

## WYBRANE PROBLEMY KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Zbigniew LUBOŚNY, Jacek KLUCZNIK, Krzysztof DOBRZYŃSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel.: 58 347 1641; e-mail: zbigniew.lubosny@pg.gda.pl;  
tel.: 58 347 1798; e-mail: jacek.kluczник@pg.gda.pl  
tel.: 58 347 1798; e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono rozważania dotyczące doboru dławików kompensacyjnych dla linii elektroenergetycznej dwutorowej wysokiego napięcia 400 kV, na przykładzie nowobudowanej linii Ełk Bis-Alytus. W analizach uwzględniono różne stany pracy układu. Zamieszczone wyniki dotyczą poziomów napięć w stanach ustalonych, podczas procesów łączeniowych oraz zwarc.

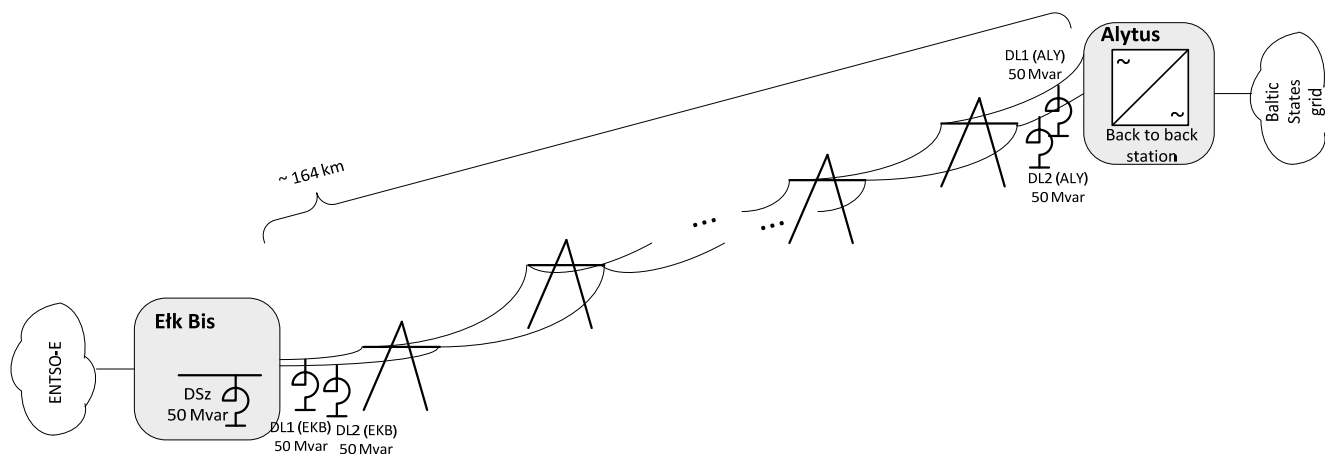
**Słowa kluczowe:** Kompensacja mocy biernej, linia napowietrzna 400 kV, dławik bocznikowy

### 1. WPROWADZENIE

Linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia są źródłem mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, gdzie poziom tej mocy zależy od poziomu mocy przesyłanej linią, jej długości i parametrów samej linii. Im bardziej niedociążona linia, tym większą wartość mocy biernej generuje linia. To z kolei przekłada się wprost na napięcie na linii oraz na poziomy napięć w najbliższym jej sąsiedztwie. W szczególnych przypadkach może się okazać, że napięcia w normalnych stanach pracy są zbyt wysokie, tzn. przekraczają wartości dopuszczalne długotrwale. Taka sytuacja może wystąpić zwłaszcza podczas pracy systemu elektroenergetycznego niedociążonego, tak jak ma to np. miejsce w krajowym sys-

temie elektroenergetycznym (KSE) np. w dni świąteczne czy w dolinie letniej. W celu ograniczenia wpływu danej linii na poziom napięcia często stosuje się dławiki bocznikowe, mające za zadanie kompensację mocy biernej generowanej przez linię [2, 3]. Miejsce zainstalowania dławików (lub dławika) zależy od sytuacji napięciowej w danym miejscu systemu.

