

Trwałe połączenia w uziemieniu rozdzielni

STRESZCZENIE

Prawidłowe uziemienie rozdzielni jest niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa personelu, zarówno pracowników zajmujących się siecią elektryczną, jak i innych osób, a także do zabezpieczenia sprzętu i zminimalizowania przerw w dostawach energii. W systemie uziemienia kluczową rolę odgrywa wiele połączeń uziemiających, wykorzystywanych do wzajemnego łączenia przewodów uziemiających i integracji struktury wewnątrz systemu. Połączenia uziemiające muszą być trwałe i funkcjonować przez cały czas działania instalacji, bez ryzyka powstania korozji bądź wzrostu rezystancji. Przeprowadzono dwa niezależne programy badawcze, w różnych laboratoriach. Celem badań była ocena wydajności połączeń powszechnie wykorzystywanych do uziemiania rozdzielni. Pierwszy program stanowił kompletny test wg wymagań IEEE (Instytutu Inżynierów Elektryków i Elektroników) 837-1987 „Normy IEEE dotyczącej kwalifikacji trwałych połączeń w uziemianiu rozdzielni” [1]. Drugi program obejmował test cyklu prądu termicznego, będący modyfikacją testu cyklu prądowo-temperaturowego zgodnie z normą IEEE 837-1989. W teście zastosowano eksploatowany przewodnik, wydłużono czas i zwiększono poziom prądu. W niniejszym artykule przedstawiono rezultaty zleconych badań. Wyniki wskazują jednoznacznie, że wydajność mechanicznych i zaciskowych łączników uziemienia nie jest równa wydajności połączeń zgrzewanych egzotermicznie. Wyniki wskazują również, że tylko połączenia zgrzewane egzotermicznie spełniają wszystkie wymogi Standardu 837-1989 IEEE.

1. WPROWADZENIE

W przeszłości prowadzono liczne badania nad określeniem prądu topienia różnych materiałów wykorzystywanych do uziemiania i połączeń służących do wzajemnego łączenia przewodów. Odkryto, że łączniki wykorzystywane do uziemiania rozdzielni, pierwotnie zaprojektowane do zastosowań energetycznych, w warunkach zakłóceń nie są w stanie przenosić takiej ilości prądu, co sam przewodnik. Kryteria uziemiania rozdzielni po raz pierwszy opublikowano w USA w AIEE Nr 80 z marca 1961 r. „Wytyczne w zakresie bezpieczeństwa uziemień rozdzielni prądu zmiennego”, później zmienionym na IEEE Nr 80. Obecna wersja (1986) wytycznych, Standard IEEE Nr 80 „Wytyczne IEEE w zakresie bezpieczeństwa uziemień rozdzielni prądu zmiennego” [2] dodatkowo precyzują wymagania, zaznaczając, że połączenia egzotermiczne mają taką samą pojemność prądu zakłóceniewego i cieplną, jak miedziane przewody uziemiające. Wcześniej nie było wzmianki o połączeniach egzotermicznych, choć niektórzy użytkownicy mieli świadomość ich pojemności. Inni klasyfikowali je jako połączenia lutowane. Pojemność cieplna przewodników uziemiających spadała do 250° lub 350°C po zastosowaniu łączników mechanicznych (w tym zaciskowych).

W trakcie prac nad przygotowaniem Standardu ANSI/IEEE 80 część producentów połączeń, należących do grupy kontrolnej, poprosiło o opracowanie nowego standardu testowania i kwalifikacji łączników mechanicznych do stałego zastosowania w warunkach wysokiego prądu zakłóceniewego w rozdzielniach.

W rezultacie opublikowano Standard IEEE 337-1984 „Standard IEEE dla kwalifikacji łączników stałych wykorzystywanych do uziemiania podstacji”, poprawiony w roku 1989. Przeprowadzona w 1986 r. aktualizacja Standardu 80 ANSI/IEEE uwzględniła ten standard i zezwoliła na wykorzystanie dowolnego łącznika spełniającego wymogi Standardu 837 IEEE, bez obniżania pojemności cieplnej przewodników uziemiających.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki dwóch niezależnych programów badawczych, sprawdzających wytrzymałość złącz mechanicznych, zaciskowych oraz połączeń zgrzewanych egzotermicznie. Programy te miały na celu ocenę możliwości spełnienia przez powszechnie wykorzystywane połączenia uziemiające wymagań w zakresie stałych połączeń dla systemów uziemiających podstacji.

