ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria· ELEKTRYKA z. 137 Nr kol. 1244

Marian MIKRUT
Zygmunt PILCH
Marian SAUCZEK

POZIOM HARMONICZNYCH W PRĄDZIE ZIEMNOZWARCIOWYM W SIECIACH PRZEMYSŁOWYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu różnych czynników na zawartość wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w sieciach przemysłowych średnich napięć. Wyniki badań dotyczą: sieci o izolowanym punkcie gwiazdowym, sieci o uziemionym przez dławik kompensacyjny punkcie gwiazdowym, sieci o uziemionym punkcie gwiazdowym przez dławik kompensacyjny zbocznikowany rezystorem oraz sieci o uziemionym przez rezystor punkcie gwiazdowym.

LEVELS OF HARMONICS IN EARTH-FAULT CURRENTS IN MEDIUM VOLTAGE INDUSTRIAL NETWORKS

Summary. The investigation results of various factors' effect on harmonics in the earth-fault current in medium voltage industrial networks are presented. These results concern: isolated neutral networks, earth-fault compensated networks, compensated networks with temporary resistive grouded neutral and networks with permanently resistive grounded neutral.

УРОВЕНЬ ГАРМОНИК В ТОКАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Резюме. В статье прдставлены результаты анализа влияния различных факторов на содержание высших гармоник тока при однофазных коротких замыканиях на землю в промышленных сетях среднего напряжения. Исследования были проведены для: сетей с изолированной нейтралью, компенсированных сетей, компенсированных сетей с катушкой шунтированной резистором и сетей с нейтралью заземленной через резистор.

1. WPROWADZENIE

Przebiegi napięć i prądów w normalnych warunkach pracy sieci elektroenergetycznych średnich napięć nie są przebiegami czysto sinusoidalnymi, lecz zawierają oprócz harmonicznej podstawowej także wyższe harmoniczne różnych rzędów. Pojawiają się one wskutek nieliniowości samych źródeł energii elektrycznej, jak i jej odbiorów. Zawartość harmonicznych jest wprawdzie limitowana przepisami określającymi wymagania w zakresie jakości energii elektrycznej, lecz mimo stosowania różnych środków ograniczających poziom wyższych harmonicznych, ich pełna eliminacja w sieciach przemysłowych jest trudna do osiągnięcia. W tej sytuacji powstaje pytanie dotyczące kształtu przebiegów prądów i napięć podczas zakłóceń zwarciowych. Do zakłóceń najczęściej występujących, których skuteczna i selektywna eliminacja w sieciach średnich napięć jest wciąż problematyczna, należą zwarcia jednofazowe z ziemią. Przyczyn tego stanu jest wiele: różnorodność wykonania sieci i poziomy stosowanych napięć, różne sposoby pracy punktu gwiazdowego, konfiguracja sieci, charakter zwarcia doziemnego. Jedną z nich jest także odkształcenie przebiegów ziemnozwarciowych [5, 9].

W artykule przedstawiono przyczyny występowania wyższych harmonicznych w przebiegach prądów ziemnozwarciowych oraz wpływ takich istotnych czynników na ich zawartość, jak sposób pracy punktu gwiazdowego sieci, nieliniowość elementów sieci i charakter zwarcia. Zaprezentowane rezultaty badań mogą być wykorzystane przy opracowaniu algorytmu działania nowoczesnych urządzeń automatyki regulacyjnej i eliminacyjnej dla sieci średnich napięć.

2. PRZYCZYNY WYSTĘPOWANIA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH W NAPIĘCIACH ŹRÓDŁOWYCH

Przyczynami pojawiania się wyższych harmonicznych w przebiegach napięć są:

- nieliniowość źródeł energii elektrycznej,
- nieliniowość odbiorników.

Siła elektromotoryczna generatorów synchronicznych zawiera oprócz harmonicznej podstawowej także harmoniczne wyższych rzędów, których wartość względna określana jest znaną zależnością

$$E_\nu^* = \frac{E_\nu}{E_1} = \left(\frac{k_{u\nu}}{k_{u1}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\nu} \,. \tag{1}$$

W zależności tej ν jest rzędem harmonicznej, a k_u współczynnikiem uzwojeniowym generatora (odpowiednio dla pierwszej oraz ν-tej harmonicznej).

Dla generatorów z uzwojeniami o poskoku skróconym dominującymi harmonicznymi wyższych rzędów są harmoniczne o krotności trzy (szczególnie trzecia i dziewiąta). Zawartość tych harmonicznych jest na ogół niewielka w przypadku turbogeneratorów i nieco większa w przypadku hydrogeneratorów [9].

Dodatkowym źródłem harmonicznych są transformatory zasilające sieć, które pobierają odkształcony prąd magnesujący. Następstwem tej nieliniowości jest pojawienie się trzeciej i wyższych harmonicznych w napięciu między punktem gwiazdowym sieci a ziemią.