Aktualnie budowana jest dwutorowa linia elektroenergetyczna wysokiego napięcia 400 kV mająca stanowić most energetyczny łączący system europejski ENTSO-E (w ramach którego pracuje KSE) oraz systemy Krajów Bałtyckich (Litwy, Łotwy oraz Estonii) [1, 4]. Połączenie to realizowane jest z wykorzystaniem układu przekształtnikowego back-to-back znajdującego się na terenie Litwy. Wstępne analizy pracy tej linii wykonane przez PSE S.A. wykazały, że występuje konieczność zastosowania kompensacji mocy biernej generowanej przez linię. Założono, że kompensacja będzie realizowana przez cztery dławiki liniowe (DL), zainstalowane na dwóch końcach linii (rys. 1). W początkowej fazie projektu dobrano sumaryczną moc dławików przyłączonych do linii wynoszącą  $4 \times 50$  Mvar, która to moc w pełni kompensuje moc bierną generowaną przez linię.



Rys. 1. Schemat poglądowy dwutorowej linii elektroenergetycznej 400 kV Ełk Bis-Alytus

Oprócz dławików przyłączonych bezpośrednio do linii w stacji Ełk Bis zaplanowano zainstalowanie dodatkowego dławika szynowy (DSz), również o mocy 50 Mvar.

Powyżej opisany układ w początkowym etapie pracy ma zapewniać przepływ mocy czynnej na poziomie  $\pm 500$  MW zaś docelowo planowane jest przesyłanie mocy na poziomie  $\pm 1000$  MW.

## 2. NAPIĘCIA LINII W STANACH USTALONYCH

Warunki napięciowe w stanach ustalonych należy określić dla różnych konfiguracji pracy układu przedstawionego na rysunku 1, uwzględniając przy tym możliwość wyłączeń elementów sieciowych w najbliższej okolicy linii. Przeanalizowano następujące konfiguracje sieci elektroenergetycznej:

- ALY 0 MW: nie jest przesyłana moc łączem HVDC,
- ALY -500 MW: export mocy 500 MW w kierunku Litwy,
- ALY +500 MW: import mocy 500 MW z Litwy,
- Tr EKB-A3: wyłączony transf. EKB-A3 (w stacji Ełk),
- Tr ELK-A1: wyłączony transf. ELK-A1 (w stacji Ełk),
- ELK-A2: wyłączony transf. ELK-A2 (w stacji Ełk),
- EKB-ALY 1: wyłączony tor nr 1 linii Ełk Bis-Alytus,
- LMS-EKB 1: wyłączony tor nr 1 linii Ełk Bis-Alytus,
- EKB111-ELK111: wyłączona linia EKB111-ELK111,
- NAR-LMS: wyłączona linia Narew-Łomża,
- OST-LMS A: wyłączony tor nr 1 linii Ełk Bis-Alytus,
- DL-1 EKB: wyłączony dławik przyłączony do toru 1 po stronie EKB,
- DL-2 EKB: wyłączony dławik przyłączony do toru 2 po stronie EKB,
- DL-1 DL-2 EKB: wyłączone oba dławiki po stronie EKB,
- DL-SZ EKB: wyłączony dławik w stacji EKB,
- DL-1 ALY: wyłączony dławik przyłączony do toru 1 po stronie ALY,
- DL-2 ALY: wyłączony dławik przyłączony do toru 2 po stronie ALY,
- DL-1 DL-2 ALY: wyłączone oba dławiki po stronie ALY.

Pierwsze trzy konfiguracje odpowiadają pracy systemu z załączonymi wszystkimi elementami rozważanej sieci. Linia Ełk Bis-Alytus pracuje w tych przypadkach z załączonymi dwoma torami. Kolejne warianty odpowiadają importowi 500 MW mocy (przepływ mocy w kierunku stacji Ełk Bis) oraz wyłączeniu jednego lub dwóch elementów sieci – w stosunku do układu pełnego (podstawowego).

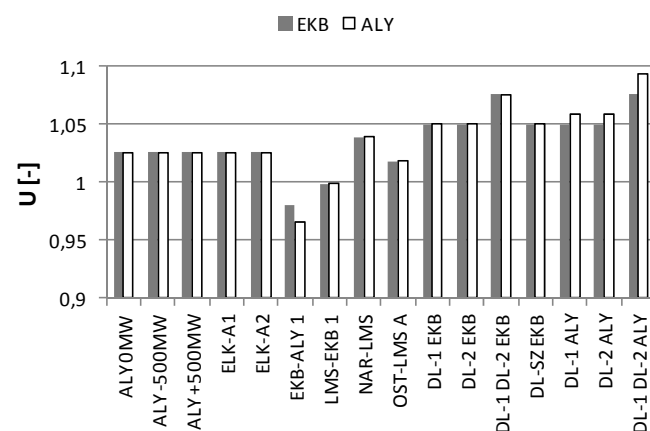
Wyniki obliczeń poziomów napięć zaprezentowane na rysunkach 2 i 3 podano w jednostkach względnych odniesionych do napięcia znamionowego sieci. Dla sieci o napięciu znamionowym 400 kV napięciem dopuszczalnym długotrwale w stanach normalnych jest napięcie 420 kV, tj. równe 1,05 w jednostkach względnych.

