

## KOMPENSACJA LINII KABLOWYCH 110 kV WYPROWADZAJĄCYCH MOC Z FARM WIATROWYCH

Piotr KACEJKO<sup>1</sup>, Paweł PIJARSKI<sup>2</sup>, Sylwester ADAMEK<sup>3</sup>

POLITECHNIKA LUBELSKA

1. tel.: 48815384735; e-mail: p.kacejko@pollub.pl

2. tel.: 48815384738; e-mail: p.pijarski@pollub.pl

3. tel.: 48815384738; e-mail: s.adamek@pollub.pl

**Streszczenie:** W referacie omówiono problemy kompensacji mocy biernej linii kablowych 110 kV o długościach kilkudziesięciu kilometrów. Linie takie są obecnie budowane głównie w celu przyłączenia farm wiatrowych, jako konsekwencja trudności w uzyskaniu pozwoleń na budowę linii napowietrznych. Praktyczne problemy projektowe wiążą się z faktem nieokreśloności pojemności kabla i reaktancji dławika (urządzenia niestandardowe produkowane jednostkowo) oraz zmiennością napięć w miejscu przyłączenia. Stosując podejście probabilistyczne zaproponowano możliwe rozwiązania w zakresie doboru urządzeń kompensacyjnych.

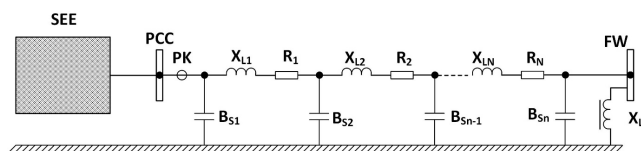
**Słowa kluczowe:** kompensacja mocy biernej, farmy wiatrowe, linie kablowe WN.

### 1. WSTĘP

Linie kablowe 110 kV o długościach przekraczających znacznie kilka kilometrów, są dziś realnym elementem krajo-wej elektroenergetyki. Ich stosowanie wynika w istotnej części z faktu zdeterminowania inwestorów z branży wiatrakowej, aby planowane i budowane farmy przyłączyć do sieci. Ponieważ warunki zabudowy obszarów pomiędzy farmami, a punktami przyłączenia ich do sieci (PCC), uniemożliwiają budowę tańszych linii napowietrznych, wariant kablowy jest jedynym realnym rozwiązaniem. Kontrola mocy biernej, której linie kablowe są znaczącym źródłem, jej koordynacja z możliwościami wytwórczymi farmy wiatrowej stają się istotnym problemem projektowym. Teoretycznie, proste rozwiązanie polegające na zastosowaniu dławika kompensującego (SR – *Shunt Reactor*) na końcu linii, wiąże się z wyborem jednostki o ustalonej indukcyjności (Fixed SR). Jednakże zmienność warunków pracy sieci (napięcie w PCC, moc czynna farmy wiatrowej) oraz niepewność parametrów konstrukcyjnych kabla i dławika (nie są to elementy produkowane w sposób powtarzalny) zmuszają do korzystania z innych rozwiązań: dławików regulowanych pod obciążeniem za pomocą odczepów (Variable SR) oraz kosztownych układów FACTS z płynną regulacją (SVC). W referacie przedstawiono sposób alternatywnego doboru układów FSR i VSR, uwzględniający wskazane wyżej ograniczenia. Sformułowano także postulat, aby operatorzy sieci w wydawanych warunkach przyłączenia i umowach przyłączeniowych określali poziom tolerancji formułowanych wymagań w zakresie kompensacji mocy biernej, udziału farmy w regulacji napięcia, ilości dostarczanej lub pobieranej mocy biernej. Praktyka dowodzi bowiem, że dążenie projektantów do nadmiernie dokładnego spełniania tych wymagań istotnie zwiększa koszty przyłączenia do sieci, nie dając przy tym istotnych korzyści systemowych [6, 7].

