

Krzysztof Wronek, Piotr Urbański, Wiesław Gil, Paweł Salomon
MIKRONIKA

Nadzór on-line linii kablowych w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć¹⁾

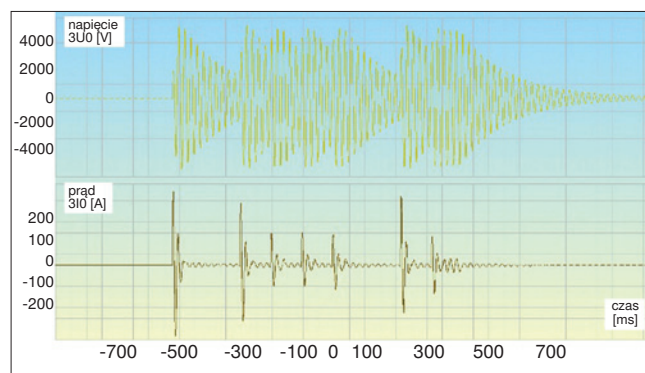
On-line supervision of cable lines in medium voltage distribution networks

Zwarcia przerywane

Instalowanie źródeł odnawialnych o coraz większych mocach i bardziej rozległych obszarach prowadzi do rozbudowy sieci kablowych. Zwiększa się także nasycenie liniami kablowymi sieci dystrybucyjnych. Występujące w tych sieciach częste wzrosty i spadki napięć oraz częste przełączenia wraz z towarzyszącymi im szybkimi przepięciami prowadzą do postępującej degradacji izolacji stosowanych kabli. Utracie właściwości izolacyjnych towarzyszą tzw. zwarcia doziemne przerywane (ang. Intermittent Earth Fault, IEF), objawiające się krótkotrwałymi pikami prądowymi, obserwowanymi podczas przepięć i wzrostów napięć [1]. Zaburzenia te nie są wykrywane przez klasyczne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. W efekcie dochodzi niekiedy do gwałtownego zniszczenia kabla.

Utrata właściwości izolacyjnych kabla może wynikać z naturalnych procesów starzenia izolacji powodowanych wzrastającym zawilgoceniem, tzw. drzewieniem, czyli wnikiem jonów metali w warstwy izolacyjne, depolimeryzacją prowadzącą do osłabienia warstw izolacyjnych. Powyższe procesy mogą być intensyfikowane wskutek błędów montażowych, a także nieprawidłowości konstrukcyjnych polegających na stosowaniu zbyt cienkich warstw izolacyjnych lub niewłaściwych materiałów.

Z czasem zaczynają powstawać szczeliny i wtrącenia w materiale izolacyjnym kabla. Wskutek pogorszenia właściwości izolacyjnych i zmiany rozkładu pola elektrycznego będą się generowały wyładowania niezpełne (wnz). Ich poziom będzie znacząco się podnosił podczas przepięć występujących w trakcie operacji łączeniowych oraz awarii. Pojawiają się wtedy charakterystyczne, stronne „piki” prądowe w przebiegu prądu nieuszkodzonych faz, pokazane na rysunku 1.



Rys.1. „Piki” prądowe towarzyszące zwarciom doziemnym przerywanym

W początkowej fazie degradacji kabla piki te powstają jedynie wtedy, gdy chwilowe wartości napięcia w kablu, wywołane np. działaniem reklozera w trakcie likwidacji zwarcia lub innym przepięciem, będą przewyższały napięcie zapiętna. Zwarcia doziemne przerywane często występują w sieciach skompensowanych, tj. uziemionych przez cewkę Petersena. Są one trudne do wykrycia przez typowe zabezpieczenia ziemnozwarciowe, ponieważ wartości rozruchowe są przekroczone tylko przez krótki czas [2].

Zapobieganie niespodziewanej awarii

Ocena stanu technicznego linii kablowych SN opiera się na wynikach badań diagnostycznych wykonywanych za pomocą sprzętu pomiarowego mobilnych laboratoriów, co określony przedział czasu, najczęściej co kilka lat. W ich zakres wchodzi poniżej wymienione próby:

- pomiar rezystancji izolacji i współczynnika strat dielektrycznych tgδ,
- próba napięciowa izolacji napięciem stałym lub napięciem wolnozmennym o częstotliwości 0,1 Hz,

¹⁾ Artykuł „Nadzór on-line linii kablowych w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć” jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0391/17 „Modułowy system automatyki przemysłowej z magistralą SWIFT”.