Wyniki zaprezentowane na rysunku 2 pokazują, że praca systemu w dolinie obciążenia wiąże się z wyższymi poziomami napięć zarówno w stacji Ełk Bis jak i w stacji Alytus. Konfiguracje pracy sieci, dla których obserwuje się nadmiernie wysokie poziomy napięcie, są związane z wyłączeniem dławików w stacji Alytus. Również konfiguracje pracy z wyłączonymi dławikami w stacji Ełk Bis prowadzą do napięć o wartościach granicznych górnych (szczyt zimowy) lub nadmiernie wysokich (dolina letnia). Oznacza to, że w normalnych stanach pracy systemu w szczycie zimowym (w okresach dużego obciążenia systemu) w stacji Alytus powinien być załączony co najmniej jeden dławik liniowy, a w stacji Ełk Bis dławik szynowy i co najmniej jeden dławik liniowy. Natomiast w okresach małego obciążenia (w tym w dolinie letniej) załączone powinny być wszystkie dławiki, tj. szynowy w stacji Ełk Bis oraz liniowe w linii Ełk Bis-Alytus.

Występowanie łącza HVDC w stacji Alytus powoduje, że możliwe są również stany pracy związane z załączaniem

tego łącza do pracy. W takim przypadku sekwencja procesu łączeniowego będzie (może być) następująca:

- 1° jednostronne załączenie linii Ełk Bis-Alytus w stacji Ełk Bis;
- 2° załączenie linii w stacji Alytus;
- 3° załączenie łącza HVDC.



Rys. 2. Poziomy napięcie na sznach EKB i ALY, dolina letnia

Powyższe oznacza, że występowały będą okresy jednostronnego załączenia linii Ełk Bis-Alytus, nieobciążonej lub obciążonej jedynie dławikiem liniowym. Przeanalizowano kilkanaście konfiguracji pracy rozważanego układu. Wybrane wyniki zamieszczono poniżej, przy czym oznaczenia przyjęte na prezentowanych rysunkach są następujące:

- A – jednostronne załączenie jednego toru linii Ełk Bis-Alytus;
- B – jednostronne załączenie obu torów linii;
- C – jednostronne załączenie jednego toru linii Ełk Bis-Alytus realizowane poprzez tor Łomża-Ełk Bis-Alytus. Oznacza to, że stacja Ełk Bis nie jest połączona z siecią 110 kV;
- D – jednostronne załączenie obu torów linii realizowane poprzez tor Łomża-Ełk Bis-Alytus, przy czym linia Łomża-Ełk Bis pracuje z załączonym jednym torem.

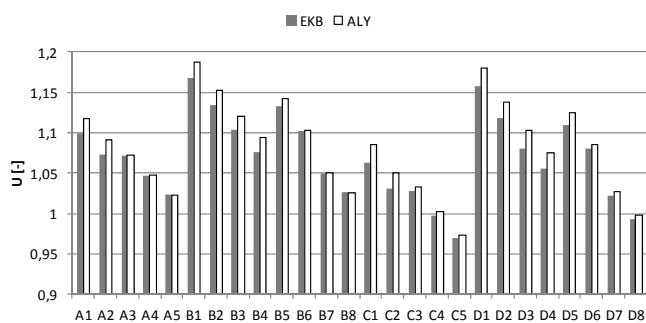
Ponadto do każdej litery dodawana jest cyfra, która oznacza stan pracy wybranych elementów sieci (tablica 1).

