

Modelowanie kabli w analizie zwarć i przepięć pochodzenia atmosferycznego w sieciach trakcyjnych i urządzeniach sterowania ruchem kolejowym

W artykule omówiono elementy składowe modelu matematycznego opisującego przyjęty do analizy układ sieci trakcyjnej z położonym równoległe do szyn kablem. W tym celu opracowano modele elementów układu: sieć trakcyjna, sieć szynowa, kabel, słup, izolator, odgromnik. Wymienione elementy analizowanego układu zgrupowano w postaci czwórników typu II tworząc modele czwórników reprezentujące odcinek sieci trakcyjnej. Analizę prowadzono w programie LTSPICE.

1. Wprowadzenie

Specyficzne warunki pracy, sieci kablowej urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk) powodują, że jest ona narażona na wpływ różnych czynników zewnętrznych. Mogą one być przyczyną zakłóceń w pracy tych urządzeń [1,2,3]. Ma to szczególne znaczenie dla linii zasilanych trakcją elektryczną ze względu na niebezpieczeństwo porażenia elektrycznego przy obsłudze, jak również w przypadku uszkodzenia izolacji, galwanicznego oddziaływania linii i urządzeń trakcji elektrycznej [4,5].

Złożoność problematyki związanej ze zwarzami i przepięciami pochodzenia atmosferycznego w urządzeniach srk jest uwarunkowana wieloma czynnikami:

- znaczną rozległością obszarową,
- wzajemnym oddziaływaniem obwodów i urządzeń wysoko i niskonapięciowych przy różnych systemach zasilania
- wspólnym prowadzeniem kabli zasilających, sygnałowych, sterujących i telekomunikacyjnych
- złożonością i wzajemnym powiązaniem podsystemów, w tym urządzeń różnych generacji
- możliwością jednoczesnego oddziaływania zaburzeń z wielu źródeł.

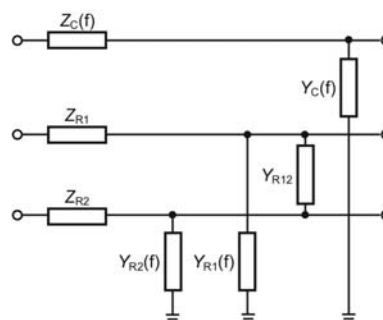
2. Modelowanie układu

W opracowaniu układu do analizy założono, że ma on umożliwić analizę zwarć i przepięć pochodzenia atmosferycznego. W tym celu opracowano modele elementów układu: sieć trakcyjna, sieć szynowa, kabel, słup, izolator, odgromnik. Podzielenie układu na odcinki o długości 72 m pozwala na dokładniejsze modelowanie oraz obserwowanie wyników analizy w dowolnie wybranych punktach.

2.1. Model sieci trakcyjnej

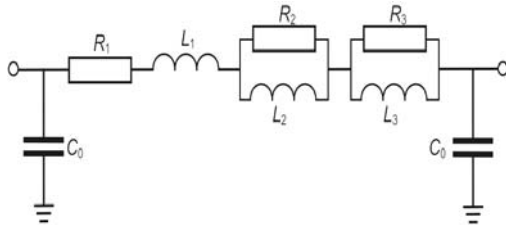
Analiza zagrożeń urządzeń srk powodowanych zwarzami i przepięciami pochodzenia atmosferycznego w sieci trakcyjnej wymaga opracowania modelu uwzględniającego parametry R , L , C i ich zmienności w funkcji częstotliwości. W analizie uwzględniono, że jest to obwód o parametrach rozłożonych. Ogólny schemat przyjętego do obliczeń odcinka sieci zasilającej i powrotnej przedstawiono na rysunku 1 [5].