- próba napięciowa napięciem stałym powłoki zewnętrznej kabli z tworzyw sztucznych,
- pomiar poziomu wnz.

Istotną wadą wymienionych badań jest konieczność wykonywania w trybie off-line, wymagającym wyłączenia badanych odcinków linii kablowych, co prowadzi do utraty zasilania przez wielu odbiorców. Pogarszają się zatem wskaźniki SAIDI oraz SAIFI [3]. Jednak przede wszystkim badania off-line nie zapewniają wykrycia przesłanek nadchodzącej awarii, ponieważ w okresach pomiędzy badaniami diagnostycznymi może dojść do przyspieszenia procesów starzeniowych. Objawem takiego stanu może być wystąpienie i intensyfikacja zwarć doziemnych przerywanych.

Wymienione przesłanki wskazują na celowość rozwiązań on-line monitorujących cały czas stan linii energetycznej. Identyfikacja tego typu zakłóceń powinna umożliwić wytypowanie fragmentu sieci, w którym znajduje się kabel o znacznej degradacji. Informacja o występowaniu zwarć doziemnych powinna być przekazywana do systemu zarządzającego pracą sieci dystrybucyjnej. Po przekroczeniu zadanego progu intensywności zwarć przerywanych byłoby możliwe wyłączenie linii przez operatora. Wyniki analizy danych mogą stać się przesłanką do przyspieszonej diagnostyki lub wymiany odcinków linii zagrożonych awarią. W Polsce tego typu zabezpieczenia nie są jeszcze powszechnie stosowane.

Urządzenie zabezpieczeniowe

Powyższe zadania spełnia nowatorskie urządzenie, pokazane na rysunku 2. Integruje ono „klasyczne” funkcje zabezpieczeniowe z modułem zabezpieczeń od zwarć doziemnych przerywanych. Realizuje ponadto funkcje sygnalizatora zwarć oraz wielokanałowego rejestratora zakłóceń. Posiada wbudowane funkcje sterownicze oraz telemechaniki. Jego konstrukcję oparto na modułowej platformie sprzętowej SO-52v21 z szybką wewnętrzną magistralą komunikacyjną „SWIFT”.



Rys. 2. Sygnalizator zwarć z funkcją detekcji zwarć doziemnych przerywanych

Rozbudowana wersja urządzenia zawiera jednostkę centralną, 3 moduły pomiarowe oraz 2 moduły wejść i wyjść binarnych. Pomiar prądów i napięć fazowych jest wykonywany za pomocą sensorów. Wartości prądu $3I_0$ oraz napięcia $3U_0$ są obliczane na podstawie pomiarów w poszczególnych fazach. Urządzenie wyposażono w 32 wejścia dwustanowe oraz 8 wyjść sterowniczych. Pełni ono funkcję trzech niezależnych sygnalizatorów zwarć, umożliwiających detekcję zwarć doziemnych przerywanych.

Algorytm wykrywania zwarć przerywanych bazuje na analizie sygnałów potrójnych składowych zerowych prądu i napięcia ($3I_0$ oraz $3U_0$). Są one próbkowane z częstotliwością 6,4 kHz i poddane wstępnej obróbce. W kolejnym kroku obliczane są następujące parametry:

- maksymalna wartość bezwzględna napięcia $3U_0$ w oknie 20 ms,
- prąd detekcji jako suma kilku ostatnich wartości pochodnej prądu $3I_0$,
- odchylenie standardowe prądu detekcji w oknie 20 ms do określenia progu adaptacyjnego,
- moc składowych zerowych.

