ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 174 Nr kol. 1472

Karol WOLSKI

ANALIZA DZIAŁANIA WYŁĄCZNIKA OCHRONNEGO RÓŻNICOWOPRĄDOWEGO W SIECI TN

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości skuteczniejszego wykorzystania wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego w czasie zakłóceniowej pracy instalacji elektrycznej zasilanej z sieci TN, przez wprowadzenie w obwód przewodu ochronnego rezystancji ograniczającej prąd jednofazowego zwarcia.

ANALYSIS OF ANTI-SHOCK RESIDUAL CURRENT CIRCUIT BREAKER OPERATION IN TN NETWORK

Summary. Possibilities of more effective use of anti-shock circuit breaker during fault state operation of electric installation supplied from TN network, by insertion of resistor limiting single-phase fault current into protective conductor circuit, have been presented in the paper.

1. WPROWADZENIE

Wyłącznik ochronny różnicowoprądowy działa przy prądzie różnicowym $I_{\Delta n}$ wyrażanym w miliamperach, natomiast w obwodach instalacyjnych, zasilanych z sieci TN, przy uszkodzeniu fazowej izolacji roboczej płynie prąd o wartości wyrażanej w setkach amperów. Prąd ten stwarza zagrożenie dla obwodu w procesie jego przerywania i dla środowiska, w którym punktowo, w miejscach łączeniowych instalacji, może wystąpić niebezpiecznie wysoka temperatura.

W artykule przedstawiono możliwość zrealizowania obwodu jednofazowego zwarcia, w którym prąd różnicowy I_{Δ} będzie mniejszy od 1 A przy zachowaniu skutecznego działania ochronnego wyłącznika różnicowoprądowego.

2. ANALIZA DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZWARCIOWYCH W INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH ZASILANYCH Z SIECI TN

2.1. Warunki działania zabezpieczeń zwarciowych w instalacjach elektrycznych zasilanych z sieci TN

Zabezpieczenia zwarciowe stosowane w instalacjach elektrycznych to:
a) w instalacjach starych - bezpieczniki topikowe,
b) w instalacjach nowych - wyłączniki instalacyjne.

Aby zabezpieczenie zwarciowe zadziałało skutecznie, prąd jednofazowego zwarcia I_{k1} musi spełniać zależność:

$$I_{k1} \geq I_a, \tag{1}$$

gdzie I_a – najmniejszy, obliczeniowy prąd zadziałania zabezpieczenia w określonym czasie:

$$I_a = k\, I_{n\,zabezpieczenia}, \tag{2}$$

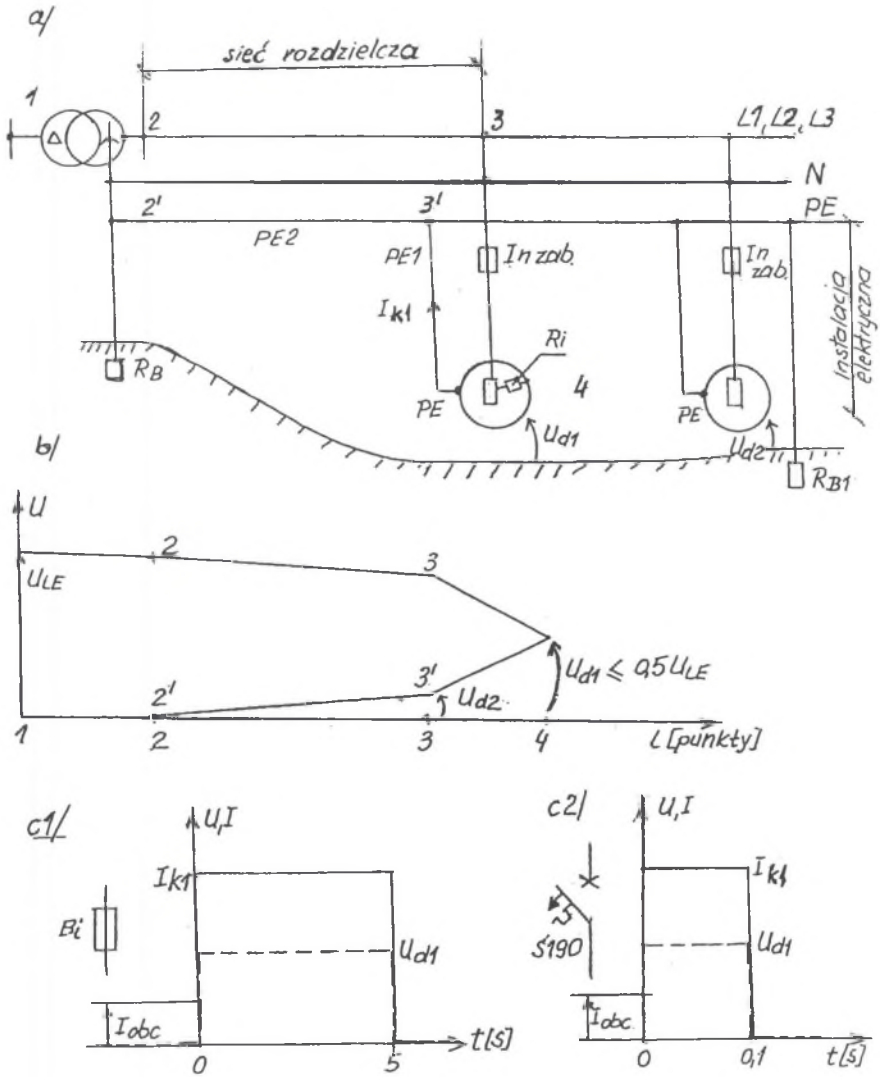
gdzie: k - krotność prądu znamionowego powodująca zadziałanie zabezpieczenia; dla bezpiecznika, czyli zabezpieczenia zwarciowego zależnego, w instalacjach istniejących współczynnik k był określany dla czasu wyłączenia $t_k = 5s$, natomiast dla wyłączników instalacyjnych - zabezpieczenia zwarciowego niezależnego - współczynnik k określa krotność prądu znamionowego zadziałania w czasie $t_k \leq 0{,}1s$.

