

## WYBRANE PROBLEMY PRZYŁĄCZANIA FARM WIATROWYCH DO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM KABLI WN

Jacek KLUCZNIK

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel.: 58 347 1798; e-mail: jacek.klucznik@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Referat prezentuje problemy jakie powstają przy przyłączaniu farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego za pomocą kabli wysokiego napięcia. Referat wskazuje możliwe problemy z kompensacją mocy biernej w zależności od sposobu przyłączenia dławika kompensacyjnego i nastawień układów napięcia farmy wiatrowej. Referat porusza też zagadnienia zwiększenia strat mocy czynnej powodowanych instalacją dławików kompensacyjnych.

**Słowa kluczowe:** linie kablowe, farmy wiatrowe, moc bierna

### 1. WSTĘP

Problemy z pozyskaniem gruntów pod budowę linii napowietrznych wysokiego napięcia, a co za tym idzie długi czas uzyskiwania pozwolenia na budowę takich linii powoduje, że coraz częściej budowane są linie kablowe wysokiego napięcia. W ostatnich latach obserwuje się tendencję do wykorzystywania linii kablowych do przyłączania farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego. Wydawać by się mogło, że jest to rozwiązanie dobre – linia jest niewidoczna, przez co nie psuje krajobrazu, linia ma większą niezawodność, bo nie jest narażona na warunki atmosferyczne takie jak silne wiatry czy wyładowania atmosferyczne. Jednak przy stosowaniu linii kablowych WN występuje jeden poważny problemem techniczny. Jest nim duża pojemność elektryczna kabla i co za tym idzie problemy z generowaną przez kabel mocą bierną.

Obecna konstrukcja umów przyłączeniowych pomiędzy właścicielem farmy wiatrowej a spółką dystrybucyjną, do sieci której wprowadzana jest moc generowana przez farmę wiatrową, zawiera precyzyjne zapisy o wymaganiach jakie muszą być spełnione w zakresie dostarczanej do sieci mocy biernej. W umowie określa się dopuszczalny zakres mocy biernej jaka może być pobierana i oddawana do sieci. Z kolei taryfa operatora sieci dystrybucyjnej określa dokładnie wartości opłat jakie są naliczane za przekroczenie ustalonych wartości mocy biernej wymienianej z siecią. Powyższe powoduje, że na etapie wykonywania projektu farmy wiatrowej konieczne jest zaplanowanie w jaki sposób dokonywana będzie kompensacja mocy biernej linii kablowej, tak aby ograniczyć koszt opłat za moc bierną.

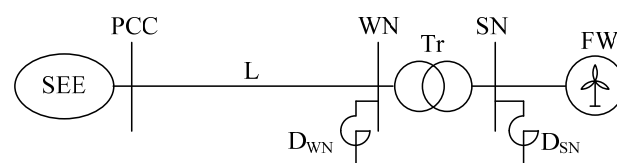
Możliwe są tu trzy główne rozwiązania problemu (rys. 1):

- Kompensacja za pomocą dławika  $D_{WN}$  przyłączonego do sieci wysokiego napięcia (stosuje się wówczas dławik wysokiego napięcia),
- Kompensacja za pomocą dławika  $D_{SN}$  przyłączonego do sieci średniego napięcia (stosuje się wówczas dławik średniego napięcia),

- Kompensacja z wykorzystaniem elektrowni wiatrowych (można nie stosować wówczas dodatkowego dławika, a nadmiar mocy biernej linii kablowej jest kompensowany przez układy energoelektroniczne elektrowni wiatrowych).

Niniejszy referat przedstawia jedynie zagadnienia związane z rozwiązaniami wykorzystującymi dławiki, pomijając potencjalne możliwości wykorzystania elektrowni wiatrowych do regulacji mocy biernej. Wynika to z faktu, że znakomita większość obecnie instalowanych elektrowni wiatrowych ma zerowe, lub bardzo niewielkie możliwości regulacji mocy biernej w sytuacji gdy elektrownia nie generuje mocy czynnej (w sytuacji gdy warunki wiatrowe są niewystarczające do uruchomienia elektrowni). Co prawda część producentów wyposaża swoje elektrownie w dodatkowe układy typu STATCOM rozszerzające możliwości regulacji mocy biernej, lecz wiąże się to z większymi kosztami inwestycyjnymi.

