

Overview and Example Test Results of Modern Pilot Schemes for Coordination of Line Distance Protection Relays

Authors

Emil Bartosiewicz
Ryszard Kowalik
Marcin Januszewski

Keywords

power system protection, testing of power system protection, SDH networks

Abstract

The paper presents a short review of pilot schemes which are available in modern line distance protection relays, and example results of common pilot scheme 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 tests and during the real coordination between D60 and D90Plus devices. For the POTT scheme, coordination between two L90 protections has been carried out by a sort of available different data communication link types, for comparison reasons too.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2014101

1. Introduction

Power lines of the highest voltages are usually double-side supplied. For the sake of safe elimination of high-current internal faults, such lines need to be capable of fast switching-off on both sides. This is associated with the risk of equipment damage or destruction. Fast tripping of faults in transmission grids is also important for power system stability.

The ability to distinguish between internal and external faults in each preset zone range and either direction seems to be the distance protection's main advantage. However, as regards these relays' autonomous operation at each end of the protected line, an instantaneous zone range reduction results in the inability to quickly switch off for some internal fault locations. The problem related to the use of distance relays for protection of two-sides powered transmission lines will be briefly discussed (Fig. 1). Due to the need to ensure relays' tripping selectivity, none of their instantaneous zone ranges can be set to cover the entire protected line. Each relay's first zone range typically covers 80–90% of the line length (Fig. 1b, c). Therefore the resultant area covered by fast and double-side tripping amounts to 60–80% of the entire section length (Fig. 1d). Both ends of the line (each representing 10–20% of its length) are located in the second zone of one of the relays, and hence any short-circuit there is switched off with a certain delay (typically 0.2–0.4 seconds).

The problem of limited instantaneous protection range can be solved by distance protection relay coordination pilot schemes using a communication link and dedicated functions available in the devices.

The paper presents example results of tests carried out in the Electrical Power Engineering Automation Laboratory at the Electrical Power Engineering Institute of Warsaw University of Technology. The aim of the tests was to examine the performance of the modern pilot schemes implemented in GE Multilin protection devices. The tests were performed in three stages:

- first stage: synthetic two-step tests of the pilot schemes available in D60 device:
 - DUTT (Direct Under-Reaching Transfer Trip)
 - PUTT (Permissive Under-Reaching Transfer Trip)
 - POTT (Permissive Over-Reaching Transfer Trip) and its modification Hybrid POTT
 - DCB (Directional Comparison Blocking)
 - DCUB (Directional Comparison Unblocking)
- second stage: testing of the real coordination between D60 and D90Plus devices implemented by the use of all above-mentioned coordination schemes and a direct connection between the relays' binary inputs and outputs
- third stage: testing the POTT coordination between two L90 devices, using different types of data communication link:
 - no link (no coordination as reference case)
 - direct Ethernet/IEC61850 link over crossed cable
 - Ethernet/IEC61850 link over switches
 - Ethernet/IEC61850 link over switches and SDH (Synchronous Digital Hierarchy) network
 - direct C37.94 optical link
 - C37.94 optical link over SDH network.

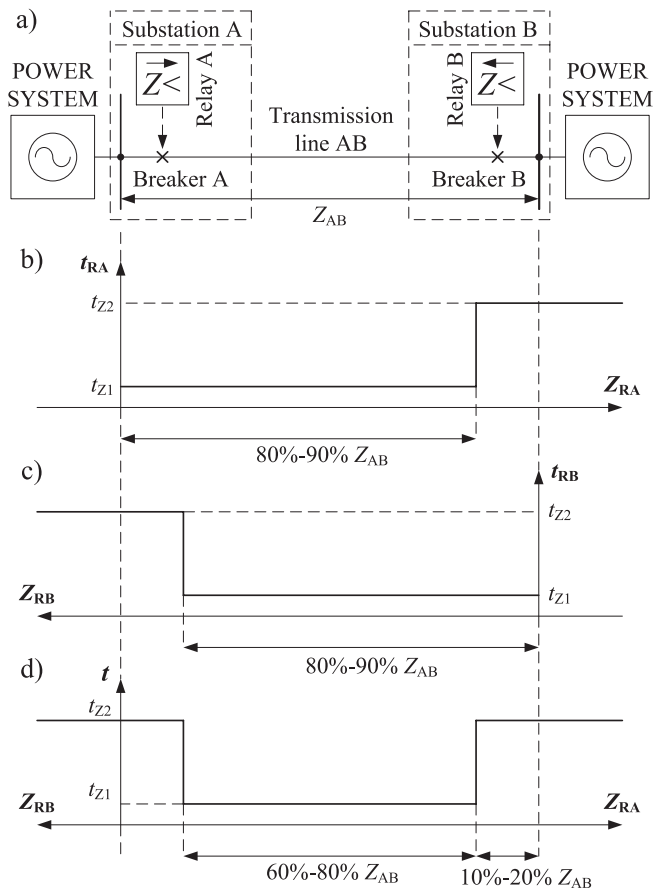


Fig. 1. Transmission line protection by two independently operated distance relays: a) protected line AB; stepped time–impedance characteristics for: b) relay A (RA), c) relay B (RB), d) resultant characteristics for entire line protection; where: Z_{AB} – AB line impedance, t_{zx} – tripping time in zone x

2. Typical pilot schemes

With regard to the types of signals exchanged between relays, the pilot schemes for coordination between distance protections can be divided into:

- tripping
 - direct
 - permissive
- blocking/unblocking:
 - blocking
 - unblocking.

Coordination schemes using tripping signal transmission are also called under/over-reaching, and those using blocking/unblocking signals – comparison blocking/unblocking. The following five basic pilot schemes can be distinguished:

- Direct Under-Reaching Transfer Trip (DUTT)
- Permissive Under-Reaching Transfer Trip (PUTT)
- Permissive Over-Reaching Transfer Trip (POTT)
- Directional Comparison Blocking (DCB)
- Directional Comparison Unblocking (DCUB).

The choice of coordination scheme should depend on the level of integration between the data communications link and

relevant power system devices. Blocking/unblocking automation is preferred where the transmission medium is an integral part of the protected line section, e.g. for high-frequency PLC (Power Line Carrier) links. This is justified by such links' exposure to interference that may impede or preclude the transfer of tripping signals, and in extreme cases – even lead to unnecessary tripping. As regards dedicated (separate) transmission media, such as fibre optic or microwave links, and SDH wide-area networks [1–4], a failure or disruption of the power element usually does not affect the data transfer between protection devices. The use of tripping signals is then more preferred.

2.1. Direct Under-Reaching Transfer Trip (DUTT)

The DUTT scheme's simplified operating principle is presented in Fig. 2. The scheme is based on the protection's first (instantaneous) zone. Upon a fault in this zone of A relay it generates a tripping or pick-up signal (depending on how the scheme is implemented in the device), and sends it to the other end of the protected line over a transmission link. The remote relay B receives this signal and unconditionally generates the circuit breaker opening signal (T_B).

The Direct Under-Reaching Transfer Trip scheme, also known as direct trip scheme, features low reliability of tripping decision due to the lack of local control over start-up conditions.

2.2. Permissive Under-Reaching Transfer Trip (PUTT)

The PUTT scheme's operating principle is presented in Fig. 3. Different than in the DUTT scheme, the remote tripping is not unconditional in this case. Pick-up (or tripping) of relay A in zone 1 is used to generate the operate signal for remote relay B. However, sending a tripping signal at substation B is subjected to fulfilment of an additional requirement – the pick-up of local relay B in a one of a forward zones.

The PUTT scheme is resistant to interference in the transmission link. No false remote tripping signal is accepted in the absence of local notice of a "forward" fault.

2.3. Permissive Over-Reaching Transfer Trip (POTT)

The POTT scheme utilises the second zone (e.g. in UR series of GE Multilin devices [5–7]), or elongated first zone (e.g. in SIPROTEC Siemens devices [8]) to generate a remote tripping signal transmitted to the other end of the line. The POTT scheme's operating principle is presented in Fig. 4. The tripping signal is generated by each of the relays upon fulfilment of two conditions:

- local pick-up in the second zone or first elongated zone
- receipt of a remote tripping signal from the opposite substation.

Some POTT automation's hardware implementations (e.g. in UR series of GE Multilin devices) allow considering additional start-up conditions, for example pick-up of the directional ground overcurrent protection.

