

AUTOMATYKA ZABEZPIECZENIOWA LINII NAPOWIETRZNO-KABLOWYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA – ZAGADNIENIA WYBRANE

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące realizacji funkcji zabezpieczeń od skutków zwarć w liniach napowietrzno-kablowych wysokiego napięcia. W rozważaniach uwzględniono dotychczasowe doświadczenia z eksploatacji takich linii, zalecenia zamieszczone w literaturze, a także autorskie badania dotyczące elektromagnetycznych stanów przejściowych podczas zwarć w sieci 110 kV z linią napowietrzno-kablową*.

Słowa kluczowe: elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, linie napowietrzno-kablowe wysokiego napięcia

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach w sieci rozdzielczej wysokiego napięcia wprowadzane są coraz częściej odcinki linii kablowych – na przykład w celu przeprowadzenia ciągu liniowego przez obszar zurbanizowany [1]. Taka inwestycja w sieci WN wymaga rozważenia kwestii skutecznej ochrony kabli od skutków zwarć. Tymczasem w praktyce zagadnienie to jest często upraszczane do tego stopnia, że z punktu widzenia układów EAZ kabel jest niejako pomijany lub traktowany, jako fragment jednorodnej linii napowietrznej. Założenie takie wydaje się być zbyt daleko idącym uproszczeniem, zwłaszcza w kontekście detekcji zwarć doziemnych w linii kablowo-napowietrznej, nawet, kiedy długość odcinka kablowego jest niewielka w stosunku do długości części napowietrznej linii.

Kwestia poprawnej detekcji i eliminacji zwarć w kablach jest niezwykle ważna z punktu widzenia ochrony tych linii przed termicznymi skutkami przepływających przez nie prądów zwarciovych. W tym kontekście kluczowe są takie parametry, jak: wartość prądu zwarciovego i czas jego przepływu wynikający z całkowitego czasu eliminacji zwarcia wieloprądowego. Przegrzanie może doprowadzić do uszkodzenia izolacji oraz innych elementów kabla i w efekcie wymaga długotrwałych i kosztownych działań naprawczych. Czas lokalizacji i naprawy uszkodzenia w linii kablowej oraz poniesione koszty są wielokrotnie większe niż w przypadku linii napowietrznej [4]. Uszkodzenia powstałe w wyniku zwarcia zależą od wielu czynników, m.in. od konstrukcji kabla oraz od lokalizacji, rodzaju i czasu trwania zwarcia. Na przykład zwarcia w kablach typu rurowego mogą prowadzić do częściowego stopienia osłony rurowej przez łuk zwarciovowy nawet przy stosunkowo szybkiej eliminacji zwarcia przez zabezpieczenie, a z kolei duże siły dynamiczne wywołane przepływem prądu zwarciovego mogą prowadzić do zerwania połączeń spawanych, co w konsekwencji może doprowadzić do poważnych uszkodzeń, w tym np. wycieku oleju lub gazu, który bywa stosowany w tego typu konstrukcjach, jako dodatkowy czynnik izolacyjny. Powstałe uszkodzenie w tym jego wpływ na otoczenie, ale także wpływ środowiska (np. zalanie kabla wodą gruntową) dodatkowo pogłębia negatywne skutki zwarcia i wydłuża czas usuwania awarii. Z wymienionych względów kwestii szybko działających zabezpieczeń zwarciovych linii kablowych należy poświęcać szczególną uwagę.

* Niniejszy artykuł stanowi poglądowe wprowadzenie do tematu (por. także [8]). Zagadnienia szczegółowe są przedmiotem dalszych rozpatrywań i publikacji autora.

3. Wybrane kryteria wykrywania zwarć w kablach WN

W literaturze (m.in. [4]) podkreśla się, że istotny problem doboru i parametryzacji zabezpieczeń zwarciovych podziemnego kabla wysokiego napięcia stanowi znaczna wartość prądu ładowania, która może być porównywalna z prądem obciążenia. Dotyczy to jednak przede wszystkim długich połączeń kablowych. W takim przypadku możliwości doboru odpowiednio czułego nastawienia zabezpieczenia nadprądowego są mocno ograniczone. Ponadto czynności łączeniowe w obwodzie kabla powodują występowanie znacznych wartości składowych przejściowych w prądach. Częstotliwości i amplitudy tych składowych zależą nie tylko od pojemności, indukcyjności i rezystancji łączonego obwodu, ale także od właściwości wyłącznika. Podobnie, znaczne prądy przejściowe przepływają przez kabel podczas zwarć zewnętrznych. Zjawiska te oraz towarzyszące im amplitudy i częstotliwości składowych przejściowych należy uwzględnić przy parametryzacji zabezpieczeń.

