UDZIAŁ FARM WIATROWYCH W REGULACJI NAPIĘCIA W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

dr inż. Jacek Klucznik / Politechnika Gdańska

1. WSTĘP

W Polsce obserwuje się olbrzymie zainteresowanie budową nowych, odnawialnych źródeł energii elektrycznej. Zainteresowanie to jest wynikiem kształtowania rynku energii przez politykę Unii Europejskiej, dążącą do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla. Wśród różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej, charakteryzujących się ograniczeniem niekorzystnego wpływu na środowisko naturalne, największy przyrost nowo instalowanych obiektów zauważa się w obszarze wykorzystania energii wiatru. Wartość mocy zainstalowanych w Polsce elektrowni wiatrowych przekroczyła 400 MW i ciągle rośnie. Plany zakładają, że moc zainstalowana może w dość krótkim czasie osiągnąć poziom od 4 do nawet 10 GW, według różnych szacunków. Elektrownie wiatrowe są grupowane w instalacje zawierające od kilkunastu do kilkudziesięciu siłowni wiatrowych. Instalacje takie, nazywane farmami wiatrowymi, przyłączane są najczęściej do istniejących linii elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnej 110 kV bądź, w przypadku znacznych mocy, za pomocą linii promieniowych do węzłów NN/WN.

Zapisy prawne zawarte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej [3] nakładają na inwestora farmy wiatrowej konieczność zapewnienia regulacji mocy biernej generowanej przez farmę wiatrową. Powoduje to, że w systemie elektroenergetycznym pojawiają się rozproszone źródła mocy biernej o znacznych nieraz wartościach. Niniejszy artykuł dotyczy właśnie sposobów wykorzystania tego dużego potencjału regulacyjnego, powstającego wraz z rozwojem energetyki wiatrowej w Polsce.

2. MOŻLIWOŚCI REGULACJI MOCY BIERNEJ ELEKTROWNI WIATROWEJ

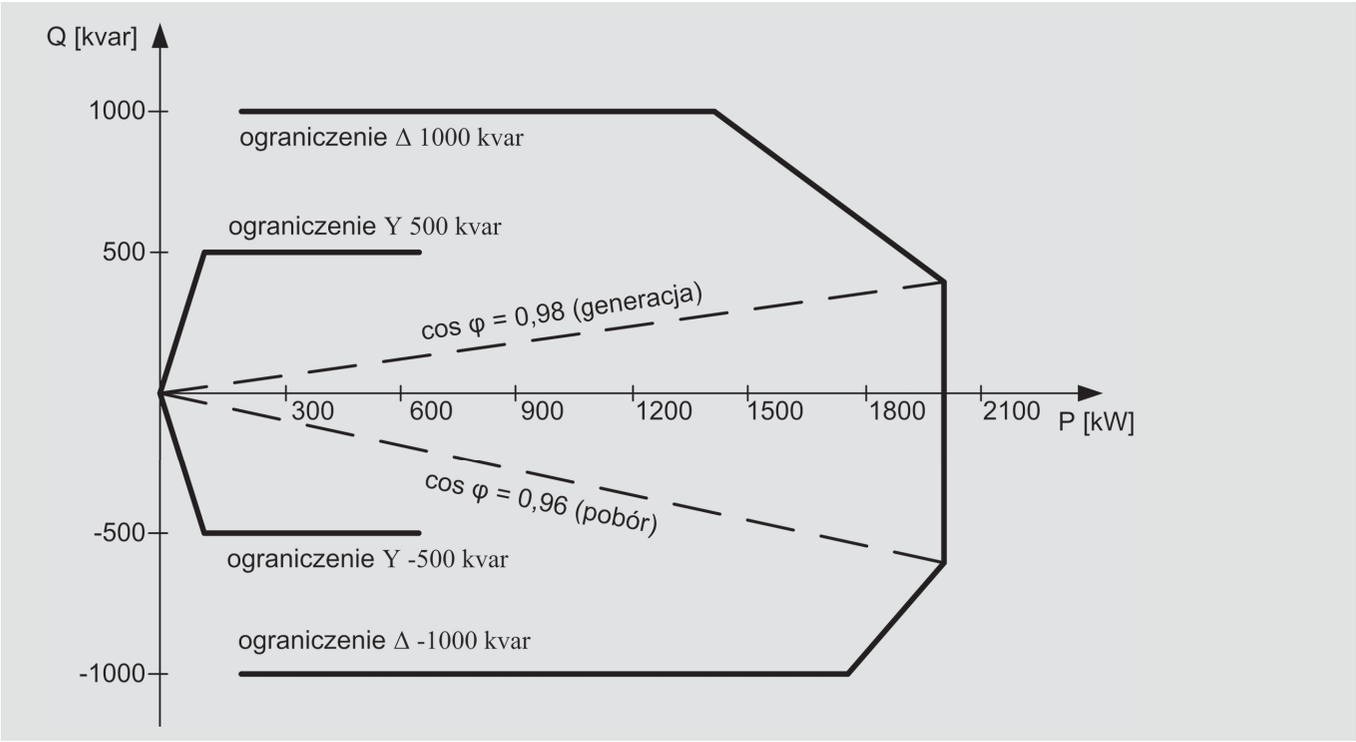
Proces generacji mocy czynnej w elektrowni wiatrowej jest związany z generacją lub poborem mocy biernej. Możliwość wykorzystania mocy biernej elektrowni wiatrowej zależy od rodzaju generatora zastosowanego do konwersji energii wiatru na energię elektryczną. Wśród rozwiązań stosowanych generatorów w elektrowniach wiatrowych można wyróżnić: generatory asynchroniczne klatkowe, generatory asynchroniczne pierścieniowe z przekształtnikiem w obwodzie wirnika (maszyny dwustronnie zasilane) oraz generatory synchroniczne z przemiennikiem częstotliwości (przekształtnik w obwodzie stojana).