2. PODEJŚCIE

Aby zapewnić wiarygodność i obiektywizm wyników wg wymagań komisji ds. standardów i branży elektrycznej, ERICO Inc. zleciło przeprowadzenie testów kontraktowych laboratorium dwóch różnych firm energetycznych w Ameryce Północnej. W 1996 r. zlecono wykonanie kompletnego programu testowego Standardu 837 IEEE laboratorium Ontario Hydro Technologies (OHT) z elektrowni Ontario Hydro Power w Toronto w Kanadzie. Program został przeprowadzony i przygotowano również końcowy raport testowy pt. „Testy połączeń do uziemień podstacji wg Standardu 837-1989 IEEE” [3]. Również w 1996 r. zlecono laboratorium Georgia Power Research Center w firmie Southern Electric International przeprowadzenie testu cyklu prądowo-temperaturowego, zmodyfikowanego w celu zaostrzenia kryteriów wobec części Standardu 837-1989 dotyczącej relacji prądu i temperatury. Program został zrealizowany i opracowano końcowy raport testowy pt. „Test porównawczy łączników uziemiających” [4]. W niniejszym artykule przedstawiono rezultaty zleconych badań. Zastosowane podejście i wyniki każdego programu przedstawiono osobno.

2.1. Test OHT – Standard 837-1989 IEEE

Przetestowano zgrzane egzotermicznie łączniki dostarczone przez firmę zlecającą test wraz z łącznikami zaciskowymi od trzech producentów twierdzących, że ich łączniki spełniają wymagania Standardu 837 IEEE. Zbadano dwa rodzaje łączników: przewód-przewód i przewód-uziom. Zastosowano linkę: 4/0 AWG (ok. 125 mm²), 19-żyłową z miedzi ciągnionej na zimno. Użyto pręty uziemiające: śr. 17,2 mm, stal miedziowana. OHT zakupiło wszystkie materiały na wolnym rynku. Wszystkie łączniki i połączenia zgrzewane egzotermicznie zainstalowano wg zaleceń producenta. Testy przeprowadzono zgodnie z wymaganiami opisanymi w Normie 837-1989 IEEE.

Norma 837-1989 IEEE wymaga przetestowania co najmniej czterech identycznych wzorców łączników w każdej z czterech kategorii kwalifikacyjnych. W każdej części programu testowego zbadano cztery przykładowe łączniki od każdego producenta. Kategorie testowe obejmują rozciąganie mechaniczne, działanie siły elektromagnetycznej, testy sekwencyjne działania kwasu i testy sekwencyjne działania zasady. Jeżeli jeden wzór łącznika nie przejdzie testu w którejkolwiek z czterech kategorii, oznacza to, że dany łącznik nie spełnia wymagań normy. Łączniki przetestowane w ramach programu przedstawiono w Tabeli 1. Zasadniczym kryterium jest, aby rezystancja zainstalowanego złącza, mierzona pomiędzy obwodami wyrównawczymi, nie przekraczała 110% wartości rezystancji przewodnika kontrolnego przed samym rozpoczęciem testów. Jedynym wyjątkiem są testy rozciągania mechanicznego, podczas których nie mierzy się rezystancji. Rezystancja połączenia obliczana jest jako zmierzona rezystancja pomiędzy obwodami wyrównawczymi minus zmierzona rezystancja

przewodnika kontrolnego. Wszystkich pomiarów rezystancji dokonano przy pomocy miernika mikro-omowego Valhalla model 4300B.

Producent	ID Próbkki	Nr katalogowy
Erico Inc. Zgrzewane egzotermicznie połączenie Cadweld®	„CW” C-C	XAC2Q2Q
	„CW” C-R	GTC182Q
Burndy Electrical Złącze zaciskowe	„B” C-C	YGL29C29
	„B” C-R	YGLR29C34
AMP, Inc. Złącze mechaniczne, śrubowe	„A” C-C	812281-1
	„A” C-R	81229-1
Thomas & Betts Złącze zaciskowe	„T” C-C	GG40250-40250
	„T” C-R	GG500-40250

Tabela 1: Łączniki testowane przez OHT

C-C: połączenie typu linka – linka

C-R: połączenie typu linka – uziom

2.1.1. Rozciąganie mechaniczne

W teście rozciągania mechanicznego próbka o długości co najmniej 25,4 cm umieszczana jest w testowym urządzeniu rozciągającym i poddawana obciążeniu o relacji krzyżowej nie przekraczającej 2,1 cm/minutę/metr długości próbki. Niedozwolony jest jakikolwiek ruch oznaczonego przewodnika przy określonym minimalnym obciążeniu rozciągającym. Minimalne obciążenie dla połączeń typu przewód-przewód wynosi 2225 N i 4450 N dla połączeń typu przewód-pręt uziemiający. Testy przeprowadzono na urządzeniu Satec Universal, model 120WHVL.