Dwa podstawowe sposoby kompensacji z wykorzystaniem dławików przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Możliwe miejsca przyłączenia dławików do kompensacji mocy biernej linii kablowej

### 2. KOMPENSACJA Z WYKORZYSTANIEM DŁAWIKÓW WN

W przypadku wykorzystania dławika wysokiego napięcia ( $D_{WN}$ ) jego moc powinna być dobrana do skompensowania mocy biernej wytwarzanej przez linię kablową WN (rys. 1). Można to zapisać w sposób następujący:

$$Q_L = Q_D \rightarrow U_{WN}^2 B_L = \frac{U_{WN}^2}{X_D} \quad (1)$$

gdzie:  $Q_L$  – moc bierna linii kablowej WN,

$Q_D$  – moc bierna dławika,

$B_L$  – susceptancja linii kablowej,

$X_D$  – reaktancja dławika,

$U_{WN}$  – napięcie w miejscu przyłączenia dławika.

Podany wzór bazuje na uproszczeniu zakładającym, że napięcie na początku linii (punkt PCC – rys. 1) i na jej końcu

(gdzie zainstalowany jest dławik) są sobie równe. W rzeczywistości napięcia te nie będą takie same, ale z racji dość małych rezystancji i reaktancji linii kablowych ich różnica nie będzie duża. Dzięki temu przyjęte uproszczenie nie prowadzi do dużych błędów, a w łatwy sposób pozwala na dobór dławika. Wzór (1) można przekształcić aby uzyskać zależność na znamionową moc bierną dławika

$$Q_{Dn} = U_n^2 B'_L l \quad (2)$$

gdzie:  $U_n$  – napięcie znamionowe dławika  
 $B'_L$  – susceptancja jednostkowa kabla  
 $l$  – długość linii

Korzystając z przedstawionej zależności dokonano doboru dławika kompensacyjnego dla przykładowej farmy wiatrowej. Założono, że farma o mocy znamionowej 50 MW przyłączona jest do systemu elektroenergetycznego kablem o napięciu znamionowym 110 kV o długości 32 km, którego jednostkowa susceptancja wynosi 50,9  $\mu\text{S}/\text{km}$ . Zatem, zgodnie ze wzorem (2) wymagana moc dławika kompensacyjnego będzie wynosić 19,7 Mvar.

W tych uproszczonych rozważaniach pomijana jest sieć wewnętrzna farmy wiatrowej, która w rzeczywistości również wpływa na bilans mocy biernej.

### 3. KOMPENSACJA Z WYKORZYSTANIEM DŁAWIKÓW SN

W przypadku wykorzystania dławika przyłączonego do szyn SN jego moc, tak jak w poprzednim przypadku powinna być dobrana do skompensowania mocy biernej wytwarzanej przez linię kablową WN. Można to zapisać w sposób następujący (pomijając straty mocy w transformatorze farmy wiatrowej):

$$Q_L = Q_D \rightarrow U_{WN}^2 B_L = \frac{U_{SN}^2}{X_D} \quad (3)$$

gdzie:  $U_{SN}$  – napięcie w miejscu przyłączenia dławika  
 $U_{WN}$  – napięcie linii kablowej WN

Oznacza to, że dławik powinien być dobrany analogicznie jak poprzednio (2) na moc:

$$Q_{Dn} = U_{WN}^2 B'_L l \quad (4)$$

Napięcie we wzorze (4) nie jest w tym przypadku napięciem znamionowym dławika a napięciem znamionowym linii WN. Oczywiście jest, że obliczona moc dławika wymaganego do kompensacji, dla danych z prezentowanego wcześniej przykładu, będzie taka sama (19,7 Mvar).