Generatory asynchroniczne klatkowe, stosowane w elektrowniach mniejszych mocy, podczas pracy pobierają z sieci moc bierną, której wartość jest funkcją generowanej mocy czynnej. Nie ma technicznej możliwości zmiany wartości mocy biernej przy określonej wartości napięcia stojana i mocy czynnej, wynikającej z aktualnej prędkości wiatru i kąta natarcia łopat śmigła. Pobierana moc bierna jest najczęściej kompensowana lokalnie poprzez baterię kondensatorów. Stosuje się zwykle do trzech stopni regulacji wartości pojemności baterii kondensatorów. Elektrownia jest wyposażana w regulator załączający odpowiednie stopnie baterii tak, aby kompensować moc bierną pobieraną przez generator. Dla konstrukcji małych mocy stosuje się często niesterowalną baterię kondensatorów, dobraną do kompensacji mocy biernej generatora pracującego na biegu jałowym. Tak więc generatorów asynchronicznych klatkowych nie można traktować jako sterowalnego źródła mocy biernej w systemie elektroenergetycznym.

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję udziału farm wiatrowych w procesie regulacji napięć w sieciach dystrybucyjnych 110 kV. Wskazano, że właściwie sterowana farma wiatrowa przyczynia się do zmniejszenia wahań napięcia w sieci WN, powodowanych dobową zmiennością obciążenia. Wykazano również, że stabilizacja napięcia sieci WN, powodowana oddziaływaniem farmy wiatrowej, przekłada się na zmniejszenie liczby przełączeń przekładni w transformatorach WN/SN pracujących w danej sieci i tym samym powoduje wydłużenie żywotności przełączników zaczepów.

Obecnie istnieje tendencja do zwiększania jednostkowych mocy pojedynczych elektrowni wiatrowych. Konstrukcje oparte na generatorach asynchronicznych klatkowych zostały w zasadzie wyparte przez generatory asynchroniczne dwustronnie zasilane. Poprzez sterowanie wartościami napięcia od strony wirnika maszyny możliwa jest zmiana generowanej w obwodzie stojana mocy biernej. Nowoczesne układy sterowania dają możliwości regulacji mocy biernej w szerokim zakresie, zarówno generacji, jak i poboru mocy biernej. Przykładowo dla elektrowni Vestas V90 producent podaje możliwości regulacji w zakresie od $\cos\varphi = 0{,}98$ (generacja mocy biernej) do $\cos\varphi = 0{,}96$ (pobór mocy biernej) przy generacji znamionowej mocy czynnej. W przypadku pracy z mocą czynną mniejszą od znamionowej możliwe jest zwiększenie generacji mocy biernej poza podane granice. Schemat zdolności regulacyjnych elektrowni Vestas V90 przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowo dla elektrowni Vestas V90 producent podaje możliwości regulacji od $\cos\varphi = 0{,}98$ (generacja mocy biernej) do $\cos\varphi = 0{,}96$ (pobór mocy biernej) przy generacji znamionowej mocy czynnej

Trzecim rodzajem generatorów stosowanych w elektrowniach wiatrowych są generatory synchroniczne, przyłączane do sieci z wykorzystaniem energoelektronicznego przetwornika częstotliwości. W zależności od budowy przekształtnika energoelektronicznego układ taki ma potencjalne możliwości pozwalające sterować generowaną mocą bierną.

Ze względu na to, że w europejskim systemie elektroenergetycznym najbardziej rozpowszechnionym rozwiązaniem są maszyny dwustronnie zasilane, w artykule dokonano analizy strategii sterowania farmą wiatrową wyposażoną właśnie w taki typ elektrowni wiatrowych.

3. CEL STEROWANIA GENERACJĄ MOCY BIERNEJ FARMY WIATROWEJ

Możliwość sterowania mocą bierną pojedynczej elektrowni wiatrowej przekłada się na możliwości sterowania mocą bierną całej farmy wiatrowej. Możliwość sterowania mocą bierną może potencjalnie być wykorzystywana do realizacji następujących zadań:

- ograniczenia wpływu zmienności wiatru na wahania (zmiany) napięcia w punkcie przyłączenia farmy do sieci elektroenergetycznej
- regulacji napięcia w sąsiedztwie farmy w stanach normalnych i awaryjnych
- ograniczenia strat mocy w sieci wewnętrznej farmy wiatrowej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

- ograniczenia strat mocy w sieci dystrybucyjnej, do której jest przyłączona farma
- ograniczenia wahań napięcia w sieci dystrybucyjnej, powodowanych zmiennością obciążenia
- zwiększenia zapasu stabilności napięciowej.