2.1.2. Siła elektromechaniczna

Test siły elektromechanicznej obejmuje obwód testowy, zbudowany z pojedynczych łączników producenta, określonego przewodnika (lub przewodników) i obwodów wyrównawczych. Zawiera również fragment przewodnika kontrolnego, służący jako układ odniesienia do pomiaru rezystancji. Obwody wyrównawcze stanowiące integralną część obwodu, zlokalizowane są w połowie odległości między poszczególnymi łącznikami i służą jako punkty pomiaru rezystancji. Odległość między obwodami wyrównawczymi jest równa długości przewodnika kontrolnego. Do obwodu podłączany jest prąd asymetryczny, obliczony na osiągnięcie wartości szczytowej pierwszej połowy cyklu, równej 2,7-krotności połowy 80% wartości skutecznej symetrycznego prądu topienia przewodnika. 80% wartości skutecznej jest ograniczone do maksymalnej wartości 100 kA. Zastosowano prąd asymetryczny z wartością szczytową 72,9 kA. Czas trwania udaru wynosi 0,2 sekundy. Udar stosowany jest trzykrotnie, przy czym dopuszcza się schłodzenie przewodnika kontrolnego do minimalnej temperatury 100°C przed zastosowaniem kolejnego udaru. Jako źródło napięcia (60Hz) zastosowano trzy transformatory jednofazowe, połączone w odpowiedni sposób, aby uzyskać poziom wymagany do przeprowadzenia testu. Zastosowano elementy bierne ograniczające prąd, aby kontrolować prąd testowy i zapewnić wysoki stosunek X/R (reaktancji do oporu). Kryterium zaliczenia testu jest brak widocznego ruchu oznaczonego przewodnika. Maksymalny wzrost rezystancji nie może wynieść więcej niż 50% w odniesieniu do początkowej wartości rezystancji.

2.1.3. Testy sekwencyjne

Testy sekwencyjne działania kwasu i zasad są przeprowadzane w ten sam sposób, z wyjątkiem części dotyczącej korozji. Sekwencja testowa jest następująca: cykl prądowo-temperaturowy, zamrażanie-topnienie, korozja (kwasowa lub zasadowa) i testy prądu zakłóceniewego. Każdy obwód do testów sekwencyjnych zbudowany jest z pojedynczych łączników producenta, określonego przewodnika (lub przewodników) i obwodów wyrównawczych. Zawiera również fragment przewodnika kontrolnego, służący jako układ odniesienia do pomiaru temperatury i rezystancji. Obwody wyrównawcze stanowią integralną część obwodu. Zlokalizowane są w połowie odległości między poszczególnymi łącznikami i służą jako punkty pomiaru rezystancji. Odległość między obwodami wyrównawczymi jest równa długości przewodnika kontrolnego. Każdy łącznik jest wyposażony w termoogniwo. Do testów kwasowych i zasadowych wykorzystywane są osobne obwody testowe.

2.1.3.1. Cykl prądowo-temperaturowy

Do obwodu testowego podłączany jest prąd zmienny na poziomie odpowiednim do podniesienia temperatury przewodnika kontrolnego do ustalonej wysokości. Do połączeń typu przewód-przewód i przewód-uziom zastosowano temperaturę 350°C. Test składa się z 25 jednogodzinnych cykli w temperaturze 350°C. Pomędzy cyklami obwód jest schładzany do temperatury otoczenia. Nominalne natężenie prądu dla połączeń typu przewód-przewód wynosiło 1010A i 540A dla połączeń typu przewód-uziom. Rezystancję i temperaturę zmierzono na początku pierwszego cyklu i następnie co pięć cykli. Kryterium zaliczenia testu zakłada maksymalny wzrost rezystancji o 50% w stosunku do początkowej rezystancji przewodnika. Temperatura połączenia nie może być wyższa niż temperatura przewodnika kontrolnego.

2.1.3.2. Test zamrażania-topnienia

Obwody testowe wykorzystane w cyklu prądowo-temperaturowym są następnie poddawane testowi zamrażania-topnienia. Test polega na zanurzeniu obwodów w wodzie o głębokości co najmniej 2,54 cm i poddaniu ich 10 cyklom zamrażania i topnienia. Cykl składa się z dwóch godzin w temperaturze -10°C lub niższej oraz dwóch godzin w temperaturze +20°C lub wyższej. Kryterium zaliczenia testu zakłada maksymalny wzrost rezystancji do 150% początkowej rezystancji przewodnika. Testy zamrażania-topnienia przeprowadzono w dużym pomieszczeniu do testów środowiskowych, z zakresem kontroli temperatury od -50°C do +50°C. Przed dokonaniem końcowego pomiaru rezystancji wzorce były dokładnie suszone.

2.1.3.3. Test korozji kwasowej „poniżej klasy”

Ta część testów przeznaczona jest dla łączników do zastosowania bezpośrednio pod ziemią. Połowę obwodów testowych poddano tej części testów, natomiast na drugiej połowie zastosowano „nadmiarowe” testy zasadowe, opisane w następnym podpunkcie. Do przeprowadzenia tego testu korozyjnego wykorzystywany jest 10% roztwór kwasu azotowego. Każdy łącznik i 80% długości przewodnika między obwodami wyrównawczymi są zanurzane w kwasie na czas, który doprowadzi do 20% ubytku w przekroju miedzianego przewodnika. Jeśli zastosowany zostanie przewód ze stali miedziowanej, wówczas za czas trwania testu przyjmuje się czas potrzebny do zwiększenia rezystancji przewodnika kontrolnego o 25%. Kryterium zaliczenia testu zakłada maksymalny wzrost rezystancji do 150% początkowej rezystancji przewodnika. Przed dokonaniem końcowego pomiaru rezystancji wzorce były myte i dokładnie suszone.

