



Piotr JANISZEWSKI, Jan SAWICKI, Andrzej STAWOWY

ENERGOPROJEKT-KRAKÓW SA

Warunki napięciowe w punkcie przyłączenia i instalacji turbin wiatrowych

Streszczenie. W referacie poruszono problemy wynikające z podskoku napięcia powodowanego przyłączeniem elektrowni wiatrowych do sieci. Wyniki analiz obliczeniowych wykonywane w punkcie przyłączenia do sieci opisują oddziaływanie farmy wiatrowej na system elektroenergetyczny. W pewnych przypadkach może się okazać, iż mogą wystąpić problemy z prawidłową pracą samej farmy wiatrowej pomimo spełnienia wszystkich wymogów jakościowych napięcia względem sieci szczególnie przy farmach wiatrowych odległych od punktu przyłączenia do sieci.

Abstract. (Voltage conditions in connection- and installation-point of wind turbine). This paper touches problems resulted from voltage increase caused by wind farm connection to the power system. Results of analysis are performed for point of connection and show the wind farm influence on the power system. In some cases there are problems with condition of wind farm operation although all requirements of voltage quality to the power grid were fulfilled, especially in case when the wind farm are remote from point of connection.

Słowa kluczowe: elektrownie wiatrowe, zmiany napięcia, podskok napięcia.

Keywords: wind farm, voltage changes, voltage increase.

Wstęp

Energetyka wiatrowa od paru ostatnich lat jest tematyką modną i angażującą specjalistów z różnych kierunków elektrotechniki. Dzieje się tak, między innymi, za sprawą charakteru pracy źródeł napędzanych wiatrem. Są to źródła mocy o parametrach wyjściowych zmiennych spowodowanych:

- zmianą momentu wynikającą z niejednakowej prędkości wiatru na różnych wysokościach,
- zmianą momentu związaną z okresowym przysłanianiem łopatek przez wieżę,
- zmianą prędkości wiatru oraz związanym z tym sterowaniem łopatkami silnika wiatrowego w celu maksymalnej generacji mocy (kiedy narasta prędkość wiatru) lub w celu ograniczenia bądź przerwania generacji mocy (kiedy prędkość wiatru przekracza górną granicę dopuszczalnej prędkości),
- oddziaływaniem układów przekształtnikowych zainstalowanych w niektórych typach elektrowni.

Równoległa praca systemu elektroenergetycznego z elektrownią wiatrową charakteryzuje się nieustanną zmiennością stanu systemu, związaną z ciągłą zmianą generowanej mocy czynnej. Zmiana generowanej mocy czynnej przenosi się na zmianę napięcia zasilającego a zarazem na jakość energii dostarczonej odbiorcom.

W referacie przedstawiono przypadek, możliwości współpracy farmy wiatrowej złożonej z trzech wiatraków o mocy 1,50 MW każdy z punktem przyłączenia przejściowo do sieci 15 kV i docelowo do sieci 110 kV.

Wymagania odnośnie pracy farmy wiatrowej w systemie elektroenergetycznym

Kryterium statycznych zmian napięcia w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej do sieci elektroenergetycznej

Efekt włączenia elektrowni wiatrowej do sieci jest statyczna zmiana napięcia (wzrost napięcia) w danym węźle systemu elektroenergetycznego. Takie zmiany wartości napięcia wywołane łączeniem elektrowni wiatrowej z systemem elektroenergetycznym mogą występować kilkadziesiąt razy w ciągu doby.

Obowiązujące rozporządzenie [1], problem statycznych zmian napięcia określa, że w sieci SN dopuszczalne odchylenie napięcia od znamionowego w czasie 15 minut powinno mieścić się w przedziale od -10 % do +5%, natomiast w

sieci 110 kV w przedziale ± 10 %. Należy zwrócić uwagę, że inne kraje, przodujące w dziedzinie rozwoju elektrowni wiatrowych, takie jak Niemcy, Hiszpania, USA, Dania, wprowadziły zdecydowanie bardziej ostre wymagania dotyczące zmian parametrów napięcia zasilającego, spowodowanych pracą farm wiatrowych.

Rozwiązanie problemu zachowania wartości napięcia w przedziale np. -10 % do +5% zaproponowano poprzez określenie maksymalnej zmiany napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia pomiędzy dwoma stanami pracy (przed i po włączeniu elektrowni wiatrowej). W przepisach koordynacyjnych niemieckich i austriackich [2] dopuszczalną wartość statycznej zmiany napięcia w punkcie przyłączenia określono na poziomie 2%. Z takiego kryterium wynika jednocześnie maksymalna dopuszczalna wartość mocy znamionowej farmy jaką można przyłączyć w danym węźle systemu elektroenergetycznego.