### 2. MODEL LINII KABLOWEJ Z UKŁADEM KOMPENSACJI – KLASYKA I ASPEKTY PROBABILISTYCZNE

Klasyczna literatura [1] podpowiada, że linia kablowa o długości kilkudziesięciu kilometrów powinna być modelowana jako linia długa o parametrach rozłożonych. Z drugiej jednak strony linia taka powstaje jako połączenie kilku sekcji [2], z których każda może być modelowana za pomocą uproszczonego modelu typu II. W rezultacie możliwe jest zastosowanie modelu o strukturze drabinkowej (rys. 1). Dla tak skonfigurowanego modelu dobór reaktancji  $X_L$  dławika kompensującego wydaje się być trywialną operacją obliczeniową: dławik uznaje się za dobrze dobrany jeśli dla stanu jałowego farmy, w miejscu przyłączenia linii kablowej do systemu (punkt pomiarowy PK) w znamionowych warunkach napięciowych  $U_{PCC} = U_N$  przepływ mocy biernej wykaże wartość zerową, czyli  $Q_{PK} = 0$ . Wartość reaktancji dławika dobrana w ten sposób może być oznaczona jako  $X_{Ln}$ .



Rys. 1. Model obliczeniowy linii kablowej wyprowadzającej moc z farmy wiatrowej (FW) wraz z dławikiem kompensującym

Prostemu zadaniu obliczeniowemu praktyka przeciwstawia utrudnienia w postaci niepewności w dotrzymaniu przez wytwórców parametrów konstrukcyjnych – zarówno kabla 110 kV jak i dławika. Tym samym, zarówno wartość pojemności kabla, jak i indukcyjność dławika można uznać za określone, gdy linia kablowa zostanie zbudowana, a dławik dostarczony do rozdzielni FW 110 kV i finalnie zmontowany. Dodatkowo należy uwzględnić fakt, że wymagania terminowe procesu inwestycyjnego wymuszają równoległe złożenie zamówień zarówno u producenta kabli jak i u producenta dławika.

Z uwagi na ogólny charakter prezentowanego referatu, uznano, że i w produkcji kabli 110 kV jak też dławików 110 kV niedokładności konstrukcyjne opisuje rozkład Gaussa. W obydwu przypadkach opisuje ten rozkład funkcja  $\Phi$  oznaczająca dystrybuantę rozkładu normalnego  $N(0,1)$ , natomiast  $B_{kn}$  oraz  $X_{Ln}$  oznaczają odpowiednio wartości susceptancji jednostkowej kabla 110 kV oraz reaktancji dławika

kompensującego przyjętych przez producentów jako znamionowe, na podstawie obliczeń omówionych wyżej. Niepewność związana z procesami produkcyjnymi (kable i dławika) wyraża odchylenie standardowe (odpowiednio dla kabla  $\sigma_k$ , a dla dławika  $\sigma_L$ ). Bazując na szczupłych informacjach uzyskanych od producentów przyjęto (w ocenie autorów pesymistycznie) dla obydwo elementów wartości  $3\sigma_k/B_{kn} = 0,075$  oraz  $3\sigma_L/X_{Ln} = 0,075$ . Oznacza to, że „kryterium 3-sigmowe” obejmuje obszar o szerokości  $\pm 7,5\%$  w stosunku do wartości uznanych za znamionowe.

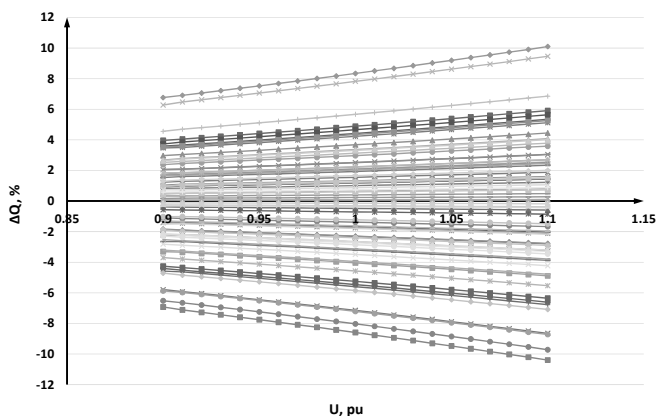
Wymagania operatorów nie pozostawiają wątpliwości, co do konieczności spełnienia warunków kompensacji dla pełnego zakresu spodziewanych napięć od  $0,90U_N$  do  $1,10U_N$ . Tym samym metodyka prowadzonych badań w każdym przypadku obejmowała skanowanie wskazanego wyżej pełnego zakresu napięć na szynach PCC.

