

Analiza wpływu źródeł fotowoltaicznych na stabilność napięciową systemu elektroenergetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposoby modelowania odbioru kompleksowego zawierającego źródła fotowoltaiczne w badaniach stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego. Przegląd sposobów modelowania został uzupełniony o przykładowe badania w zakresie stabilności napięciowej z wykorzystaniem opisanego modelu. W trakcie badań zapas stabilności określany był za pomocą krzywych P-V wyznaczanych w programie symulacyjnym Power Factory. Uzyskane wyniki badań wskazują, że sposób modelowania odbioru kompleksowego zawierającego ogniwa fotowoltaiczne ma istotny wpływ na ocenę stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego.

Abstract. The paper presents methods of modeling complex load model with photovoltaic sources for analysing the power system voltage stability. The survey was supplemented with examples of analysis of voltage stability using described models of complex load. In the study, the stability margin was determined using P-V curves determined by means of the Power Factory program. The obtained results indicate that the modeling of complex load with photovoltaic cells has a significant impact on the assessment of the power system voltage stability (**Analysis of the impact of photovoltaic generation source on power system voltage stability**).

Słowa kluczowe: stabilność napięciowa, odbiór kompleksowy, ogniwa fotowoltaiczne, model odbioru kompleksowego

Keywords: voltage stability, complex load, photovoltaic cells, load model

doi:10.12915/pe.2014.11.61

Wstęp

Produkcja energii elektrycznej wykorzystująca odnawialne źródła energii jest jednym ze sposobów, obok energii cieplnej oraz biopaliw, który pozwala wypełnić krajom europejskim cele wskazane przez Unię Europejską w zakresie produkcji energii z OZE. W szerszej perspektywie rozwój rozproszonych zasobów energii (DER) może przynieść różnorodne korzyści dla systemu elektroenergetycznego oraz społeczeństwa [1].

W przypadku Polski, we wciąż obowiązującym dokumencie Ministerstwa Gospodarki „Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku”, przyjęto, że część prognozowanego zapotrzebowania na energię elektryczną będzie pokrywana przez Odnawialne Źródła Energii (OZE). Przewiduje się, że do produkcji energii elektrycznej OZE będą wykorzystywać głównie wiatr, biomasę, biogaz, wodę, ale także promieniowanie słoneczne (fotowoltaika).

Źródła fotowoltaiczne są coraz bardziej widoczne w systemie elektroenergetycznym, a w niedalekiej przyszłości ich ilość może znacząco wzrosnąć. Są to zazwyczaj instalacje o niewielkich mocach rzędu kilku kilowatów. Coraz częściej jednak mówi się o farmach źródeł fotowoltaicznych. Przykładem tego typu obiektu w Polsce może być farma fotowoltaiczna w Wierzchosławicach koło Tarnowa. Elektrownia składa się z 4445 modułów, każdy o mocy 225W, co daje moc 1MWp. Farma zajmuje działkę o powierzchni 2 ha [2]. W planach jest budowa kolejnych farm fotowoltaicznych o jeszcze większych mocach.

Pojawienie się w systemie elektroenergetycznym źródeł energii o całkowicie odmiennej charakterystyce, w porównaniu do klasycznych źródeł opartych na generatorach synchronicznych, powoduje potrzebę badań w zakresie stabilności systemu. Rodzi się bowiem pytanie, jak nowe źródła będą wpływały na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego.

W tym artykule uwaga autorów została skupiona na kwestii stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego zawierającego źródła fotowoltaiczne. Problem ten został dostrzeżony w literaturze zagadnienia, czego wyrazem mogą być między innymi publikacje [6,13]. Autorzy referatu stawiają sobie za cel dalsze pogłębienie badań w tym zakresie.

Perspektywy rozwoju źródeł fotowoltaicznych

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój źródeł fotowoltaicznych. Wzrost mocy zainstalowanej w

źródłach wykorzystujących promieniowanie słoneczne jest dużo większy niż innych źródeł energii elektrycznej. Niekwestionowanym liderem w mocy zainstalowanej w źródłach fotowoltaicznych jest Europa, jednak coraz większe zainteresowanie można zauważyć w Chinach, Japonii i Indiach [3]. W tabeli 1 przedstawiono moc nowych instalacji fotowoltaicznych w różnych krajach świata w 2011 roku.

