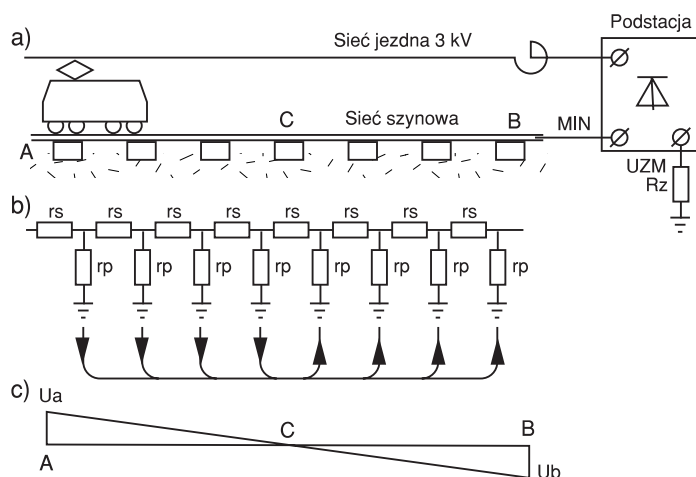


Impulsowy pomiar rezystancji w obwodach związanych z torami trakcji kolejowej

W artykule opisano metody impulsowego pomiaru rezystancji w obwodach, w których występują stałe i przemienne napięcia zakłócające, a czasem nawet uniemożliwiające pomiar metodami klasycznymi. Warunki takie występują w trakcyjnej sieci powrotnej. Proponowana metoda umożliwi dokonanie pomiaru przy przepływie prądu do około 100 A przy rezystancjach małych (mniejszych od 1 Ω) i stosowanie lekkiego przenośnego sprzętu o masie kilku kilogramów.

Środowisko pomiarowe

Do zapewnienia poprawnego działania układów zabezpieczeń przeciwporażeniowych w trakcji kolejowej, stosuje się urządzenia powodujące wyłączenie zasilania na odcinku sieci kolejowej, w którym wystąpiło zagrożenie porażenia na skutek np. doziemienia sieci trakcyjnej (uszkodzenie izolatora),



Rys. 1. Fragment sieci trakcyjnej w pobliżu podstacji

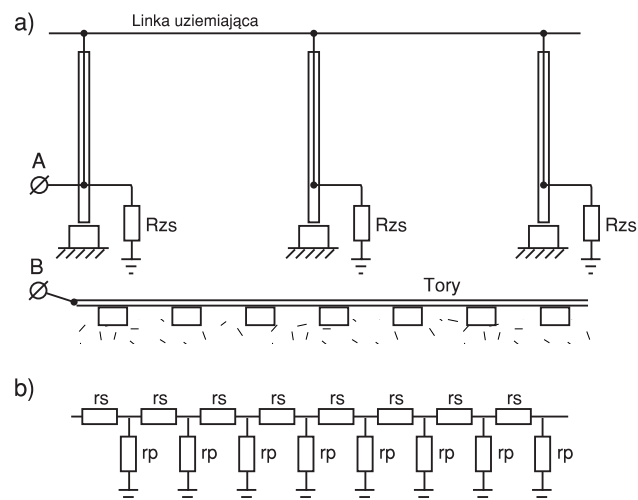
- a) schemat: MIN – zacisk ujemny zasilacza podstacji, UZM – zacisk uzziemia podstacji,
 b) rezystancje: r_s – rezystancje cząstkowe szyn, r_p – rezystancje cząstkowe przejścia szyna–ziemia, R_z – rezystancja uzziemia podstacji,
 c) rozkład potencjału na szynach

przerwy w sieci powrotnej lub zerwanie połączenia sieci szynowej z szyną minusową podstacji trakcyjnej. O skuteczności tego zabezpieczenia decyduje wartość rezystancji uzziemia podstacji i rezystancji uzziemia sekcji uszynienia grupowego. Dbalność o poprawną pracę urządzeń zabezpieczających wymaga okresowej kontroli tej rezystancji.

Na rysunku 1 przedstawiono fragment sieci trakcyjnej w pobliżu podstacji. Prąd powrotny płynący od elektrowozu do podstacji wytwarza spadek napięcia na odcinku toru AB między elektrowozem a zaciskiem ujemnym (MIN) podstacji. Mimo założonej izolacji między zaciskiem ujemnym podstacji a ziemią, część prądu powrotnego płynie przez ziemię, w pobliżu elektrowozu wpływając do ziemi, a w pobliżu podstacji wracając z ziemi do szyn. Między punktami A i B można znaleźć taki punkt C na torze, którego potencjał jest równy potencjałowi ziemi; w pobliżu elektrowozu potencjał toru jest dodatni, a przy podstacji ujemny.