Kryterium dynamicznych zmian napięcia w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej do sieci elektroenergetycznej

Przyłączenie turbiny wiatrowej do sieci elektroenergetycznej może wywołać krótkie stany nieustalone zmian wartości napięcia zasilającego. Wielkość dynamicznych zmian wartości napięcia uzależniona jest od rodzaju turbiny wiatrowej oraz od poziomu mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia.

Problem dynamicznych zmian wartości napięcia reguluje międzynarodowa norma IEC 61000-3-7 [3] uzależniając maksymalną zmianę napięcia od częstotliwości łączenia do sieci urządzenia generującego zakłócenie. W przypadku, kiedy częstotliwość łączenia siłowni wiatrowej z siecią SN jest mniejsza niż 10 razy na godzinę, zmiana napięcia nie może przekroczyć 3% dla punktu przyłączenia do sieci SN i 2,5% dla punktu przyłączenia do sieci 110 kV.

Warto zwrócić uwagę, że prawdopodobieństwo jednoczesnego przyłączenia do sieci kilku turbin wiatrowych jest bliskie zero, dlatego efekt dynamicznych zmian wartości napięcia wyznacza się od pojedynczej turbiny.

Wahania napięcia - maksymalna wartość współczynników migotania (poziom emisji długookresowej i krótkookresowej)

Wahania napięcia zasilającego wprowadzają bardzo uciążliwy efekt dla oka ludzkiego w postaci migotania światła. Miarą tego efektu są współczynniki P_{Lt} i P_{St} , których cał-

kowity poziom nie powinien przekraczać odpowiednio wartości 0,7 i 0,9 w sieci SN oraz 0,6 i 0,8 w sieci 110 kV (IEC 61000-3-7) [3].

W przypadku elektrowni wiatrowej, kiedy może ona być tylko jednym z wielu obiektów niespokojnych przyłączonych do sieci elektroenergetycznej na tym samym ciągu liniowym, wielkości współczynników P_{Lt} i P_{St} wnoszonych przez jedną farmę wiatrową, muszą zostać odpowiednio skorygowane. Autorzy publikacji [4] sugerują, że emisja migotania w sieci SN i 110 kV największego odbiorcy nie powinna przekraczać wartości 0,25 dla wskaźnika P_{Lt} i 0,35 dla wskaźnika P_{St} .

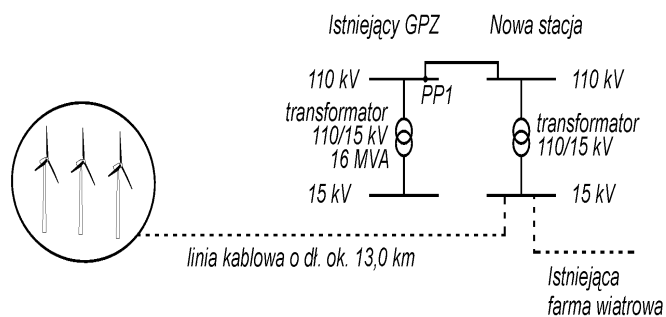
O dopuszczalnej zmianie wartości napięcia w funkcji częstotliwości jego zmiany, w ten sam sposób odnosi się międzynarodowa norma IEC 61000-3-7.

Analiza obliczeniowa

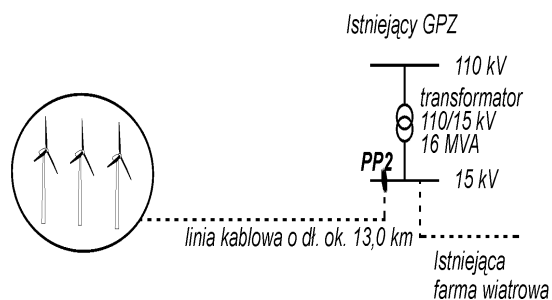
Założenia

Schemat sieci wraz z punktami przyłączenia wiatraków pokazano na rysunku 1.

Układ docelowy



Układ przejściowy



Rys.1. Schemat sieci wraz z punktami przyłączenia

Poniżej przedstawiono najważniejsze parametry turbin wiatrowych:

- znamionowa moc czynna $P_N=1500$ kW,
- znamionowa moc bierna $Q_N=0$ kVar,
- znamionowa moc pozorna $S_N=1500$ kVA,
- napięcie znamionowe $U_N=690$ V,
- prąd znamionowy $I_N=1260$ A,

każda siłownia wyposażona jest w układy zabezpieczające:

- nadnapięciowe $1,06 \cdot U_N$,
- podnapięciowe $0,80 \cdot U_N$,
- nadczęstotliwościowe $50,5$ Hz,
- podczęstotliwościowe $49,5$ Hz,
- czas działania układów zabezpieczeń ~ 150 ms.

