



Arkadiusz WAKIEĆ¹, Jacek RÓZGA¹, Marek OLESZ²

Energa S.A. Gdańsk (1), Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki (2)

Wykorzystanie pomiarów jakości energii elektrycznej do analizy zwarć w systemie elektroenergetycznym

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki rejestracji doziemień oraz innych stanów nieustalonych w sieciach średniego napięcia (SN) Polski Północnej wykonanych za pomocą analizatorów jakości zasilania. Przebiegi nieustalone towarzyszące zwarciom w sieciach SN mogą być punktem wyjścia do określenia rodzaju zwarcia, poziomu generowanych przepięć, weryfikacji poprawności doboru ograniczników przepięć, analizy pracy układów wymuszających składową czynną prądu zwarcia. Dane uzyskane z analizatorów jakości energii mogą być również pomocne w analizach statystycznych niezawodności poszczególnych elementów toru elektroenergetycznego. W referacie opisano także sposoby rejestracji stanów przejściowych wykonywanych przy użyciu różnych przyrządów.

Abstract. (Using of electric power quality measurements for analysis of short circuits in power system). The paper presents some records of earth fault short circuits and other non-steady states at medium voltage networks at the North of Poland. Transients measurements give a possibility of evaluating a type of short circuit, a level of generated transients, a check of choice LPS equipment, and analysis of systems forcing resistive component of short circuit current. The results from power quality measurements can also be helpful in statistic analyses of reliability of power system elements. The methods of transient signal recording in non-steady states of system were also described.

Słowa kluczowe: jakość energii, stany nieustalone, zwarcia, sieci elektroenergetyczne.

Keywords: power quality, transients, short circuits, power systems.

Wstęp

Potrzeby eksploatacji instalacji elektroenergetycznych oraz rozwój elektroniki i procedur związanych z pomiarami parametrów jakościowych energii elektrycznej wymusił pojawienie się na rynku nowoczesnych urządzeń pozwalających na rejestrację i analizę zjawisk szybkozmiennych (np. przepięcia piorunowe, łączeniowe) oraz realizację algorytmów wymagających dużych mocy obliczeniowych (np. pomiar wyższych harmonicznnych, analiza przepływu mocy). W Polsce zakłady elektroenergetyczne korzystają z wymienionych rejestratorów głównie z powodu rozpatrywania zażaleń odbiorców energii na niezgodną z wymaganiami normy [1] i rozporządzenia [2] jakość energii elektrycznej. Przyrządy te przy odpowiednio wykwalifikowanym personelu pozwalają na pomiar stanów nieustalonych, których analiza może pomóc w określeniu przyczyn powstawania uszkodzeń, jak również w zmianie dotychczasowego sposobu eksploatacji elementów sieci elektroenergetycznej.

Przykładowo wiedza na temat stanów przejściowych, ich charakteru, poziomu zakłóceń skorelowana z czynnościami ruchowymi wykonanymi w ciągu liniowym pozwala na zwiększenie odporności lub eliminację powstawania zjawisk rezonansowych. Informacje na temat stanów eksploatacyjnych wewnątrz rozłożonego schematu zastępczego sieci elektroenergetycznej pozwalają na zakup urządzeń odbiorczych o odpowiednich charakterystykach odporności i emisji, zapewniających pełną kompatybilność elektromagnetyczną na poziomie rozsądnego prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń przekraczających założone progi odporności sprzętu.

Brak wiedzy na temat stanów przejściowych w danym miejscu sieci może spowodować nieodwracalne skutki w systemie elektroenergetycznym poprzez nieprawidłowe działanie zabezpieczeń.

Analiza zarejestrowanych stanów nieustalonych może również pomóc we właściwym doborze aparatury elektroenergetycznej i weryfikacji stosowanych procedur koordynacji izolacji.

