

Stabilność kątowna systemu elektroenergetycznego z zainstalowanymi źródłami fotowoltaicznymi

Streszczenie. Globalne ocieplenie klimatu jest głównym czynnikiem powodującym wzrost zainteresowania Odnawialnymi Źródłami Energii. W związku ze spadkiem kosztów pozyskania energii elektrycznej z systemów fotowoltaicznych, będącego skutkiem postępu w technologii produkcji i spadających cen krzemu przewiduje się zwiększenie tempa przyrostu instalacji PV. Mogą się przez to zmienić niektóre aspekty stabilności systemu elektroenergetycznego (SEE). W tej pracy przedstawiono przegląd stosowanych modeli i wyników badań opublikowanych w światowej literaturze odnośnie wpływu źródeł PV na stabilność kątową SEE.

Abstract. Global warming is the main driving force for increasing interest in Renewable Energy Sources. Due to technological advance and decreasing silicon costs solar photovoltaics energy costs decrease. This may lead to modification of several aspects of power system stability. This paper reviews models as well as results of published research studies regarding impact of solar photovoltaics on power system angle stability. (Power system angle stability with high penetration photovoltaics).

Słowa kluczowe: stabilność SEE, potencjał energii słonecznej, duże źródła PV, modelowanie

Keywords: power system stability, solar energy potential, large-scale PV, modelling

Wstęp

W ostatnich latach zaszły znaczne zmiany w sektorze wytwarzania energii elektrycznej. W celu ograniczenia globalnego ocieplenia klimatu wzrosło zainteresowanie zastąpieniem wytwarzania energii opartego na paliwach kopalnych przez Odnawialne Źródła Energii (OZE). W szerszej perspektywie rozwój rozproszonych zasobów energii (DER), których elementem są technologie OZE może przynieść istotne korzyści dla systemu elektroenergetycznego oraz społeczeństwa [1].

Jedną z najbardziej obiecujących technologii OZE, głównie na skutek spadających cen krzemu okazuje się być wytwarzanie oparte na źródłach fotowoltaicznych (PV). Aktualnie przewiduje się zwiększenie tempa przyrostu instalacji PV, co powinno zwiększyć ilość odnawialnych nośników energii w miksie energetycznym kosztem paliw kopalnych. Między innymi dzięki źródłom PV ma nastąpić osiągnięcie celu Unii Europejskiej 3x20%, w zakresie polityki klimatycznej i energetycznej [2].

Istotnym elementem, który w przyszłości pozwoli na większe zainteresowanie źródłami PV będzie z pewnością spadek ceny modułów oraz system wsparcia dla producentów energii z OZE [3]. Jeśli tempo w jakim wzrasta ilość przyłączanych do sieci źródeł PV obserwowane na świecie w ciągu ostatniej dekady się utrzyma, energia ze źródeł PV może prowadzić do przeobrażenia niektórych aspektów funkcjonowania systemów elektroenergetycznych (SEE) i wpłynąć m. in. na jego stabilność. Problem stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego zawierającego źródła fotowoltaiczne został omówiony między innymi w publikacji [4]. W tym artykule przedstawiono przegląd wyzwań technicznych, w szczególności powiązanych ze stabilnością kątową systemu elektroenergetycznego na skutek integracji dużych fotowoltaicznych źródeł wytwórczych.

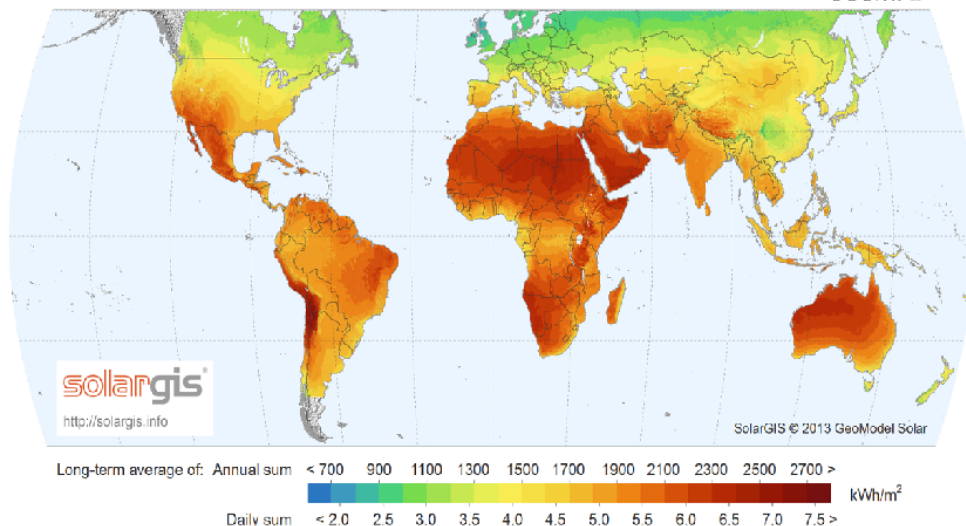
Potencjał energii słonecznej

Słońce jest źródłem znacznej ilości darmowej energii.

