

Parametry asymetrii dla składowej zerowej w sieciach średnich napięć

Streszczenie. W pracy przedstawiono parametryczne zależności do szacowania wielkości charakteryzujących asymetrię napięcia, prądów, mocy i admitancji dla podstawowej oraz wyższych harmonicznych składowych symetrycznych zerowych. Uwzględniają one wszystkie istotne parametry sieci, zwłaszcza nierówność pojemności i konduktancji doziemnych. Przeprowadzono analizę otrzymanych wielkości od najważniejszych parametrów. Wybrane wyniki porównano z wynikami z symulacji. Wyprowadzone wzory mogą być stosowane przy określaniu nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Abstract. The paper presents parametric relationships for estimating quantities characterizing voltage, current, electric power and admittance asymmetry for fundamental and higher harmonics of zero sequence components. They take into account all relevant network parameters, especially the inequality of ground capacitances and conductances. An analysis of the obtained quantities depending on the most important parameters was carried out. Selected calculation results were compared with the simulation ones. Obtained formulas can be used to determine the earth fault protection settings. (**Asymmetry parameters for zero sequence component in medium voltage networks**).

Słowa kluczowe: sieci SN, składowe symetryczne zerowe, parametry asymetrii.

Keywords: MV networks, zero sequence components, asymmetry parameters.

Wstęp

W sieciach średnich napięć (SN) występuje asymetria prądów i napięć fazowych oraz zniekształcenia harmonicznymi [1–5]. Asymetrię wywołują: niesymetryczne źródło zasilania, nierówność prądów obciążenia oraz nierówności impedancji podłużnych i admitancji poprzecznych poszczególnych faz linii energetycznych wynikające z ich konstrukcji oraz konfiguracji przewodów. Stopień asymetrii ocenia się powszechnie za pomocą współczynników wyrażających w procentach stosunek składowej symetrycznej przeciwnej lub zerowej do składowej zgodnej. Dla napięć współczynniki asymetrii przeciwnej α_{u2} i zerowej (współczynnik niezrównoważenia) α_{u0} określają zależności:

$$(1) \quad \alpha_{u2} = 100 \cdot U_2 / U_1; \quad \alpha_{u0} = 100 \cdot U_0 / U_1$$

w których: U_0 , U_1 i U_2 – wartości skuteczne składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej napięć.

Zgodnie z normą [6] współczynnik asymetrii przeciwnej w sieciach SN nie powinien przekraczać 2%. Norma nie określa granicznej wartości współczynnika niezrównoważenia, jednak zgodnie z zaleceniem w [2] nie powinien on również przekraczać 2%. W praktyce współczynnik ten zależy od sposobu pracy punktu neutralnego sieci oraz udziału linii napowietrznych i w skrajnych przypadkach (sieć kompensowana z dużym udziałem linii napowietrznych) może osiągać wartość nawet 20% [7].

Harmoniczne w napięciach i prądach wywołwane są przez nieliniowe odbiorniki. Występują głównie nieparzyste harmoniczne, zwłaszcza 5, 7, 11 i 13. Odnotowuje się także niewielką zawartość 3 harmonicznej i harmonicznych wielokrotnych 3. Zgodnie z normą [6] zawartość harmonicznych 3, 5, 7, 9, 11 i 13 w napięciach sieci SN nie powinna przekraczać odpowiednio 5%, 6%, 5%, 1,5%, 3,5% i 3% pod warunkiem, że ogólny współczynnik zniekształceń harmonicznych $THD < 8\%$.