W sieciach odbiorczych (przemysłowych i komunalnych) zasadniczą przyczyną pojawienia się wyższych harmonicznych w napięciach są odbiorniki nieliniowe. Należą do nich układy prostownikowe, przekształtniki tyrystorowe i piece łukowe, a w sieciach niskiego napięcia – także spawarki, lampy jarzeniowe oraz różne zasilacze prostownikowe i odbiorniki z rdzeniami ferromagnetycznymi. Odkształcenie napięcia – wskutek zawartości harmonicznych w prądzie obciążeniowym – zależy od rodzaju odbiornika, ale też od konfiguracji i parametrów sieci zasilającej. W sieciach z kompensacją mocy biernej zależy ono również od lokalizacji i mocy baterii kondensatorów. Wśród wymienionych odbiorników nieliniowych na szczególne wyróżnienie zasługują – stosowane coraz powszechniej w sieciach przemysłowych – przekształtniki tyrystorowe. Rząd harmonicznych wprowadzanych przez te odbiorniki określony jest wzorem [2]

$$\nu = k \cdot p \pm 1 \tag{2}$$

w którym p jest liczbą pulsów przekształtnika, a k - liczbą naturalną.

Przekształtniki 6-pulsowe wprowadzają zatem harmoniczne — 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 ... . Są to tzw. harmoniczne charakterystyczne, których zawartość zależy m. in. od kąta komutacji (maleje wraz ze wzrostem tego kąta) i od liczby pulsów przekształtnika (także maleje ze wzrostem liczby pulsów). Z badań wynika [1], że np. dla przekształtnika 6-pulsowego zawartość 5. harmonicznej w prądzie pobieranym przez przekształtnik wynosi 19÷20%, a 25. — 1÷4%. Wartość tzw. harmonicznych niecharakterystycznych (2, 3, 4, 6, 8, 9, 10 ...), które powstają wskutek stałych strumieni magnetycznych w rdzeniach transformatorów przekształtnikowych, są mniejsze i zależą silnie od rozrzutu kąta komutacji. Np. przy rozrzucie rzędu 3° suma harmonicznych 2, 3 i 4 nie przekracza 1,5% [11]. Stosowane dla ograniczenia zawartości harmonicznych odpowiednie filtry pasmowe mają tę cechę, że poza pasmem przepustowym ich impedancja silnie wzrasta. Układ „sieć – filtr" zachowuje się wtedy jak równoległy obwód rezonansowy i pojawiają się w napięciu sieci harmoniczne parzyste rzędu 6, 12, 18, ... [8].

Zawartość harmonicznych generowanych przez inne odbiorniki zależy od stopnia ich nieliniowości i często ma charakter stochastyczny (np. w sieciach zasilających piece łukowe). Ponadto, jak wykazano w pracy [4], w sieciach przemysłowych nawet przy braku aktywnych

źródeł prądów wyższych harmonicznych, w napięciach zawsze występuje pewna ich zawartość (zwykle są to harmoniczne 3, 5, 7, 11 – o łącznej zawartości 0,5÷1%).

Stopień odkształcenia napięć jest określany współczynnikiem zawartości harmonicznych i jego wartość jest już w wielu krajach normowana. Przykładowo, według źródeł niemieckich [8] wynosi ona dla sieci przemysłowych 5 kV – 6%. Nieco ostrzejsze wymagania w tym zakresie stawia np. norma rosyjska (łączna zawartość harmonicznych do 13 włącznie – 5%), co nie oznacza jednak, że wartości dopuszczalne nie są czasowo przekraczane. Z rezultatów badań opublikowanych w pracy [11] wynika, że współczynnik zawartości harmonicznych napięcia w zakładach metalurgicznych wynosił 8÷9% osiągając w pojedynczych przypadkach nawet wartości 20%.

Skutki występowania wyższych harmonicznych w napięciach są wielorakie. Jednym z nich jest odkształcenie prądu ziemnozwarciowego. Odkształcenie to – jak wykazano niżej – jest w różnym stopniu uzależnione od czynników wewnętrznych sieci.

3. CZYNNIKI GENERUJĄCE WYŻSZE HARMONICZNE PRZY ZWARCIACH JEDNOFAZOWYCH Z ZIEMIĄ

Podatność sieci na generowanie wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym jest zależna od sposobu pracy jej punktu gwiazdowego.

Przyjmując do rozważań ogólny model sieci z wyodrębnionym punktem zwarciowym F (pokazany na rys. 1a), sposób pracy punktu gwiazdowego można odwzorować przez położenie łączników Q1, Q2 i Q3. Modelowi temu odpowiada schemat zastępczy, który przedstawiono na rys. 1b. W schemacie tym poszczególne symbole oznaczają:

$C_0 = \frac{1}{3}(C_{L1} + C_{L2} + C_{L3})$ – pojemność zerową sieci,

$G_0 = \frac{1}{3}(G_{L1} + G_{L2} + G_{L3})$ – konduktancję zerową sieci,

$\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ – admitancję zerową sieci,