Stała słoneczna wynosi średnio $G_0 = 1,43 \text{ kW/m}^2$ [5]. Jest to całkowita energia, jaką promieniowanie słoneczne przynosi w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca (1 j.a.) przed wejściem promieniowania do atmosfery. Ze względu na zmiany w czasie stałej słonecznej poprawniejszą nazwą jest całkowita irradancja Słońca (Total Solar Irradiance – TSI). Na całą kulę ziemską dociera $5,6 \cdot 10^6 \text{ EJ/a}$, czyli $1,5 \cdot 10^{18} \text{ kWh/a}$. Niemożliwe jest wykorzystanie tego promieniowania w całości. Jego część jest odbijana bądź absorbowana przez atmosferę ziemską, głównie przez znajdujące się w niej aerozole, hydrometeory oraz cząsteczki gazów. Część jest odbijana przez atmosferę i powierzchnię Ziemi (promieniowanie rozproszone). Światowe zapotrzebowanie na energię pierwotną wynosi ok. 10^{14} kWh rocznie, co oznacza, że Słońce jest w stanie dostarczyć 15000 razy więcej energii niż potrzeby ludzkość. Na powierzchnię Ziemi w dni słoneczne dociera maksymalnie 1 kW/m^2 . Dla Polski jako normę przyjmuje się wartość napromieniowania całkowitego w ciągu roku $3600 \text{ MJ/m}^2 \pm 10\%$.

Rysunek 1 przedstawia średni roczny rozkład natężenia promieniowania słonecznego na świecie. Na jego podstawie można stwierdzić, że większość państw, z wyjątkiem tych leżących powyżej 50°N i poniżej 50°S dysponuje znacznym potencjałem w kierunku wykorzystania generacji bazującej na energii słonecznej. Widoczne są również tzw. „gorące plamy”, np. pustynia Mohawe w USA, pustynia Sahara i Kalahari w Afryce, Środkowy Wschód, pustynia Atacama w Chile i północno-wschodnia Australia.

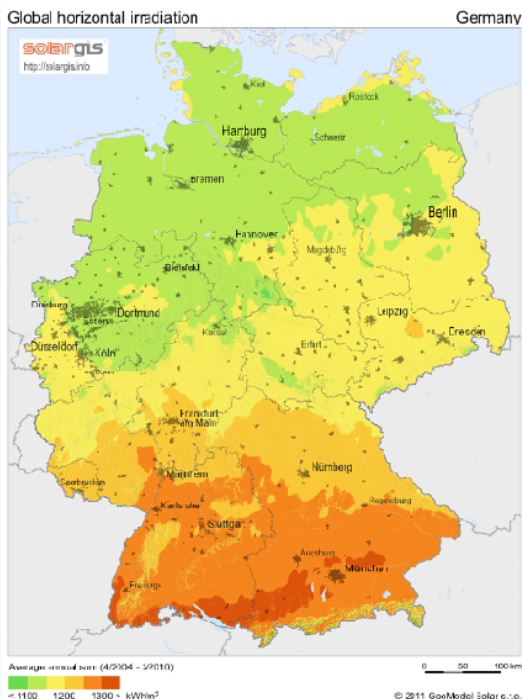
Kraje najczęściej inwestujące w farmy fotowoltaiczne to [7]: Chiny, Japonia, USA, Niemcy, Wielka Brytania. Z powyższej klasyfikacji wynika, że tak naprawdę wiodącym czynnikiem rozwoju źródeł fotowoltaicznych nie jest potencjał teoretyczny lecz wola polityczna i zamożność poszczególnych państw.



Rys.1. Średnie roczne natężenie promieniowania słonecznego na świecie [6].

W Europie najlepsze uwarunkowania do produkcji energii z wykorzystaniem energii słonecznej mają kraje leżące na jej południowych krańcach, przede wszystkim Hiszpania i Portugalia, w dalszej kolejności Włochy i kraje półwyspu bałkańskiego. Liderem w zakresie generacji energii ze źródeł fotowoltaicznych są Niemcy przed Włochami [7]. Niemcy są jednym ze światowych liderów w produkcji energii. Polska pod tym względem znajduje się w ognie państw UE. Należy zwrócić uwagę, że warunki środowiskowe w zakresie nasłonecznienia Polski i Niemiec są bardzo podobne. Ilustrują to rysunki 2 i 3.

doprowadzane następnie do turbiny napędzającej generator;
2. metoda helielektryczna, która polega na bezpośredniej przemianie energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną, na skutek efektu fotoelektrycznego, za pomocą ogniw fotowoltaicznych (PV), bez udziału mas wirujących.



Rys.2. Średnie roczne natężenie promieniowania słonecznego w Niemczech [6].

Elektrownie słoneczne

Energię słoneczną można wykorzystać do produkcji energii elektrycznej i do produkcji wody. Generalnie są dwie metody służące do konwersji energii słonecznej na energię elektryczną [8]:

1. metoda heliometryczna, która polega na przemianie energii promieniowania słonecznego na ciepło,



Rys.3. Średnie roczne natężenie promieniowania słonecznego w Polsce [6].