Dla pasma częstotliwości uwzględnianego w tego rodzaju analizach, rzędu kilku kHz, sieć trakcyjna odpowiadająca długości odcinka między podstacjami ma długość porównywalną z długością ćwierćfali. Zgodnie z danymi przedstawionymi w pracy [5], jeżeli długość zastępczego czwórnika sieci trakcyjnej nie przekracza 3% długości fali, to błąd takiego modelu jest mniejszy niż 2,5%. Dla przyjętej do analizy częstotliwości 10 kHz długość czwórnika spełniającego ten warunek wynosi 900 m. W utworzonym modelu obliczeniowym jako długość modelowanego odcinka przyjęto odległość między dwoma słupami sieci trakcyjnej tj. 72 m.



Rys. 1. Model impedancyjno – admitancyjny odcinka toru [5]

Wyznaczone dla odcinka sieci trakcyjnej (rys. 2) o długości 72 m, parametry z pomiarów [5], przy uwzględnieniu częstotliwościowo zależnej charakterystyki parametrów przewodów wynosiły: $R_1 = 5,04 \text{ m}\Omega$, $L_1 = 97,35 \text{ }\mu\text{H}$, $R_2 = 16,45 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 12,39 \text{ }\mu\text{H}$, $R_3 = 118,34 \text{ m}\Omega$, $L_3 = 4,19 \text{ }\mu\text{H}$, $C_0 = 2,32 \text{ nF}$ [5].

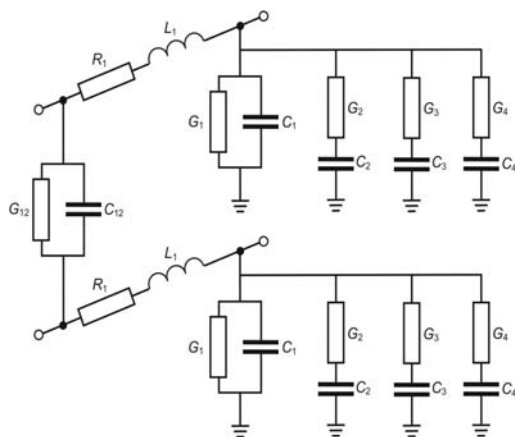


Rys. 2. Czwornik jako element modelu sieci trakcyjnej uwzględniający zmienność parametrów w funkcji częstotliwości [5]

2.2. Sieć szynowa i parametry elektryczne toru

Parametry szyn wyznaczone na podstawie wyników pomiarów zamieszczonych w [5] dla długości odcinka 72 m wynosiły (rys. 3): $R_1 = 0,576 \text{ }\Omega$, $L_1 = 0,0576 \text{ mH}$, $G_{12} = 0,115 \text{ S}$, $C_{12} = 1,44 \text{ }\mu\text{F}$. W podobny sposób wyliczono parametry zastępcze czwornika opisującego odcinek sieci szynowej przy uwzględnieniu ich zmienności w funkcji częstotliwości (szyna 1): $G_1 = 6,24 \text{ mS}$, $C_1 = 3,98 \text{ }\mu\text{F}$, $G_2 = 6,07 \text{ mS}$, $C_2 = 0,37 \text{ mF}$, $G_3 = 13,3 \text{ mS}$, $C_3 = 5,94 \text{ }\mu\text{F}$, $G_4 = 0,305 \text{ S}$, $C_4 = 3,06 \text{ }\mu\text{F}$ [11].

Takie same wartości przyjęto dla drugiego czwornika połączonego z szyną 2. Uwzględniono również połączenia wyrównawcze pomiędzy szynami, co około 300 m.

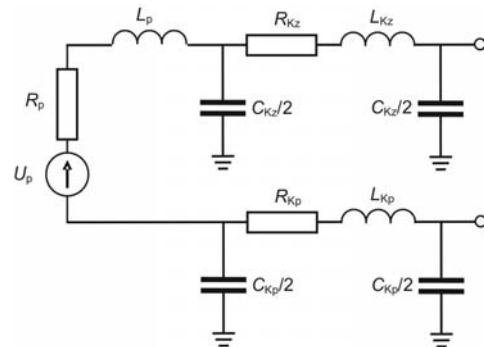


Rys. 3. Schemat odcinka toru kolejowego z uwzględnieniem wpływu ziemi [5]