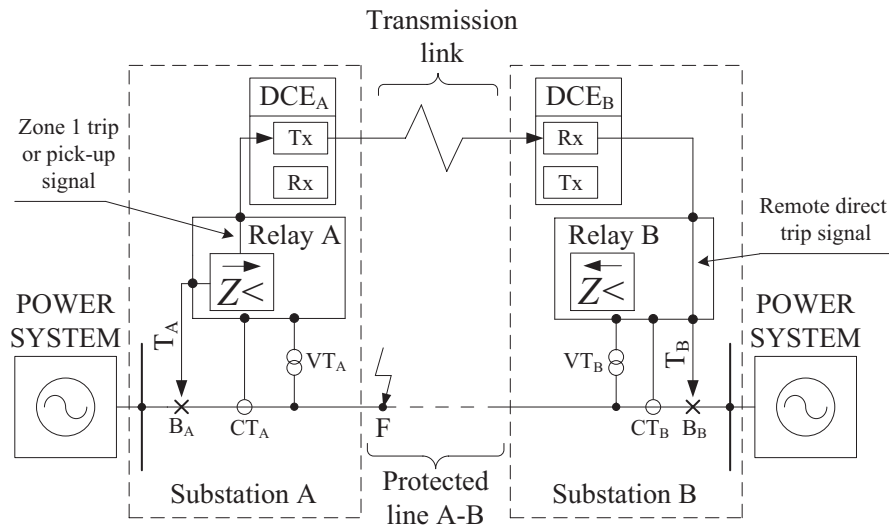


Fig. 2. Direct Under-Reaching Transfer Trip (DUTT) concept of distance protection relay coordination; where: B – circuit breaker, CT – current transformer, VT – voltage transformer, T – tripping (circuit breaker opening) signal, F – fault location, DCE – Data Communication Equipment, Tx – transmitter, Rx – receiver

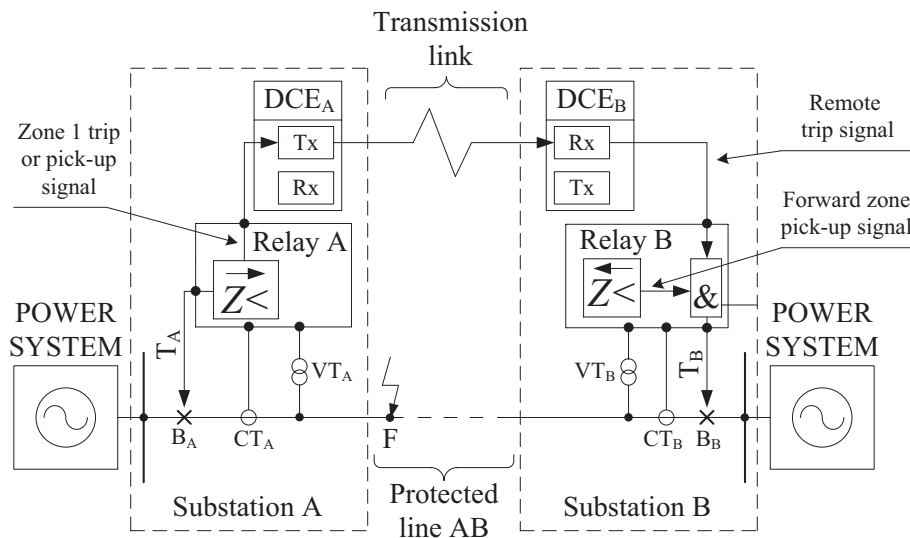


Fig. 3. Permissive Under-Reaching Transfer Trip (PUTT) concept of distance protection relay coordination; where: B – circuit breaker, CT – current transformer, VT – voltage transformer, T – tripping (circuit breaker opening) signal, F – fault location, DCE – Data Communication Equipment, Tx – transmitter, Rx – receiver

2.4. Directional Comparison Blocking (DCB)

DCB is the first of the two typical directional comparison schemes. Also in this case there are two different implementations of the scheme:

- solution using the second zone of each of the relays for the comparison of fault location viewing direction (e.g. GE Multilin devices)
- solution using the elongated fast (first) zone of each relay for the fault notice direction (e.g. Siemens SIPROTEC).

The DCB scheme operating principle is presented in Fig. 5. Upon an external fault in point F, relay B picks up in its backward zone. It sends the blocking signal to the opposite end of the line. The signal is received by relay A, which does not respond with an instantaneous signal for circuit breaker BA opening, despite the local notice of a forward fault. Upon an internal fault (viewed as forward by both relays simultaneously) no signal is transmitted. This allows quickly generating tripping signals, in each substation independently.

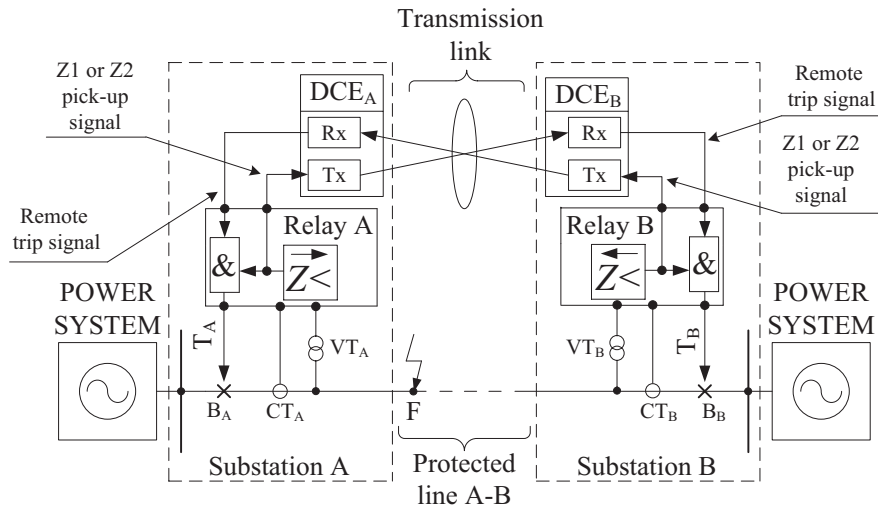


Fig. 4. Permissive Over-Reaching Transfer Trip (POTT) concept of distance protection relay coordination; where: B – circuit breaker, CT – current transformer, VT – voltage transformer, T – tripping (circuit breaker opening) signal, F – fault location, DCE – Data Communication Equipment, Tx – transmitter, Rx – receiver

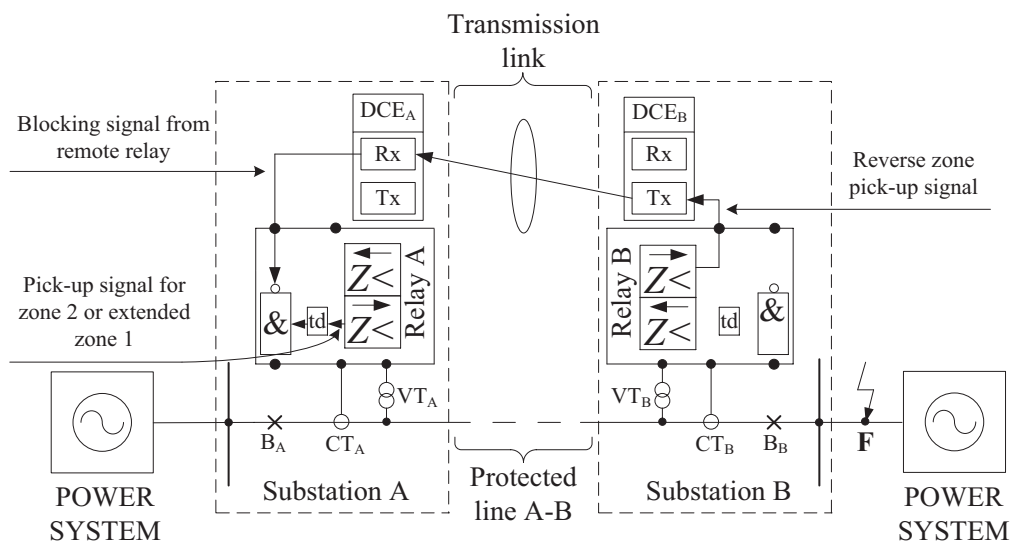


Fig. 5. Directional Comparison Blocking (DCB) concept of distance protection relay coordination; where: B – circuit breaker, CT – current transformer, VT – voltage transformer, T – tripping (circuit breaker opening) signal, F – fault location, DCE – Data Communication Equipment, Tx – transmitter, Rx – receiver, td – time delay

2.5. Directional Comparison Unblocking (DCUB)

The DCUB scheme can be implemented in two different ways, the same as the DCB scheme. In this case, however, a signal is sent to unlock the fast trip. An occurrence of an internal fault in the protected line results here with generation and transmission (by each relay independently) of the unlocking signal. The opposite protection receives this signal as remote permission to trip immediately.

3. Special coordination schemes

Some protection devices are provided with unique remote cooperation solutions. One example is the Hybrid POTT function available in many devices in GE Multilin's UR series. It has

been designed for three-terminal applications (e.g. dual-circuit lines), and utilises additional advanced features (such as ECHO, or backward-set distance and/or directional ground over-current protection functions) in order to increase the reliability in special system events, such as a weak infeed conditions. What is more, the distance protections' coordination functions do not have to be predefined solutions only. Modern terminals are usually provided with extensive internal programmable logic, which enables the implementation of their own interoperability coordination schemes (e.g. the solution presented in [9]), using selected internal and external signals, as well as self-defined start-up conditions. The wide variety of communication standards and protocols, available in modern protection devices, further expands the array of possible inter-terminal interoperability implementations.

4. Synthetic tests of pilot schemes functions

The pilot schemes, implemented in the D60 device, were tested using an OMICRON Electronics CMC-156 microprocessor tester under software dedicated for PC computer. A simplified wiring diagram for the first stage of tests is presented in Fig. 6.

The D60 device [5] and its coordination features were configured by dedicated *EnerVista UR Setup* software, and the configuration's correctness was preliminarily verified by selected modules of the *Omicron Test Universe* test environment.