2.2. Działanie zabezpieczenia zwarciowego w instalacjach elektrycznych zasilanych z sieci TN

Analizę działania zabezpieczeń zwarciowych zobrazowano na schemacie instalacji oraz na wykresach liniowych i czasowych napięcia dotyku, które przedstawiono na rys. 1.

Zabezpieczenia zwarciowe działają, gdy rezystancja izolacji chronionego odbiornika równa się zero ($R_i = 0$), wówczas w obwodzie jednofazowego zwarcia płynie prąd zwarcia I_{k1}, wywołując spadki napięć, które przedstawiono na rys. 1b. Rozkład wartości napięcia w poszczególnych punktach obwodu wynika z jednostkowej rezystancji przewodów fazowych i ochronnych. Dla uproszczenia można przyjąć, że występują dwa przekroje przewodów: jeden w sieci rozdzielczej i drugi w instalacji elektrycznej. Punkt 3 na rys. 1a to miejsce (złącze) połączenia instalacji z siecią rozdzielczą.

Prąd jednofazowego zwarcia I_{k1} – wyrażany w setkach amperów i niebezpieczne napięcie dotyku na uszkodzonym odbiorniku równe połowie napięcia fazowego - będą występować:
- w czasie do 5s w instalacjach starych, wyposażonych w bezpieczniki topikowe (rys. 1c1),
- w czasie do 0,1s w instalacjach nowych, wyposażonych w wyłączniki instalacyjne (rys. 1c2).



Rys.1. Działanie zabezpieczenia zwarciowego w sieci TN: a) schemat jednoliniowy obwodu instalacyjnego w czasie zwarcia, b) rozkład napięcia wzdłuż obwodu przy zwarciu jednofazowym, c) wykresy czasowe prądu zwarcia i napięcia dotyku dla instalacji starej i nowej

PE1 - przewód ochronny instalacji elektrycznej; PE2 - przewód ochronny sieci rozdzielczej

Fig. 1. Operation of short circuit protection in TN network: a) single line diagram of a circuit during fault state, b) distribution of voltage along the circuit during single-phase fault, c) time diagrams of the fault current and touch voltage for the old and new installation

PE1 - protective conductor of installation; PE2 - protective conductor of distribution network

Napięcie dotyku na pozostałych, nieuszkodzonych odbiornikach zasilanych z tej samej linii wyprowadzonej ze stacji transformatorowej będzie proporcjonalnie mniejsze, które można obliczyć z poniższego wyrażenia:

$$U_{d2} = U_{d1} \frac{R_{PE2}}{R_{PE1} + R_{PE2}}, \tag{3}$$

gdzie:

R_{PE1} - rezystancja przewodu ochronnego instalacji elektrycznej,

R_{PE2} – rezystancja przewodu ochronnego sieci rozdzielczej.