Tabela 1. Zestawienie mocy nowych instalacji PV oraz wielkości zainstalowanej mocy w poszczególnych krajach

Kraj	Moc nowych instalacji PV w 2011 roku (MW)	Skumulowana moc fotowoltaiki w 2011 roku (MW)
Włochy	9000	12500
Niemcy	7500	24700
Chiny	2000	2900
USA	1600	4200
Francja	1500	2500
Japonia	1100	4700
Australia	700	1200
Wielka Brytania	700	750
Belgia	550	1500
Hiszpania	400	4200
Grecja	350	550
Słowacja	350	500
Kanada	300	500
Indie	300	450
Ukraina	140	140
Reszta Świata	1160	6060
Razem	27650	67350

W zestawieniu nie występuje Polska, ponieważ moc zainstalowana w źródłach fotowoltaicznych w roku 2013 ma wartość około 3MW [14]. Świadczy to o niewielkim zainteresowaniu tą technologią wytwarzania energii elektrycznej w Polsce. Rozpowszechnianie źródeł fotowoltaicznych jest zależne od państwowego systemu wsparcia. Obecnie, w warunkach krajowych, koszty zakupu paneli i produkcji energii nie mogą konkurować z kosztami energii wytwarzanej w elektrowniach konwencjonalnych. W Niemczech, gdzie obowiązują korzystny dla fotowoltaiki system wsparcia, łączna moc systemów fotowoltaicznych zainstalowanych w Niemczech osiągnęła z końcem grudnia

2013 roku 35,6 GW [15]. W Polsce panują podobne warunki nasłonecznienia do tych występujących w Niemczech. Należy przypuszczać, że jeżeli w Polsce zostałyby wprowadzone systemy wsparcia podobne do tych z zachodniej granicy, nastąpiłby gwałtowny wzrost mocy zainstalowanej w źródłach fotowoltaicznych.

Typy ogniw fotowoltaicznych

Największe szanse na wzrost udziału źródeł fotowoltaicznych w produkcji energii elektrycznej są związane z instalacjami domowymi. Niewielkie źródła mogą być instalowane przez odbiorców indywidualnych, w celu obniżenia rachunków za energię elektryczną. Taki odbiorca (prosument) staje przed koniecznością wyboru odpowiedniej technologii oraz mocy źródeł fotowoltaicznych. Najpopularniejsze, polikrystaliczne ogniwa fotowoltaiczne charakteryzują się sprawnością na poziomie 14-18% oraz niewygórowaną ceną. Innym rodzajem źródeł fotowoltaicznych są ogniwa monokrystaliczne, których sprawność zawiera się w przedziale 18-22%. Są to najdroższe rodzaje ogniw [4].

Obecnie największy rozwój obserwuje się w ogniwach cienkowarstwowych. Swoją nazwę zawdzięczają niewielkiej grubości, rzędu kilku mikrometrów, aktywnego półprzewodnika, co oznacza, że są one cieńsze od ogniw polikrystalicznych i monokrystalicznych o około 100 razy. Tego typu ogniwa mają niższą sprawność maksymalną, jednak charakteryzują się dużo większą produkcją energii w przypadku mniejszego nasłonecznienia, co w ujęciu całorocznym daje rezultaty podobne do innych ogniw. Cena ogniw cienkowarstwowych jest dużo niższa niż ogniw klasycznych, co stawia je w dobrym świetle przy wyborze elementów źródła [4].

Sprawności jakie są uzyskiwane w źródłach fotowoltaicznych powodują, że istotnym parametrem elektrowni jest powierzchnia. Jeśli mamy bardzo ograniczoną powierzchnię, np. dach, rozsądne wydają się zastosowanie ogniw o większej sprawności.

Źródła fotowoltaiczne wytwarzają energię elektryczną będąc źródłem prądu stałego (DC). Niezbędne jest więc wykorzystanie inwerterów do zamiany prądu stałego (DC) na prąd przemienny (AC) o częstotliwości sieciowej. Inwertery wykorzystywane w elektrowniach fotowoltaicznych charakteryzują się wysoką sprawnością (powyżej 98%) oraz stosunkowo niewielkimi mocami znamionowymi (zazwyczaj kilka kilowatów) [5]. Małe moce inwerterów powodują, że w przypadku dużych farm fotowoltaicznych wykorzystuje się duże ilości inwerterów. Połączenie ogniw do inwertera jest zależne od jego napięcia znamionowego. Zwykle jednak kilka paneli łączonych jest szeregowo, a następnie przyłączane są do inwertera.