Między zaciskami MIN i UZM na podstacji występuje część spadku napięcia z torów – na rysunku 1c jest to napięcie oznaczone jako U_b . W napięciu tym oprócz składowej stałej występują pulsacje o częstotliwości 50, 300 i/lub 600 Hz. Brak symetrii w napięciach fazowych zasilających prostownik trakcyjny jest przyczyną występowania niewielkiej składowej 50 Hz. Pulsacje o częstotliwości 300 i 600 Hz są skutkiem stosowania prostowników 6- lub 12-pulsowych w zasilaczach trakcyjnych. Pulsacja napięcia wyprostowanego wywołuje pulsacje prądu, a te uwidaczniają się w spadku napięcia na torze.

Na rysunku 2 przedstawiono fragment sieci trakcyjnej z uszynieniem grupowym w układzie otwartym. Rezystancja uzziemia sekcji musi mieć wartość na tyle małą, żeby w przypadku doziemienia sieci jezdnej popłynął prąd wywołujący zadziałanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Rezystancję taką można zmierzyć pośrednio przez pomiar rezystancji między punktami: A – linką uzziemiającą i B – szynami



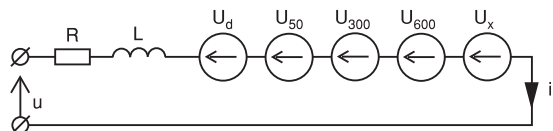
Rys. 2. Fragment sieci trakcyjnej z uzziemieniem grupowym

- a) schemat,
 b) rezystancje: r_s – rezystancje cząstkowe szyn, r_p – rezystancje cząstkowe przejścia szyna–ziemia, R_{zs} – rezystancja uzziemia słupa trakcyjnego

występuje również rezystancja przejścia szyny–ziemia). Między tymi punktami będzie występowała część spadku napięcia wywołanego prądem powrotnym (rys. 1c). Napięcie to mieści się w przedziale od U_b do U_a i występują w nim, jak wspomniano, oprócz składowej stałej składowe przemienne o częstotliwości 50, 300 i 600 Hz.

Zasada pomiaru w obwodzie z szeregowo połączonymi elementami R , L , w którym występują napięcia stałe i przemienne

Pomiar rezystancji polega na zarejestrowaniu przebiegów prądu i napięcia w obwodzie zawierającym mierzoną rezystancję, podczas rozładowania w tym obwodzie wcześniej naładowanego kondensatora, i dokonania odpowiednich przeliczeń na zarejestrowanych wartościach prądu i napięcia. Na rysunku 3 pokazano przykładowy obwód, w którym występują: rezystancja, indukcyjność oraz napięcia stałe i przemienne o częstotliwościach 50, 300 i 600 Hz oraz napięcie przypadkowe – zakłócenie.



Rys. 3. Przykładowy obwód pomiarowy: U_d , U_{50} , U_{300} , U_{600} , U_x – napięcia występujące w obwodzie, odpowiednio: składowa stała, składowe 300, 600 i 50 Hz, napięcie przypadkowe

Podczas rozładowania kondensatora, przyłączonego z zewnątrz do obwodu pokazanego na rysunku 3, na zaciskach zewnętrznych tego obwodu występuje napięcie u , a w obwodzie płynie prąd i . Równanie napięciowe dla tego obwodu ma postać:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + u_d + u_{300} + u_{600} + u_{50} + u_x \quad (1)$$

Po scałkowaniu obu stron równania i wyznaczeniu z niego rezystancji otrzymujemy wyrażenie

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_k} u dt}{\int_{t_0}^{t_k} i dt} + \frac{\int_{t_0}^{t_k} L \frac{di}{dt} + \int_{t_0}^{t_k} u_d dt + \int_{t_0}^{t_k} (u_{300} + u_{600} + u_{50}) dt + \int_{t_0}^{t_k} u_x dt}{\int_{t_0}^{t_k} i dt} \quad (2)$$

Wyrażenie (2) jest dość złożone. Można go znacznie uprościć przez:

a – odpowiedni dobór granic całkowania,

b – kompensację wpływu składowej stałej na wynik pomiaru.