Napięcie dotyku U_{d2} wystąpi na wszystkich nieuszkodzonych odbiornikach I klasy ochronności, zasilanych z tej samej linii rozdzielczej.

3. ANALIZA DZIAŁANIA WYŁĄCZNIKA OCHRONNEGO RÓŻNICOWO-PRADOWEGO W INSTALACJI ELEKTRYCZNEJ ZASILANEJ Z SIECI TN

3.1. Warunki działania wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego w instalacji elektrycznej zasilanej z sieci TN

Wyłącznik ochronny różnicowoprądowy działa przy prądzie wyłączającym I_Δ, zawierającym się w granicach:

$$0{,}5 I_{\Delta n} < I_\Delta \le I_{\Delta n}, \tag{4}$$

gdzie:

$I_{\Delta n}$ -znamionowy prąd zadziałania wyłącznika ochronnego,

I_Δ – prąd wyłączający wyłącznika ochronnego.

Rzeczywista wartość prądu wyłączającego I_Δ zależy od szybkości obniżania się rezystancji izolacji chronionej instalacji (rys. 2). Mogą w tym przypadku wystąpić dwie okoliczności:

a) następuje powolna zmiana rezystancji izolacji R_i, to znaczy, gdy czas obniżenia się rezystancji izolacji Δt od wartości R_i zadziałania do wartości $R_i = 0\Omega$ jest większy od czasu t_{min} wyłącznika różnicowoprądowego (rys. 3), czyli gdy

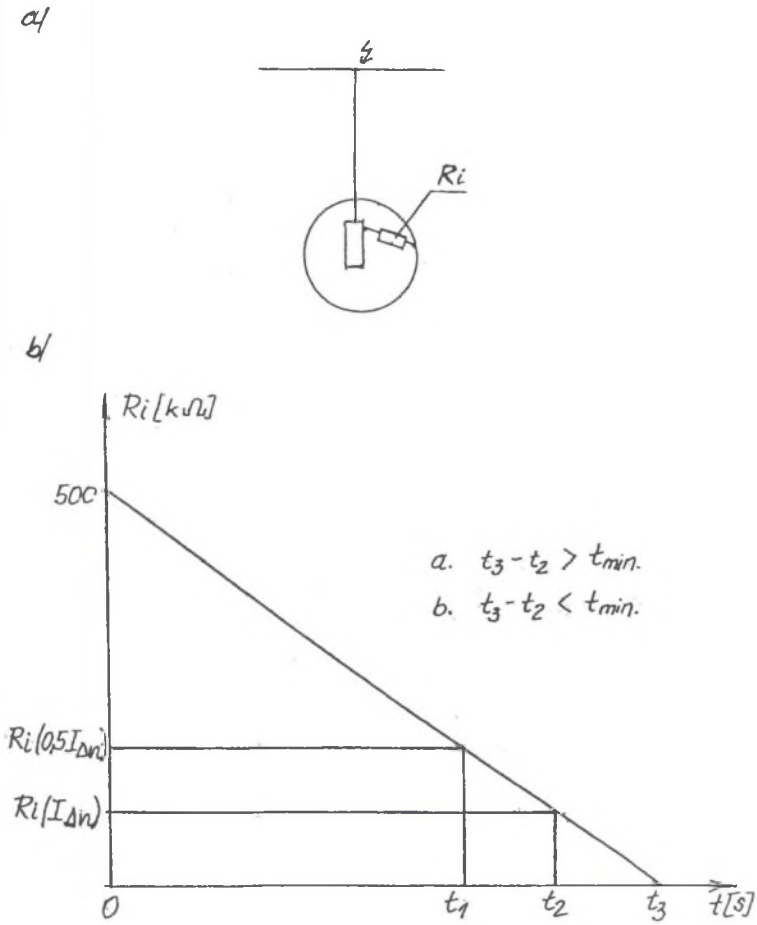
$$\Delta t = t_3 - t_2 > t_{min}, \tag{5}$$

to

$$I_\Delta \le I_{\Delta n}, \tag{6}$$

b) następuje szybka zmiana rezystancji izolacji R_i, to znaczy, gdy czas obniżania się rezystancji Δt od wartości R_i zadziałania do $R_i = 0\ \Omega$ jest mniejszy od czasu t_{min} wyłącznika różnicowoprądowego (rys. 4), czyli gdy