Modele źródeł fotowoltaicznych

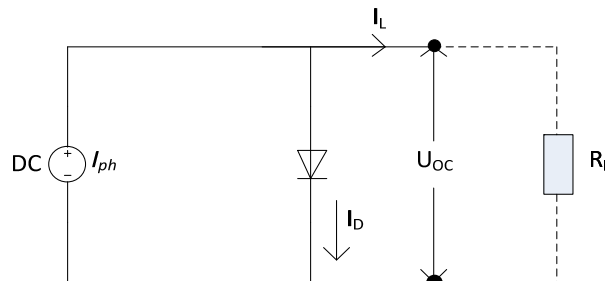
Schemat podstawowego modelu źródła fotowoltaicznego przedstawiono na rysunku 1. Przedstawiony układ odzwierciedla schemat idealnego, bezstratnego źródła fotowoltaicznego.

Układ przedstawiony na rysunku. 1 można opisać następującym równaniem [6]:

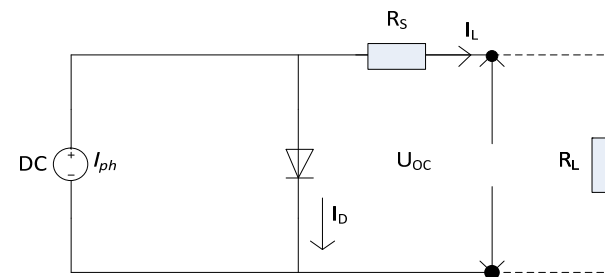
$$(1) \quad I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

gdzie: I_0 – prąd związany z temperaturą, U – potencjał na wyprowadzeniach omowych fotoogniw, U_T – potencjał termiczny

Ze względu na duże uproszczenia model przedstawiony na rysunku. 1 oraz opisany zależnością (1) może okazać się niewystarczający do analiz z zakresu systemów elektroenergetycznych. Dlatego do modelu wprowadza się rezystancję szeregową R_s i współczynnik niedoskonałości diody n . Parametry te pozwalają uwzględnić straty wewnętrzne źródła. Schemat źródła fotowoltaicznego z uwzględnieniem parametrów R_s i n przedstawiono na rysunku. 2.



Rys. 1. Schemat idealnego źródła fotowoltaicznego (I_{ph} – prąd związany z natężeniem promieniowania, I_L – stały fotoprąd, I_D – wsteczny prąd nasycenia w diodzie, U_{oc} – napięcie fotoogniwa, R_L – rezystancja obciążenia ogniwa) [6]

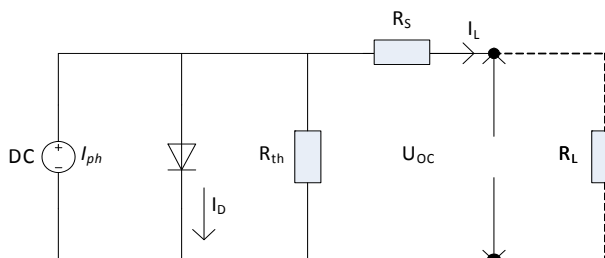


Rys 2. Schemat źródła fotowoltaicznego z uwzględnieniem parametrów R_s i n (R_s – rezystancja szeregową, n – współczynnik doskonałości diody) [7]

Model matematyczny układu przedstawionego na rysunku. 2 opisać można następującą zależnością [7]:

$$(2) \quad I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{nU_T}} - 1 \right)$$

Dokładniejszy model obwodowy ogniwa fotowoltaicznego niż przedstawiony na rysunku. 2 oraz opisany zależnością (2) uwzględnia rezystancję bocznikową