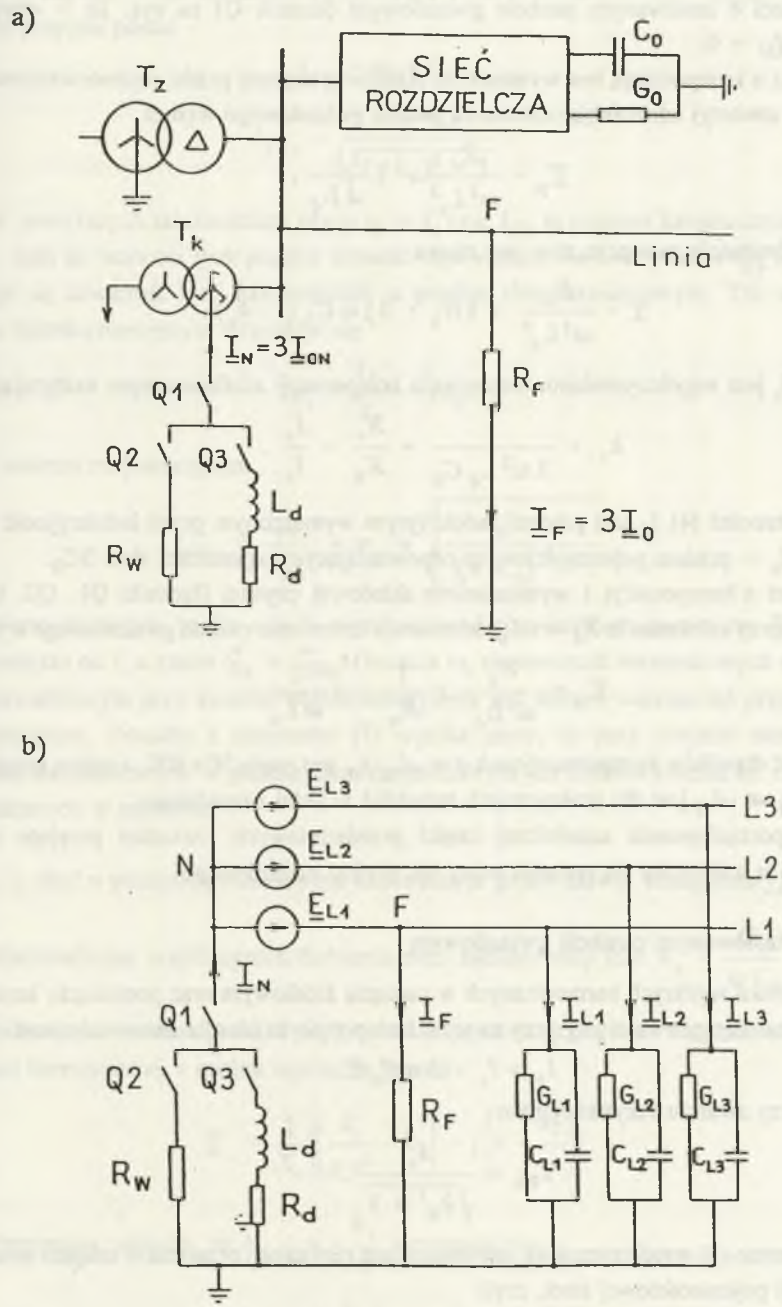
$\underline{Y}_N = \underline{Y}_d + \underline{Y}_w$ – admitancję uziemienia punktu gwiazdowego sieci,

$\underline{Y} = \underline{Y}_N + \underline{Y}_0$ – admitancję sumaryczną sieci względem ziemi.

W ogólnym przypadku prąd ziemnozwarciowy – przy założeniu symetrii napięć źródłowych – określony jest zależnością

$$\underline{I}_F = \frac{\underline{Y}\,\underline{E}}{1 + R_F\underline{Y}}, \tag{3}$$

w której R_F jest rezystancją przejścia w miejscu zwarcia.



Rys. 1. Schemat sieci modelowej (a) oraz jej schemat zastępczy (b)
Fig. 1. Network model (a) and equivalent scheme (b)

Dla sieci o izolowanym punkcie gwiazdowym (łącznik Q1 na rys. 1a – otwarty) admitancja $\underline{Y}_N = 0$.

W sieci z kompensacją bez wymuszenia składowej czynnej prądu ziemnozwarciowego (łącznik Q2 otwarty) admitancja uziemienia punktu gwiazdowego wynosi

$$\underline{Y}_N = \frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} - j\frac{1}{\omega L_d},$$

natomiast admitancja zastępcza sieci jest równa

$$\underline{Y} = \frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} + 3G_0 + 3j\omega C_0 (1 - k_r)$$

przy czym k_r jest współczynnikiem rozstrojenia kompensacji zdefiniowanym następująco

$$k_r = \frac{1}{3\omega^2 L_d C_0} = \frac{X_c}{X_d} = \frac{I_d}{I_c}. \tag{4}$$

W zależności (4) I_d jest prądem indukcyjnym wymuszonym przez indukcyjność dławika L_d, a I_c – prądem pojemnościowym odpowiadającym pojemności sieci $3C_0$.

W sieci z kompensacją i wymuszaniem składowej czynnej (łączniki Q1, Q2, Q3 - zamknięte), przy założeniu że $R_d \ll \omega L_d$, admitancja uziemienia punktu gwiazdowego wynosi

$$\underline{Y}_N = \frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} + \frac{1}{R_w} - j\frac{1}{\omega L_d}.$$

Dobroć dławików kompensacyjnych $q = \omega L_d / R_d$ jest rzędu $50 \div 100$, a zatem przyjęcie założenia $R_d \ll \omega L_d$ jest dla praktycznych rozważań w pełni uzasadnione.

Dla uporządkowania zasadniczej części przedmiotowych rozważań przyjęto dalej podział sieci w zależności do sposobu pracy ich punktu gwiazdowego.