### 3. NIESKUTECZNOŚĆ PODEJŚCIA DETERMINISTYCZNEGO – WYNIKI SYMULACJI MONTE CARLO

Zakładając losowy charakter parametrów  $B_K$  oraz  $X_L$ , skuteczność kompensacji pojemności linii kablowej wykonywanej dławik o nieregulowanej indukcyjności (FSR), może być zbadana za pomocą symulacji Monte Carlo. Odpowiednia para wielkości ( $B_K$ ,  $X_L$ ) może być losowana za pomocą generatora liczb losowych, a wynik takiego losowego doboru pojemności kabla i indukcyjności dławika może zostać zweryfikowany za pomocą obliczeń rozpiętych. Weryfikacja obliczeniowa powinna obejmować pełny zakres napięć dopuszczalnych na szynach stacji PCC. Wyniki tak przeprowadzonej symulacji dla 100 wylosowanych par (susceptancja jednostkowa kabla, indukcyjność dławika), przedstawiono na rys. 2, przy czym procentowy stopień kompensacji zdefiniowano jako

$$\Delta Q_{\%} = \frac{Q_c - Q_L}{Q_{kn}} \cdot 100 \quad (1)$$

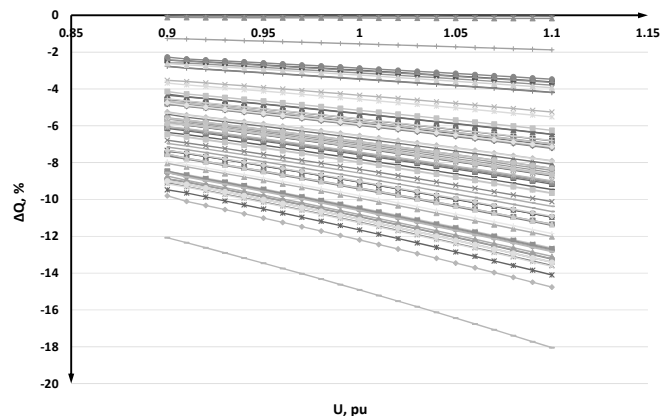
gdzie jako  $Q_{kn}$  zdefiniowano moc dławika zapewniającego idealną kompensację, przy pojemności  $B_{kn}$  i napięciu  $U_{PCC} = U_N = 110$  kV.



Rys. 2. Stopień skompensowania linii kablowej – wyniki symulacji Monte Carlo dla losowo wybranych par ( $B_K$ ,  $X_L$ ) i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC

Jak pokazano na rys. 2, losowy charakter parametrów kabla oraz dławika powoduje, że dla wartości napięcia w PCC wynoszącej 121 kV stopień kompensacji zamiast wartości zerowej, może wynieść nawet 10%. Oznacza to, że przy mocy ładowania 100 Mvar (np. 2 linie kablowe pracujące