W zaprezentowanym sposobie doboru dławika tkwi jednak zagrożenie, związane ze zmiennością napięcia w punkcie przyłączenia. Napięcie w sieci podlega wahaniom i zgodnie z IRiESP [3] dla sieci WN może przyjmować dla normalnych stanów pracy wartości od 105 kV do 123 kV.

Jaki zatem poziom napięcia powinien być wykorzystany w doborze dławika? Najniższy, znamionowy, najwyższy?

W przypadku dławika przyłączonego do szyn WN, analizując zależność (1) można zauważyć, że warunek kompensacji nie zależy od napięcia, gdyż przy nie zmieniających się parametrach linii ( $B_L$ ) i dławika ( $X_D$ ) wartości mocy generowanej przez linię kablową i pobieranej przez dławik zmieniają się tak samo, proporcjonalnie do kwadratu napięcia zasilania. Zatem układ kompensacji dobrany na napięcie znamionowe zachowa się poprawnie dla napięć wyższych i niższych od napięcia znamionowego.

Z kolei w celu analizy poprawności doboru dławika przyłączonego po stronie SN transformatora, zależność (3) należy zmodyfikować do postaci (5), wprowadzając do wzoru przekładnię transformatora  $\mathcal{G}$ , wiążącą napięcie strony górnej i dolnej transformatora.

$$Q_L = Q_D \rightarrow U_{WN}^2 B_L = \frac{U_{WN}^2}{X_D \mathcal{G}} \quad (5)$$

Pobieżna ocena uzyskanej zależności wydaje się wskazywać, że warunek kompensacji będzie spełniony niezależnie od napięcia, podobnie jak w przypadku dławika instalowanego po stronie WN. Jednak zaprojektowanie układu kompensacji w ten sposób może skutkować poważną niedokładnością kompensacji przy zmianach napięcia w punkcie przyłączenia. Powodem tego jest fakt, że transformatory farm wiatrowych są wyposażone w przełącznik zaczełów i regulator napięcia. Zadaniem tego układu jest utrzymanie stałego poziomu napięcia w sieci wewnętrznej farmy wiatrowej, tak aby zapewnić prawidłową pracę przyłączonych elektrowni wiatrowych. Regulatory napięcia stosowane dla transformatorów farm wiatrowych dość często pracują z wąską strefą nieczułości i krótkim czasem zwłoki. Takie nastawienie regulatora wynika z obawy projektantów przed możliwością wyłączenia elektrowni wiatrowych przez zabezpieczenia podnapięciowe lub nadnapięciowe.

Wszystko to powoduje, że napięcie na szynach SN utrzymywane jest na w zasadzie stałym poziomie, niezależnie od wartości napięcia linii kablowej WN. W efekcie tego moc bierna pobierana przez dławik pozostaje praktycznie stała, mimo zmian napięcia w linii kablowej. Powyższe powoduje, że dobrana (wg zależności 4) wartość mocy dławika kompensacyjnego może zapewnić pełną kompensację jedynie dla jednego, określonego napięcia zasilającego linię kablową WN.

W uproszczeniu, przy pominięciu strat mocy w linii kablowej i w transformatorze, uchyb kompensacji można opisać jako różnicę mocy biernej generowanej przez linię kablową  $Q_L$  i mocy pobieranej przez dławik  $Q_D$ . Uchyb kompensacji wyrażony będzie jako

$$\Delta Q = Q_L - Q_D = U_{WN}^2 B_L - \frac{U_{SN}^2}{X_D} \quad (6)$$

Przy stałej wartości napięcia na szynach SN (wynikającym z przyjętego sposobu sterowania przekładnią transformatora) uchyb kompensacji zawsze będzie zależał od wartości napięcia zasilającego linię kablową WN i niemożliwe jest uzyskanie pełnej kompensacji dla różnych warunków pracy układu przy stałej wartości indukcyjności dławika.