Niniejszy artykuł podejmuje tematykę sposobu sterowania generacją mocy biernej w celu uzyskania pozytywnego oddziaływania na sieć dystrybucyjną. Zaproponowana strategia sterowania generacją mocy biernej farmy wiatrowej opiera się na kryterium napięciowym, gdzie nadrzędny regulator farmy wiatrowej ustala poziom generacji mocy biernej farmy na podstawie pomiaru napięcia w węźle przyłączenia farmy do sieci. Na rys. 2 przedstawiono proponowaną charakterystykę, jaką powinien realizować regulator. Charakterystyka z rys. 2a jest opisana następującym równaniem:

$$Q_g = (U - U_z) \times k_u \tag{1}$$

gdzie:

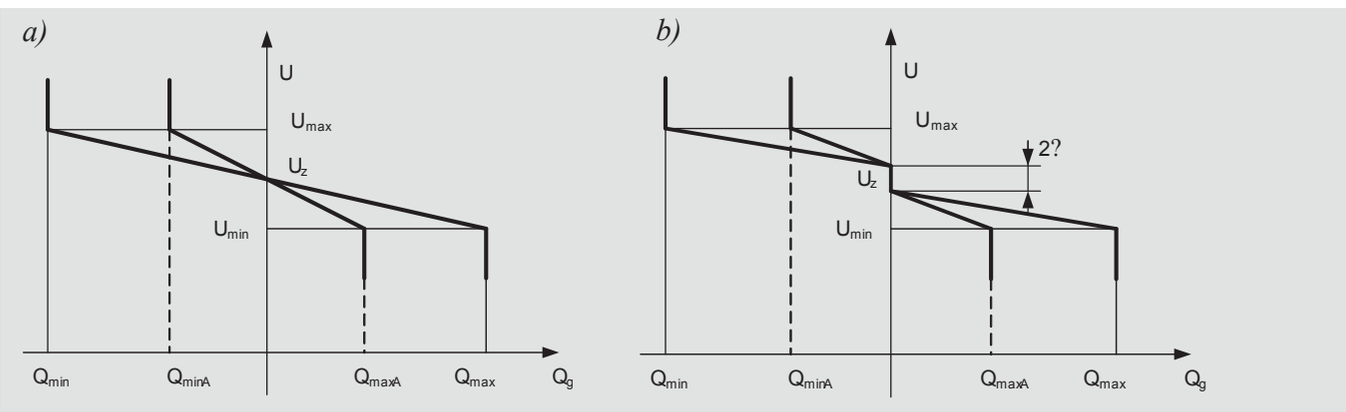
Q_g – generowana moc bierna
U – napięcie w miejscu przyłączenia farmy
U_z – napięcie zadane
k_u – nachylenie charakterystyki definiowane jako:

$$k_u = -\frac{Q_{\max A} - Q_{\min A}}{U_{\max} - U_{\min}} \tag{2}$$

Charakterystyka regulacyjna farmy definiowana jest przez graniczne wartości napięć U_{max} i U_{min}, przy których farma będzie pracowała z granicznymi wartościami mocy biernej Q_{maxA} i Q_{minA}. Należy zauważyć, że granice Q_{max} i Q_{min} nie są stałe, gdyż zależą od wartości generowanej mocy czynnej, co określa charakterystyka elektrowni wiatrowej – przykładowo taka, jaką przedstawiono na rys. 1. Oznacza to, że w pewnych stanach pracy farmy dostępny będzie pełen zapas regulacji mocy biernej $Q_g \in \langle Q_{\min}, Q_{\max} \rangle$, a w pewnych zapas będzie ograniczony do aktualnych wartości minimalnej i maksymalnej mocy biernej $Q_g \in \langle Q_{\min A}, Q_{\max A} \rangle$.

Proponowany regulator ma za zadanie utrzymywanie przez farmę generacji mocy biernej bliskiej zeru, jeżeli napięcie w punkcie przyłączenia farmy do systemu elektroenergetycznego równe jest napięciu zadanemu U_z. Dla napięć mniejszych od zadanego farma ma za zadanie zwiększać generację mocy biernej w celu podniesienia wartości napięcia, dla napięć większych od zadanego farma przechodzi do poboru mocy biernej, obniżając napięcie w sieci. Wartość zadana napięcia może być ustawiona jako znamionowe napięcie sieci (np. 110 kV, jak założono w dalszych badaniach) lub inna wartość, przy czym celowe jest, aby o nastawie napięcia zadanego mógł decydować zdalnie właściciel/operator sieci, do której przyłączona jest dana farma wiatrowa.

Charakterystyka przedstawiona na rys. 2b jest pewną modyfikacją opisywanej wyżej charakterystyki. Wprowadzono w niej strefę nieczułości o wartości 2ε, powodującą pracę farmy wiatrowej bez wymiany mocy biernej z systemem elektroenergetycznym, gdy napięcie w punkcie przyłączenia bliskie jest wartości zadanej.