Wykrywanie pików prądu $3I_0$ polega na zliczaniu lokalnych maksimum sygnału w zależności od amplitudy i bieżącej wartości progu. Dodatkowo musi zostać przekroczony próg napięcia $3U_0$. Znak mocy składowych zerowych określa kierunek. Kierunek „w przód” oznacza obszar w kierunku odbiorcy, a kierunek „w tył” – obszar w kierunku stacji zasilającej. Odpowiednia liczba „pików” występujących po sobie w wystarczająco krótkim czasie powoduje wystąpienie informacji do systemu nadrzędnego.

Opracowane urządzenie integruje w sobie także „klasyczne”, poniżej wymienione funkcje zabezpieczeniowe [4]:

- nadprądowe zwarciove $I >>$ (ANSI 50),
- nadprądowe zwłoczne $I >$ (ANSI 51),
- uszkodzony / zerwany przewód (ANSI 46BC),
- zerowoprądowe $I_0 >$ (ANSI 50N),
- zerowoprądowe kierunkowe $10k >$ (ANSI 67N),
- admitancyjne / konduktancyjne / susceptancyjne (ANSI 67YN).

Weryfikacja funkcjonalności

Funkcjonalność urządzenia zweryfikowano korzystając z modułu testowego Test Universe firmy Omicron. Wymuszano przebiegi odtwarzające rzeczywiste zwarcia doziemne przerywane o wiadomym kierunku. Sprawdzano reakcję urządzenia oraz poprawność generacji poszczególnych sygnałów. Przeanalizowano zadziaania algorytmu korzystając z bazy kilkudziesięciu zarejestrowanych sytuacji zwarciowych z określonymi miejscami i kierunkami występowania pików, aby określić skuteczność algorytmu. Korzystano ze specjalnie przygotowanego oprogramowania.

Testy wykazały 98,9% skuteczności wykrywania pików we właściwych momentach czasowych. Kierunek zaburzeń był prawidłowo wyznaczony w 98% przypadków. Fałszywe detekcje pików w miejscu, w którym nie powinien zostać wykryty, stanowiły jedynie 1% ogółu przypadków. Łączny wskaźnik precyzji metody, określony jako różnica liczby prawidłowo wykrytych pików w poprawnym kierunku do wykrytych nadmiarowo lub w złym kierunku, wyniósł ponad 96%.

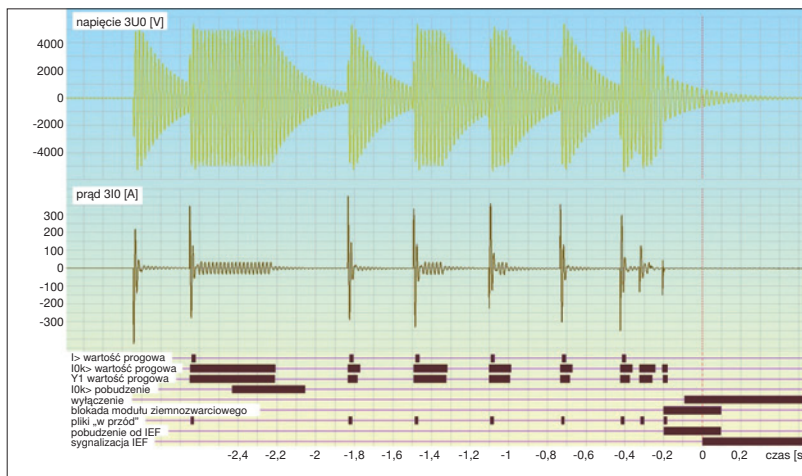
Wdrożenie

Zabezpieczenie wdrożono na obszarze jednego z operatorów sieci dystrybucyjnej w Finlandii, gdzie najczęściej są spotykane sieci skompensowane. Zdarzają się też sieci z punktem neutralnym izolowanym. W warunkach normalnej pracy fińska sieć dystrybucyjna jest niedokompensowana, co niesie ze sobą zagrożenia. Po wyłączeniu linii, a więc zmniejszeniu się prądu pojemnościowego, może wystąpić rezonans. W sieci przekompensowanej taka sytuacja nie wystąpi, gdyż po wyłączeniu linii współczynnik kompensacji wzrasta i nie dochodzi do rezonansu.