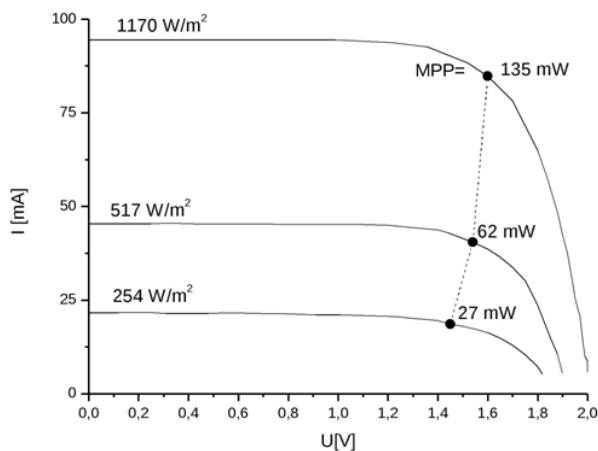


Rys 3. Schemat źródła fotowoltaicznego z uwzględnieniem R_s , n oraz R_{sh} (R_{sh} – rezystancja bocznikowa) [7]

Model przedstawiony na rysunku 3 można opisać następująco:

$$(3) \quad I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{nU_T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s I}{R_{sh}}$$

Przykładowa charakterystyka prądowo napięciowa źródła fotowoltaicznego została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa $I(U)$ ogniwa fotowoltaicznego z wyznaczonymi punktami mocy maksymalnej [8]

Badanie stabilności systemu elektroenergetycznego ze źródłami fotowoltaicznymi

System elektroenergetyczny ze względu na swoją złożoność oraz nieliniowy charakter jest trudnym obiektem badań. Z uwagi na bezpieczeństwo energetyczne, większość badań systemu elektroenergetycznego ma charakter symulacyjny. W tym celu niezbędne jest określenie jakie konkretnie badania chcemy przeprowadzić. Jest to związane z wieloma uproszczeniami zastosowanymi podczas budowania modeli odwzorowujących działanie rzeczywistych elementów systemu.

W badaniach stabilności napięciowej możemy wyróżnić kilka elementów mających duży wpływ na wyniki analizy. Należą do nich przede wszystkim: odwzorowanie charakterystyki kołowej generatora oraz odpowiednie zamodelowanie charakterystyki napięciowej odbioru kompleksowego. Dodatkowym czynnikiem komplikującym badanie może być kompensacja mocy biernej usytuowana w równych węzłach systemu elektroenergetycznego [17]. W przypadku źródła fotowoltaicznego najważniejsze jest zakwalifikowanie go do odpowiedniego zbioru elementów. Ze względu na niewielkie moce i duże rozproszenie ogniw fotowoltaicznych rozsądne wydaje się zakwalifikowanie tych źródeł do odbioru kompleksowego. Problem pojawia się z odpowiednim dodaniem tych źródeł do istniejącego modelu odbioru kompleksowego. By dokonać tego w odpowiedni sposób należy przejść od pojedynczego fotoogniwa do zbioru tych ogniw.

W badaniach stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego źródła fotowoltaiczne można traktować jako część odbioru kompleksowego. Należy pamiętać, że tego rodzaju generacja jest przyłączana do systemu elektroenergetycznego za pomocą inwerterów. Moc na wyjściu z takiego inwertera jest zależna od napięcia roboczego w węzle do którego jest on przyłączony. W badaniach przedstawiono 2 różne sposoby odwzorowania charakterystyk napięciowych inwerterów fotowoltaicznych [10]. Zastosowano model typu ZIP, o współczynnikach zawartych w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości współczynników a_1 , a_2 , a_3 charakterystyki statycznej inwertera w modelu ZIP [9]

Typ odbioru	a_1	a_2	a_3
Inwerter 1 (ZIP1)	3,19	-3,84	1,65
Inwerter 2 (ZIP2)	0,72	-0,98	1,25

Wartości te dotyczą modelu ZIP, w przypadku którego zależność na moc czynną można zapisać za pomocą poniższej funkcji:

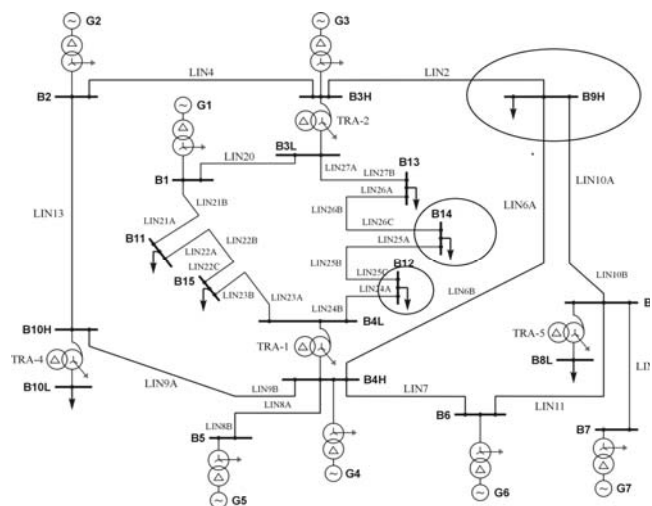
$$(4) \quad P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{U}{U_0} \right) + a_3 \right]$$

gdzie: P – wartość mocy czynnej zależnej od napięcia, P_0 – wartość mocy czynnej niezależnej od napięcia, a_1, a_2, a_3 – współczynniki charakterystyk statycznych odbioru.

W badaniach wykorzystano również model źródła fotowoltaicznego zaproponowanego w programie Power Factory [11]. Jest to model statycznego generatora, którego zadaniem jest odwzorowanie generatorów niewirujących, które najczęściej są przyłączone do sieci za pomocą inwerterów. Model ten można wykorzystać do: źródeł fotowoltaicznych, ogniw paliwowych, kompensacji mocy biernej oraz terminali HVDC [11].

System testowy

W badaniach został wykorzystany system testowy CIGRE zmodyfikowany. Jest to system elektroenergetyczny składający się z 17 węzłów (9 na poziomie 220kV i 8 na poziomie 110kV) [12]. System testowy na potrzeby badań stabilności został dodatkowo odpowiednio dopasowany. Zmiana polegała na zwiększeniu mocy odbiorów w węzłach po stronie 110 kV oraz dołączeniu źródła fotowoltaicznego do węzła B14. Schemat układu testowego został przedstawiony na rysunku 5. Na tym samym rysunku zaznaczono węzły, które zostały poddane analizie (B9H, B12, B14). Poszczególne węzły wybrano w następujący sposób: węzeł z zainstalowanym źródłem fotowoltaicznym (B14), węzeł sąsiadujący (B12) – węzeł bezpośrednio połączony z węzłem z zainstalowanym źródłem fotowoltaicznym i węzeł odległy (B9H) – węzeł o napięciu 220kV. Węzeł odległy (B9H) został on wybrany ze względu na najgorsze warunki napięciowe po stronie 220kV.



Rys. 5. Schemat modelu CIGRE zmodyfikowany [11]

Wszystkie odbiory w układzie testowym zostały zamodelowane jako model ZIP. Odbiory podzielono na 3 grupy: komercyjny, przemysłowy i mieszkaniowy. Współczynniki modelu ZIP dla poszczególnych typów odbiorów [10], podano w tabelach 3 i 4:

Tabela 3. Parametry odbioru kompleksowego modelu ZIP dla mocy czynnej

Typ odbioru	a_1	a_2	a_3
Odbiór komercyjny	0,60	0,30	0,10
Odbiór przemysłowy	1,34	-1,18	0,84
Odbiór mieszkaniowy	0,62	0,63	-0,24

Tabela 4. Parametry odbioru kompleksowego modelu ZIP dla mocy biernej

Typ odbioru	a_4	a_5	a_6
Odbiór komercyjny	9,36	-13,76	5,40
Odbiór przemysłowy	4,47	-6,19	2,72
Odbiór mieszkaniowy	6,64	-9,31	3,67

We wszystkich badaniach bardzo ważne jest znalezienie odpowiedniego wskaźnika, opisującego system elektroenergetyczny w zakresie badanych wielkości. Wskaźnikiem oceny stabilności napięciowej był zapas stabilności napięciowej wyznaczany z charakterystyk P-V i zdefiniowany następująco [16]:

$$(5) \quad k_u = \frac{P_{max} - P_0}{P_{max}} \cdot 100$$

gdzie: P_{max} – moc czynna graniczna (moc maksymalna) z charakterystyki P-V, P_0 – moc czynna pobierana w danym punkcie pracy (moc początkowa).

Wartości P_{max} i P_0 można odczytać bezpośrednio z charakterystyki P-V. Moc P_0 jest to moc odbierana w węźle przed rozpoczęciem dociążania węzła, czyli początek charakterystyki, a P_{max} to moc maksymalna jaką można dostarczyć do węzła. Z charakterystyki P-V można odczytać to jako czubek krzywej nosowej.