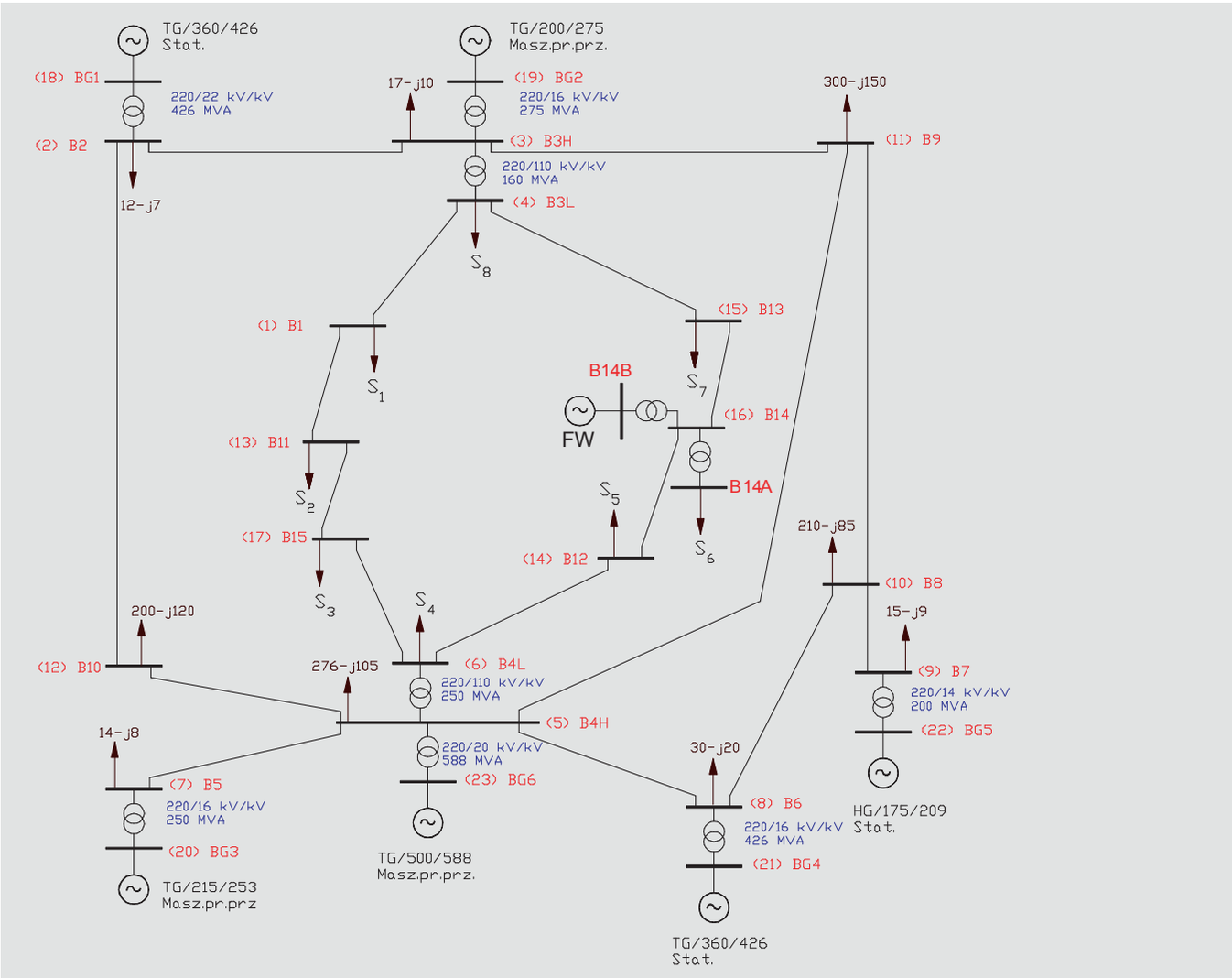
Rys. 2. Proponowane charakterystyki regulacyjne farmy wiatrowej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4. WERYFIKACJA ALGORYTMU STEROWANIA

W niniejszym rozdziale dokonano analizy działania regulatora farmy wiatrowej pracującego według zaproponowanej koncepcji.

Na rys. 3 przedstawiono schemat przykładowej sieci elektroenergetycznej, wykorzystanej na potrzeby niniejszych analiz. W systemie tym można wyróżnić sieć 110 kV, która jest zasilana w dwóch punktach poprzez transformatory 220 kV/110 kV. W rozważaniach się zakłada, że transformatory te pracują ze stałą wartością przekładni, przez co napięcie w sieci 110 kV jest uzależnione od poboru mocy w węzłach sieci 110 kV oraz generacji mocy przez farmę wiatrową przyłączoną do węzła B14. Rozpatrywana farma wiatrowa o mocy 160 MW składa się z 80 elektrowni wiatrowych typu Vestas V90 – 2 MW, których charakterystyki możliwości regulacji mocy biernej przedstawiono uprzednio na rys 1.