2.1.3.4. Test „nadmiarowej” korozji zasadowej

Ta część testów przeznaczona jest dla łączników do zastosowania nadmiarowego. Obwód testowy poddawany jest działaniu mgły solnej przez okres minimum 500 godzin. Test przeprowadzany jest wg normy ANSI/ASTM B117-85 [5]. Do przeprowadzenia testu użyto komory testowania korozji z użyciem mgły solnej Industrial Filter & Pump Mfg Co. Kryterium zaliczenia testu zakłada maksymalny wzrost rezystancji do 150% początkowej rezystancji przewodnika. Przed dokonaniem końcowego pomiaru rezystancji wzorce były dokładnie myte i suszone.

2.1.3.5. Test prądu zakłóceniewego

Test prądu zakłóceniewego przeprowadzany jest na wszystkich obwodach testowych jako ostatni etap testów sekwencyjnych. Celem tego końcowego testu jest określenie czy połączenia sprawdzone w ramach poprzednich etapów programu testowego są w stanie wytrzymać udar prądu zakłóceniewego. Symetryczny prąd zakłóceniewy ma poziom 90% prądu topienia pozostałej powierzchni przekroju przewodnika kontrolnego. Do obwodu wpuszczane są trzy 10-sekundowe udary prądowe. Pomiędzy kolejnymi udarami przewodnik kontrolny schładza się do 100°C. Kryterium zaliczenia testu zakłada maksymalny wzrost rezystancji do 150% początkowej rezystancji przewodnika.

2.2. Porównawczy test łączników uziemienia SEI

Należące do Southern Electric International laboratorium Georgia Power Research Center otrzymało zlecenie przeprowadzenia testów cyklu prądowo-temperaturowego, aby ocenić względną wydajność stałych uziemień zamontowanych na regenerowanym przewodzie w warunkach długotrwałych zakłóceń. Celowo zastosowano starzony przewód w celu imitacji warunków modernizacji istniejącego uziemienia rozdzielni. Testom poddano połączenia zgrzewane egzotermicznie, złącza mechaniczne śrubowe i zaciskowe od tych samych trzech producentów, których wyroby sprawdzało OHT w ramach testów w zakresie Standardu 837-1989 IEEE. Testowane łączniki przeznaczone były do połączeń typu przewód-przewód. SIE zakupiło wszystkie materiały na wolnym rynku. Wszystkie łączniki i połączenia zgrzewane egzotermicznie zainstalowano wg zaleceń producenta. Listę producentów i numerów części wykorzystanych w programie przedstawiono w Tabeli 2.

Producent	ID Próbkki	Nr katalogowy
Erico Inc. Zgrzewane egzotermicznie połączenie Cadweld®, zgrzew typu T	CW1, CW2	TAC2V2V
Burndy Electrical Złącze zaciskowe, krzyżowe	BC1, BC2	YGL29C29
Burndy Electrical Złącze zaciskowe, z gwintem	BL1, BL2	YGHC29C29
AMP, Inc. Złącze klinowe skręcane śrubami	A1, A2	81228-1
Thomas & Betts Złącze zaciskowe, krzyżowe	TB1, TB2	GG40250-40250

Tabela 2. Lista producentów i numerów części.

Przewód: linka 250 KCMIL (127 mm²), 37-żyłowa z ciągniętej na miękko miedzi, poddano sztucznemu zużyciu w piecu w temperaturze 260°C przez 24 godziny, w celu uzyskania symulacji utlenionych

przewodników w istniejącym systemie siatek uziemiających. Obwód testowy składał się ze zużytego przewodu, dwóch złącz każdego testowanego typu, obwodów wyrównawczych i fragmentu przewodu kontrolnego (1,22 m), stanowiącego układ odniesienia do pomiaru temperatury i rezystancji. Obwody wyrównawcze stanowią integralną część obwodu. Zlokalizowane są w połowie odległości między poszczególnymi łącznikami i służą jako punkty pomiaru rezystancji. Odległość między obwodami wyrównawczymi jest równa długości przewodu kontrolnego.

Test przeprowadzono z użyciem prądu (60 Hz) wyższego, niż określony w Standardzie 837-1989 IEEE. Testy cyklu prądowo-temperaturowego obejmowały 100 cykli przy temperaturze przewodu kontrolnego wynoszącej 550°C (51% temperatury topienia przewodu). Standard 837-1989 IEEE dla przewodników miedzianych przewiduje temperaturę 350°C, czyli 32% temperatury topienia przewodu. W momencie awarii łącznika lub przewodu, dokonywano jego obejścia przy pomocy fragmentu przewodu wlutowanego między obwody wyrównawcze, omijając dzięki temu uszkodzoną część obwodu i umożliwiając kontynuowanie testu.

Każde złącze oraz przewód kontrolny były wyposażone w dwa termoogniwa. Pod koniec każdego cyklu odczytywano i zapisywano temperaturę z każdego termoogniwa. Pomiaru i zapisu rezystancji dokonywano na początku testu i potem co 10 cykli. Rezystancja połączenia obliczana jest jako zmierzona rezystancja pomiędzy obwodami wyrównawczymi minus zmierzona rezystancja przewodu kontrolnego.