Większość zwarć w kablu ma charakter trwałe, niezależnie od szybkości działania zabezpieczeń eliminacyjnych. Dokonywanie próby trwałości zwarcia (np. za pomocą automatyki SPZ) jest zatem niedopuszczalne, gdyż mogłoby prowadzić do powstania jeszcze większych uszkodzeń. Ponieważ pobudzenie zabezpieczenia w obwodzie z kablem może być spowodowane przez przeskok na elementach krańcowych, ważne jest właściwe zidentyfikowanie wszystkich urządzeń znajdujących się w strefie chronionej.

Jak wspomniano w większości przypadków dla kabli stosuje się analogiczne układy zabezpieczeń jak dla linii napowietrznych. Wobec tego najczęściej, zabezpieczeniem podstawowym jest zabezpieczenie wykorzystujące kryterium odległościowe. Należy jednak pamiętać o fundamentalnych różnicach w charakterystykach technicznych (w szczególności elektrycznych) obu rozwiązań linii. Przy wyborze wariantu zabezpieczenia szczególną uwagę należy zwrócić na możliwości związane z zastosowaniem zabezpieczeń łączowych, do których należą zabezpieczenia wykorzystujące kryteria: różnicowo-prądowe, porównawczo-fazowe, i porównawczo-kierunkowe, a także rozmaite warianty łączowe zabezpieczenia odległościowego [6, 7].

Podstawowym kryterium wykrywania zwarć w liniach wysokich i najwyższych napięć jest kryterium odległościowe. Zastosowanie kryterium odległościowego do ochrony linii kablowej od skutków zwarć wymaga dobrej znajomości jej parametrów elektrycznych oraz możliwości i ograniczeń danego rozwiązania zabezpieczenia. Impedancja pętli zwarciowej jest wielkością, której wartości istotnie różnią się dla podziemnej linii kablowej i linii napowietrznej o zbliżonej długości. Wartość impedancji (zarówno dla składowej zgodnej jak i zerowej) dla kabla jest zazwyczaj mniejsza ze względu na znacznie mniejsze odstępki między przewodami fazowymi. Zatem w pewnych przypadkach impedancja ta może być nawet mniejsza od minimalnej wartości nastawialnej w zabezpieczeniu.

Droga przepływu prądu ziemnozwarciowego zależy od wielu czynników, które wpływają na wartości impedancji zastępczych kabla. Z uwagi na to, że praktycznie wszystkie zwarcia w kablach jedнопроводowych są zvarciami z udziałem ziemi, sprawą kluczową staje się nastawienie modułów ziemnozwarciowych zabezpieczeń odległościowych dla osiągnięcia poprawnej detekcji zwarcia.

Impedancję pętli ziemnozwarciowej mierzoną przez zabezpieczenie można zapisać wzorem [11]:

$$\underline{Z}_{f-E} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{I}_f - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E}, \quad (1)$$

w którym: \underline{U}_f – napięcie fazowe,

\underline{I}_E – prąd resztkowy,

\underline{k}_E – współczynnik kompensacji prądowej dla składowej zerowej.