Problemy w rejestracji stanów nieustalonych

Pewnym problemem w rejestracji zdarzeń krótkotrwałych są dane techniczne rejestratorów przepięć oraz używanie dla celów pomiarowych przekładników sieciowych. W celu obserwacji stanów przejściowych jako źródło sygnału napięciowego wykorzystywane są przekładniki napięciowe zazwyczaj zainstalowane już w obiektach, na których wykonuje się pomiary. Pasma przenoszenia przekładników w znacznym stopniu uzależnione jest od stałych czasowych związanych z prądem magnesowania i obciążenia transformatora pomiarowego szczególnie przy określaniu dolnej granicy częstotliwości poprawnego przenoszenia sygnału. Natomiast górna częstotliwość przenoszenia istotnie zależy od stałej czasowej obwodu złożonego z impedancji rozproszenia i obciążenia uzwojeń. Przy dużych częstotliwościach obserwowanych przebiegów znaczny wpływ zaczynają odgrywać pojemności pasożytnicze samych przekładników jak również elementów wchodzących w skład ich obwodów wtórnych. Nie bez znaczenia dla jakości pomiarów i uzyskanych z nich danych jest również sposób uziemienia uzwojeń przekładników [6].

W praktyce można przyjąć, że typowe przekładniki napięciowe indukcyjne poprawnie przenoszą sygnał o częstotliwości do 1 kHz. Ogranicza to w znacznym stopniu obserwację oraz wnioskowanie dla zjawisk szybkozmiennych w sieciach SN. Pojawiające się rezonanse związane z występowaniem różnych obciążeń uzwojeń oraz pojemności pasożytniczych mogą prowadzić do niepoprawnych wniosków. Obserwacje odkształceń harmonicznnych do rzędu 40 z punktu widzenia praktyki eksploatacyjnej są możliwe z uwagi na silne tłumienie wyższych harmonicznnych przez sam model sieci jak również braku zdecydowanych źródeł takich odkształceń w odniesieniu do mocy zwarciaowej systemu.

Najczęściej w miernikach do pomiarów parametrów jakościowych energii wg [1] stosowane jest próbkowanie na poziomie 128 próbek na okres, a więc co około 150 μ s, co nie jest wystarczające do detekcji krótkotrwałych przepięć. Przyrządy o lepszych parametrach korzystają z kilkukrotnie wyższych częstotliwości próbkowania.

Na przykład przyrząd Metrel MI2292 [4] przy rejestracji stanów nieustalonych (opcja TRANSIENT) zwiększa częstotliwość próbkowania w trybie rejestracji przebiegów do 400 próbek na okres, co daje już 20 punktów na 1 ms (odstęp między próbkami wynosi 50 μ s), a to pozwala już szacować poziom przepięć o krótkich czasach narastania czoła. W szeregu wykonanych prób przyrządem METREL MI2292 potwierdzono poprawne wychwytywanie przepięć łączeniowych i dorywczych oraz wszelkich stanów nieustalonych na poziomie nawet dziesiątych części milisekundy, co jest istotne z punktu widzenia problemów występujących w przypadku stosowania oscyloskopów cyfrowych opisanych w dalszej części referatu.

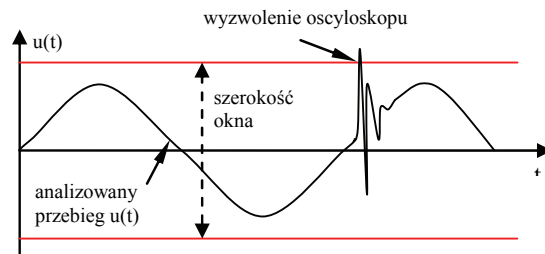
Obecnie dostępne na rynku przyrządy takie jak np. trójfazowy analizator jakości energii FLUKE 435, PowerVisa (Dranetz) lub rejestrator jakości energii Memobox Fluke 1745 mają jeszcze wyższe częstotliwości próbkowania przy braku czasów martwych w analizowaniu poziomu napięcia w sieci [3]. Zgodnie z wymaganiami normy IEC 61000-4-30 posiadają one właściwości zapewniające rejestrowanie parametrów jakościowych w najwyższej klasie A z dokładnością 0,1% przy pomiarze napięcia. Pewnym mankamentem jest ograniczona tylko do 40 przebiegów liczba rejestracji (pamięć 16 MB, przetwornik a/c 16-bitowy), co wynika z zastosowanej wysokiej częstotliwości próbkowania w każdym kanale 200 kS/s, umożliwiającą próbkowanie przebiegów co 5 μ s. Taka wartość daje już szansę określenia przynajmniej wartości szczytowych udarów piorunowych, a nawet prawidłowe odwzorowanie przebiegu w części opadającej. Odporność udarowa wejścia przyrządu jest na poziomie 6 kV wartości szczytowej. Natomiast rozwiązania jednofazowe jak np. Fluke 43B umożliwiają próbkowanie 2 sygnałów (napięcie i prąd) nawet co 40 ns [3].