Obowiązywały te same kryteria zaliczenia, co w przypadku testu cyklu prądowo-temperaturowego wg Normy 837-1989 IEEE. Temperatura złącza nie może przewyższać temperatury przewodu kontrolnego. Rezystancja łącznika nie może przekroczyć 150% wartości początkowej. Wszystkie cykle rejestrowano na taśmie filmowej.

3. REZULTATY

Wyniki każdego programu przedstawiono osobno. Przedstawiają się one następująco.

ID Próbkki	Test rozciągania mechanicznego	Test elektromechaniczny	Testy sekwencyjne	
			Kwas	Zasada
„A” C-C	4 zal.	3 nzał.	4 nzał.	4 nzał.
„A” C-R	1 nzał.	4 zal.	4 zal.	3 nzał.
„B” C-C	4 zal.	4 zal.	4 zal.	4 nzał.
„B” C-R	4 zal.	3 nzał.	2 nzał.	3 nzał.
„T” C-C	4 zal.	4 zal.	4 nzał.	4 nzał.
„T” C-R	4 zal.	3 nzał.	1 nzał.	4 nzał.
„Cadweld” C-C	4 zal.	4 zal.	4 zal.	4 zal.
„Cadweld” C-R	4 zal.	4 zal.	4 zal.	4 zal.

Tabela 3. Podsumowanie rezultatów testów OHT.

3.1. Test OHT – Standard 837-1989 IEEE Std

Wyniki testów OHT przedstawiono w Tabeli 3. Wyniki wskazują, że wszystkie wymagania testowe Standardu 837-1989 IEEE spełniły jedynie zgrzewane egzotermicznie połączenia CADWELD. W przypadku przewodu będącego prętem uziemiającym stalowym miedzianym, wprowadzono

zmianę metody obliczania zmian rezystancji łącznika. Jak omówiono w ustępie 2.1, rezystancja jest określana w sposób standardowy. Zaobserwowano problem w postaci różnej grubości warstwy miedzi na prętach uziemiających. Grubość warstwy miedzi na przewodniku kontrolnym mogła różnić się od grubości na prętach użytych w obwodach testowych. Powstała trudność w odjęciu rezystancji przewodnika kontrolnego od rezystancji testowanego przewodnika i uzyskaniu wiarygodnej rezystancji testowanego łącznika. Stwierdzono, że zmiana rezystancji w zakresie 8-10% w ramach całościowej rezystancji testowanego łącznika (łącznik i przewodniki) odpowiada zmianie rezystancji samego łącznika o 50%. Dzieje się tak dlatego, że rezystancja samego łącznika stanowi tylko niewielki odsetek całkowitej rezystancji testowanego systemu łącznika. Z tego względu na użytek miedziowanych prętów uziemiających zmieniono definicję kryteriów dopuszczalnej różnicy rezystancji. Nowe kryteria zakładały, że całkowita maksymalna rezystancja testowanego łącznika może być wyższa od rezystancji przewodnika kontrolnego o 10 punktów procentowych. Na przykład zmiana rezystancji przewodnika kontrolnego o 4% oznacza, że maksymalny dopuszczalny wzrost całkowitej rezystancji testowanego łącznika wyniesie 14%. Kryterium to zastosowano do wszystkich łączników zainstalowanych na miedziowanych prętach uziemiających.

3.1.1. Rozciąganie mechaniczne

Na tym etapie testów jedyne problemy wystąpiły w połączeniach typu przewód-pręt uziemiający. Problemy wystąpiły w przypadku jednego testowanego łącznika „A” przewód-pręt i wszystkich czterech łączników „T”. Pręty uziemiające wysunęły się z łączników poniżej poziomu obciążenia 4450N. Łącznik „A” przewód-uziom zawiódł przy obciążeniu 4317N, tuż poniżej minimalnego poziomu. Cztery łączniki „T” przewód-uziom zawiódły przy obciążeniu odpowiednio 966, 1633, 1455 i 1108N, a więc znacznie poniżej poziomu 4450N.

3.1.2. Siła elektromagnetyczna

Testu nie przeszły złącza rodzajów: przewód-przewód i przewód-pręt uziemiający. W połączeniach przewód-przewód testu nie przeszły trzy z czterech łączników „A” przewód-przewód, które przemieściły się na odległość do 0,64 cm. W połączeniach typu przewód-pręt uziemiający testu nie przeszły trzy z czterech łączniki „B” przewód-uziom i cztery łączniki „T” przewód-uziom, które przemieściły się odpowiednio o 0,16 cm i 7,62 cm. Przewodnik całkowicie wysunął się z jednego z łączników „T” przewód-uziom w trakcie trzeciego udaru.

