróżnić odbiorniki, które nie wymagają stałego zasilania, np. sprzęt elektroniczny w tym RTV, gdyż są one wyposażone w zasilacze impulsowe zdolne do utrzymania napięcia zasilania układów elektronicznych na wymaganym poziomie mimo wahań parametrów napięcia sieci. Jednakże odbiorniki te współlistnieją w sieci z odbiornikami bardzo wrażliwymi na zmiany napięcia, np. oświetlenie żarowe (halogenowe) i lodówki wyposażone w silniki asynchroniczne. W związku z tym, w całej sieci wymagane jest utrzymanie napięcia i częstotliwości na stałym poziomie.



Rys. 3. Przykład układu regulacji źródła z sieciowym przekształtnikiem energii elektrycznej

Dla źródeł należących do drugiej grupy układ regulacji w celu utrzymania stałych parametrów napięcia (jego wartości skutecznej i częstotliwości) musi oddziaływać na dwa przetworniki energii. Utrzymanie stałej wartości skutecznej napięcia wymaga wpływu na generator, a utrzymanie stałej częstotliwości związane jest ze zmianami stanu pracy przetwornika mocy energii mechanicznej (silnika lub turbiny). Ponadto innych działań regulatora wymaga źródło wyposażone w generator synchroniczny a innych w generator asynchroniczny. Dla źródła z generatorem synchronicznym, utrzymanie stałej wartości skutecznej napięcia wymaga zmiany prądu wzbudzenia, a utrzymanie stałej częstotliwości wymaga stałej prędkości obrotowej generatora. Natomiast dla źródła z generatorem asynchronicznym, utrzymanie stałej wartości skutecznej napięcia wymaga zmiany mocy biernej dostarczanej do generatora (np. poprzez zmianę pojemności baterii kondensatorów), a utrzymanie stałej częstotliwości wymaga zmiany prędkości obrotowej generatora. W związku z taką strukturą układu regulacji (rys. 4) właściwości dynamiczne źródła zależą do dynamiki zjawisk elektromechanicznych zachodzących w generatorze i silniku napędowym (turbinie). Dla uproszczenia można założyć, że im źródło jest mniejszej mocy, tym stany przejściowe związane z regulacją napięcia i częstotliwości zachodzą w krótszym czasie, jednakże i tak znacząco dłuższym niż dla źródeł z przekształtnikiem sieciowym.



Rys. 4. Przykład układu regulacji źródła z generatorem synchronicznym

Dla drugiej grupy mogą wystąpić ponadto niekorzystne interakcje pomiędzy źródłem a odbiornikiem. Przykładem takiej sytuacji może być współpraca źródła rozproszonego z silnikiem spalinowym i generatorem synchronicznym oraz odbiornika w postaci silnika asynchronicznego. W czasie rozruchu silnika asynchronicznego następuje gwałtowny wzrost prądu obciążenia źródła, który powoduje działanie układu regulacji napięcia (układ regulacji zwiększa prąd wzbudzenia generatora w celu utrzymania napięcia na zadanym poziomie) i układu regulacji prędkości obrotowej silnika spalinowego (wzrost ilości paliwa dostarczanego

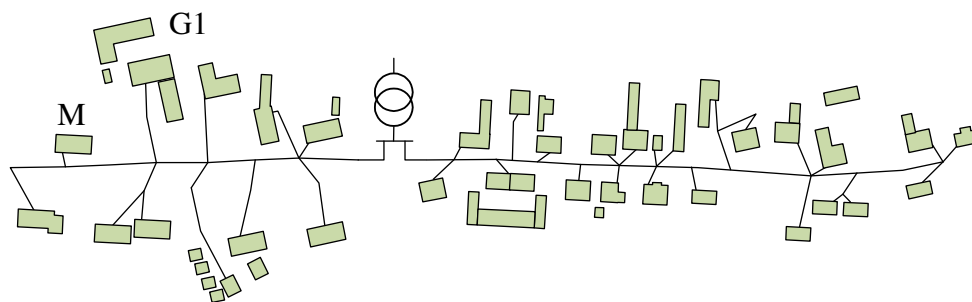
do silnika). W miarę narastania prędkości silnika asynchronicznego prąd maleje, co powoduje wzrost napięcia źródła i konieczność obniżenia prądu wzbudzenia i ilości paliwa. Przy źle dobranych parametrach układu regulacji, zbyt gwałtowne obniżenie prądu wzbudzenia wywołane przez układ regulacji napięcia może powtórnie doprowadzić do nagłego wzrostu prądu silnika asynchronicznego. W konsekwencji w układzie mogą pojawić się groźne oscylacje.

Wybrane badania stanów przejściowych źródeł rozproszonych

Przedstawiono wybrane badania stanów przejściowych źródeł rozproszonych pracujących on/off grid [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 48]. W pierwszym podrozdziale przedstawiono pracę on grid źródła w sieci niskiego napięcia, w drugim przejście fragmentu sieci (z zainstalowanymi kilkoma źródłami rozproszonymi) do pracy wyspowej a w trzecim, pracę autonomiczną kilku rodzajów zespołów wytwórczych. Przedstawione badania mają charakter poglądowy i nie wyczerpują tematu analizy regulacji źródeł rozproszonych.