Ad. a. Całka ze składowych przemiennej 50, 300 i 600 Hz jest równa zero, jeżeli przedział całkowania jest całkowitą wielokrotnością okresu napięcia 50 Hz:

$$\Delta t = t_k - t_0 = n20 \text{ [ms]} \quad (3)$$

Całka z napięcia na indukcyjności jest równa zero, jeżeli granice całkowania są określone przez chwile czasowe,

w których prąd w cewce zaczyna narastać od zera i kończy na wartości zerowej:

$$i(t_0) = 0, \quad i(t_k) = 0 \quad (4)$$

Ad. b. Całkę ze składowej stałej napięcia można skompensować przez wprowadzenie do układu całkującego sygnału o przeciwnym znaku i wartości odpowiadającej zmierzonej wcześniej wartości składowej stałej.

Przy spełnieniu tych warunków wyrażenie (2) uprości się do postaci:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_k} u dt}{\int_{t_0}^{t_k} i dt} + \frac{\int_{t_0}^{t_k} u_x dt}{\int_{t_0}^{t_k} i dt} \quad (5)$$

Podczas pomiaru rezystancji dostępne do pomiaru są wartości napięcia na zaciskach wyjściowych przyrządu i prąd wypływający z tych zacisków. Nieznane napięcie u_x wprowadza dodatkową wartość, której w pomiarze nie da się skompensować. Napięcie to jest zakłóceniem, które ma krótki czas trwania w porównaniu do czasu całkowania i w związku z tym drugi ułamek w wyrażeniu (5) ma niewielką wartość w porównaniu z ułamkiem pierwszym. Pomijając w wyrażeniu (5) drugi ułamek uzyskuje się prostą regułę umożliwiającą obliczenie rezystancji na podstawie pomiaru napięcia i prądu na zaciskach wyjściowych przyrządu:

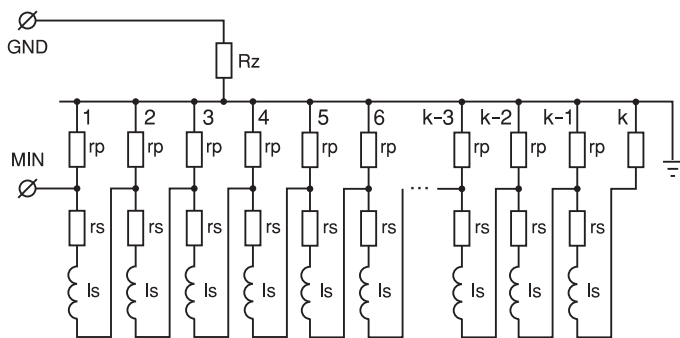
$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_k} u dt}{\int_{t_0}^{t_k} i dt} \quad (6)$$

Uproszczenie takie dopuszcza do wystąpienia błędu w pomiarze. Jego wartość można w praktyce sprawdzić do bardzo małych wartości, wykonując kilka pomiarów w badanym obwodzie. Powtarzające się wyniki pomiaru wskazują na brak napięć zakłócających i pomiar można uznać za poprawny.

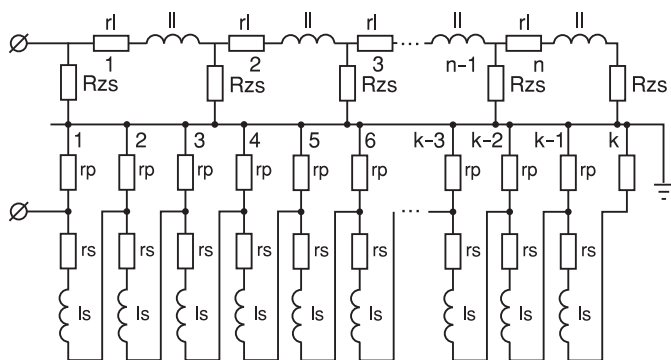
Zasada pomiaru w obwodach o strukturze drabinkowej

Obwód przedstawiony na rysunku 3 nie reprezentuje dokładnie schematu zastępczego obwodów widzianych z zacisków GND i MIN (rys. 1) i z zacisków A i B (rys. 2) występujących w praktyce. Szeregowy układ R , L jest zbytnim uproszczeniem zarówno dla obwodu przejścia szyny–ziemia (rys. 1 i 2), jak również obwodu składającego się z linki uziemiającej i uziomów słupów trakcyjnych na szlakach z uszynowaniem grupowym (rys. 2). Schematy zastępcze tych obwodów przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

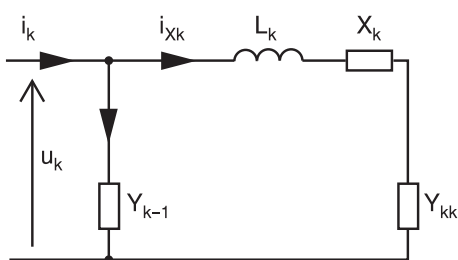
Rezystancje i indukcyjności cząstkowe w schemacie zastępczym toru trakcyjnego i linki uziemiającej połączonej do uziomów słupów trakcyjnych tworzą struktury drabinkowe. Gałęzie szeregowo struktury drabinkowej składają się z szeregowo połączonych elementów R , L , a gałęzie równoległe tylko z elementów R .



