

DOI: 10.5604/20830157.1194275

## DOBÓR URZĄDZEŃ KOMPENSACYJNYCH DLA FARMY WIATROWEJ PRZYŁĄCZONEJ DO SIECI 110 KV

Paweł Pijarski<sup>1</sup>, Michalina Gryniewicz-Jaworska<sup>2</sup><sup>1</sup>Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, <sup>2</sup>Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki

**Streszczenie.** Energetyka wiatrowa w Polsce zaczęła się rozwijać na początku lat 90 XX wieku, jednak jej dynamiczny wzrost można zaobserwować w kolejnych latach. Pod koniec 2014 roku łączna moc zainstalowana w farmach wiatrowych w Polsce wynosiła ok. 3 800 MW i nadal rośnie. Budowa oraz instalacja farm wiatrowych o dużych mocach niesie za sobą szereg problemów związanych z kompensacją linii kablowych 110 kV, wyprowadzających moc z farmy wiatrowej o znacznych długościach oraz właściwym doбором urządzeń kompensacyjnych. W artykule opisano zagadnienia związane regulacją mocy biernej w farmach wiatrowych oraz dokonano analizy poszczególnych urządzeń kompensacyjnych wykorzystywanych w energetyce wiatrowej.

**Słowa kluczowe:** farmy wiatrowe, kompensacja mocy biernej, urządzenia kompensacyjne

### SELECTION OF COMPENSATION WIND FARM EQUIPMENT CONNECTED TO THE NETWORK 110 KV

**Abstract.** Wind energy in Poland began to develop in the early 90s of the twentieth century, but its dynamic growth can be observed in subsequent years. At the end of 2014, the total installed capacity in wind farms in Poland amounted to 3 800 MW and continues to grow. The construction and installation of wind farms with high power brings with it a number of problems related to the compensation of the 110 kV cable lines of considerable length and the right type of compensation equipment. The article describes issues related to regulation of reactive power in wind farms and an analysis of individual compensation equipment used in wind energy.

**Keywords:** wind farms, compensation of reactive power compensation device

#### Wstęp

Dynamiczny rozwój Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) wynika głównie z wyczerpywania się tradycyjnych surowców energetycznych oraz konieczności ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Do najszybciej rozwijającej się gałęzi OZE należy zaliczyć energetykę wiatrową, której uwarunkowania rozwoju zależą od wielu czynników takich jak: zasoby wiatru, lokalna infrastruktura techniczna i energetyczna [9].

Wiatr jako zasób energii nie emituje szkodliwych zanieczyszczeń. Przy średniej prędkości wiatru, około 5 m/s cena jednostkowa energii pochodząca z wiatru jest niższa niż w przypadku ceny energii pozyskanej z tradycyjnych elektrowni ciepłych. Niestety zasoby energetyczne wiatru są różne na terenie Polski, dlatego główne inwestycje związane z budową i instalacją farm wiatrowych znajdują się na terenach potwierdzającą ich rentowność. Według danych z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej najkorzystniejsze warunki wiatrowe posiadają tereny: najbardziej wysunięte na północ części wybrzeża, rejon wyspy Wolin, środkowa Wielkopolska i Mazowsze, Beskid Śląski i Żywiecki, Bieszczady oraz Pogórze Dynowskie [2].

Energetyka wiatrowa pod względem mocy zainstalowanej jest najwyżej notowaną w kategorii odnawialnych źródeł energii (OZE) zasilających KSE w energię elektryczną. Siłownie wiatrowe często przyłączane są do linii elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnej 110 kV lub za pomocą linii promieniowych do węzłów NN/110 kV.

Ze względu na przepisy prawne dotyczące Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej, które nakładają na inwestorów farmy wiatrowej konieczność zapewnienia regulacji dotyczących mocy biernej generowanej przez farmę wiatrową (FW), której nadmiar prowadzi do powstania w systemie elektroenergetycznym rozproszonych źródeł mocy biernej o dość znacznych wartościach. W przypadku farm wiatrowych o dużych mocach należy rozpatrywać je pod względem wszelkich regulacji prowadzonych w systemie elektroenergetycznym. Wynika to z następujących przesłanek:

- treści aktów prawnych formułujących wymagania wobec farm wiatrowych przyłączonych do KSE (IRiESP, IRiESD),
- zapisów w warunkach przyłączenia wydawanych indywidualnie dla każdego obiektu (wymaganie zawarte w IRiESP, IRiESD),
- faktycznych właściwości technicznych współczesnych farm wiatrowych posiadających duże możliwości regulacyjne,