Za jak najszerzym wykorzystaniem wytwarzania bazującego na źródłach PV przemawiają: bardzo duży potencjał techniczny i możliwość wytwarzania rozproszonego w pobliżu odbiorców oraz skalowalność, co pozwala dopasować jednostkę wytwórczą do zapotrzebowania. Dodatkowym atutem są niskie koszty konserwacji i nadzoru. Problemem jest ciągle wysoka cena urządzeń oraz silne wahania produkcji, co wymaga stosowania konwencjonalnych elektrowni lub dużych magazynów. Niektóre duże projekty w zakresie źródeł PV wymagają wybudowania międzysystemowych linii przesyłowych (np. projekt MEDRING łączący państwa leżące wokół Morza Śródziemnego) [9]. Jednakże niektóre badania wykazały, że zapotrzebowanie na energię elektryczną Europy, państw śródziemnomorskich i północnej Afryki mogłoby zostać pokryte z jednostek wytwórczych wykorzystujących energię słoneczną wybudowanych na pustyni Sahara [10].

Sposoby przyłączania źródeł PV do sieci elektroenergetycznej

Ogniwo fotowoltaiczne produkuje prąd i napięcie stałe, dlatego, aby mogło współpracować z instalacją elektryczną lub siecią elektroenergetyczną, wymagane jest użycie przekształtnika (falownika) energoelektronicznego. Poszczególne ogniwa łączone są w większe układy, co prowadzi do następujących rodzajów falowników [11]:

1. Falownik centralny: moce od 20 kVA do 1 MVA. W tym przypadku śledzenie punktu mocy maksymalnej (MPP) możliwe jest tylko dla całego systemu. Układ jest stosowany w źródłach PV montowanych na ziemi.
2. Falownik łańcuchowy: moce od 0,8 do 5 kVA. W tym przypadku śledzenie MPP możliwe dla każdego łańcucha. Układ jest stosowany w źródłach PV montowanych na dachach budynków.
3. Falownik modułowy: moce od 100 do 400VA. W tym przypadku śledzenie MPP możliwe dla każdego modułu. Układ jest stosowany w źródłach PV montowanych na elewacjach budynków.
4. Struktury hybrydowe: np. przekształtnik wielołańcuchowy. W tym przypadku śledzenie MPP jest realizowane przez przekształtnik DC/DC w każdym łańcuchu. Dodatkowo stosowany jest falownik centralny. Zastosowanie dachy i fasady budynków.

W przypadku zastosowania falownika centralnego moduły fotowoltaiczne łączone są szeregowo w łańcuchy, te zaś łączy się równolegle i następnie przyłącza do falownika. Równolegle do każdego modułu włączona jest dioda bocznikująca, która chroni moduły przed uszkodzeniem termicznym w przypadku zacinienia jednego z nich. Do takiej sytuacji mogłoby dojść, gdyż moduły mają ograniczoną zdolność akomodacji różnic między wspólnym prądem łańcucha, a swoim indywidualnym prądem wyjściowym. Diody łańcuchowe chronią poszczególne łańcuchy przed większym prądem w przypadku, gdy z pracy wypadnie cały łańcuch (np. przez zacinienie). W układzie z falownikiem centralnym zacinienie pojedynczego ogniwa powoduje, że cała jednostka wytwórcza pracuje poza MPP, co skutkuje że nie jest wykorzystywana całkowita dostępna energia słoneczna. W przypadku pozostałych topologiach wykorzystanie energii słonecznej jest większe, gdyż zacinienie jednego ogniwa powoduje, że poza MPP pracuje tylko jeden łańcuch lub tylko pojedyncze ogniwo PV.

Stosując falownik łańcuchowy ogniwa PV łączone są szeregowo po stronie DC. Następnie każdy łańcuch dołączany jest do oddzielnego falownika i te łączy się równolegle. Przy tej topologii nadal wymagane są diody bocznikujące, ale można zrezygnować z diod łańcuchowych. W tym przypadku straty spowodowane zacięciem i pracą poza MPP są znacznie mniejsze.

Stosując falownik modułowy nie ma potrzeby stosowania żadnych diod zabezpieczających, każdy moduł PV posiada swój własny falownik. Indywidualne falowniki ogniwa łączone są równolegle.