Rys. 4. Schemat zastępczy obwodu widzianego z zacisków GND i MIN według rysunku 1
 rs, ls – rezystancje i indukcyjności cząstkowe szyn, rp – rezystancje cząstkowe przejścia szyny–ziemia, Rz – rezystancja uziemienia podstacji, 0, 1, 2, ... k numery oczek w schemacie zastępczym toru powrotnego



Rys. 5. Schemat zastępczy obwodu widzianego z zacisków A i B według rysunku 2
 rs, ls, rp – oznaczenia jak na rysunku 4; rl, ll – rezystancje i indukcyjności cząstkowe linki uziemiającej, Rzsz – rezystancja uziemienia słupa trakcyjnego, k – liczba oczek w schemacie zastępczym toru powrotnego, n – liczba oczek w schemacie zastępczym uziemienia grupowego



Rys. 6. Ostatnie oczko schematu drabinkowego
 X_k – rezystancje szeregowe; Y_k, Y_{kk} – rezystancje równoległe; k – liczba oczek i numer węzła przy oczku k

Na rysunku 6 przedstawione jest ostatnie oczko struktury drabinkowej składającej się z k oczek. Dla wygody rezystancje szeregowe oznaczone są symbolem X, a równoległe symbolem Y. Równania napięciowe dla oczka k mają postać:

$$u_k = L_k \frac{di_{X_k}}{dt} + (X_k + Y_{kk}) i_{X_k} \quad (7)$$

$$u_k = Y_k i_{Y_k} \quad (8)$$

prąd wejściowy do oczka k wynosi:

$$i_k = i_{X_k} + i_{Y_k} \quad (9)$$

Po scałkowaniu obustronnym wyrażen (7, 8 i 9) przy spełnieniu warunków (3) i (4) można wyznaczyć całkę z prądu wpływającego do węzła k. Całka ta wynosi:

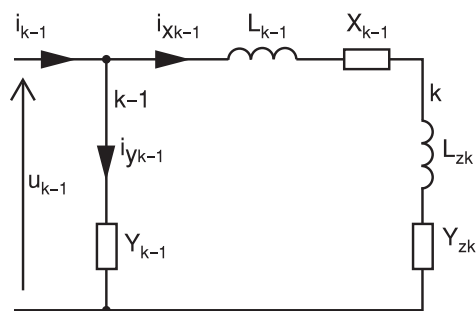
$$\int_{t_0}^{t_k} i_k dt = \int_{t_0}^{t_k} i_{X_k} dt + \int_{t_0}^{t_k} i_{Y_k} dt = \left(\frac{1}{X_k + Y_{kk}} + \frac{1}{Y_k} \right) \int_{t_0}^{t_k} u_k dt \quad (10)$$

stąd:

$$\frac{\int_{t_0}^{t_k} u_k dt}{\int_{t_0}^{t_k} i_k dt} = \frac{1}{\frac{1}{X_k + Y_{kk}} + \frac{1}{Y_k}} = Y_{zk} \quad (11)$$

Wyrażenie to, jak widać, określa rezystancję zastępczą dwóch gałęzi (x i y) połączonych równoległe do węzła k. Rezystancja ta będzie występowała w schemacie zastępczym oczka (k – 1). Ze względu na umiejscowienie w schemacie, przez analogię do oczka k, rezystancję tę oznaczono symbolem Y_{zk}.

Na rysunku 7 przedstawiono przedostatnie oczko struktury drabinkowej składającej się z k oczek. Y_{zk} reprezentuje rezystancję zastępczą według zależności (11), a L_{zk} indukcyjność zastępczą oczka k. Wartość indukcyjności zastępczej nie została wyznaczona, jest ona zależna od częstotliwości, dla której schemat zastępczy jest wyznaczany. Częstotliwość w rozpatrywanym zagadnieniu nie jest określona. Przebieg rozładowania kondensatora przez nieznaną impedancję jest zależny od parametrów tej impedancji. Do przeprowadzanej analizy nie ma to jednak znaczenia. Wpływ tej indukcyjności na obliczenia jest i tak zerowy, gdy spełnione są warunki (3) i (4).