Napięcie fazowe można opisać równaniem dla pętli zwarciowej:

$$\underline{U}_f = \underline{I}_f \cdot \underline{Z}_{z1} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_{zE} = \underline{Z}_{z1} \left(\underline{I}_f - \frac{\underline{Z}_{zE}}{\underline{Z}_{z1}} \cdot \underline{I}_E \right), \quad (2)$$

gdzie: \underline{Z}_{z1} – impedancja pętli zwarciowej dla składowej zgodnej, \underline{Z}_{zE} – impedancja pętli zwarciowej dla składowej zerowej, które można zapisać zależnościami:

$$\underline{Z}_{z1} = \underline{Z}_{1L} = R_{1L} + jX_{1L}, \quad (3a)$$

$$\underline{Z}_{zE} = \underline{Z}_{1E} = \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}}{3}. \quad (3b)$$

Wyrażenie na impedancję mierzoną przez zabezpieczenie przyjmie zatem postać:

$$\underline{Z}_{f-E} = R_{f-E} + jX_{f-E} = \underline{Z}_{z1} \frac{\left(\underline{I}_f - \frac{\underline{Z}_{zE}}{\underline{Z}_{z1}} \cdot \underline{I}_E \right)}{\underline{I}_f - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E}. \quad (4)$$

Z wyrażenia (4) widać, że impedancja pętli zwarciowej (a także odległość do miejsca zwarcia) jest poprawnie mierzona (tzn. odpowiada impedancji linii dla składowej zgodnej), jeżeli zostanie właściwie wyznaczony współczynnik kompensacji prądowej:

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{Z}_{zE}}{\underline{Z}_{z1}} = \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}}{3 \cdot \underline{Z}_{1L}}, \quad (5)$$

Równania 1 ÷ 5 są podstawą do wyznaczania odległości do miejsca zwarcia doziemnego w tzw. konwencjonalnych zabezpieczeniach odległościowych. Przy obliczaniu współczynnika \underline{k}_E powinno się uwzględniać wszystkie składowe impedancje pętli zwarciowej, bowiem od ich dokładnego odwzorowania, a następnie nastawienia właściwej wartości \underline{k}_E zależy poprawne (w szczególności szybkie i selektywne) działanie zabezpieczenia.

Należy zwrócić uwagę, że dla linii napowietrznych impedancje \underline{Z}_{1L} i \underline{Z}_{0L} są proporcjonalne do odległości. Jednakże taka zależność nie zawsze jest spełniona dla linii kablowej, dla której impedancja składowej zerowej może być nieliniową funkcją odległości [4, 9]. Wartość współczynnika kompensacji \underline{k}_E dla kabli o połączeniach typu *Solid-Bonded* (układ *Both-ends*, tzn. z uziemieniem dwustronnym) i *Cross-Bonded* (układ CB, tzn. z krzyżowaniem ekranów metalicznych) nie jest stała dla zwarc wewnątrznych i zależy od lokalizacji zwarcia. Wobec tego, że w konwencjonalnych zabezpieczeniach odległościowych zadawana jest stała wartość współczynnika \underline{k}_E impedancja kompensowanej pętli ziemnozwarciowej może mieć charakter nieliniowy, co wpływa znacząco na błąd pomiaru odległości do miejsca zwarcia. Poza tym często stosowanym uproszczeniem jest zadawanie jedynie wartości modułu współczynnika \underline{k}_E . W przypadku linii napowietrznych prowadzi to do niewielkiego błędu pomiaru, który w większości przypadków jest akceptowalny. W przypadku linii kablowych charakter (argument) impedancji dla składowej zgodnej i składowej zerowej jest zupełnie inny, wobec tego takie uproszczenie jest niedopuszczalne.

Zazwyczaj, ze względów praktycznych, doboru nastawień zabezpieczeń odległościowych dla kabla podziemnego, a zwłaszcza dla linii napowietrzno-kablowej, dokonuje się w sposób analogiczny do stosowanego dla linii napowietrznych. Moduły pomiarowe ziemnozwarciowe parametryzuje się w oparciu o składową zgodną impedancji i odpowiednio dobrany współczynnik kompensacji dla składowej zerowej. W efekcie, dla większości przypadków, uzyskuje się poprawną reakcję zabezpieczenia o ile tylko zapewniona jest selektywność dla poszczególnych stref.