Rozwój energetyki opartej na źródłach PV

Efekt fotowoltaiczny odkryty został w roku 1839, francuski fizyk eksperymentalny Edmond Becquerel zaobserwował zależność napięcia pomiędzy dwoma elektrodami zanurzonymi w elektrolicie od oświetlenia. Efekt ten dokładnie opisał Albert Einstein w roku 1905, postulując teorię kwantów energii. Przez kolejne stulecie technologia fotowoltaiczna ulegała licznym udoskonaleniom i znajdowała coraz szersze zastosowanie. Rynek fotowoltaiczny, pomimo kryzysu ekonomicznego i wciąż niedojrzałej technologii, osiągnął największy wzrost w ciągu ostatniej dekady. Początkowo źródła PV przyłączane były

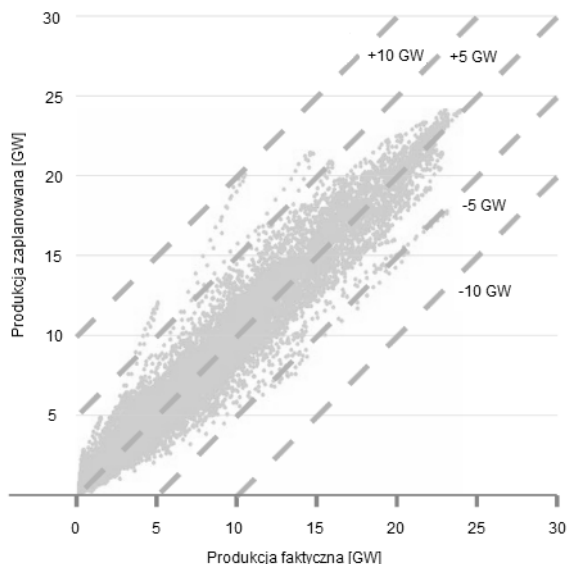
do sieci dystrybucyjnej. W roku 2009 nastąpiło pierwsze na świecie przyłączenie fotowoltaicznej jednostki wytwórczej do sieci przesyłowej (230 kV, Desoto Solar Energy Center) [12]. Od tej pory coraz więcej dużych farm PV przyłączanych jest do sieci przesyłowej. Uważa się, że integracja wielu farm PV o mocy od kilkudziesięciu do kilkuset MW nie będzie łatwa i mogą pojawić się nowe, nieznanne dotychczas problemy będące rezultatem innej charakterystyki dynamicznej źródeł PV niż źródeł konwencjonalnych opartych na generatorach synchronicznych.

Na koniec roku 2009 skumulowana moc zainstalowana źródeł PV na Ziemi wynosiła ponad 23 GW [13]. W następnym roku było to 40,3 GW, a na koniec 2011 r. już 70,5 GW. Ten wzrost stał się coraz bardziej dynamiczny. W roku 2012 zainstalowane było już 100 GW, a w roku 2013 139 GW. Tak duża ilość ogniw fotowoltaicznych jest w stanie wyprodukować 160 TWh rocznie. Taka ilość energii jest wystarczająca by pokryć zapotrzebowanie na energię ponad 45 milionów gospodarstw domowych w Europie. Jest to ilość równoważna rocznej produkcji 32 konwencjonalnych elektrowni opalanych węglem. Według obecnych prognoz, zakładających dalszy linowy wzrost mocy zainstalowanej źródeł PV w roku 2018 na kuli ziemskiej zainstalowane zostanie od 320 do 420 GW. Należy przy tym pamiętać, że wszystkie dotychczasowe prognozy okazywały się ostatecznie mocno niedoszacowane. Rok 2013 był również pierwszym rokiem, w którym odnotowano wzrost mocy zainstalowanej pomimo spadku nakładów na inwestycje w źródła PV. Światowym liderem, jeśli chodzi o moc zainstalowaną źródeł PV jest Europa, w której na koniec roku 2013 zainstalowane było 81,5 GW, co stanowi 59% instalacji fotowoltaicznych na kuli ziemskiej. Udział ten systematycznie maleje na skutek intensywnego rozwoju rynku źródeł PV w Azji Południowo-Wschodniej.

W Europie nieprzerwanie liderami są Niemcy i Włochy. Szybki przyrost w latach 2012-2013 [7] można było zaobserwować w Hiszpanii i Czechach. Były to jednak wydarzenia incydentalne. W kolejnych latach rozwój PV w tych krajach został gwałtownie wyhamowany z powodu nacisków producentów energii z konwencjonalnych źródeł na polityków. Obecnie znaczny przyrost instalacji PV występuje w Wielkiej Brytanii, Rumunii i Grecji. Motorem rozwoju rynku PV są mechanizmy wsparcia, które za pomocą dofinansowania budowy instalacji lub produkowanej energii zachęcają do inwestowania w tę technologię.

Najbardziej rozwiniętym rynkiem pod względem źródeł PV w Europie są Niemcy, dlatego też niemiecki SEE może być postrzegany jako system testowy przez Operatorów Sieci Przesyłowej krajów, w których źródła fotowoltaiczne dopiero zyskują na znaczeniu. W roku 2014 w Niemczech wytworzono ze źródeł fotowoltaicznych 32,8 TWh energii, co stanowiło 6,2% energii elektrycznej wyprodukowanej w ciągu roku [14]. Najwyższa miesięczna produkcja wystąpiła w czerwcu i wyniosła 4,8 TWh, zaś najniższa w grudniu i były to 0,4 TWh. Obecnie w Niemczech zainstalowane są ogniwa fotowoltaiczne o łącznej mocy znamionowej 38,2 GW.

