

## WYBRANE PROBLEMY DOBORU ZABEZPIECZEŃ DŁAWIKÓW KOMPENSACYJNYCH PRACUJĄCYCH W SIECIACH NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ

Jacek KLUCZNIK, Zbigniew LUBOŚNY, Krzysztof DOBRZYŃSKI

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

tel.: 58 347 1641; e-mail: zbigniew.lubosny@pg.gda.pl;

tel.: 58 347 1798; e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono trudności jakie napotyka się podczas projektowania systemu zabezpieczeń dla dławików przyłączanych bezpośrednio do sieci najwyższych napięć (NN). Referat, bazując na przykładzie budowanej aktualnie stacji 400 kV Ełk Bis, pokazuje, że możliwości zabezpieczenia dławika, oparte na układach EAZ wykorzystujących pomiary sygnałów elektrycznych z przekładników prądowych i napięciowych mają swoje ograniczenia i w pewnych przypadkach mogą być niewystarczające

**Słowa kluczowe:** dławiki kompensacyjne, elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, kompensacja mocy biernej.

### 1. WSTĘP

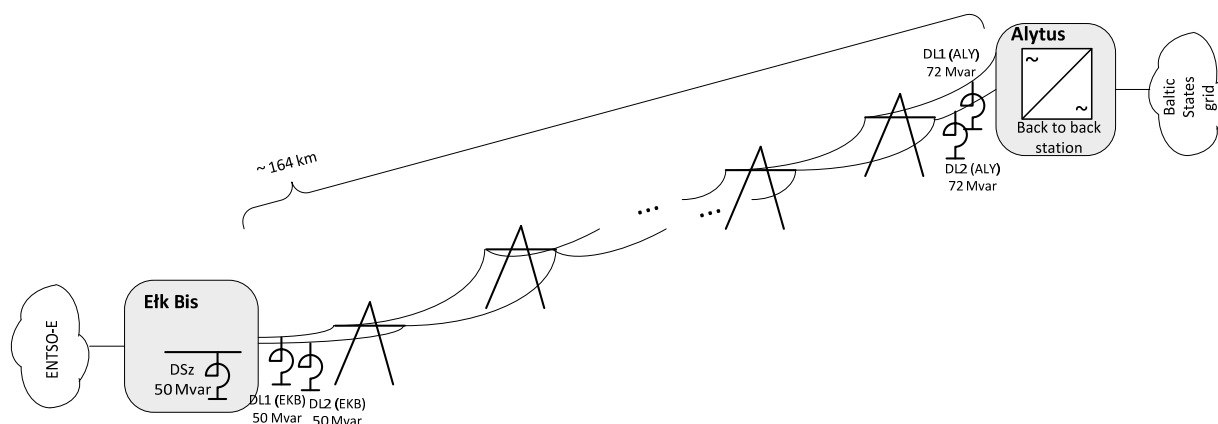
Instalowanie dławików najwyższych napięć (NN) do kompensacji mocy biernej sięga lat 70 XX wieku, kiedy to dla dłuższych linii NN zauważono konieczność kompensacji mocy biernej. Obecnie, na świecie, dławiki stosowane są dość powszechnie zarówno w liniach napowietrznych jak i w liniach kablowych. W Polsce dławiki przyłączane bezpośrednio do sieci NN są nowością, a instalacja trzech dławików o napięciu znamionowym 400 kV w stacji Ełk Bis jest dla krajowego systemu pionierska.

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). Połączenie to realizowane jest z wykorzystaniem układu przekształtnikowego back-to-back znajdującego się w stacji Alytus na terenie Litwy.