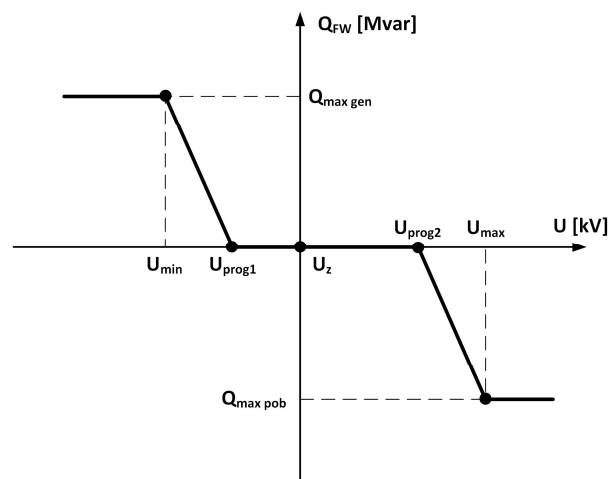
- zapewnienia bezpiecznej pracy systemu elektroenergetycznego jako nadrzędnego warunku właściwej współpracy wszystkich urządzeń i instalacji.

Farma wiatrowa jako obiekt przyłączony do systemu, w normalnych warunkach pracy dostarcza do sieci moc czynną, natomiast w zakresie mocy biernej może być jej źródłem lub odbiornikiem. Efekt regulacyjny wnoszony przez farmę mierzony jest przez Operatora w miejscu jej przyłączenia.

#### 1. Wymagania techniczne dla farm wiatrowych odnośnie kompensacji mocy biernej

Wymagania Operatorów sieci dla farm wiatrowych dotyczące mocy biernej, wynikają między innymi z konieczności utrzymania dopuszczalnej wartości napięcia oraz odpowiedniego współczynnika mocy w miejscu przyłączenia. Regulacja napięcia i mocy biernej, w dużych farmach wiatrowych, powinna się odbywać w trybie autonomicznym, przy współpracy z nadrzędnym systemem sterowania i regulacji napięcia i mocy biernej.

Zapisy IRiESP oraz IRiESD wymagają od farm wiatrowych takiego wyposażenia, aby możliwe było zapewnienie przez nie określonych warunków napięciowych w miejscu przyłączenia. W warunkach przyłączenia podawane są wymagania odnośnie charakterystyki statycznej działającego lokalnie układu regulacji napięcia (rys. 1).



Rys. 1. Charakterystyka statyczna układu regulacji napięcia farmy wiatrowej [11]

Przedstawiona charakterystyka jest z reguły sparаметryzowana. Zakresy nastawcze parametrów określone są w IRiESP [12], przy czym parametryzacja odbywa się indywidualnie dla danej farmy wiatrowej.

Wymaganie związane z regulacją mocy biernej dotyczy utrzymania odpowiedniego współczynnika mocy, zarówno jeżeli chodzi o pobór jak i generację mocy biernej. Często w warunkach przyłączenia farm wiatrowych można znaleźć zapisy mówiące o dwóch stanach:

- tzw. „jałowym”, co oznacza postój (brak generacji mocy czynnej). W takiej sytuacji Operator wymaga aby współczynnik mocy w miejscu przyłączenia był bliski jedności,
- pracy, co wiąże się z koniecznością utrzymania współczynnika mocy w miejscu przyłączenia w granicach od  $\cos\varphi = 0,95$  (o charakterze indukcyjnym) do  $\cos\varphi = 0,95$  (o charakterze pojemnościowym) w pełnym zakresie obciążenia mocą czynną.

Dodatkowo, przy obciążeniu mocą czynną niższą od osiągalnej, należy udostępnić całą dostępną moc bierną w zakresie poza wymaganym współczynnikiem mocy.

Jeżeli mamy do czynienia z farmą wiatrową o dużej mocy (rzędu kilkudziesięciu MW), przyłączoną do systemu za pomocą linii kablowej 110 kV o znacznej długości (rzędu kilkudziesięciu km) wówczas dobór urządzenia kompensacyjnego musi opierać się na dwóch powyższych stanach pracy FW.