Regulacja i stany przejściowe mikroźródeł z generatorem synchronicznym i asynchronicznym pracujących w sieci niskiego napięcia

W przykładzie rozważano sieć dystrybucyjną niskiego napięcia, zbudowaną w większości jako sieć napowietrzna. Sieć zasilana jest z transformatora o mocy znamionowej $S_n = 250$ kV·A i przekładni napięciowej 20 kV/0,4 kV. Do sieci przyłączone są 34 nieruchomości. Na potrzeby badań przyjęto, że w sieci pracuje źródło rozproszone G1 (np. kogenerator) o elektrycznej mocy znamionowej $S_n = 10$ kV·A. Schemat topograficzny analizowanej sieci z miejscem zainstalowania źródła rozproszonego przedstawiono na rys. 5. Ponadto w analizowanej sieci zamodelowano jeden odbiornik w postaci asynchronicznego silnika prądu przemiennego (oznaczonego literą M) o mocy znamionowej równej $P_n = 4$ kW.



Rys. 5. Schemat topograficzny analizowanej sieci.

W modelu układu regulacji źródła z generatorem synchronicznym uwzględniono regulator mocy wypracowujący sygnał sterujący dla silnika napędowego oraz regulator napięcia sterujący przekształtnikiem w obwodzie wzbudzenia generatora synchronicznego. W przypadku źródła z generatorem asynchronicznym, model układu regulacji obejmował jedynie regulator mocy (dla źródła z generatorem asynchronicznym, stale współpracującego z siecią

nie wymaga się stosowania regulatora napięcia). Ponadto zamodelowano baterię kondensatorów służącą do bilansowania mocy biernej źródła.

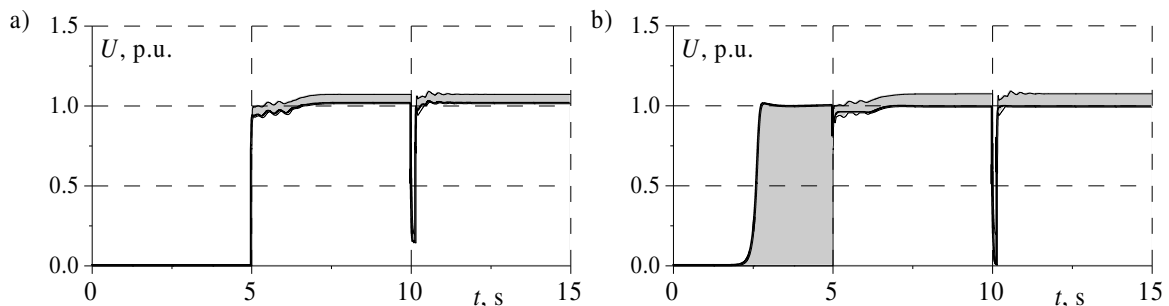
Parametry wszystkich regulatorów dobrano eksperymentalnie, korzystając z zaleceń producentów układów regulacji zespołów wytwórczych małej mocy.

Badania symulacyjne analizowanego układu obejmowały następujący cykl pracy:

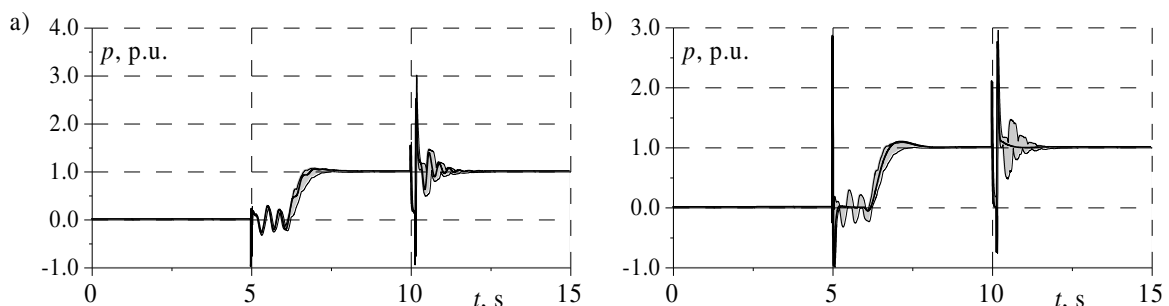
- rozruch silnika spalinowego, prędkość narasta od zera do prędkości bliskiej prędkości synchronicznej,
- przyłączenie generatora do sieci (w chwili $t_1 = 5$ s – bezpośrednio dla generatora asynchronicznego lub metodą samosynchronizacji dla generatora synchronicznego),
- przemijający zanik napięcia na szynach średniego napięcia transformatora 20 kV/0,4 kV (zanik napięcia trwający 150 ms zaczynający się w chwili $t_2 = 10$ s).

Ponadto w przeprowadzonych badaniach uwzględniono niepewność parametrów modeli matematycznych analizowanego układu. Uwzględnienie niepewności parametrów związane jest z brakiem wiarygodnych danych poszczególnych elementów układu i zmiennością obciążenia sieci.