Tablica 1. Konfiguracje pracy rozważanego fragmentu sieci; „-” oznacza element wyłączony; „+” oznacza element załączony

Element	Wariant							
	1	2	3	4	5	6	7	8
LMS-EKB tor 1	+	+	+	+	+	+	+	+
LMS-EKB tor 2	+	+	+	+	+	+	+	+
EKB-ALY tor 1	+	+	+	+	+	+	+	+
EKB-ALY tor 2	+	+	+	+	+	+	+	+
DSz EKB	-	+	-	+	-	-	-	+
DL EKB T1	-	-	+	+	-	-	+	+
DL EKB T2	-	-	+	+	-	-	+	+
DL ALY T1	-	-	-	-	+	+	+	+
DL ALY T2	-	-	-	-	-	+	+	+

Z wyników zaprezentowanych na rys. 3 można wnioskować, że również w procesie tworzenia toru do załączenia łącza HVDC wymagane jest załączenie dławika szynowego i dławików liniowych (warianty A5, B8) lub ewentualnie tylko dławików liniowych (warianty A4, B7). Wyniki obliczeń dla wariantu C pokazują, że możliwe jest również

podanie do stacji Alytus napięcia pojedynczym torem linii Łomża-Ełk Bis-Alytus. W tym przypadku załączone powinny być również dławiki liniowe i ewentualnie dławik szynowy.



Rys. 3. Poziomy napięć na szynach EKB i ALY, dolina letnia

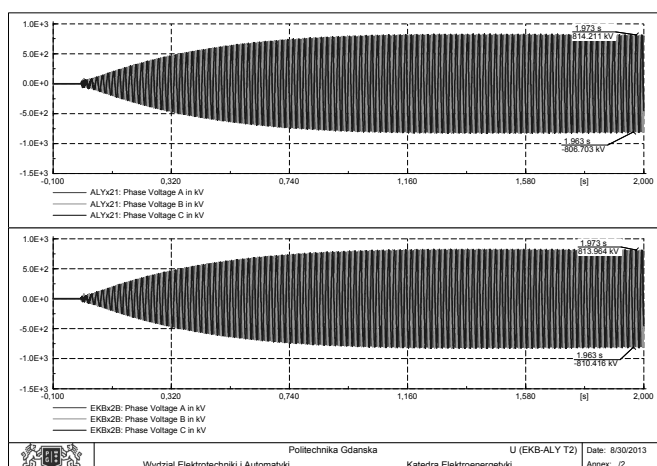
### 3. ZJAWISKA NAPIĘCIOWE PODCZAS PROCESÓW ŁĄCZENIOWYCH

Praca prezentowanego układu związana jest z koniecznością prowadzenia procesów łączeniowych. Wynikają one zarówno z normalnych procedur ruchowych jak również mogą być wynikiem powstałego w linii zakłócenia, np. zwarcia.

Dławiki liniowe mogą pracować z różnie skonfigurowanym punktem neutralnym (PN): izolowanym, uziemionym bezpośrednio lub uziemionym przez dławik uziemiający (NGR). Przyjęcie danego rozwiązania wpływa na zjawiska napięciowe obserwowane podczas procesów łączeniowych w linii. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki dla różnych rozwiązań pracy punktu neutralnego dławików podczas procesów łączeniowych.

#### 3.1. Symetryczne załączanie jednostronne jednego toru linii

Załączenie jednostronne trójfazowe (symetryczne) jednego toru linii EKB-ALY w EKB (drugi tor pozostaje wyłączony), jest dopuszczalne dla dowolnej konfiguracji dławików w torze załączanym.



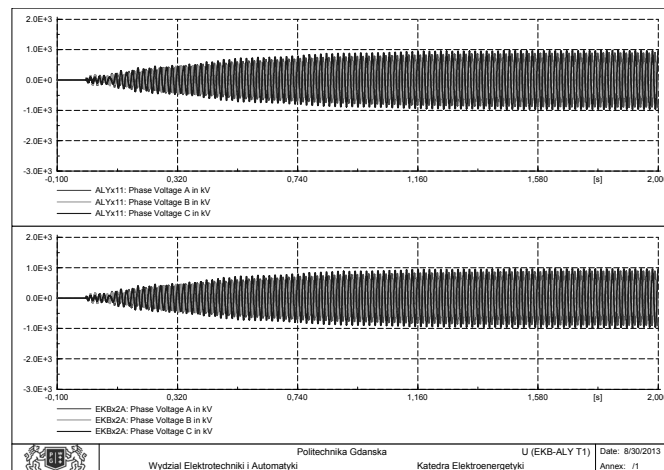
Rys. 4. Napięcia fazowe na końcach wyłączzonego toru II linii EKB-ALY

W tym przypadku w drugim torze dławiki liniowe muszą być wyłączone lub załączony może być tylko jeden dławik liniowy z PN uziemionym za pomocą dławika NGR. Pozostawienie wyłączzonego toru linii z załączonymi dwoma dławikami liniowymi o mocy 50 Mvar prowadzi do rezonansu i dużych poziomów napięcia w tym torze.

