

Układ sterowania mocą bierną farmy wiatrowej wykorzystujący możliwości regulacyjne przekształtników, dławika zaczepowego oraz pojemność kabla zasilającego farmę

Streszczenie. W artykule przedstawiono problem kompensacji mocy biernej w dużych farmach wiatrowych, przyłączonych do sieci elektroenergetycznej za pomocą linii kablowych 110 kV o długości kilkudziesięciu kilometrów. Uwzględniając wymagania operatora sieci w tym zakresie, przedstawiono wyniki obliczeń dla przykładowej elektrowni wiatrowej o mocy kilkudziesięciu megawatów. W analizie skupiono uwagę na pracy farmy w pełnym zakresie jej obciążenia.

Abstract. The article presents the problem of reactive power compensation for large wind farms, connected to the grid via a 110 kV cable lines with a length of several kilometers. Taking into account the requirements of the network operator, results of calculations for sample wind power plant are presented. The analysis refers to wind farm which works fully load. General idea compensation scheme is presented and describe. (Wind Farm Reactive Power Control Using Regulatory Potentiality of Converters, Tapped Variable Reactors and Capacitance of the Farm Feeder Cable).

Słowa kluczowe: farma wiatrowa, kompensacja mocy biernej.
Keywords: wind farm, compensation of reactive power.

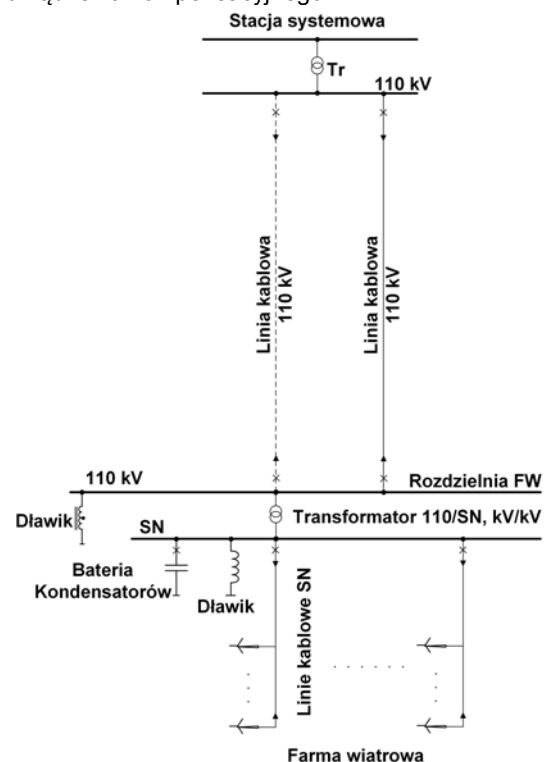
Wstęp

Farmy wiatrowe przyłączone do systemu elektroenergetycznego powinny świadczyć na jego rzecz określone usługi systemowe. Niezależnie od tego czy będą to usługi opłacane przez operatora systemu, czy też ich świadczenie będzie wynikało z obowiązków przyjętych przez strony w umowie o przyłączenie. Z technicznego punktu widzenia farma i jej infrastruktura muszą spełniać określone wymagania techniczne. Część tych wymagań wiąże się z problemem generacji przez farmę mocy biernej o określonej wartości. Z reguły operator wymaga, aby niezależnie od poziomu generowanej mocy czynnej, farma dostarczała w miejscu przyłączenia moc bierną wynikającą z zadanej współczynnika mocy (najczęściej jest to wartość $\cos\varphi=0,95$). Współczesne układy przekształtnikowe stwarzają możliwości generacji lub poboru mocy biernej o wartości $0,6P_{maxw}$ praktycznie w całym zakresie generacji mocy czynnej turbiny wiatrowej od 0 do P_{maxw} . Udostępniają one funkcję WindFree umożliwiającą generację mocy biernej przez generatory, nawet przy braku wiatru. Pomimo to, w warunkach generacji mocy czynnej zbliżonej do maksymalnej, wprowadzenie do sieci mocy biernej o wartości $Q_{PCC} = n \cdot P_{maxw} \cdot tg\varphi_{max}$ przez n turbin wiatrowych tworzących farmę, napotyka na trudności. Wynikają one ze strat podłużnych mocy biernej na reaktancjach transformatorów i kabli w sieci wewnętrznej elektrowni na odcinku od farmy do miejsca przyłączenia (PCC). Możliwe rozwiązania to dodatkowe baterie kondensatorów oraz kosztowne układy kompensacyjne typu SVC lub STATCOM. Autorzy zwracają uwagę na inną możliwość zapewnienia brakującej mocy biernej. Polega ona na zastosowaniu dławika z regulacją zaczepową, którego głównym zadaniem jest kompensacja mocy biernej kabli łączących farmę z PCC w warunkach pracy jałowej. Jego zastosowanie wynika bowiem z innych wymagań operatorów. Dodatkowym zadaniem takiego dławika może być „udostępnianie” zdolności generacyjnych kabli wysokiego napięcia, poprzez celowe i kontrolowane rozkompensowanie. Tym samym pojemność kabli 110 kV uzupełnia możliwości generacyjne turbin wiatrowych. W rezultacie, w punkcie przyłączenia operator może dysponować odpowiednią ilością mocy biernej, która w wymaganych warunkach systemowych zapewni jego stabilną pracę. W artykule przedstawiono symulacyjną