### 4. PORÓWNANIE KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ Z WYKORZYSTANIEM DŁAWIKÓW SN I DŁAWIKÓW WN

W celu porównania obu metod kompensacji wykonano w programie PowerFactory badania porównawcze dla obu opisywanych rozwiązań. Badania przeprowadzono wykorzystując prosty model sieci zawierający linię kablową WN i transformator sieciowy farmy (rys. 1). Odpowiada to sytuacji, gdy farma wiatrowa nie pracuje i jej sieć SN nie jest pod napięciem. Układ taki przyjęto ze względu na chęć uproszczenia zjawisk jakie występują w układzie, tak aby skupić się jedynie na aspektach związanych z kompensacją mocy biernej linii kablowej. Warto zauważyć, że sytuacja ta bardzo podobna, do stanu kiedy farma wiatrowa nie generuje

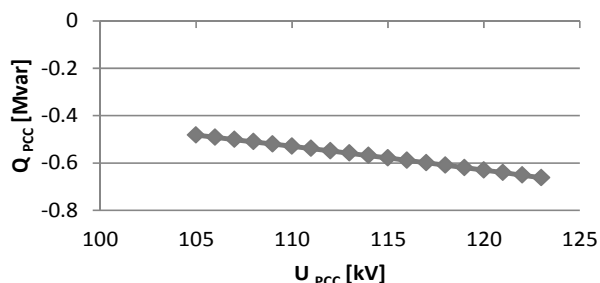
mocy czynnej (bo występują zbyt małe prędkości wiatru), ale sieć wewnętrzna jest pod napięciem, co może występować nawet przez 10% roku.

Bazując na obliczonej uprzednio wymaganej mocy dławika 19,7 Mvar przyjęto dławik o mocy 20 Mvar, w wersji na napięcie znamionowe 20 kV lub 110 kV. Podstawowe dane wykorzystanych dławików zestawiono w tabelicy 1.

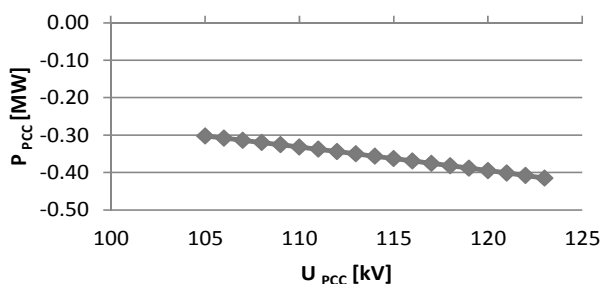
Tabela 1. Wybrane dane dławików powietrznych firmy Trench [4]

Napięcie znamionowe	20 kV	110 kV
Moc znamionowa	20 Mvar	20 Mvar
Reaktancja dławika	20 $\Omega$	605 $\Omega$
Prąd znamionowy	578 A	105 A
Straty znamionowe	182 kW	235 kW

Rysunki 2 i 3 ilustrują zachowanie układu z dławikiem WN podczas zmian napięcia w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej do sieci (PCC).



Rys. 2. Moc bierna w punkcie przyłączenia w funkcji napięcia w punkcie przyłączenia, dla układu z dławikiem WN

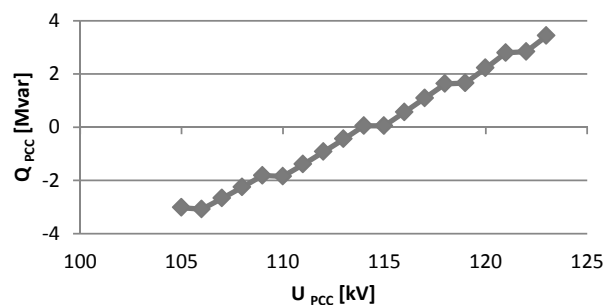


Rys. 3. Moc czynna w punkcie przyłączenia w funkcji napięcia w punkcie przyłączenia, dla układu z dławikiem WN