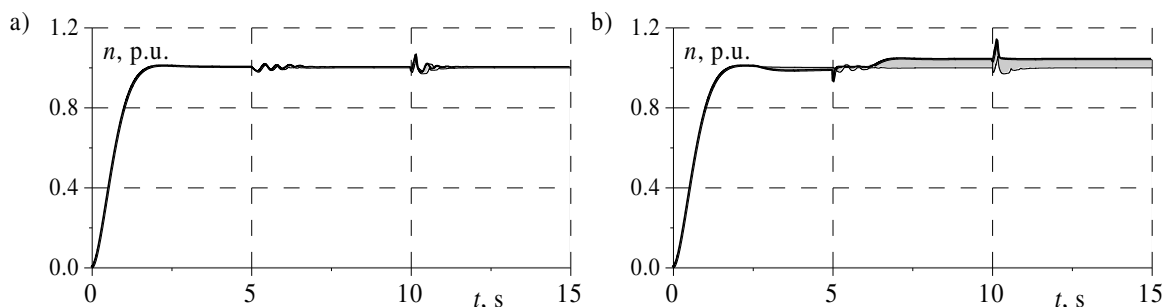
Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6 do 8, gdzie na tle pasm granicznych przebiegów (pasma przebiegów są wynikiem uwzględnienia niepewności parametrów modeli matematycznych), umieszczono przebiegi wartości skutecznej napięcia twornika $U(t)$, mocy chwilowej $p(t)$ i prędkości obrotowej $n(t)$ źródła



Rys. 6. Przebiegi napięcia twornika generatora synchronicznego (a) i asynchronicznego (b).



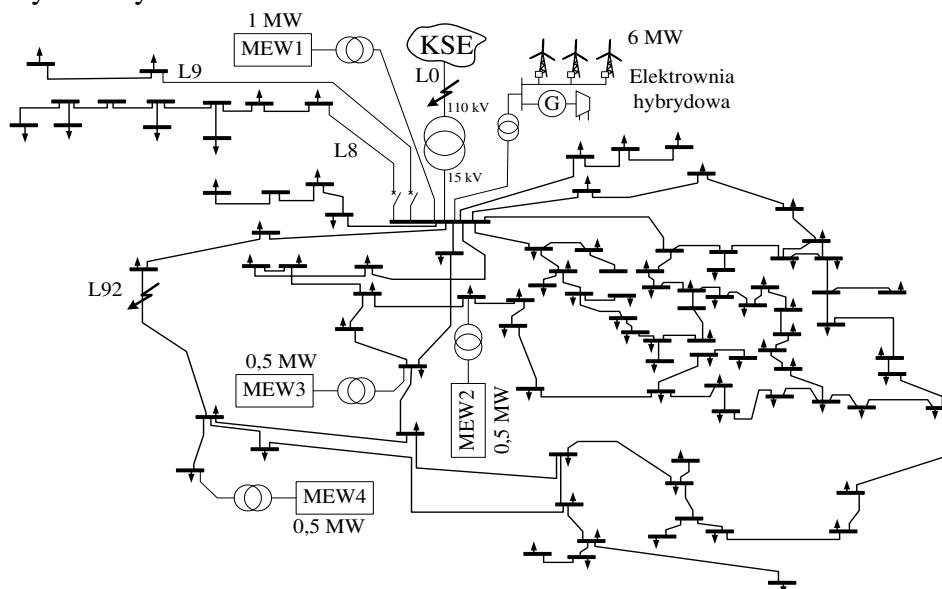
Rys. 7. Przebiegi mocy chwilowej generatora synchronicznego (a) i asynchronicznego (b).



Rys. 8. Przebiegi prędkości obrotowej generatora synchronicznego (a) i asynchronicznego (b).

Regulacja i stany przejściowe źródeł pracujących w sieci średniego napięcia

Przedstawiona w przykładzie analiza dotyczy sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym równym 15 kV, stanowiącej fragment Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. W badaniach zamodelowano sieć obejmującą obszar o powierzchni około 100 km². Na potrzeby analizy przyjęto, że w sieci zainstalowana jest jedna wiatrowo-gazowa elektrownia hybrydowa o mocy 6 MW, w której skład wchodziły trzy siłownie wiatrowe o mocy jednostkowej 1 MW oraz jeden turbozespół zasilany biogazem o mocy znamionowej 3 MW. Ponadto do sieci przyłączone były cztery małe elektrownie wodne, jedna o mocy 1 MW (MEW1) i trzy o mocy 0,5 MW każda (MEW2÷4). Strukturę analizowanego systemu przedstawiono na rys. 9, na którym zaznaczono miejsca przyłączenia poszczególnych jednostek wytwórczych i ich moce znamionowe.



Rys.9. Struktura analizowanej sieci dystrybucyjnej

W przykładzie rozpatrywano stan przejściowy związany z przejściem wybranego fragmentu systemu z pracy w KSE (*on grid*) do pracy wyspowej (*off grid*), przy czym poszczególne źródła cały czas współpracowały z siecią (*on grid*), z tą tylko różnicą, że najpierw współpracowały z całym KSE a potem tylko z jego wydzielonym fragmentem.

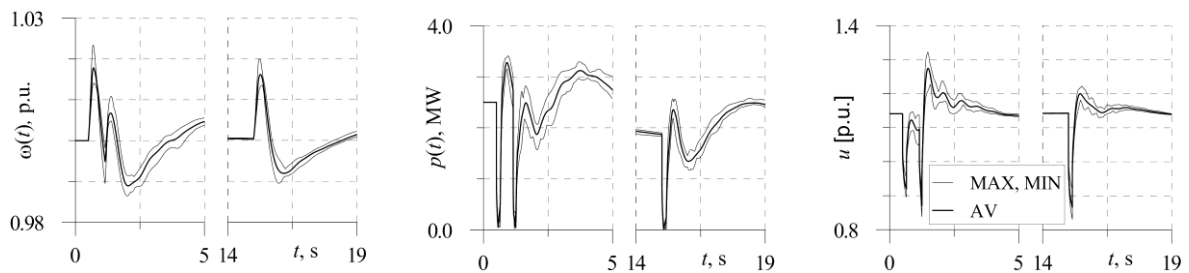
Na potrzeby analizy przyjęto, że KSE dostarcza do rozpatrywanej sieci 23,5 % zapotrzebowanej mocy czynnej. Pozostałe 76,5 % pokrywają źródła rozproszone. W związku z takim podziałem mocy, nie ma możliwości zbilansowania sieci dla pracy wyspowej. Przyjęto więc, że w momencie wydzielania się wyspy, automatycznie zostają wyłączone linie L9 i L8 (rys. 9). W celu zapewnienia poprawnej pracy wyspowej układ regulacji elektrowni hybrydowej wyposażono w regulatory napięcia i częstotliwości.