Analizy pracy tej linii wykazały, że konieczne jest zastosowanie czterech dławików liniowych (DL) zainstalowanych na dwóch końcach linii (Rys. 1) o mocach 50 Mvar po stronie stacji Ełk Bis i 72 Mvar po stronie stacji Alytus. Oprócz dławików przyłączonych bezpośrednio do linii, w stacji Ełk Bis zainstalowany zostanie dodatkowy dławik szynowy (DSz) o mocy 50 Mvar. Opisany układ przesyłowy ma zapewniać przepływ mocy czynnej na poziomie  $\pm 500$  MW w pierwszym etapie pracy, a w przyszłości planowane jest przesyłanie mocy na poziomie  $\pm 1000$  MW. Zastosowanie dławików kompensacyjnych wiąże się z koniecznością ich odpowiedniego zabezpieczenia oraz doboru nastawień tych zabezpieczeń. Dobór zestawu zabezpieczeń w głównej mierze wynika z zagrożeń w pracy dławika, do których należy zaliczyć:

- uszkodzenia izolatorów i zwarcia wewnętrzne do kadzi;
- zwarcia wewnętrzne międzyzwojowe;
- zakłócenia technologiczne (niski poziom oleju, zakłócenia w układzie chłodzenia, wzrost temperatury itp.).

Do ochrony od skutków powyższych zjawisk stosuje się różne typy zabezpieczeń, obejmujące zarówno zabezpieczenia elektryczne (bazujące na pomiarze prądów i/lub napięć) jak i nieelektryczne (np. pomiar ciśnienia czy temperatury). Dobierając system zabezpieczeń dla dławika należy brać pod uwagę zakłócenia występujące w dławiku, ale także należy mieć na uwadze zakłócenie zewnętrzne (poza dławikiem) oraz zakłócenia systemowe, które mogą wpływać na pracę dławika.



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

## 2. ROZWIĄZANIA STOSOWANE NA ŚWIECIE PRZY ZABEZPIECZANIU DŁAWIKÓW BOCZNIKOWYCH

Autorzy raportu [2] zauważają różnice w sposobie zabezpieczania dławików przyłączonych bezpośrednio do szyn stacji (nazywanych dalej dławikami szynowymi) i dławików przyłączonych do linii (nazywanych dalej dławikami liniowymi). Zgodnie z ankietą przeprowadzoną przez zespół przygotowujący raport, najczęściej stosowanymi zabezpieczeniami dławików szynowych są:

- zabezpieczenie różnicowe (fazowe) (87R);
- zabezpieczenie różnicowe obejmujące punkt neutralny dławika (87N);
- zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne (50);
- zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne (51);
- zabezpieczenie nadprądowe ziemnozwarciowe zwłoczne (51N);
- zabezpieczenie odległościowe (21);
- zabezpieczenie ziemnozwarciowe (pomiędzy kadzią, a ziemią);
- zabezpieczenie od uszkodzenia wyłącznika (51BF);
- zabezpieczenia do zwarć międzyzwojowych (różne rozwiązania);
- zabezpieczenie od niepełnofazowego otwarcia wyłącznika;
- zabezpieczenie Buchholz'a, zabezpieczenie od nagłego wzrostu ciśnienia (63).

W przytaczanym dokumencie nie podano typowych rozwiązań dla dławików liniowych. Można założyć, że proponowane rozwiązania są takie same jak dla dławików szynowych. Jedyne różnice mogą wynikać ze sposobu przyłączenia dławików do linii i sposobu sterowania wyłącznikami. Najważniejsze różnice w podejściu do zabezpieczenia dławików liniowych w porównaniu do dławików szynowych mogą wynikać z następujących przyczyn:

- często wymagane jest stosowanie telezabezpieczeń (komunikacja z wyłącznikami na drugim końcu linii), uzależnione od sposobu przyłączenia dławika;
- na działanie zabezpieczeń mogą mieć wpływ oscylacje powstające po wyłączeniu linii (oscylacje występują w układzie LC pomiędzy indukcyjnością dławików a pojemnością linii);
- często, w celu ograniczenia prądu łuku wtórnego i napięcia powrotnego, stosuje się dodatkowy dławik gaszący wymagający stosowania osobnych zabezpieczeń.