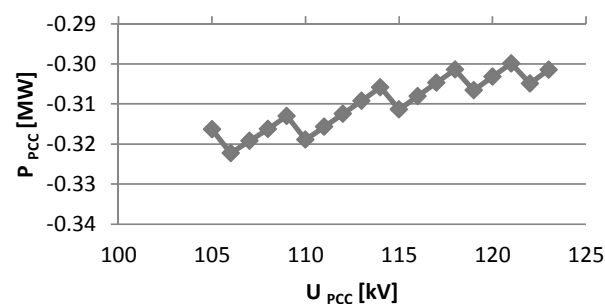
Dla najniższego poziomu napięcia 105 kV można zauważyć (rys. 2), że wartość mocy biernej w punkcie przyłączenia wynosi  $-0,5$  Mvar. Widać, że dobrany w sposób bardzo uproszczony dławik poprawnie kompensuje moc bierną linii kablowej. Wraz ze wzrostem napięcia moc bierna w punkcie przyłączenia obniża się, osiągając przy maksymalnym napięciu wartość około  $-0,7$  Mvar. Te zmiany mocy są efektem wzrostu napięcia w układzie. Wzrost napięcia powoduje wzrost prądu dławika, wzrost prądu magnesowania transformatora w efekcie czego zwiększa się wartość prądu płynącego kablem, co z kolei powoduje powstawanie dodatkowych (nie uwzględnianych w uproszczonych wzorach) strat mocy biernej w kablu WN. Powyższe powoduje, że kompensacja nie jest idealna i wartość mocy biernej w punkcie przyłączenia jest w niewielkim stopniu zależna od poziomu napięcia. Powyższe rozważania wskazują, że układ z dławikiem WN dość dobrze zapewnia kompensację mocy biernej linii kablowej WN. Zasadniczą wadą układu są dość

duże straty mocy czynnej w dławiku i w linii kablowej (rys. 3), rosnące wraz ze wzrostem napięcia w punkcie przyłączenia.

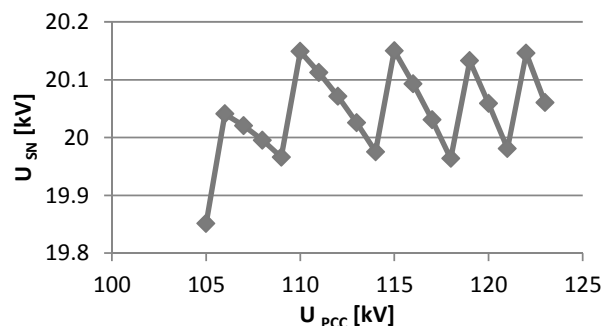
Z kolei rysunki 4÷6 ilustrują zachowanie układu z dławikiem SN podczas zmian napięcia w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej do sieci.



Rys. 4. Moc bierna w punkcie przyłączenia w funkcji napięcia w punkcie przyłączenia, dla układu z dławikiem SN



Rys. 5. Moc czynna w punkcie przyłączenia w funkcji napięcia w punkcie przyłączenia, dla układu z dławikiem SN



Rys. 6. Napięcie szyn SN w funkcji napięcia w punkcie przyłączenia, dla układu z dławikiem SN

Można zauważyć, że układ z dławikiem przyłączonym do szyn napięcia średniego zachowuje się zgodnie z oczekiwaniami. Przy niskich napięciach, gdy moc ładowania linii kablowej jest niska, układ jest przekompensowany i z sieci pobierana jest znaczna wartość mocy biernej (rys. 4). Wraz ze wzrostem napięcia w punkcie przyłączenia, moc ładowania linii kablowej WN rośnie, zaś moc bierna dławika pozostaje praktycznie na stałym poziomie, gdyż napięcie szyn SN (rys. 6), kontrolowane przez regulator transformatora, zmienia się w bardzo wąskich granicach. Skutkiem tego jest wzrost mocy biernej w punkcie przyłączenia. W analizowanym przykładzie przy napięciu 115 kV występuje pełna kompensacja, zaś dalszy wzrost napięcia powoduje wzrost mocy biernej oddawanej do sieci. Przy najwyższym dopuszczalnym napięciu w punkcie przyłączenia (125 kV) wartość oddawanej do sieci mocy biernej przekracza 3 Mvar. Zakres zmian mocy biernej w punkcie przyłączenia, w przypadku dławika przyłączonego do szyn SN wynosi około 6 Mvar,

czemu odpowiada zmiana współczynnika mocy w bardzo szerokim zakresie. Pewną zaletę układu jest ograniczenie strat mocy czynnej dławika względem układu z dławikiem WN, zwłaszcza w zakresie wyższych napięć (rys. 5).