Analizator dostarczany przez firmę Dranetz – PowerVisa pozwala na prowadzenie jednoczesnej analizy parametrów jakościowych napięcia zasilania, jak również zapis przebiegu stanu przejściowego. Swą uniwersalność zawdzięcza odpowiedniemu zarządzaniu bankami pamięci masowej. Pamięć stała realizowana jest przy użyciu 2 dysków statycznych typu CF. Pozwala to na przypisanie oddzielnego zasobu dyskowego dla przebiegów i rejestracji parametrów jakościowych zgodnie z wymaganiami [1, 2]. Częstotliwość próbkowania wynosi 256 próbek na okres, co pozwala na obserwację zjawisk związanych z doziemieniami, zwarciami i przepięciami łączeniowymi. Znacznym ułatwieniem w prowadzeniu analizy jest również aplikacja służąca do przeglądania wyników pomiarów DranView. Po pobraniu danych z analizatora są one przedstawiane na monitorze komputera w postaci trendu zmian napięcia z ustawionymi znacznikami w miejscach przebiegu gdzie nastąpiła rejestracja stanu przejściowego.

Pewną alternatywą dla wykorzystania analizatorów jakości energii w pomiarach przepięć mogą być oscyloskopy cyfrowe charakteryzujące się bez porównania większymi częstotliwościami próbkowania. Kłopoty zaczynają się w przypadkach monitorowania trzech faz napięcia zasilającego, kiedy konieczne staje się wyzwalanie w każdym z obserwowanych kanałów. Możliwości takie są w oscyloskopach najwyższej klasy poprzez wprowadzenie opcji matematycznych i logicznych. Taka procedura wydłuża jednak czas programowej analizy sygnałów i prowadzi do powstania czasów martwych, kiedy oscyloskop nie analizuje przebiegu i nie wyzwala mimo wystąpienia zdarzeń spełniających określone kryteria. Typowe procedury wyzwalania oscyloskopów za pomocą przepięć wykrywanych tylko w 1 kanale na przykładzie modelu LeCroy Waverunner-2 [5] zestawiono i opisano poniżej: pomiar z wyzwalaniem oknem napięciowym -

funkcja „Window”, pomiar z wyzwalaniem za pomocą maski - funkcja „Pass/Fail – Mask”, pomiar z wyzwalaniem za pomocą funkcji „Smart – Glitch” [5].

Funkcja WINDOW umożliwia skuteczne wyzwalanie oscyloskopu przepięciami obu biegunowości przekraczającymi zadane poziomy odpowiednio dla napięć dodatnich i ujemnych (rys. 1). Niestety wyzwalanie występuje tylko dla wskazanego kanału oscyloskopu, co nie pozwala na skuteczny monitoring przepięć we wszystkich fazach.