The purpose of this testing stage was to verify (using the CMC tester's binary inputs and outputs) the accuracy of D60 device's generation and interpretation of dedicated pilot schemes' signals for each available coding method (1-, 2- or 4-bit) and each fault type (internal and external, phase-to-phase and phase-to-ground). Multi-bit encoding of signals in UR series devices allows transferring information not only of fault's occurrence, but also of its type and short-circuited phases. Test sequences that simulated the respective fault types were individually designed and enforced (currents and voltages in each phase) using an *Omicron State Sequencer* module (Fig. 10) belonging to the *Omicron Test Universe* environment.

The use of microprocessor testers allowed testing the D60 device's coordination functions for tripping and locking signals' generation (relay in the role of local protection), as well as interpretation (relay as remote protection).

5. Tests of real coordination between two devices

The wiring diagram of the test setup for the second testing stage is presented in Fig. 7. An additional element of the setup was in this case an OMICRON Electronics CMS-156 amplifier, which allowed enforcing three additional currents and three voltages for the D90Plus device. Internal logic of the terminal [7] and its pilot scheme functions were configured using dedicated *EnerVista URPlus Setup* software (Fig. 9). The second testing phase's objective was to check the real cooperation between D60 and D90Plus devices (connected directly through the binary inputs and outputs) for each of the available pilot schemes. The D60 device acted as local protection (closer to the simulated short circuit), and D90Plus – as remote protection. In addition (for POTT scheme) time differences were measured between each device's trip signal. All the tested distance protection relays coordination schemes worked properly for all types of simulated faults, with a significant acceleration of the remote relay's tripping upon a close fault (Fig. 10).

6. Comparative tests of various communication link types

The last (third) stage of laboratory tests was aimed at comparing various transmission link types in terms of their usefulness for distance protection coordination. Subject to this stage of the tests were two L90 devices [6] and only one pilot scheme – POTT. A simplified wiring diagram of the test setup is shown in Fig. 8. Only two binary inputs of the CMC-156 testers were needed for the tests – one for each tripping system from both L90 devices.

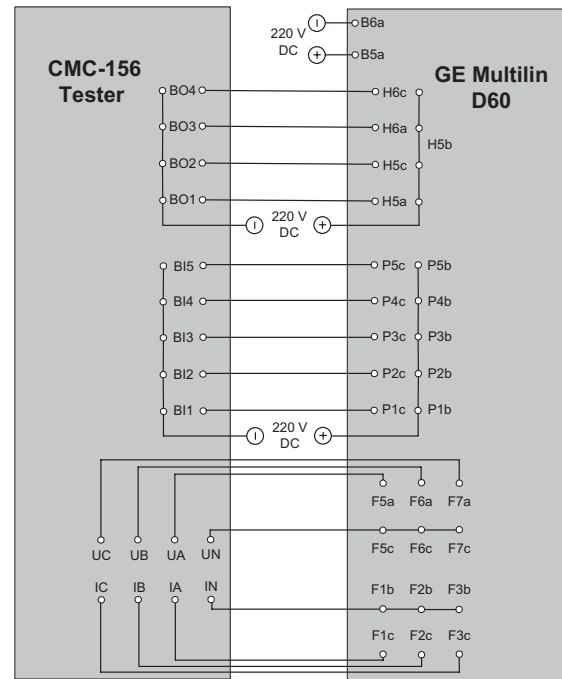


Fig. 6. Diagram of tested D60 device connection with CMC-156 tester for synthetic testing of automatic systems coordination over link (I stage tests)

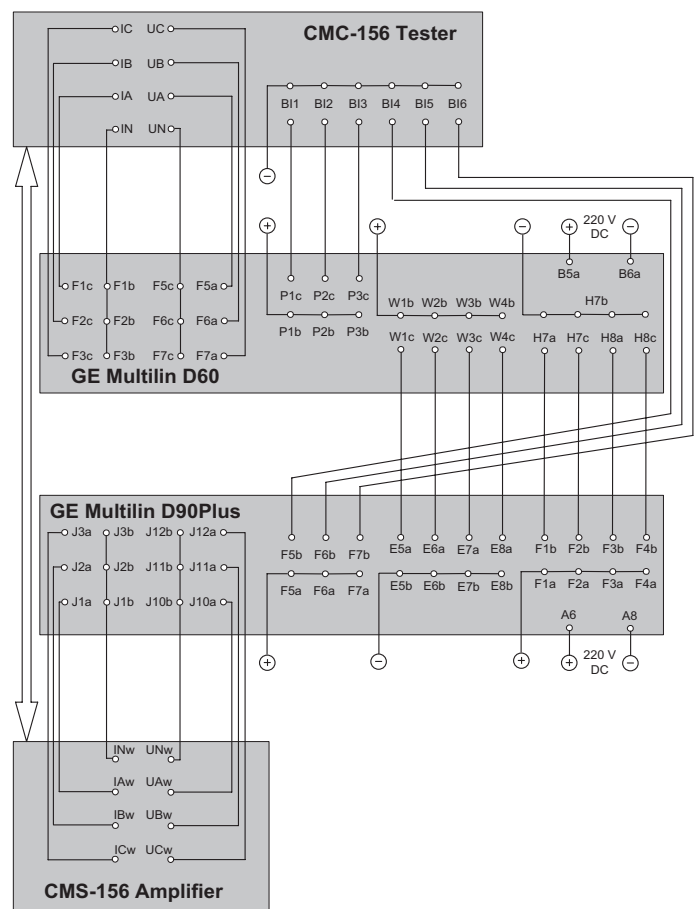


Fig. 7. Connection system of the setup for testing actual coordination between D60 and D90Plus devices (II stage tests)

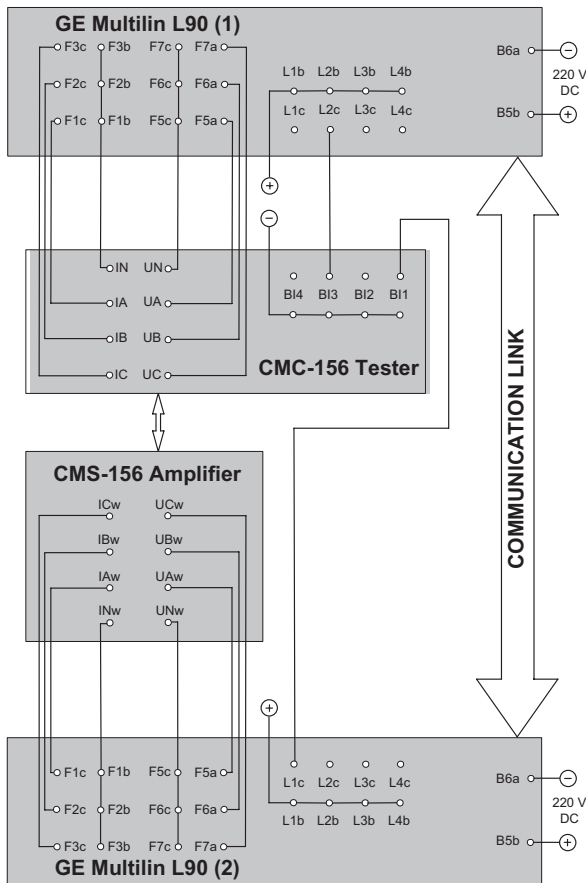


Fig. 8. Wiring diagram of the setup for testing various communication link types (phase III tests)

The most important issue is the delay between the remote and local relay tripping times recorded for various transmission link types, and the differences between them. The measurements (Fig. 11) for each connection were made several times for transmissions in either direction. Their average values (for both signal transmission directions) are listed in Tab. 1.

In the absence of coordination the remote relay’s delay exceeds 500 ms. This is due to its tripping in the second zone. The POTT scheme reduces the delay to a few milliseconds. The shortest delay was noted in the direct Ethernet/IEC61850 connection, which results from its highest bit rate – 100 Mb/s. The addition of the switches adds ca. 1 ms to the delay, and transmission through the SDH digital communication network – adds another 5 ms. The direct C37.94 optical link (64 kb/s) ensures a delay in the average order of nearly 7 ms, and with the SDH addition – ca. 14 ms. The remote relay’s short time delay in the case of direct connection of the D series relays’ binary I/Os (the previous test stage), amounting to ca. 6 ms, results from the use of high-speed (static) Form-C binary outputs.