Główną przyczyną niesymetrii zerowej w sieci SN jest nierówność pojemności i konduktancji poszczególnych faz względem ziemi. Objawem tej asymetrii w sieci SN jest występowanie składowych zerowych napięcia, prądów, mocy i admitancji w stanie normalnej pracy [7, 8]. Wymienione wielkości są wykorzystywane w charakterze wielkości kryterialnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych [7-9]. Wykorzystuje się przede wszystkim podstawowe

harmoniczne tych wielkości. Jednak do wykrywania niestacjonarnych zwarć łukowych i wysokorezystancyjnych proponuje się wykorzystanie również wyższych harmonicznych, zwłaszcza trzeciej [10-12]. Powszechnie stosowaną wielkością kryterialną w zabezpieczeniach jest podstawowa harmoniczna składowej zerowej napięcia [7-9]. Wzrost tej wielkości powyżej wartości nastawionej świadczy o pojawieniu się doziemienia i stanowi warunek wstępny działania zabezpieczeń. Do selektywnego wykrywania doziemień na liniach dystrybucyjnych są stosowane pozostałe z wymienionych wielkości kryterialnych, zależnie od sposobu pracy punktu neutralnego sieci. Dla zapewnienia selektywnego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych nastawy stosowanych wielkości kryterialnych muszą być większe od spodziewanych wartości asymetrii. Jednocześnie, w celu zapewnienia wysokiej czułości zabezpieczeń, należy stosować możliwie jak najniższe nastawy, do czego jest niezbędne właściwe szacowanie parametrów asymetrii. Pożądane są w miarę proste zależności analityczne, ujmujące istotne parametry sieci i zapewniające wystarczającą do celów inżynierskich dokładność obliczeń.

Analityczne zależności do obliczania składowych zerowych napięcia, prądu, mocy i admitancji asymetrii

Podstawą do oceny parametrów składowych zerowych asymetrii posłużył uproszczony model sieci SN przedstawiony na rysunku 1. Zgodnie z tym rysunkiem sieć składa się z wydzielonej linii o admitancji dla składowej zerowej Y_{01} i pozostałych linii o admitancji Y_{02} . Założono, że jest ona zasilana z symetrycznego źródła o częstotliwości odpowiadającej podstawowej lub wyższym harmonicznym i napięciu

$$(2) \quad E_h = k_h U_n / \sqrt{3}$$

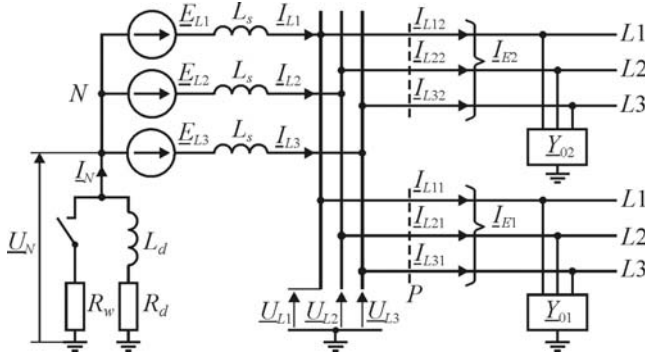
gdzie: U_n – napięcie znamionowe sieci, k_h – współczynnik udziału harmonicznej w napięciu zasilania.

W modelu uwzględniono indukcyjność źródła L_s . Pominięto natomiast, jako małoistotne, parametry podłużne linii i prądy obciążenia. Założono możliwość pracy sieci z izolowanym punktem neutralnym lub uziemionym przez dławik kompensacyjny o indukcyjności L_d i rezystancji uzwojeń R_d . Uwzględniono również możliwość podłączenia do dławika rezystora wymuszającego R_w .

Admitancje poszczególnych faz całej sieci \underline{Y}_{0Li} , linii \underline{Y}_{01Li} i pozostałej części sieci \underline{Y}_{02Li} określają zależności:

$$(3) \quad \begin{aligned} \underline{Y}_{0Li} &= G_{0Li} + jB_{0Li} = \omega C_{0Li}(d_0/n_h + j) \\ \underline{Y}_{01Li} &= G_{01Li} + jB_{01Li} = \omega C_{01Li}(d_0/n_h + j) \\ \underline{Y}_{02Li} &= G_{0Li} - G_{01Li} + j(B_{0Li} - B_{01Li}) \end{aligned}$$