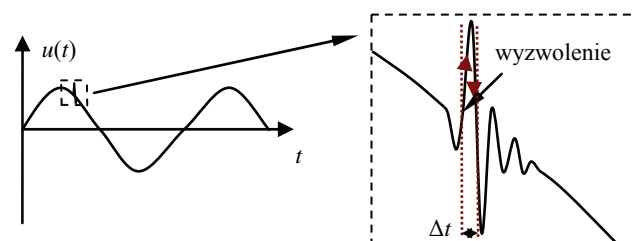
Rys. 1. Wyzwalanie oscyloskopu przepięciem w trybie WINDOW

Analiza przepięć w układach trójfazowych jest możliwa zazwyczaj przy korzystaniu funkcji maski i alternatywnego wyzwalania kolejnymi kanałami. W takim przypadku procedura koniecznych obliczeń wydłuża czas martwy oscyloskopu, co pokazano w tabeli 1. W tabeli 1 można zaobserwować, że w przypadku monitorowania 3 – fazowego zasilania rejestrowano zaledwie 20% udarów występujących w napięciu zasilającym co 2 sekundy.

Tabela 1. Wyniki badań prawdopodobieństwa wyzwalenia oscyloskopu Lecroy Waverunner-2 za pomocą generatora udarów napięciowych, objaśnienia do tabeli - nK- liczba badanych kanałów, nM- liczba kanałów wykorzystana do tworzenia maski, n – liczba kanałów

L p.	Typ wyzwalania, liczba kanałów matem.	Próbkowanie	Wyświetlany na ekranie zakres czasowy	Udział wyzwoleń w stosunku do liczby udarów	Odstęp między udarami
		[MS/s]	[ms]	[%]	[s]
1.	1K+1M	1	80	39	2
2.	1K+1M	2,5	80	32	2
3.	1K+1M	5	80	22	2
4.	1K+1M	10	80	11	2
5.	1K+1M	0,5	40	55	2
6.	1K+1M	1	40	49	2
7.	1K+1M	5	40	25	2
8.	1K+1M	1	160	45	2
9.	3K+3M	2,5	80	12	2
10.	3K+3M	1	80	20	2

Z punktu widzenia pomiarów przepięć i zapadów jest to chyba najbardziej efektywne rozwiązanie stosowane zresztą zwykle również w analizatorach parametrów jakościowych energii elektrycznej.



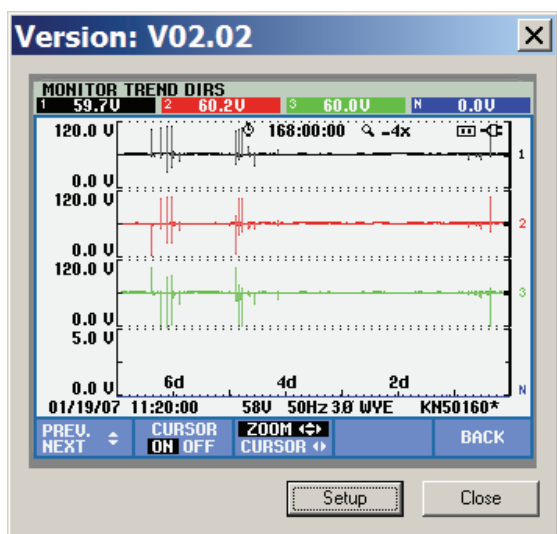
Rys. 2. Wyzwalanie oscyloskopu przepięciem w trybie GLITCH

Ostatnim rozwiązaniem jest zastosowanie opcji wyzwalania typu „Glitch”, która analizuje czas narastania

sygnałów narastających lub opadających (rys. 2). Wyzwolenie oscyloskopu występuje pod warunkiem spełnienia zadeklarowanego przez użytkownika warunku logicznego dotyczącego określonych granic czasowych. Pewną odmianą tej funkcji spotykaną w niektórych oscyloskopach jest wyzwolenie czasem przejścia – funkcja „Transition Time”, która polega na analizie przez układ wyzwalający pochodnej napięcia względem czasu z dodatkowo wskazanym znakiem pochodnej, tj. zbocze narastające lub opadające.