analizę takiego układu wraz z układem regulacyjnego, wykazując skuteczność jego działania w różnych warunkach napięciowych. Tym samym może on stanowić alternatywę dla znacznie droższych rozwiązań opartych na układach typu FACTS, które proponowane jest dla niektórych inwestycji.

Rozpatrywany schemat przyłączenia farmy wiatrowej do sieci elektroenergetycznej

Przykładowy schemat przyłączenia przedstawiono na rys. 1. Pokazano również dławiki po stronie WN i SN oraz baterię kondensatorów. O tym, czy po stronie SN znajdzie konieczność stosowania dodatkowych urządzeń do kompensacji mocy biernej decyduje dobór głównego urządzenia kompensacyjnego.



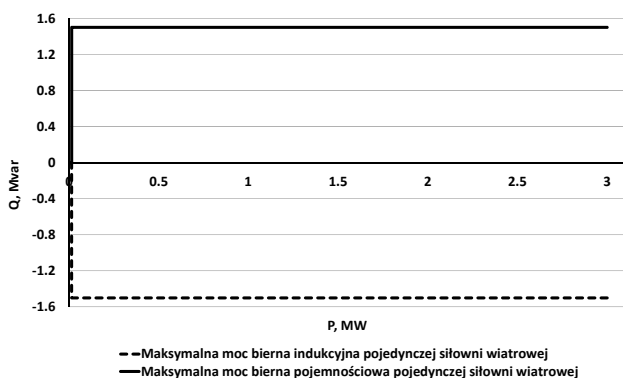
Rys.1. Poglądowy schemat przyłączenia farmy wiatrowej do sieci elektroenergetycznej

W pewnych sytuacjach, ze względu na brak pozwolenia na budowę linii napowietrznej, przyłączenie farmy wiatrowej o dużej mocy może być zrealizowane za pomocą jednotorowej lub dwutorowej linii kablowej 110 kV. Linia ta może być zamodelowana jako linia długa o parametrach rozłożonych lub w postaci czwórnika typu Π (o parametrach skupionych) [6]. Ponieważ linia kablowa składa się zazwyczaj z kilku sekcji (czasami, z pewnych względów, o różnych przekrojach) toteż zastępując każdy odcinek danej sekcji czwórnikiem typu Π otrzymuje się model drabinkowy. Takim modelem posługiwano się w niniejszym artykule.

Możliwości produkcji/poboru mocy biernej w siłowniach wiatrowych

Większość obecnie produkowanych turbin wiatrowych o mocach znamionowych równych 2-3 MW ma zdolność generacji każdej ilości mocy biernej z przedziału zawierającego się w granicach $\pm 50\%$ znamionowej mocy czynnej, w zakresie generacji mocy czynnej prawie od zera aż do pełnej mocy znamionowej P_{NG} .

Na rysunku 2 przedstawiono przykładową charakterystykę mocy biernej w funkcji generowanej mocy czynnej.



Rys.2. Zależność mocy biernej w funkcji mocy czynnej dla siłowni wiatrowej o mocy 3 MW

Z rysunku 2 wynika, że farma wiatrowa o mocy rzędu 100 MW ma możliwość generacji/poboru mocy biernej na poziomie 50 Mvar. Jest to dość istotna wartość z punktu widzenia regulacji napięcia i mocy biernej w punkcie przyłączenia oraz utrzymania dopuszczalnej wartości $\cos \varphi$.

Powyższy rysunek przedstawia charakterystykę pojedynczego wiatraka. Natomiast wymagany współczynnik mocy powinien być zachowany w PCC, w odniesieniu do farmy wiatrowej jako całości. Zachodzi zatem konieczność uwzględnienia w obliczeniach linii kablowej, transformatora farmy, transformatorów turbin oraz linii kablowych SN. W rzeczywistości wartość $\cos \varphi$, szczególnie przy generacji mocy czynnej bliskiej znamionowej, nie zostaje zachowana. Stąd konieczność stosowania urządzeń, które zapewnią pracę farmy z uwzględnieniem wymagań operatora.