gdzie: G_{0Li} , G_{01Li} , B_{0Li} , B_{01Li} , C_{0Li} , C_{01Li} ($i = 1, 2, 3$) – składowe zerowe konduktancji, susceptancji i pojemności poszczególnych faz sieci i linii, $\omega = \omega_1 n_h$ – częstotliwość kątowna harmonicznej n_h , ω_1 – częstotliwość kątowna podstawowej harmonicznej, $d_0 = G_0/(\omega_1 C_0)$ – współczynnik tłumienia dla podstawowej harmonicznej, G_0 , C_0 – wartości średnie składowej zerowej konduktancji i pojemności sieci.



Rys. 1. Model sieci SN

Założono występowanie w sieci wyłącznie nierówności parametrów poprzecznych – pojemności C_{0Li} i konduktancji G_{0Li} . Rozpatrzono najmniej korzystny przypadek asymetrii pojemności i konduktancji faz L1÷L3:

$$(4) \quad \begin{aligned} C_{0L1} &= C_0 - \Delta C_0; \quad C_{0L2} = C_0; \quad C_{0L3} = C_0 + \Delta C_0; \\ G_{0Li} &= d_0 \omega_1 C_{0Li}; \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

gdzie: $\Delta C_0 = C_0 - C_{0L1}$ – maksymalne odchylenie pojemności jednej z faz względem wartości średniej pojemności C_0 .

Podobnie zdefiniowano asymetrię wydzielonej linii, zakładając, że udział pojemności linii C_{01} w całkowitej pojemności sieci C_0 wynosi $\alpha = C_{01}/C_0$, a maksymalne odchylenie pojemności linii wynosi ΔC_{01} .

Przedstawioną sieć w stanie normalnej pracy można opisać następującym układem równań:

$$(5) \quad \begin{aligned} \underline{I}_{Li} &= (\underline{E}_{Li} - \underline{I}_N / \underline{Y}_N) \underline{Y}_{Li}; \quad \underline{I}_N = \sum_{i=1}^3 \underline{I}_{Li}; \\ \underline{U}_{Li} &= \underline{I}_{Li} / \underline{Y}_{0Li}; \quad \underline{U}_N = \underline{I}_N / \underline{Y}_N; \quad \underline{U}_{0as} = \sum_{i=1}^3 \underline{U}_{Li} / 3 \\ \underline{I}_{01Li} &= \underline{I}_{Li} \underline{Y}_{01Li} / \underline{Y}_{0Li}; \quad \underline{I}_{E1as} = \sum_{i=1}^3 \underline{I}_{01Li} \\ \underline{Y}_{Li} &= \underline{Y}_{0Li} k_{si}; \quad \underline{Y}_N \approx 1/R_d + 1/(j\omega L_d) \\ k_{si} &= \frac{1}{j\omega L_s \underline{Y}_{0Li} + 1} = \frac{1}{1 - C_{0Li} L_s \omega^2 + j C_{0Li} L_s \omega^2 d_0 / n_h} \end{aligned}$$

w których: \underline{I}_{Li} , \underline{I}_{01Li} , \underline{I}_N , \underline{I}_{E1as} – odpowiednio prądy fazowe źródła, składowe zerowe prądów fazowych linii, prąd w obwodzie neutralnym i prąd doziemny asymetrii linii, \underline{E}_{Li} , \underline{U}_{Li} , \underline{U}_N , \underline{U}_{0as} – napięcia fazowe źródła, napięcia fazowe na szynach stacji, napięcie w punkcie neutralnym i napięcie

asymetrii dla składowej zerowej, \underline{Y}_{Li} , \underline{Y}_N – admitancje fazowe sieci i admitancja obwodu neutralnego, k_{si} – współczynniki uwzględniające wpływ indukcyjności systemu na admitancje fazowe.