równoległe o długości 50 km) można oczekiwać niedokompensowania o wartości 10 Mvar (zbyt mała moc dławika) lub przekompensowania (zbyt duża moc dławika) o wartości – 10 Mvar. Z punktu widzenia praktyki projektowej zjawisko niedokompensowania jest znacznie bardziej kłopotliwe – bo mocy dławika zwiększyć się nie da, a jego wymiana, z uwagi na koszty, nie wchodzi w grę. Stąd też próba alternatywnego podejścia zaproponowana przez autorów niniejszego referatu – jako wartość znamionową reaktancji dławika określoną dla wytwórcy w zamówieniu, podaje się  $X_{Lp} = (1 + 3\sigma_L) \cdot X_{Ln}$ . Oczywiście dławik o reaktancji określonej w ten sposób też będzie podlegał losowemu procesowi produkcji zdefiniowanemu za pomocą rozkładu Gaussa, analogicznego jak w poprzednim przypadku. Tym razem jednak losowy charakter reaktancji dławika i pojemności kabla nigdy nie spowoduje niedokompensowania linii kablowej – zawsze jest to przekompensowanie, co wskazuje rys. 3. Opanowanie przekompensowania jest jednak względnie łatwe – może być zrealizowane za pomocą kondensatorów przyłączonych do szyn średniego napięcia rozdzielni FW. Kondensatory takie są produkowane seryjnie i stosunkowo łatwo dostępne, dlatego o ich liczbie i mocy można zdecydować na późniejszym etapie procesu inwestycyjnego. Z rysunku 2 można wnioskować, że stopień przekompensowania zawiera się w przedziale od zera do –18%. Można jednak wykazać, że uzasadnione jest zainstalowanie „w ciemno” baterii sześcioczołowej o mocy odpowiadającej 12%  $Q_{kn}$  przy zapewnieniu możliwości dostawienia dodatkowych jednostek o łącznej mocy 8%  $Q_{kn}$  (razem moc baterii 20%  $Q_{kn}$ ).



Rys. 3. Stopień skompensowania linii kablowej - wyniki symulacji Monte Carlo dla losowo wybranych par ( $B_K$ ,  $X_L$ ) i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC, przy powiększonej do wartości  $X_{Lp}$  reaktancji znamionowej dławika

### 4. ROZWIĄZANIE ALTERNATYWNE – DŁAWIK REGULOWANY

Zastosowanie dławika o ustalonej (choć wstępnie nieokreślonej) reaktancji wraz z baterią kondensatorów po stronie SN pozwala na opanowanie problemu kompensacji nawet w sytuacji niepewności w zakresie pojemności linii kablowej oraz w warunkach zmienności napięć na szynach PCC. Zastosowanie dławika o ustalonej wartości reaktancji (FSR) można zastąpić zastosowaniem dławika o regulacji zaczepowej (VSR). Nieliczni producenci takich dławików podejmują się jednostkowej produkcji elementów, których moc określona jest zgodnie z zależnością

$$Q_L = Q_{Ln} \frac{(U/U_N)^2}{(Z/Z_N)^2} = \quad (2)$$

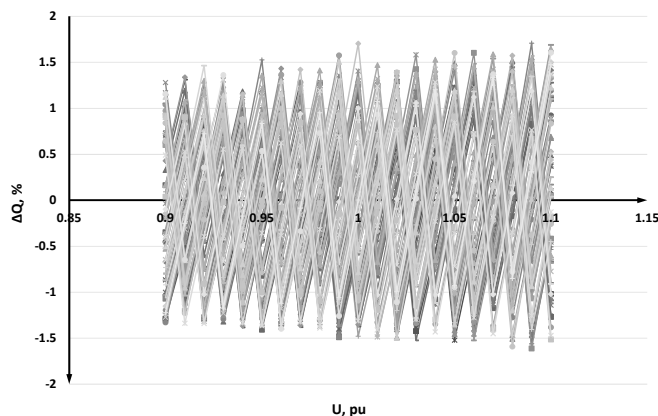
$$= Q_{Ln} \cdot (U/U_N)^2 \cdot \left( \frac{100}{100 + N \cdot \Delta R} \right)^2$$

gdzie:  $N$  – numer zaczepu (dodatni, ujemny lub zero);  
 $\Delta R$  – skok zaczepu w % (np. 1,5%, 2%, 2,5%, 3%).

Tak jak i w przypadku dławika FSR, losowość jednostkowej produkcji dławika VSR upoważnia do przyjęcia założenia o rozkładzie Gaussa jedynie w stosunku do reaktancji  $X_{Ln}$ , bowiem wyprowadzenie zaczepów może być zrealizowane w sposób równomierny i dokładny.

W rezultacie, dla znamionowej wartości reaktancji  $X_{Ln}$  zmiany zaczepów oraz zróżnicowanie poziomu napięcia prowadzi do znaczącej zmienności mocy dławika.