Urządzenia do kompensacji mocy biernej

Kontrola mocy biernej, której linie kablowe są znaczącym źródłem, jej koordynacja z możliwościami wytwórczymi farmy wiatrowej stają się istotnym problemem projektowym.

Najprostszym rozwiązaniem może być zastosowanie dławika o stałej indukcyjności FSR (ang. Fixed Shunt Reactor). Moc bierna pobierana może być wówczas wyrażona zależnością (1).

$$(1) \quad Q = \frac{U^2}{X_{Ln}}$$

gdzie: Q – moc dławika, X_{Ln} – reaktancja dławika, U – napięcie w miejscu przyłączenia dławika.

Dławik ten jest instalowany na końcu linii. Urządzenia te produkowane są jako suche i olejowe.

Zmienność warunków pracy sieci oraz niepewność parametrów konstrukcyjnych kabla i dławika powodują, że zachodzi konieczność korzystania z innych rozwiązań, tj.: dławików regulowanych pod obciążeniem za pomocą odczepów VSR (ang. Variable Shunt Reactor). Są to urządzenia produkowane jednostkowo pod konkretne zamówienie [1, 3].

Moc dławika w zależności od napięcia oraz liczby zwojów wyraża się zależnością [2]:

$$(2) \quad Q_L = Q_{Ln} \cdot (U / U_N)^2 \cdot \left(\frac{100}{100 + N \cdot \Delta R} \right)^2,$$

gdzie: $Q_{Ln} = \frac{U_N^2}{X_{Ln}}$ – moc dławika przy U_N i przy

znamionowej liczbie zwojów Z_N , X_{Ln} – reaktancja dławika, Q_L – moc dławika przy wybranym zaczepe N oraz dla napięcia U , N- numer zaczepe (dodatni, ujemny lub zero), ΔR – skok zaczepe w % (np. 1,5%, 2%, 2,5%, 3%).



Rys.3. Dławik z zaczeпами firmy ABB [4]

Inne urządzenia do kompensacji mocy biernej, takie jak układy FACTS z płynną regulacją SVC (ang. Static Var Compensator) czy STATCOM są urządzeniami kosztownymi. Ponieważ ich analiza nie jest celem niniejszego artykułu toteż nie będą one szerzej opisywane.

Ocena możliwości kompensacji mocy biernej w aspekcie utrzymania zakresu regulacyjnego farmy w pełnym zakresie generowanej przez nią mocy czynnej

Z uwagi na możliwości regulacyjne współczesnych układów generatorów siłowni wiatrowych farma wiatrowa o mocy kilkudziesięciu megawatów może w znaczący sposób oddziaływać na poziom napięcia, przepływy mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, szczególnie w bezpośrednim jej sąsiedztwie.

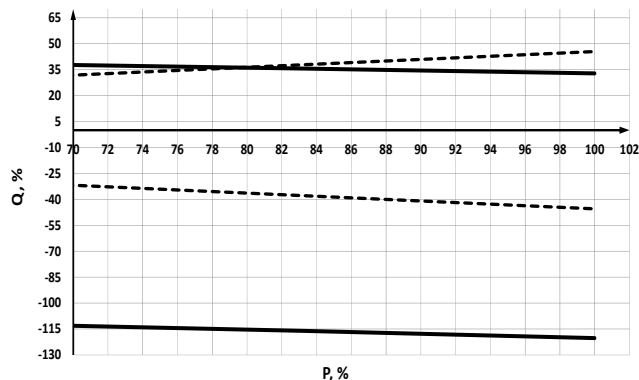
Jak już wspomniano, zalecenia Instrukcji [5] wymagają, aby farma wiatrowa w całym zakresie pracy, w miejscu przyłączenia farmy do sieci 110 kV, umożliwiała pracę ze współczynnikiem mocy $\cos \varphi$ mieszczącym się w przedziale od 0,95 do 1, dotyczy to zarówno poboru, jak również generacji mocy biernej. Oznacza to, że w zależności od sytuacji sieciowej operator może ustalić pracę farmy, w zakresie generacji mocy biernej na