Produkcja energii ze źródeł PV cechuje się znaczną zmiennością, uwarunkowaną warunkami atmosferycznymi. Mimo tak dużych wahań trafność prognozowania produkcji jest stosunkowo wysoka, co ilustruje rysunek 4. Większość błędnych prognoz mieści się w paśmie ± 5 GW, co oznacza stopień dokładności podobny jak w przypadku przewidywania produkcji z wiatru i w jednostkach konwencjonalnych.



Rys.4. Trafność prognozowania produkcji energii elektrycznej ze źródeł PV w Niemczech w roku 2014 [14].

Największe niemieckie farmy fotowoltaiczne powstają obecnie w landzie Brandenburgia, blisko granicy z Polską, na terenach o takim samym nasłonecznieniu jakie występuje w Polsce. Budowane są na terenach zamkniętych kopalń i lotnisk wojskowych. Ich moce sięgają ponad sto megawatów. By osiągnąć takie moce łączy się tysiące pojedynczych modułów PV o mocach typowo 100-320 W, co wymaga znacznych powierzchni.

Stabilność systemu elektroenergetycznego

Stabilność systemu elektroenergetycznego jest podstawową cechą tego układu i z technicznego punktu widzenia oznacza zdolność do odzyskania równowagi, ustalonego punktu pracy, po wystąpieniu zakłócenia [15].

Generalnie stabilność systemu elektroenergetycznego ze względu na fizyczny charakter zjawisk towarzyszących niestabilności, dzieli się na stabilność kątową, stabilność napięciową i stabilność częstotliwościową. W tym artykule uwaga została skupiona na kwestiach stabilności kątowej.

Spośród różnych typów stabilności sklasyfikowanych w referacie [16], w tym artykule omówiono problem stabilności kątowej, która dotyczy zachowania synchronizmu maszyn elektrycznych pracujących w systemie elektroenergetycznym po wystąpieniu zakłócenia. Stabilność kątowa wiąże się ze zjawiskami elektromechanicznymi [16], którym towarzyszą kołysania (oscylacje) kątów wirników generatorów synchronicznych. Ze względu na lokalną lub ogólnosystemową naturę kołysań w systemie wyróżnia się:

- kołysania lokalne o częstotliwości 0,8÷2,0 Hz;
- kołysania międzyobszarowe o częstotliwości 0,2÷0,8 Hz.

Charakterystyka modeli źródeł PV do badania stabilności SEE

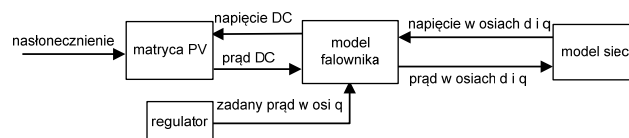
W literaturze [17], [18] można znaleźć wiele modeli źródeł PV, jednak nie wypracowano jednego standardowego modelu dla potrzeb programów symulujących stany SEE. Większość z opracowanych modeli źródeł PV została przygotowana pod kątem badania aspektów jakości energii w sieciach dystrybucyjnych i bardzo dokładnie odwzorowuje zachowanie źródła PV. W przypadku analiz stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego, w których szczególną uwagę poświęca się zjawiskom elektromechanicznym, tak wysoki poziom szczegółowości nie jest wymagany. Źródło PV składa się z licznych mniejszych ogniw PV, lecz moc

dostarczana jest do sieci przez jedną stację transformatorową. Dlatego też źródło PV może być zagregowane do jednego generatora o mocy równej sumie mocy poszczególnych modułów PV. Z racji, że falownik może wytworzyć również moc bierną, źródło PV w stanie ustalonym może zostać zamodelowane tak jak generator synchroniczny, tzn. węzeł PV lub PQ [19], [20]. W większości modeli, które opracowywane są przez pracowników naukowych uniwersytetów i instytuty badawcze układ modułu PV, przekształtnik podwyższający i stabilizujący napięcie, falownik reprezentowany jest jako sterowane źródło prądowe.

Najdokładniejszy model, opracowany na podstawie prac WECC i CIGRE został zaimplementowany w oprogramowaniu PSLF i PSS [21] i [22]. Najczęstsze wymagania stawiane modelom źródeł PV można sformułować następująco [23]:

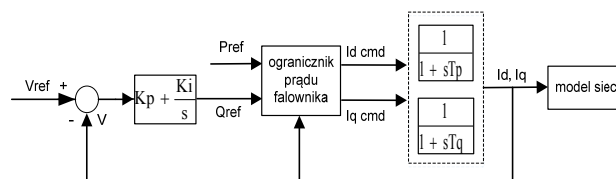
1. Model powinien wiarygodnie odwzorowywać dynamiczne właściwości elektryczne źródła PV w miejscu przyłączenia do sieci, a niekoniecznie wewnątrz farmy fotowoltaicznej.
2. Powinien być odpowiedni do analizy zachowania systemu w przypadku zakłóceń pochodzących z systemu, a nie np. ze zmiennego nasłonecznienia.
3. Powinna istnieć możliwość uwzględnienia różnic pomiędzy różnymi przekształtnikami energoelektronicznymi i sposobami sterowania.
4. Model powinien uwzględniać zabezpieczenia odłączające źródło PV od sieci.
5. Stan początkowy modelu powinien być określony za pomocą optymalnego rozplywu mocy.
6. Na skutek niewielkich stałych czasowych można pominąć stany przejściowe po stronie DC.