Możliwość uzyskiwania z dławika VSR mocy biernej o zmiennej wartości, pozwala na wykorzystanie go zarówno w przypadku stochastycznej niepewności związanej z wartością indukcyjności i pojemności kabla, jak też w związku ze zmiennością napięcia w PCC. Także i w tym przypadku przeprowadzono analizę obliczeniową wykorzystującą symulację Monte Carlo. Proces losowania pary wielkości ( $B_K, X_L$ ) uzupełniono obliczeniowym poszukiwaniem takiej liczby  $N$  (numer zaczepu), która minimalizuje wartość bezwzględną procentowego stopnia kompensacji. Dodatkowo, tak jak w poprzednim przypadku, operacje tę powtórzono w procesie skanowania pełnego zakresu napięć od  $0,90U_N$  do  $1,10U_N$ .



Rys. 4. Stopień skompensowania linii kablowej – wyniki symulacji Monte Carlo dla losowo wybranych par ( $B_K, X_L$ ) i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC, przy wykorzystaniu dławika regulowanego VSR, o skoku zaczepu 1,5%

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4. Przedstawia on wpływ regulacji zaczepowej (skok 1,5%) na stopień skompensowania. Jak można zauważyć moc rozkompensowania mieści się zasadniczo w zakresie strefy martwej wynikającej ze skoku przełącznika zaczepów dławika. Możliwe jest zawężenie tej strefy poprzez dobór dławika o większej mocy znamionowej na zaczepie zerowym, zgodnie z formułą  $X_{Lp} = (1 + 3\sigma_L) \cdot X_{Ln}$ .

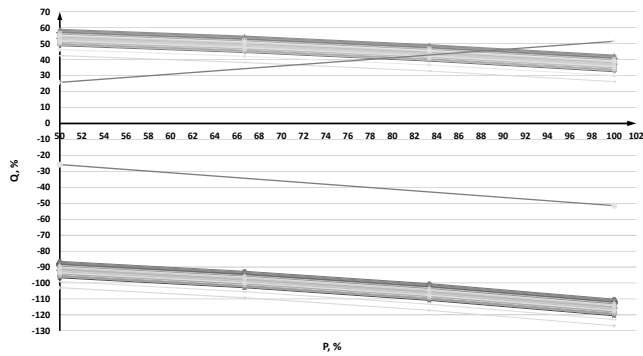
Warto w tym miejscu zauważyć, że Instrukcja [4] formułując wymagania odnośnie kompensacji pojemności linii kablowej nie podaje tolerancji w zakresie dokładności tej kompensacji. W rezultacie, niektórzy projektanci i operatorzy sieci, traktując kwestie tej kompensacji wręcz obsesyjnie kierują inwestora ku niezwykle kosztownym układom SVC. Tymczasem, z podstawowej zasady prawa energetycznego – niedyskryminacyjnego podejścia do podmiotów, powinna wynikać zasada, aby dokładność kompensacji linii kablowej

była nie większa niż skutki pracy linii napowietrznej analogicznej długości pracującej w stanie jałowym. Wobec linii napowietrznych 110 kV nikt bowiem kompensacji nie wymaga. Uwzględniając stosunek pojemności typowych linii napowietrznych i typowych linii kablowych tolerancję kompensacji tych ostatnich powinno się określać na poziomie 2–2,5%.

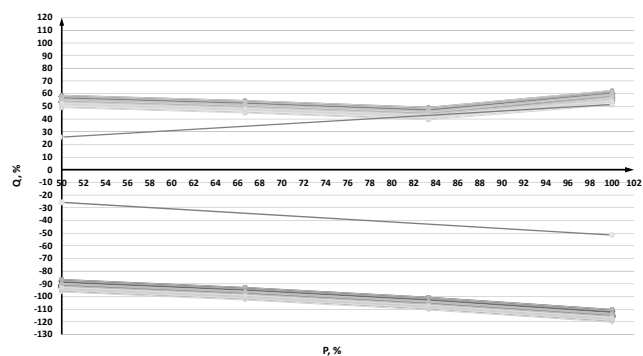
## 5. KOMPENSACJA POJEMNOŚCI LINII KABLOWEJ 110 kV A ZDOLNOŚĆ FW DO PRODUKCJI MOCY BIERNEJ W WYMAGANYM ZAKRESIE