Z kolei dokument przygotowany przez IEEE [3] daje dużo ogólniejsze zalecenia i informacje dotyczące zabezpieczania dławików. Porównanie zaleceń IEEE i CIGRE przedstawiono w tablicy 1.

## 3. PRZYJĘTA KONCEPCJA DLA ZABEZPIECZENIA DŁAWIKÓW W STACJI ELK BIS

W stacji Elk Bis dla zabezpieczenia dławików liniowych i dławika szynowego przyjęto taki sam zestaw zabezpieczeń elektrycznych, w którego skład wchodzi:

- a) zabezpieczenia główne:
- pierwsze zabezpieczenie różnicowe typu 7UT63 firmy Siemens realizujące funkcje: różnicową (87R), różnicową ziemnozwarciową (87N) oraz nadprądową składową przeciwną (46) (zabezpieczenie od zwarć międzyzwojowych);

- zabezpieczenie ziemnozwarciowe kierunkowe typu 7SJ64 firmy Siemens, realizujące funkcję nadprądową ziemnozwarciową kierunkową (67N);
- b) zabezpieczenia rezerwowe:
- drugie zabezpieczenie różnicowe typu P633 firmy Schneider Electric, realizujące funkcję różnicową (87);
  - zabezpieczenie nadprądowe typu 7SJ64 firmy Siemens, realizujące funkcje: nadprądową bezzwłoczną (50) oraz nadprądową zwłoczną (51DT);
- c) zabezpieczenia dodatkowe:
- zabezpieczenie nadprądowe w punkcie zerowym typu 7SJ64 firmy Siemens, realizujące funkcje: nadprądową zwłoczną (51N), nadprądową kierunkową składową przeciwną (67Q).

Ponadto każdy z dławików wyposażony jest w zabezpieczenia technologiczne, do których należy zaliczyć:

- przełącznik Bucholtza (dwustopniowy);
- dwa zawory ciśnieniowe;
- zawór odcinający kłapowy;
- czujnik poziomu oleju;
- czujnik temperatury oleju;
- czujnik temperatury uzwojenia (model cieplny).

Tablica 1 Porównanie proponowanych zabezpieczeń z zaleceniami IEEE i CIGRE.

Zestaw zabezpieczający	Symbol ANSI	Zalecenia CIGRE	Zalecenia IEEE
Podstawowe	87R	tak	tak
	87N	tak	tak
	46	nie	tak
	67N	nie*	tak
	Techn.	tak	tak
Rezerwowe	50	tak	tak
	51DT	tak	tak
	87R	tak	tak
Dodatkowe	51N/67Q	nie	tak

\* CIGRE zaleca stosowanie zabezpieczenia bezkierunkowego 51N.

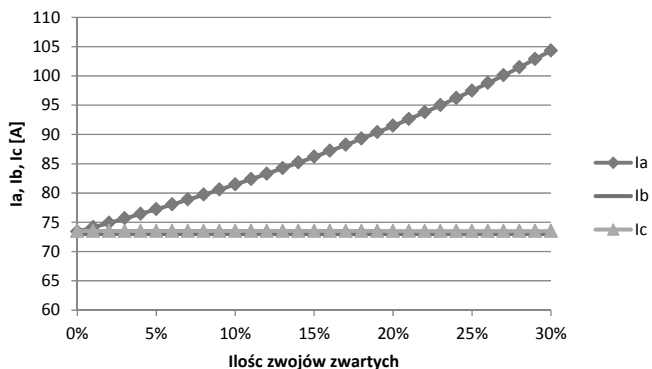
## 4. PROBLEMATYKA DETEKCJI ZWARĆ MIĘDYZWOJOWYCH

Poniżej zamieszczono rozważania dotyczące detekcji zwarć międzyzwojowych. Autorzy wybrali to zagadnienie z uwagi na dużą trudność w wykrywaniu tego typu zwarć w dławikach.

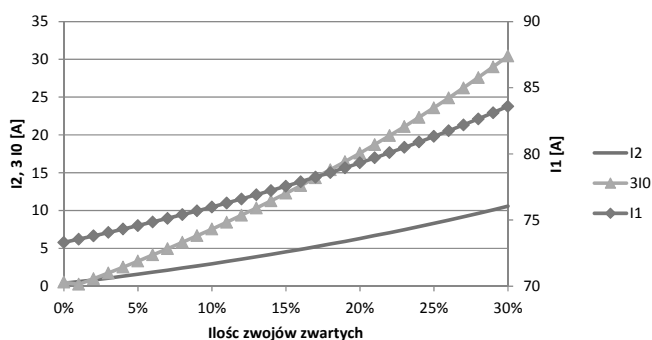
Analizy przeprowadzone przez autorów wskazują, że lokalizacja pierwszego uszkodzonego zwoju nie ma wpływu na wartości napięć i prądów w układzie, a tym samym nie ma wpływu na czułość zabezpieczeń od zwarć międzyzwojowych. Czułość ta będzie zależała jedynie od liczby zwartych zwojów.

Wpływ liczby zwojów zwartych na charakterystyczne wielkości przedstawiono na rysunkach 3 ÷ 6. W analizie ograniczono się do przedstawienia charakterystyk uzyskanych dla zakresu zwojów zwartych od 0 (co opowiada normalnemu stanowi pracy, tj. bez zwarcia) do 30% liczby wszystkich zwojów, ze skokiem równym 1%. Nie pokazano wyników obliczeń dla większej liczby zwojów zwartych, zakładając, że jest to mało prawdopodobne, a jednocześnie utrudniające analizę czułości zabezpieczeń dla małej liczby zwojów zwartych. Rysunki przedstawiają stan dla uszkodzenia, gdzie pierwszy zwarty zwoj jest ulokowany w 20%

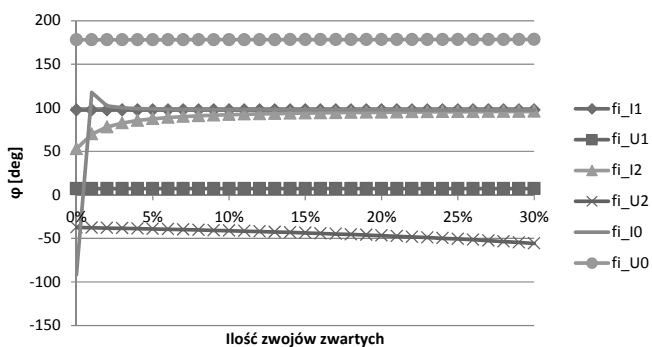
długości uzwojenia dławika (licząc od strony izolatorów WN, w fazie A). Rysunki przedstawiają wielkości obserwowane dla dławika uszkodzonego, dając możliwość wnioskowania na temat sygnałów jakie można wykorzystać podczas wykrywania zwarć międzyzwojowych.



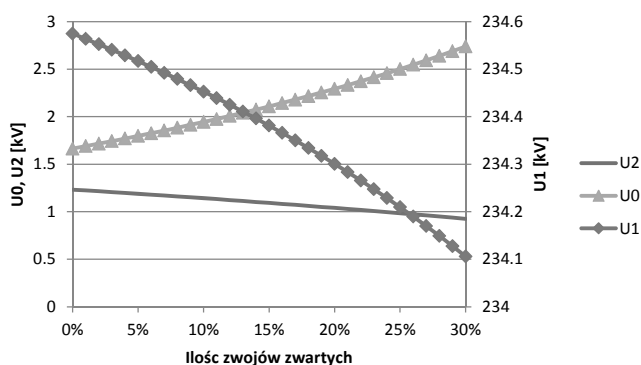
Rys. 3. Wartości prądów fazowych w uszkodzonym dławiku dla zwarcia międzyzwojowego w fazie A



Rys. 4. Wartości prądów składowych symetrycznych w uszkodzonym dławiku dla zwarcia międzyzwojowego w fazie A



Rys. 5. Wartości kątów fazowych składowych symetrycznych uszkodzonego dławika dla zwarcia międzyzwojowego w fazie A



Rys. 6. Wartości napięć składowych symetrycznych na szynach stacji dla zwarcia międzyzwojowego w dławiku, w fazie A

Analiza powyższych rysunków prowadzi do następujących obserwacji:

- Podczas zwarcia międzyzwojowego obserwuje się wzrost prądu płynącego w jednej fazie. Wzrost ten jest niewielki w stosunku do prądu znamionowego. Przedstawiona na rysunku 3 krzywa pokazuje, że zwarcie obejmujące 10% zwojów prowadzi do wzrostu prądu o około 10 A, tj. o około 14% prądu znamionowego dławika. Potencjalnie pozwala to na wykrycie zwarcia międzyzwojowego, ale w przypadku małej liczby zwojów zwartych zwarcie zostanie niezauważone. Szacuje się, że zabezpieczenie ma możliwość wykrywania zwarć międzyzwojowych od powyżej 10% zwojów zwartych;
- Występuje relatywnie silny związek pomiędzy liczbą zwojów zwartych, a wartościami składowych symetrycznych prądu. Przedstawione na rysunku 4 krzywe pokazują, że np. zwarcie obejmujące 5% zwojów prowadzi do wzrostu prądu składowej zerowej do około 3 A (wartość 6 krotnie większa niż w stanie normalnej pracy). Dla zwarcia obejmującego 2% zwojów, wzrost tego prądu jest dwukrotny w stosunku do wartości w normalnym stanie pracy. Kryterium oparte o pomiar składowej zerowej prądu nie umożliwia co prawda wykrywania zwarć pojedynczych zwojów, ale daje możliwość wykrywania zwarć międzyzwojowych od 2% zwojów zwartych. Wadami tego rozwiązania jest trudność w pomiarze małych prądów składowej zerowej przy stosowaniu typowych przekładników prądowych (gdzie prądy znamionowe przekładnika są znacznie większe od znamionowych prądów dławika). Ponadto, przy wykorzystaniu takiego rozwiązania, konieczne jest wprowadzanie zwłoki czasowej w celu odstrojenia się od zwarć zewnętrznych poza dławikiem, podczas których składowa zerowa będzie osiągać znaczne wartości;
- Wyraźny wpływ zwarcia międzyzwojowego widoczny jest również w kierunku przepływu składowej zerowej prądu (rys. 5). Tym niemniej zastosowanie w tym przypadku kryterium nadprądowego składowej zerowej prądu z blokadą kierunkową również nie pozwala na wykrywanie zwarć pojedynczych zwojów. Problemem jest również (poza wspomnianym wcześniej problemem pomiaru małych prądów) uzyskanie odpowiedniej wartości składowej napięcia do polaryzacji członu kierunkowego zabezpieczenia. Wartości napięć składowej zerowej czy składowej przeciwnej w trakcie zwarć międzyzwojowych mogą być tu niewystarczające (rys. 6).

Uzyskane wyniki potwierdzają, prezentowany w rekomendacjach CIGRE i IEEE, fakt trudności wykrywania zwarć zwojowych w dławiku metodami elektrycznymi tj. wykorzystującymi pomiary prądów i napięć. Żadna ze wskazywanych metod nie jest w stanie wykryć zwarć na poziomie pojedynczego zwoju. Potencjalnie najlepsza z analizowanych metod, wykorzystująca kryterium nadprądowe z blokadą kierunkową, pozwala na wykrycie zwarć na poziomie 1% impedancji dławika, co dla stosowanych dławików oznacza ponad 30 zwojów. Dodatkowo, rodzaj zastosowanych w analizowanym układzie przekładników prądowych i napięciowych (tj. ich przekładnie) oraz ograniczenia nastawień urządzeń EAZ (wynikające np. z rozdzielczości przetworników i dokładności algorytmów obliczeniowo – decyzyjnych) powodują, że w rzeczywistości liczba zwojów nie chronionych będzie znacznie większa. Uzyskane rezultaty i negatywna ocena działania zabezpieczeń od zwarć międzyzwojowych znajdują potwierdzenie w światowych publikacjach i rekomendacjach wskazujących, że wykrywanie

zwarć zwojowych jest trudne i często możliwe do realizacji jedynie zabezpieczeniami technologicznymi.

## 5. PODSUMOWANIE

Podsumowując powyższe rozważania, w ogólności należy stwierdzić, że zaproponowana koncepcja automatyki zabezpieczeniowej dławików kompensacyjnych liniowych i szynowych jest właściwa i kompletna. Koncepcja ta równocześnie wpisuje się w trendy i zalecenia światowe.

Selektywność działania automatyki zabezpieczeniowej dławików kompensacyjnych uzależniona jest od wielu czynników, a w tym od:

- parametrów obiektów (dławików) oraz parametrów i konfiguracji sieci przylegającej do analizowanych obiektów,
- lokalizacji i przekładni znamionowej przekładników zabezpieczeniowych, prądowych i napięciowych
- rodzaju stosowanych przełączników zabezpieczeniowych, w sensie zakresów nastawczych wielkości kryterialnych,
- przewidywanej koncepcji, lub wymagań dotyczących sposobu eliminacji zaburzeń w pracy w przylegających elementach sieci, np. wymagań co do sposobu eliminacji zwarć w liniach elektroenergetycznych i stosowania SPZ 1- lub 3-fazowego.

Podkreślić należy, co równocześnie wynika z rozważań przedstawionych powyżej, że złożoność zjawisk oraz liczba

czynników wpływających na efektywność i pewność działania automatyki zabezpieczeniowej dławików prowadzi do wniosku, że analiza tego typu powinna mieć charakter analizy przypadku i tym samym powinna być prowadzona niezależnie dla każdego obiektu tego typu.

## 6. 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. CIGRE Working Group B5.37, Protection, Monitoring and Control of Shunt Reactors, 2013
3. IEEE Power Engineering Society, IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors, 2007
4. F. K. Basha and M. Thompson, Practical EHV Reactor Protection, 68th Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, USA 2013
5. Z. Gajic, B. Hillström, and F. Mekić, HV Shunt Reactor Secrets for Protection Engineers, 30th Western Protective Relaying Conference, Washington, USA 2003
6. Praca zbiorowa, Zasady doboru i nastawiania zabezpieczeń elementów systemu elektroenergetycznego wysokiego napięcia, PSE S.A., Warszawa 2010
7. Klucznik J., Dobrzyński K., Lubośny Z., Czapp S., Evaluation of Single Pole Auto-Reclosing Effectiveness with Nonlinear Secondary Arc Model, XXIII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, Pilsen, Czech Republic 2014.

## SELECTED PROBLEMS OF SETTING PROTECTION DEVICES FOR HIGH VOLTAGE SHUNT REACTORS

The paper presents the difficulties encountered during the design of protection system for the shunt reactors connected directly to the ultra-high voltage grid (UHV). The paper, based on the example of the currently built 400 kV substation Elk Bis, shows that the possibility of securing of shunt reactors by protection devices using measurements of electrical signals from the voltage and current transformers have their limitations and in some cases may not be sufficient. A large part of the paper is focused on the analysis of inter-turns short circuits which are most difficult disturbances to detect.

**Keywords:** shunt reactors, reactive power compensation, protection systems