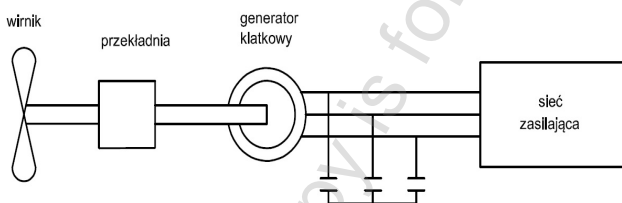
Stan, w którym farma wiatrowa nie generuje mocy czynnej (postój) wpływa na moc znamionową głównego urządzenia kompensacyjnego – zachodzi wówczas konieczność przede wszystkim kompensacji pojemności linii kablowej 110 kV oraz sieci SN FW, która odgrywa w tym przypadku mniejszą rolę.

Stan pracy FW, szczególnie przy obciążeniu mocą czynną bliską znamionowej, wpływa na określenie możliwości regulacyjnych urządzenia kompensacyjnego (np. liczby zaczeów dławika) lub też dobór dodatkowych urządzeń umożliwiających taką regulację (np. baterii kondensatorów). Przy pełnym obciążeniu mocą czynną bowiem możliwości generacji mocy biernej przez turbiny wiatrowe są niekiedy niewystarczające do utrzymania odpowiedniej wartości współczynnika mocy.

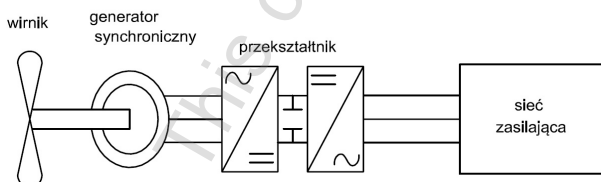
## 2. Regulacja mocy biernej farmy wiatrowej

Generacja mocy czynnej w elektrowni wiatrowej związana jest z generacją lub poborem mocy biernej [1]. Wykorzystanie mocy biernej farmy wiatrowej zależy od rodzaju generatora zastosowanego do konwersji energii wiatru na elektryczną [8].

Do najczęściej stosowanych generatorów w elektrowniach wiatrowych możemy wyszczególnić: generatory asynchroniczne klatkowe, generatory asynchroniczne pierścieniowe z przekształtnikiem w obwodzie wirnika, generatory synchroniczne z przekształtnikiem częstotliwości.



Rys. 2. Elektrownia wiatrowa z generatorem asynchronicznym klatkowym [12]



Rys. 3. Elektrownia wiatrowa z generatorem synchronicznym [12]

Generatory asynchroniczne klatkowe konstruowane są często jako maszyny o zmiennej liczbie biegunów, zazwyczaj 4 lub 6 [10]. W zależności od warunków wietrznych zostaje dołączona lub odłączona jedna para biegunów. Elektrownia pracuje z dwoma nominalnymi prędkościami obrotowymi. W przypadku generatorów pierścieniowych można sterować prędkością wirowania przez zastosowanie przekształtników energoelektronicznych sterujących prądem wirnika. Do optymalizacji pracy elektrowni w różnych warunkach wykorzystuje się czasami dwa generatory o różnej prędkości obrotowej oraz mocy wyjściowej. Rys. 2 prezentuje przykład elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym klatkowym.

Aktualnie coraz częściej w energetyce wiatrowej wykorzystuje się generatory synchroniczne, które mają dużą ilość par biegunów ze względu na małą prędkość obrotową wirnika. Zmiany prędkości obrotowej wirnika wywołują zmiany częstotliwości generowanego napięcia. Z tego powodu elektrownie z generatorem synchronicznym dołączane są do systemu energetycznego poprzez przekształtniki. Na rysunku 2 zaprezentowano przykład elektrowni wiatrowej z generatorem synchronicznym.

W przypadku elektrowni o małej mocy wykorzystuje się generatory asynchroniczne klatkowe, które podczas pracy pobierają z sieci moc bierną, gdzie następnie jest ona kompensowana lokalnie poprzez baterię kondensatorów [7]. Zazwyczaj stosuje się trzy stopnie regulacji wartości pojemności baterii kondensatorów. Elektrownia jest wyposażona w regulator załączający odpowiednie stopnie baterii tak, aby kompensować moc bierną pobieraną przez generator.