Przykłady zwarć w sieci SN

W okresie jesienno zimowym wykonano pomiary jakościowe na terenie GPZ Opalino. Celem nadrzędnym było sprawdzenie jakości napięcia w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej o mocy osiągalnej 8,4 MW. Elektrownia przyłączona jest do systemu za pośrednictwem kabla SN o długości 5,7 km. Pozostałe pola obejściowe w GPZ zasilają okoliczne miejscowości o charakterze typowym dla obszarów wiejskich z przemysłem przetwórczym usytuowanym w strefie ekonomicznej Żarnowiec. Przeprowadzony pomiar wykazał występowanie na obszarze linii napowietrznych prowadzonych przez obszary leśne licznych doziemień typowych dla okresów silnie wietrznych. Pomiar wykonywano przy użyciu przyrządu Fluke 434 ustawionego w tryb rejestracji „monitor”. Tryb ten pozwala na zarejestrowanie oprócz napięcia uśrednionego za okres 10 minut wymaganego przez rozporządzenie [2] dodatkowo najmniejszej i największej wartości skutecznej RMS obliczonej za ½ okresu. Możliwe jest również odczytanie histerezy czasowej dla przekroczenia dopuszczalnych parametrów obserwowanego przebiegu. Na rysunku 3 przedstawiono zarejestrowane wartości napięcia fazowego w trakcie zjawisk ziemnozwarciowych.

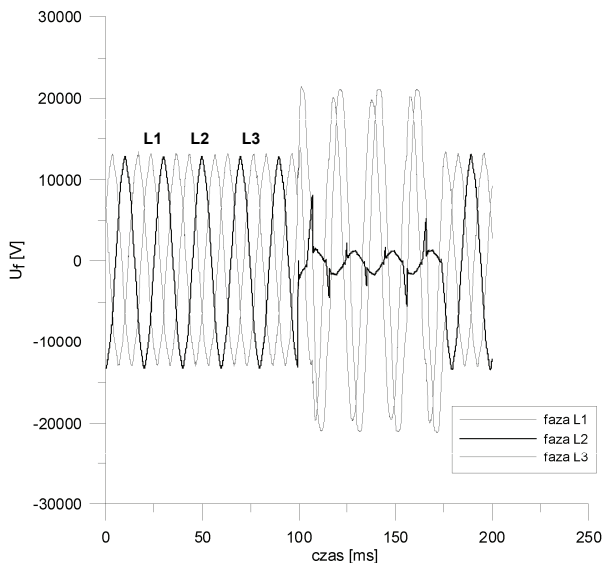


Rys. 3. Rejestracja wielokrotnych doziemień w 7 dniowym okresie obserwacji

Typowy przebieg napięć w poszczególnych fazach po stronie SN przy doziemieniu w fazie L2 linii kablowej pokazano na rysunku 4. Rejestracji dokonano w jednym z GPZ 110/15 kV na obszarze miasta Gdańska. Ze względu na zastosowany układ pracy sieci, z uziemionym przez rezystor punktem zerowym, doziemienie trwa krótko i zostaje zlikwidowane po około 80 ms. Doziemieniu w fazie L2 towarzyszy wzrost napięcia w fazach L1 i L3, co jest typowym przebiegiem dorywczym o współczynniku przebiecia ok. 1,7.

Na rysunkach 5 i 6 pokazano przebiegi napięć i prądów zarejestrowane rejestratorem PowerVisa w jednym z GPZ

110 kV/15 kV Polskiej Północnej, zlokalizowanym na terenie działania ENERGA S.A. Oddział w Elblągu. W stacji napowietrznej wykonanej w typowym układzie H4 pracują 2 transformatory o mocy $S = 10$ MVA każdy. Punkt zerowy strony pierwotnej transformatorów potrzeb własnych uziemiony jest przez cewkę Petersena.