The additional delays induced by SDH digital network (Tab. 2) vary for different telecommunication standards. For C37.94 transmission the SDH network generates a delay of ca. 40% longer (2 ms) than for Ethernet/IEC61850 protocol. This is due to differences in SDH network data encapsulation and transmission methods for

Communication link between coordinated protection devices (POTT scheme)	Average difference between tripping times
	[ms]
No link / coordination (reference value)	504.1
Direct connection of binary inputs and outputs (data from phase II tests)	6.2
Direct Ethernet/IEC61850 (GOOSE/GSSE) link (crossed cable)	3.8
Ethernet/IEC61850 (GOOSE/ GSSE) link with switch	5.1
Ethernet/IEC61850 (GOOSE/ GSSE) link over switch and SDH digital network	10.4
Direct C37.94 optical link (820 nm fibre, G.651)	6.9
Optical C37.94 link input to SDH digital network	14.1

Tab. 1. Average delays between local and remote relay tripping times

Communication protocol	Ethernet / IEC61850	C37.94
	SDH multiplexer (TN1Ue by GE Multilin) unit	ETHER-100
SDH network delay [ms]	Fault at L90(1) (L90_right)	7.4
	Fault at L90(2) (L90_left)	6.9
	Average	7.15
Directional asymmetry / (1)–(2)/[ms]	-0.3	0.5

Tab. 2. Delays induced by SDH digital network

Communication link	Tripping time delay [ms]		Directional difference [ms]
	Fault at L90 (1) signal to L90 (2) /	Fault at L90 (2) signal to L90(1)/	
Direct Ethernet/IEC61850	4.5	3	1.5
Ethernet/IEC61850 over switches	5.9	4.2	1.7
Ethernet/IEC61850 connected to SDH over switches	11.1	9.7	1.4
Direct C37.94 optical link	7	6.9	0.1
C37.94 link over SDH network	14.3	13.8	0.5
Average:			1

Tab. 3. Relay tripping times for different transmission directions

both standards. For optical links (C37.94) a VC-12 virtual container (bit rate 2Mb/s) is used, and a VC-3 container (bit rate ca. 50 Mb/s) for IEC61850 transfer (GOOSE/GSSE mechanism).

Directional asymmetry of the SDH network induced delay is small (only a few percent of the entire delay) and directionally indeterminate – in the case of one standard it is (for the adopted measurement convention) negative, and positive for the other. Asymmetry (due to tripping signal transmission direction) increases with consideration of the total delay between relay responses (Tab. 3). In this case it is already directionally determined – the delay was always shorter at the operation of relay L90 (1) as remote protection.

7. Final conclusions

The diversity of the available pilot scheme functions, and the possible transmission links alike, allows adjusting the optimal

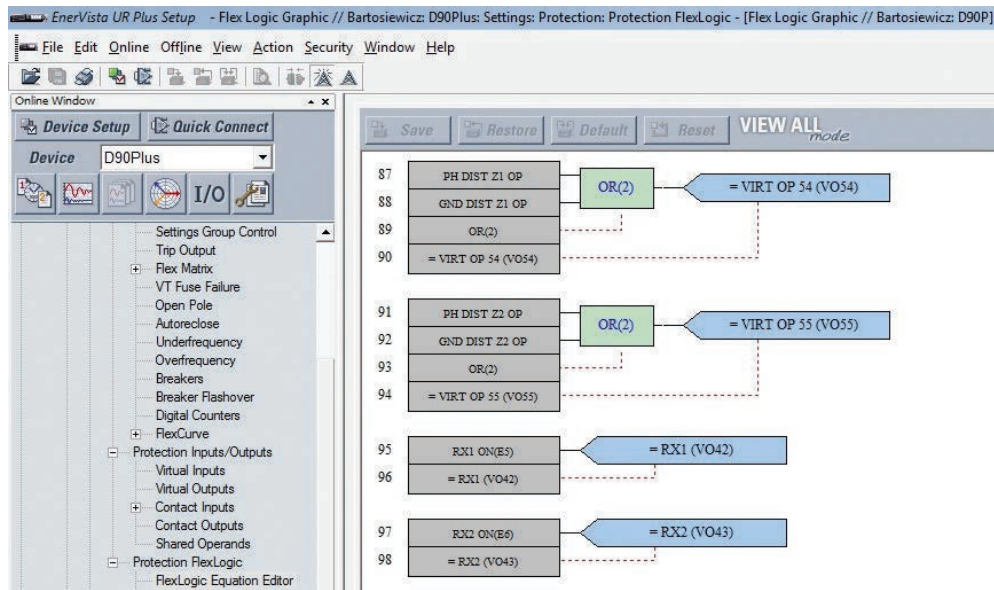


Fig. 9. Screenshot of EnerVistaURPlus Setup program for D90Plus device configuration; on the left side: the device functions tree, on the right side: window of graphical representation of the device programmable logic (FlexLogic) settings

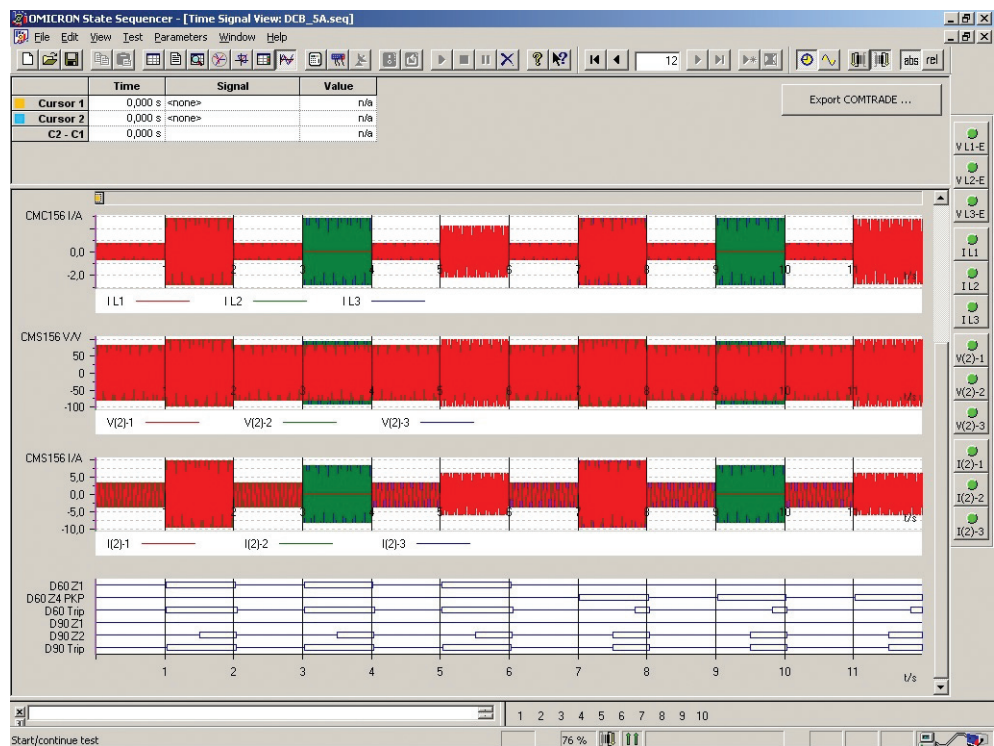


Fig. 10. Example results of the DCB scheme tests (4-bit encoding) for six fault types (simulated in sequence's even seconds): the first three internal fault, and the other three external faults (in each group of three the sequence of three phase, two-phase, and single-phase faults), where: Z1, Z2, Z4 – zones 1., 2., and 4. (backward); PKP – relay pick-up in the zone; Trip – measured relay response (its tripping signal)

protection coordination system to a wide variety of technical and configuration operating conditions. The tests, both synthetic and of real interoperation between the protections, demonstrated the ability of the tested UR series devices to effectively accomplish the assumed tasks in all simulated system cases. Modern protection devices feature high functionality and huge configuration potential.

Regardless of the coordination scheme and transmission link applied, the acceleration of the remote relay trip for a close fault is significant – by one or even two orders of magnitude. The delay relative to the instantaneous local relay tripping time is short – much shorter than the typical fast trip times of the analysed protection devices (20–30 ms).

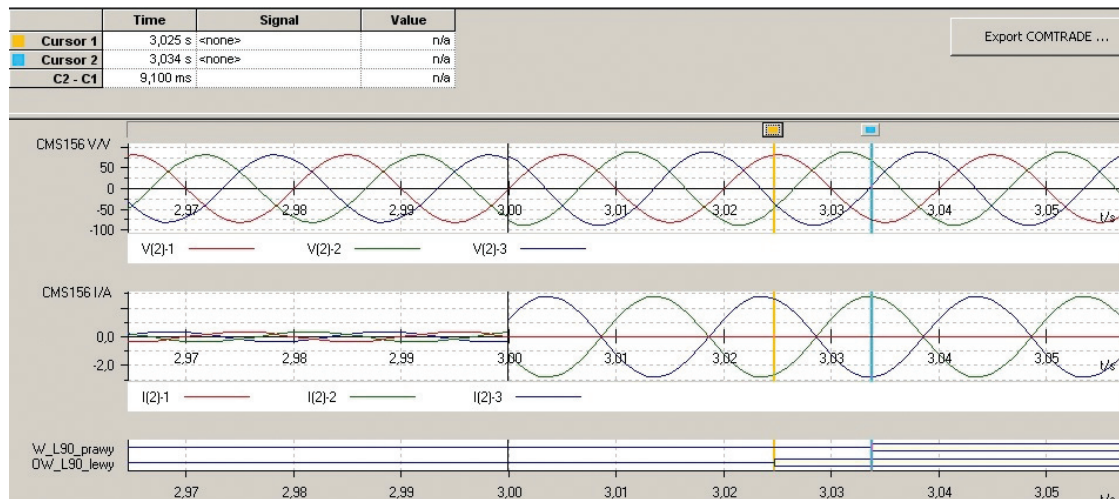


Fig. 11. Example measurement of delay between remote (L90_prawy) and local (L90_lewy) relay tripping times upon phase-to-phase fault

REFERENCES

- Bartosiewicz E., Wykorzystanie sieci WAN do koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych [WAN network applications to coordination of distance relay protection], Master's thesis, Electrical Faculty of Warsaw University of Technology, 2012.
- Kowalik R., Januszewski M., Performance tests of power system protection, exchanging data through PDH network, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008, No. 11, pp. 20–26.
- Kowalik R., Januszewski M., Tests of power system protections using SDH network, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, No. 4, pp. 142–150.
- Kowalik R., Januszewski M., Rasolomampionona D., Problems Found During Testing Synchronous Digital Hierarchical Devices Used on Power Protection Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012.
- GE Multilin: D60 Line Distance Protection System – D60 Revision 6.0, technical documentation, 2011.
- GE Multilin: L90 Line Current Differential System – L90 Revision 6.0, technical documentation, 2011.
- GE Multilin: D90Plus Line Distance Protection System – L90Plus Revision 1.7, technical documentation, 2012.
- Siemens SIPROTEC: Distance Protection 7SA522 V4.70, technical documentation, 2011.
- Kowalik R., Januszewski M., Coordination of protections through the exchange of binary signals between power system substations in the IEC61850 protocol, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, No. 6, pp. 195–201.