Dla elektrowni o małej mocy stosuje się często niesterowalną baterię kondensatorów, dobraną do kompensacji mocy biernej generatora pracującego na biegu jałowym. W przypadku pojedynczych elektrowni wiatrowych o większych mocach wykorzystuje się generatory asynchroniczne dwustronnie zasilane. Nowoczesne układy sterowania umożliwiają regulację mocy biernej o znacznym zakresie zarówno generacji i poboru mocy biernej [7].

W sytuacji gdy rozważamy elektrownie o dużych mocach oraz gdy powstaje problem kompensacji linii kablowych, wyprowadzających moc z farmy wiatrowej o długościach przekraczających kilkadziesiąt kilometrów stosuje się m. in. dławiki kompensacyjne. Dławik może być wyposażony w przełącznik zaczeów umożliwiający dostosowanie do zmiennych warunków pracy.

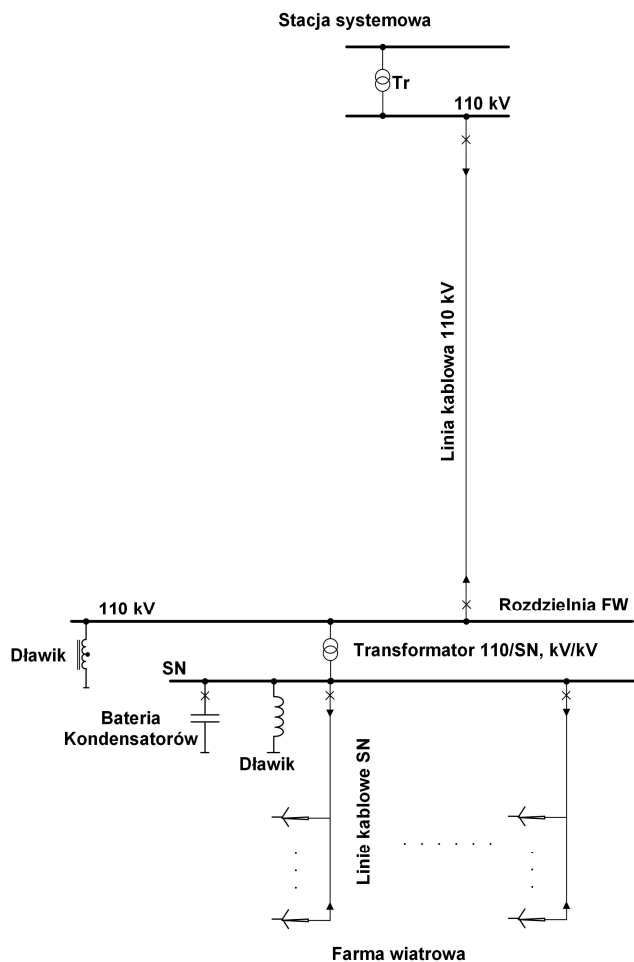
Głównym parametrem użytkowym dławików jest wytwarzana przez nie moc bierna. Moc dławików kompensacyjnych dobierana jest na podstawie obliczeń. Baterie statyczne kondensatorów w trakcie przerw obciążeniowych często doprowadzają do przekompensowania sieci. Aby zabezpieczyć sieć przed nadprodukcją mocy biernej pojemnościowej stosuje się dławiki kompensacyjne [5].

## 3. Kompensacja pojemności linii kablowej 110 kV

Na rysunku 4 przedstawiono uproszczony schemat przyłączenia farmy wiatrowej do sieci 110 kV [4].

Farmy wiatrowe, przyłączone do systemu elektroenergetycznego (SEE) za pośrednictwem długich linii kablowych 110 kV, w warunkach zerowej generacji mocy czynnej, mogą wprowadzać do sieci 110 kV w punkcie przyłączenia moc bierną o dość znacznych wartościach, co niekorzystnie wpływa na stany napięciowe KSE.

Układ kompensacji pojemności kabla 110 kV wyprowadzającego moc z farmy wiatrowej o dużej mocy, powinien być analizowany pod względem spełnienia dodatkowych wymagań sformułowanych się w umowach przyłączeniowych jest zapewnienie w stanie jałowej pracy farmy (brak generacji mocy czynnej) współczynnika mocy  $\cos\varphi = 1$ , co wiąże się z koniecznością zastosowania urządzenia kompensacyjnego (np. dławika).