3.1.3. Testy sekwencyjne w kwasie

Na tym etapie testów pozytywną ocenę uzyskał tylko jeden producent obu rodzajów połączeń (przewód-przewód, przewód-uziom), tzn. CADWELD, oferujący połączenia zgrzewane egzotermicznie. Pozytywnie ten etap przeszły także łączniki „A” przewód-uziom i „B” przewód-przewód. Awaryjne wystąpiły w różnych momentach tej serii testów. Wszystkie łączniki, które nie przeszły testu, wykazały wzrost rezystancji więcej niż 150% rezystancji początkowej.

Z powodu wysokiej rezystancji żaden z łączników „A” kabel-kabel nie przeszedł tego testu. Awaryjne wystąpiły po teście zamrażania-topnienia (1417%, 351%, 1481% i 408%). Wszystkie łączniki „A” przewód-uziom przeszły ten etap testów.

Wszystkie łączniki „B” przewód-przewód przeszły ten etap testów. Dwa z czterech łączników „B” przewód-uziom nie przeszły tego etapu z powodu zbyt wysokiej rezystancji. Z powodu wysokiej rezystancji testu nie przeszły również wszystkie łączniki „T” przewód-przewód. Wszystkie testowane

Łączniki przekroczyły limit rezystancji po teście zamrażania-topnienia (473%, 2590%, 841% i 1139%). Jeden łącznik „T” przewód-uziom wykazał przekroczenie limitu rezystancji po teście prądu zakłócenieniowego.

Ten etap testów pozytywnie przeszły wszystkie połączenia „CADWELD” przewód-przewód i przewód-uziom. Połączenia „CADWELD” wykazały najniższy poziom rezystancji początkowej ze wszystkich łączników. Największy wzrost rezystancji po wyjęciu z kąpeli kwasowej wyniósł 49% i wystąpił w jednym z łączników „CW” przewód-przewód. Po teście prądu zakłócenieniowego rezystancja tego połączenia spadła do 21%.

3.1.4. Testy sekwencyjne w zasadzie

Ten etap testów pozytywnie przeszły tylko zgrzewane egzotermicznie złącza Cadweld. Produkowane przez pozostałe firmy łączniki obu typów nie zdołały uzyskać pozytywnej oceny. Wszystkie łączniki, które nie przeszły testu, nadtopiły się lub wykazały wzrost rezystancji ponad 150%.

Wszystkie łączniki „A” przewód-przewód uzyskały negatywną ocenę w tym teście. Jeden łącznik został utracony (otworzył się) w trakcie cyklu prądowo-temperaturowego. Dwa łączniki nie przeszły testu ze względu na wzrost rezystancji (467% i 346%) po cyklu prądowo-temperaturowym. Podczas testów prądu zakłócenieniowego zaobserwowano jarzenie łukowe na wszystkich łącznikach. Jeden łącznik otworzył się podczas trzeciego cyklu. Łącznik, który otworzył się podczas cyklu prądu zakłócenieniowego wykazał wzrost rezystancji o 475% po teście zamrażania-topnienia. Trzy z czterech łączników „A” przewód-uziom nie przeszły testu prądu zakłócenieniowego z powodu nadmiernego wzrostu rezystancji.

Żaden z łączników „B” przewód-przewód nie przeszedł tego etapu z powodu zbyt wysokiej rezystancji. Jeden łącznik wykazał zbyt wysoki wzrost rezystancji (181%) po teście zamrażania-topnienia. Jeden łącznik wykazał nadmierny wzrost po teście w mgie solnej (154%), dwa kolejne po teście prądu zakłócenieniowego (185% i 383%). Trzy z czterech łączników „B” przewód-uziom nie przeszły testów z powodu zbyt wysokiej rezystancji po teście prądu zakłócenieniowego. Podczas pierwszego cyklu prądu zakłócenieniowego na jednym z łączników „B” przewód-uziom zaobserwowano jarzenie łukowe.

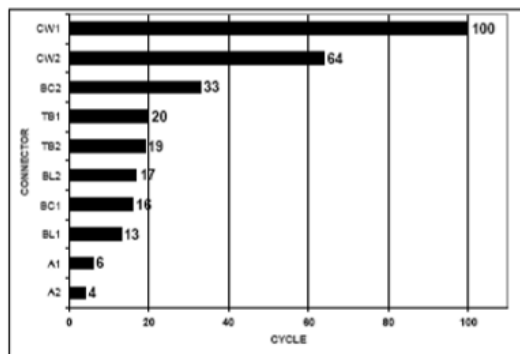
Wszystkie łączniki „T” przewód-przewód i „T” przewód-uziom uzyskały negatywną ocenę na tym etapie. Wszystkie łączniki „T” przewód-przewód przekroczyły limit rezystancji po teście zamrażania-topnienia (1570%, 1668%, 526% i 1394%). Jeden z łączników „T” przewód-przewód stopił się podczas pierwszego cyklu prądu zakłócenieniowego. Trzy łączniki „T” przewód-uziom przekroczyły limit rezystancji po teście w mgie solnej. Czwarty łącznik wykazał przekroczenie limitu rezystancji po teście prądu zakłócenieniowego.