poziomie od $tg \phi = 0,329$ (farma wprowadza do sieci moc czynną i bierną powiązane takim współczynnikiem, czyli $Q_{gF} = P_{gF} \cdot tg \phi$) do $tg \phi = -0,329$ (farma wprowadza do sieci moc czynną, ale pobiera z niej moc bierną). Jeśli w sieci poziomy napięcie ulegają obniżeniu stosuje się pierwszą z opcji (generacja mocy biernej). Natomiast jeżeli są zbyt wysokie to drugą (pobór mocy biernej). Z drugiej strony w sieci farmy występują zarówno straty mocy biernej (w uzwojeniach transformatorów, w kablach, na magnesowanie transformatorów) jak również jest ona jej źródłem (pojemności kabli). Zadaniem analiz prowadzonych w ramach niniejszego artykułu jest sprawdzenie, czy zaproponowany system regulacyjny pozwala na spełnienie wymagań zawartych w przepisach.

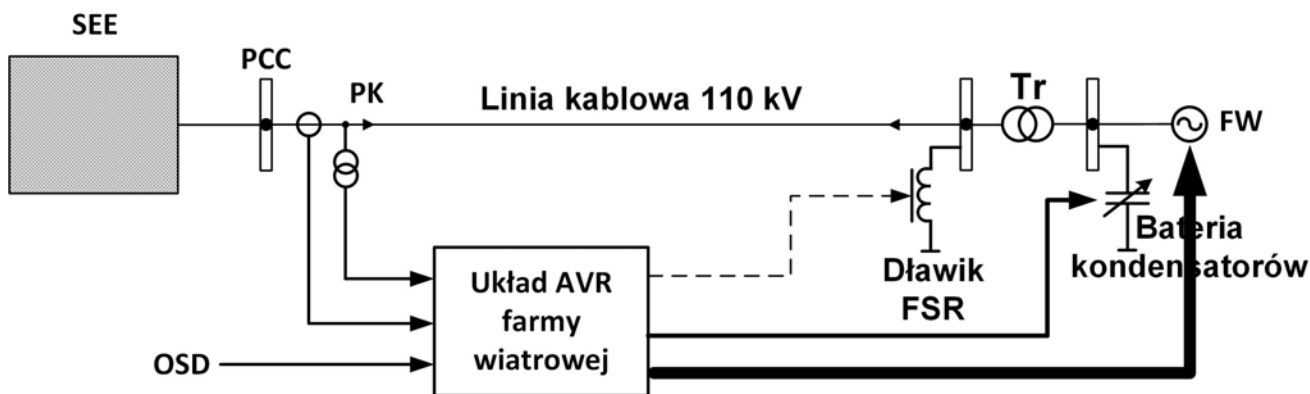
Uwzględniając charakterystykę pojedynczej instalacji wiatrowej z rysunku 2, schemat przyłączenia farmy wiatrowej (FW) z rysunku 1, przeprowadzono obliczenia, zakładając długość linii kablowych równą 50 km oraz moc FW równą 100 MW. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 4.

Krzywe oznaczone linią przerywaną przedstawiają wymagany obszar pracy ze względu na $\cos \phi$. Krzywe oznaczone linią ciągłą przedstawiają charakterystykę farmy. Przy generacji mocy czynnej powyżej 80% P_{max} , wymagany współczynnik mocy nie jest zachowany. W tym momencie

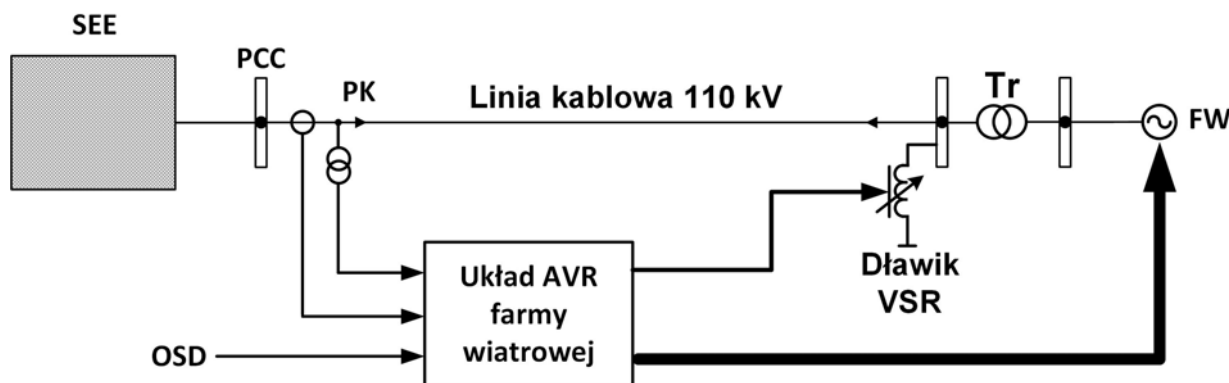
konieczna staje się zmiana zaczeptu w dławiku kompensacyjnym VSR tak, aby zmniejszyć jego moc i sprawić, by krzywa ciągła (górną) znalazła się ponad przerywaną (górną). Możliwy jest również układ z dławikiem FSR i dodatkową baterią kondensatorów po stronie SN.