Rys. 4. Uproszczony schemat przyłączenia farmy wiatrowej do sieci 110 kV

Drugie podstawowe zagadnienie związane jest z pracą generacyjną farmy wiatrowej (FW). Oznacza ono konieczność zapewnienia możliwości generacji mocy biernej farmy, tak aby w całym zakresie możliwej generacji mocy czynnej, pomiar mocy biernej w punkcie przyłączenia zapewniał współczynnik mocy nie mniejszy niż 0,95 zarówno w zakresie poboru mocy biernej jak też jej generacji.

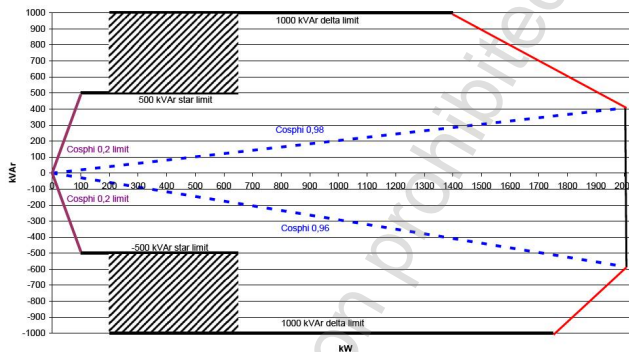
Należy zwrócić uwagę, że układy przekształtnikowe, w które wyposażone są wiatraki mają bardzo szerokie możliwości generacyjne w odniesieniu do mocy biernej. Znaczna część produkowanych jednostek o mocach znamionowych  $P_{nG}$  równych 2–3 MW ma zdolność generacji każdej ilości mocy biernej z przedziału od  $-0,5 P_{nG}$  do  $0,5 P_{nG}$ , w zakresie generacji mocy czynnej prawie od zera (np. od 20 kW) aż do pełnej mocy znamionowej  $P_{nG}$ .

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowe charakterystyki mocy biernej w funkcji generowanej mocy czynnej odpowiednio dla turbin Vestas V90 2 MW oraz Vestas V90 3 MW.

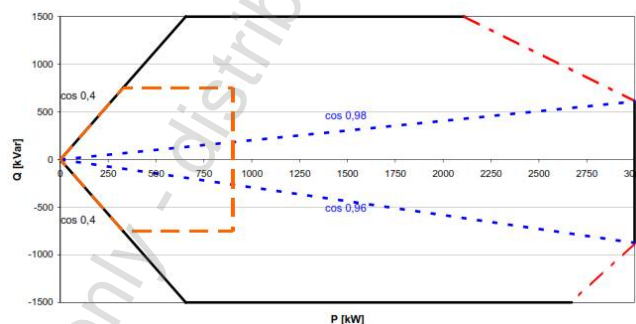
Producent turbin Vestas V90 2 MW i Vestas V90 3 MW (dotyczy to także nowoczesnych jednostek innych producentów) podaje, że dzięki układowi regulacji mogą one pracować w zakresie współczynnika mocy od  $0,96_{ind}$  do  $0,98_{poj}$  (krzywe oznaczone niebieską linią przerywaną na rysunkach 5 i 6). Przekłada się to na pracę w warunkach znamionowych (generacja mocy czynnej 2 MW i 3 MW) z generacją mocy biernej 0,406 Mvar (dla turbiny 2 MW) i 0,609 Mvar (dla turbiny 3 MW) albo z poborem mocy biernej 0,583 Mvar (dla turbiny 2 MW) i 0,875 Mvar (dla turbiny 3 MW).

Dzięki właściwościom współczesnych układów energoelektronicznych można jednakże znacząco poszerzyć zakres możliwości generacyjnych siłowni wiatrowych. Dzięki regulacji zwanej umownie regulacją specjalną obszar ten jest w proponowanych obecnie siłowniach wyraźnie większy, choć przy maksymalnej generacji mocy czynnej wartości krańcowe mocy biernej pozostają bez zmian). Ta opcja generacji mocy biernej nazywa się Wind

Free i jest możliwa w pełnym zakresie generacji mocy czynnej. Jeśli uwzględni regulację specjalną, uzyskuje się punkty pracy daleko poza obszarem normatywnym. Tak określony obszar pracy pojedynczego wiatraka pokazano również na powyższych rysunkach (krzywe oznaczone linią czarną i czerwoną).