Rys. 7. Przedostatnie oczko schematu drabinkowego
 X_{k-1} – rezystancja szeregowa, Y_{k-1}, Y_{kz} – rezystancje równoległe; k-1, k – numery węzłów w przedostatnim oczku

Schemat na rysunku 7 jest analogiczny do schematu z rysunku 6. Przeprowadzając analogiczne rozumowanie, jak wyżej, można napisać wyrażenie określające wartość rezystancji zastępczej dla dwóch ostatnich oczek:

$$\frac{\int_{t_0}^{t_k} u_{k-1} dt}{\int_{t_0}^{t_k} i_{k-1} dt} = \frac{1}{\frac{1}{X_{k-1} + Y_{zk}} + \frac{1}{Y_{k-1}}} = Y_{zk-1} \quad (12)$$

Przenosząc to rozumowanie kolejno przez pozostałe oczka aż do oczka numer 1, otrzymamy analogiczny schemat zastępczy oczka 1, który jest schematem zastępczym całej struktury drabinkowej. Wyznaczona dla tego schematu rezystancja zastępcza (ciągle przy zachowaniu warunków (3) i (4)) jest rezystancją zastępczą całej struktury:

$$\frac{\int_{t_0}^{t_k} u_1 dt}{\int_{t_0}^{t_k} i_1 dt} = \frac{1}{\frac{1}{X_1 + Y_{z2}} + \frac{1}{Y_1}} = Y_{z1} = R_z \quad (13)$$

Jak więc widać wyrażenie (6) o prostej i identycznej postaci, jak wyrażenie (13) pozwala na wyznaczenie zastępczej rezystancji zarówno przy obwodach o stałych skupionych, jak i przy złożonych strukturach drabinkowych, w których przebiegi prądów i napięć mają charakter zbliżony do falowego.

Zasada pomiaru w układach rzeczywistych

Schemat układu z rysunku 4 można przedstawić jako szeregowe połączenie rezystancji R_z i struktury drabinkowej z elementów R i L , a schemat układu z rysunku 5 – jako szeregowe połączenie dwóch struktur drabinkowych. Przeprowadzona analiza pozwala na prosty wniosek, że przedstawiona metoda wyznaczania rezystancji zgodna z wyrażeniem (6) jest słuszną również dla obwodów z rysunków 4 i 5. Można więc ją stosować do pomiaru rezystancji między zaciskami UZM i MIN podstacji trakcyjnej, jak również do pomiaru rezystancji uziomu grupowego.

Uwagi i wnioski

Przedstawiony w artykule algorytm wyznaczania rezystancji obwodu widzianej z dostępnych do pomiaru punktów jest słuszny zarówno dla obwodów o stałych skupionych, jak też w strukturach o parametrach rozłożonych występujących w układach rzeczywistych w otoczeniu tracji elektrycznej.

Wniosek ten został potwierdzony praktycznie. Przyrząd wykorzystujący przedstawiony algorytm jest od kilku lat wykorzystywany do pomiarów rezystancji w otoczeniu tracji elektrycznej przy wykorzystaniu sieci szynowej jako elektrody o znanej rezystancji doziemnej przyjętej na poziomie $0,1 \Omega$.

Opisany w artykule sposób pomiaru rezystancji pozwala na:

- kompensowanie wpływu napięć stałych i przemiennych występujących w obwodzie pomiarowym,
- wykonywanie pomiaru impulsem prądowym o natężeniu ok. 100 A dla rezystancji mierzonej mniejszej od 1Ω i około 10 A dla 10Ω ,
- korzystanie ze źródła zasilania o niewielkiej mocy – np. z akumulatora,
- pomiar rezystancji uziemienia podstacji z błędem ok. $0,1 \Omega$,
- ciągłe wykonywanie pomiarów w wydzielonym obwodzie według dowolnego algorytmu czasowego,
- monitorowanie i zapamiętywanie zmian zachodzących w środowisku pomiarowym przy wykorzystaniu mikroprocesorowego lub komputerowego sterowania pomiarem,
- uzyskanie lepszych warunków pracy urządzeń zabezpieczeń przeciwporażeniowych.

□

Literatura

- [1] Dziuba W.: *Sieć powrotna i prądy błądzące*. Warszawa Instytut Elektrotechniki 1995.
- [2] Mikołajuk K, Trzaska Z.: *Elektrotechnika teoretyczna – analiza i synteza elektrycznych obwodów liniowych*. PWN 1984
- [3] Przywara G., Jaworski R.: *Impulsowy pomiar rezystancji w sieci powrotnej tracji prądu stałego*. Bezpieczne Urządzenia Energoelektroniczne – I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Warszawa, Instytut Elektrotechniki 1998.

Autor
dr inż. Gustaw Przywara
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Politechniki Warszawskiej