3.1. Sieć o izolowanym punkcie gwiazdowym

Przy braku wyższych harmonicznych w napięciu źródłowym oraz pominięciu konduktancji G_0 prąd ziemnozwarciowy przy zwarciu bezoporowym określa znana zależność

$$I_F = I_c = 3\omega C_0 E, \tag{5}$$

natomiast przy zwarciu rezystancyjnym

$$I_{FR} = \frac{I_c}{\sqrt{k_R^2 + 1}}. \tag{6}$$

We wzorze (6) współczynnik k_R jest stosunkiem rezystancji przejścia w miejscu zwarcia do reaktancji pojemnościowej sieci, czyli

$$k_R = \frac{R_k}{X_c} = 3R_k\omega C_0.$$

Jeśli napięcie źródłowe zawiera ν-tą harmoniczną o zawartości $m_\nu = E_\nu/E_1$, to wzory (5) i (6) przyjmą postać

$$I_{F\nu} = m_\nu \nu I_F , \tag{5a}$$

$$I_{FR\nu} = \frac{m_\nu \nu I_F}{\sqrt{(\nu k_R)^2 + 1}} . \tag{6a}$$

W powyższych zależnościach prądy $I_F = I_c$ oraz I_{FR} są prądami harmonicznej podstawowej. Jeśli do wartości tych prądów odnieść odpowiednie wartości prądów $I_{F\nu}$ oraz $I_{FR\nu}$, uzyskuje się zawartość ν-tej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym. Tak więc przy zwarciu bezrezystancyjnym otrzymuje się

$$I^*_{F\nu} = \frac{I_{F\nu}}{I_F} = m_\nu \nu , \tag{7}$$

a przy zwarciu rezystancyjnym

$$I^*_{FR\nu} = \frac{I_{FR\nu}}{I_{FR}} = m_\nu \cdot \nu \sqrt{\frac{k_R^2 + 1}{(\nu \cdot k_R)^2 + 1}} \tag{8}$$

Warto zauważyć, że dla $\nu > 1$ wyrażenie pod pierwiastkiem we wzorze (8) jest zawsze mniejsze od 1, a zatem $I^*_{F\nu} > I^*_{FR\nu}$. Oznacza to, że zawartość harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym przy zwarciu bezrezystancyjnym jest zawsze większa niż przy zwarciu rezystancyjnym. Ponadto z zależności (7) wynika jasno, że przy zwarciu metalicznym zawartość harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym jest liniowo zależna od zawartości harmonicznych w napięciu.

3.2. Sieć o punkcie gwiazdowym uziemionym przez dławik kompensacyjny

Wprowadzając współczynnik tłumienia sieci zdefiniowany jako $k_d = \dfrac{G_0}{\omega C_0}$ (w sieci z kompensacją nie można pomijać G_0), admitancję sumaryczną sieci względem ziemi dla dowolnej harmonicznej ν można zapisać w postaci

$$\underline{Y}_\nu = \frac{1}{X_c}\left[\left(\frac{k_r}{q\,\nu^2} + k_d\right) + j\left(\nu - \frac{k_r}{\nu}\right)\right].$$

Przyjmując ponadto, że $k_\nu = \nu - \dfrac{k_r}{\nu}$, otrzymuje się

$$\underline{Y}_\nu = \frac{1}{X_c}\left[\left(\frac{k_r}{q\,\nu^2} + k_d\right) + j k_\nu\right].$$

Dla sieci kablowych średnich napięć współczynnik tłumienia k_d – określony pomiarowo w kilku sieciach przemysłowych [6] – zawiera się w przedziale $0{,}05 \div 0{,}15$, natomiast dobroć dławików kompensacyjnych q – jak już wcześniej stwierdzono – przyjmuje wartości z przedziału $50 \div 100$. W tych warunkach dla $\nu > 1$ spełniona jest nierówność $\frac{k_r}{q\nu^2} < k_d$, a więc admitancję sumaryczną sieci dla dowolnej harmonicznej można wyrazić wzorem

$$\underline{Y}_\nu = \frac{1}{X_c}(k_d + jk_\nu) .$$

Harmoniczną podstawową prądu ziemnozwarciowego przy zwarciu rezystancyjnym, przy określonym współczynniku rozstrojenia kompensacji k_r, można opisać dość złożoną zależnością

$$I_{FR} = I_c \sqrt{\frac{\left(\frac{k_r}{q} + k_d\right)^2 + (1 - k_r)^2}{\left[1 + k_R\left(\frac{k_r}{q} + k_d\right)\right]^2 + k_R^2(1 - k_r)^2}} . \tag{9}$$

Jeśli w napięciu źródłowym zawartość ν-tej harmonicznej wynosi m_ν, wówczas prąd ziemnozwarciowy ν-tej harmonicznej określa wzór

$$I_{FR\nu} = I_c m_\nu \sqrt{\frac{k_d^2 + k_\nu^2}{(1 + k_R k_d)^2 + (k_R k_\nu)^2}} , \tag{10}$$

a zatem zawartość ν-tej harmonicznej prądu ziemnozwarciowego w odniesieniu do harmonicznej podstawowej prądu I_c wynosi