$$\Delta t = t_3 - t_2 < t_{min}, \tag{7}$$

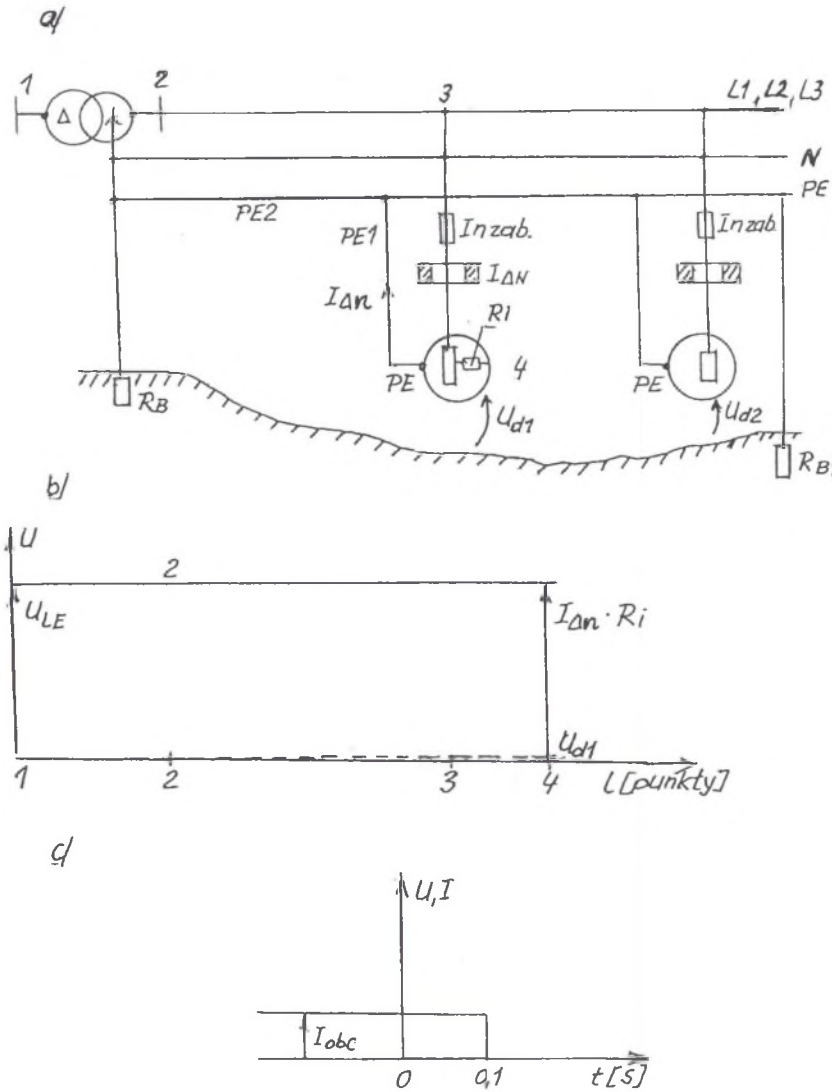


Rys.2. Zmiana rezystancji izolacji fazowej odbiornika: a) szkic odbiornika, b) zmiana rezystancji izolacji fazowej

$R_{i(I_{\Delta n})}$ – rezystancja izolacji fazowej, gdy prąd upływu jest równy $I_{\Delta n}$; $R_{i(0,5I_{\Delta n})}$ – rezystancja izolacji fazowej, gdy prąd upływu jest równy $0,5I_{\Delta n}$, t_{min} – czas własny wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego

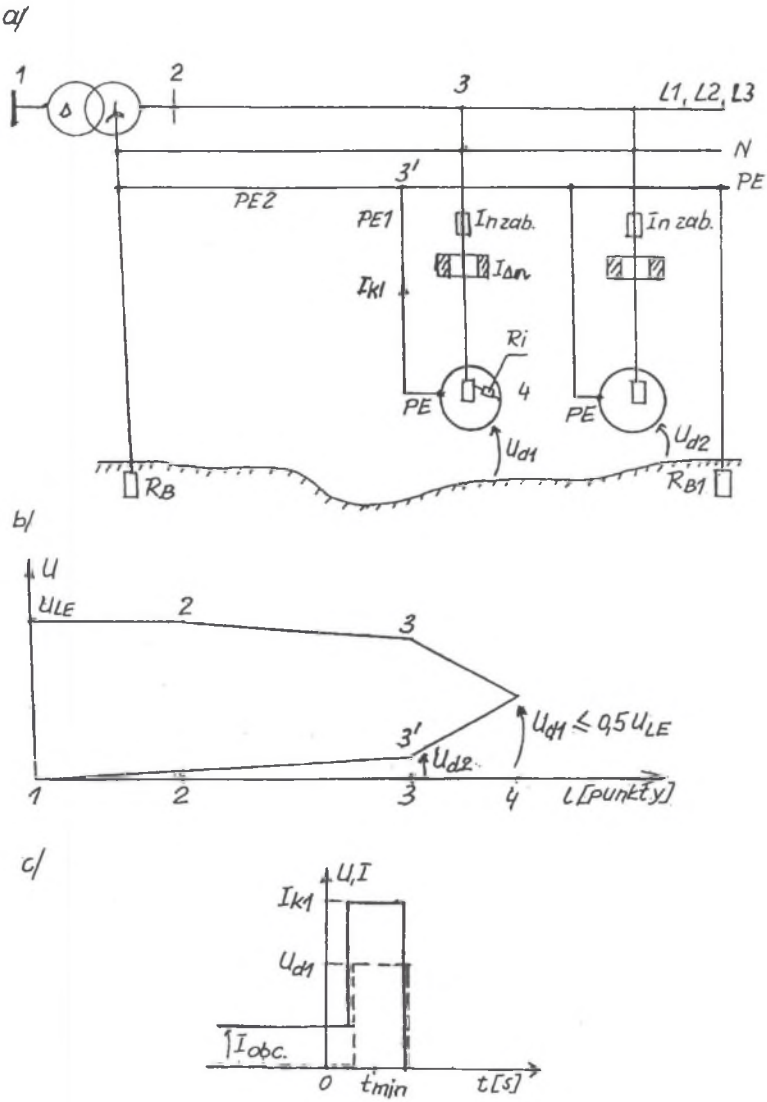
Fig. 2. Variation of phase insulation resistance in a receiver

$R_{i(I_{\Delta n})}$ – phase insulation resistance when the leakage current is equal $I_{\Delta n}$; $R_{i(0,5I_{\Delta n})}$ – phase insulation resistance when the leakage current is equal $0,5I_{\Delta n}$; t_{min} - anti-shock circuit breaker operating time



Rys. 3. Działanie wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego w sieci TN przy powolnym obniżaniu się rezystancji izolacji chronionej instalacji, czyli gdy $\Delta t = t_3 - t_2 > t_{min}$: a) schemat jednoliniowy obwodu, b) rozkład napięcia wzdłuż obwodu w czasie działania wyłącznika, c) wykres czasowy prądów w obwodzie i napięcia dotyku

Fig. 3. Operation of anti-shock residual current circuit breaker in TN network during slow lowering of resistance of a receiver, i.e. when $\Delta t = t_3 - t_2 > t_{min}$: a) single line diagram of a circuit, b) longitudinal voltage distribution during circuit breaker operation, c) time diagrams of the current and touch voltage



Rys. 4. Działanie wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego w sieci TN przy szybkiej zmianie rezystancji izolacji chronionej instalacji; a) schemat jednoliniowy instalacji, b) wykres rozkładu napięcia wzdłuż obwodu instalacyjnego, c) czasowy wykres prądów w obwodzie instalacyjnym i napięcia dotyku na uszkadzającym się odbiorniku

Fig. 4. Operation of anti-shock residual current circuit breaker in TN network during quick variation of phase insulation resistance in the protected installation: a) single line diagram of a circuit, b) time diagram of the current in the circuit and touch voltage on the getting damaged receiver

to

$$I_{\Delta} = I_{k1}, \tag{8}$$

gdzie:

I_{k1} – prąd jednofazowego zwarcia w chronionej instalacji,

t_{min} – czas od chwili powstania prądu zadziałania w wyłączniku ochronnym różnicowo-prądowym do chwili, gdy styki włącznika utracą galwaniczny kontakt.

