

BOGUSŁAW SZEWC, KURT ZMUDA

Katedra Elektroenergetyki

ASYMETRIA NAPIĘĆ FAZOWYCH W KOMPENSOWANYCH SIECIACH ŚREDNIOWYSOKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie. W artykule przeprowadzono uproszczoną analizę teoretyczną zaobserwowanego w sieciach średniego napięcia zjawiska asymetrii napięciowej podczas normalnej pracy z punktem zerowym uziemionym przez dławik gaszący.

Wprowadzenie

Sieci średnich napięć napowietrzne lub kablowe, pracujące z izolowanym punktem zerowym, wyposażone są często w urządzenia do kompensacji pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego. Praktyka eksploatacyjna niektórych tego typu sieci notuje bardzo niepożądane przypadki dużej asymetrii napięć fazowych sieci, mające miejsce w czasie normalnej pracy (bez doziemienia). Zjawisko to zachodzi przy ustawieniu dławika gaszącego na zaczepie, odpowiadającym całkowitej (lub prawie całkowitej) kompensacji prądu ziemnozwarciowego w przypadku ewentualnego zwarcia doziemnego. Zachodzi wtedy konieczność pracy na innym, mniej korzystnym z punktu widzenia kompensacji, zaczepie dławika, gdzie asymetria napięć jest znikoma, bądź w ogóle niezauważalna.

W przedstawionym artykule zostaną częściowo omówione przyczyny tego zjawiska.

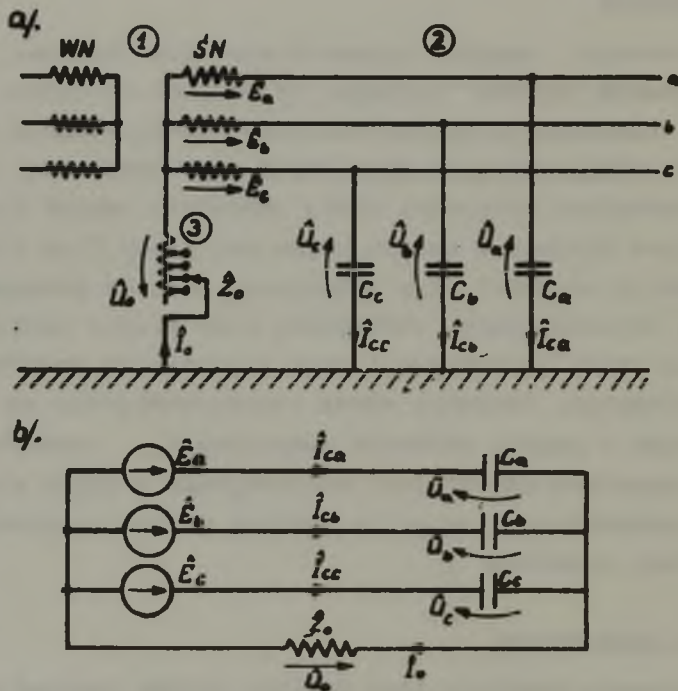
Analiza teoretyczna

Dla uzyskania prostego toku analizy należy przyjąć następujące, dopuszczalne z praktycznego punktu widzenia, założenia:

- a) pominięcie parametrów podłużnych linii i transformatora,
- jako b. małych w porównaniu z parametrami poprzecznymi,

- b) pominięcie konduktancji poprzecznych linii,
- c) pojemność przewodów linii zostanie skupiona w jednym miejscu,
- d) napięcie sieci jdst sinusoidalne, tzn. nie zawiera wyższych harmonicznych,
- e) SEM transformatora zasilającego sieć są symetryczne,
- f) częstotliwość sieci 50 Hz.

Przy tych założeniach schemat poglądowy kompensowanej sieci średniego napięcia przedstawiono na rys. 1a, natomiast na rys. 1b podano zastępczy schemat obliczeniowy tej sieci.



Rys. 1. Schemat zastępczy kompensowanej sieci średniego napięcia:

a) schemat poglądowy, b) schemat obliczeniowy

Na rysunku przyjęto oznaczenia:

1 - transformator zasilający sieć, 2 - sieć, 3 - dławik gaszący,

$\hat{E}_a, \hat{E}_b, \hat{E}_c$ - SKM transformatora zasilającego sieć,

$\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$ - napięcia fazowe sieci,

\hat{U}_0 - napięcie na dławiku gaszącym,

C_a, C_b, C_c - pojemności przewodów do ziemi (poj. dla składowej zerowej),

$\hat{Z}_0 = R + j\omega L$ - impedancja dławika gaszącego.

Interesujące nas napięcia fazowe wyznaczyć można z relacji:

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_a &= \hat{E}_a - \hat{U}_0 \\ \hat{U}_b &= \hat{E}_b - \hat{U}_0 \\ \hat{U}_c &= \hat{E}_c - \hat{U}_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Stosując dla schematu z rys. 1b metodę równań węzłowych Coltriego określić można napięcie \hat{U}_0 .

$$\hat{U}_0 = \frac{j\omega \sum \hat{E}_x C_x}{R + j\omega L + j\omega \sum C_x} = \frac{j\omega \sum \hat{E}_x C_x}{R^2 + (\omega L)^2 + j\omega \sum C_x} \quad (2)$$

przy czym

$$\sum \hat{E}_x C_x = \hat{E}_a C_a + \hat{E}_b C_b + \hat{E}_c C_c$$

$$\sum C_x = C_a + C_b + C_c$$

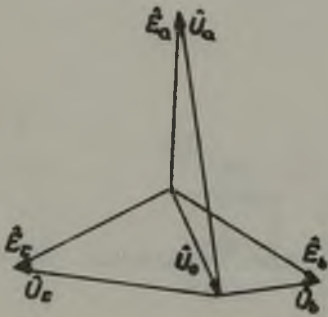
Dla dławików gaszących stosunek $\frac{\omega L}{R}$, nazywany dobrocią dławika Q, jest rzędu 100, a więc $R^2 \ll (\omega L)^2$ i wtedy

$$\hat{U}_0 = \frac{j\omega \sum \hat{E}_x C_x}{(\omega L)^2 - j \frac{1}{\omega L} + j\omega \sum C_x} \quad (3)$$

Z równania (3) wynika, że napięcie \hat{U}_0 będzie różne od zera jedynie wtedy, gdy sieć jest niesymetryczna pod względem pojemnościowym, a więc gdy $C_a \neq C_b \neq C_c$. Wartość tego napięcia zależy jednak nie tylko od stopnia asymetrii pojemnościowej, lecz również od parametrów dławika ($R, \omega L$) i sieci ($\sum C_x$).

W przypadku pełnej symetrii pojemnościowej sieci ($C_a = C_b = C_c$) napięcie \hat{U}_0 będzie, bez względu na pozostałe czynniki, równe zero. Z chwilą pojawienia się na dławiku napięcia \hat{U}_0 ulega przesunięciu punkt zerowy gwiazdy napięć fazowych, w następstwie czego zachodzi asymetria napięć fazowych (rys. 2).

Wyrażenie (3) można przekształcić do wygodniejszej postaci, w tym celu definiujemy



Rys. 2. Przykładowy wykres wektorowy napięć w kompensowanej sieci, asymetrycznej pod względem pojemnościowym

$$\left. \begin{aligned} k_a &= \frac{C_a}{C_{\acute{s}r}} \\ k_b &= \frac{C_b}{C_{\acute{s}r}} \\ k_c &= \frac{C_c}{C_{\acute{s}r}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

przy czym

$$C_{\acute{s}r} = \frac{\sum C_x}{3} = \frac{C_a + C_b + C_c}{3}$$

Przyjmując fazę początkową SEM \hat{E}_a oraz na podstawie założenia e) otrzymamy

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}_a &= E e^{j90^\circ} \\ \hat{E}_b &= E e^{-j30^\circ} \\ \hat{E}_c &= E e^{-j150^\circ} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

gdzie:

E - SEM transformatora zasilającego sieć.

Wobec tego licznik wyrażenia (3) można przekształcić

$$\begin{aligned} j\omega \sum \hat{E}_x C_x &= j\omega C_{\text{sr}} (\hat{E}_a k_a + \hat{E}_b k_b + \hat{E}_c k_c) = \\ &= -\omega C_{\text{sr}} E (k_a + k_b e^{-j120^\circ} + k_c e^{j120^\circ}) \end{aligned}$$

W oparciu o teorię zwarcia doziemnych w sieciach kompensowanych [1] wielkości $\frac{1}{\omega L}$ i $\omega \sum C_x$ wyrazić można przy pomocy SEM transformatora oraz prądów I_L i I_C , mianowicie

$$\frac{1}{\omega L} \approx \frac{1}{E_0} = \frac{I_L}{E} \quad (6)$$

$$\omega \sum C_x = 3\omega C_{\text{sr}} = \frac{I_C}{E} \quad (7)$$

gdzie:

I_L - prąd płynący w dławiku w przypadku zwarcia doziemnego,

I_C - pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci.

Uwzględniając równania (6) i (7) w mianowniku wyrażenia (3) będzie:

$$\begin{aligned} \frac{R}{(\omega L)^2} - j \frac{1}{\omega L} + j \omega \sum C_x &= \frac{R}{(\omega L)^2} - j \frac{I_L}{E} + j \frac{I_C}{E} = \\ &= \frac{1}{E} \left[\frac{1}{Q} I_L + j(I_C - I_L) \right] \end{aligned}$$

Ostatecznie wyrażenie na napięcie \hat{U}_0 przyjmie postać

$$\hat{U}_0 = -\frac{E}{3} \cdot \frac{(k_a + k_b e^{-j120^\circ} + k_c e^{j120^\circ})}{\frac{1}{Q} \cdot \frac{I_L}{E} + j \left(\frac{I_C - I_L}{E} \right)} \quad (8)$$

W uzyskanej zależności (8) część urojona mianownika, tzn. $\frac{I_C - I_L}{I_C}$ charakteryzuje stopień niedokompensowania sieci prądem dławika I_L w przypadku ewentualnego zwarcia doziemnego. Wielkość ta jest często nazywana stopniem rozstrojenia sieci. Ze względu na warunki gaszenia łuku w czasie doziemienia, dąży się, by była ona jak najmniejsza. W praktyce jednak nie zawsze jest to możliwe do zrealizowania z uwagi na dwa czynniki:

- a) regulacja prądu dławika I_L odbywa się skokowo w odstępach średnio co 12,5% maksymalnego prądu dławika,
- b) prąd I_C sieci zmienia swą wartość w zależności od aktualnego stanu układu połączeń sieci.

Najczęściej więc stopień rozstrojenia sieci będzie wynosił od kilku do kilkunastu %.

Część rzeczywista mianownika zależności (8), tzn. $\frac{1}{Q} \cdot \frac{I_L}{I_C}$ jest b. mała ze względu na dużą dobrotę Q dławików, wynoszącą ok. 100, najczęściej więc można ją pomijać.

Brak jest szczegółowego rozeznania odnośnie możliwego w praktyce stopnia asymetrii pojemnościowej sieci, wyrażonego w zależności (8) współczynnikami k_a , k_b i k_c . Jest to spowodowane dużą ilością trudnych do zdefiniowania czynników, mogących wchodzić tutaj w rachubę. Wydaje się jednak, że różnice rzędu 5-10% między pojemnościami przewodów do ziemi są wielce prawdopodobne.

Wykonane przy powyższych założeniach obliczenia wg wzoru (8) wykazują, że napięcie \hat{U}_0 może osiągnąć stosunkowo duże wartości, przekraczające nawet wartość znamionowego napięcia fazowego w przypadku niskiego stopnia rozstrojenia sieci. Maleje ono jednak szybko w miarę powiększania się rozstrojenia, osiągając przy rozstrojeniu 20% wartość ok. 10% napięcia sieci.

Należy zaznaczyć, że wzór na napięcie \hat{U}_0 ma zastosowanie dla rozstrojenia sieci od ok. 5% w górę, natomiast dla niższych wartości traci on ważność ze względu na rosnące znaczenie pominiętych w analizie czynników.

Reasumując można stwierdzić, że znaczna asymetria napięć fazowych będzie miała miejsce w sieciach kompensowanych, dla których zachodzi równocześnie:

- a) asymetria pojemnościowa sieci,
- b) niski stopień rozstrojenia sieci.

Jeżeli jeden z powyższych warunków nie będzie spełniony, asymetria napięć fazowych w ogóle nie będzie miała miejsca (war. a) lub też będzie znikomo mała (war. b).

Mając na uwadze przyczyny asymetrii napięć, można z grubsza określić sposoby przeciwdziałania jej. Jeden ze sposobów, tzn. rozstrajanie sieci poprzez pracę na innym zaczeple dławika, jest stosowany w praktyce. Innym sposobem może być zapewnienie sieci symetrii pojemnościowej, co jest aktualnie przedmiotem badań Katedry.

Konfrontacja wyników analizy z praktyką

Zależność (8) na napięcie \hat{U}_0 uzyskana została na drodze rozważań teoretycznych, po uprzednim przyjęciu szeregu założeń upraszczających. Słuszność tej zależności dla rzeczywistych sieci średniego napięcia została częściowo potwierdzona dużą zbieżnością wyników pomiarowych i obliczeń dla konkretnej sieci.

Chodzi mianowicie o napowietrzną sieć rozdzielczą 30 kV, zasilaną ze stacji transformatorowo-rozdzielczej 110/30/15 kV Wełecz a eksploatowaną przez RE Busko (woj. kieleckie). W sieci tej jest zainstalowany dławik gaszący typu DGONb 260/17320, o prądzie znamionowym 7,5 - 15 A (5 zaczeplów).

Wykonane na stacji Wełecz pomiary dały następujące wyniki:
 $I_C = 13,6$ A, $C_a = 0,8485$ μ F, $C_b = 0,7417$ μ F, $C_c = 0,8125$ μ F
W przypadku ustawienia dławika na czwartym zaczeple (odpowiada mu prąd $I_L = 14,7$ A) stwierdzono dużą asymetrię napięć fazowych:

$$U_a = 26,3 \text{ kV}, U_b = 13,0 \text{ kV}, U_c = 18,8 \text{ kV} \text{ i } E = 18,0 \text{ kV}.$$

Z danych pomiarowych odnośnie asymetrii napięć wyznaczyć można metodą wykreślną napięcie \hat{U}_0 ; wynosi ono

$$\hat{U}_0 = 8,50 e^{-j68^\circ} \text{ kV}$$

Korzystając z zależności (4) i (8) otrzymuje się $k_a = 1,059$, $k_b = 0,927$, $k_c = 1,014$ oraz

$$\hat{U}_0 = 8,95 e^{-j58^\circ} \text{ kV}$$

przy czym przyjęto dla dławika $Q = 74,6$ zgodnie z danymi uzyskanymi od producenta (M-1).

Obie metody, pomiarowa i obliczeniowa wg zależności (8), dają wyniki bardzo zbieżne; różnica w module napięcia \hat{U}_0 wynosi 5,3%, natomiast w argumencie 2,8%.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonej uproszczonej analizy teoretycznej okazało się, że asymetria napięć fazowych w kompensowanych sieciach średniego napięcia jest wywoływana współdziałaniem głównie dwóch czynników: asymetrii pojemnościowej sieci i niskiego stopnia rozstrojenia sieci.

Zależność na napięcie \hat{U}_0 uzyskana została po przyjęciu szeregu założeń upraszczających. Wydaje się jednak, że nie wpływa to na możliwość stosowania jej dla rzeczywistych sieci średniego napięcia, na co wskazuje porównanie z przeprowadzonym pomiarem.

Z grubsza określić można sposoby przeciwdziałania asymetrii napięć; będzie to rozstrojenie sieci przez pracę na odpowiednim zaczeple dławika lub zapewnienie sieci symetrii pojemnościowej.

LITERATURA

- [1] Kończakowski St., Bursztyński J.: Zwarcia w układach elektroenergetycznych, PWN, 1965 r.
- [2] Konorski B.: Podstawy elektrotechniki tom III, W-wa, 1952.

АСИММЕТРИИ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ СЕТЯХ
СРЕДНЕВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье проведен упрощенный теоретический анализ наблюдаемого в сетях средневысокого напряжения, явления асимметрии фазных напряжений во время нормального режима работы с нулевой точкой заземленной через дугогасящую катушку.

PHASE VOLTAGE UNBALANCE IN MIDDLE-HIGH VOLTAGE SYSTEMS
WITH REACTANCE GROUNDED NEUTRAL

S u m m a r y

The paper describes a simplified theoretical analysis of phase voltage unbalance in middle-high voltage systems during their normal work with reactance grounded neutral.