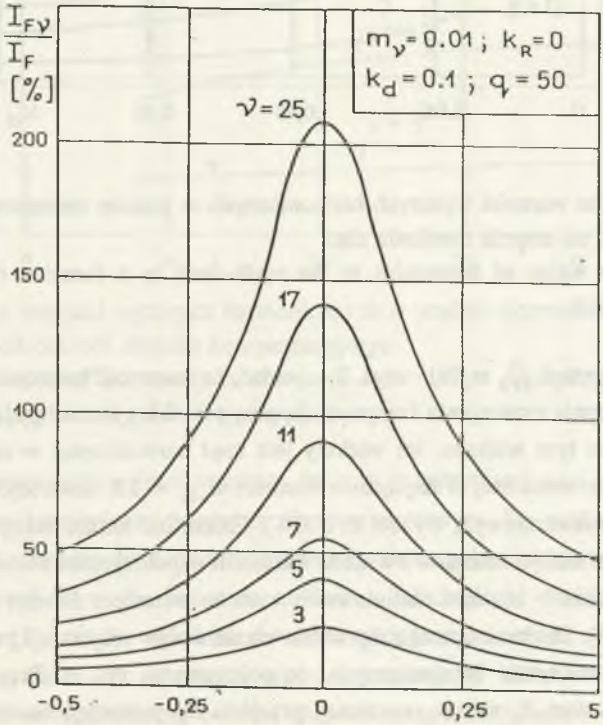
$$I^*_{FR\nu} = m_\nu \sqrt{\frac{(k_d^2 + k_\nu^2)\left[1 + k_R\left(\frac{k_r}{q} + k_d\right)^2 + k_R^2(1 - k_r)^2\right]}{\left[(1 + k_R k_d)^2 + (k_R k_\nu)^2\right]\left[\left(\frac{k_r}{q} + k_d\right)^2 + (1 - k_r)^2\right]}} . \tag{11}$$

Po wprowadzeniu stopnia rozstrojenia kompensacji równego $s = (k_r - 1)$ i uwzględnieniu, że $k_\nu = \nu - \frac{s+1}{\nu}$, zależność (11) przyjmuje postać

$$I^{*}_{FR\nu} = m_{\nu} \sqrt{\frac{\left[k_d^2 + \left(\nu - \frac{s+1}{\nu}\right)^2\right]\left\{\left[1 + k_R\left(\frac{s+1}{q} + k_d\right)\right]^2 + (k_R^2 \cdot s)^2\right\}}{\left[(1 + k_R k_d)^2 + k_R^2\left(\nu - \frac{s+1}{\nu}\right)^2\right]\left[\left(\frac{s+1}{q} + k_d\right)^2 + s^2\right]}} \quad (11a)$$

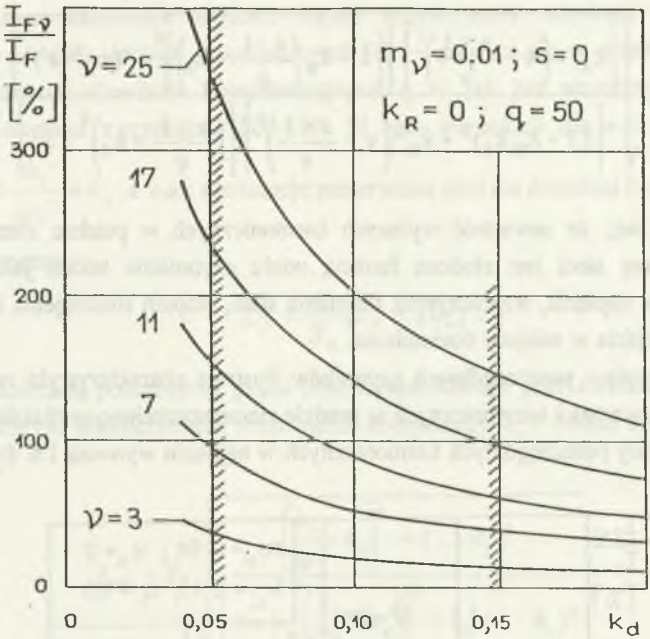
Wynika z niej, że zawartość wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym rozpatrywanej sieci jest złożoną funkcją wielu czynników takich jak: zawartość harmonicznych w napięciu, współczynnik tłumienia sieci, stopień rozstrojenia kompensacji i rezystancja przejścia w miejscu doziemienia.

Ilościowy wpływ poszczególnych czynników ilustrują charakterystyki zamieszczone na rys. 2 ÷ 5. Zawartości harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym określono tu, przy założeniu że udziały poszczególnych harmonicznych w napięciu wynoszą 1% (m_{ν} = 0,01).



Rys. 2. Względne wartości wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w zależności od stopnia rozstrojenia kompensacji

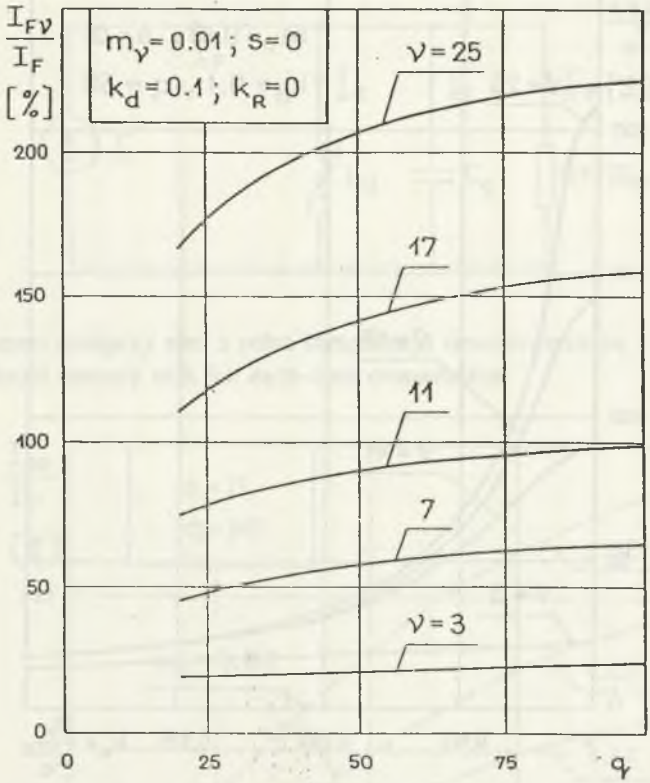
Fig. 2. Relative value of harmonics in the earth-fault current depending on the detuning factor