3.2. Działanie wyłącznika ochronnego przy powolnej zmianie rezystancji izolacji chronionej instalacji zasilanej z sieci TN

Rezystancja izolacji R_i zadziałania wyłącznika zawiera się w granicach

$$R_{i(I_{\Delta n})} \leq R_i < R_{i(0,5I_{\Delta n})}, \tag{9}$$

gdzie:

$R_{i(I_{\Delta n})}$ – rezystancja izolacji, gdy prąd upływu jest równy $I_{\Delta n}$,

$R_{i(0,5I_{\Delta n})}$ – rezystancja izolacji, gdy prąd upływu jest równy $0,5I_{\Delta n}$.

Przy powolnej zmianie rezystancji izolacji (rys. 3) prąd upływu będzie wzrastał. Gdy rezystancja R_i ma wartość w przedziale według zależności (9), wtedy popłynie prąd wyłączający I_{Δ} i uszkodzony odbiornik (obwód) zostanie wyłączony. Zatem w obwodzie instalacyjnym występuje tylko prąd roboczy, który przy uszkadzaniu się izolacji zostaje przez wyłącznik ochronny wyłączony.

Napięcia dotyku U_{d1} na uszkodzonym odbiorniku i U_{d2} na odbiorniku sprawnym technicznie są pomijalnie małe (rys. 3b i 3c) a można je obliczyć z wyrażeń:

$$U_{d1} = I_{\Delta n}(R_{PE1} + R_{PE2}), \tag{10}$$

$$U_{d2} = I_{\Delta n} R_{PE2} = U_{d1} \frac{R_{PE2}}{R_{PE1} + R_{PE2}}. \tag{11}$$

Efektem powolnej zmiany rezystancji izolacji przy istnieniu w obwodzie wyłącznika ochronnego jest:

- likwidacja jednofazowego prądu zwarcia w obwodach chronionych,
- likwidacja niebezpiecznych napięć dotykowych.

3.3. Działanie wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego przy szybkiej zmianie rezystancji izolacji chronionej instalacji zasilanej z sieci TN

Przy szybkiej zmianie rezystancji izolacji (rys. 4), czyli gdy $\Delta t = t_3 - t_2 < t_{min(wyłącznika)}$, zanim wyłącznik ochronny wyłączy, popłynie prąd zwarcia I_{k1}, który uruchomi również zabezpieczenie zwarciowe. W tej sytuacji będzie kwestią przypadku, czy wyłączenie prądu zwarcia spowoduje wyłącznik różnicowoprądowy, czy zabezpieczenie zwarciowe. Niemniej

skutki zewnętrzne wyłączenia są takie, jak gdyby nie było wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego, bo:

a) prąd wyłączający I_Δ jest równy prądowi zwarcia I_{k1},

b) napięcie dotyku na uszkodzonym odbiorniku jest równe połowie napięcia fazowego,

c) napięcia dotyku na technicznie sprawnych odbiornikach jest takie samo, jak w punkcie 2, a można je obliczyć z wyrażenia (3).

Efektem szybkiej zmiany rezystancji izolacji chronionej instalacji jest samoczynna likwidacja pozytywnych skutków pracy wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego, które przedstawiono w punkcie 3.2.

Przywrócenie właściwej pracy wyłącznika ochronnego jest możliwe po zastosowaniu dodatkowej rezystancji w przewodzie ochronnym.

3.4. Działanie wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego przy zwiększonej do 300 Ω rezystancji podłużnej przewodu ochronnego

W miejscu zainstalowania wyłącznika ochronnego w chronionej instalacji lub w skrzynce zaciskowej odbiornika, w przewodzie ochronnym stosuje się rezystor R_d o rezystancji $R_d = 300\ \Omega$ (rys. 5).

Przy szybkiej zmianie rezystancji izolacji chronionej instalacji, czyli gdy $\Delta t = t_3 - t_2 < t_{\min(wyłącznika)}$, w obwodzie popłynie prąd ograniczony do wartości $I_0 \leq 1$A, który spowoduje zadziałanie każdego wyłącznika ochronnego.

Napięcie dotyku na uszkodzonym odbiorniku (rys. 5c2) będzie równe napięciu fazowemu ($U_d \leq U_{LE}$), ale czas jego występowania będzie krótszy od 0,1 s. Napięcie dotyku na sprawnych technicznie odbiornikach, zasilanych z tej samej linii rozdzielczej, będzie pomijalnie małe, a można je wyliczyć z wyrażenia:

$$U_{d2} \leq I_0 R_{PE2}, \tag{12}$$

gdzie: I_0 – prąd ograniczony do 1 A.