Zabezpieczenia cyfrowe bazują na spróbkowanych przebiegach napięć i prądów mierzonych w punkcie zabezpieczeniowym, co daje szerokie możliwości numerycznego przetwarzania wielkości pomiarowych. W większości rozwiązań stosuje się transformację do dziedziny częstotliwości (por. np. [11]), w której wyznacza się składowe impedancji pętli ziemnozwarciowej R_{f-E} i X_{f-E} . Pozwala to na wprowadzenie współczynnika kompensacji w postaci zespolonej lub w postaci wartości względnych R_E/R_L i X_E/X_L . Uwzględnia się także dodatkowe parametry dla skompensowania czynników fałszujących pomiar m.in.: rezystancji przejścia (np. łuku zwarciovego), tzw. podparcia mocowego i wpływu sprzężenia magnetycznego od toru równoległego w liniach wielotorowych [12].

Dobór wartości współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej jest kluczowy ze względu na zasięg i działanie zabezpieczenia odległościowego. Należy, zatem *przyjmować współczynnik kompensacji prądowej w postaci zespolonej*. Jeżeli algorytm zabezpieczenia na to nie pozwala, to można ewentualnie zadać dobraną empirycznie wartość skalarną, która zapewni kompensację przy zwarciach na końcu kabla. Należy także mieć na uwadze strukturę linii, sposób uziemienia, strukturę mieszaną (sekcje napowietrzne i kablowe) itd.

Zabezpieczenia cyfrowe dają użytkownikowi lepsze możliwości w zakresie dokładności pomiaru impedancji pętli zwarciovowej niż ich odpowiedniki statyczne i elektromechaniczne. Możliwe jest m.in. wprowadzenie dowolnej wartości współczynnika (a czasem nawet kilku współczynników) kompensacji prądowej w postaci zespolonej jak również parametryzacja z wykorzystaniem zarówno składowej zerowej jak i składowej przeciwnej prądu. Według [5] parametryzacja z wykorzystaniem składowej przeciwnej jest korzystniejsza dla obwodów z kablem, bowiem obwód zastępczy dla składowej przeciwnej jest bardziej jednorodny niż obwód dla składowej zerowej. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku modułów pomiarowych dla pętli międzyfazowych duża wartość prądu ładowania linii (długie ciągi kablowe) może prowadzić do zwiększenia zasięgu zabezpieczenia.

Reasumując, można stwierdzić, że zabezpieczanie linii kablowych za pomocą zabezpieczeń odległościowych jest zadaniem dosyć trudnym m.in. ze względu na: elektryczne właściwości kabla, wpływ sposobu uziemienia, pętli ziemnopowrotnych, nieliniowego charakteru impedancji mierzonej przez zabezpieczenie, a niekiedy także niewielką długość kabla (zbyt mała impedancja dla nastawienia I-szej strefy). Może to w niektórych przypadkach prowadzić do niepoprawnych działań tego zabezpieczenia [8]. Ze względu na fałszowanie pomiaru przez zabezpieczenie odległościowe alternatywą jest zastosowanie zabezpieczenia odcinkowego, np. różnicowo-prądowego wzdłużnego lub porównawczo-fazowego prądowego. Zabezpieczenie odległościowe może także być realizowane jako łączowe (m.in. w wariantach blokowania lub zdejmowania blokady w tzw. układzie współbieżnym [6], [11]), a także można je zastosować jako zabezpieczenie rezerwowe.

4. Wybrane aspekty realizacji zabezpieczeń łączowych linii napowietrzno-kablowych

Dla linii kablowych o nieznaczej długości najbardziej odpowiednim jest zabezpieczenie różnicowo-prądowe. W takim przypadku stosuje się dwa podstawowe zabezpieczenia różnicowe wykorzystujące różne łącza komunikacyjne (np. światłowodowe i radiowe).

Współczesne zabezpieczenia różnicowo-prądowe uzupełniane są układem funkcji zabezpieczenia odległościowego z opcją komunikacji między tzw. półkompletami zabezpieczenia (z niezależnymi portami dla różnych funkcji zabezpieczeń i sterowania). Użytkownik może zatem zrealizować układ dwóch zabezpieczeń podstawowych opartych na różnych kryteriach. Wydłużone strefy zabezpieczenia odległościowego oraz zabezpieczenie kierunkowe mogą pełnić funkcje rezerwy dla obu podstawowych zabezpieczeń łączowych.

Dzięki łączom można także zrealizować szybko działającą lokalną rezerwę wyłącznikową. Automatyki SPZ się nie stosuje ze względu na trwały charakter zwarć w kablu.