Taką sytuację pokazano na rysunku 4, gdzie przebiegi odpowiadają sytuacji, w której wszystkie dławiki są załączone, dławik szynowy i dławiki liniowe po stronie stacji Ełk Bis mają punkt neutralny uziemiony bezpośrednio, a dławiki liniowe po stronie stacji Alytus uziemione są przez dławik NGR. Przyczyną takiego stanu (rezonansu) jest zaprojektowanie dławików do pełnej kompensacji mocy biernej linii.

#### 3.2. Niesymetryczne załączanie jednostronne drugiego toru linii

Wyższe poziomy napięć niż w przypadkach pracy linii EKB-ALY z dwoma załączonymi torami pojawiają się w przypadkach niesymetrycznych łączy (mających miejsce np. na skutek awarii wyłącznika czy 1-fazowego cyklu SPZ), gdy linia pracuje lub jest załączana do pracy z jednym torem. Przykładowe przebiegi przedstawione na rysunku 5 pokazują, że zastosowanie dławików liniowych o mocy 50 Mvar każdy z PN uziemionym bezpośrednio (tj. bez stosowania dławika uziemiającego NGR w punkcie neutralnym dławika liniowego) w przypadku dwufazowego załączenia/wyłączenia toru linii może skutkować napięciem fazowym w torze wyłączonym przekraczającym 1000 kV w szczycie (w tym przypadku do pracy załączany jest tor II, przy wyłączonym torze I).



Rys. 5. Napięcia fazowe na końcach wyłączzonego toru I linii EKB-ALY

Powyższe analizy wskazują, że pierwotnie zaprojektowany układ, ze względu na duże prawdopodobieństwo pojawienia się rezonansu, nie jest wskazany. Docelowo budowany jest układ, w którym po stronie stacji Ełk Bis zainstalowane są: dławik szynowy oraz dwa dławiki liniowe (po jednym na każdy tor) o mocy 50 Mvar każdy, z uziemionym bezpośrednio punktem neutralnym. Z kolei po stronie stacji Alytus zainstalowane są dwa dławiki liniowe (po jednym na każdy tor) o mocy 72 Mvar każdy z punktem neutralnym uziemionym przez dławik gaszący.

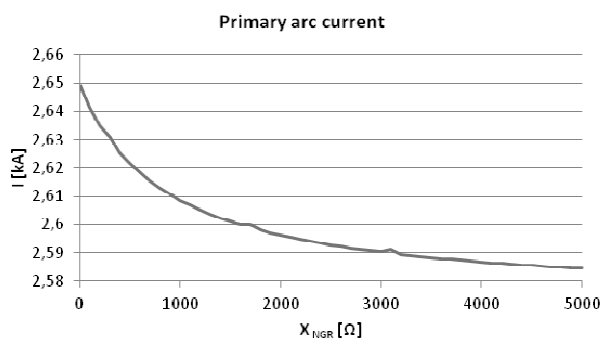
#### 3.3. Dobór dławika uziemiającego

Moc dławika uziemiającego ma relatywnie niewielki wpływ na napięcia w normalnych (symetrycznych) stanach pracy układu, co wynika ze względnie małej niesymetrii obwodu wprowadzanej przez linię elektroenergetyczną EKB-ALY. Wpływ dławika widoczny jest podczas zakłóceń niesymetrycznych [5]. Wpływa on między innymi na:

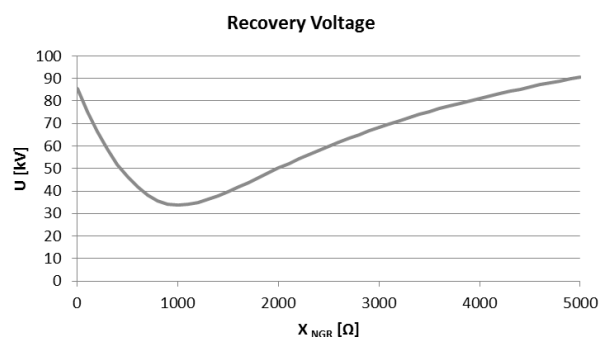
- prąd zwarcia jednofazowego w chwili początkowej zwarcia (*primary arc current*) i po wyłączeniu zwartej fazy (*secondary arc current*);

- napięcie powrotne w miejscu wystąpienia zwarcia, po zgaszeniu łuku wtórnego (*recovery voltage*).

Wyniki zaprezentowane na rysunkach 6–8 pokazują wpływ wartości reaktancji dławika uziemiającego na powyższe wielkości. Założono tu niemetaliczne zwarcie i przyjęto, że rezystancja przejścia (łuku) wynosi 50 Ω.