Wadą tego typu sieci jest również charakter pojemnościowy prądu ziemnozwarciowego. Fakt ten wprowadza gorsze warunki wygaszenia łuku, gdyż fazor prądu wyprzedza fazor napięcia [5]. W Polsce stosowana jest kompensacja centralna, wykorzystująca cewki Petersena wpięte w punkt neutralny transformatora potrzeb własnych w stacji energetycznej WN/SN. W Finlandii stosuje się kompensację rozproszoną. Oprócz cewek Petersena w stacji głównej instaluje się wiele mniejszych cewek w głębi sieci dystrybucyjnej.

Zainstalowano również kilka sygnalizatorów w różnych punktach linii i wykonano próby zwarcia dla dwóch różnych lokalizacji zwarcia. Testy obejmowały zvarcia doziemne o różnych rezystancjach przejścia, od metalicznych po wysokooporowe do 5 k Ω . Zvarcia doziemne przerywane były generowane poprzez uszkodzony, celowo zainstalowany kabel. Korzystano także z iskiernika o wyregulowanej przerwie, tak aby w trakcie próby zvarciowej dochodziło do przeskoków iskry pomiędzy elektrodami. Zasymlowano również zvarcie trójfazowe w celu oceny działania zabezpieczeń od zvarc międzyfazowych. Próby wykonywano dla sieci o różnym stopniu kompensacji ziemnozwarciowej: normalnej – niedokompensowanej o 5 A, niedokompensowanej o 30 A, przekompensowanej o 30 A.

Wykonane próby potwierdziły poprawne funkcjonowanie urządzeń. Zvarcia doziemne były wykrywane prawidłowo niezależnie od sposobu kompensacji ziemnozwarciowej oraz od rezystancji przejścia, a kierunek zvarcia był poprawnie określany. Próba dotycząca zvarc międzyfazowych również zakończyła się powodzeniem.



Rys. 3. Zadziałanie modułu IEF podczas prób zwarcia

Na rysunku 3 przedstawiono zadziałanie zabezpieczenia od zvarc doziemnych przerywanych. Po dwóch pierwszych pikach wystąpił ciągły łuk, podczas którego pobudziły się klasyczne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Przerwy pomiędzy kolejnymi pikami były za długie, aby wywołać pobudzenie modułu IEF. Pobudzenie wywołały dopiero trzy końcowe piki.

Podsumowanie

Urządzenie automatyki zabezpieczeniowej z sygnalizatorem zvarc i modułem identyfikacji zvarc przerywanych może sygnalizować wzrastające zagrożenie nagłą awarią. Przeprowadzone testy laboratoryjne potwierdziły wysoką, 96-procentową skuteczność wykrywania kierunku zvarc przerywanych doziemnych. Urządzenie zweryfikowano w warunkach rzeczywistych linii SN, w trakcie wymuszanych zvarc przerywanych. Zaimplementowany algorytm wykrywa zvarcia przerywane niezależnie w obydwu kierunkach: w przód oraz w tył.

Informacje o wykryciu zvarcia przerywanego mogą być wysyłane do systemu SCADA.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Olejnik B., *Doziemne zvarcia przerywane w sieci średniego napięcia*, Poznan University of Technology „Academic Journals – Electrical Engineering” 2017, No. 90, s. 101-112.
- [2] Łowczewski K., Olejnik B., *Monitoring, Detection and Locating of Transient Earth Fault Using Zero-sequence Current and Cable Screen Earthing Current in Medium Voltage Cable and Mixed Feeders*, „Energies” 2022, No 1, <https://doi.org/10.3390/en15031066>.
- [3] Gruza W., Wojciechowski J., *Ocena awaryjności linii kablowych SN i nN na wybranym obszarze zasilania*, „Logistyka – Nauka” 2011, nr 6, s. 1267-1273.
- [4] IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations, IEEE Std C37.2 – 2008.
- [5] Hoppel W., *Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażeń*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2017.

MIKRONIKA Sp. z o.o.

ul. Wykopy 2/4, 60-001 Poznań,

tel.: +48 61 6655 600, e-mail: biuro@mikronika.pl, www.mikronika.pl