2.3. Model podstacji

Jako model podstacji (rys. 4) przyjęto parametry uwzględniające: napięcie podstacji $U_p = 3450 \text{ V}$, indukcyjność podstacji i systemu zasilania $L_p = 4,774 \text{ mH}$ [6]. Parametry kabla powrotnego i zasilającego wprowadzono, zgodnie z wynikami pomiarów zamieszczonymi w pracy [6], dla częstotliwości 10 kHz

i długości kabla 200 m jako: $R_{Kz} = R_{Kp} = 3 \text{ }\Omega$, $L_{Kz} = L_{Kp} = 0,13 \text{ mH}$, $C_{Kz} = C_{Kp} = 0,4 \text{ }\mu\text{F}$. Model ten przyjęty do obliczeń jako czwornik może być rozbudowywany w dalszych symulacjach.



Rys. 4. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej i połączeń kablowych [6]

2.4. Słupy

W analizie zwarć i przepięć pochodzenia atmosferycznego, model słupa może być realizowany jako szeregowe połączenie indukcyjności i rezystancji. Zakładając indukcyjność jednostkową $L_0 = 1,67 \text{ }\mu\text{H/km}$ wyznaczoną z zależności:

$$L = 0,2 \mu_r \frac{2h}{r} \text{ } [\mu\text{H/km}] \quad (1)$$

gdzie: μ_r - przenikalność magnetyczna względna
 h - wysokość słupa

r - promień zastępczy słupa

przyjęto indukcyjność słupa $L = 20,28 \text{ }\mu\text{H}$, a rezystancję uziemienia słupa jako $R = 10 \text{ }\Omega$. Jako uszynie nie słupa przyjęto indukcyjność $L = 5 \text{ }\mu\text{H}$ [7].

2.5. Odgromniki i iskierniki

W analizie jako model izolatora uwzględniono w modelu słupa wyłącznik sterowany napięciem 90 kV. Model odgromnika różkowego wprowadzono natomiast jako wyłącznik sterowany napięciem o wartości napięcia przeskoku 12 kV i powietrznej przerwie o rezystancji 100 M Ω [7,8].

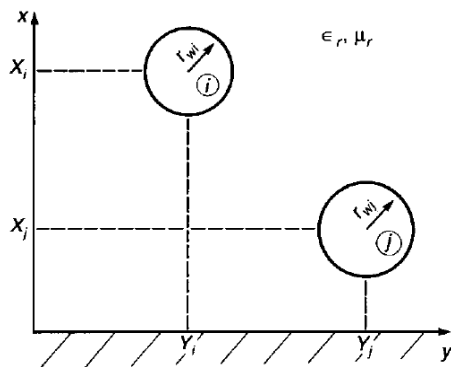
Odgromniki różkowe, stosowane do ochrony sieci trakcyjnej, są instalowane co 1200 m lub 600m (dla terenów o dużej intensywności burzowej, więcej niż 30 dni). W analizie uwzględniono odległości 600 m.

3. Model czteroprzewodowej wzajemnie sprzężonej linii długiej

Wyznaczenie parametrów L i C linii długiej 37-o żyłowego kabła YKSY(zo) dla przyjętych parametrów jednostkowych i przy zastosowaniu równań analizy obwodów elektrycznych omówiono w [9]. W referacie oddziaływanie pomiędzy siecią trakcyjną, szynami i kablem do urządzeń srk uwzględniono (rys. 5) stosując model czteroprzewodowej wzajemnie

sprężonej linii długiej z wykorzystaniem źródeł sterowanych w programie LTSPICE [10]. W tego rodzaju analizie kabel wielożyłowy dla uproszczenia jest zamodelowany jako pojedynczy przewód [11].