Układ kompensacji pojemności kabla 110 kV wyprodukowanego moc z farmy wiatrowej powinien być rozpatrywany także pod kątem spełnienia innych wymagań sformułowanych w stosunku do farmy w Instrukcji [4]. W szczególności chodzi o zapewnienie możliwości generacji mocy biernej farmy, tak aby w całym zakresie możliwej generacji mocy czynnej pomiar mocy biernej w punkcie PK (rys. 1) zapewniał współczynnik mocy nie mniejszy niż 0,95 – w obydwu kierunkach, zarówno w zakresie poboru mocy biernej (wartość przyjmowana dla źródeł jako ujemna) jak też jej generacji. Omawiając powyższy problem warto przypomnieć, że układy przekształtnikowe, w które wyposażone są wiatraki mają bardzo szerokie możliwości generacyjne w odniesieniu do mocy biernej – [5]. Większość obecnie produkowanych jednostek o mocach znamionowych  $P_{NG}$  równych 2–3 MW ma zdolność generacji każdej ilości mocy biernej z przedziału od  $-0,5P_{NG}$  do  $0,5P_{NG}$ , w zakresie generacji mocy czynnej prawie od aż do pełnej mocy znamionowej  $P_{NG}$ . Okazuje się jednak, że nie są to możliwości wystarczające, co ilustruje rys. 7. Dla generacji mocy czynnej bliskiej znamionowej i dla wszystkich jednostek pracujących, straty mocy biernej związane z przesyłem mocy czynnej niweczą częściowo możliwości generacyjne przekształtników. Także i w tym przypadku ostateczny efekt rozumiany jako wynik pomiaru mocy w punkcie PK ma charakter stochastyczny – decyduje o tym niepewność w określaniu parametrów kabla 110 kV oraz dławika kompensującego w FW. Symulacja Monte Carlo odniesiona do par ( $B_K, X_L$ ), połączona z analizą rozptyłową, wskazuje, że deficyt możliwości generacyjnych farmy w zakresie mocy biernej (mierzonej w punkcie PK) może zawierać się w przedziale od 10% do 20%  $Q_{kn}$ . Tym samym idea zastosowania wieloczołkowej baterii kondensatorów po stronie SN oraz dławika o stałej mocy daje gwarancję kompleksowego opanowania problemu mocy biernej FW zasilanej linią kablową o znacznej długości.

Podobne korzyści w zakresie opanowania deficytu mocy biernej generowanej w farmie wiatrowej w warunkach zbliżonych do znamionowej mocy czynnej, daje zastosowanie dławika regulowanego VSR. Dławik ten pełni wtedy rolę swoistego zaworu, który udostępnia dla potrzeb bilansu mocy biernej farmy (mierzonego w punkcie PK) rezerwar mocy biernej którym jest pojemność kabla. Zmniejszając moc dławika (poprzez odpowiednią regulację zaczepową uwzględniającą także warunki napięciowe) osiąga się stan niedokompensowania kabla 110 kV zyskując jednocześnie brakującą moc bierną. Efekt zastosowania dławika VSR pokazano na rys. 8. Jak widać stosowanie dodatkowych kondensatorów po stronie SN jest zbędne.