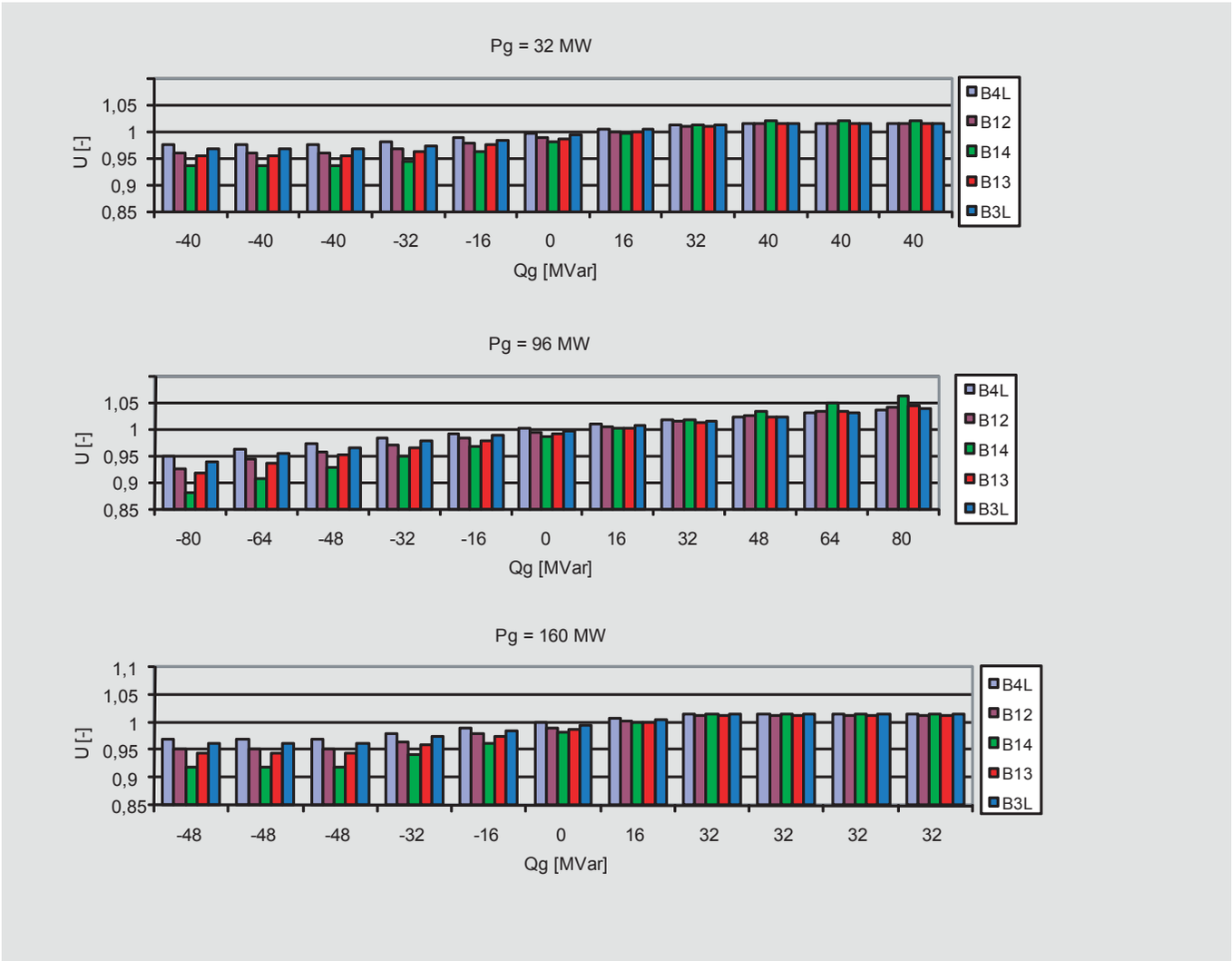
Rys. 3. Schemat testowego systemu elektroenergetycznego

Generacja mocy, zarówno czynnej, jak i biernej, przez farmę wiatrową FW wpływa na poziom napięć w sieci 110 kV. Na rys. 4 pokazano, jak zmieniają się wartości napięć w węzłach B4L, B12, B14, B13 i B3L przy zmianach generacji przez farmę wiatrową.

Analizując przedstawione wykresy, dostrzegamy, że zmiany generacji mocy biernej silnie wpływają na poziomy napięć w rozpatrywanej sieci 110 kV. Zmiany generacji mocy biernej powodują największe efekty w postaci zmian napięć w węźle przyłączenia FW (B14) i w rozpatrywanym przypadku sięgają one ponad 15%. Najmniejszy wpływ jest obserwowany w punktach zasilania sieci 110 kV – węzłach B3L i B4L, aczkolwiek tam również zauważalny jest wpływ farmy wiatrowej. Należy zwrócić uwagę na fakt, że zmiany mocy czynnej farmy wiatrowej pociągają za sobą zmiany ograniczeń generacji mocy biernej farmy wiatrowej, przy czym na ograniczenia generacji poszczególnych elektrowni wiatrowych farmy nakładają się dodatkowo straty mocy biernej w transformatorze

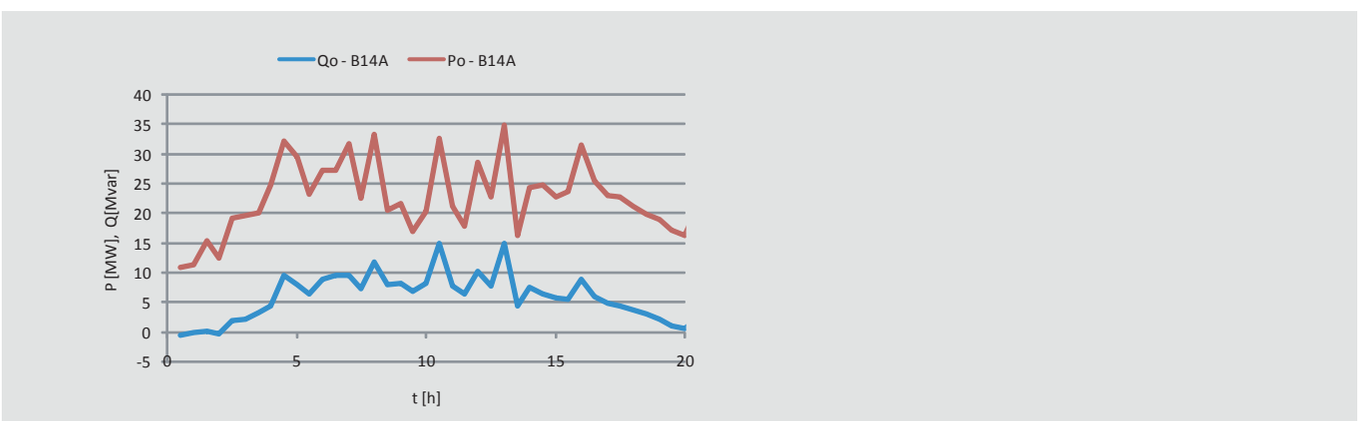
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

farmy. W efekcie, przy pełnej generacji mocy czynnej, widoczne jest asymetryczne ograniczenie generacji mocy biernej do zakresu od –48 do 32 MVAr.