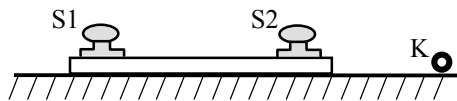
Do analizy przyjęto parametry geometryczne, jak rysunku 5. Długość odcinków odpowiada odległości pomiędzy słupami trakcyjnymi i wynosi 72 m. W przyjętym układzie kabel jest umieszczony na powierzchni ziemi w odległości 1,5 m od osi toru.



Rys. 5. Model wzajemnie sprzężonej linii długiej dla dwóch przewodów umieszczonych w ośrodku jednorodnym [10]

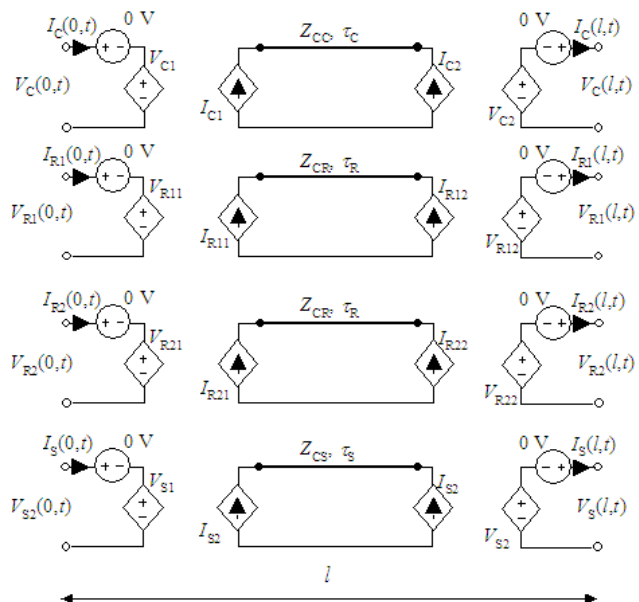
Symulację prowadzono dla układu składającego się z 178-u sekcji, dających model linii o długości 12,82 km. Model linii bezstratnej ze sprzężeniami uzupełniono o straty podłużne jak (w pkt 2.1 i 2.2) umieszczone w węzłach między sekcjami linii. Do uwzględnienia sprzężeń pomiędzy poszczególnymi przewodami wprowadzono przedstawiony na rysunku 7 model wzajemnie sprzężonej czteroprzewodowej linii długiej z wykorzystaniem źródeł sterowanych [10]

○ Pj



Rys.6. Widok poprzeczny sieci trakcyjnej i torów z pobliskim kablem

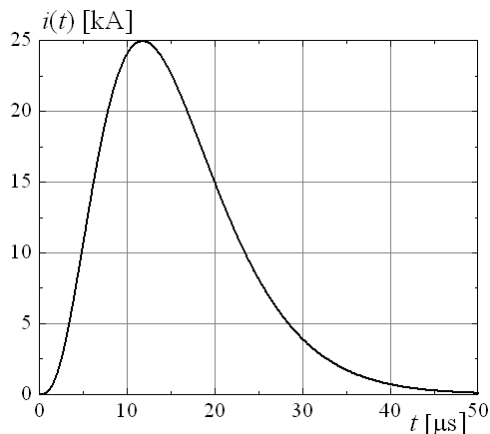
Do symulacji przepięć pochodzenia atmosferycznego przyjęto wymuszenie w postaci udaru prądowego 8/20 μ s, jak na rysunku 8. Dla celów symulacji komputerowych oraz do projektowania generatorów udarów podawane są zależności matematyczne definiujące parametry i kształty impulsów [12]. Impuls prądowy 8/20 μ s może być przybliżony zależnością:



Rys. 7. Model wzajemnie sprzężonej czteroprzewodowej linii długiej z wykorzystaniem źródeł sterowanych [10]

$$i(t) = AI_p t^3 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

z parametrami wynoszącymi: $A = 0,01243 (\mu\text{s})^{-3}$; $\tau = 3,911\mu\text{s}$.