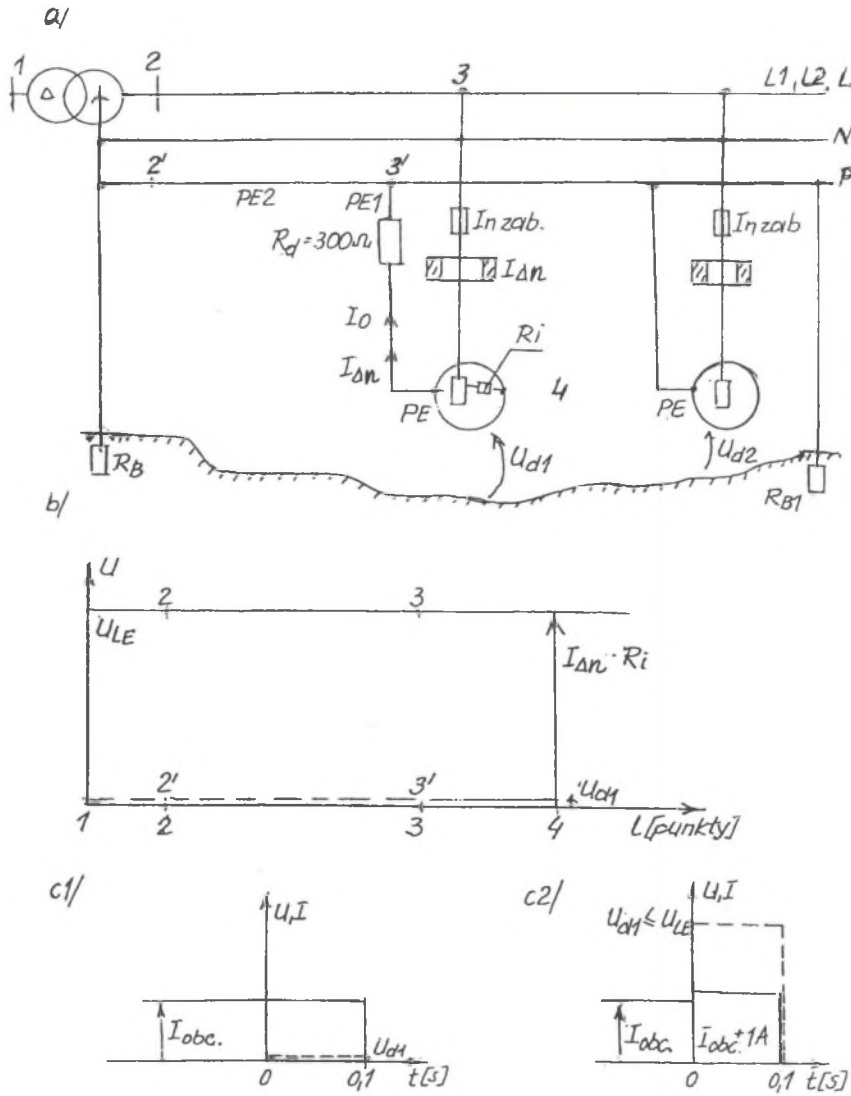
Przy powolnej zmianie rezystancji izolacji instalacji chronionej wyłącznikiem ochronnym, czyli gdy czas obniżania się rezystancji wynika z zależności (5), w obwodzie popłynie prąd różnicowy określony z zależności (6), który spowoduje wyłączenie uszkadzającego się odbiornika.

Napięcie dotyku (rys. 5c1) na uszkodzonym odbiorniku będzie równe

$$U_{d1} = I_{\Delta n}(R_{PE1} + R_{PE2} + 300\ \Omega). \tag{13}$$

Napięcie dotyku na pozostałych sprawnych technicznie odbiornikach, zasilanych z tej samej linii rozdzielczej (U_{d2}) jest pomijalnie małe, a można je obliczyć z wyrażenia:

$$U_{d2} = I_{\Delta n} R_{PE2} = U_{d1} \frac{R_{PE2}}{R_{PE1} + R_{PE2} + 300\ \Omega}. \tag{14}$$



Rys. 5. Działanie wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego po wprowadzeniu w obwód przewodu ochronnego rezystora R_d o rezystancji 300 Ω: a) schemat jednoliniowy instalacji, b) wykres rozkładu napięcia wzdłuż obwodu instalacyjnego, c) czasowy wykres prądów w obwodzie instalacyjnym i napięcia dotyku na uszkadzającym się odbiorniku