Rys. 7. Moc bierna mierzona w punkcie PK (pasma) w funkcji mocy czynnej generowanej w wiatrakach FW – stochastyczny charakter parametrów dławika  $FSR$  oraz pojemności linii kablowej 110 kV wynika z symulacji Monte Carlo, wskazano linie odpowiadające współczynnikowi mocy 0,95 (charakter indukcyjny i pojemnościowy); moc bierna w wiatrakach  $-0,5P_{nG}$  (część dolna rysunku oraz  $0,5P_{nG}$  (część górna rysunku)



Rys. 8. Moc bierna mierzona w punkcie PK (pasma) w funkcji mocy czynnej generowanej w wiatrakach FW – stochastyczny charakter parametrów dławika  $VSR$  oraz pojemności linii kablowej 110 kV wynika z symulacji Monte Carlo; wskazano linie odpowiadające współczynnikowi mocy 0,95 (charakter indukcyjny i pojemnościowy); moc bierna w wiatrakach  $-0,5P_{nG}$  (część dolna rysunku oraz  $0,5P_{nG}$  (część górna rysunku)

## 6. PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono problem doboru dławika kompensującego pojemność długiej linii kablowej 110 kV

wyprowadzającej moc z farmy wiatrowej. Wskazano na możliwość zastosowania dwóch rozwiązań:

- dławika o stałej wartości indukcyjności ( $FSR$ ) współpracującego z wieloczołową baterią kondensatorów zainstalowaną po stronie średniego napięcia;
- dławika o regulacji zaczepowej ( $VSR$ ) o odpowiednio dobranej liczbie zaczepów i skoku zaczepu.

Obydwie koncepcje (choć za bardziej zaawansowana technicznie uznaje się drugą) pozwalają na opanowanie problemu niepewności i tolerancji dotyczącego zarówno pojemności jednostkowej kabla 110 kV jak i reaktancji dławika. Finalne wartości obydwu tych wielkości, wobec jednostkowego charakteru produkcji kabla jak i dławika są znane dopiero w fazie montażu urządzeń na placu budowy, co firmy projektowe i wykonawcze uznają za poważne utrudnienie.

Dodatkowo obydwie metody pozwalają na spełnienie wymagań operatorów sieci w zakresie wartości mocy biernej generowanej przez farmy wiatrowe w warunkach generacji mocy czynnej zbliżonej do znamionowej, bez konieczności stosowania dodatkowych układów kompensacyjnych i baterii kondensatorów.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Saadat H: Power System Analysis, McGraw-Hill International Editions, 3-rd edition, 2010.
2. Sobral A., Moura A., Carvalho M.: Technical Implementation of Cross Bonding in Underground HV Lines Projects, 21-st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt 6–9 June 2011, paper 0499.
3. Iwanicki M., Dębek M.: Kompensacja mocy biernej indukcyjnej oraz pojemnościowej na farmach wiatrowych, Wiadomości Elektrotechniczne Nr 2, 2015 r., s. 35–38.
4. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej PSE SA <http://www.pse.pl/>.
5. Lubośny Z. Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. Warszawa, WNT 2010.
6. Kacejko P., Pijarski P.: Generation level matching to the transmission capability of overhead lines, Acta Energetica – 2013, nr 1/14, vol 5, s. 43–49.
7. Kacejko P., Pijarski P.: Przyłączanie farm wiatrowych – ograniczenia zamiast przewymiarowanych inwestycji, Rynek Energii, nr 1 (80), luty 2009 r., s.10–15.

## COMPENSATION OF 110 kV CABLE LINES CONNECTING WIND FARMS WITH THE GRID

Application of 110 kV cable lines with length bigger than a few kilometers, is a standard engineering practice now. These cables are used mainly by wind farm developers for connecting them to power system in PCCs (*Points of Common Coupling*). Because of infrastructure limitations, it is impossible to built the new overhead lines, so cables occur to be one and only solution. As it is well known, HV cables are significant sources of the reactive power. It should be controlled and coordinated with general requirements of the grid operators. Application of a shunt reactor with fixed reactance ( $FSR$ ), seems to be theoretically an easy task. On the other hand variability of power system parameters (voltage in PCC, active power in WF), constructional uncertainty of cable and reactor nominal parameters, forced us to look for more flexible solutions. As the alternative, the reactor with on load tap changer ( $OLTC$ ) called *Variable SR* can be taken into account. In the paper two alternative methods of  $FSR$  versus  $VSR$  adjustment are considered.

**Keywords:** reactive power compensation, HV cable lines, wind farms