Tabela 5. Zapas stabilności napięciowej w węźle zawierającym źródła fotowoltaiczne (B14) w zależności od nasycenia generacją fotowoltaiczną i rodzaju modelowania

Model odbioru kompleksowego	Zapas stabilności napięciowej	Zmiana zapasu stabilności napięciowej
bez źródeł	72,0	0,0
model ZIP1 (10%)	72,7	0,7
model ZIP2 (10%)	72,7	0,7
model PV w PF (10%)	73,0	1,0
model ZIP1 (25%)	73,7	1,7
model ZIP2 (25%)	73,7	1,7
model PV w PF (25%)	74,3	2,3
model ZIP1 (50%)	75,2	3,2
model ZIP2 (50%)	75,3	3,3
model PV w PF (50%)	76,2	4,2

Tabela 6. Zapas stabilności napięciowej w węźle sąsiadującym (B12) z węzłem zawierającym źródła fotowoltaiczne w zależności od nasycenia generacją fotowoltaiczną i rodzaju modelowania

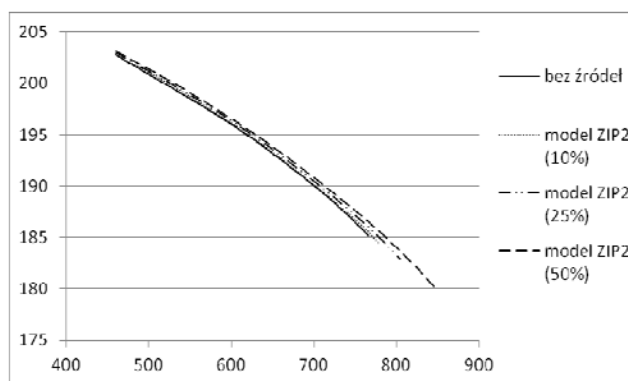
Model odbioru kompleksowego	Zapas stabilności napięciowej	Zmiana zapasu stabilności napięciowej
bez źródeł	79,3	0,0
model ZIP1 (10%)	80,0	0,7
model ZIP2 (10%)	80,0	0,7
model PV w PF (10%)	80,2	0,9
model ZIP1 (25%)	82,3	3,0
model ZIP2 (25%)	81,0	1,7
model PV w PF (25%)	81,3	2,0
model ZIP1 (50%)	82,2	2,9
model ZIP2 (50%)	82,4	3,1
model PV w PF (50%)	83,0	3,7

Tabela 7. Zapas stabilności napięciowej w węźle odległym (B9H) od źródeł fotowoltaicznych w zależności od nasycenia generacją fotowoltaiczną i rodzaju modelowania

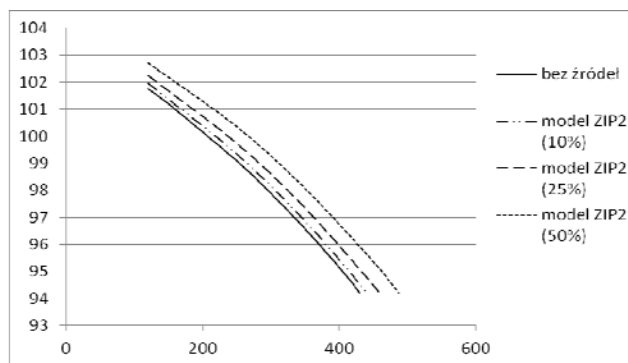
Model odbioru kompleksowego	Zapas stabilności napięciowej	Zmiana zapasu stabilności napięciowej
bez źródeł	39,9	0,0
model ZIP1 (10%)	42,7	2,8
model ZIP2 (10%)	41,0	1,1
model PV w PF (10%)	41,3	1,4
model ZIP1 (25%)	45,6	5,7
model ZIP2 (25%)	42,8	2,9
model PV w PF (25%)	43,3	3,4
model ZIP1 (50%)	45,4	5,5
model ZIP2 (50%)	45,6	5,7
model PV w PF (50%)	46,4	6,5

Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych symulacji wyliczono zapasy stabilności oraz wykreślono charakterystyki P-V w analizowanych węzłach systemu testowego