Ten etap testów pozytywnie przeszły wszystkie połączenia „CADWELD” przewód-przewód i przewód-uziom. Połączenia „CADWELD” wykazały najniższy poziom rezystancji początkowej ze wszystkich łączników. Największy wzrost rezystancji, po zakończeniu testów prądu zakłócenieniowego, wyniósł 7%. Zaobserwowano go w jednym z łączników „CADWELD” przewód-przewód.

3.2. Porównawczy test łączników uziemienia SEI

Po zakończeniu pierwszego cyklu prądowo-temperaturowego, temperatura wszystkich łączników z wyjątkiem zgrzewanych egzotermicznie, przekroczyła temperaturę przewodnika kontrolnego. Po zakończeniu 33. cyklu jedynie dwa zgrzewane egzotermicznie złącza (CW1, CW2) nie uległy stopieniu. W tym momencie temperatura obu łączników zgrzewanych egzotermicznie była niższa niż

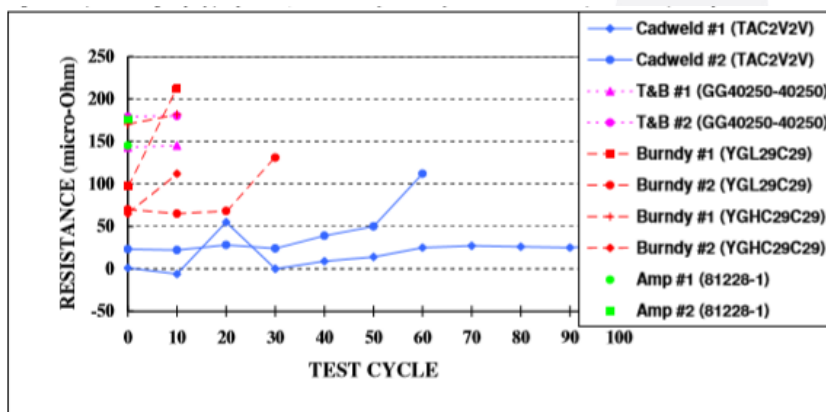
przewodnika kontrolnego. Czas działania do awarii każdego z testowanych łączników przedstawiono na Rysunku 1.



*CONNECTOR = Złącze
*CYCLE = Cykl

Rys. 1. Ilość ukończonych cykli.

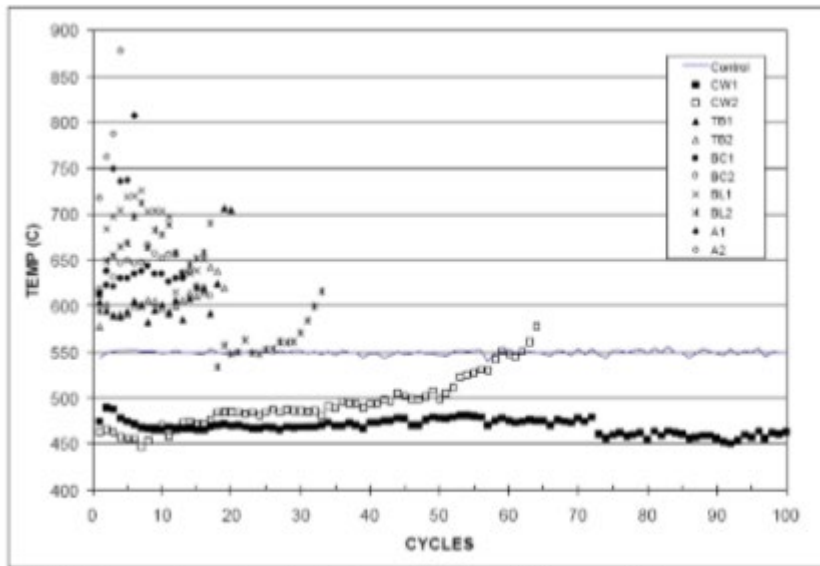
Złącza „A” i „BL” uległy awarii wskutek powstania wysokiej rezystancji kontaktowej między złączem i przewodem, o czym świadczył wiśniowy kolor i jarzenie łukowe, zaobserwowane na złączach przed awarią. Awarie złącz „BC” i „TB” spowodowane były nierównym rozłożeniem prądu w żyłach przewodnika, co doprowadziło do ich stopienia. W rezultacie nastąpiło przeciążenie pozostałych żył i stopienie przewodnika przylegającego do złącza. W typowej sytuacji stopieniu ulegają żyły zewnętrzne wskutek wyższej gęstości prądu niż w żyłach wewnętrznych. Jest to spowodowane wysoką rezystancją między żyłami, powstającą wskutek utlenienia, oraz tym, że prąd musi przechodzić przez żyły zewnętrzne, gdyż tylko one mają kontakt z łącznikiem mechanicznym lub zaciskowym. Zjawisko to nie występuje w łącznikach zgrzewanych egzotermicznie, ponieważ w procesie spawania końcówki wszystkich żył stapiają się ze sobą, dzięki czemu prąd rozkłada się równomiernie. W miarę trwania testu pogarszała się kondycja przewodników w obwodzie. Na przewodniku powstała gruba utleniona warstwa, która zaczęła odpadać. Efekt ten potwierdza stały wzrost rezystancji przewodnika kontrolnego. Na Rysunku 2 porównano rezystancję każdego złącza i przewodu z momentem wystąpienia awarii. Przewodnik w obwodzie zawierającym egzotermiczne połączenie CW2 uległ awarii w połowie drogi między połączeniem, a obwodem wyrównawczym. Awaria nie została spowodowana przez łącznik.