Na rysunku 1 przedstawiono dwa przypadki zastosowania łączowego zabezpieczenia odległościowego do ochrony od skutków zwarć w linii napowietrzno-kablowej.

Układy zabezpieczeń linii napowietrzno-kablowych WN są zazwyczaj podobne do stosowanych w liniach napowietrznych. Jeżeli część napowietrzna jest znacznie dłuższa od kablowej, wówczas dopuszcza się szybki SPZ w części napowietrznej. Najczęściej przyjmuje się, że jeżeli udział części kablowej nie przekracza 25% całkowitej długości linii, automatyka SPZ może być zainstalowana.

Kolejną kwestią jest, czy kabel znajduje się na początku ciągu, czy też jest włączony pomiędzy odcinki napowietrzne. Na rysunku 1a kabel znajduje się na początku ciągu liniowego, a jego długość jest znacznie mniejsza niż części napowietrznej. W tym wypadku proponuje się zastosować dwa bezzwłoczne moduły pomiarowe dla strefy Z1 zabezpieczenia na krańcu odcinka kablowego w celu odróżnienia zwarć w kablu od zwarć w linii napowietrznej, a także w celu blokowania automatyki SPZ przy zwarciach w kablu. Pierwszy moduł bezzwłoczny (Z1-1) można nastawić na 120–150 procent impedancji kabla dla składowej zgodnej. Pobudzenie tego modułu powoduje otwarcie lokalnego wyłącznika i blokowanie związanego z nim SPZ-tu oraz wysłanie impulsów na: otwarcie wyłącznika oraz blokowanie SPZ-tu na krańcu przeciwnym. Moduł pomiarowy dla drugiej strefy bezzwłocznej (Z1-2) od strony kabla nastawia się w sposób typowy dla zasięgu strefy pierwszej, tzn. np. 85 procent wypadkowej impedancji dla składowej zgodnej kabla i linii napowietrznej. Dla zwarć w tej strefie (tzn. (Z1-2), ale nie w strefie (Z1-1)) zabezpieczenie wysyła sygnał na wyłączenie i zezwala na działanie SPZ przy zwarciu jednofazowym zarówno na krańcu przeciwnym jak i od strony kabla. W takim rozwiązaniu (rys. 1a) zabezpieczenie na krańcu przeciwnym do kabla (tzn. na krańcu sekcji napowietrznej) ma tradycyjnie jeden moduł pomiarowy dla strefy pierwszej nastawiany na ok. 85% impedancji dla składowej zgodnej linii napowietrznej. Wykrycie zwarcia w tej strefie powinno spowodować otwarcie lokalnego wyłącznika, wysłanie impulsu na otwarcie wyłącznika na krańcu przeciwnym oraz zezwolenie na aktywowanie szybkiego SPZ. Z kolei dla zwarć w strefie 2 tego zabezpieczenia SPZ nie jest dopuszczalny.