Rys. 6. Charakterystyka nosowa P-V przedstawiająca wpływ nasycenia systemu źródłami fotowoltaicznymi dla modelu ZIP2 (analiza w węźle odległym)

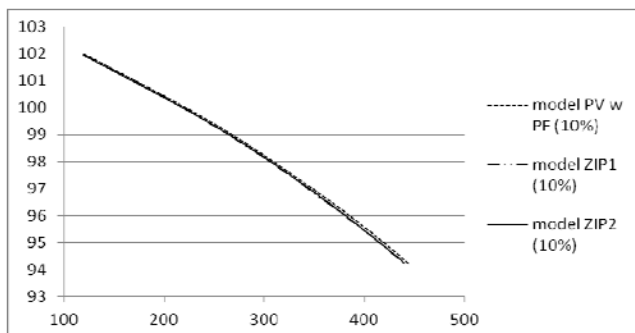


Rys. 7. Charakterystyka nosowa P-V przedstawiająca wpływ nasycenia systemu źródłami fotowoltaicznymi dla modelu ZIP2 (analiza w węźle z fotowoltaiką)

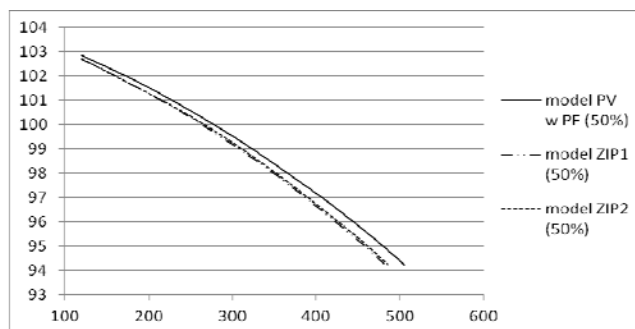
Na podstawie tabel 5 – 7 można zauważyć, że największa poprawa stabilności napięciowej występuje w węźle odległym od źródeł fotowoltaicznych. Ma to związek ze zdecydowanie najgorszymi warunkami napięciowymi przed dodaniem źródeł. Potwierdzeniem trudnych warunków w węźle jest zdecydowanie najmniejsza wartość zapasu stabilności. Na wartość współczynnika zapasu stabilności ma wpływ przede wszystkim moc generowana w źródłach fotowoltaicznych. Ma to związek ze zmniejszeniem ilości mocy przesyłanej do węzła odbiorczego. Zauważalna jest również różnica wynikająca ze sposobu modelowania źródeł fotowoltaicznych. Zapas stabilności dla modeli ZIP1 i ZIP2 ma bardzo zbliżone wartości, natomiast model

zaproponowany przez program Power Factory ma wyniki nieco lepsze, jednak różnica nigdy nie przekracza 1%.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykładowe charakterystyki P-V dla jednego sposobu modelowania (ZIP2). Dla modelowania metodą ZIP1 charakterystyki są bardzo zbliżone, natomiast dla modelu Power Factory udaje się osiągnąć większe moce maksymalne P_{max} . Z rysunków 6 i 7 wynika, że nasycenie źródłami fotowoltaicznymi ma wpływ nie tylko na maksymalną moc czynną dostarczaną do węzła, ale również na roboczą wartość napięcia w węźle. Z charakterystyk wynika też, że wpływ źródeł fotowoltaicznych na węzeł jest większy jeśli znajduje się on w pobliżu zainstalowanych źródeł fotowoltaicznych. Podobnie wygląda wpływ generacji na napięcie robocze w węźle. Jest on najbardziej widoczny w węźle z dołączoną generacją, a najmniej widoczny w węźle odległym od dołączonego źródła fotowoltaicznego.



Rys. 8. Charakterystyka nosowa P-V dla węzła z fotowoltaiką przedstawiająca wpływ modelowania źródeł fotowoltaicznych przy udziale fotowoltaiki na poziomie 10%



Rys. 9. Charakterystyka nosowa P-V dla węzła z fotowoltaiką przedstawiająca wpływ modelowania źródeł fotowoltaicznych przy udziale fotowoltaiki na poziomie 50%

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono charakterystyki P-V dla węzła z zainstalowanym źródłem fotowoltaicznym. Z charakterystyk wynika, że przy niskim poziomie generacji charakterystyki P-V są bardzo zbliżone. Różnica pojawia się przy większym nasyceniu fotowoltaiką. Zdecydowanie największy zapas stabilności jest w przypadku modelu źródła fotowoltaicznego z programu Power Factory. Wynika to przede wszystkim ze niezmienności mocy przy zmieniającym się napięciu.