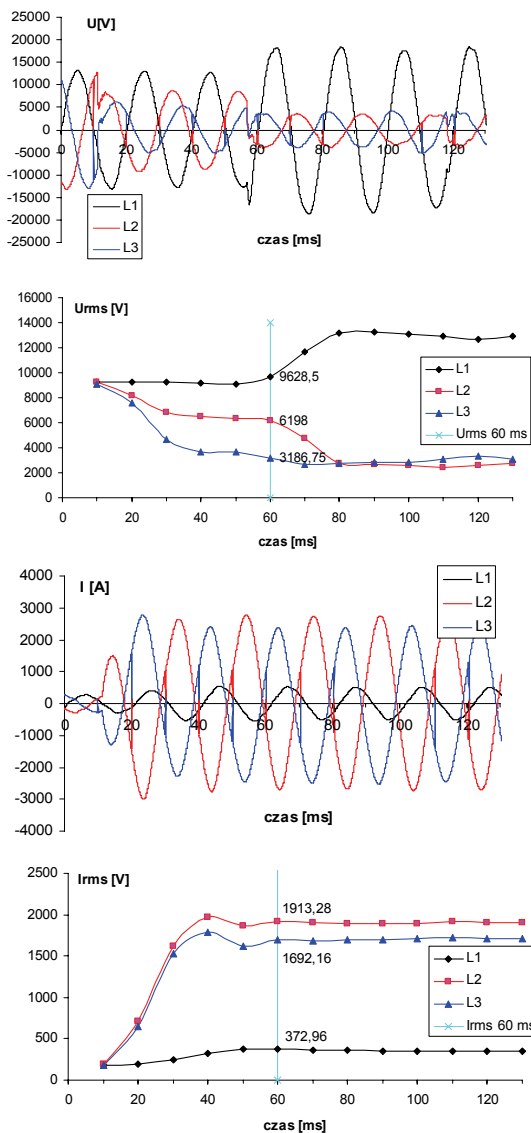


Rys. 4. Przepięcia zarejestrowane w sieci SN przy doziemieniu występującym w fazie L2

Po stronie 15 kV zamontowano ograniczniki przepięć typu GXE o napięciu pracy 17,5 kV. Pomiar wykonano w polu transformatora nr 2 ($S_n = 10$ MVA) po stronie 15 kV, gdzie moc zwarcia na szynach rozdzielni wynosiła 78 MVA. Transformator pracował na obie sekcje. Stacja GPZ była zasilana nietypowo, tj. jednostronnie linią 110 kV stąd niższy poziom mocy zwarcia. Przy normalnym układzie pracy, stacja zasilana jest również drugą linią 110 kV i wówczas moc zwarcia na szynach 15 kV wzrasta do wartości 92 MVA. Przekładniki, przy pomocy których wykonywano rejestracje to: w torze napięciowym przyrządu PowerVisa – przekładnik UT15 (przekładnia 15 kV/100 V), w torze prądowym – przekładnik IT15 (przekładnia 800 A/5 A). Sygnały napięciowy i prądowy wyprowadzono z listwy sk-a, na której dostępne są zaciski stron wtórnych wyżej wymienionych przekładników.

W dniu 8 grudnia 2006 o godzinie 13:39 w linii napowietrznej 15 kV *Lokalna* nastąpiło zdarzenie spowodowane przez ptaka, którego spalone szczątki znalaziono pod stacją T-71180 usytuowaną w odległości ok. 4 km od opisywanego GPZ. Linia zasilająca wyżej wymienioną stację jest wyprowadzona z GPZ kablem do stacji *Kotłownia* (odległość około 2 km), następnie następuje przejście na linię napowietrzną, zasilającą stację T-71180.

Z zarejestrowanego na rysunku 5 przebiegu widać, iż pierwsze zaburzenie dotyczy zwarcia wysokoenergetycznego dwufazowego, które po około 60 ms przechodzi w zwarcie dwufazowe z jednoczesnym doziemieniem z charakterystycznym wzrostem napięcia na fazie L3 do wartości międzyprzewodowej. Dalszy rozwój stanu przejściowego to trwanie w zwarcu dwufazowym z doziemieniem. Ponieważ napięcie na fazach doziemionych ma wartość około 3,3 kV można wnioskować, iż jest to zwarcie odległe. Następnie zwarcie dwufazowe przechodzi w trójfazowe, które po upływie 3 okresów napięcia sieci wykazuje tendencję powrotu do układu początkowego przed zwarciem (rys. 6). Czas trwania okresu przejściowego wynosi około 3 sekund.



