

Bartosz OLEJNIK*

DOZIEMNE ZWARCIA PRZERYWANE W SIECI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Artykuł porusza problemy związane ze zvarciami doziemnymi w sieci SN o charakterze przerywanym. Analizowane są sytuacje, w których punkt neutralny sieci uziemiony jest przez rezystor lub przez dławik gaszący z układem AWSCz. Badania dotyczą przede wszystkim przebiegów prądów i napięć w wybranych liniach sieci, wartości i przebiegu w czasie składowych symetrycznych tych wielkości oraz parametrów charakterystycznych dla zwarć doziemnych.

Wyznaczana jest także średnia wartość wybranych wielkości do oceny możliwości detekcji zwarć przez współcześnie eksploatowane zabezpieczenia. Oceniona została możliwość zastosowania kryteriów admitancyjnych w detekcji zwarć przerywanych, zwłaszcza w odniesieniu do sygnalizatorów przepływu prądu zvarcia doziemnego.

SŁOWA KLUCZOWE: EMTP/ATP, zvarcie doziemne, zvarcia przerywane, sieć SN

1. WSTĘP

Elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna tworzona jest przez zespół urządzeń, których zadaniem jest rozdzielanie energii między odbiorców lub grupy odbiorców. Obciążenia przez nich generowane są zwykle rozłożone wzdłuż linii. Wyjątek stanowią tutaj np. odbiorcy przemysłowi o dużym zapotrzebowaniu na moc, zasilani indywidualną linią SN, często będącą ich własnością. Poszczególne linie zwykle są rozgałęzione i składają się z odcinków napowietrznych oraz kablowych. Z uwagi na te cechy, w sieciach rozdzielczych, zwłaszcza o napięciu z przedziału od 6 do 45 kV [1], dochodzi do wielu różnych zaburzeń w ich pracy. Wśród nich wyróżnia się przede wszystkim zvarcia międzyfazowe (ok. 20 % wszystkich zwarć) oraz doziemne (ok. 80 % wszystkich zwarć). Wśród zwarć doziemnych wyszczególnić można:

- zvarcia metaliczne – gdy rezystancja przejścia w miejscu zvarcia $R_F \approx 0$,
- zvarcia oporowe ($R_F > 0$) oraz wysokooporowe ($R_F \gg 0$),
- zvarcia przerywane, które zwykle związane są z czasowym zapalaniem się i gaśnięciem łuku elektrycznego w miejscu zvarcia.

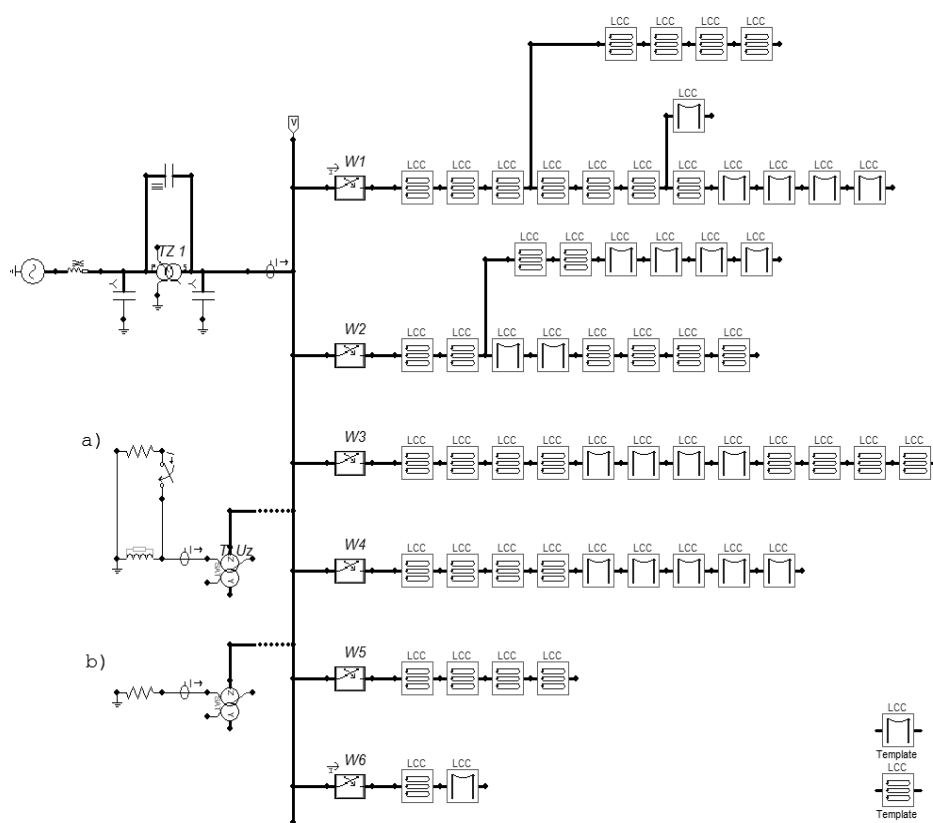
* Politechnika Poznańska.