Emil Bartosiewicz

Warsaw University of Technology
e-mail: emil.bartosiewicz@ien.pw.edu.pl

Graduated as M. Sc. Eng. in electric power engineering from the Electrical Faculty of Warsaw University of Technology. Since 2012 PhD student at the Institute of Power Engineering of Warsaw University of Technology. His interests focus on power system automation devices and applications of modern telecommunication solutions in the power industry.

Ryszard Kowalik

Warsaw University of Technology
e-mail: ryszard.kowalik@ien.pw.edu.pl

He has worked at the Institute of Electrical Power Engineering, Warsaw University of Technology since 1989. He is a co-author of modern digital protection and micro-processor technology laboratories launched at the Department of Automation of Electric Power Engineering Institute. His professional interests concern the power of automation equipment, synchronization systems and telecommunications systems.

Marcin Januszewski

Warsaw University of Technology
e-mail: majanusz@ien.pw.edu.pl

He has worked at the Institute of Electrical Power Engineering, Warsaw University of Technology since 1995. Since 2002 an assistant professor in Power System Automation Department of Warsaw University of Technology. His professional interests concern power system automation equipment, remote access to protections, and telecommunications systems.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4–11. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Przegląd i wybrane wyniki testów współczesnych układów koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych

Autorzy

Emil Bartosiewicz
Ryszard Kowalik
Marcin Januszewski

Słowa kluczowe

automatyka zabezpieczeniowa, testowanie zabezpieczeń, sieci SDH

Streszczenie

W artykule zaprezentowano krótki przegląd układów koordynacji, dostępnych w nowoczesnych zabezpieczeniach odległościowych linii elektroenergetycznych, oraz przykładowe wyniki testów wybranych układów koordynacji wraz z opisem metod testowania. Opisano 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 (ang. *Permissive Over-Reaching Transfer Trip*) i przełączników L90 koordynacja została zrealizowana przy wykorzystaniu różnych rodzajów łącza transmisyjnego.

1. Wstęp

Linie elektroenergetyczne najwyższych napięć pracują zazwyczaj jako dwustronnie zasilane. Na potrzeby bezpiecznej eliminacji wielkopiędnych zwarć wewnętrznych wymagane jest szybkie obustronne wyłączenie tych linii. Jest to związane z ryzykiem uszkodzenia bądź zniszczenia aparatury. Szybkie wyłączenie zwarć w sieciach przesyłowych ma także istotne znaczenie dla stabilności systemu elektroenergetycznego.

Możliwość rozróżnienia pomiędzy zwarciami wewnętrznymi i zewnętrznymi dla każdej z nastawionych stref działania i w każdym z kierunków wydaje się być główną zaletą zabezpieczeń odległościowych. Jednakże

w przypadku autonomicznej pracy tych przełączników na każdym z końców chronionej linii ograniczenie zasięgu strefy bezzwłocznej skutkuje niezdolnością 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 (rys. 1). Zasięg bezzwłocznej strefy żadnego z przełączników nie może być, ze względu na konieczność zapewnienia selektywności działania, nastawiony na pokrycie całej chronionej linii. Zasięg pierwszej strefy obejmuje zazwyczaj 80–90% jej długości (rys. 1b, c) dla każdego z przełączników. Wypadkowy obszar objęty szybkim i obustronnym wyłączeniem stanowi zatem 60–80% długości całego odcinka (rys. 1d). Oba końcowe fragmenty linii (każdy stanowiący 10–20% jej długości) znajdują się już w drugiej strefie działania jednego z przełączników, a więc zwarcia w nich są wyłączone z pewną zwłoką czasową (typowo 0,2–0,4 s).

Rozwiązaniem problemu ograniczonego zasięgu bezzwłocznej ochrony jest zastosowanie układów koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych, wykorzystujących łącza telekomunikacyjne oraz dedykowane funkcje dostępne w urządzeniach.

W artykule 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 przeprowadzono w trzech etapach:

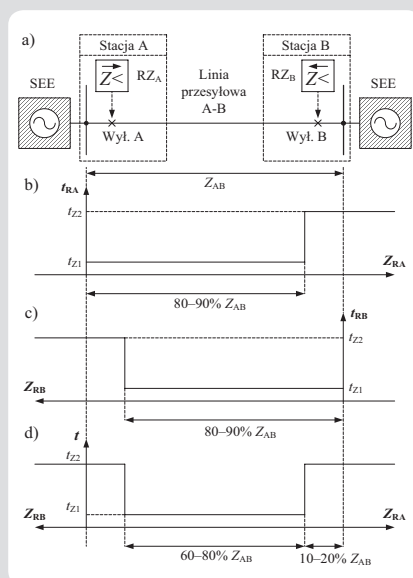
- pierwszym etapem były syntetyczne, zrealizowane w dwóch krokach, testy układów koordynacji dostępnych w urządzeniu D60:
 - system współbieżny bezwarunkowy DUTT (ang. *Direct Under-Reaching Transfer Trip*)
 - system współbieżny z przyzwoleniem PUTT (ang. *Permissive Under-Reaching Transfer Trip*)

- 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 dwustronnymi przełączników
- 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
 - połączenie optyczne (C37.94) przez sieć SDH.

2. Typowe układy koordynacji

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

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



Rys. 1. Ochrona linii przesyłowej z wykorzystaniem dwóch przełączników odległościowych pracujących niezależnie: a) chroniona linia A-B; schodkowe charakterystyki czasowo-impedancyjne dla: b) przełącznika A (RZ_A), c) przełącznika B (RZ_B), d) wypadkowa charakterystyka dla całego zabezpieczenia linii; gdzie: Z_{AB} – impedancja linii A-B, t_{zx} – czas działania w strefie x

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

Uproszczona zasada działania systemu DUTT została zaprezentowana na rys. 2. Układ ten bazuje na pierwszej (bezwłocznej) strefie działania zabezpieczenia. W chwili wystąpienia zwarcia w tej właśnie strefie przekaznik RZ_A 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 przekaznik RZ_B odbiera ten sygnał i bezwarunkowo generuje sygnał na otwarcie wyłącznika (OW_B). 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

Idea funkcjonowania systemu współbieżnego z przyzwoleniem (PUTT) została zaprezentowana na rys. 3. W przeciwieństwie do układu DUTT zdalne wyłączenie nie jest w tym przypadku bezwarunkowe. Pobudzenie (bądź zadziałanie) przekaznika RZ_A w strefie I jest wykorzystywane do generowania sygnału wyzwalającego dla zdalnego przekaznika RZ_B . Jednakże wysłanie sygnału na otwarcie wyłącznika w stacji B uwarunkowane jest spełnieniem dodatkowego wymogu – pobudzenia lokalnego przekaznika RZ_B w jednej ze stref „do przodu”.

PUTT jest systemem odpornym na zakłócenia w łączy 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. Zasada działania systemu POTT została przedstawiona na rys. 4.

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

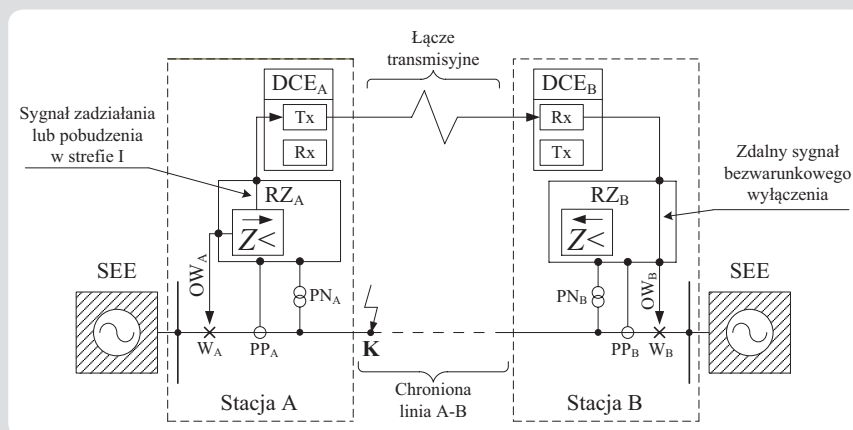
- lokalnego pobudzenia w strefie drugiej lub wydłużonej strefie pierwszej
 - otrzymania zdalnego sygnału wyzwalającego z przeciwległej stacji elektroenergetycznej.
- Niektóre implementacje sprzętowe automatyki POTT (np. w serii UR od GE Multilin) pozwalają na wykorzystywanie dodatkowych warunków rozruchowych, na przykład pobudzenia od funkcji zabezpieczenia nadprądowego ziemnozwarciowego kierunkowego.