Rys. 6. Początkowy prąd zwarcia jednofazowego w linii EKB-ALY (*primary arc current*)

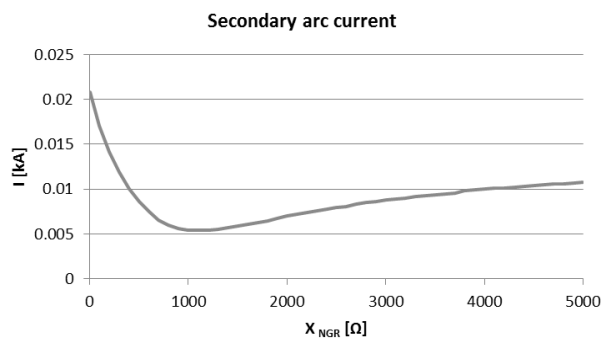


Rys. 7. Napięcie w miejscu zwarcia po jego przeminięciu (*recovery voltage*)

Jak wynika z rysunku 6 wpływ dławika gaszącego na wartość początkową prądu zwarcia jednofazowego jest nieznaczny. O wartości prądu zwarcia decydują głównie impedancje dla składowej zerowej linii, transformatorów i autotransformatorów, znacząco mniejsze od impedancji dławika gaszącego. Większy jest wpływ dławika gaszącego na prąd łuku wtórnego, płynący w miejscu zwarcia po wyłączeniu zwartej fazy (przy założeniu 1-fazowego SPZ), co przedstawiono na rysunku 8, oraz na wartość napięcia powrotnego w miejscu zwarcia (rys. 7).

Minimalną wartość prądu łuku wtórnego (rzędu 5 A) uzyskuje się tu dla impedancji dławika gaszącego równej około 1000 Ω, co stanowi około 30% impedancji dławika liniowego w stacji Alytus (72 Mvar). Również dla tej wartości impedancji dławika gaszącego uzyskuje się najmniejsze wartości

ści napięcia powrotnego (tj. równe około 35 kV). Takie warunki pozwalają na przeprowadzenie skutecznego cyklu 1-fazowego SPZ [5].



Rys. 8. Prąd zwarcia jednofazowego po wyłączeniu jednofazowym obustronnym linii (*secondary arc current*)

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Problematyka kompensacji mocy biernej generowanej przez linie wysokiego napięcia 400 kV z wykorzystaniem dławików bocznikowych jest dla krajowej energetyki nowym wyzwaniem. Aktualnie budowane jest pierwsze tego typu rozwiązanie w Polsce. Jak wynika z powyższych rozważań tego typu układy każdorazowo wymagają analizy, która pozwoli dobrać układ odpowiedni do danego miejsca w systemie elektroenergetycznym. Podstawowym zagrożeniem są tu: nadmiernie wysokie poziomy napięć wynikające ze sprzężeń, rezonansów, niesymetrii łączy, a także zagrożenie niezgaszeniem się łuku wtórnego w przypadku zwarcia jednofazowego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Lubośny Z., Klucznik J., Dobrzyński K.: Analiza techniczna pracy dławików kompensacyjnych projektowanej stacji 400/110 kV Elk Bis, raport dla Elfeko S.A., Gdańsk 2013
2. Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Kowalak R., Lubośny Z., Małkowski R.: Case studies of resonance phenomena in high voltage overhead power lines with shunt reactors, The Sixteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2014, Francja 2014
3. M.V. Escudero, M. Redfern: Effects of Transmission Line Construction on Resonance in Shunt Compensated EHV Lines, IPST, Montreal, Canada, 2005, Paper No IPST05-109
4. S. Robak, J. Wasilewski: Analiza asymetrii napięć i prądów w układzie sieci elektroenergetycznego połączenia Polska – Litwa, Energetyka, vol. XXII, 2012
5. Klucznik J., Lubosny Z., Dobrzynski K., Czapp S.: Nonlinear secondary arc model use for evaluation of single pole auto-reclosing effectiveness, COMPEL, vol. 34, no. 4, 2015, w druku

### REACTIV POWER COMPENSATION OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE HV PROBLEMS

The authors present results of selection analysis of shunt reactors for HV new overhead transmission line Elk Bis-Alytus. The analysis takes into account the various operating states. Shown results for steady-state, switching and short-circuit.

**Keywords:** reactive power compensation, overhead transmission line, shunt reactor