Z punktu widzenia działania zabezpieczeń elektroenergetycznych, najtrudniejsze do wykrycia są zwarcia wysokooporowe (o rezystancji przejścia $R_F > 2 \text{ k}\Omega$) i zwarcia przerywane, ponieważ sygnały pomiarowe są w tych sytuacjach trudne do pomiaru i późniejszej analizy.

Niniejszy artykuł porusza problem zwarców przerywanych z pominięciem zjawisk łukowych. To uproszczenie nie ma znaczącego wpływu na analizy, które zostaną tutaj przeprowadzone.

2. MODEL SYMULACYJNY

Do przeprowadzenia analiz stworzony został model przedstawiony na rys. 1. Do wykonywania obliczeń wykorzystane zostało środowisko EMTP/ATP, natomiast sam model zbudowany został w programie ATPDraw 6.1.



Rys. 1. Badana sieć średniego napięcia z a) punktem neutralnym uziemionym przez dławik gaszący z automatyką wymuszania składowej czynnej, b) punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

Podstawowe parametry zamodelowanej sieci są następujące:

- napięcie znamionowe $U_N = 15 \text{ kV}$,
- moc zwarciowa na szynach WN: $S_k'' = 1,1 \text{ MVA}$,
- punkt neutralny uziemiony przez dławik gaszący z AWSCz lub przez rezystor, transformator uziemiający z grupą połączeń ZY,
- liczba linii odpływowych – 6, w tym pięć linii o mieszanej strukturze napowietrzno – kablowej, jedna linia kablowa.

Do symulowania zwarć wytypowana została linia za wyłącznikiem W4, której prąd pojemnościowy jest równy $I_{CL4} = 15,75 \text{ A}$. Całkowity prąd pojemnościowy sieci jest równy $I_{CS} \approx 100 \text{ A}$. W przypadku, gdy w punkcie neutralnym sieci pracuje rezystor, jego rezystancja jest równa $R_R = 70 \Omega$, co daje znamionowy prąd ziemnozwarciowy rezystora równy $I_{RN} = 125 \text{ A}$.

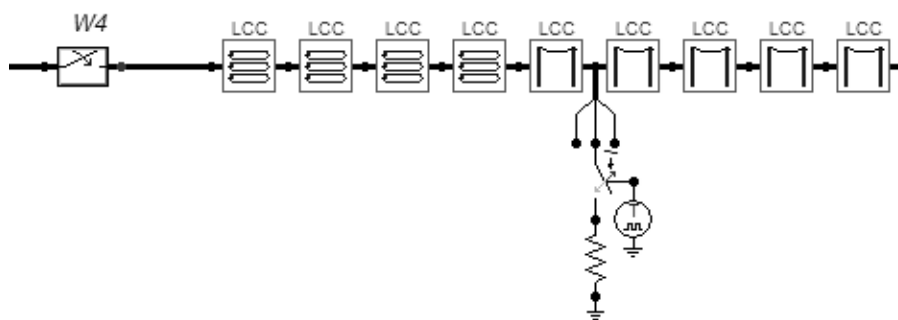
Dla wariantu z siecią skompensowaną parametry znamionowe dławika gaszącego oraz rezystora w układzie AWSCz są tak dobrane, aby:

- współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej był równy $s \approx 0,1$,
- dotatkowy prąd o charakterze czynnym wymuszany przez automatykę AWSCz był równy $I_{AWSCz} = 25 \text{ A}$.

Zakłada się, że współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej jest wyznaczany z zależności:

$$s = 1 - \frac{1}{\omega^2 C_0 L_L} \quad (1)$$

w miejscu wskazanym na rysunku 2. Model linii składa się z czterech bloków LCC „kablowych” oraz 5 bloków LCC „napowietrznych”. Każdy blok LCC odwzorowujący linię kablową symuluje kabel typu YHAKXS o przekroju $s_k = 120 \text{ mm}^2$ i ma długość $l_k = 1 \text{ km}$. Każdy blok LCC odwzorowujący linię napowietrzną symuluje taką o długości $l_{ln} = 10 \text{ km}$ i przekroju $s_{ln} = 70 \text{ mm}^2$.



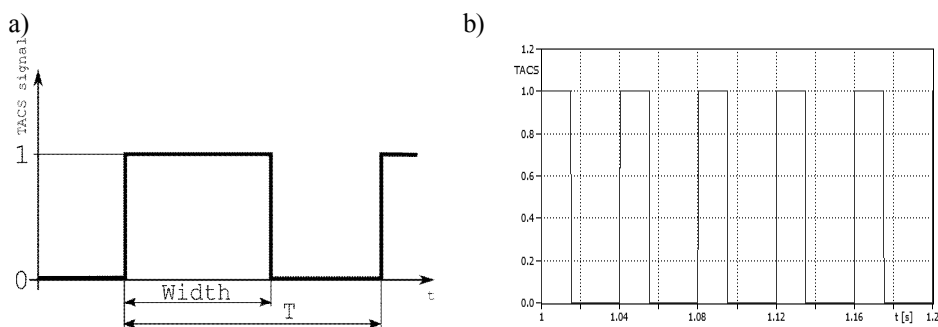
Rys. 2. Linia W4 i miejsce wykonywania zwarć przerywanych

W budowie modelu symulacyjnego wykorzystane zostały elementy typu TACS (ang. *Transient Analysis of Control Systems*), które umożliwiają analizę stanów przejściowych systemów pomiarowych, sterowania i nadzoru. Za pomocą elementów TACS można dokonywać różnorodnych operacji matematycznych na sygnałach pobranych z wybranych miejsc analizowanego układu. Na tej podstawie możliwe jest podejmowanie decyzji i realizowanie różnego rodzaju operacji, zgodnie z wynikami obliczeń [2].

Do symulowania zwarć przerywanych posłużono się następującymi elementami typu TACS:

- TACS switch (type 13), który jest łącznikiem sterowanym binarnym sygnałem TACS – dla stanu 0 wyłącznik jest otwarty, dla stanu 1 – zamknięty,
- TACS pulse source (type 23), który jest źródłem sygnału prostokątnego o regulowanym czasie trwania impulsu [3].

Inicjacja zwarcia poprzez cykliczne zamykanie i otwieranie łącznika z podpunktu b) odbywa się przez zadanie parametrów jak na rysunku 3. Początek generowania zwarć przerywanych ustalony został na $t_p = 1$ s.



Rys. 3. Sygnał generowany przez źródło TACS pulse source (type 23): a) wyjaśnienie wielkości, b) przykład sygnału dla $Width = 0,015$ s oraz $T = 0,04$ s

Na tej podstawie można zapisać, że zwarcie utrzymywane jest w układzie przez czas równy $Width$. Przerwa natomiast ma długość $T_p = T - Width$.

Przykładowy przebieg sygnału sterującego załączaniem zwarcia pokazuje rysunek 3b.

Jedną z metod detekcji zwarć przerywanych jest zastosowanie średniej kroczącej do wyznaczania wartości średniej składowej zerowej napięcia i prądu. W symulacji zastosowano okno pomiarowe o szerokości $t_0 = 80$ ms, czyli obejmujące 4 okresy sygnału o częstotliwości $f = 50$ Hz. Fragment kodu programu odpowiedzialnego za wyznaczanie średniej kroczącej w języku MODELS przedstawiony jest na rysunku 4.

```

MODEL AVG
INPUT inp
OUTPUT out
DATA avgsz
VAR P, Val, tab[1..avgsz], Cnt, out
INIT
P:=1
Val:=0
tab[1..avgsz]:=0
Cnt:=1
out:=0
ENDINIT
EXEC
P:=(Cnt mod avgsz)+1
Val:=(Val+inp-tab[P])
tab[P]:=inp
Cnt:=Cnt+1
out:=Val/avgsz
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Rys. 4. Wyznaczanie średniej kroczącej – kod źródłowy

3. SCENARIUSZ BADAŃ

Z uwagi na to, że jednym z celów badań było wskazanie różnic w przebiegach wybranych wielkości fizycznych przy zwarcia przerywanych o różnych parametrach i w sieciach z różnym sposobem pracy punktu neutralnego, doświadczenia były prowadzone wg scenariuszy przedstawionych w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Scenariusz badań

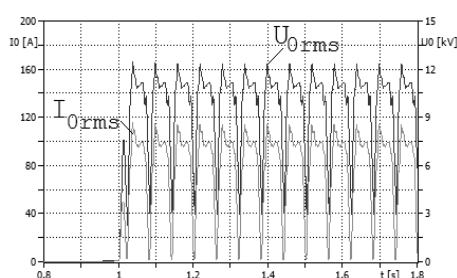
Punkt neutralny uziemiony przez rezystor				Sieć skompensowana			
Nr scen.	R_F [Ω]	$Width$ [s]	T [s]	Nr scen.	R_F [Ω]	$Width$ [s]	T [s]
$R1$	0	0,06	0,045	$C1$	0	0,06	0,045
$R2$		0,04	0,015	$C2$		0,04	0,015
$R3$	1000	0,06	0,045	$C3$	1000	0,06	0,045
$R4$		0,04	0,015	$C4$		0,04	0,015

Scenariusze, w przypadku których punkt neutralny sieci uziemiony jest przez rezystor zostały oznaczone numerami R1–R4. Do sieci skompensowanej przyporządkowane zostały scenariusze C1–C4.

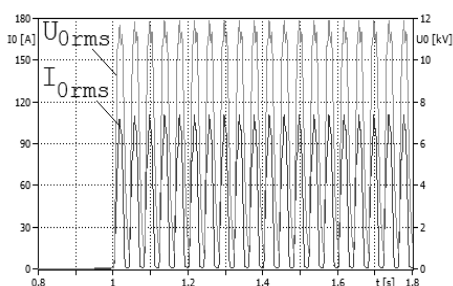
4. WYNIKI SYMULACJI

Scenariusz R1 i R2

Wartość skuteczna składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej dla scenariusza R1 przedstawiona jest na rysunku 5 a dla scenariusza R2 – na rysunku 6.

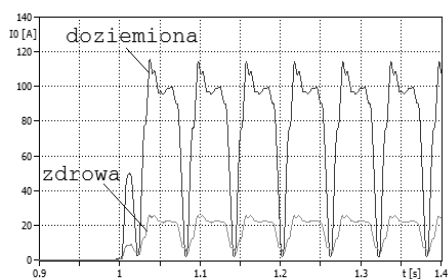


Rys. 5. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej dla scenariusza R1

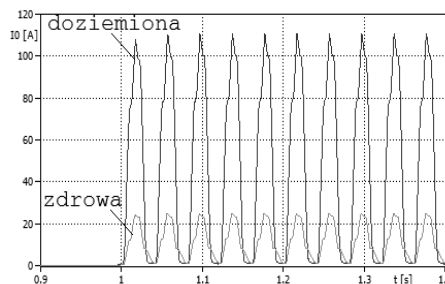


Rys. 6. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej dla scenariusza R2

Rysunek 7 przedstawia porównanie przebiegów wartości skutecznych składowych zerowych prądu w linii zdrowej (za wyłącznikiem W3) oraz doziemionej dla scenariusza R1, natomiast rysunek 8 – dla scenariusza R2.

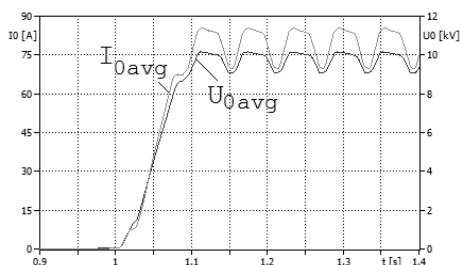


Rys. 7. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza R1

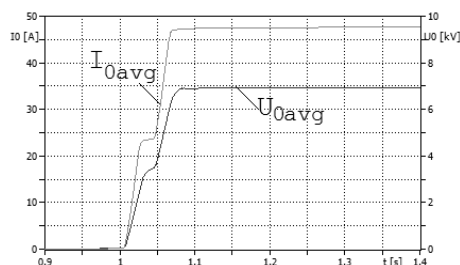


Rys. 8. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza R2

Uśrednione wartości skuteczne składowej zerowej napięcia i prądu w linii z doziemieniem dla scenariusza R1 przedstawia rysunek 9 a dla scenariusza R2 – rysunek 10.



Rys. 9. Uśredniona wartość skuteczna składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemnej dla scenariusza R1

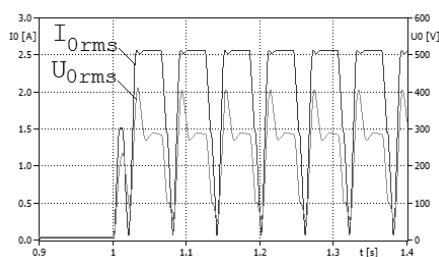


Rys. 10. Uśredniona wartość skuteczna składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemnej dla scenariusza R2

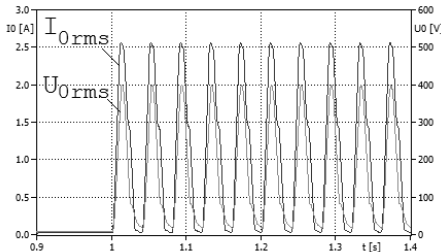
Scenariusz R3 i R4

Zwarcia symulowane w scenariuszach R3 oraz R4 są zwarciami oporowymi z rezystancją przejścia $R_F = 1000 \Omega$. Jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych, tego typu zakłócenia są dość często spotykane a większość współczesnych zabezpieczeń elektroenergetycznych ma problem z ich detekcją.

Rysunki 11 oraz 12 przedstawiają przebiegi wartości skutecznej składowych zerowych prądu i napięcia w linii doziemnej dla obu scenariuszów.

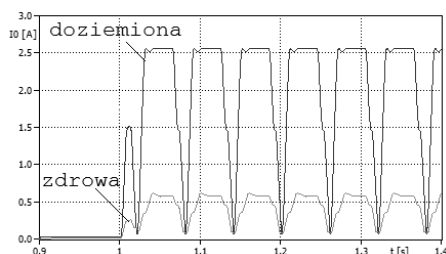


Rys. 11. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemnej dla scenariusza R3

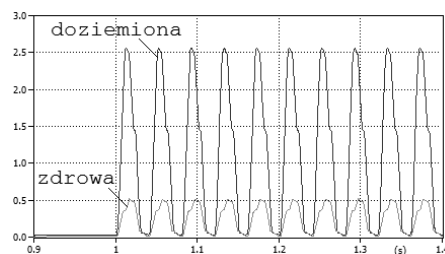


Rys. 12. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemnej dla scenariusza R4

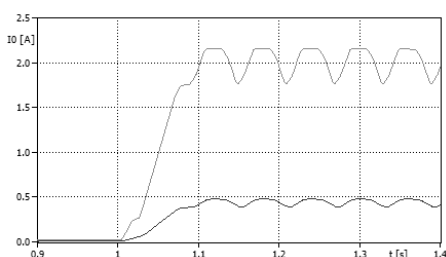
Rysunki 13 oraz 14 pokazują porównanie przebiegów składowych zerowych prądów w linii zdrowej (za wyłącznikiem W3) oraz w linii z doziemieniem. Obie te linie mają porównywalne wartości prądów pojemnościowych. Maksymalna chwilowa wartość skuteczna I_0 w linii doziemionej jest ok. 5 krotnie wyższa w porównaniu z linią zdrową. Podobne zjawisko można zaobserwować w przypadku scenariusza R1 i R2. W przypadku uśrednionej wartości tych wielkości sytuacja jest taka sama – w linii zdrowej I_0 jest ok. pięciokrotnie niższe niż w linii doziemionej (patrz rys. 15 – 16).



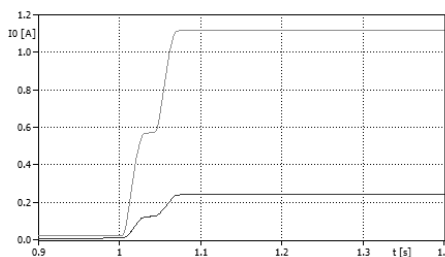
Rys. 13. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza R3



Rys. 14. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza R4

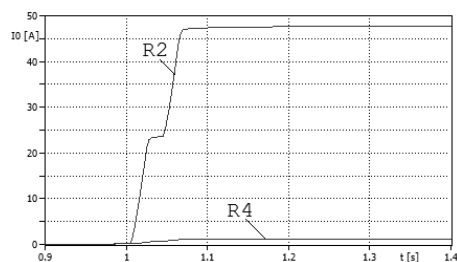


Rys. 15. Uśrednione przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza R3



Rys. 16. Uśrednione przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza R4

Porównanie uśrednionych wartości skutecznych składowych zerowych prądów dla przykładowych wariantów R2 oraz R4 pokazuje rysunek 17.



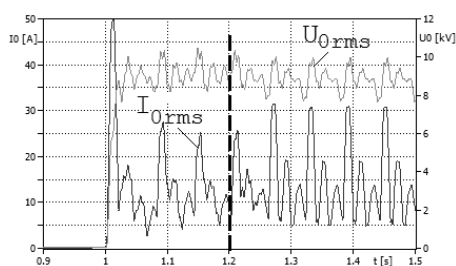
Rys. 17. Uśrednione wartości skuteczne składowych zerowych prądów dla scenariusza R2 oraz R4

W przypadku zwarcia z $R_F = 1000 \Omega$ wartość składowej zerowej prądu jest prawie 50 razy większa niż dla zwarcia metalicznego. Z tego powodu doziemienie metaliczne jest znacznie łatwiejsze w detekcji.

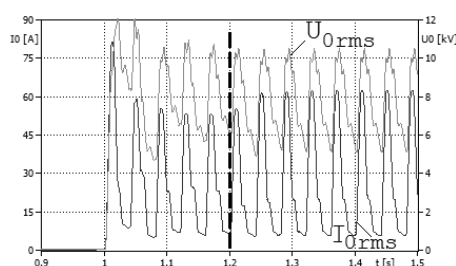
Scenariusz C1 i C2

Dla scenariuszów C1–C4 sieć jest uziemiona przez dławik gaszący o odpowiednio dobranej reaktancji. Dodatkowo, dla poprawy skuteczności zabezpieczeń ziemnozwarciowych, równoległe do dławika podłączony jest rezystor wymuszający (AWSCz) załączany łącznikiem jednofazowym w chwili $T_{AWSCz} = 1,2$ s.

Wartość skuteczna składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej dla scenariusza C1 przedstawiona jest na rysunku 18 a dla scenariusza C2 – na rysunku 19. Linia przerywaną na rysunkach 18–25 zaznaczono moment załączenia automatyki AWSCz.

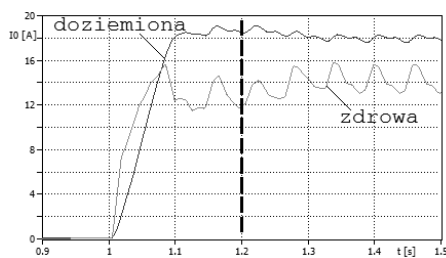


Rys. 18. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej dla scenariusza C1

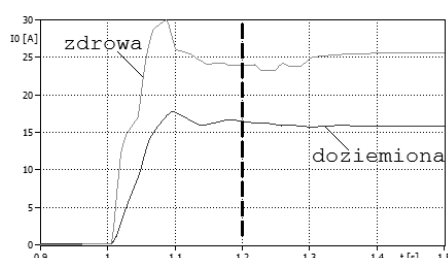


Rys. 19. Przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej dla scenariusza C2

Porównanie uśrednionych wartości składowych zerowych prądu dla linii zdrowej (za wyłącznikiem W3) i uszkodzonej dla rozpatrywanych scenariuszów przedstawiają rysunki 20 oraz 21.



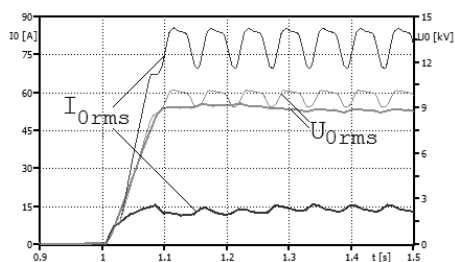
Rys. 20. Uśrednione przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza C1



Rys. 21. Uśrednione przebiegi wartości skutecznej składowej zerowej prądu w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza C2

Analizując rysunki 18–21 widać, że załączenie automatyki wymuszania składowej czynnej nie wpływa istotnie na przebiegi składowych zerowych prądów co świadczy o dużej trudności pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych przy tego

typu uszkodzeniach występujących w sieci skompensowanej. Można także porównać przebiegi uśrednionej składowej zerowej prądu i napięcia w doziemionej linii sieci skompensowanej oraz uziemionej przez rezystor (patrz rys. 22).

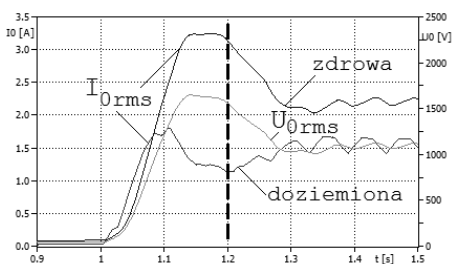


Rys. 22. Uśrednione przebiegi składowej zerowej prądu i napięcia w linii doziemionej w sieci skompensowanej (linie pogrubione) oraz w sieci uziemionej przez rezystor (linie zwykłe)

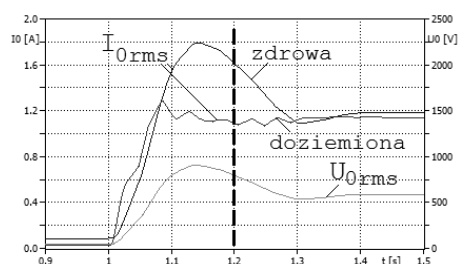
Rysunek 22 pokazuje oczywistą właściwość sieci uziemionej przez rezystor – wyższą wartość składowej zerowej prądu w porównaniu z siecią skompensowaną. Z uwagi na reaktancyjny charakter sieci skompensowanej omawiane przebiegi są bardziej wygładzone, co poprawia skuteczność pomiaru wielkości kryterialnych zabezpieczeń.

Scenariusz C3 i C4

Według źródeł (np. [4]) zwarcia doziemne oporowe przerywane są jednymi z najtrudniejszych do wykrycia stanów awaryjnych w sieci SN. Wartości prądów zwarciovych są w tym przypadku bardzo małe a ich silnie zmienny charakter – dodatkowo tą opinię potwierdza. Uśrednione przebiegi wartości skutecznej napięcia i prądów w linii doziemionej i zdrowej dla scenariusza C3 oraz C4 przedstawiają rysunku 23 oraz 24.



Rys. 23. Uśrednione wartości składowej zerowej napięcia oraz prądów w linii zdrowej i doziemionej dla scenariusza C3



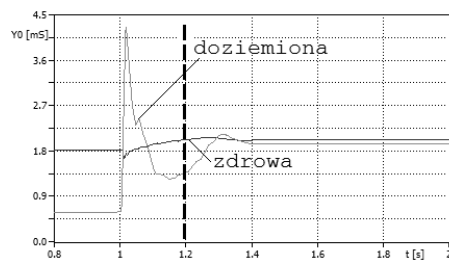
Rys. 24. Uśrednione wartości składowej zerowej napięcia oraz prądów w linii zdrowej i doziemionej dla scenariusza C4

Ponownie widoczny jest niewielki wpływ automatyki AWSCz na rozpatrywane wielkości, co może stawiać pod wątpliwość skuteczność tej automatyki w przypadku zwarć przerywanych.

Rysunek 25 przedstawia wartości chwilowe admitancji w linii zdrowej (za wyłącznikiem W3) oraz doziemionej dla scenariusza C4. Admitancja wyznaczana była w każdym kroku symulacji wg zależności:

$$Y = \frac{I_{0avg}}{U_{0avg}} \quad (2)$$

gdzie I_{0avg} – uśredniona wartość składowej zerowej prądu w danej linii dla danego kroku symulacji, U_{0avg} – uśredniona wartość składowej zerowej napięcia w sieci w danym kroku symulacji.



Rys. 25. Wartości chwilowe admitancji w linii zdrowej i doziemionej dla scenariusza C4

Widoczny jest wyraźny, zgodny z teorią, przyrost admitancji linii doziemionej, przy czym wartość wzrasta ponad trzykrotnie w stosunku do stanu bez zwarcia i o ponad 0,5 mS tylko po załączeniu AWSCz. Widać tutaj pozytywny skutek działania tej automatyki, która znacznie poprawia warunki działania zabezpieczeń, także przy zwarciach przerywanych.

5. PODSUMOWANIE

Doziemne zwarcie przerywane jest szczególnym stanem awaryjnym mogącym wystąpić w elektroenergetycznym systemie dystrybucyjnym. Z uwagi na charakter sygnałów pomiarowych stanowi duże wyzwanie dla każdego urządzenia elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Kilkanaście lat temu były one wykonane w technice analogowej. Dzięki stosowaniu licznych pojemności i indukcyjności w torach pomiarowych wygładzały one przebiegi wielkości decyzyjnych. Ten skutek uboczny wynikający z ich konstrukcji w przypadku zwarć przerywanych pozwalał na ich dość skuteczną detekcję. W urządzeniach cyfrowych istnieje konieczność uśredniania sygnałów pomiarowych wykorzystując odpowiednie, szybkie algorytmy.

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazują, że detekcja zwarć przerywanych bazująca na kryteriach nadprądowych jest nieprecyzyjna i trudna. Nawet mimo uśredniania sygnały pomiarowe mogą być niestabilne i powodować odpady zabezpieczeń. O wiele wyższą skuteczność prezentują kryteria admitancyjne – na podstawie wyników symulacji, także tych niepublikowanych, oraz literatury (np. [5]) można stwierdzić, że oparte na ich zabezpieczenia korzystają z sygnałów, które wyraźnie wskazują linię doziemioną. Poprawne wykorzystanie tych sygnałów leży w gestii producentów urządzeń, także sygnalizatorów przepływu prądu zwarciovego.

LITERATURA

- [1] Marzecki J.: Rozdzielcze sieci elektroenergetyczne. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2001 (in Polish).
- [2] Wiater J.: Kurs praktycznego wykorzystania programu ATP/EMTP, cz. 10. Elektro.info, nr 4/2008, ss. 94–101 (in Polish).
- [3] Kwapisz A., Lorenc J., Staszak B.: Intermittent Ground–Fault Modeling With EMTP/ATP. Lviv Polytechnic National University Repository, 2007.
- [4] Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007 (in Polish).
- [5] Sedighizadeh M., Rezaadeh A., Elkalashy N.I.: Approaches in High Impedance Fault Detection A Chronological Review. Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 114–128, 2010.

INTERMITTENT EARTH FAULTS IN MV GRID

The article focuses on problems related to earth faults in the MV network of an intermittent character. There are situations in which the neutral point of the network is grounded through a resistor or coil with Active Current Forcing Automation (AWSCz) analysed. The study relate primarily to current and voltage waveforms on selected lines in network, values and time course of symmetrical components of these values and parameters characteristic of the earth fault.

In the simulation the average value of the selected signals is calculated. This is to assessing the possibility to detect earth faults by modern IED. It was evaluated for the possibility of applying the admittance criteria to detect intermittent earth faults in particular with regard to the earth fault passage indicators.

(Received: 14. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)