Fig. 5. Operation of anti-shock residual current circuit breaker after insertion of 300 Ω resistor into protective conductor circuit: a) single line diagram of a circuit, b) longitudinal voltage distribution along the circuit, c) time diagram of the current in the circuit and touch voltage on the getting damaged receiver

4. WNIOSKI

1. Przy powolnym obniżaniu się rezystancji izolacji fazowej wyłącznik ochronny różnicowoprądowy zapewnia całkowite bezpieczeństwo w korzystaniu z energii elektrycznej.
2. Przy szybkich zmianach rezystancji izolacji fazowej skuteczność działania wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego można zachować przez wprowadzenie do przewodu ochronnego rezystora R_d o rezystancji 300 Ω. Rezystor R_d można usytuować w miejscu zainstalowania indywidualnego wyłącznika ochronnego lub w skrzynce zaciskowej każdego odbiornika I klasy ochronności dla centralnego wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego.

LITERATURA

1. Markiewicz H.: Instalacje elektryczne. WNT, Warszawa 1996.
2. Markiewicz H.: Bezpieczeństwo w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1999.
3. Rogoń A.: Ochrona od porażeń w instalacjach elektrycznych . Poradnik, wyd. II, COSIW SEP, Warszawa.
4. Wolski K., Gembalski J.: Sposób wykorzystania wyłącznika przeciwporażeniowego różnicowoprądowego do ograniczania jednofazowego prądu zwarcia w instalacjach elektrycznych zasilanych z sieci TN. Zgłoszenie patentu: P326873 - Biuletyn Urzędu Patentowego RP Nr 26/99 z dnia 20 grudnia 1999.
5. Wolski K.: Ocena zerowania jako środka dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. ZN Pol. Śląskiej, ser. „Elektryka", z. 127, Gliwice 1992.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Gerhard Bartodziej

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 maja 2000 r.

Abstract

An analysis of short circuit protection operation has been pictured on scheme of installation and diagrams of the touch voltage (Fig. 1).

Short circuit protection operates when a phase insulation resistance of the protected receiver (Fig. 2) is equal nought; then a fault current I_{k1} flows through the single phase short circuit loop bringing about voltage drops shown in Fig. 1b. A single phase fault current I_{k1} - which can amount hundreds amperes and a dangerous touch voltage reaches a half of the phase voltage - will happen:

- within the period to 5 s in old installations equipped with switch-fuses (Fig. 1c1),
- within the period to 0.5 s in new installations equipped with installation circuit breakers (Fig. 1c2).

Operation of the anti-shock circuit breaker depend on speed of insulation resistance variations of the protected receiver (Fig. 2). A leakage current increases when phase insulation resistance variation is slow (Fig. 3). When resistance R_i is placed within the interval after dependence (9) then a breaking current flows and the failed receiver (circuit) will be cut off. So in the installation circuit only working current appears which is cut off by the protective circuit breaker when insulation goes worsened. Touch voltage values U_{d1} on the failed receiver and U_{d2} on the healthy one are negligible little (Fig. 3b, c) and can be computed with expressions (10) and (11).

When phase insulation resistance variation is quick (Fig. 4) then - before the protective circuit breaker operation - a fault current I_{k1} flows which also activates short circuit protection. In such a situation it will be a random question whether switch-off is realised by the protective circuit breaker or by short circuit protection. Nevertheless external results of switching off are the same like the anti-shock circuit breaker does not exist.

It is possible to restore a proper operation of the protective circuit breaker when an additional resistor in the protective conductor is applied. In the place where the protective circuit breaker is installed or in the receiver's terminal box a resistor R_d of 300 Ω is applied. During quick insulation resistance variations of the protected installation in the circuit flows a current limited to a value $I_0 \leq 1$ A which causes operation of any protective circuit breaker. A touch voltage value on the failed receiver (Fig. 5c2) will be equal a phase voltage ($U_d \leq U_{LE}$) but the time of its appearance will be shorter than 0.1 s. The touch voltage on the technically efficient receivers supplied from the same distribution line will be negligible litte and can be computed from expression (12).

A slow insulation resistance variation, when the protective circuit breaker exists in the circuit, causes:

- clearance of the single phase fault current in protected circuits,
- clearance of dangerous touch voltages.

When quick insulation resistance variations happen a protective circuit breaker's operational efficacy can be saved by insertion of limiting resistor of 300 Ω into protective conductor circuit.