Można zauważyć, że rozpatrywany układ z dławikiem zainstalowanym na szynach SN nie pozwala na uzyskanie zadowalającego stopnia kompensacji, a realizacja praktyczna takiego rozwiązania, mimo niższych kosztów inwestycyjnych może, z racji znacznych opłat za moc bierną oddawaną/pobieraną z sieci, spowodować w długofalowym horyzoncie czasowym znaczne obniżenie zysku inwestora.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w referacie dwa sposoby rozwiązania problemu kompensacji mocy biernej linii kablowej za pomocą dławików, wskazują na istotne różnice wpływu dławików zainstalowanych na poziomie napięcia wysokiego i napięcia średniego na efekty kompensacji.

Wykorzystanie dławików WN niesie ze sobą mniej problemów eksploatacyjnych. Dławik nie wymaga regulacji, a mimo to w szerokim zakresie napięć jest w stanie zapewnić ograniczenie mocy biernej pobieranej/oddawanej z sieci. Brak konieczności regulacji mocy dławika pociąga zmniejszenie kosztów (brak konieczności instalacji droższych dławików regulowanych, brak układów regulacji, brak przeglądów czy konserwacji układów przełączających). Ograniczona do minimum zostaje ilość operacji łączeniowych, gdyż dławik praktycznie przez cały czas pracy pozostaje załączony. Wadą rozwiązania jest fakt, że dławiki wysokich napięć charakteryzują się często nieco wyższymi stratami mocy czynnej w porównaniu z dławikami na napięcia średnie. Dodatkową wadą jest konieczność rozbudowy rozdzielni WN o dodatkowe pole dławika.

Wykorzystanie dławików SN bez możliwości regulacji ich mocy biernej powoduje, że kompensacja mocy biernej kabla będzie zapewniona w otoczeniu jednego, określonego poziomu napięcia. Powyżej tego napięcia farma będzie oddawała nadmiar mocy biernej do sieci, poniżej tego napięcia, farma będzie pobierała moc bierną z sieci. Takie rozwiązanie jest zatem korzystne jedynie w wypadku, gdy napięcie w punkcie przyłączenia farmy do sieci charakteryzuje się bardzo małą zmiennością. W innym przypadku należy stosować dławiki umożliwiające regulację mocy biernej, bądź liczyć się z wysokimi opłatami z tytułu niedotrzymania współczynników mocy zawartych w umowie przyłączeniowej.

Na koniec warto zauważyć, że wykorzystanie linii kablowych w celu przyłączania farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego oraz konieczność stosowania dławików do kompensacji mocy biernej w istotny sposób zwiększa straty mocy czynnej takiej instalacji. Układ linii kablowej i dławika, jako urządzenia pracujące ciągle, powinien być zatem projektowany pod kątem ograniczenia strat mocy czynnej, a projektanci powinni zwracać uwagę na deklarowane przez producentów dławików parametry konstrukcyjne i poszukiwać urządzeń o możliwie najniższych stratach mocy czynnej.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Lubośny Z. Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, WNT 2009
2. Taryfa Energa – Operator, zatwierdzona Decyzją Prezesa URE nr DRE-4211-79(8)/2013/VII/WDR/KGo z dnia 17.12.2013 r.
3. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej PSE-Operator z dnia 1 sierpnia 2014r.
4. Dry-Type, Air-Core Shunt Reactors, Trench Austria GmbH

## SELECTED PROBLEMS OF CONNECTING WIND FARMS TO THE POWER SYSTEM USING HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES

The paper presents the problems related to connecting wind farms to the power system by using high voltage underground cables. The paper indicates possible problems with reactive power compensation depending on the method of shunt reactor connection and setting wind farm reactive power and voltage control systems. The paper also shows issues of active power losses increasing caused by the installation of shunt reactors.

**Keywords:** underground cables, reactive power, wind farms