Schemat blokowy typowego modelu źródła PV obrazuje rysunek 5, schemat falownika przedstawiono na rysunku 6.

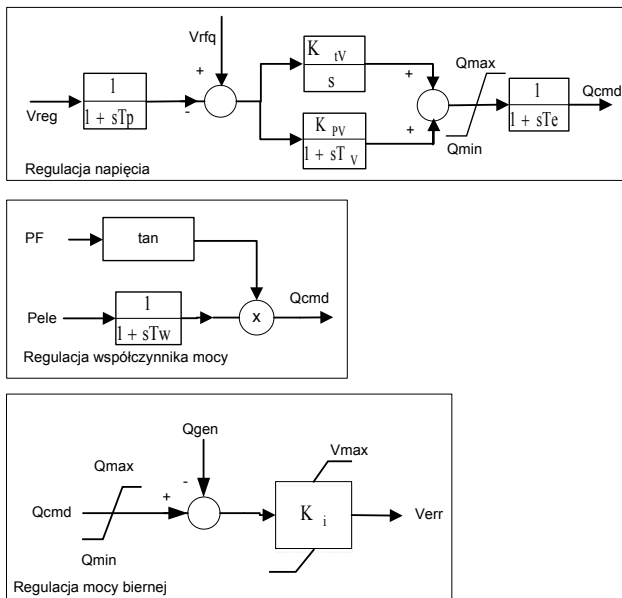


Rys.5. Schemat blokowy modelu źródła PV [23].

Moc czynna dostarczana przez źródło PV do systemu zależy od mocy generowanej przez matrycę modułów PV, zmieniającej się wraz ze zmianami nasłonecznienia. Moc bierna dostarczana do systemu zależy od sygnału podawanego z regulatora, który może pracować w jednym z trzech trybów: regulacji napięcia, regulacji mocy biernej lub regulacji współczynnika mocy. Schematy układów regulacji zaprezentowano na rysunku 7. W trybie regulacji napięcia, napięcie zmierzone w węzle przyłączenia źródła PV porównywane jest z napięciem zadanym. W trybie regulacji współczynnika mocy, generowana moc czynna mnożona jest przez tangens kąta odpowiadającego zadanemu współczynnikowi mocy. W trybie regulacji mocy biernej zadana moc bierna porównywana jest z generowaną przez konwerter, a następnie sygnał różnicy służy do wytworzenia sygnału sterującego składową bierną prądu falownika.



Rys. 6. Schemat blokowy falownika [19].



Rys. 7. Schemat blokowy układów regulacji [19].

Przegląd dotychczasowych wyników badań dotyczących wpływu PV na stabilność SEE

W artykule [24] pracownicy California ISO przeprowadzili analizę wpływu generacji ze źródeł fotowoltaicznych na lokalną stabilność kątową systemów elektroenergetycznych za pomocą analizy wartości i wektorów własnych. W swoich badaniach wykorzystali model źródła opracowany przez NREL i opisany w [25]. Do badań został wykorzystany model systemu składającego się z dwóch obszarów. Każdy z obszarów składał się z dwóch generatorów synchronicznych. W badaniach zmniejszono moc jednego z generatorów w jednym obszarze i zastępowano ją generacją ze źródeł PV. Następnie powtórzono badania dołączając źródło PV w drugim z obszarów. Badania wykazały, że obecność generacji PV może zmienić kształt modów oscylacji międzyobszarowych odpowiadających generatorom synchronicznym pozostałym w pracy w SEE. Rezultaty symulacji pokazują również, że wpływ na stabilność kątową lokalną mają: miejsce przyłączenia źródła PV, jego mocy oraz rozdział mocy na generatory synchroniczne (konwencjonalne) [24]. W przypadku, gdy wpływ ten jest niekorzystny autorzy [24] sugerują utrzymywanie w pracy krytycznych generatorów konwencjonalnych lub stosowanie innych środków zaradczych, jak np. zainstalowanie urządzeń FACTS.

W artykule [26] przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu generacji ze źródeł PV na stabilność lokalną systemu elektroenergetycznego. Badania przeprowadzono w układzie generator- sieć sztywna, dołączając źródło PV w połowie linii przesyłowej. W badaniu zasymulowano zmianę mocy mechanicznej napędzającej generator synchroniczny. Zwiększono ją o 20% w ciągu 0,2 s i po tym czasie zmniejszono moc do wartości wyjściowej. Wykazano, że jeśli obciążenie systemu jest stałe i generacja ze źródeł PV jest znacznie większa niż generacja konwencjonalna, system wykazuje słabe właściwości w zakresie stabilności oscylacyjnej. Przy odpowiednich rozdziałach mocy pomiędzy źródło PV i źródło konwencjonalne można zaobserwować wzmocnienie tłumienia oscylacji dzięki pracy źródeł PV.