Podsumowanie

Można zaobserwować wzrastające zainteresowanie ogniwami fotowoltaicznymi. Przekłada się to na wzrastającą moc zainstalowaną tych źródeł w systemie elektroenergetycznym. Z tego powodu rodzi się między innymi pytanie dotyczące wpływu tego typu źródeł na system elektroenergetyczny, w tym na jego stabilną pracę. Z przeprowadzonych badań wynika, że im większe jest

nasycenie generacją, tym istotniejsza staje się kwestia modelowania tego źródła. W przeprowadzonych badaniach założono, że źródła fotowoltaiczne zainstalowane są tylko w jednym węźle. Takie podejście pozwala na lepsze zapoznanie się ze sposobem modelowania odbiorów kompleksowych zawierających źródła fotowoltaiczne. Należy jednak pamiętać, że ze względu na swoją specyfikę, źródła te będą znajdowały się w wielu węzłach rozdzielczych systemu elektroenergetycznego. Stąd dalszym etapem badań powinna być ocena wpływu źródeł fotowoltaicznych usytuowanych w dużej liczbie węzłów systemu elektroenergetycznego na stabilność napięciową 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] Strona internetowa, Największa farma fotowoltaiczna w kraju: <http://energetyka.inzynieria.com/cat/16/art/26947/najwieksza-farma-fotowoltaiczna-w-kraju>
- [3] Skubicki M., Jatczak A.: Rentowność i perspektywy rozwoju instalacji PV w Polsce, Czysta energia, nr 12/2012
- [4] Strona internetowa, Zielona energia: http://www.zielonaenergia.eco.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=229:rodzaje-ogniw-fotowoltaicznych&catid=46:soce&Itemid=204
- [5] Strona internetowa Soltec energia odnawialna w zasięgu ręki: <http://www.soltec.pl/baterie-sloneczne/produkty/inwertery-sinusoidalne-sieciowe/139-sinusoidalna-przetwornica-napiecia>
- [6] Xiaoyan X, Yuehui H, Guoqing H, Haixiang Z, Weisheng W.: Modeling of Large-Integrated PV Station and Analysis Its Impact on Grid Voltage, International Conference Sustainable Power Generation and Supply, 2009
- [7] Castaner L., Silvestre S.: Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice, West Sussex 2002
- [8] Strona internetowa Instytutu fizyki, wydział inżynierii procesowej, materiałowej i fizyki stosowanej politechniki częstochowska: <http://pldocs.org/docs/index-153722.html>
- [9] Hajagos L., Danai B.: Laboratory Measurements and Models of Modern Loads and Their Effect on Voltage Stability Studies, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 584-592
- [10] Gryszpanowicz K.: Wpływ modelowania odbioru kompleksowego na stabilność napięciową systemu elektroenergetycznego, Przegląd elektrotechniczny 03a/2013, pp. 8-13
- [11] User's manual – DigSILENT Power Factory 14.1.1 (x64)
- [12] Kacejko P.: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004
- [13] Yun Tiam Tan., Kirschen D.S: Impact on the Power System of a Large Penetration of Photovoltaic Generation Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1-8.
- [14] Mapa źródeł odnawialnych energii, Urzędu Regulacji Energetyki, <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html>
- [15] Niemcy: 2,8GW nowych mocy PV w 2014 roku, <http://pvportal.pl/nowosci/5643/niemcy-2-8gw-nowych-mocy-pv-w-2014-roku>
- [16] Machowski J.: Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego. OWPW, Warszawa 2007
- [17] Szczegłow J., W. Wysocki, S. Robak: "The influence of control strategy choice on effectiveness of reactive power compensation in distribution network". Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, Vol. 88, Issue: 9a, 2012, pp. 158-161

Autorzy:

mgr inż. Konrad Gryszpanowicz, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: konrad.gryszpanowicz@ien.pw.edu.pl,
Dr hab. inż. Sylwester Robak, Prof. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: sylwester.robak@ien.pw.edu.pl