Rys. 3. Względne wartości wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w zależności od stopnia tłumienia sieci

Fig. 3. Relative value of harmonics in the earth-fault as a function of the attenuation coefficient

Z charakterystyk $I^*_{F\nu} = f(s)$ – rys. 2 – widać, że zawartość harmonicznych bardzo silnie zależy od stopnia rozstrojenia kompensacji; przy $s = 0$ krzywe osiągają maksimum, którego wartość jest tym większa, im większy jest rząd harmonicznej w napięciu (np. przy zawartości 25. harmonicznej w napięciu o wartości $m_{\nu\%} = 1\%$ zawartość tej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym wynosi aż 210%). Zawartość harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym maleje nieliniowo wraz ze wzrostem współczynnika tłumienia sieci (rys. 3) i nieznacznie rośnie – również nieliniowo – wraz ze wzrostem dobroci dławika kompensacyjnego (rys. 4). Bardzo interesująco przedstawia się wpływ rezystancji przejścia w miejscu doziemienia na zawartość harmonicznych, co pokazano na rys. 5. Przy stałej reaktancji pojemnościowej sieci X_c wzrost rezystancji przejścia R_F powoduje bardzo silne tłumienie zawartości harmonicznych. Ponadto – jak wynika z rys. 2÷5 – przy stałej zawartości harmonicznych w napięciu (np. $m_{\nu\%} = 1\%$) zawartość określonej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym rośnie wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej. Przy znacznej zawartości wyższych harmonicznych pełna kompensacja dla harmonicznej podstawowej nie spełnia jednego ze swoich podstawowych zadań, którym jest gaszenie łuku w miejscu doziemienia.



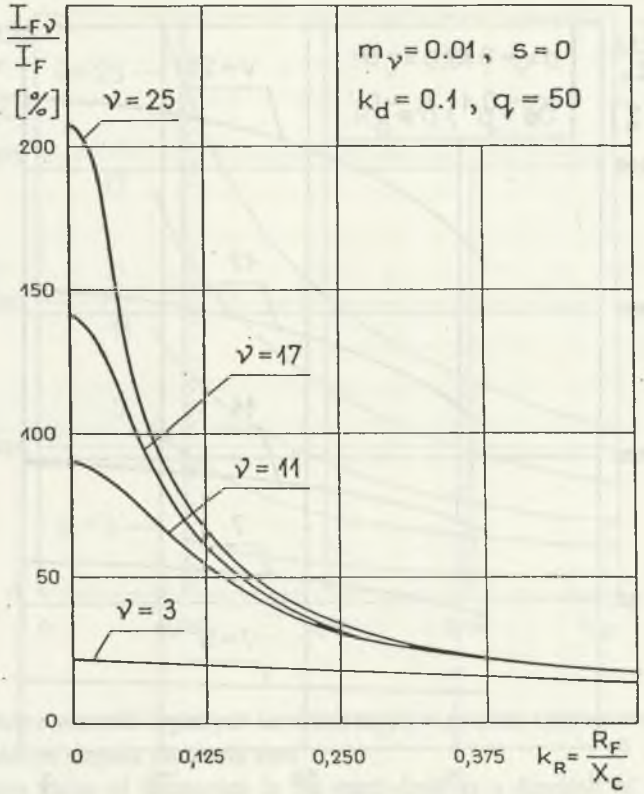
Rys. 4. Względne wartości wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w zależności od dobroci dławika kompensacyjnego

Fig. 4. Relative value of harmonics in the earth-fault current depending on the quality factor of the neutral grounding reactor

Dławik kompensacyjny jest elementem, który w rozpatrywanej sieci może dodatkowo generować wyższe harmoniczne w prądzie ziemnozwarciowym. Do analizy tego zjawiska przyjęto schemat zastępczy (rys. 6) odwzorowujący sieć z pełną kompensacją dla harmonicznej podstawowej (s = 0). Założono nieliniową indukcyjność dławika oraz zwarcie bezrezystancyjne (R_F = 0), dla którego zawartości harmonicznych – jak wykazano wyżej – są maksymalne. W schemacie tym konduktancja G odwzorowuje sumaryczną upływność sieci z uwzględnieniem dobroci dławika kompensacyjnego, tworząc gałąź dla przepływu tzw. prądu resztkowego o charakterze czynnym.