W pracy [27] zbadano wpływ dużych źródeł PV na system New England- New York składający się z 16 generatorów synchronicznych. Wykazano w nich, że integracja dużych źródeł PV pogarsza tłumienie modów

oscylacji międzyobszarowych. W artykule [27] naukowcy z University of Waterloo przeprowadzili analizę skutków integracji dużej ilości źródeł PV w prowincji Ontario. Przeprowadzono analizę wartości własnych i symulację w dziedzinie czasu dotyczącą modelu sieci elektroenergetycznej prowincji Ontario. Badano wpływ trzech typów źródeł fotowoltaicznych: duża scentralizowana farma fotowoltaiczna z możliwością regulacji napięcia, duża scentralizowana farma fotowoltaiczna utrzymująca stały współczynnik mocy równy jedności oraz model zawierający rozproszone źródła PV. Na podstawie analiz wartości własnych stwierdzono, że źródła PV nie mają większego wpływu na stabilność lokalną systemu elektroenergetycznego. Analizy stabilności przejściowej wykazały, że źródła PV wpływają na stabilność systemu, przy czym wpływ generacji scentralizowanej jest bardziej negatywny niż generacji rozproszonej w systemie.

W pracy [28] autorzy badali stabilność kątową przejściową systemu używając modelu generator- sieć sztywna. Rozważano różne wartości mocy generowanej przez generator synchroniczny i źródło PV. Uzyskane wyniki wskazały, że w przypadku włączenia do sieci znacznej ilości źródeł PV, na skutek zmniejszonej inercji systemu i większej reaktancji generatora pracującego w stanie mniejszego obciążenia mocą czynną, obserwuje się pogorszenie zachowania systemu pod względem stabilności przejściowej.

Praca badawcza [29] dotyczyła wpływu zarówno niewielkich źródeł PV montowanych na dachach budynków, jak i dużych scentralizowanych źródeł PV. Jako układ testowy przyjęto system Western US interconnection. Źródła PV były dodawane do systemu zastępując generację konwencjonalną w różnych proporcjach. Na podstawie wyników badań przedstawiono wniosek, że w przypadku gdy źródła PV odpowiadają za 20% mocy generowanej w systemie wyłączenie linii na której wystąpiło zwarcie może mieć zarówno korzystny jak i niekorzystny wpływ na stabilność kątową przy dużym zakłóceniu. Jest to zależne od lokalizacji i czasu trwania zwarcia. Wskazano również, że utrata znacznej części źródeł PV może prowadzić do problemów ze stabilnością przejściową.

Podsumowanie

W ciągu ostatnich lat, w wyniku podejmowanych wysiłków mających na celu ograniczenie zanieczyszczenia środowiska i zminimalizowanie zależności od paliw kopalnych na znaczeniu przybrały technologie oparte na odnawialnych źródłach energii. Głównym czynnikiem popularyzacji wytwarzania energii elektrycznej opartej na czystych technologiach jest wola polityczna. Jednym z najbardziej obiecujących odnawialnych źródeł energii jest energia słoneczna, służąca do produkcji energii cieplnej (podgrzewu wody) lub produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem ogniw fotowoltaicznych.

Wraz z rozwojem technologii ogniw fotowoltaicznych i spadkiem ich cen, do sieci przyłączane są fotowoltaiczne źródła wytwórcze o mocy setek MW. W najbliższych latach planowane jest uruchomienie jednostek o mocy nawet 1 GW. Początkowo źródła PV były mniejszej mocy i były przyłączane do sieci dystrybucyjnej. Obecnie jednostki o największej mocy przyłącza się bezpośrednio do sieci przesyłowej. Uważa się, że przyłączenie do sieci znacznej ilości fotowoltaicznych źródeł energii może spowodować liczne problemy dla operatorów sieci elektroenergetycznych. W szczególności problemem jest stabilna praca systemu. Integracja wielu źródeł o dużej mocy i nie posiadających części wirujących oraz ograniczenie generacji konwencjonalnej zmniejsza inercję systemu. W związku z tym pojawia się konieczność

sprawdzenia zachowania się systemu w nowych warunkach za pomocą symulacji komputerowej. Modele źródeł PV dla potrzeb badania stabilności kątowej nie muszą być tak dokładne jak w przypadku badania jakości energii. Z tego względu wielu badaczy tworzy własne modele i na ich podstawie bada wpływ przyłączenia znacznej ilości źródeł PV na stabilność kątową SEE.

Dotychczas uzyskane wyniki badań w zakresie wpływu źródeł PV na stabilność kątową systemu elektroenergetycznego nie są jednoznaczne. Wpływ źródeł PV na stabilność kątową jest uzależniony między innymi od miejsca przyłączenia źródła PV, jego mocy, czy też sposobu sterowania. Przeprowadzony przegląd publikacji z omawianej tematyki wskazuje na konieczność przeprowadzenia dalszych, pogłębionych analiz w zakresie wpływu źródeł PV na stabilność kątową systemu elektroenergetycznego.