Rys. 4. Zmiany wartości napięć w węzłach sieci 110 kV przy zmianach generacji FW

W systemach elektroenergetycznych wartości mocy odbiorów w sieci 110 kV zmieniają się w ciągu doby zgodnie z zapotrzebowaniem odbiorców. W wykonywanych analizach założono zmienność mocy zgodnie z rys. 5. W wykonywanych dalej analizach założono, że zgodnie z przedstawionym rysunkiem zmieniają się moce we wszystkich węzłach sieci 110 kV. Różnice między poszczególnymi węzłami polegają na innych wartościach mocy maksymalnej, przebieg zmienności pozostaje jednak taki sam.

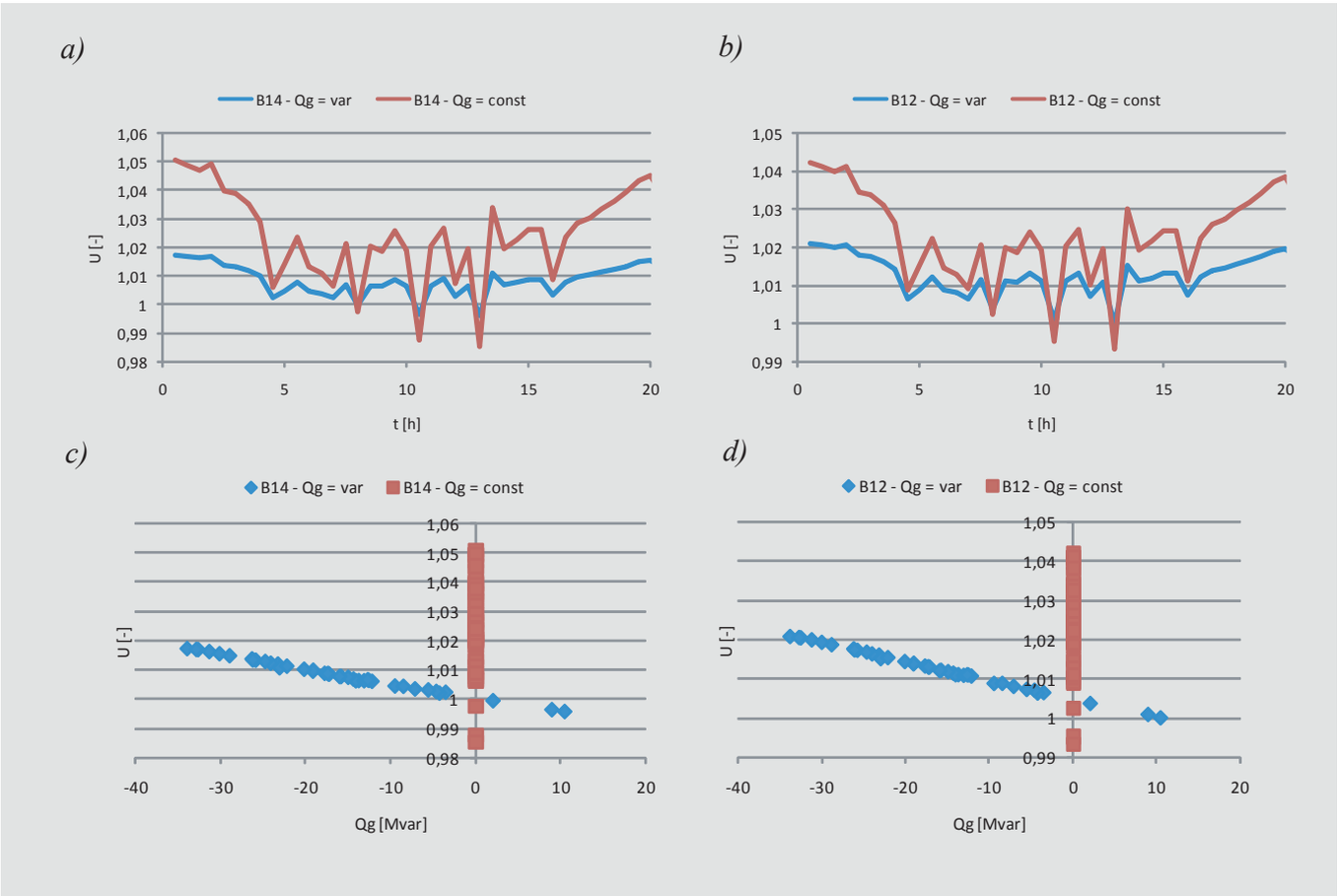


Rys. 5. Przykładowa zmienność obciążenia dla węzła B14A

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W wykonywanych badaniach określono, jak zmieniać się będą napięcia w sieci 110 kV, gdy moc bierna farmy wiatrowej pozostaje stała, wynosi zero, oraz gdy moc bierna podlega sterowaniu zgodnie z rys. 2. Przyjęto następujące założenia dla regulatora farmy wiatrowej: napięcie zadane $U_z = 1\ (110\ kV)$, graniczne wartości napięć $U_{min} = 0{,}95$, $U_{max} = 1{,}05$.