W badaniach symulacyjnych założono następującą sekwencję zdarzeń występujących w analizowanej sieci:

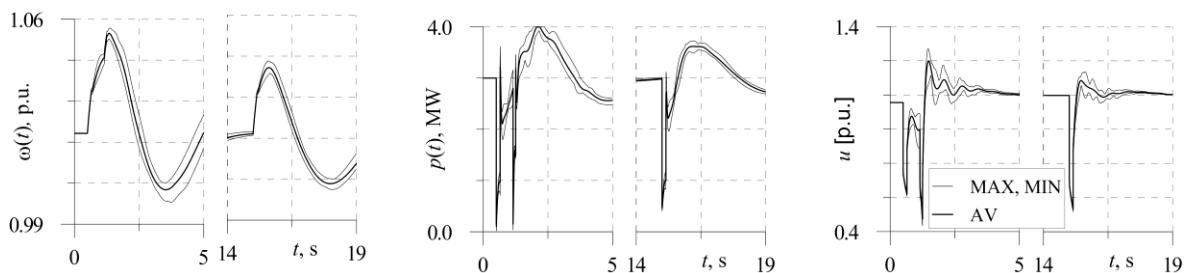
- w chwili $t = 0,5$ s następuje zwarcie w linii napowietrznej L0,
- po czasie zwłoki (150 ms), zwarcie wyłączane jest przez zabezpieczenie zwarciove linii L0,

- po przerwie bezprądowej (0,5 s) następuje ponowne załączenie linii (SPZ), a tym samym ponowne zwarcie w linii L0,
- po kolejnych 150 ms zwarcie i linia L0 wyłączane są na stałe przez zabezpieczenie zwarciove, w konsekwencji sieć dystrybucyjna trwale przechodzi do pracy wyspowej,
- po 100 ms następuje wyłączenie linii L8 i L9 zgodnie z założonym algorytmem odciążenia wyspy,
- w chwili $t = 15$ s (w czasie pracy wyspowej) następuje przejściowe zwarcie trwające 150 ms w linii średniego napięcia L92.

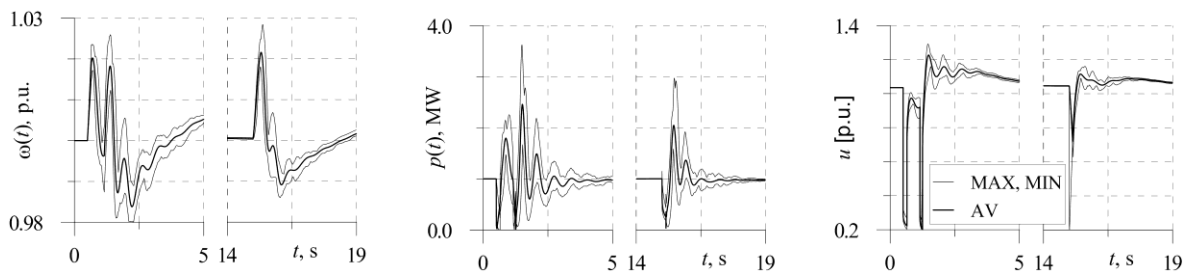
Tak jak w poprzednim przykładzie, badania symulacyjne wykonano z uwzględnieniem niepewności parametrów modeli matematycznych, a wybrane pasma przebiegów (ograniczone przez wartości maksymalną i minimalną) oraz wyznaczoną wartość średnią przebiegów (AV) przedstawiono na rys. 10 do 13.



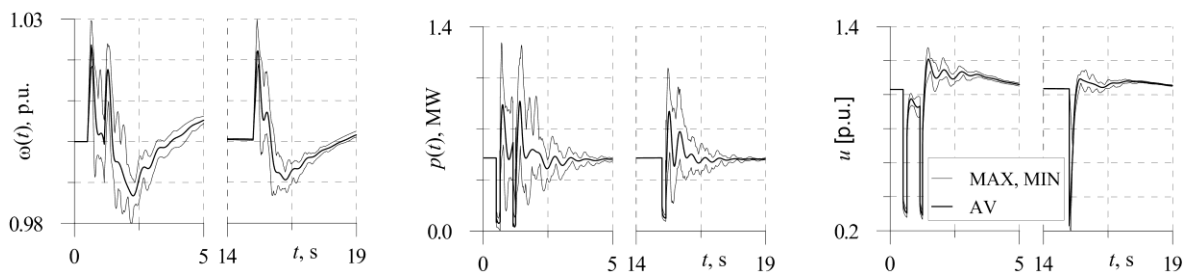
Rys. 10. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni gazowej