2.4. Układ z przesyłem sygnału blokującego – DCB

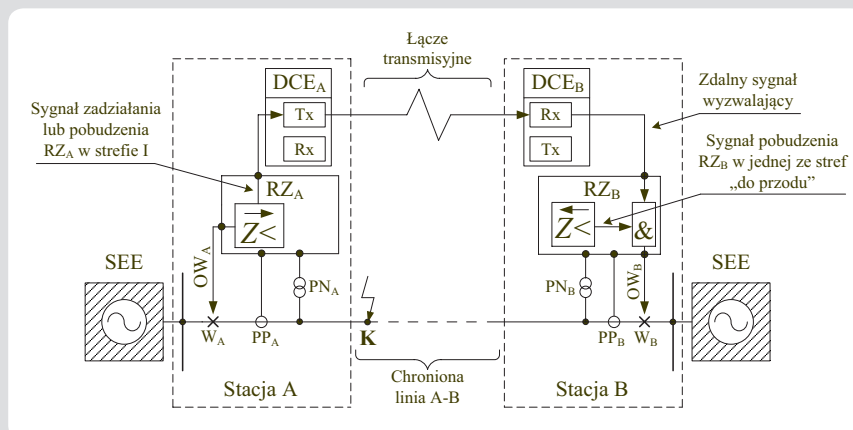
DCB jest pierwszą z dwóch typowych automatyk typu przeciwbieżnego. Także w tym przypadku można wyróżnić dwie odmienne implementacje układu:

- rozwiązanie wykorzystujące strefę drugą każdego z przekazników na potrzeby realizacji porównania kierunku widzenia miejsca zwarcia (np. urządzenia GE Multilin)
- rozwiązanie wykorzystujące, dla porównania kierunku odnotowania zwarcia, wydłużoną strefę szybką (pierwszą) każdego z przekazników (np. Siemens SIPROTEC).

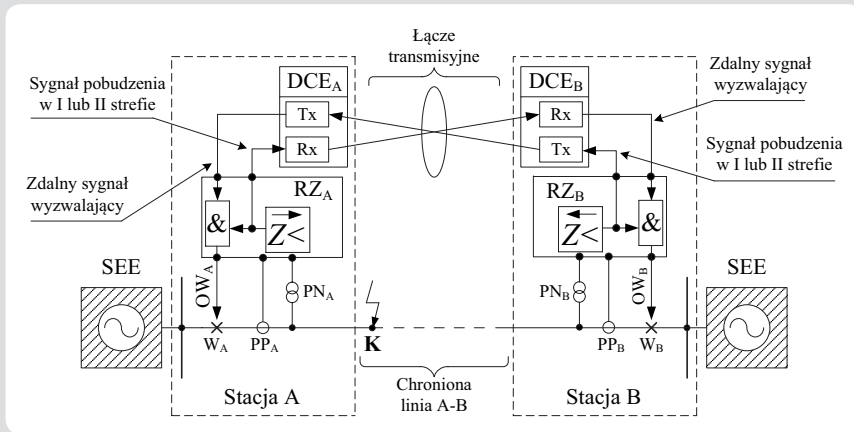
Zasada działania układu DCB została przedstawiona na rys. 5. W przypadku zwarcia zewnętrznego w punkcie K zabezpieczenie RZ_B zostaje pobudzone w strefie wstecznej. Wysyła ono sygnał blokujący na przeciwległy koniec linii. Zostaje on odebrany przez przekaznik RZ_A , który w efekcie nie generuje bezwłocznego sygnału na otwarcie wyłącznika W_A , pomimo lokalnego odnotowania zwarcia w kierunku „do przodu”.



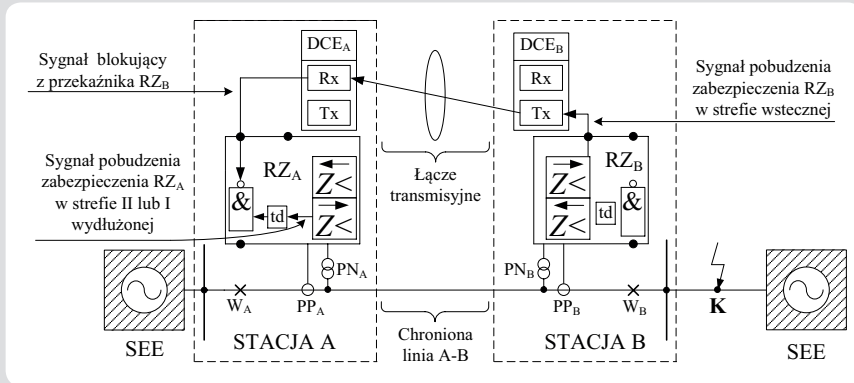
Rys. 2. Idea koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych w układzie bezpośredniego wyłączenia (DUTT); gdzie: W – wyłączniki, PP – przekładniki prądowe, PN – przekładniki napięciowe, OW – sygnały otwarcia wyłączników, RZ – urządzenia zabezpieczeniowe, SEE – system elektroenergetyczny, K – miejsce zwarcia, DCE – urządzenia telekomunikacyjne (ang. *Data Communication Equipment*), Tx – nadajniki, Rx – odbiorniki



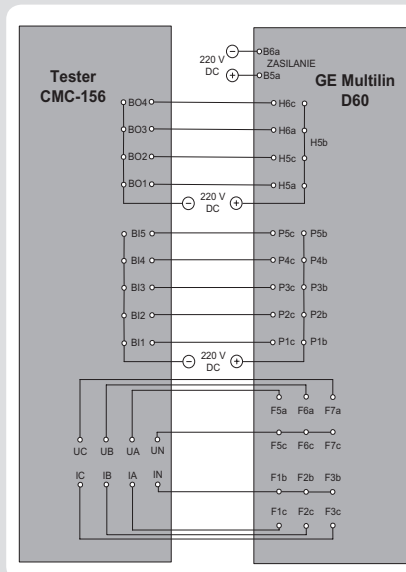
Rys. 3. Idea koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych w układzie współbieżnym z przyzwoleniem (PUTT); gdzie: W – wyłączniki, PP – przekładniki prądowe, PN – przekładniki napięciowe, OW – sygnały otwarcia wyłączników, RZ – urządzenia zabezpieczeniowe, SEE – system elektroenergetyczny, K – miejsce zwarcia, DCE – urządzenia telekomunikacyjne, Tx – nadajniki, Rx – odbiorniki



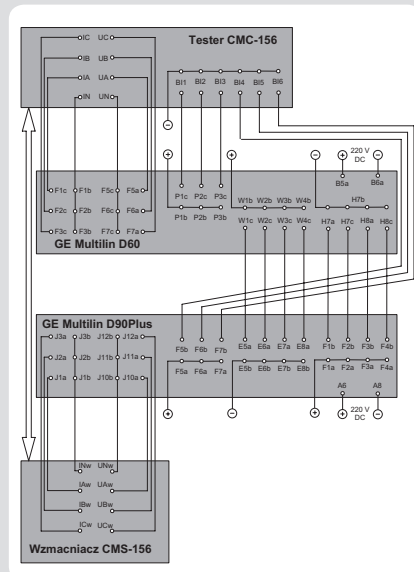
Rys. 4. Idea koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych w układzie POTT; gdzie: W – wyłączniki, PP – przekładniki prądowe, PN – przekładniki napięciowe, OW – sygnały otwarcia wyłączników, RZ – urządzenia zabezpieczeniowe, SEE – system elektroenergetyczny, K – miejsce zwarcia, DCE – urządzenia telekomunikacyjne, Tx – nadajniki, Rx – odbiorniki



Rys. 5. Idea koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych w systemie DCB; gdzie: W – wyłączniki, PP – przekładniki prądowe, PN – przekładniki napięciowe, RZ – urządzenia zabezpieczeniowe, SEE – system elektroenergetyczny, K – miejsce zwarcia, DCE – urządzenia telekomunikacyjne, Tx – nadajniki, Rx – odbiorniki, td – zwłoka czasowa



Rys. 6. Schemat połączeń badanego urządzenia D60 z testerem CMC-156 podczas testów syntetycznych automatyk współpracy z łączem (I etap badań)



Rys. 7. Schemat połączeń układu do badania rzeczywistej koordynacji pomiędzy urządzeniami D60 i D90Plus (II etap badań)

W przypadku zwarcia wewnętrznego (widzianego w kierunku „do przodu” przez oba przełączniki 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. Tym razem jednak przesyłany jest sygnał odblokowujący wyłączenie szybkie.

