

Józef LORENC*
Bogdan STASZAK*

MODELOWANIE ZJAWISK WYWOŁUJĄCYCH ASYMETRIĘ NAPIĘĆ DOZIEMNYCH W SIECIACH SN

W analizie zjawisk ziemnozwarciowych często pomija się impedancje wzdłużne poszczególnych jej elementów i uwzględnia się wyłącznie pojemności i konduktywności poszczególnych faz względem ziemi. Takie postępowanie jest szczególnie uzasadnione dla sieci skompensowanych i zwarć, którym towarzyszy znaczna rezystancja w miejscu zakłócenia (tzw. zwarcia wysokooporowe). Ważne jest jednak uwzględnianie w takich przypadkach możliwości wystąpienia różnicy napięć pomiędzy punktem neutralnym sieci a ziemią. Napięcie to jest skutkiem występowania naturalnej asymetrii admitancji doziemnych sieci lub asymetrii w napięciach zasilających. Poziom takiej asymetrii napięciowej ma znaczący wpływ na skuteczność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz ogranicza możliwości dokładnego strojenia dławików w procesie kompensacji ziemnozwarciowej

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu różnych zjawisk na poziom asymetrii napięć doziemnych sieci. Badania prowadzono na modelu sieci SN wykonanym w środowisku PSCAD i uwzględniano w nich oddziaływania doziemnej asymetrii pojemnościowej i konduktancyjnej sieci oraz stopień nierównomiernego obciążania poszczególnych linii.

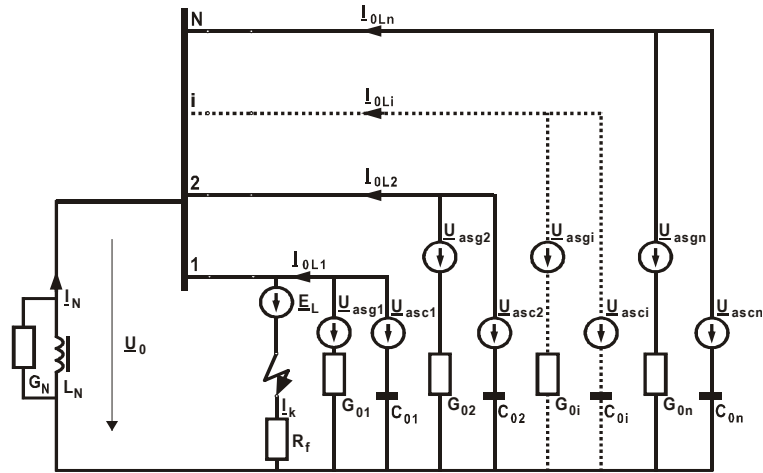
SŁOWA KLUCZOWE: zwarcia doziemne, sieci SN, asymetria napięciowa, zabezpieczenia ziemnozwarciowe

1. WPROWADZENIE

Podstawową wielkością charakteryzującą sieć w stanie zwarcia doziemnego jest składowa zerowa napięcia U_0 , która przy pominięciu impedancji wzdłużnych linii przedstawia napięcie pomiędzy punktem neutralnym sieci a ziemią [1, 2, 3, 4]. Jednak o poziomie tego napięcia decydują nie tylko warunki istniejące w miejscu zwarcia z ziemią, ale również asymetrie w pojemnościach i konduktancjach doziemnych oraz asymetria napięciowa względem ziemi w układzie zasilającym [1, 2]. Zjawiska wywołane takimi asymetrami są szczególnie widoczne w sieciach kompensowanych i muszą być uwzględniane w ustalaniu warunków pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz regulato-

* Politechnika Poznańska.

rów nadążnej kompensacji ziemnozwarciowej. W związku z tym analizę teoretyczną zakłóceń wywołanych asymetrią i zwarciami doziemnymi przeprowadza się najczęściej w oparciu o schemat zastępczy sieci przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy kompensowanej sieci SN do obliczeń wielkości ziemnozwarciowych [1]

Elementy i oznaczenia wprowadzone na tym rysunku dotyczą:

\underline{E}_L – napięcia źródłowej fazy doziemionej, C_{0i} – pojemności doziemnej i-tej linii, G_{0i} – konduktancji doziemnej i-tej linii, \underline{I}_{0i} – prądu doziemnego i-tej linii (wynikającego z C_{0i} i G_{0i}), R_F – rezystancji przejścia w miejscu doziemienia, L_N – reaktancji dławika kompensującego zainstalowanego w punkcie neutralnym sieci, G_N – konduktancji obwodu uzimniającego punkt neutralny sieci, oraz:

$$\underline{U}_{asci} = \frac{\underline{E}_{L1}C_{0L1i} + \underline{E}_{L2}C_{0L2i} + \underline{E}_{L3}C_{0L3i}}{C_{L1i} + C_{L2i} + C_{L3i}} \quad (1)$$

$$\underline{U}_{asgi} = \frac{\underline{E}_{L1}G_{0L1i} + \underline{E}_{L2}G_{0L2i} + \underline{E}_{L3}G_{0L3i}}{G_{L1i} + G_{L2i} + G_{L3i}} \quad (2)$$

gdzie: \underline{U}_{asci} - napięcie wywołane asymetrią fazowych pojemności doziemnych i-tej linii, \underline{U}_{asgi} - napięcie wywołane asymetrią fazowych konduktancji doziemnych i-tej linii, \underline{E}_{L1} , \underline{E}_{L2} , \underline{E}_{L3} - napięcia źródłowe poszczególnych faz L1, L2 i L3 sieci, C_{0L1i} , C_{0L2i} , C_{0L3i} - pojemności doziemne poszczególnych faz L1, L2 i L3 w i-tej linii, G_{0L1i} , G_{0L2i} , G_{0L3i} - konduktancje doziemne poszczególnych faz L1, L2 i L3 w i-tej linii.

W obwodzie uzimienia punktu neutralnego płynie prąd \underline{I}_N , natomiast napięcie punktu neutralnego względem ziemi (traktowane dalej jako składowa zerowa

napięcia sieci) oraz prąd w miejscu zwarcia oznaczono przez \underline{U}_0 i \underline{I}_K . Wielkości te w sposób zasadniczy opisują podstawowe cechy zjawiska ziemnozwarciowego sieci SN, a napięcia \underline{U}_0 ma szczególne znaczenie w ziemnozwarciowej automatyce zabezpieczeniowej. Poniżej przedstawiono zależności, które umożliwiają ocenę wpływu na \underline{U}_0 i \underline{I}_K skutków asymetrii doziemnej poszczególnych linii sieci w zależności od warunków kompensacji ziemnozwarciowej S i wartości rezystancji R_F .

2. SKŁADOWE NAPIĘCIA U_0

Zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys.1 wartość składowej zerowej napięcia U_0 wyraża się zależnością:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{E}_L + R_F j \omega \sum_{i=1}^n \underline{U}_{\text{asci}} C_{0i} + R_F \sum_{i=1}^n \underline{U}_{\text{asgi}} G_{0i}}{1 + R_F \cdot \omega \sum_{i=1}^n C_{0i} \left[\frac{G_N + \sum_{i=1}^n G_{0i}}{\omega \sum_{i=1}^n C_{0i}} + j \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_N \sum_{i=1}^n C_{0i}} \right) \right]} \quad (3)$$

gdzie: ω oznacza pulsację roboczą sieci.

Przyjmując, że:

$$\frac{G_N + \sum_{i=1}^n G_{0i}}{\omega \sum_{i=1}^n C_{0i}} = d_0 \quad \text{oraz, że} \quad 1 - \frac{1}{\omega^2 L_N \sum_{i=1}^n C_{0i}} = S \quad (4)$$

otrzymuje się zależność:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{E}_L + R_F j \omega \sum_{i=1}^n \underline{U}_{\text{asci}} C_{0i} + R_F \sum_{i=1}^n \underline{U}_{\text{asgi}} G_{0i}}{1 + R_F \cdot \omega \sum_{i=1}^n C_{0i} [d_0 + jS]} \quad (5)$$

gdzie: d_0 – współczynnik tłumienia sieci, S – współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej.

Po wprowadzeniu równań:

$$\underline{U}_{\text{asc}} = \frac{1}{C_{0s}} \sum_{i=1}^n \underline{U}_{\text{asci}} C_{0i} \quad \text{i} \quad \underline{U}_{\text{asg}} = \frac{1}{G_{0s}} \sum_{i=1}^n \underline{U}_{\text{asgi}} G_{0i} \quad (6)$$

gdzie:

$$C_{0s} = \sum_{i=1}^n C_{0i} \quad \text{i} \quad G_{0s} = \sum_{i=1}^n G_{0i} \quad (7)$$

otrzymuje się wyrażenie na napięcie U_0 w postaci:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{E}_L + R_F j \omega C_{0s} \underline{U}_{asc} + R_F G_{0s} \underline{U}_{asg}}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (8)$$

Z powyższej zależności wynika, że o składowej zerowej napięcia sieci decydują trzy następujące zjawiska: zwarcie fazy z ziemią, wypadkowa asymetria fazowych pojemności doziemnych i wypadkowa asymetria fazowych konduktancji doziemnych sieci. Każdemu z tych zjawisk można przypisać następującą formę zależności:

– dla zwarcie fazy z ziemią

$$\underline{U}_{0z} = \frac{\underline{E}_L}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (9)$$

– dla asymetrii fazowych pojemności doziemnych sieci

$$\underline{U}_{0asc} = \frac{R_F j \omega C_{0s} \underline{U}_{asc}}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (10)$$

– dla asymetrii fazowych konduktancji doziemnych sieci

$$\underline{U}_{0asg} = \frac{R_F G_{0s} \underline{U}_{asg}}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (11)$$

Składowa zerowa napięcia sieci może więc być zapisana równaniem:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{0z} + \underline{U}_{0asc} + \underline{U}_{0asg} \quad (12)$$

Ilościową interpretację poszczególnych składowych napięcia U_0 wygodniej jest przedstawić w wartościach względnych. W tym celu wyrażenie (12) należy obustronnie podzielić przez E_L i przekształcić napięcie U_0 do postaci współczynnika ziemnozwarciowego β , który opisany jest zależnością:

$$\underline{\beta} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{E}_L} = \underline{\beta}_z + \underline{\beta}_{asc} + \underline{\beta}_{asg} \quad (13)$$

gdzie:

$$\underline{\beta}_z = \frac{1}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (14a)$$

$$\underline{\beta}_{asc} = \frac{j \omega C_{0s} R_F \underline{X}_c}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (14b)$$

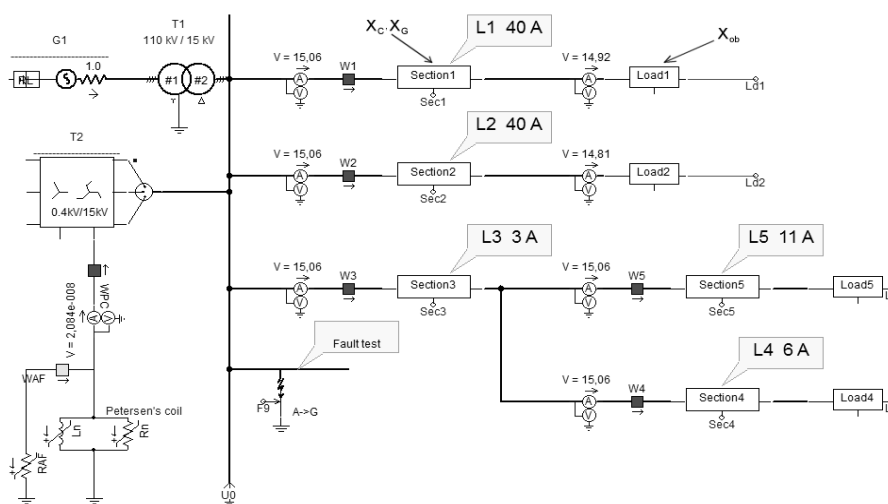
$$\underline{\beta}_{asg} = \frac{G_{0s} R_F \underline{X}_g}{1 + R_F \omega C_{0s} [d_0 + jS]} \quad (14c)$$

a $\underline{X}_c = \frac{U_{asc}}{\underline{E}_L} = X_c e^{j\alpha_c}$ oraz $\underline{X}_g = \frac{U_{asg}}{\underline{E}_L} = X_g e^{j\alpha_g}$ to współczynniki doziemnej asymetrii pojemnościowej i konduktancyjnej sieci.

Przedstawione powyżej wyrażenia oraz ich szczegółowa analiza wskazuje i potwierdzają, że ocena skutków wywołanych zwarciami doziemnymi i zjawiskami asymetrii napięciowej, pomimo wprowadzenia uproszczeń jest złożona i wymaga dość pracochłonnych obliczeń. Dodatkowo utrudnienia stanowić może brak wiarygodnych i bieżących danych o różnicach w admitancjach doziemnych poszczególnych faz sieci oraz rozkładzie napięć fazowych wzdłuż kolejnych odcinków linii. W związku z tym znacznym ułatwieniem w zakresie analiz skutków wywołanych w sieci przez zjawiska asymetrii mogą być badania prowadzone na zamodelowanych w programie komputerowym rozbudowanych strukturach sieci średnich napięć. Przykładem takich działań mogą być wyniki symulacji wykonanych w środowisku PSCAD.

3. CHARAKTERYSTYKA SIECI SN I ZAMODELOWANYCH ZJAWISK ASYMETRII

Dla potrzeb prowadzenia badań zamodelowano kompensowaną sieć 15 kV o doziemnym prądzie pojemnościowym równym 100 A, w której występują zjawiska związane z asymetrią pojemności i konduktancji doziemnej oraz zróżnicowanym rozkładem napięć względem ziemi w niesymetrycznie obciążonych liniach. Schemat modelu przedstawiono na rys. 2, na którym zaznaczono miejsca modelowanych zjawisk (znaczniki X_C , X_G , X_{ob} w linii L1).



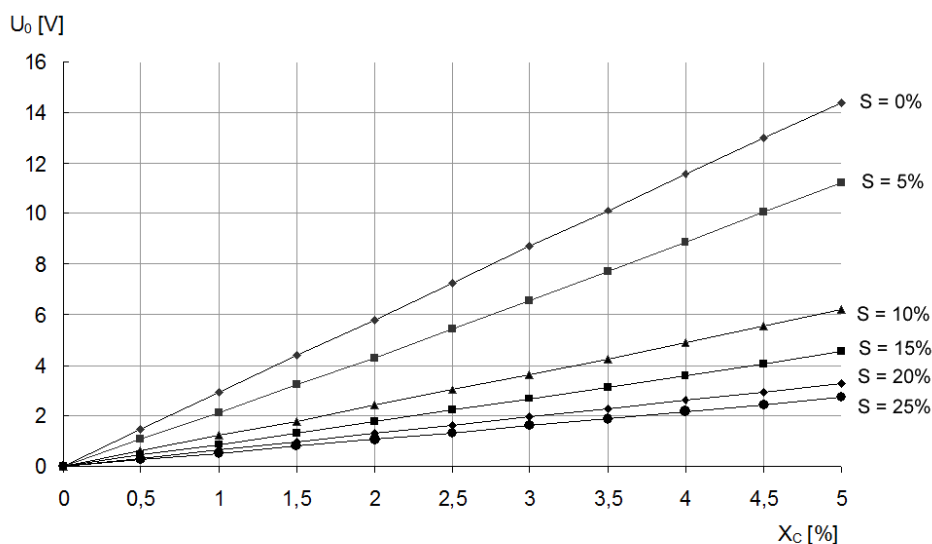
Rys. 2. Model badanej sieci SN

W modelowanej sieci istnieje możliwość określenia sposobu pracy punktu neutralnego i uwzględnienia działania układów automatyki wymuszania składowej czynnej AWSCz (wyłączniki WPC i WAF) oraz dokonania pomiarów prądów i napięć (wartości fazowe, składowe zerowe).

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych.

3.1. Napięcie U_0 wymuszone asymetrią pojemnościową

W skompensowanej sieci SN doziemna asymetria pojemnościowa linii o wartości do 5% powoduje pojawienie się składowej zerowej napięcia o znaczącej wartości. Wyniki symulacji dla linii L1 o współczynniku udziału w doziemnym prądzie pojemnościowym równym 0,4 przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Napięcie U_0 wymuszone asymetrią pojemnościową X_C dla różnych wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej S

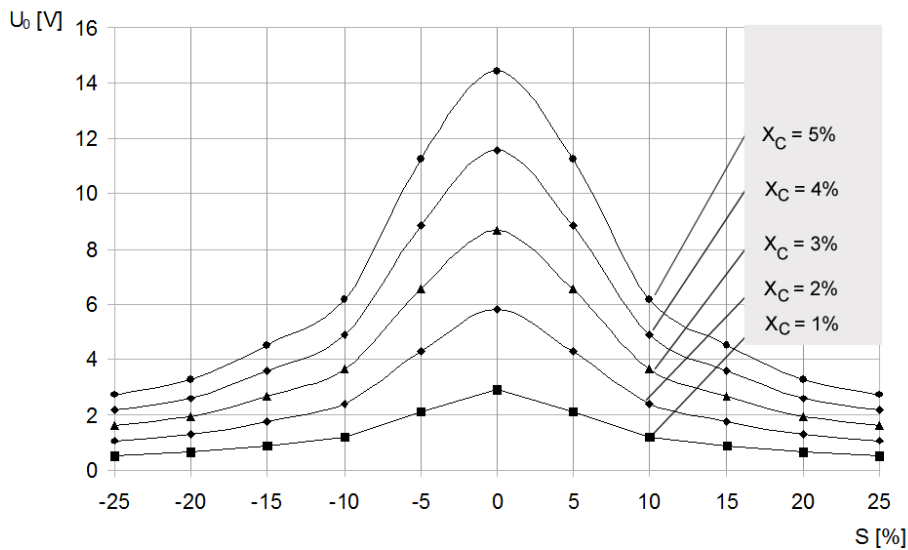
Składowa zerowa napięcia jest zależna od współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej S i największe wartości osiąga w sieci mocno skompensowanej dla dużych asymetrii pojemnościowych. W badaniach uwzględniono zakres wartości współczynnika X_C ograniczony wartościami asymetrii naturalnej sieci występującymi w rzeczywistych sieciach SN z liniami napowietrznymi lub liniami o strukturze napowietrzno-kablowej. W badaniach wyznaczano również napięcie asymetrii naturalnej U_{0as} dla sieci pracującej z izolowanym punktem neutralnym dla kolejnych wartości X_C . Wartości te przedstawiono w tabeli 1 (wiersz o liczbie porządkowej 1). W sieci skompensowanej mierzone wartości napięcia U_0

wielokrotnie przekraczają wartości U_{0as} wymuszone tymi samymi asymetriami elementów poprzecznych badanej linii L1. W czasie symulacji w pozostałej części sieci doziemna asymetria pojemnościowa nie występuje.

W praktyce eksploatacyjnej w polskich sieciach SN sporadycznie notuje się pojawienie asymetrii naturalnej przekraczającej poziom $0,2 \pm 0,3$ V. W przeprowadzonych w 2015 roku przez autorów badaniach ponad 20 skompensowanych sieci SN jednej ze spółek dystrybucyjnych trzykrotnie wartość asymetrii naturalnej była większa od 0,5 V.

Na rys. 4. pokazano zależność napięcia U_0 od współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej S (wartości ujemne oznaczają sieć niedokompensowaną) dla wybranych wartości asymetrii pojemnościowych X_C .

Wartości U_0 wymuszone asymetrią pojemnościową mogą osiągnąć poziom wartości nastawczych zabezpieczeń ziemnozwarciowych stosowanych wspólnie w polskich sieciach dystrybucyjnych pracujących z punktem neutralnym uziemionym przez dławik.



Rys. 4. Wpływ współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej S na napięcie U_0 wymuszone asymetrią pojemnościową X_C

Wartości te mieszczą się przeważnie w przedziale między 10 V a 20 V.

W tabeli 1 umieszczono również wyniki symulacji odzwierciedlające wpływ asymetrii konduktancyjnej na wartość składowej zerowej napięcia. Takie same poziomy tej asymetrii powodują pojawienie się ok. 50-krotnie mniejszej wartości napięcia U_0 niż w przypadku asymetrii pojemnościowej.

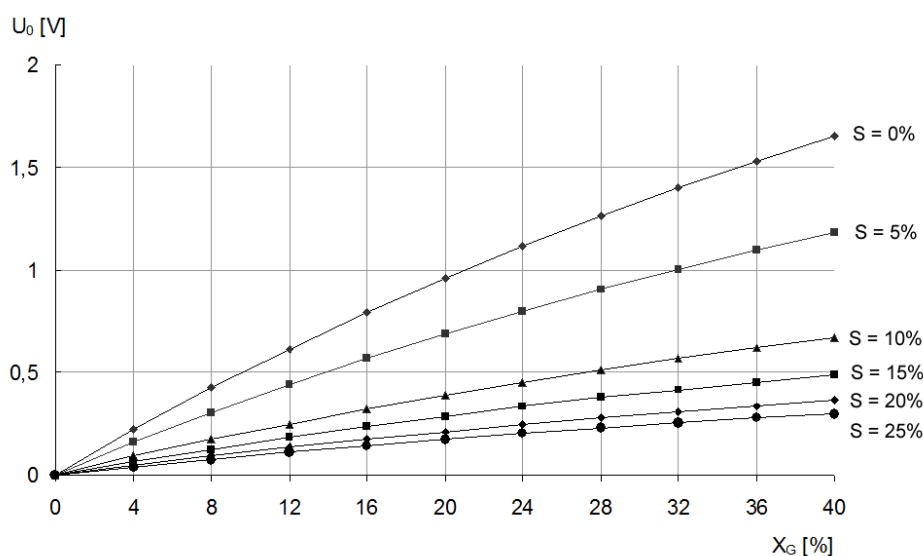
Tabela 1. Wpływ asymetrii poprzecznych na składową zerową napięcia U_0

Lp.	X [%]	2	4	6	Uwagi	
1	U_0 [V]	0,26	0,53	0,79	$U_{0as}^{*)}$	Asymetria pojemnościowa X_C
2		2,39	4,89	7,50	$S = 10\%$	
3		5,80	11,56	17,24	$S = 0\%$	
4		0,005	0,010	0,015	$U_{0as}^{*)}$	Asymetria konduktancyjna X_G
5		0,046	0,090	0,132	$S = 10\%$	
6		0,112	0,220	0,324	$S = 0\%$	

^{*)} dotyczy sieci pracującej z izolowanym punktem neutralnym

3.2. Napięcie U_0 wymuszone relatywnie dużą asymetrią konduktancyjną

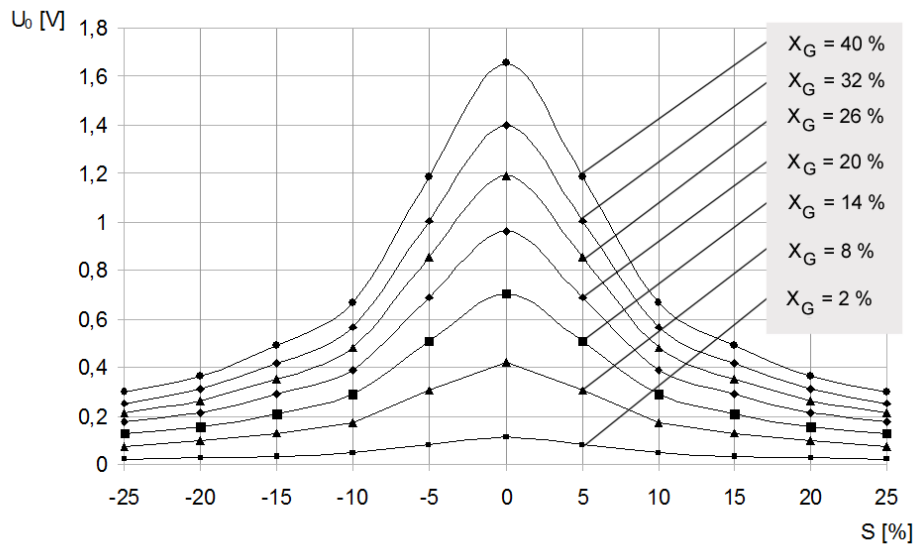
Dopiero znaczne różnice w wartościach, związanej z upływnością, konduktancji doziemnej poszczególnych faz są zauważane w pomiarze składowej zerowej napięcia i to szczególnie w sieciach, gdzie prowadzona jest dokładna kompensacja ziemnozwarciowa (rys.5 i rys.6). Przy dużych wartościach asymetrii konduktancyjnej wymuszone napięcie U_0 nie przekroczyło wartości 2 V.



Rys. 5. Napięcie U_0 wymuszone asymetrią konduktancyjną X_G dla różnych wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej S

Czynnik asymetrii konduktancyjnej, zgodnie ze wzorem (12), uzupełnia bardziej znaczący wpływ doziemnej asymetrii pojemnościowej na wartość składowej zerowej. Przy zauważalnej w ostatnich latach praktyce obniżania wartości

rozruchowych U_{0n} zabezpieczeń ziemnozwarciowych, związanej m.in. z próbami wykrywania wysokooporowych zwarć jednofazowych z ziemią, pomijanie udziału asymetrii konduktancyjnej w wartości napięcia U_0 nie jest zasadne.



Rys. 6. Wpływ współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej S na napięcie U_0 wymuszone asymetrią konduktancyjną X_G

Przy współczynniku X_G równym 40% napięcie asymetrii naturalnej sieci (zmierzone w sieci pracującej z izolowanym punktem neutralnym) wyniosło 0,075 V, w związku z tym nie można wykluczyć przypadków występowania większych asymetrii konduktancyjnych w rzeczywistych sieciach SN. W sieciach o przeważającym udziale odcinków kablowych, cechujących się bardzo dobrą symetrią pojemnościową, wartość napięcia U_0 wymuszana jest głównie przez zmienną w czasie asymetrię konduktancyjną.

3.3. Napięcie U_0 wymuszone asymetrią obciążeń linii

W badaniach symulacyjnych współczynnik X_{ob} określający asymetrię obciążeniową zdefiniowano zgodnie z zależnością

$$X_{ob} = \max \left\{ \frac{I_{L1} - I_{L2}}{I_{L1}}, \frac{I_{L2} - I_{L3}}{I_{L2}}, \frac{I_{L3} - I_{L1}}{I_{L3}} \right\} \quad (15)$$

gdzie: I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} to prądy poszczególnych faz mierzone w linii L1.

W tabeli 2 przedstawiono wartości napięć fazowych, składowej zerowej napięcia oraz największą z różnic między napięciami fazowymi zaobserwowaną w

czasie symulacji w sieci skompensowanej (współczynnik S równy 0). Nie zauważono wpływu stopnia asymetrii obciążeniowej na wartość napięcia U_0 . Asymetria ta widoczna jest w zmianach wartości napięć fazowych i przy znaczących wartościach współczynnika X_{ob} powoduje pojawienie się różnic na poziomie ok. 100 V.

Tabela 2. Wartości napięć fazowych w zależności od asymetrii obciążeniowej

Lp.	X_{ob}	U_{phL1}	U_{phL2}	U_{phL3}	U_0	$U_{phL1} - U_{phL2}$
	%	V	V	V	V	V
1	0	8669	8669	8669	0	0
2	10	8717	8637	8702	0	79
3	20	8732	8627	8712	0	104
4	30	8740	8621	8718	0	119
5	40	8747	8617	8722	0	130

Zmiany współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej dokonywane przez zmianę prądu dławika nie powodowały zmian mierzonych napięć.

4. PODSUMOWANIE

O skuteczności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średniego napięcia decyduje najczęściej poziom napięcia składowej zerowej. Jednak jak podano w punkcie 2 źródłem tego napięcia mogą być zjawiska nie związane bezpośrednio z zakłóceniem doziemnym. W składowych napięciach U_0 można wyróżnić również wpływ zjawisk wywołanych asymetrią admitancji doziemnych poszczególnych faz lub różny poziom fazowych napięć zasilających.

W pracy wykazano, że analizę wpływu zjawisk związanych z asymetrią na napięcie U_0 wygodnie jest przeprowadzać drogą badań symulacyjnych wykorzystując w tym celu odpowiednie modelowanie komputerowe. Stosując nieskomplikowane modele układów sieciowych w środowisku PSCAD relatywnie łatwo ocenić wpływ różnych asymetrii doziemnych sieci na poziom napięcia U_0 . Zamieszczone wyniki badań jednoznacznie wskazują, że skutki asymetrii doziemnej sieci są szczególnie widoczne w sieciach, w których prowadzona jest dokładna kompensacja ziemnozwarciowa. Stwierdzono, że poziom napięcia U_0 może przekraczać nawet wartości 15% napięcia fazowego. Przy czym wpływ asymetrii pojemnościowej jest wyraźnie większy niż asymetria doziemnej konduktancji. Wykazano również, że na poziom napięcia U_0 nie ma praktycznego wpływu asymetria obciążeń fazowych linii.

LITERATURA

- [1] Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007 (in Polish).
- [2] Synal B.: Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach z małym prądem zwarcia doziemnego, Problematyka zabezpieczeniowa, Prace Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Monografia, Wrocław 1974 (in Polish).
- [3] Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 2004 (in Polish).
- [4] Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieczeniowa, tom 2, WNT, Warszawa 1985 (in Polish).

MODELLING OF PHENOMENA LEADING TO ASYMMETRY OF THE PHASE VOLTAGES IN MV NETWORKS

Resonant earthed neutral system MV networks are prone to occurrence of differences in potential between the neutral point and the ground. It is caused by persistent asymmetry either in phase admittance, or in power voltage. The magnitude of such differences in voltage has implications on flawless operation of the earth fault protection systems, and further hinders accurate tuning of Petersen coils. In this paper we discuss how those different phenomena affect the magnitude of neutral point voltage. Following analytical description of the problem, we focus on the results of simulations on a model network carried out with PSCAD software. Our investigations take into account the relations between asymmetries in phase capacitance and conductance of the network, as well as asymmetric load of the powered lines.

(Received: 16. 02. 2016, revised: 29. 02. 2016)