Rys. 11. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni wiatrowej



Rys. 12. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni wodnej MEW1

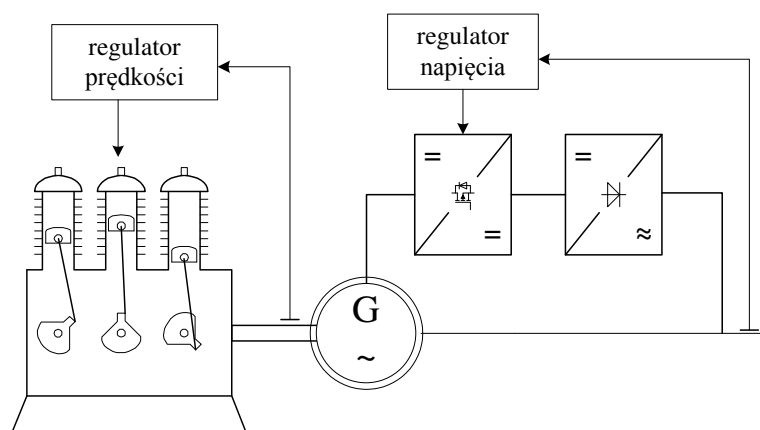


Rys. 13. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni wodnej MEW4

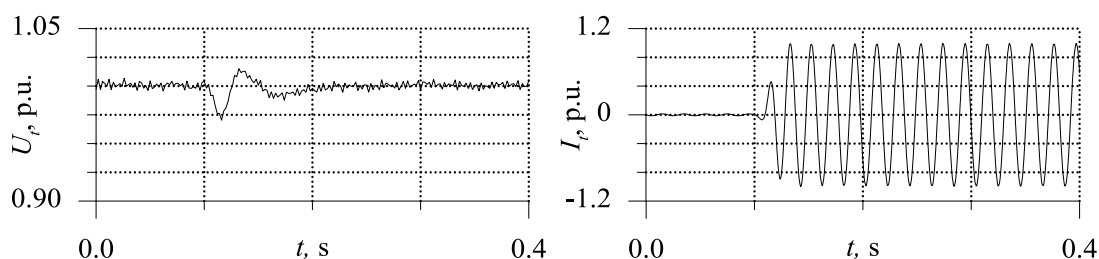
Stany przejściowe źródła pracującego samotnie (off-grid)

Jak już wspomniano wcześniej dla pracy *off grid* na dynamikę źródła wpływa technologia wytwarzania energii elektrycznej, właściwości układu regulacji oraz właściwości odbiornika. Poniżej przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych trzech źródeł rozproszonych z silnikiem spalinowym.

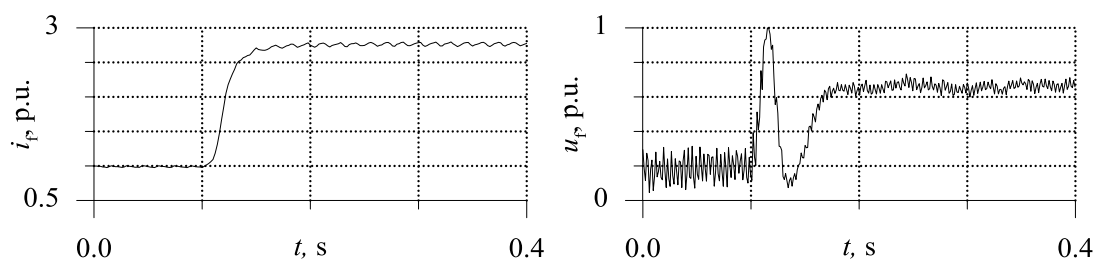
W pierwszym przypadku badano źródło z generatorem synchronicznym o mocy $S_n = 5 \text{ kV}\cdot\text{A}$ wyposażone w cyfrowy regulator napięcia typu PI współpracujący z przekształtnikiem wzbudzenia typu buck. Do regulacji prędkości obrotowej wykorzystano cyfrowy regulator typu PI współpracujący z enkoderem zainstalowanym na wale silnika spalinowego. Schemat analizowanego źródła przedstawiono na rys. 14. Przebiegi uzyskane w trakcie badań analizowanego układu przedstawiono na rys. 15 i 16.



Rys. 14. Schemat ideowy badanego zespołu wytwórczego



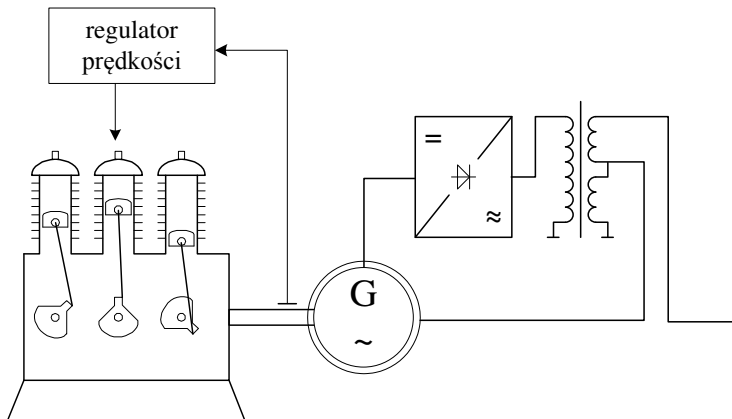
Rys. 15. Przebiegi wartości skutecznej napięcia U_t i prądu twornika generatora I_t w czasie załączenia obciążenia znamionowego.