Rys. 7. Przebieg udaru prądowego 8/20 μ s, $I_p=25$ kA [14]

Poziomy odporności na udary urządzeń srk są określone w normie PN-EN50121-4, 2002(U) [15]. Modelowanie i analiza zwarć w opracowanym układzie wymaga znacznie dłuższego (około 60 ms) czasu obserwacji. Zwiększa to w znaczący sposób plik wyników. Realizowano ją poprzez doprowadzanie idealnego źródła zwarcia. Otrzymywane charakterystyki mogą być przybliżone zależnością [16]:

$$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (3)$$

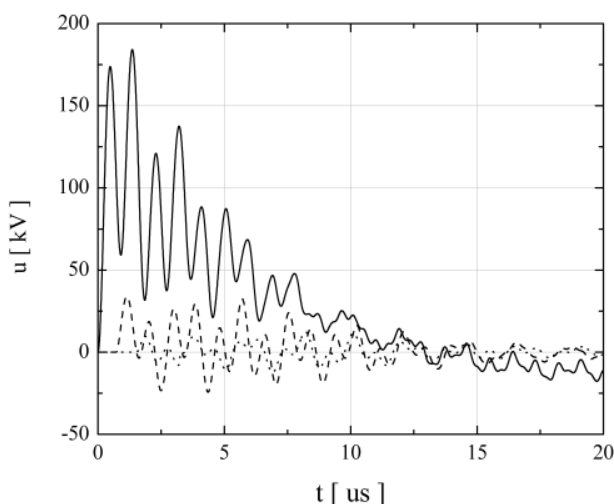
gdzie: E - napięcie źródłowe
R - rezystancja obwodu
T - stała czasowa obwodu $\frac{L}{R}$.

Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi z modelowania propagacji sygnałów napięciowych dla wymuszenia w postaci fali prądowej $8/20 \mu\text{s}$ ($I_{\text{max}} = 25 \text{ kA}$). Do analizy modele elementów przyjętego układu zgrupowano w postaci czwórników typu Π tworząc dwa modele czwórników zawierające odcinek sieci trakcyjnej i toru o długości 72m oraz:

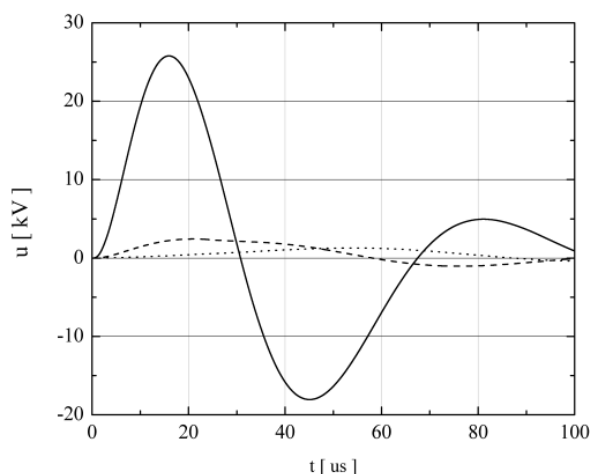
- 1 - słup z izolatorem
- 2 - słup z odgromnikiem rozkowym.

Przyjęto odcinek zawierający 178 czwórników. Źródło zwarcia doprowadzono do czwórnika 93 realizując zwarcie pomiędzy szyną i kablem:

Poniżej przedstawiono wybrane przebiegi napięć dla słupa z doprowadzonym udarem (linia ciągła) i dwóch kolejnych słupów (linia przerywana i kropkowa) w miejscu ich połączenia z wyłącznikiem. Na kolejnym rysunku 9 zamieszczono przebiegi napięć dla tych samych słupów w miejscu połączenia z szyną.