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

3. Specjalne układy koordynacji

Niektóre urządzenia zabezpieczeniowe są wyposażone w unikatowe rozwiązania współpracy zdalnej. Jednym z przykładów jest funkcja Hybrid POTT, dostępna w wielu urządzeniach serii UR firmy GE Multilin. Została ona zaprojektowana do zastosowań trójterminalowych (np. w liniach dwutorowych) i wykorzystuje dodatkowe zaawansowane funkcje (takie jak ECHO lub nastawione wstecznie funkcje zabezpieczenia odległościowego i/lub ziemnozwarciowego kierunkowego) w celu zwiększenia niezawodności w specjalnych przypadkach systemowych, takich jak warunki słabego zasilania.

Co więcej, funkcje koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych nie muszą być wyłącznie rozwiązaniami predefiniowanymi producentów urządzeń. Nowoczesne terminale posiadają zazwyczaj rozbudowaną wewnętrzną logikę programowalną, która daje możliwość realizacji własnych układów koordynacji działania (na przykład rozwiązanie zaprezentowane w [9]), wykorzystujących wybrane sygnały wewnętrzne, zewnętrzne oraz samodzielnie zdefiniowane warunki rozruchowe.

Szeroki wybór standardów i protokołów komunikacyjnych, dostępnych w nowoczesnych urządzeniach zabezpieczeniowych, dodatkowo rozszerza pulę możliwych sposobów realizacji współpracy międzyterminalowej.

4. 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. Uproszczony schemat połączeń dla pierwszego etapu testów został zaprezentowany na rys. 6.

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

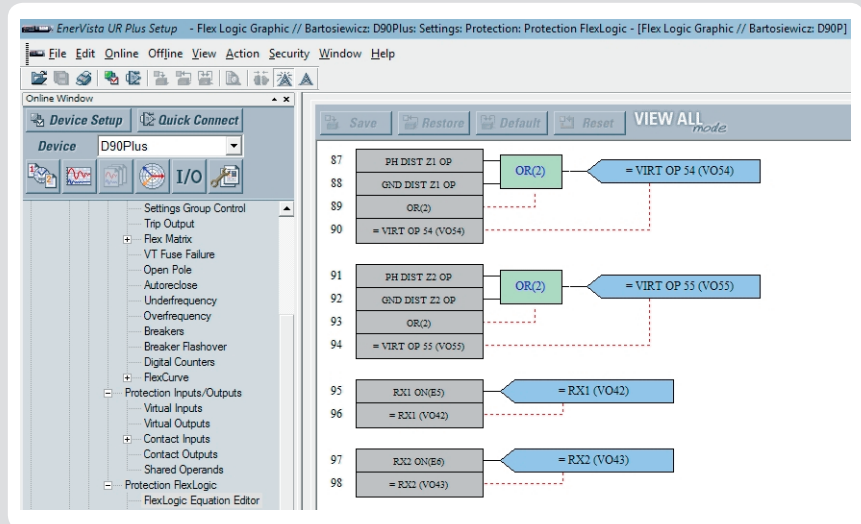
kodowanie sygnałów w urządzeniach serii UR pozwala na przekazywanie informacji nie tylko o wystąpieniu zwarcia, ale także o jego rodzaju i fazach nim objętych. Sekwencje testowe, symulujące odpowiednie rodzaje zwarć, były każdorazowo projektowane i wymuszane (prądy i napięcia w każdej z faz) za pomocą modułu *Omicron State Sequencer* (rys. 10), wchodzącego w skład środowiska *Omicron Test Universe*.

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 rzeczywistej koordynacji pomiędzy dwoma urządzeniami

Schemat połączeń układu testowego dla drugiego etapu badań został przedstawiony na rys. 7. 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 terminalu [7] i jego funkcji współpracy z łączem została zrealizowana przy wykorzystaniu dedykowanego oprogramowania *EnerVista UR Plus Setup* (rys. 9).

Drugi etap testów został przeprowadzony w celu 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.



Rys. 9. Widok programu *EnerVista UR Plus Setup* dla konfiguracji terminalu D90Plus; po lewej stronie drzewo funkcji urządzenia, po prawej – okno graficznej reprezentacji nastaw logiki programowalnej urządzenia (*Flex Logic*)

Wszystkie przetestowane układy koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych pracowały poprawnie dla wszystkich rodzajów symulowanych zwarć, z wyraźnym przyspieszeniem zadziałania przełącznika zdalnego podczas bliskich zwarć wewnętrznych (rys. 10).

6. Testy porównawcze różnych rodzajów łącza komunikacyjnego

Ostatni etap (III) badań laboratoryjnych miał na celu porównanie różnych rodzajów łącz 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. Uproszczony schemat połączeń został przedstawiony na rys. 8.

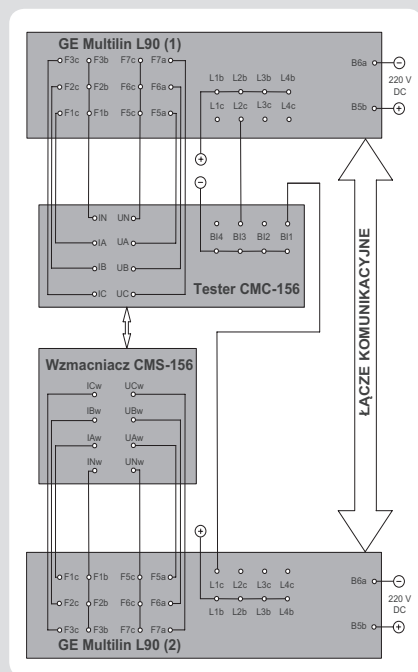
Do przeprowadzenia testów potrzebne były wyłącznie dwa wejścia dwustanowe testera CMC-156 – po jednym na sygnał wyłączający z obu urządzeń L90.

Najistotniejszym zagadnieniem są opóźnienia zadziałania przełącznika zdalnego względem lokalnego, odnotowane przy zastosowaniu poszczególnych rodzajów łącza transmisyjnego, oraz różnice pomiędzy nimi. Pomiary (rys. 11) dla każdego z połączeń zostały wykonane wielokrotnie dla transmisji w każdym z kierunków. Ich uśrednione wartości (dla obu kierunków transmisji sygnału) zebrano w tab. 1.

W przypadku braku koordynacji opóźnienie zadziałania przełącznika zdalnego przekracza 500 ms. Związane jest to z jego działaniem w drugiej strefie.

Wykorzystanie automatyki POTT zapewnia obniżenie wartości tego opóźnienia do kilku-kilkunastu milisekund. Najmniejsze opóźnienie zostało odnotowane w bezpośrednim połączeniu 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 – ok. 14 ms. Niewielka zwłoka czasowa działania przełącznika zdalnego w przypadku bezpośredniego połączenia wejść/wyjść dwustanowych przełączników serii D (poprzedni etap badań), wynosząca ok. 6 ms, wynika z wykorzystania szybkich (statycznych) wyjść dwustanowych typu Form-C.

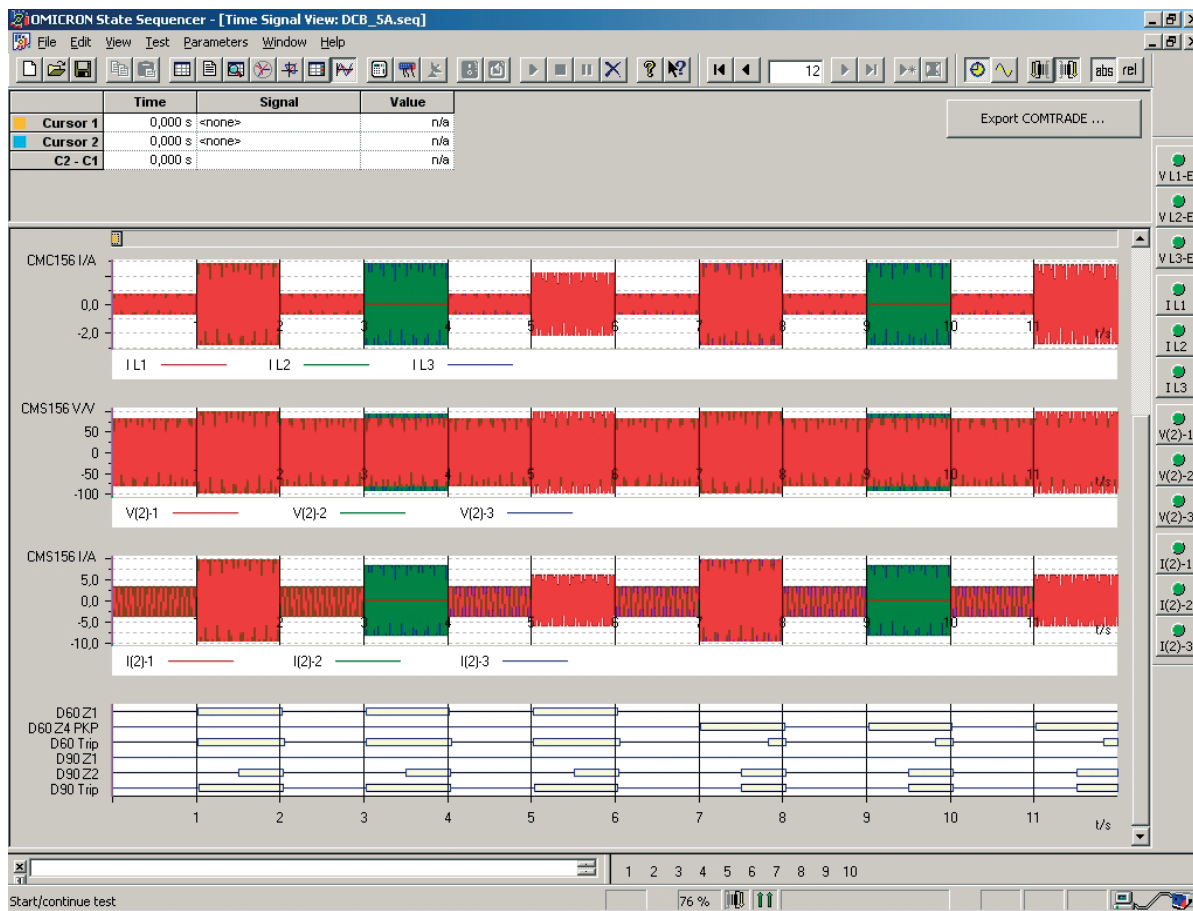
Dodatkowe opóźnienie wprowadzane przez sieć cyfrową SDH (tab. 2) jest różne dla poszczególnych standardów telekomunikacyjnych. Dla transmisji w standardzie C37.94 sieć SDH generuje opóźnienie o ok. 40% większe (2 ms) niż dla protokołu Ethernet/IEC61850. Jest to spowodowane odmiennym dla obu standardów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