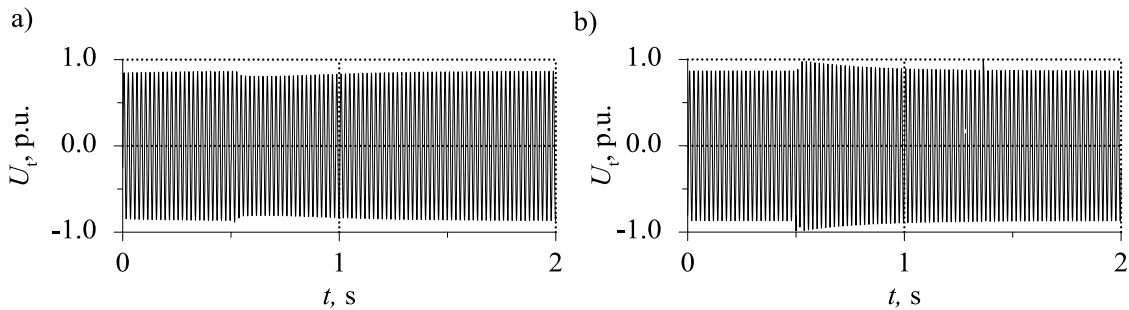
Rys. 16. Przebiegi prądu i_f i napięcia wzbudzenia generatora u_f w czasie załączenia obciążenia znamionowego.

Drugim analizowanym źródłem był zespół wytwórczy z generatorem synchronicznym o mocy $S_n = 5 \text{ kV}\cdot\text{A}$ wyposażony z prostownik diodowy zasilany z transformatora wzbudzenia – układ kompaundacji wzbudzenia (rozwiązanie takie jest powszechnie stosowane w agregatach prądotwórczych małej mocy). Schemat badanego układu przedstawiono na rys. 17

a zmierzone przebiegi dla załączenia i wyłączenia obciążenia znamionowego przedstawiono na rys. 18.

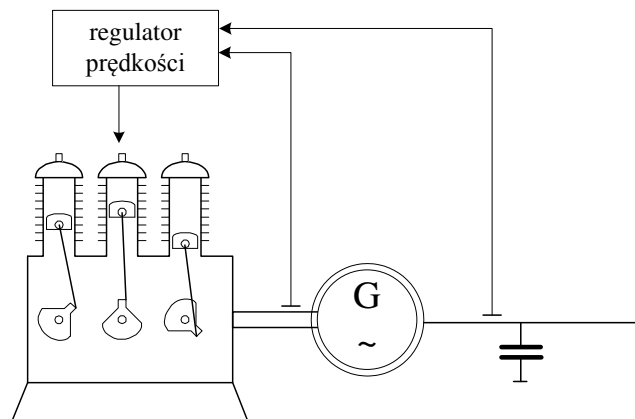


Rys. 17. Schemat ideowy badanego zespołu wytwórczego

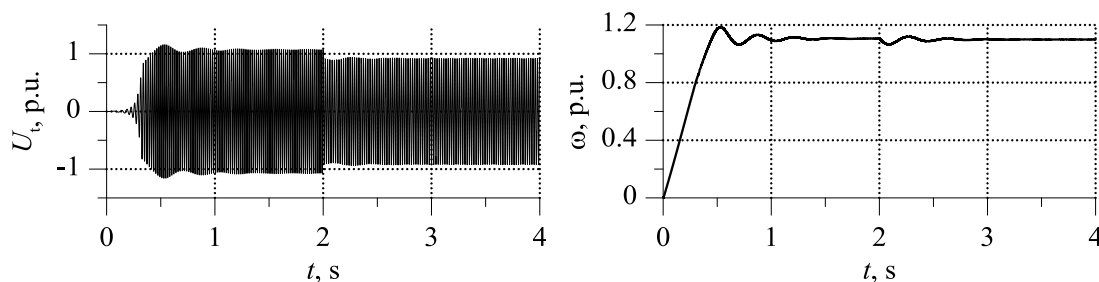


Rys. 18. Przebieg napięcia twornika U_t generatora synchronicznego w czasie załączenia (a) i wyłączenia (b) obciążenia znamionowego

Ostatnim badanym źródłem był zespół wytwórczy z generatorem asynchronicznym wzbudzonym pojemnościowo moc $S_n = 5 \text{ kV}\cdot\text{A}$. Układ nie został wyposażony w regulator napięcia a jedynie w regulator prędkości obrotowej z dodatkowym wejściem od prądu twornika geenratora. Schemat badanego układu przedstawiono na rys. 19 a uzyskane przebiegi na rys. 20.



Rys. 19. Schemat ideowy badanego zespołu wytwórczego



Rys. 20. Przebiegi napięcia twornika U_t i prędkości obrotowej generatora asynchronicznego ω w czasie rozruchu i załączenia obciążenia znamionowego.

Podsumowanie

Jak wynika z wielu badań, w tym przedstawionych w niniejszym opracowaniu zastosowanie generacji rozproszonej może w znaczący sposób poprawić bezpieczeństwo elektroenergetyczne, w skali globalnej jak i lokalnej. Instalowanie źródeł rozproszonych w pobliżu odbiorców poprawia ciągłość zasilania a w przypadku niektórych klęsk żywiołowych jest jedynym sposobem dostarczenia energii elektrycznej. W trakcie normalnej pracy źródła rozproszone mogą być efektywnie wykorzystane, pod warunkiem, że będzie istniała infrastruktura umożliwiająca zarządzanie nimi. W okresach dużego zapotrzebowania na energię np. latem wzrost zużycia energii w upalne dni spowodowany przez układy klimatyzatorów może prowadzić do niestabilnej pracy systemu. Wykorzystanie do pokrycia zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną źródeł generacji rozproszonej w znaczący sposób odciąża sieć w okresach obciążenia szczytowego z jednoczesnym zmniejszeniem strat sieciowych. Pozwalając ponadto na bezpieczne przeprowadzanie remontów źródeł wielkiej mocy i sieci przesyłowej. Nie małe znaczenie dla bilansu mocy systemu ma odciążanie systemu przez układy źródło – odbiornik pracujące poza systemem (*off grid*).