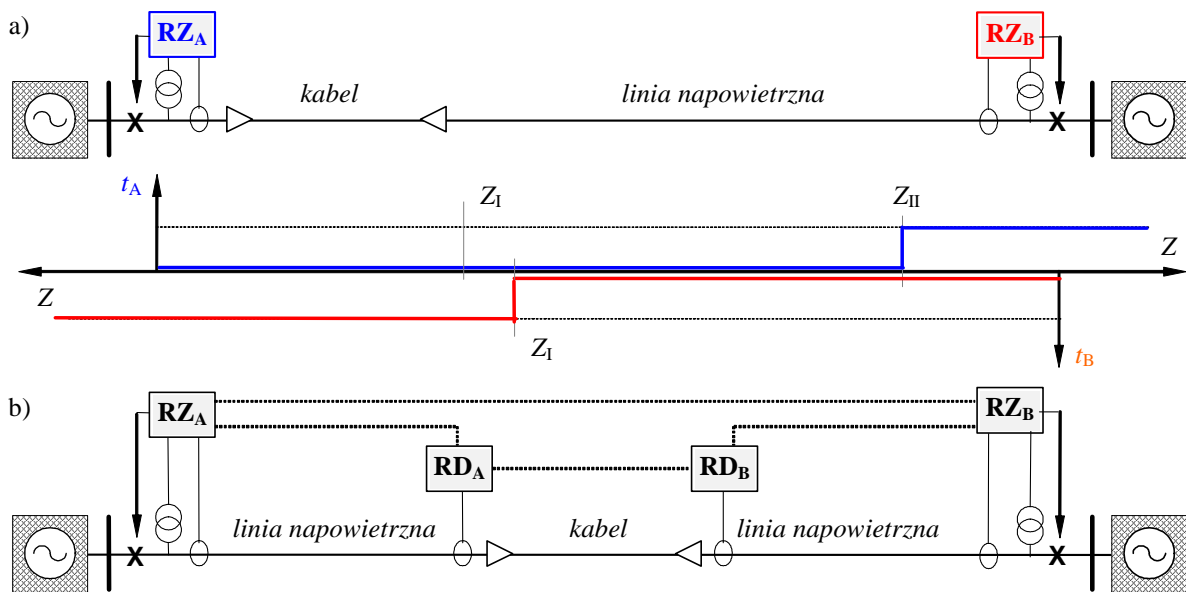
W przypadku linii kablowej włączonej między dwa odcinki napowietrzne (por. rys. 1b) proponuje się odrębne zabezpieczenie kabla za pomocą zabezpieczenia odcinkowego, np. różnicowo-prądowego. W takim rozwiązaniu zwarcie w kablu jest jednoznacznie identyfikowane przez zabezpieczenie różnicowe, które przez łącze komunikacyjne wysyła sygnał blokady dla automatyki SPZ na obu krańcach linii. Jeżeli kabel jest bardzo krótki (np. 300 metrów lub mniej), wówczas zdarza się, że nie jest on w ogóle uwzględniany ze względu na małe prawdopodobieństwo zwarcia w kablu, a zabezpieczenia są konfigurowane jak dla „jednorodnej” linii napowietrznej. Ponadto, w takich przypadkach może być ekonomicznie uzasadnione przewymiarowanie kabla w celu dopuszczenia cyklu SPZ, aczkolwiek dla dłuższych kabli taka sytuacja może być trudna do osiągnięcia z uwagi na ograniczenia wynikające z parametrów termicznych kabla.

6. Uwagi końcowe i rekomendacje

Charakterystyki elektryczne kabli wysokiego napięcia znacząco różnią się od charakterystyk napowietrznych linii przesyłowych. Pomimo tego można odpowiednio chronić podziemne obwody kablowe, zwłaszcza z wykorzystaniem współczesnych zabezpieczeń.

Nie powinno się dopuszczać do sytuacji wydłużenia czasu działania zabezpieczenia np. z uwagi na selektywność. Należy raczej zmierzać do osiągnięcia selektywności EAZ przez zastosowanie zabezpieczeń łączowych, gwarantujących wyłączenie uszkodzonego odcinka

kabla z czasem własnym zabezpieczenia. Zwarcia w kablach powstają zazwyczaj, jako zwarcia doziemne, wobec tego wysoka czułość zabezpieczenia na zwarcia z udziałem ziemi jest kolejnym, ważnym wymaganiami. Ze względów praktycznych kryteria zabezpieczeniowe, które można zastosować do detekcji zwarć w liniach kablowych nie różnią się zasadniczo od kryteriów stosowanych w zabezpieczeniach linii w wykonaniu napowietrznym. Jednakże parametry i topologia obwodów elektrycznych powstałych podczas zwarć w liniach napowietrznych i kablowych są zupełnie inne. Istotną różnicę stanowi sposób uziemienia linii dla obu wariantów wykonania, który należy uwzględnić zwłaszcza przy parametryzacji modułów ziemnozwarciowych EAZ. Dotyczy to w szczególności zabezpieczeń odległościowych. W tym wypadku detekcja zwarcia doziemnego może być utrudniona przez fakt, że całkowita impedancja kabla dla składowej zerowej zależy istotnie od drogi przepływu prądu w ziemi, a ta z kolei jest uzależniona od rozmaitych czynników, m.in. od: miejsca zwarcia, zastosowanych metod i środków połączenia i uziemienia osłon lub ekranów, rezystywności materiału, którym wypełniono wykop kablowy, obecności w pobliżu innych kabli oraz rurociągów (np. wody, gazu). Określenie impedancji pętli zwarciowej powinno uwzględniać sprzężenia magnetyczne pomiędzy prądami płynącymi w przewodach fazowych a także w osłonach kabli. Dobre rozeznanie tej kwestii może zapewnić przeprowadzenie badań symulacyjnych elektromagnetycznych stanów przejściowych, zwłaszcza podczas zwarć doziemnych, z wykorzystaniem modelu matematycznego układu, uwzględniającego istotne parametry linii kablowej i jej otoczenia. Zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych badań.