Ze schematu wynika, że prąd ziemnozwarciowy względny (odniesiony do prądu dławika przy pełnej kompensacji dla harmonicznej podstawowej, tj. w warunkach, gdy $I_d = I_c$), jest równy

$$\underline{I}_F^* = 3\underline{I}_0^* = \underline{I}_d^* + \underline{I}_c^* + \underline{I}_r^* . \tag{12}$$



Rys. 5. Względne wartości wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym przy zwarciach rezystancyjnych;
k_R — względna rezystancja przejścia w miejscu zwarcia

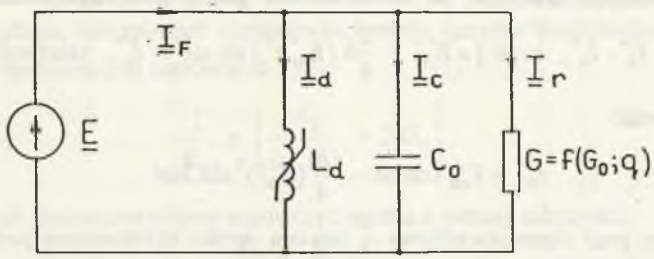
Fig. 5. Relative value of harmonics in the earth-fault current during resistance-faults;
k_R — relative fault resistance

Przyjmując aproksymację charakterystyki magnesowania wielomianem trzeciego stopnia w postaci $I_d^* = aE^* + b(E)^3$ (E^* jest wartością względną napięcia odniesioną do napięcia znamionowego) i zakładając, że napięcie jest przebiegiem sinusoidalnym, przebieg czasowy prądu dławika można opisać zależnością

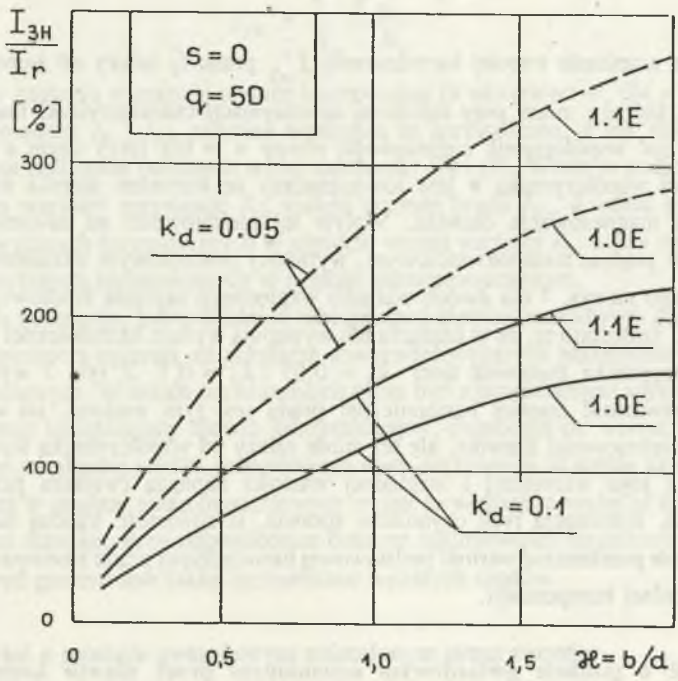
$$i_d^* = a E_m^* \sin \omega t + b (E_m^*)^3 \sin^3 \omega t \,. \tag{13}$$

Po przekształceniach trygonometrycznych otrzymuje się

$$i_d^* = \left[a E_m^* + \frac{3}{4} b (E_m^*)^3 \right] \sin \omega t - \frac{b}{4} (E_m^*)^3 \sin 3\omega t \,. \tag{13a}$$



Rys. 6. Schemat zastępczy sieci z pełną kompensacją ziemnozwarciową
Fig. 6. Reduced network with full earth-fault compensation



Rys. 7. Wpływ nieliniowości dławika kompensacyjnego na zawartość trzeciej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym
Fig. 7. Influence of the neutral grounding reactor non-linearity on the third harmonic in the earth-fault current

Uwzględniając następnie, że w warunkach pełnej kompensacji dla harmonicznej podstawowej $I_d^* = I_c^*$, czyli $[a E_m^* + \frac{3}{4} b (E_m^*)^3] \sin \omega t = i_c^*$, zależność (12) przyjmie ostatecznie postać

$$i_F^* = I_{rm}^* \cos \omega t - \frac{b}{4} (E_m^*)^3 \sin 3\omega t \,. \tag{14}$$

Tak więc prąd ziemnozwarciowy i_F^* zawiera oprócz harmonicznej podstawowej prąd trzeciej harmonicznej, wynikający z nieliniowości dławika. Wartość względną podstawowej harmonicznej prądu ziemnozwarciowego można wyznaczyć z zależności (9) dla $k_r = 1$ ($s = 0$) i $k_R = 0$. Wynosi ona

$$I_r^* = \frac{1}{q} + k_d \,. \tag{15}$$

Względna amplituda trzeciej harmonicznej $\underline{I}_{m3}^*$ prądu i_F^* zależy od stopnia nieliniowości dławika, którego miarą przy założonej aproksymacji charakterystyki magnesowania dławika może być współczynnik nieliniowości równy $\varkappa = b/a$ (przy czym $a + b = 1$). Wzrost wartości współczynnika $\varkappa$ jest równoznaczny ze wzrostem stopnia nieliniowości charakterystyki magnesowania dławika. Wpływ tej nieliniowości na zawartość trzeciej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym, wyrażony procentowym udziałem tej harmonicznej, pokazano na rys. 7 dla dwóch wartości względnego napięcia źródłowego $E^* = 1$ oraz $E^* = 1{,}1$ (założono tu, że w napięciu nie występują wyższe harmoniczne) oraz dwóch wartości współczynnika tłumienia sieci $k_d = 0{,}05$ i $k_d = 0{,}1$. Z rys. 7 wynika jednoznacznie, że zawartość trzeciej harmonicznej prądu jest tym większa, im większy jest współczynnik nieliniowości dławika, ale też silnie zależy od współczynnika tłumienia sieci (maleje wraz z jego wzrostem) i względnej wartości napięcia (większa przy napięciu podwyższonym). Kumulacja tych czynników sprawia, iż zawartość trzeciej harmonicznej może kilkakrotnie przekraczać wartość podstawowej harmonicznej prądu ziemnozwarciowego w warunkach pełnej kompensacji.