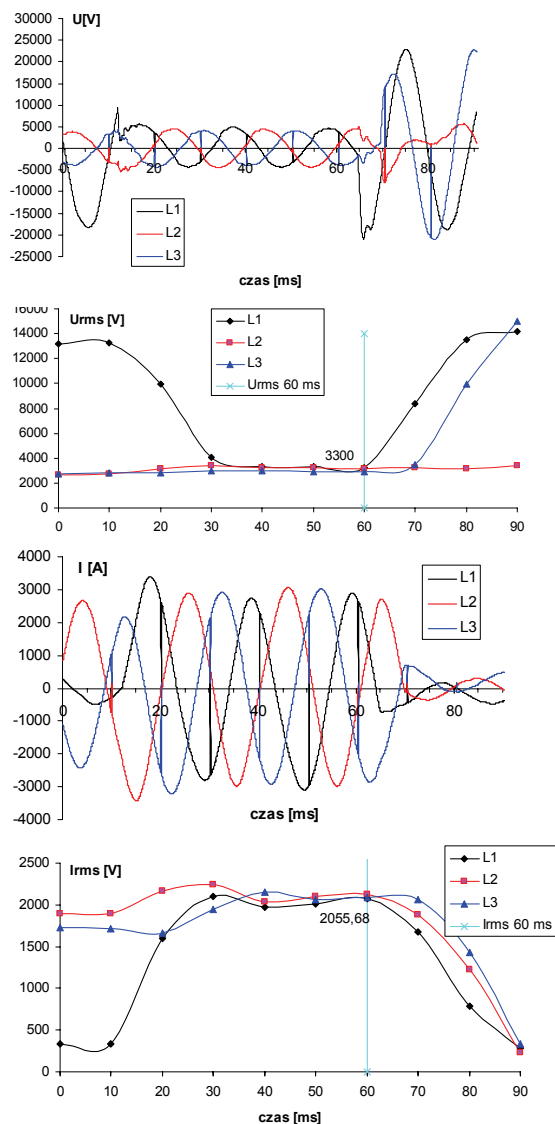
Rys. 5. Przejście zwarcia dwufazowego w dodatkowy stan doziemienia

Wnioski

Analizator JEE użyty do pomiaru wykazał zdolność do przeprowadzenia oprócz typowej analizy jakościowej wg [1, 2] również rejestracji przebiegów nieustalonych. Uzyskane przebiegi pozwoliły na jednoznaczne określenie rodzaju zwarcia, poziomu przepięć i przetężeń.

Zebranie większej ilości informacji w dłuższym okresie czasu może być pomocne w analizie poprawności doboru parametrów prądowych i napięciowych aparatury, a w przypadku uszkodzeń w instalacjach elektroenergetycznych być podstawą określenia przyczyn awarii.

Wykorzystanie wyników pomiarów pozwala ocenić poprawność tworzonych modeli komputerowych systemu elektroenergetycznego, które wspomagają analizę stanów eksploatacyjnych.



Rys. 6. Przejście zwarcia dwufazowego w trójfazowe

LITERATURA

- [1] PN-EN 50160: 2002, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [2] Dziennik Ustaw z 2007 roku, Nr 93, poz. 623, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
- [3] Fluke 2007, Katalog przyrządów pomiarowych
- [4] Metrel, Dokumentacja techniczna przyrządu – Analizator jakości energii plus MI2292, ver 3
- [5] Lecroy Waverunner-2, Dokumentacja techniczna oscyloskopu Waverunner-2
- [6] Łuszcz J., Wpływ przebiegów odkształconych na dokładność układów pomiarowych z przekładnikami napięciowymi, *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, Jurata 2007

Autorzy: mgr inż. Arkadiusz Wakieć, Energa S.A. Gdańsk, e-mail: arkadiusz.wakiec@elblag.energa.pl; mgr inż. Jacek Rózga, Energa S.A. Gdańsk, e-mail: Jacek.Rozga@energa.pl; dr inż. Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, e-mail: molesz@elv.pg.gda.pl