*RESISTANCE (MICROOHMS) = Opór w mikro-omach.

Rys. 2. Rezystancja łącznika/przewodnika kontrolnego.

Na Rysunku 3 przedstawiono średnią temperaturę każdego łącznika i przewodnika kontrolnego we wszystkich cyklach do momentu awarii. Wyraźnie widać, że temperatura wszystkich łączników z wyjątkiem CW przekroczyła temperaturę przewodnika kontrolnego po zakończeniu pierwszego cyklu.


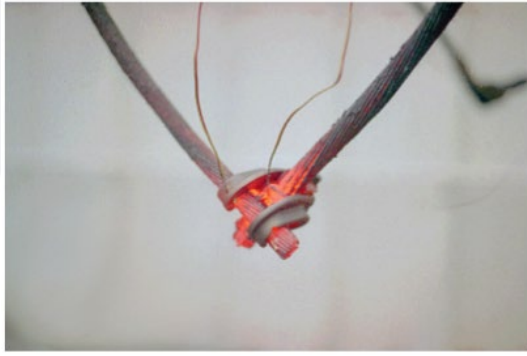




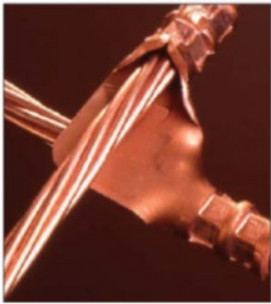
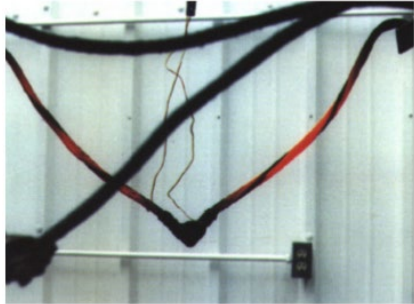
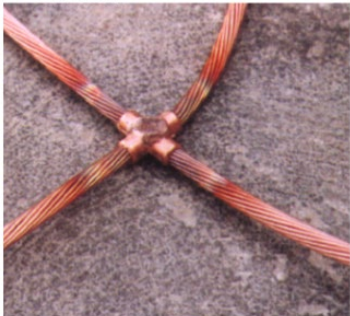
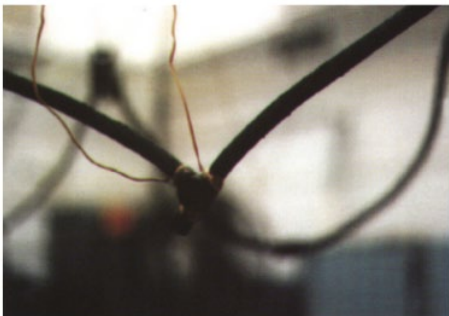
TEMP (C) – Temperatura w °C Rys. 3. Temperatura łączników/ przewodnik

4. WNIOSKI

Wyniki wskazują jednoznacznie, że wydajność mechanicznych i zaciskowych łączników uziemienia jest niższa niż wydajność połączeń zgrzewanych egzotermicznie. Wyniki wskazują także, że tylko połączenia zgrzewane egzotermicznie spełniają wszystkie wymagania Normy 837-1989 IEEE. Wyniki obu programów wskazują, że jedynie złącza zgrzewane egzotermicznie zapewniają stałe i niezawodne połączenie dla uziemienia rozdzielni. W oparciu o przeprowadzone testy można stwierdzić, że jedynie połączenia zgrzewane egzotermicznie mogą bezpiecznie wytrzymywać wysokie prądy zakłócenia, powszechne w rozdzielniach elektrycznych.

5. ZDJĘCIA

Testowane Wzorce	Test prądowy
	
AMP	AMP cykl 4

	
BURNDY	BURNDY Cykl 10
	
Thomas & Betts	Thomas & Betts Cykl 15
	
CADWELD	CADWELD Cykl 57

6. ŹRÓDŁA

[1] IEEE Std 837-1989, "IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA, 1989.

[2] ANSI/IEEE Std 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA, 1986.

[3] Maurice C.G., "Substation Grounding Connectors IEEE Std 837-1989 Test Series", Report No. C-95-EST-193-P, Ontario Hydro Technologies, Electrical Systems Technology, 1996.

[4] McKoon, T.L., "Comparative Grounding Connector Test", Project No. C94901, Southern Electric International, 1996.

[5] ASTM B117-85, "Method of Salt Spray (Fog) Testing, American Society of Testing Materials, 1916 Race St, Philadelphia, PA 19103, USA, 1985.