Wyniki obliczeń

Statyczne zmiany napięcia

W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń wartości statycznej zmiany napięcia w obu punktach przyłączenia farmy wiatrowej do sieci elektroenergetycznej.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wartości statycznej zmiany napięcia.

punkty w sieci	Statyczna zmiana napięcia w stosunku do stanu wyjściowego [%]	Dopuszczalna wartość statycznej zmiany napięcia w punkcie przyłączenia [%]
PP1	0,1	2
PP2	0,1	2

Analiza zmienności napięcia w stanach ustalonych nie wykazała przekroczenia założonych wartości dopuszczalnych.

Dynamiczne zmiany napięcia

Maksymalną wielkość dynamicznych zmian napięcia w sieci zasilającej, wywołaną operacją przyłączenia pojedynczej turbiny, wykonano zgodnie z normą IEC 61400-21 [5]. W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń dynamicznych zmian napięcia dla analizowanych punktów przyłączenia farmy do sieci zasilającej.

Tabela 2. Wyniki obliczeń dynamicznych zmian napięcia.

punkty w sieci	Dynamiczna zmiana napięcia w stosunku do stanu wyjściowego [%]	Dopuszczalna wartość dynamicznych zmiany napięcia w punkcie przyłączenia [%]
PP1	0,09	2,5
PP2	1,04	3

Analiza zmienności napięcia w stanach dynamicznych nie wykazała przekroczenia założonych wartości dopuszczalnych.

Wahania napięcia

Analiza wahań napięcia została wykonana zgodnie z normą IEC 61400-21. W przypadku pracy ciągłej, współczynniki emisji migotania (wywołane zmiennością wiatru oraz przejściem łopatek przez cień wieży) przyjmują tę samą wartość. Podczas operacji łączeniowych współczynniki emisji migotania są różne i zależą od dopuszczalnej liczby łączeń w odpowiednich przedziałach czasowych. W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń współczynników emisji migotania P_{Lt} i P_{St} w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej dla obu stanów pracy (praca ciągła i operacje łączeniowe).

Tabela 3. Wyniki obliczeń współczynników emisji migotania P_{Lt} i P_{St}

Rodzaj pracy	Wskaźniki	Wartość obliczona	Wartość dopuszczalna
Stan normalny – wariant 1			
Praca ciągła	$P_{Lt} = P_{St}$	0,01	0,25
Operacje łączeniowe	P_{St}	0,02	0,35
	P_{Lt}	0,02	0,25
Stan normalny – wariant 2			
Praca ciągła	$P_{Lt} = P_{St}$	0,15	0,25
Operacje łączeniowe	P_{St}	0,26	0,35
	P_{Lt}	0,22	0,25

Przeprowadzona analiza wahań napięcia dla alternatywnych punktów przyłączenia farmy wiatrowej do sieci nie wykazała przekroczenia założonych, dopuszczalnych wartości.

Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy obliczeniowej wynika, że istnieje możliwość przyłączenia farmy wiatrowej składającej się z trzech turbin firmy NEG Micon NM72C/1500 o łącznej mocy 4,5 MW zarówno do istniejącej sieci 15 kV (PP2) jak i sieci 110 kV (PP1).

Przyłączenie farmy wiatrowej do sieci

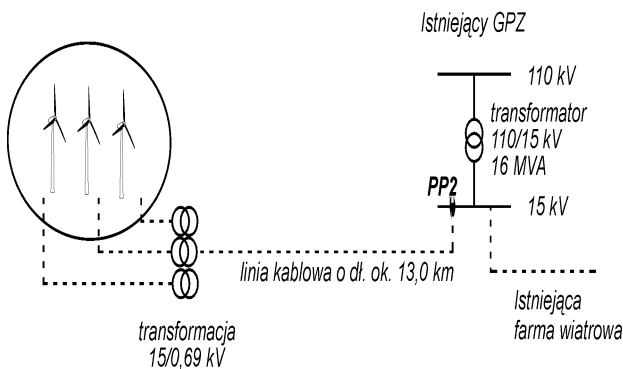
Tak wykonana ekspertyza może stanowić, oprócz innych dokumentów, podstawę do wydania przez Spółkę Dystrybucyjną, Inwestorowi farmy wiatrowej, warunków przyłączenia do sieci. Warunki zaś są podstawą do wykonania projektów budowlano-wykonawczych oraz umowy przyłączeniowej, czyli do rozpoczęcia procesu inwestycyjnego oraz zawarcia umowy handlowej. W rzeczywistości może się okazać, iż w skrajnym przypadku rozpatrywanej farmy wiatrowej nie będzie się dało uruchomić.