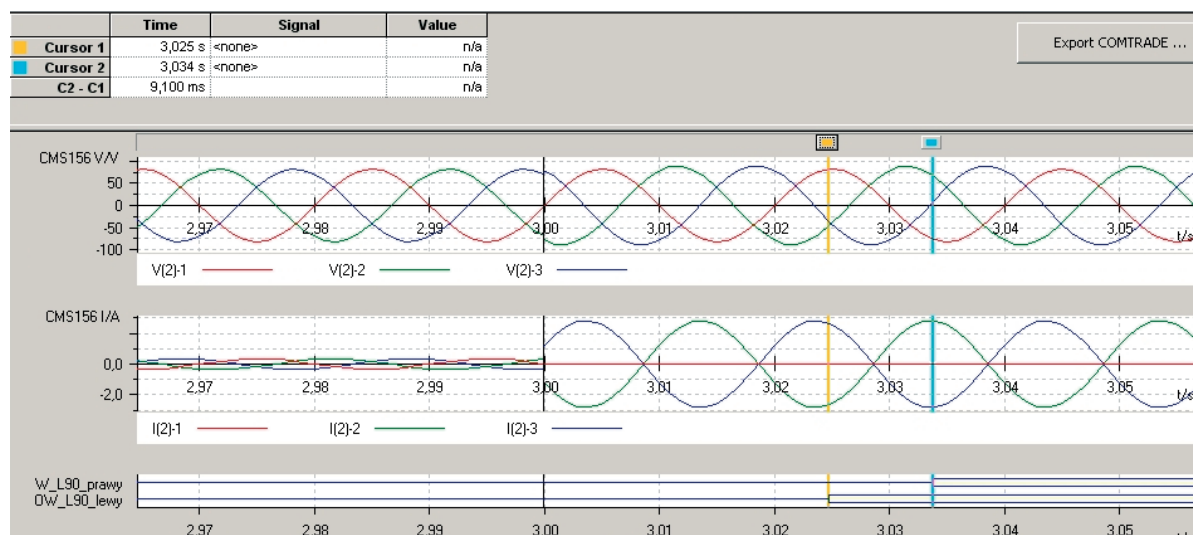
Rys. 8. Schemat połączeń układu do badania dla różnych rodzajów łącza telekomunikacyjnego (III etap badań)

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 (switch)	5,1
Połączenie w standardzie Ethernet/IEC61850 (GOOSE/GSSE) przez przełączniki i sieć cyfrową SDH	10,4
Bezpośrednie połączenie optyczne (światłowod 820 nm, G.651) w standardzie C37.94	6,9
Łącze optyczne w standardzie C37.94, wprowadzone do sieci cyfrowej SDH	14,1

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



Rys. 10. Przykładowe wyniki testów systemu DCB (z kodowaniem 4-bitowym) dla sześciu rodzajów zwarć (symulowanych w parzystych sekundach sekwencji): pierwsze trzy zwarcia wewnętrzne, a drugie trzy zewnętrzne (w każdej trójce kolejno zwarcie trójfazowe, dwufazowe i jednofazowe); gdzie: Z1, Z2, Z4 – strefy 1, 2 i 4 (wsteczna); PKP – pobudzenie przekaźnika w danej strefie; Trip – mierzone zadziałanie danego przekaźnika (odpowiadające wysłaniu sygnału na otwarcie wyłącznika)



Rys. 11. Przykładowy pomiar opóźnienia zadziałania przekaźnika zdalnego (L90_prawy) względem lokalnego (L90_lewy) dla zwarcia międzyfazowego

2 Mb/s), wobec kontenera VC-3 (przepływność ok. 50 Mb/s) dla połączeń w protokole IEC61850 (mechanizm GOOSE/GSSE). Asymetria kierunkowa opóźnienia, wprowadzanego 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 (tab. 3). W tym przypadku jest już ona

Protokół komunikacyjny		Ethernet / IEC61850	C37.94
Moduł multiplexera SDH (TN1Ue firmy GE Multilin)		ETHER-100	DATA-NX64F
Opóźnienie sieci SDH [ms]	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
Asymetria kierunkowa / (1) – (2) / [ms]		–0,3	0,5

Tab. 2. Zestawienie wartości opóźnień wprowadzanych przez sieć cyfrową SDH

Łącze komunikacyjne	Opóźnienie czasu zadziałania [ms]		Różnica kierunkowa [ms]
	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
Średnio:			1

Tab. 3. Zestawienie czasów zadziałania przekaźników z rozróżnieniem kierunku transmisji

zdeteminowana kierunkowo – opóźnienie było zawsze mniejsze podczas pracy przekaźnika L90 (1) jako zdalnego.

7. Wnioski końcowe

Różnorodność zarówno dostępnych automatyk współpracy z łączem, jak i możliwych kanałów transmisyjnych, pozwala na dostosowanie optymalnego układu koordynacji zabezpieczeń dla zróżnicowanych warunków technicznych i konfiguracji pracy.

Testy zarówno syntetyczne, jak i rzeczywistej współpracy między zabezpieczeniami

wykazały zdolność badanych urządzeń serii UR do skutecznej realizacji założonych zadań we wszystkich symulowanych przypadkach systemowych. Współczesne urządzenia zabezpieczeniowe charakteryzują się dużą funkcjonalnością i ogromnymi możliwościami konfiguracyjnymi.

Niezależnie od zastosowanego układu koordynacji i rodzaju łącza transmisyjnego przyspieszenie zadziałania przekaźnika zdalnego przy zwarcu bliskim jest znaczące – o rząd lub nawet dwa rzędy wielkości. Opóźnienie względem bezzwłocznego przekaźnika lokalnego jest przy tym niewielkie

– znacznie mniejsze od typowych czasów zadziałania szybkiego badanych urządzeń zabezpieczeniowych (20–30 ms).

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* 2008, No. 11, s. 20–26.
3. Kowalik R., Januszewski M., Tests of power system protections using SDH network, *Electrical Review* 2009, No. 4, s. 142–150.
4. Kowalik R., Januszewski M., Rasolomampionona D., Problems Found During Testing Synchronous Digital Hierarchical Devices Used on Power Protection Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 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* 2009, No. 6, s. 195–201.

Emil Bartosiewicz

mgr inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: emil.bartosiewicz@ien.pw.edu.pl

Studia inżynierskie i magisterskie, na kierunku elektrotechnika, ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej (specjalność elektroenergetyka). Od 2012 roku doktorant w Instytucie Elektroenergetyki PW. Jego zainteresowania dotyczą urządzeń automatyki elektroenergetycznej oraz zastosowań nowoczesnych rozwiązań teleinformatycznych w elektroenergetyce.

Ryszard Kowalik

dr inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: ryszard.kowalik@ien.pw.edu.pl

Od 1995 roku pracuje w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. Jest współautorem nowoczesnych laboratoriów zabezpieczeń cyfrowych oraz techniki mikroprocesorowej uruchomionych w Zakładzie Automatyki IEN. Jego zainteresowania zawodowe dotyczą urządzeń automatyki elektroenergetycznej, układów synchronizacji oraz systemów telekomunikacyjnych.

Marcin Januszewski

dr inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: majanusz@ien.pw.edu.pl

Od 1995 roku pracuje w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. W 2002 roku został adiunktem w Zakładzie Automatyki Elektroenergetycznej PW. Jego zainteresowania zawodowe dotyczą urządzeń automatyki elektroenergetycznej, układów zdalnego dostępu do zabezpieczeń oraz systemów telekomunikacyjnych.