Z układu równań (5) można uzyskać, po żmudnych przekształceniach, ogólne zależności dla składowej zerowej napięcia asymetrii sieci \underline{U}_{0as} i prądu doziemnego asymetrii linii \underline{I}_{E1as} :

$$(6) \quad \begin{aligned} \underline{U}_{0as} &= \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 (\underline{E}_{Li} k_{si}) - \frac{\sum_{i=1}^3 k_{si} \sum_{i=1}^3 (\underline{E}_{Li} \underline{Y}_{Li})}{\underline{Y}_N + \underline{Y}_{L1} + \underline{Y}_{L2} + \underline{Y}_{L3}} \right] \\ \underline{I}_{E1as} &= \sum_{i=1}^3 \underline{E}_{Li} k_{si} \underline{Y}_{01Li} - \frac{\sum_{i=1}^3 k_{si} \underline{Y}_{01Li} \sum_{i=1}^3 \underline{E}_{Li} k_{si} \underline{Y}_{0Li}}{\underline{Y}_N + \underline{Y}_{L1} + \underline{Y}_{L2} + \underline{Y}_{L3}} \end{aligned}$$

Współczynniki k_{si} można zastąpić, z zachowaniem dużej dokładności obliczeń dla harmonicznych nieprzekraczających dziesiątej, jednym współczynnikiem w postaci:

$$(7) \quad \underline{k}_{si} \approx k_s = 1/(1 - C_0 L_s \omega^2)$$

Wówczas zależności (6) przyjmą postać:

$$(8) \quad \begin{aligned} \underline{U}_{0as} &= - \frac{k_s^2 \sum_{i=1}^3 (\underline{E}_{Li} \underline{Y}_{0Li})}{\underline{Y}_N + 3k_s \underline{Y}_0} \\ \underline{I}_{E1as} &= k_s \sum_{i=1}^3 \underline{E}_{Li} \underline{Y}_{01Li} - \frac{3k_s^2 \underline{Y}_{01} \sum_{i=1}^3 \underline{E}_{Li} \underline{Y}_{0Li}}{\underline{Y}_N + 3k_s \underline{Y}_0} \end{aligned}$$

Mianownik w równaniu napięcia asymetrii i w drugim członie równania prądu układu (8) można uprościć do postaci parametrycznej wiążącej pojemność sieci dla składowej zerowej C_0 , stopień rozstrojenia kompensacji s_h i tłumienie d_{0h} dla harmonicznej n_h :

$$(9) \quad \underline{Y}_N + 3k_s \underline{Y}_0 = 3k_s C_0 \omega_1 n_h (d_{0h} - js_h)$$

przy czym parametry s_h i d_{0h} powiązane są ze stopniem rozstrojenia kompensacji dla podstawowej harmonicznej s i dobrocią dławika Q_d zależnościami:

$$(10) \quad \begin{aligned} d_{0h} &= (s+1)/(k_s Q_d n_h) + d_0/n_h \\ s_h &= (s+1)/(k_s n_h^2) - 1 \\ s &= [\omega_1 C_0 - 1/(\omega_1 L_d)]/(\omega_1 C_0) \\ Q_d &= \omega_1 L_d / R_d \end{aligned}$$

Równania (8) z uwzględnieniem zależności (9) i (3) dla admitancji oraz związku $\underline{Y}_{01} = \alpha \underline{Y}_0$ uproszczą się do postaci:

$$(11) \quad \begin{aligned} \underline{U}_{0as} &= - \frac{k_s (d_0/n_h + j) \sum_{i=1}^3 (\underline{E}_{Li} C_{0Li})}{3C_0 (d_{0h} - js_h)} \\ \underline{I}_{E1as} &= k_s \omega_1 n_h (d_0/n_h + j) \sum_{i=1}^3 (\underline{E}_{Li} C_{01Li}) - \frac{k_s \alpha \omega_1 n_h (d_0/n_h + j)^2 \sum_{i=1}^3 (\underline{E}_{Li} C_{0Li})}{(d_{0h} - js_h)} \end{aligned}$$

Ostatecznie, dla założonej asymetrii parametrów poprzecznych sieci (4) i linii, uzyskamy następujące zależności parametryczne:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{0as} &= -e^{j\frac{5\pi}{6}} \frac{U_n k_h k_s \Delta C_0 (d_0/n_h + j)}{3C_0(d_{0h} - js_h)} \\
 \underline{I}_{E1as} &= e^{j\frac{5\pi}{6}} U_n k_h k_s \omega_1 n_h (d_0/n_h + j) A \\
 A &= \frac{d_0/n_h (\Delta C_{01} - \alpha \Delta C_0) - j(s_h \Delta C_{01} + \alpha \Delta C_0)}{(d_{0h} - js_h)}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Z równań (12) można uzyskać parametryczne równania mocy czynnej $P_{0as} = \text{Re}(\underline{U}_{0as} \underline{I}_{E1as}^*)$ i biernej $Q_{0as} = \text{Im}(\underline{U}_{0as} \underline{I}_{E1as}^*)$ dla harmonicznych na linii

$$\begin{aligned}
 P_{0as} &= -\frac{U_n^2 k_h^2 k_s^2 \Delta C_0 \omega_1 d_0 (\Delta C_{01} + \alpha \Delta C_0)}{3C_0(d_{0h}^2 + s_h^2)} \\
 Q_{0as} &= -\frac{U_n^2 k_h^2 k_s^2 \Delta C_0 \omega_1 n_h (s_h \Delta C_{01} + \alpha \Delta C_0)}{3C_0(d_{0h}^2 + s_h^2)}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

oraz admittancji asymetrii \underline{Y}_{0as} i jej składowych G_{0as} i B_{0as}

$$\begin{aligned}
 \underline{Y}_{0as} &= \underline{I}_{E1as} / 3\underline{U}_{0as} = G_{0as} + jB_{0as}; \\
 G_{0as} &= C_0 \omega_1 d_0 (\alpha - \Delta C_{01} / \Delta C_0) \\
 B_{0as} &= C_0 \omega_1 n_h (\alpha + s_h \Delta C_{01} / \Delta C_0)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Równania (13) i (14) są niezbędne do szacowania nastaw zabezpieczeń wykorzystujących kryterium mocy biernej lub admittancji (susceptancji) dla harmonicznych zarówno w sieciach kompensowanych jak i w sieciach z izolowanym punktem neutralnym.

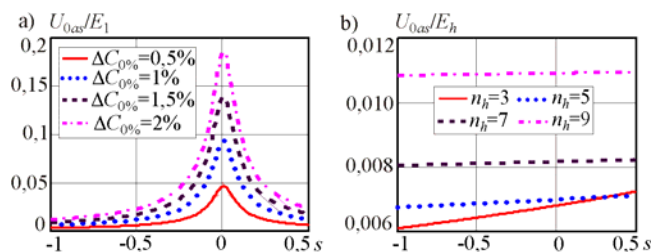
Ocena parametrów asymetrii

Na podstawie zależności (12)–(14) oszacowano wartości napięcia asymetrii dla składowej zerowej, prądu doziemnego, mocy i admittancji dla podstawowej i wyższych harmonicznych w funkcji istotnych parametrów sieci. Wybrane wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2–5. Obliczenia przeprowadzono dla sieci o parametrach: $U_n = 15$ kV, $C_0 = 12,25$ μ F (prąd pojemnościowy $I_{CS} = 100$ A), $\Delta C_{0\%} = 1\%$, $C_{01} = 1,225$ μ F ($\alpha = 0,1$), $d_0 = 0,05$, $Q_d = 80$, $L_s = 6,367$ mH ($\omega_1 L_s = 2$ Ω), $k_h = 3\%$.

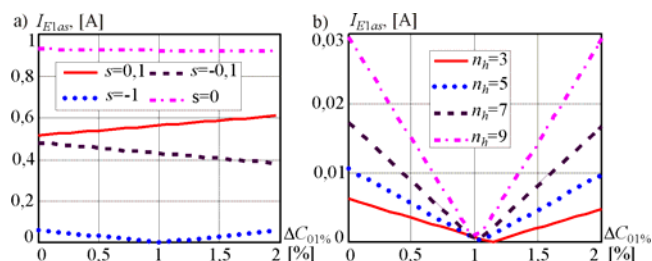
Z pierwszego równania układu (10) wynika, że składowa zerowa napięcia asymetrii zależy wprost proporcjonalnie od wielkości maksymalnego odchylenia składowej zerowej pojemności sieci ΔC_0 i od udziału harmonicznej w napięciach zasilania k_h . Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe zależności wartości bezwzględnej napięcia asymetrii odniesionej do harmonicznej w napięciu źródła. Nietrudno zauważyć, że U_{0as} przyjmuje największe wartości dla podstawowej harmonicznej (rys. 2a) w przypadku dokładnej kompensacji ($k_h = k_1 = 1$, $s = 0$). W skrajnym przypadku, odpowiadającym $\Delta C_{0\%} = 2\%$, napięcie asymetrii może osiągać wartości zbliżone do 20% napięcia źródłowego. Czym wyższy numer harmonicznej n_h , tym mniejszy jest wpływ rozstrojenia kompensacji s na U_{0as} , jednak wraz ze wzrostem n_h napięcie asymetrii relatywnie rośnie (rys. 2b). Należy jednak pamiętać, że udział poszczególnych harmonicznych w napięciu zasilania k_h nie przekracza 6% [6] i w związku z tym napięcia asymetrii dla harmonicznych są co najmniej 20 razy mniejsze niż dla podstawowej harmonicznej.

Prąd doziemny asymetrii linii dla podstawowej harmonicznej jest największy przy dokładnej kompensacji

(rys. 3a) i może osiągać wartość nawet 10% prądu pojemnościowego linii. Prąd ten jest najmniejszy przy braku kompensacji ($s = -1$). Stosunkowo słabo zależy on od odchylenia składowej zerowej pojemności linii ΔC_{01} . W przypadku wyższych harmonicznych prąd asymetrii jest wielokrotnie mniejszy niż dla podstawowej harmonicznej (rys. 3b). Jego wartość jest tym większa im wyższy jest rząd harmonicznej. Silnie zależy on od różnicy między ΔC_{01} i ΔC_0 , przyjmując minimalne wartości bliskie zeru w przypadku $\Delta C_{01} \approx \Delta C_0$.

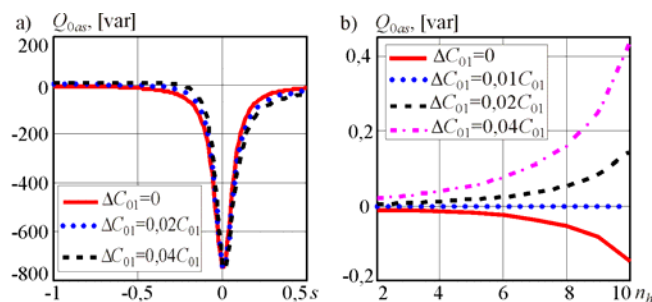


Rys. 2. Zależność względnego napięcia asymetrii od rozstrojenia kompensacji dla harmonicznych: a) podstawowej $n_h = 1$, b) $n_h = 3, 5, 7$ i 9 w przypadku $\Delta C_{0\%} = 1\%$



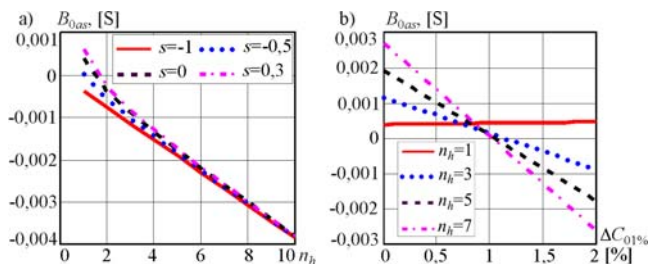
Rys. 3. Zależność prądu asymetrii linii od maksymalnego odchylenia pojemności linii ΔC_{01} w przypadku $\Delta C_{0\%} = 1\%$ dla harmonicznych: a) podstawowej $n_h = 1$ i $s = \text{var}$, b) $n_h = 3, 5, 7$ i 9 oraz $s = 0,1$, $k_h = 3\%$

Moc bierna asymetrii dla podstawowej harmonicznej (rys. 4a) silnie zależy od stopnia rozstrojenia kompensacji, osiągając największe wartości w przypadku $s = 0$. Jej wartość zależy proporcjonalnie od odchyłki pojemności sieci ΔC_0 i w niewielkim stopniu od odchyłki pojemności linii ΔC_{01} . Moc asymetrii linii dla wyższych harmonicznych (rys. 4b) jest o kilka rzędów mniejsza od mocy dla podstawowej harmonicznej, silnie zależy od różnicy między ΔC_0 i ΔC_{01} oraz charakteryzuje się paraboliczną zależnością od numeru harmonicznej. Jest ona ujemna w przypadku, gdy zachodzi nierówność $\Delta C_{01\%} < \Delta C_{0\%}$ i dodatnia, gdy $\Delta C_{01\%} > \Delta C_{0\%}$.



Rys. 4. Zależność mocy biernej asymetrii linii: a) dla podstawowej harmonicznej od rozstrojenia kompensacji s , b) dla harmonicznych n_h w przypadku $s = 0,1$, $k_h = 3\%$

Susceptancja asymetrii B_{0as} nie zależy od napięcia zasilania. Dla podstawowej harmonicznej mieści się ona, zależnie od rozstrojenia kompensacji s (rys. 5a), w zakresie ± 1 mS. Wpływ rozstrojenia kompensacji na B_{0as} jest tym mniejszy im wyższy jest numer harmonicznej. Dla wyższych harmonicznych wartość i znak B_{0as} zależy głównie od relacji zachodzących pomiędzy $\Delta C_{01\%}$ i $\Delta C_{0\%}$ (rys. 5b).



Rys. 5. Zależność susceptancji asymetrii linii od: a) numeru harmonicznej n_h , b) procentowego odchylenia pojemności linii $\Delta C_{01\%}$ w przypadku $s = 0,1$, $k_h = 3\%$, $\Delta C_{0\%} = 1\%$

Susceptancja B_{0as} jest dodatnia, gdy $\Delta C_{01\%} < \Delta C_{0\%}$ i ujemna, gdy $\Delta C_{01\%} > \Delta C_{0\%}$. Wartość bezwzględna B_{0as} rośnie proporcjonalnie do numeru harmonicznej. Dla wyższych harmonicznych jest ona na ogół większa od wartości dla podstawowej harmonicznej, mimo że zawartość harmonicznych w napięciach i prądach nie przekracza kilku procent. Ten fakt świadczy o niecelowości wykorzystania kryterium susceptancyjnego dla wyższych harmonicznych w zabezpieczeniach ziemnozwarciowych.

Wyniki otrzymane z parametrycznych zależności są wystarczająco zbliżone z wynikami uzyskanymi z symulacji [13]. Dowodzą tego też wybrane wyniki zamieszczone w tabeli 1. Błędy z pominięciem wpływu prądu obciążenia nie przekraczają 10% (przypadek 1 w tab. 1). Prąd obciążenia linii I_{obc} i impedancja wzdłużna mogą powodować zmniejszenie lub wzrost błędów. W przypadku obciążenia linii napowietrznej prądem $I_{obc} \leq 100$ A w odległości 2 km od stacji (przypadek 2 w tab. 1) błędy nie przekraczają również 10%.

Tabela 1. Zestawienie porównawcze parametrów asymetrii uzyskanych za pomocą wzorów i z symulacji w przypadku: $s = 0,1$, $\Delta C_{0\%} = 1\%$, $\Delta C_{01\%} = 2\%$

Param.	U_{0as} , [V]			I_{E1as} , [mA]			Q_{0as} , [mvar]		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Z wzoru	445	1,79	1,82	610	4,76	9,73	-270e3	8,52	18,0
1. Z symul.	448	1,84	1,95	613	4,85	10,46	-274e3	8,90	19,48
1. Błąd, [%]	-0,67	-2,7	-6,7	-0,49	-1,9	-7,0	-1,5	-4,3	-7,6
2. Z symul.	447	1,82	1,91	611	4,73	10,01	-273e3	8,59	19,17
2. Błąd, [%]	-0,45	-1,6	-4,7	-0,16	0,63	-2,8	-1,1	-0,81	-6,1

Wnioski

Dla zapewnienia czułego i selektywnego nastawienia zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach SN niezbędne jest właściwe szacowanie wartości asymetrii wielkości kryterialnych – napięcia U_{0as} , prądu doziemnego I_{E1as} , mocy bierniej Q_{0as} i susceptancji B_{0as} linii dla podstawowej i wyższych harmonicznych składowych symetrycznych zerowych w stanie normalnej pracy.

Otrzymano parametryczne wzory do szacowania wymienionych wielkości ujmujące wszystkie istotne parametry sieci: napięcie znamionowe U_n , udział określonej harmonicznej k_h , rozstrojenie kompensacji s , pojemność dla składowej zerowej sieci C_0 i linii C_{01} , tłumienie d_0 , maksymalne odchyłki pojemności sieci ΔC_0 i linii ΔC_{01} , indukcyjność systemu L_s . Wybrane wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi drogą symulacji uzyskując dobrą zbieżność.

Z przytoczonych charakterystyk parametrów asymetrii, obliczonych za pomocą wyprowadzonych wzorów, wynika między innymi zasadność wykorzystania w charakterze wielkości kryterialnej mocy bierniej trzecich harmonicznych składowych zerowych prądu i napięcia. Moc bierna asymetrii tych harmonicznych jest niewielka i nie przekracza kilkudziesięciu mvar, co pozwala zastosować niską nastawę zabezpieczenia. To z kolei pozwala uzyskać wysoką czułość działania zabezpieczenia podczas zwarc łukowych generujących znaczne wartości trzecich harmonicznych składowych zerowych prądu i napięcia i odpowiadającej im mocy bierniej [11, 12].

Autor: dr hab. inż. Lubomir Marciniak, prof. uczelni, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: lubmar@el.pcz.czest.pl.

LITERATURA

- [1] Hanzelka Z., Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.
- [2] Kowalski Z., Jakość energii elektrycznej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
- [3] Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B., Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7 (2014), 23-31.
- [4] Arrillaga J., Bradley D. A., Bodger P. S., Power system harmonics, John Wiley & Sons, 1985.
- [5] Sawicki A., Assessment of power parameters of asymmetric arcs by means of the Cassie and Mayr models, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2 (2011), 131-134.
- [6] PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych., PKN, 2010.
- [7] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
- [8] Hoppel W., Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażenia, WNT, Warszawa 2017.
- [9] Winkler W., Wiszniewski A., Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 2013.
- [10] Marciniak L., Wykrywanie zwarc doziemnych w sieciach średnich napięć z wykorzystaniem trzeciej harmonicznej sygnałów, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3 (2017), 56-59.
- [11] Piątek M., Marciniak L.: Identification of high-resistance earth faults in medium voltage networks using higher harmonics, *Acta Energetica*, 30 (2017), nr 1, 50-57.
- [12] Piątek M., Marciniak L., Harmoniczne generowane przez nieliniową rezystancję zwarcia z ziemią w sieciach średnich napięć, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 53 (2017), 45-48.
- [13] Marciniak L., Piątek M., The influence of the network asymmetry on the settings and sensitivity of an earth fault protection using higher harmonics, *E3S Web of Conferences*, nr. 84 (2019), 10s.