O ile, z punktu widzenia systemu elektroenergetycznego spełnia ona wszystkie wymagania odnośnie jakości w punktach przyłączenia do sieci o tyle mogą zaistnieć odmienne warunki napięciowe w punktach instalacji turbin wiatrowych tj. na zaciskach transformatorów 15/0,69 kV poszczególnych elektrowni.

Warunki napięciowe w punkcie instalacji turbin wiatrowych

W rozpatrywanych przypadkach napięcie w punktach przyłączenia niewiele się różniło przed i po włączeniu farmy wiatrowej. Natomiast na zaciskach górnego napięcia transformatora, poszczególnych turbin wiatrowych, następuje znaczny podskok wartości napięcia i zależy jest on od impedancji połączenia pomiędzy farmą wiatrową a punktem przyłączenia czyli od przekroju kabla łączącego te dwa punkty (rys.2).

Układ przejściowy



Rys.2. Schemat sieci wraz z punktem przyłączenia dla przejściowego układu pracy.

Przy zastosowaniu połączenia kablowego o przekroju:

- 240 mm² podskok napięcia wynosi 4,3% (0,65 kV),
- 120 mm² podskok napięcia wynosi 7,4% (1,14 kV).

Ponieważ na szynach 15 kV GPZ zasilającego sieć dystrybucyjną utrzymywane jest napięcie 15,5 kV (z uwagi na rozległość sieci), wyżej opisane podskoki napięcia spowodują przekroczenie górnego poziomu napięcia dopuszczalnego dla sieci 15 kV (tj. 15,75 kV), a tym samym wystąpienie przebiegów będących narażeniem dla układów izolacyjnych. Jednocześnie zostanie przekroczony górny poziom napięcia, przy którym możliwa jest praca turbiny wiatrowej.

Przekroczenie górnego poziomu napięcia przy którym możliwa jest praca turbiny spowoduje nie włączenie się kolejnej turbiny, bądź natychmiastowe odłączenie już pracujących turbin od sieci zasilającej, przez zabezpieczenie nadnapięciowe nastawione w tym przypadku na poziom 1,06 U_N.

Rozwiązaniem tego problemu może być:

- zwiększenie zakresu napięcia przy którym możliwa jest praca turbiny wiatrowej (zmiana standardowych nastaw zabezpieczeń),
- zastosowanie transformatorów 15/0,69 kV we wszystkich turbinach wiatrowych z możliwością regulacji napięcia w zakresie takim aby umożliwić pracę turbin z zakresu standardowych nastaw zabezpieczeń napięciowych (0,8 – 1,06 U_N).

Wniosek

Wyniki analizy obliczeniowej wykonywane w punkcie przyłączenia do sieci opisują oddziaływanie farmy wiatrowej na system elektroenergetyczny. W pewnych przypadkach może się okazać iż mogą wystąpić problemy z prawidłową pracą samej farmy wiatrowej pomimo spełnienia wszystkich wymogów jakościowych napięcia względem sieci szczególnie przy farmach wiatrowych odległych od punktu przyłączenia do sieci.

LITERATURA

- [1] Dz. U. Nr 85, Rozporządzenie Ministra Gospodarki 957 z dnia 25 września 2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców.
- [2] Beck H.P., Rosner J.: Wind energy converter with asynchronous machines and 12-puls ac controller in generator mode. EPQU'01, Kraków 2001.
- [3] IEC 61000-3-7, Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems.
- [4] Christiansen P., Holmstrom O., Jorgensen B.: Manual Calculation Methods and Assessment of Wind Farms Influence. Grid Connection of Wind Farms, EWISSE'01, Gdańsk 2001.
- [5] IEC 61400-21, Wind Turbine Generator Systems – Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.

Autorzy: mgr inż. Piotr Janiszewski, inż. Jan Sawicki, mgr inż. Andrzej Stawowy, ENERGOPROJEKT-KRAKÓW SA ul. Mazowiecka 21, 30-019 Kraków,
E-mail: p.janiszewski@energoprojekt.krakow.pl,
j.sawicki@energoprojekt.krakow.pl,
a.stawowy@energoprojekt.krakow.pl