Na rys. 6 przedstawiono wyniki badań pokazujące, jak zmiany mocy odbiorów (zgodne z rys. 5) wpływają na poziom napięcia w węźle B14 i węźle B12. Założono, że farma wiatrowa pracuje ze stałą wartością mocy czynnej wynoszącą 64 MW, co stanowi 40% jej mocy znamionowej.



Rys. 6. Wpływ zmian mocy odbiorów w sieci 110 kV na poziom napięcia w węźle B14 i węźle B12

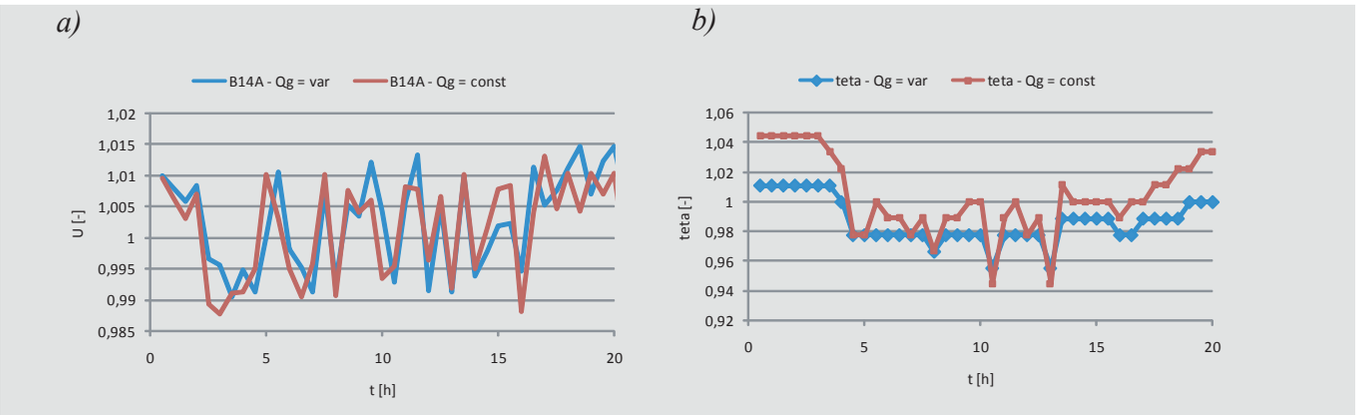
Przedstawione na rys. 6a i 6b przebiegi wartości napięcia w węzłach B14 i B12 wskazują, że uzależnienie wartości generowanej przez farmę wiatrową mocy biernej od poziomu napięcia prowadzi do ograniczenia zmienności napięcia w węzłach sieci 110 kV. Największe ograniczenie zmienności uzyskuje się oczywiście w węźle, gdzie przyłączona jest farma wiatrowa (B14), ale w węzłach sąsiednich – np. węzeł B12 uzyskuje się również istotną poprawę – wahania napięcia powodowane zmiennością obciążenia istotnie maleją. Rys. 6c i 6d pokazują zmienność napięcia w funkcji generowanej przez farmę mocy biernej lub, mówiąc inaczej, pokazują realizację charakterystyki sterowania farmy. Kolorem niebieskim pokazano sytuację, gdy farma uczestniczy w regulacji napięcia i jej moc bierna podlega sterowaniu, zaś kolorem czerwonym sytuację, gdy moc bierna pozostaje stała. Rysunki te pozwalają w łatwy sposób ocenić zmienność napięcia w węzłach przy zmianie obciążeń w sieci 110 kV. Gdy farma pracuje ze stałą wartością mocy biernej, wahania napięć sięgają ok. 6% dla węzła B14 i ok. 5% dla węzła B12. Włączenie farmy w proces regulacji napięcia powoduje zmniejszenie wahań napięcia do 2,5% w węźle B14 i do 2% w węźle B12, co jest bardzo dużą poprawą.

Instalowane w rozdzielniach GPZ WN/SN transformatory wyposażone są w podobciążeniowy przełącznik zaczepów umożliwiający zmianę przekładni transformatora. Pracą przełącznika zaczepów steruje regulator napięcia transformatora, zwany najczęściej skrótowo regulatorem transformatora. Ma on za zadanie utrzymanie zadanego poziomu napięcia na szynach średniego napięcia transformatora. Wobec dobowej zmiany wielkości zapotrzebowania na moc różnych odbiorców, w sieci waha się wartość napięcia. Zmianom napięcia w sieci 110 kV, towarzyszą zmiany wartości napięć po stronie średniego napięcia wszystkich transformatorów przyłączonych do

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

danej sieci 110 kV. Ponadto obciążenie każdego z transformatorów WN/SN powoduje dodatkowe spadki napięć na danym transformatorze, wpływając na wartość napięcia zasilającego sieć średniego napięcia. Tak więc, aby utrzymać zadaną wartość napięcia na stałym poziomie, konieczna jest zmiana przekładni transformatora, dokonywana za pomocą podobciążeniowego przełącznika zaczepów. Przełącznik zaczepów jest jednak urządzeniem o określonej wytrzymałości mechanicznej. Dla przełącznika określa się dopuszczalną liczbę przełączeń, po przekroczeniu której konieczny jest jego remont. Zwykle liczba dopuszczalnych przełączeń wynosi 50–60 na dobę. Zużycie przełącznika wiąże się przede wszystkim ze zużyciem się styków przełączających. Ponowne przywrócenie sprawności mechanicznej wiąże się z kosztownym remontem, który pociąga za sobą konieczność wyłączenia danego transformatora z eksploatacji. Fakt ten powoduje konieczność ograniczania częstości (liczby) przełączeń przełącznika zaczepów przez regulatory transformatora.