Przedstawione wyżej problemy stanowią tylko niewielki fragment całości zagadnień pracy źródeł rozproszonych w tym ich regulacji. Jednakże na podstawie przeprowadzanych analiz i przywołanej literatury można wymienić kilka sposobów na minimalizację znaczenia niekorzystnych zjawisk związanych z pracą *on/off grid* źródeł rozproszonych:

- optymalizacja miejsc przyłączenia źródeł rozproszonych, lokalnie i w skali całego systemu;
- stworzenie procedur, w tym uwarunkowań prawnych, ułatwiających rozwiązania techniczne minimalizujące niekorzystne oddziaływania (np. prawne wymaganie przyłączenia źródeł rozproszonych do "sterowania grupowego");
- wielokryterialna optymalizacja struktur regulacji powiązanych ze źródłami rozproszonymi, w tym optymalizacja z uwzględnieniem niepewności parametrów systemu,
- modernizacja sieci przesyłowych i dystrybucyjnych, w tym instalowanie nowoczesnych urządzeń sterujących przepływami mocy, np. FACTS;
- stosowanie źródeł z przekształtnikami energoelektronicznymi i zasobnikami energii.

Źródła:

- [1] Adamek S., Kacejko P.: Wybrane zagadnienia doboru nastawień automatyki zabezpieczeniowej w układach generacji rozproszonej. *Automatyka Elektroenergetyczna*, 2/2005, ss. 16 – 20.
- [2] Bewszko T., Nocoń A: Multicriteria decision aid in virtual power plant. 32-th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, SPETO'2010, Ustroń May 2009, pp. 24-25.
- [3] Boczar T.: Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania. PAK 2007.
- [4] Burek A., Rosołowski E.: Zabezpieczenia układów generacji rozproszonej przed pracą wyspą. V Konferencja Naukowo – Techniczna „Elektroenergetyczne Sieci Rozdzielcze” SIECI 2004, Wrocław 2004, ss. 97 –104
- [5] Chmielniak T., Technologie energetyczne, WNT, Warszawa 2008.
- [6] Janiczek R., Przygodzki M., Rozproszone źródła energii w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwo Pol. Śl., Gliwice 2006.
- [7] Jastrzębska G., Odnawialne źródła energii i pojazdy elektryczne, WNT, Warszawa 2007.
- [8] Kacejko P., Adamek S.: Automatyka zabezpieczeniowa generatorów energetyki rozproszonej – wymagania, praktyka, kierunki zmian, V Konferencja Naukowo-Techniczna, Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI 2004. s. 87-96
- [9] Kacejko P., Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 2004.
- [10] Kowalska A., Wilczyński A.: Źródła rozproszone w systemie elektroenergetycznym. Wydawnictwo KAPRINT, Lublin 2008.
- [11] Kowalska-Bundz A.: Wieloaspektowa ocena rozwoju generacji rozproszonej, V Konferencja Naukowo-Techniczna, Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI 2004. s. 63-70.
- [12] Lubośny Z.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, WNT, 2007r.
- [13] Machowski J.: Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [14] Malko J.: Generacja rozproszona w europejskiej polityce energetycznej, V Konferencja Naukowo-Techniczna, Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI 2004. s. 49-56.
- [15] Marzecki J.: Elektroenergetyczne sieci miejskie. Zagadnienia wybrane, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006r.
- [16] Mirosław M., Drulis H.: Ogniwia paliwowe: Nowe kierunki rozwoju. Wrocław, Wydawnictwo Uniwersyteckie Wrocław, 2005r.
- [17] Nocoń A., Boboń A., Paszek S., Pruski P.: Pomiarowa estymacja parametrów modelu generatora synchronicznego pracującego w elektrociepłowni. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 88 NR 9a/2012, s.46-49.
- [18] Nocoń A., Paszek S.: Analysis of power system stabilizer Pareto optimization when taking into account the uncertainty of power system mathematical model parameters, *Archives of Electrical Engineering* 2011, Vol. 60(4), pp. 385-398.
- [19] Nocoń A., Paszek S.: Optymalizacja parametrów regulatora elektrowni wirtualnej źródeł rozproszonych w SEE. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010 R. 86 nr 8, ss. 82-86.
- [20] Nocoń A., Paszek S.: Polioptymalizacja regulatorów napięcia zespołów prądowców z generatorami synchronicznymi. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2008r.
- [21] Nocoń A., Paszek S.: Synteza regulatora napięcia generatora synchronicznego przy wykorzystaniu polioptymalizacji, *Kwartalnik Elektryka*, rok LIII, zeszyt 3(203), Gliwice 2007, ss. 31-40

- [22] Nocoń A., Szuster D.: Badania symulacyjne stanów przejściowych generatorów źródeł rozproszonych. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały*, 2012, Nr 32, tom 2, s. 160-165
- [23] Nocoń A., Szuster D.: Distributed source mathematical model including parameter uncertainty. *33th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, SPETO'2010, Ustroń May 2009*, pp. 45-46.
- [24] Nocoń A., Szuster D.: Dynamika źródła rozproszonego z uwzględnieniem niepewności parametrów. *Zesz. Probl. Masz. Elekt.* 2010 nr 88, s. 187-190
- [25] Nocoń A., Szuster D.: Zastosowanie algorytmu genetycznego do oceny jakości regulacji mikroźródła energii eklektycznej z uwzględnieniem niepewności parametrów modelu matematycznego. *Kwartalnik Elektryka* 2013 z. 1 (225), ss. xx-xx.
- [26] Nocoń A.: Elektrownia wirtualna w systemie elektroenergetycznym. Nowy sposób zarządzania źródłami rozproszonymi, artykuł zamawiany, www.sila-wiedzy.pl, Projekt „Siła wiedzy” finansowany w ramach działania 4.2 priorytetu IV, PO KL, współfinansowanego przez UE z EFS i Budżetu Państwa.
- [27] Nocoń A.: Integracja źródeł rozproszonych z krajowym systemem elektroenergetycznym. Problemy techniczne i propozycje ich rozwiązania, artykuł zamawiany, www.sila-wiedzy.pl, Projekt „Siła wiedzy” finansowany w ramach działania 4.2 priorytetu IV, PO KL, współfinansowanego przez UE z EFS i Budżetu Państwa.
- [28] Nocoń A.: Stabilizacja pracy źródeł rozproszonych w sieci dystrybucyjnej z wykorzystaniem wiatrowo-gazowej elektrowni hybrydowej. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 88 NR 9a/2012, s.42-45.
- [29] Paska J., Sałek M., Surma T.: Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 12 (2005), str. 3 – 13.
- [30] Paska J.: Jakość energii elektrycznej, niezawodność zasilania, bezpieczeństwo energetyczne. *Elektroenergetyka* Nr 4/2003 (47).
- [31] Paszek S., Nocoń A., Stabilization of virtual power plant sources, *Kwartalnik Elektryka* 2009 R. 55 z. 2 (210), ss. 45-50.
- [32] Paszek S., Nocoń A., Sterowanie grupowe do stabilizacji generatorów małych mocy współpracujących z systemem elektroenergetycznym, *Archiwum Energetyki*. t. 39, nr 1 *Polska Akademia Nauk. Komitet Problemów Energetyki*, 2009, s. 65-75,
- [33] Paszek S., Nocoń A.: Optimisation and polyoptimisation of power system stabilizer parameters. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2014, Monografia.
- [34] Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
- [35] Paściak G., Chmielowiec J., Bujło P.: Ogniwia paliwowe – ekologiczne generatory energii”, *Nowa Elektrotechnika*, nr 3 (7), 2005
- [36] Paściak G., Prociów K., Mielcarek W., Górnicka B., Mazurek B.: Solid electrolytes for gas sensors and fuel cells applications, *Journal of the European Ceramic Society* 21 (2001) 1867-1870
- [37] Pawlik M., Strzelczyk F.: *Elektrownie*, WNT 2009r.
- [38] Piróg S.: *Energoelektronika. Negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczania*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 1998.
- [39] Popczyk J. *Energetyka prosumencka jako innowacja przełomowa*. BŻEP, www.klaster3x20.pl (CEP)
- [40] Przedmojska K., Wybrane problemy współpracy małych generatorów z systemem elektroenergetycznymi ich „odcinania” w sytuacjach awaryjnych. *Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce” APE'03, Jurata, 11 – 13 czerwca 2003, tom II*, ss. 7 – 14.

- [41] Rasolomampionona Desire D.: Optymalizacja parametrów regulatorów przesuwników fazowych w liniach powiązań międzysystemowych uwzględniającą automatyczną regulację częstotliwości i mocy wymiany, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007r.
- [42] Robak S.: Projektowanie i analiza odpornych regulatorów urządzeń FACTS w systemie elektroenergetycznym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007r.
- [43] Rosołowski E.: Automatyka zabezpieczeniowa układów generacji rozproszonej, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 3 (2004), str. 20 – 22
- [44] Siwy E., Przygodzki M.: Współpraca źródeł rozproszonych z siecią elektroenergetyczną – projekt demonstracyjny. Polska Akademia Nauk Oddział w Katowicach. Prace Komisji Naukowych. Zeszyt nr 30, Katowice 2006,
- [45] Siwy E., Przygodzki M.: Źródła rozproszone w sieci dystrybucyjnej – aspekty praktyczne. Archiwum Energetyki. Tom XXXVII, Gdańsk 2007,
- [46] Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne, WNT, 2005r.
- [47] Smoliński S.: Fotowoltaiczne źródła energii i ich zastosowania, Wyd. SGGW, 1998r.
- [48] Szuster D., Nocoń A.: Wpływ parametrów sieci dystrybucyjnej średniego napięcia na stany przejściowych generatorów źródeł rozproszonych - analiza wrażliwości, Zeszyty Problemowe "Maszyny Elektryczne" BOBRME Nr. 92/2011, ss. 181-186.
- [49] Theodorescu R., Liserre M., Rodriguez P: Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley & Sons, 2011.
- [50] Tytko R.: Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, Towarzystwo Słowaków w Polsce, 2013.
- [51] Witold M. Lewandowski W. M: Proekologiczne źródła energii odnawialnej, WNT, 2002r.
- [52] Wróblewska S.: Zabezpieczenia generatora synchronicznego małej i średniej mocy. Elektroinfo, 2/2003 (13), ss. 55 – 61.

Datowanie (wersja oryginalna opracowana we współpracy z Parkiem Naukowo-Technologicznym Euro-Centrum) – 17.05.2014 r.