Rys.4. Fragment charakterystyki mocy biernej w funkcji mocy czynnej farmy wiatrowej



Rys.5. Układ regulacji napięcia i mocy biernej farmy wiatrowej z dławikiem FSR



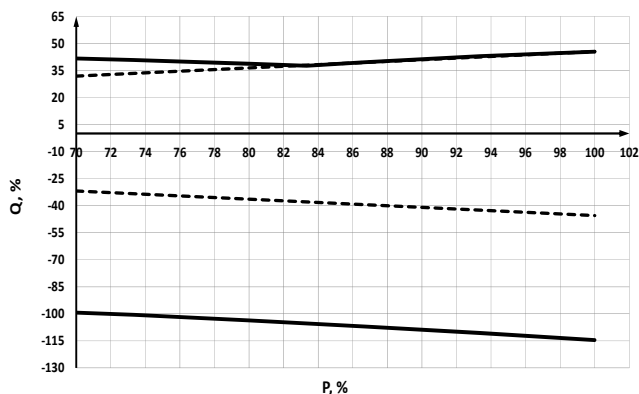
Rys.6. Układ regulacji napięcia i mocy biernej farmy wiatrowej z dławikiem VSR

Układ regulacji

Zmiana zaczeptu dławika regulowanego pozwoli na poprawę warunków pracy FW. Zdarzają się jeszcze jednak przypadki, gdzie krzywa ciągła (górną) znajduje się pod krzywą przerywaną (górną). Wynika to z procentowego skoku zaczeptu dławika, który w obliczeniach przyjęto 2% oraz nieliniowości zadania rozplływowego. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie układu regulacji napięcia i mocy biernej farmy wiatrowej, wykorzystującego przekształtniki turbin wiatraków, kondensatory

i w nadzwyczajnych sytuacjach wyłączenie dławika FSR, przedstawionego na rysunku 5. Rysunek 6 natomiast, dotyczy układu z dławikiem VSR z regulacją zaczeptową, bez baterii kondensatorów. Grubość linii oznacza istotność elementów w procesie regulacji.

Uwzględniając powyższy układ przeprowadzono obliczenia, których wyniki przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7 Fragment charakterystyki mocy biernej w funkcji mocy czynnej farmy wiatrowej

Jak widać na rysunku 7, zaproponowany układ regulacji poprawia warunki pracy FW i pozwala na spełnienie wymagań zawartych w instrukcji operatora.

Podsumowanie

Problem przedstawiony w artykule jest istotny z punktu widzenia pracy farmy wiatrowej. Niespełnienie wymagań dotyczących wartości $\cos \varphi$ może narażać inwestora na znaczne koszty spowodowane przepływem mocy biernej. Zaproponowany układ w postaci dławika FSR z baterią kondensatorów jest z pewnością tańszy od wersji z dławikiem VSR z regulacją zaczepową. Uniemożliwia jednak wykorzystanie pojemności kabla 110 kV do generacji mocy biernej w stanach kiedy jej brakuje. Stosując rozwiązanie z dławikiem regulowanym można uniknąć konieczności instalowania dodatkowych źródeł mocy biernej oraz w pełni wykorzystać potencjał urządzeń farmy.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: p.kacejko@pollub.pl; dr inż. Paweł Pijarski, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: p.pijarski@pollub.pl; dr inż. Marek Wancerz, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: m.wancerz@pollub.pl; mgr inż. Michalina Gryniwicz-Jaworska, Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: michalina.gryniwicz.jaworska@vp.pl.

LITERATURA

- [1] Muljadi E., Butterfield C.P., Yinger R., Romanowitz H., Energy Storage and Reactive Power Compensator in a Large Wind Farm. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 5-8, 2004
- [2] Kacejko P., Pijarski P., Adamek S., Compensation of 110 kV Cable Lines – Possibilities and Limitations. Conference APE'15, Jastrzębia Góra, 17-19.06.2015
- [3] Miller T.J.E., Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley & Sons, 1982
- [4] <http://new.abb.com>
- [5] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej PSE SA <http://www.pse.pl>
- [6] Saadat H., Power System Analysis, McGraw-Hill International Editions, 3-rd edition, 2010