Rys. 5. Dopuszczalny obszar pracy pojedynczego wiatraka Vestas V90 2 MW przy różnych wartościach generowanej (pobieranej) mocy biernej z uwzględnieniem regulacji specjalnej [3]



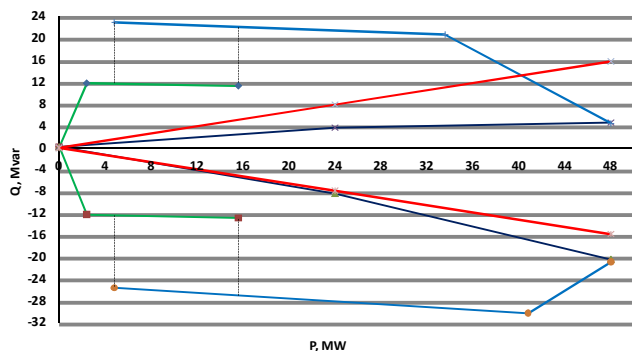
Rys. 6. Dopuszczalny obszar pracy pojedynczego wiatraka Vestas V90 3 MW przy różnych wartościach generowanej (pobieranej) mocy biernej z uwzględnieniem regulacji specjalnej [3]

Nie są to jednak możliwości wystarczające [6]. Dla generacji mocy czynnej bliskiej znamionowej i dla wszystkich jednostek pracujących, straty mocy biernej związane z przesyłem mocy czynnej destabilizują częściowo możliwości generacyjne przekształtników. Również i w tym przypadku ostateczny wynik pomiaru mocy w punkcie przyłączenia ma charakter stochastyczny – decyduje o tym niepewność w określaniu parametrów kabla 110 kV oraz urządzenia kompensującego w farmach wiatrowych.

Ogólnie rzecz biorąc, przy zerowej generowanej mocy czynnej, zachodzi potrzeba kompensacji indukcyjnej, natomiast przy generacji mocy czynnej, bliskiej znamionowej, konieczna staje się kompensacja pojemnościowa, ze względu na niespełnienie warunku co do wymaganej wartości współczynnika mocy.

Na rysunku 7 przedstawiono przykładową charakterystykę dla farmy wiatrowej o mocy 48 MW, składającej się z turbin Vestas V90 2 MW.

Krzywa oznaczona kolorem czerwonym przedstawia dopuszczalny współczynnik mocy, natomiast pozostałe krzywe odnoszą się do farmy wiatrowej. Z wykresu wynika zatem, że dla opcji  $\cos\phi = 0,96_{ind}$  wymagania co do możliwości regulacyjnych farmy w zakresie mocy biernej są spełnione (charakterystyka dolna farmy znajduje się poniżej dolnej krzywej oznaczonej na czerwono). Natomiast dla opcji  $\cos\phi = 0,98_{poj}$  wymagania co do możliwości regulacyjnych farmy w zakresie mocy biernej byłyby spełnione po przyłączeniu po stronie SN stacji farmy baterii kondensatorów o mocy ok. 11 Mvar i załączeniu jej przy maksymalnej generacji mocy czynnej i zapotrzebowaniu systemu na moc bierną. Górna charakterystyka farmy powinna znaleźć się bowiem ponad górną krzywą czerwoną. Z wykresu widać jednak, że przy mocy czynnej powyżej ok. 40 MW wymaganie to nie jest spełnione. Stąd pojawia się konieczność zastosowania dodatkowych urządzeń kompensacyjnych.



Rys. 7. Obszar możliwej generacji mocy biernej przez przykładową farmę wiatrową o mocy 48 MW (na poziomie 110 kV) dla różnych wartości mocy czynnej wiatraków farmy, przy pracy w obszarze dopuszczalnych wartości współczynnika mocy wraz z uwzględnieniem regulacji specjalnej

Aby spełnić oba powyższe wymagania (stan jałowy oraz stan pracy) można zastosować dławik o stałej reaktancji FSR (*Fixed Shunt Reactor*) przyłączony do szyn 110 kV GPZ FW oraz dodatkowo wykorzystać baterię kondensatorów SN o regulowanej skokowo pojemności, w celu precyzyjnego dopasowania poziomu generacji mocy biernej do potrzeb układu kompensacji.

Drugim rozwiązaniem może być zastosowanie dławika regulowanego VSR (*Variable Shunt Reactors*) o odpowiednio dobranych zaczepach. W stanie bez generacji następuje kompensacja linii kablowej 110 kV, natomiast podczas pracy, szczególnie przy dużych mocach, wykorzystywane są zaczepy. Dławik ten pełni wtedy rolę swoistego zaworu, który udostępnia dla potrzeb bilansu mocy biernej farmy (mierzonego w punkcie przyłączenia) rezerwar mocy biernej, którym jest pojemność kabla. Zmniejszając moc dławika (szczególnie przy generacji mocy czynnej bliskiej znamionowej), poprzez właściwą regulację zaczepową, uwzględniając także warunki napięciowe, osiąga się stan niedokompensowania kabla 110 kV zyskując jednocześnie brakującą moc bierną.