Praca finansowana ze środków na działalność statutową.

LITERATURA

- [1] Robak S., Rasolomampionona D.D.: Rozproszone zasoby energii – przegląd zagadnienia. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 87, Issue 6, 2011, str. 63-66
- [2] Komisja Wspólnot Europejskich, Komunikat komisji do rady, parlamentu europejskiego, europejskiego komitetu ekonomiczno- społecznego oraz komitetu regionów Ograniczenie globalnego ocieplenia do 2°C w perspektywie roku 2020 i dalszej, [Online], dostępne : <http://eur-lex.europa.eu>
- [3] Szczerbowski R.: Instalacje fotowoltaiczne - aspekty techniczno-ekonomiczne. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 90, Issue 10, 2014, str. 31-36
- [4] Gryspanowicz K., Robak S.: Analysis of the impact of photovoltaic generation source on power system voltage stability. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 90, Issue 11, 2014, str. 240-243
- [5] Lewandowski W.M., Proekologiczne odnawialne źródła energii, *WNT*, Warszawa (2010)
- [6] Solargis Online Data and Tools for Solar Energy Projects, www.solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI
- [7] Renewable Energy Policy Network, Renewables 2014 Global Status Report, *REN 21 Secretariat*, Paris (2014)
- [8] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, *WNT*, 2000
- [9] Nova B., Progress of the Mediterranean Ring and the Interconnection with Europe, *IEEE PES General Meeting*, Denver (2004), nr. 2, 1229-1234
- [10] Desertec Foundation, [Online]. dostępne : <http://desertec.org>
- [11] De Doncker R. W., Leistungselektronik für regenerative Energien, *wykład*, RWTH Aachen (2014)
- [12] Florida power and light, [Online]. dostępne : <http://www.fpl.com/enviorment/solar/Desoto>
- [13] European Photovoltaic Industry Association „Global market output for photovoltaics 2014-2018
- [14] Burger B., Stromerzeugung aus Solar- und Windenergie im Jahr 2014, *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme*, Freiburg (2015)
- [15] Machowski J., Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, OWPW, Warszawa 2007.
- [16] Kundur P., Power System Stability and Control, *McGraw-Hill Inc.* 1994
- [17] Papaioannou, Alexiadis MC, Demoulias CS, Labridis DP, Dokopoulos PS, Modelling and field measurements of photovoltaic units connected to LV grid. Study of penetration scenarios, *IEEE Trans Power Delivery*, 2011, nr 26(2), 979–87
- [18] Dash PP, Kazerani M., Dynamic modelling and performance analysis of a grid connected current source inverter-based photovoltaic system, *IEEE Trans Sustainable Energy*, 2011, nr 2(4), 443–50
- [19] Rakibuzzaman S., Mithulananthan N., Bansal R.C., Oscillatory stability analysis with high penetrations of large-scale photovoltaic generation, *Energy Conversion and Management* 65 (2013), 420–429
- [20] Rakibuzzaman S., Mithulananthan N., Bansal R.C., A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015), 1423–1436
- [21] WECC Modeling and Validation Work Group, Generic solar photovoltaic system dynamic simulation model specification, *Sandia National Laboratories report*, (2012)
- [22] Clark Miller M. W., Walling R, Modeling of GE solar photovoltaic plants for grid studies, *General Electric International Inc*, Schenectady, (2009)
- [23] Abraham Ellis, PV System Models For System Planning and Interconnection Studies Plan, *Sandia National Laboratories*, Cedar Rapids, (2009)
- [24] Liu H., Jin L., Le D., Chowdhury A. A., Impact of High Penetration of Solar Photovoltaic Generation on Power System Small Signal Stability, *International Conference on Power System Technology*, Hangzhou (2010), 1-7
- [25] Achilles S., Schramm S., Bebic J., Transmission System Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics, *NREL Report*, Cole Boulevard (2008)
- [26] Hussain M. T., El-Amin I.M., A PV Controlled System for Damping Power System Oscillations, *IEEE PES Conference on Innovative Smart grid Technologies*, Jeddah (2011), 1-5
- [27] Tamimi B., Canizares C., Bhattacharya K., System Stability Impact of Large-scale and Distributed Solar Photovoltaic Generation: The Case of Ontario, Canada, *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, (2012), 680-688
- [28] Yagani M., Tamura J., Impact of high penetration photovoltaic on synchronous generator stability, *XXth international conference on electrical machines*, (2012)
- [29] Eftekharijad S., Vittal V., Heydt G. T., Keel B., Loehr J., Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems, *IEEE Trans Power Syst*, (2013), nr 28(1), 893–901

Autorzy: dr hab. inż. Sylwester Robak, prof. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: syrobak@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Grzegorz Młynarz, E-mail: mlynarzq@ee.pw.edu.pl.