Rys. 8. Przebiegi napięć dla modelu wzajemnie sprzężonej linii długiej na słupie, do którego doprowadzono udar o kształcie $8/20 \mu\text{s}$ i wartości maksymalnej 25 kA (linia ciągła) oraz kolejnych słupach w odległości 72 m (linia kreskowana) i 144m (linia kropkowa)



Rys. 9. Przebiegi napięć dla słupów z rys. 8 w miejscu połączenia z szyną

5. Podsumowanie

W referacie omówiono elementy składowe modelu matematycznego opisującego przyjęty do analizy układ sieci trakcyjnej z położonym równolegle do szyn w odległości 1,5 m od osi toru kablem. Wprowadzono model wzajemnie sprzężonej linii długiej. Zbudowany model sieci złożony został z elementów opisanych w punkcie 2 i może reprezentować odcinek sieci trakcyjnej o dowolnej długości. Zawarte elementy składowe wprowadzone w postaci czwórników można rozbudowywać lub uzupełniać o kolejne w zależności od rodzaju stosowanych elementów rzeczywistego układu.

5. Wnioski

Ocena zagrożeń urządzeń srk powodowanych zwarciami i przepięciami pochodzenia atmosferycznego w sieciach trakcyjnych wymaga prowadzenia pomiarów i dokładnych analiz rozplywu prądów i spadków napięć w elementach konstrukcyjnych i instalacyjnych analizowanych urządzeń. Zastosowanie programu LTSPICE znacznie ułatwia skomplikowaną analizę oraz ocenę zachodzących zjawisk. Rozeznane możliwości programu mają charakter poznawczy i zostaną wykorzystane do dalszej analizy i oceny zagrożeń elementów zasilania urządzeń kolejowych.

Literatura

1. A. Kulawiak, B. Kabacińska, A. Kaźmierczak – "Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 1. Przygotowanie zbioru dokumentacji najczęściej uszkodzanych urządzeń srk". Wersja 2, 4036/20. CNTK, Warszawa, 2003
2. A. Kulawiak, B. Kabacińska, A. Kaźmierczak – "Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 2. Analiza uszkodzeń urządzeń srk spowodowanych przepięciami". Wersja 2. Nr 4036/20. CNTK, Warszawa, 2003
3. M. Laskowski, A. Kulawiak – "Ochrona przeciwprzepięciowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi". Praca CNTK, 1002/24, Warszawa 1994
4. M. Laskowski, R. Malesa, Z. Wróbel i inni – "Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych". Praca CNTK (Zakład Telekomunikacji) nr 1049/24, Warszawa 1997
5. A. Szelaż – "Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji". Prace Naukowe, Elektryka z. 123, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002
6. A. Białoń, A. Kaźmierczak, W. Zajęc – "Opracowanie dopuszczalnych parametrów zakłóceń dla urządzeń srk, łączności i pojazdów trakcyjnych". Sprawozdanie końcowe. Praca 6915/23, CNTK, Warszawa 1999

7. Z. Wróbel – "Computer modelling of lightning discharge threat to railway installations", MODERN ELECTRIC TRACTION. POWER SUPPLY. Edited by Krzysztof Karwowski, Adam Szeląg, Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering. Gdańsk 2009
8. Z. Wróbel, R. Ziemia – "Computer modelling of the railway electric traction cused by fast surges", MODERN ELECTRIC TRACTION. POWER SUPPLY. Edited by Krzysztof Karwowski, Adam Szeląg, Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering. Gdańsk 2009
9. Z. Wróbel – "Zastosowanie modelu kabla wielożyłowego w analizie zagrożeń urządzeń sterowania ruchem kolejowym", Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej; XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Zakopane, październik 2010, 373-382
10. Paul R. Clayton - "Introduction to Electromagnetic Compatibility". John Wiley & Sons, Inc. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada, 2006
11. A. S. Ahmad, T. Aka-Ngnui – "Lightning induced voltage on telephone cables and power systems", International Conference on Power Systems Transients (IPST'07) in Lyon, France on June 4-7, 2007
12. PN-EN 61000-4-5, (1998) –Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badania odporności na udary
13. PN-EN50121-4, 2002(U) –Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna Część 4, Emisja i odporność na zakłócenia urządzeń sygnalizacji i telekomunikacji
14. L. Mierzejewski, A. Szeląg, M. Galuszewski –"System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego", Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1989