Można stosować również inne urządzenia do kompensacji mocy biernej, takie jak układy FACTS z płynną regulacją SVC (Static Var Compensator) czy STATCOM. Są one jednak dość kosztowne dlatego nie zajmowano się nimi szerzej w niniejszym artykule.

## Podsumowanie

W artykule opisano zagadnienie związane z kompensacją mocy biernej w farmach wiatrowych o dużych mocach, przyłączonych do SEE za pomocą długich linii kablowych 110 kV oraz podkreślono problem związany z doбором urządzeń kompensacyjnych. Dobierając właściwe urządzenie kompensacyjne należy uwzględnić problem niepewności związany z jego reaktancją oraz pojemnością jednostkową kabla 110 kV. Do kompensacji mocy biernej można wykorzystać, dławiki FSR o stałej wartości induk-

cyjności lub dławiki o regulacji zaczepowej VSR o właściwie dobranej liczbie zaczepów oraz skoku zaczepu. Dławiki VSR są droższym rozwiązaniem ale pozwalają na opanowanie problemu związanego z niepewnością, wynikającą z ich procesu produkcyjnego oraz kabla 110 kV.

## Literatura

- [1] Asghar Saqib M.: Power-quality issues and the need for reactive-power compensation in the grid integration of wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 43/2015, 51–64.
- [2] Badyda K.: Energetyka wiatrowa Aktualne trendy rozwoju w Polsce. *Energetyka* 5/2013, 393–395.
- [3] Grządzielski I.: Sposoby kompensacji mocy biernej farm wiatrowych, Międzynarodowe Targi Energetyki Expopower, Poznań, 2010.
- [4] Kacejko P., Pijarski P., Adamek S.: Kompensacja linii kablowych 110 kV – możliwości i ograniczenia. *ActaEnergetica* 3/2015, 34–38.
- [5] Kacejko P., Pijarski P.: Przyłączanie farm wiatrowych – ograniczenia zamiast przewymiarowanych inwestycji. *Rynek Energii* 1(80), 2009, 10–15.
- [6] Kacejko P.: Inżynieria Elektryczna i Technologie Informatyczne w Nowoczesnych Technologiach Energetycznych, 2010.
- [7] Klucznik J.: Udział farm wiatrowych w regulacji napięcia w sieci dystrybucyjnej. *Acta Energetica* 1/2011, 39–45.
- [8] Lubośny Z.: Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT, 2010.
- [9] www.ioze.pl/energetyka-wiatrowa/generatory-elektrowni-wiatrowych [03.09.2015]
- [10] www.polishwindenergy.com/index.php/pl/component/content/article/90-elektrownia-wiatrowa-z-generatorem-asynchronicznym-klatkowym [03.06.2015]
- [11] www.pse.pl [25.09.2015]
- [12] www.winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy2/10856/full10856.pdf [02.06.2015]

**Dr inż. Paweł Pijarski**  
e-mail: p.pijarski@pollub.pl



Studia na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej ukończył w 2004 r. Pracę doktorską obronił w 2012 roku. Od 2005 roku jest pracownikiem Politechniki Lubelskiej. Jego zainteresowania naukowe związane są obecnie z wpływem oddziaływania rozproszonego lokowania źródeł wytwórczych na pracę systemu elektroenergetycznego, wraz z możliwością elektroenergetycznych linii napowietrznych na zmiany mocy generowanych w poszczególnych źródłach wytwórczych, optymalizacją rozplywów mocy biernej, a także heurystycznymi metodami optymalizacji. Jest współautorem kilkudziesięciu artykułów i prac poświęconych tej tematyce.

**Mgr inż. Michalina Gryniwicz-Jaworska**  
e-mail: michalina.gryniwicz.jaworska@vp.pl



Mgr inż. Michalina Gryniwicz-Jaworska jest doktorantem w Instytucie Informatyki Politechniki Lubelskiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z optymalizacją wielokryterialną.

otrzymano/received: 11.06.2015

przyjęto do druku/accepted: 07.07.2015