Stabilizacja napięć w sieci 110 kV przyczynia się do pozytywnego oddziaływania na pracę regulatorów transformatorów w stacjach GPZ. Jako przykład dokonano analizy, jak zmienia się przekładnia transformatora WN/SN zainstalowanego w węźle B14/B14A przy zmianach obciążenia w sieci 110 kV. Założono, że regulator transformatora ma utrzymać zadane napięcie na szynach SN wynoszące 1.



Rys. 7. Wpływ zmian mocy odbiorów w sieci 110 kV na pracę przełącznika zaczepów transformatora WN/SN dla pracy farmy ze stałą wartością mocy biernej oraz przy regulacji mocy biernej

Na rys. 7 przedstawiono porównanie układu tradycyjnego, bez sterowania mocą bierną, do układu, w którym moc bierna jest uzależniona od wartości napięcia w punkcie przyłączenia farmy do sieci. Rys. 7a wskazuje, że oba rozpatrywane warianty powodują w zasadzie podobną zmienność napięć na szynach średniego napięcia transformatora. Jednak analiza rys. 7b pokazuje, że utrzymanie quasi-ustalonego poziomu napięcia na szynach SN wymaga większej zmienności przekładni transformatora, gdy farma wiatrowa pracuje ze stałą wartością mocy biernej. Dla układu z aktywną regulacją mocy biernej farmy wiatrowej nastąpiło 17 przełączeń zaczepów transformatora, podczas gdy w układzie tradycyjnym przełączeń było aż 45[1]. Efekt ten powodowany jest ustabilizowaniem poziomu napięcia sieci 110 kV przez generację mocy biernej farmy wiatrowej. Dzięki temu ogranicza się liczbę przełączeń zaczepów transformatorów WN/SN przyłączonych do tej sieci.

Koordynacja działania regulatorów farm wiatrowych z działaniem regulatorów transformatorów powstaje w sposób naturalny, bez konieczności wymiany jakichkolwiek informacji, gdyż regulatory transformatorów zawsze działają ze zwłoką czasową. Wystarczy więc, że regulacja mocy biernej farm wiatrowych będzie szybsza od działania regulatorów transformatorów i wtedy w pierwszej kolejności zmieniana będzie moc bierna farm wiatrowych, potem zaś zmieniane będą zaczepy w transformatorach.

5. PODSUMOWANIE

W pracy wskazano, że farmy wiatrowe mogą być nowym elementem systemu sterowania poziomami napięć i rozpływu mocy biernej w KSE. Współczesne konstrukcje elektrowni wiatrowych (a zwłaszcza elektrownie

1 Jako pojedyncze przełączenie rozumie się zmianę przekładni o wartość odpowiadającą zmianie o jeden zaczep regulacyjny. W rozpatrywanym przypadku wartość ta wynosi 1,11%.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

z maszynami asynchronicznymi dwustronnie zasilanymi) umożliwiają płynne sterowanie wartością generowanej mocy biernej. Ta zaleta może i powinna być wykorzystana w celu poprawy jakości sterowania napięciami – głównie w sieciach rozdzielczych 110 kV, gdzie przyłączana jest znakomita większość budowanych obecnie farm wiatrowych.

Należy zwrócić jednak uwagę, że mimo braku konieczności komunikacji z nadrzędnymi układami regulacji czy innymi farmami przyłączonymi w sąsiedztwie, aby spełnić wymienione cele regulacyjne konieczna jest koordynacja układów sterujących wszystkich farm i innych źródeł mocy biernej poprzez kształtowanie ich charakterystyk statycznych $Q = f(U)$ oraz szybkości działania.

W przypadku występowania ograniczeń możliwości regulacji mocy biernej przez farmy wiatrowe o małej mocy lub wyposażonych w elektrownie wiatrowe starego typu (generatory asynchroniczne bez przekształtników) rzeczywiste rezultaty współpracy takich farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym mogą być mniej zadowalające, niż pokazano w artykule.

BIBLIOGRAFIA

1. Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, WNT, Warszawa 2009.

2. Lubośny Z., Klucznik J., Dobrzyński K., Opracowanie koncepcji wykorzystania farm wiatrowych (FW) w procesie planowania pracy i prowadzenia ruchu, przy uwzględnieniu możliwości uczestnictwa FW w regulacji parametrów pracy systemu elektroenergetycznego w stanach normalnej i zakłóceniowej pracy KSE oraz określenie sposobu integracji FW w nadrzędnych systemach sterowania i regulacji OSP, PSE-Operator, 2007.

3. IRiESP – Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci v. 1.2. Tekst jednolity obowiązujący od dnia: 5 listopada 2007 roku.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl