

## PRZEGLĄD I WYBRANE WYNIKI TESTÓW WSPÓŁCZESNYCH UKŁADÓW KOORDYNACJI DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ODLEGŁOŚCIOWYCH – REFERAT KONFERENCYJNY

Emil BARTOSIEWICZ<sup>1</sup>, Ryszard KOWALIK<sup>1</sup>, Marcin JANUSZEWSKI<sup>1</sup>

1. Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska

**Streszczenie:** Referat przedstawia krótki przegląd układów koordynacji, dostępnych w nowoczesnych zabezpieczeniach odległościowych linii elektroenergetycznych, oraz przykładowe wyniki testów wybranych układów koordynacji wraz z opisem metod testowania. Zaprezentowane zostały także różnice w sprzętowych implementacjach niektórych układów. Funkcje koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych zostały przetestowane na przykładzie urządzeń serii UR firmy GE Multilin. Każdy z dostępnych układów koordynacji został sprawdzony w testach syntetycznych oraz podczas rzeczywistej współpracy urządzeń D60 i D90Plus. Dla układu POTT i przekaźników L90, koordynacja została zrealizowana przy wykorzystaniu różnych rodzajów łącza transmisyjnego.

**Słowa kluczowe:** automatyka zabezpieczeniowa; testowanie zabezpieczeń; sieci SDH.

### 1. WSTĘP

Możliwość rozróżnienia pomiędzy zwarciami wewnętrznymi i zewnętrznymi dla każdej z nastawionych stref działania oraz w każdym z kierunków, wydaje się być główną zaletą zabezpieczeń odległościowych. Jednakże, w przypadku autonomicznej pracy tych przekaźników na każdym z końców chronionej linii, ograniczenie zasięgu strefy bezzwłocznej skutkuje niezdołnością do szybkiego obustronnego jej wyłączenia dla niektórych lokalizacji zwarć wewnętrznych.

Problem związany z wykorzystaniem zabezpieczeń odległościowych do ochrony dwustronnie zasilanej linii przesyłowej zostanie krótko omówiony. Zasięg bezzwłocznej strefy żadnego z przekaźników nie może, ze względu na konieczność zapewnienia selektywności działania, być nastawiony na pokrycie całej chronionej linii. Zasięg pierwszej strefy obejmuje zazwyczaj 80% - 90% jej długości, dla każdego z przekaźników. Wypadkowy obszar objęty szybkim i obustronnym wyłączeniem stanowi zatem 60% - 80%. Oba końcowe fragmenty linii (każdy stanowiący 10% - 20% jej długości) znajdują się już w drugiej strefie działania jednego z przekaźników, a więc zwarcia w nich są wyłączane z pewną zwłoką czasową (typowo 0,2 s do 0,4 s).

Rozwiązaniem problemu ograniczonego zasięgu bezzwłocznej ochrony jest zastosowanie układów koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych, wykorzystujących

łącze telekomunikacyjne oraz dedykowane funkcje dostępne w urządzeniach.

W referacie przedstawione zostaną przykładowe wyniki testów, zrealizowanych w Laboratorium Automatyki Elektroenergetycznej, w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. Ich celem było zbadanie działania rzeczywistych układów koordynacji, zaimplementowanych w urządzeniach zabezpieczeniowych firmy GE Multilin.

Testy zostały przeprowadzone w trzech etapach:

- pierwszym etapem były syntetyczne, zrealizowane w dwóch krokach, testy układów koordynacji dostępnych w urządzeniu D60:
  - system współbieżny bezwarunkowy DUTT (ang. *Direct Under-reaching Transfer Trip*),
  - system współbieżny z przyzwoleniem PUTT (ang. *Permissive Under-reaching Transfer Trip*),
  - system współbieżny z wyłączeniem ze strefy wydłużonej POTT (ang. *Permissive Over-reaching Transfer Trip*) i jego zmodyfikowana wersja (ang. *Hybrid POTT*),
  - system przeciwbieżny z przesyłem sygnału blokowania DCB (ang. *Directional Comparison Blocking*),
  - system przeciwbieżny z przesyłem sygnału odblokowania DCUB (ang. *Directional Comparison Unblocking*);
- drugi etap testów stanowiło badanie rzeczywistej koordynacji pomiędzy urządzeniami D60 i D90Plus, zrealizowanej przy wykorzystaniu wszystkich wymienionych powyżej układów koordynacji oraz bezpośredniego połączenia pomiędzy wejściami i wyjściami dwustanowymi przekaźników;
- trzecim etapem były testy układu POTT koordynacji między dwoma urządzeniami L90, z wykorzystaniem różnych rodzajów łącza telekomunikacyjnego:
  - brak łącza (brak koordynacji – jako odniesienie),
  - bezpośrednie połączenie kablem krosowanym, w standardzie Ethernet/IEC61850,
  - połączenie Ethernet/IEC61850 przez przełączniki,
  - połączenie Ethernet/IEC61850 przez przełączniki i sieć cyfrową SDH (ang. *Synchronous Digital Hierarchy*),
  - bezpośrednie połączenie optyczne w standardzie C37.94,

- o połączenie optyczne (C37.94) przez sieć SDH.

## 2. TYPOWE UKŁADY KOORDYNACJI

Układy koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych można podzielić, pod względem rodzaju sygnałów wymienianych między przekaźnikami, na:

- automatyki typu wyłączającego (ang. *tripping*):
  - o bezpośrednio (ang. *direct*),
  - o z przyzwoleniem (ang. *permissive*);
- automatyki typu blokującego:
  - o blokowania (ang. *blocking*),
  - o odblokowania (ang. *unblocking*).

Systemy koordynacji wykorzystujące transmisję sygnałów wyłączających są także nazywane współbieżnymi, a w przypadku sygnałów blokujących – przeciwbieżnymi. Można wyróżnić pięć podstawowych układów współpracy przekaźników odległościowych:

- system współbieżny bezwarunkowy (DUTT),
- system współbieżny z przyzwoleniem (PUTT),
- system współbieżny z wyłączeniem ze strefy wydłużonej (POTT),
- system przeciwbieżny z przesyłem sygnału blokowania (DCB),
- system przeciwbieżny z przesyłem sygnału odblokowania (DCUB).

Wybór konkretnego systemu koordynacji powinien być uwarunkowany poziomem integracji pomiędzy łączem telekomunikacyjnym a właściwą aparaturą elektroenergetyczną. Automatyki typu blokującego są preferowane, gdy medium transmisyjne stanowi integralną część chronionego odcinka linii, np. dla łącza wysokiej częstotliwości PLC (ang. *Power Line Carrier*). Jest to uzasadnione narażeniem tego rodzaju łącza na zakłócenia, które mogą utrudniać bądź uniemożliwiać transfer sygnałów wyłączających, a w przypadkach skrajnych – doprowadzać nawet do zadziałań zbędnych. W przypadku wydzielonego (odrębnego) medium transmisyjnego, np. łącza światłowodowego, mikrofalowego czy rozległej sieci telekomunikacyjnej SDH ([1]-[4]), awaria bądź zakłócenia w części elektroenergetycznej nie mają zazwyczaj wpływu na wymianę informacji między urządzeniami zabezpieczeniowymi. Bardziej korzystne jest wtedy stosowanie sygnałów typu wyłączającego.

### 2.1. System współbieżny bezwarunkowy - DUTT

Układ ten bazuje na pierwszej (bezwłocznej) strefie działania zabezpieczenia. W chwili wystąpienia zwarcia w tej właśnie strefie przekaźnika lokalnego, generuje on sygnał wyłączenia bądź pobudzenia (w zależności od sposobu implementacji funkcji w danym urządzeniu) i wysyła go na przeciwległy koniec chronionej linii za pomocą łącza telekomunikacyjnego. Zdalny przekaźnik odbiera ten sygnał i bezwarunkowo generuje sygnał na otwarcie wyłącznika.

System współbieżny bezwarunkowy (zwany także układem bezpośredniego wyłączenia) charakteryzuje się niewielką wiarygodnością decyzji wyłączającej, ze względu na brak lokalnej kontroli warunków rozruchu.

### 2.2. System współbieżny z przyzwoleniem - PUTT

W przeciwieństwie do układu DUTT, zdalne wyłączenie nie jest w tym przypadku bezwarunkowe.

Pobudzenie (bądź zadziałanie) przekaźnika lokalnego w strefie I jest wykorzystywane do generowania sygnału wyzwalającego dla zdalnego przekaźnika. Jednakże, wysła-

nie sygnału na otwarcie wyłącznika w stacji odległej uwarunkowane jest spełnieniem dodatkowego wymogu – pobudzenia przekaźnika zdalnego w jednej ze stref „do przodu”.

PUTT jest systemem odpornym na zakłócenia w łączu transmisyjnym. Falszywy zdalny sygnał wyzwalający nie jest uwzględniany przy braku lokalnego odnotowania zwarcia w kierunku „do przodu”.

### 2.3. Wyłączenie ze strefy wydłużonej - POTT

System POTT wykorzystuje strefę drugą (np. w urządzeniach serii UR od GE Multilin [5]-[7]) lub wydłużoną strefę pierwszą (np. w urządzeniach Siemens SIPROTEC [8]) do generowania zdalnego sygnału wyzwalającego, transmitowanego na przeciwległy koniec linii.

Sygnał na otwarcie wyłącznika jest, przez każdy z przekaźników, generowany po spełnieniu dwóch warunków:

- lokalnego pobudzenia w strefie drugiej lub wydłużonej strefie pierwszej,
- otrzymania zdalnego sygnału wyzwalającego z przeciwległej stacji elektroenergetycznej.

Niektóre implementacje sprzętowe automatyki POTT (np. w serii UR od GE Multilin) pozwalają na wykorzystywanie dodatkowych warunków rozruchowych – na przykład pobudzenia od funkcji zabezpieczenia nadprądowego ziemnozwarciowego kierunkowego.

### 2.4. Układ z przesyłem sygnału blokującego - DCB

DCB jest pierwszą z dwóch typowych automatyk typu przeciwbieżnego. Także w tym przypadku, można wyróżnić dwie odmienne implementacje układu:

- rozwiązanie wykorzystujące strefę drugą każdego z przekaźników dla potrzeb realizacji porównania kierunku widzenia miejsca zwarcia (np. urządzenia GE Multilin);
- rozwiązanie wykorzystujące, dla porównania kierunku odnotowania zwarcia, wydłużoną strefę szybką (pierwszą) każdego z przekaźników (np. Siemens).

W przypadku zwarcia zewnętrznego, zabezpieczenie lokalne zostaje pobudzone w strefie wstecznej. Wysyła ono sygnał blokujący na przeciwległy koniec linii. Zostaje on odebrany przez przekaźnik zdalny, który w efekcie nie generuje bezzwłocznego sygnału na otwarcie wyłącznika, pomimo odnotowania zwarcia w kierunku „do przodu”.

W przypadku zwarcia wewnętrznego (widzianego w kierunku „do przodu” przez oba przekaźniki jednocześnie), nie jest transmitowany żaden sygnał. Pozwala to na szybkie wygenerowanie sygnałów wyłączających, niezależnie w każdej ze stacji elektroenergetycznych.

### 2.5. Układ z przesyłem sygnału odblokowania - DCUB

System DCUB może zostać zaimplementowany na dwa różne sposoby, analogiczne jak w przypadku DCB. Jednakże, tym razem przesyłany jest sygnał odblokowujący wyłączenie szybkie.

Pojawienie się zwarcia wewnętrznego w chronionej linii, skutkuje tym razem wygenerowaniem i nadaniem (niezależnie przez każdy z przekaźników) sygnału odblokowania. Odebranie tego sygnału przez przeciwległe zabezpieczenie stanowi dla niego zdalne przyzwolenie na bezzwłoczne otwarcie wyłącznika.

### 3. TESTY SYNTETYCZNE AUTOMATYK WSPÓŁPRACY Z ŁĄCZEM

Syntetyczne badanie automatyk współpracy z łączem, zaimplementowanych w urządzeniu D60, zostało przeprowadzone przy wykorzystaniu testera mikroprocesorowego CMC-156 firmy *OMICRON electronics*, obsługiwanego za pomocą dedykowanego oprogramowania dla komputera klasy PC.

Konfigurację urządzenia D60 [5] i jego funkcji koordynacyjnych zrealizowano poprzez dedykowane oprogramowanie *EnerVista UR Setup*, a jej poprawność została wstępnie zweryfikowana za pomocą wybranych modułów środowiska testowego *Omicron Test Universe*.

Celem tego etapu testów było zweryfikowanie (przy wykorzystaniu wejść i wyjść dwustanowych testera CMC) poprawności generowania i interpretacji, przez urządzenie D60, dedykowanych sygnałów automatyk współpracy z łączem, dla każdego dostępnego sposobu kodowania (1-, 2- lub 4-bitowego) oraz dla każdego rodzaju zwarcia (zewnętrznych i wewnętrznych, międzyfazowych i doziemnych). Wielobitowe kodowanie sygnałów w urządzeniach serii UR pozwala na przekazywanie informacji nie tylko o wystąpieniu zwarcia, ale także o jego rodzaju i fazach nim objętych. Sekwencje testowe, symulujące odpowiednie rodzaje zwarć, były każdorazowo projektowane i wymuszane (prądy i napięcia w każdej z faz) za pomocą modułu *Omicron State Sequencer*, wchodzącego w skład środowiska *Omicron Test Universe*.

Odnotowane zostało poprawne działanie funkcji koordynacyjnych urządzenia D60, zarówno w aspekcie generowania sygnałów wyłączających i blokujących (przełącznik w roli zabezpieczenia lokalnego), jak i ich interpretacji (przełącznik jako zabezpieczenie zdalne).

### 4. TESTY RZECZYWISTEJ KOORDYNACJI POMIĘDZY DWOMA URZĄDZENIAMI

Dodatkowym elementem stanowiska był w tym przypadku wzmacniacz CMS-156 firmy *OMICRON electronics*, który pozwolił na wymuszanie dodatkowych trzech prądów i trzech napięć dla urządzenia D90Plus. Konfiguracja logiki wewnętrznej terminala [7] i jego funkcji współpracy z łączem została zrealizowana przy wykorzystaniu dedykowanego oprogramowania *EnerVista UR Plus Setup*.

Drugi etap testów został przeprowadzony dla sprawdzenia poprawności rzeczywistej współpracy pomiędzy urządzeniami D60 i D90Plus (połączonymi bezpośrednio za pomocą wyjść i wejść dwustanowych), dla każdej z dostępnych automatyk współpracy z łączem. Zabezpieczenie D60 pełniło przy tym rolę zabezpieczenia lokalnego (bliższego symulowanemu zwarcia), a D90Plus – rolę zabezpieczenia zdalnego. Dodatkowo (dla automatyki POTT) zmierzone zostały różnice czasu wysyłania, przez każde z urządzeń, sygnału na otwarcie wyłącznika.

Wykorzystanie testerów mikroprocesorowych pozwoliło na sprawdzenie funkcji koordynacyjnych działania urządzenia D60, zarówno podczas generowania sygnałów wyłączających oraz blokujących (przełącznik w roli zabezpieczenia lokalnego), jak i ich interpretacji (przełącznik jako zabezpieczenie zdalne).

### 5. TESTY PORÓWNAWCZE RÓŻNYCH RODZAJÓW ŁĄCZA KOMUNIKACYJNEGO

Ostatni etap (III) przeprowadzonych badań laboratoryjnych miał na celu porównanie różnych rodzajów łączy transmisyjnych w aspekcie ich przydatności w układach koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych. W tym etapie testów wykorzystywane były dwa urządzenia L90 [6] i tylko jedna automatyka współpracy z łączem – POTT. Do przeprowadzenia testów potrzebne były wyłączenie dwa wejścia dwustanowe testera CMC-156 – po jednym na sygnał wyłączający z obu urządzeń L90.

Najistotniejszym zagadnieniem są opóźnienia zadziałania przełącznika zdalnego względem lokalnego, odnotowane przy zastosowaniu poszczególnych rodzajów łączy transmisyjnych, oraz różnice pomiędzy nimi. Pomiar dla każdego z połączeń zostały wykonane wielokrotnie dla transmisji w każdym z kierunków. Ich uśrednione wartości zebrano w tabelicy 1. W przypadku braku koordynacji, opóźnienie zadziałania przełącznika zdalnego przekracza 500 ms. Związane jest to z jego działaniem w drugiej strefie.

Tablica 1. Zestawienie średnich opóźnień między czasem zadziałania przełącznika zdalnego i lokalnego

Zastosowane łącze komunikacyjne między skoordynowanymi (w automatyce POTT) zabezpieczeniami	Średnia różnica pomiędzy czasami zadziałania
	[ms]
Brak łącza/koordynacji (wartość odniesienia)	504,1
Bezpośrednie połączenie wejść i wyjść dwustanowych (dane z etapu II badań)	6,2
Bezpośrednie połączenie (kabel krosowany) w standardzie Ethernet/IEC61850 (GOOSE/GSSE)	3,8
Połączenie w standardzie Ethernet/IEC61850 (GOOSE/GSSE) z wykorzystaniem przełącznika ( <i>switch</i> )	5,1
Połączenie w standardzie Ethernet/IEC61850 (GOOSE/GSSE) przez przełączniki i sieć cyfrową SDH (moduł)	10,4
Bezpośrednie połączenie optyczne (światłowod 820 nm, G.651) w standardzie w standardzie C37.94	6,9
Łącze optyczne w standardzie C37.94, wprowadzone do sieci cyfrowej SDH	14,1

Wykorzystanie automatyki POTT zapewnia obniżenie wartości tego opóźnienia do kilku-kilkunastu milisekund. Najmniejsze opóźnienie zostało odnotowane dla bezpośredniego połączenia Ethernet w standardzie IEC61850, co wynika z największej przepływności tego łącza – 100 Mb/s. Zastosowanie przełączników powoduje wprowadzenie dodatkowego opóźnienia na poziomie 1 ms, a zrealizowanie transmisji przez telekomunikacyjną sieć cyfrową SDH – kolejne 5 ms. Bezpośrednie łącze optyczne (64 kb/s) w standardzie C37.94 zapewnia opóźnienie na średnim poziomie blisko 7 ms, a po wprowadzeniu do sieci SDH - około 14 ms. Niewielka zwłoka czasowa działania przełącznika zdalnego w przypadku bezpośredniego połączenia wejść/wyjść dwustanowych przełączników serii D (poprzedni etap badań), wynosząca około 6 ms, wynika z wykorzystania szybkich (statycznych) wyjść typu *Form-C*.

Tablica 2. Zestawienie wartości opóźnień wprowadzanych przez sieć cyfrową SDH

<b>Protokół komunikacyjny</b>		Ethernet / IEC61850	C37.94
<b>Moduł multipleksa SDH (TNIUe firmy GE Multilin)</b>		ETHER-100	DATA-NX64F
<b>Opóźnienie sieci SDH [ms]</b>	Zwarcie przy L90 (1) (L90_prawy)	5,2	7,4
	Zwarcie przy L90 (2) (L90_lewy)	5,5	6,9
	Średnio	5,35	7,15
<b>Asymetria kierunkowa / (1) – (2) / [ms]</b>		-0,3	0,5

Dodatkowe opóźnienie, wprowadzane przez sieć cyfrową SDH (tablica 2), jest różne dla poszczególnych standardów telekomunikacyjnych. Dla transmisji w standardzie C37.94, sieć SDH generuje opóźnienie o około 40% większe (2 ms) niż dla protokołu Ethernet/IEC61850. Jest to spowodowane, odmiennym dla obu standardów, sposobem enkapsulacji i właściwej transmisji danych w sieci SDH. Dla połączeń optycznych (C37.94) wykorzystywany jest kontener wirtualny VC-12 (przepływność 2Mb/s), wobec kontenera VC-3 (przepływność około 50 Mb/s) dla połączeń w protokole IEC61850.

Tablica 3. Zestawienie czasów zadziałania przekaźników z rozróżnieniem kierunku transmisji

<b>Łącze komunikacyjne</b>	<b>Opóźnienie czasu zadziałania [ms]</b>		<b>Różnica kierunkowa [ms]</b>
	Zwarcie przy L90 (1) / sygnał do L90 (2) /	Zwarcie przy L90 (2) / sygnał do L90 (1) /	
Ethernet/IEC61850 bezpośrednio	4,5	3	1,5
Ethernet/IEC61850 przez przełączniki	5,9	4,2	1,7
Ethernet/IEC61850 podłączone do SDH przez przełączniki	11,1	9,7	1,4
Bezpośrednie łącze optyczne C37.94	7	6,9	0,1
Połączenie C37.94 przez sieć SDH	14,3	13,8	0,5

Asymetria kierunkowa opóźnień, wprowadzanych przez sieć SDH, jest niewielka (zaledwie kilka procent wartości całego opóźnienia) i niezdeteminowana kierunkowo – w przypadku jednego standardu ma (dla przyjętej konwencji pomiaru) wartość ujemną, a dla drugiego dodatnią.

Asymetria (ze względu na kierunek transmisji sygnału wyzwalającego) zwiększa się przy rozpatrywaniu całkowitego opóźnienia między działaniem przekaźników (tablica 3). W tym przypadku jest już ona zdeterminowana kierunkowo – opóźnienie było zawsze mniejsze podczas pracy przekaźnika L90 (1) jako zdalnego.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Bartosiewicz E.: Wykorzystanie sieci WAN do koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych, praca dyplomowa magisterska na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, 2012
2. Kowalik R., Januszewski M.: Performance tests of power system protection, exchanging data through PDH network, Electrical Review, nr 11/2008, s. 20-26, ISSN 0033-2097
3. Kowalik R., Januszewski M.: Tests of power system protections using SDH network, Electrical Review, nr 4/2009, s. 142-150, ISSN 0033-2097
4. Kowalik R., Januszewski M., D. Rasolomampionona: Problems Found During Testing Synchronous Digital Hierarchical Devices Used on Power Protection Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, ISSN 0885-8977, 2012
5. GE Multilin: D60 Line Distance Protection System – D60 Revision 6.0, dokumentacja techniczna, 2011
6. GE Multilin: L90 Line Current Differential System – L90 Revision 6.0, dokumentacja techniczna, 2011
7. GE Multilin: D90Plus Line Distance Protection System – L90Plus Revision 1.7, dokumentacja techniczna, 2012
8. Siemens SIPROTEC: Distance Protection 7SA522 V4.70, dokumentacja techniczna, 2011
9. Kowalik R., Januszewski M.: Coordination of protections through the exchange of binary signals between power system substations in the IEC61850 protocol, Electrical Review, nr 6/2009, s. 195-201, ISSN 0033-2097

## OVERVIEW AND EXAMPLE TEST RESULTS OF MODERN PILOT SCHEMES FOR COORDINATION OF LINE DISTANCE PROTECTION RELAYS – CONFERENCE PAPER

**Key-words:** power system protection, testing of power system protection, SDH networks

The paper presents a short review of pilots schemes, which are available in modern line distance protection relays, and example results of common pilot schemes tests with the testing methods description. Some differences in implementations of selected pilot schemes have been shown for comparison reasons. Distance protection coordination functions have been tested for GE Multilin UR-series devices. Every type of available pilot scheme has been checked in synthetic test and during the real coordination between D60 and D90Plus devices. For POTT scheme, coordination between two L90 protections has been realized by a sort of available different telecommunication link types, for comparison reasons too.