Rys. 1. Schematy zabezpieczeń łączowych dla dwóch wariantów linii napowietrzno-kablowej:
a) linia kablowa na początku ciągu przesyłowego, b) linia kablowa zainstalowana pomiędzy dwoma odcinkami napowietrznymi

W oparciu o przeprowadzone rozpatrywania, dla linii kablowych i napowietrzno-kablowych zaleca się w szczególności:

- stosować kryteria porównawcze: porównawczo-prądowe (różnicowe), porównawczo-fazowe oraz porównawcze kierunkowe, które mogą wykorzystywać przekładniki impedancyjne (odległościowe) uzupełnione o dodatkowe kryterium składowej przeciwnej pozwalające na zwiększenie czułości zabezpieczenia na zwarcia wysokorezystancyjne w kablu;
- przywiązywać szczególną uwagę do doboru nastawień zabezpieczeń odległościowych dla pętli ziemnozwarciowych, w tym do właściwego doboru współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej (w postaci zespolonej), należy mieć na uwadze, że impedancja dla

składowej zerowej nie jest liniową funkcją odległości i zależy od sposobu łączenia i uziemienia kabli;

- stosować cyfrowe moduły zabezpieczeniowe oferujące m.in. funkcje: porównawczo-prądowe, wielosystemowe odległościowe, kierunkowe, logikę obsługi łącza, komunikację pomiędzy półkompletami zabezpieczenia. Zastosowanie łączy komunikacyjnych istotnie poprawia właściwości układów zabezpieczeń linii, w szczególności ich niezawodność i selektywność.

BIBLIOGRAFIA

1. Duda D., Szadkowski M., Żmuda K.: Aktualne problemy projektowania i eksploatacji linii kablowych 110 kV (głównie miejskich). Wiadomości elektrotechniczne nr 4/2014, s. 22 – 26.
2. Leitloff V., Bourgeat X., Duboc G.: Setting Constrains for Distance Protection on Underground Lines. Developments on Power System Protection. Conference Publication No. 479, IEE 2001, pp. 467-470.
3. Moore P.J., Bo Z.Q., Aggarwal R.K.: Digital distance protection for composite circuit applications. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 152, No. 2/2005, pp. 283 – 290.
4. Tziouvaras D.A.: Protection of High-Voltage AC Cables. Proc. of 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers IEEE, 2006.
5. Vargas J., Guzman A., Roblem J.: “Underground/submarine Cable Protection Using a Negative-Sequence Directional Comparison Scheme”. Proc. Of 26th Annual Protective Relay Conference. 1999.
6. Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych. Wydanie 2, WNT, Warszawa 2004.
7. Witek B.: Algorithms of Phase and Current Comparison Protection for Transmission Lines. European Transactions on Electrical Power Vol.8, No.1, January/February 1998, pp. 51 – 56.
8. Witek B.: Niektóre aspekty realizacji funkcji automatyki zabezpieczeniowej w liniach kablowych i kablowo-napowietrznych wysokiego napięcia. Energetyka nr 5/2016, s. 281-285.
9. Working Group D12 of the Line Protection Subcommittee: Protective Relaying Considerations for Transmission Lines with High Voltage AC Cables. IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997.
10. Working Group B1.30 Technical Brochure Nr 531: Cable Systems Electrical Characteristics. CIGRE, April 2013.
11. Ziegler G.: Numerical Distance Protection. Principles and Applications. Siemens AG, Berlin and Munich 2011.
12. Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, Tom 2 – Automatyka eliminacyjna. WNT, Warszawa 1985.