3.3. Sieć o punkcie gwiazdowym uziemionym przez dławik kompensacyjny zbocznikowany rezystorem

Liniowy rezystor bocznikujący dławik kompensacyjny stosowany jest w celu zwiększenia składowej czynnej podstawowej harmonicznej prądu ziemnozwarciowego. Przy zwarciu bezrezystancyjnym ($R_F = 0$) admitancja zastępcza sieci z pełną kompensacją ($s = 0$) wyrażona jest wzorem

$$\underline{Y} = \frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} + \frac{1}{R_w} + 3 G_0 \,.$$

Dla uzyskania odpowiednio dużej wartości składowej czynnej prądu, która warunkuje poprawność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, rezystor bocznikujący dobiera się tak, że zwykle spełniona jest nierówność

$$\frac{1}{R_w} > \left(\frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} + 3G_0 \right).$$

Wtedy prąd ziemnozwarciowy wyznaczyć można z prostej zależności

$$I_F \cong \frac{E}{R_w}. \tag{16}$$

Przy zwarciu pośrednim ($R_F \neq 0$) prąd ziemnozwarciowy określa się natomiast ze wzoru

$$I_{FR} \cong \frac{E}{R_w + R_F}. \tag{17}$$

Jeśli w napięciu występują wyższe harmoniczne (o zawartości m_ν dla ν-tej harmonicznej), to w prądach I_F i I_{FR} również występują te harmoniczne, a ich zawartość można wyznaczyć na podstawie podanych wyżej zależności (7) i (8). Warto tu podkreślić, że wraz ze wzrostem wartości rezystancji R_w maleje wartość prądu $I_{F\nu}$, a zatem przy określonej zawartości wyższych harmonicznych w napięciu wzrost wartości R_w działa ograniczająco na zawartość wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym.

Istnieją koncepcje, które działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla sieci pracujących z kompensacją opierają na pomiarze zawartości wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym. W takich rozwiązaniach może być z powodzeniem wykorzystany nieliniowy rezystor bocznikujący dławik kompensacyjny. Powoduje on wzrost współczynnika nieliniowości admitancji punktu gwiazdowego sieci, co sprawia, iż rośnie zawartość trzeciej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym – jak to wykazano wyżej w analizie wpływu nieliniowości dławika. Przy odpowiednim doborze nieliniowości rezystancji R_w w prądzie tym mogą być generowane także harmoniczne wyższych rzędów.

3.4. Sieć o punkcie gwiazdowym uziemionym przez rezystor

Uziemienie punktu gwiazdowego przez rezystor umożliwia – przy odpowiednim doborze wartości rezystancji R_w – stosowanie prostych nadprądowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Wartość rezystancji R_w dobierana jest na zasadzie kompromisu między dopuszczalną wartością prądu ziemnozwarciowego (np. z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy silników elektrycznych) a możliwością uzyskania wymaganej czułości zabezpieczeń ziemnozwarciowych przy doziemieniach. W takiej sieci prąd ziemnozwarciowy zależy głównie od wartości rezystancji R_w, a przy zwarciach rezystancyjnych – także od rezystancji przejścia R_F, i można go wyznaczyć z zależności (16) lub (17). Problem zawartości

wyższych harmonicznych w tym prądzie można więc ująć w sposób identyczny jak w przypadku sieci uziemionej przez dławik kompensacyjny zbocznikowany rezystorem liniowym.

4. WNIOSKI

Z przedstawionych wyżej analiz wynikają następujące wnioski o charakterze ogólnym:

1. Zasadniczą przyczyną występowania wyższych harmonicznych w napięciach przemysłowych sieci średnich napięć są odbiorniki nieliniowe zasilane z tych sieci.
2. Występowanie wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym wynika z faktu istnienia dwóch rodzajów przyczyn, tj. przyczyny zewnętrznej i przyczyn wewnętrznych. Przyczyną zewnętrzną jest wspomniane wyżej odkształcenie napięć. Przyczyny wewnętrzne, związane z dodatkowym generowaniem wyższych harmonicznych przez niektóre elementy sieci, są w dużej mierze zależne od sposobu pracy punktu gwiazdowego sieci.
3. Siecią najbardziej podatną na występowanie wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym jest sieć o punkcie gwiazdowym uziemionym przez dławik kompensacyjny. Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w takiej sieci zależy od stopnia kompensacji, współczynnika tłumienia sieci, dobroci dławika i stopnia jego nieliniowości oraz rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Najwyższy poziom wyższych harmonicznych – przy ich istnieniu w napięciu – występuje przy pełnej kompensacji. Wraz ze wzrostem dobroci dławika i współczynnika jego nieliniowości zawartość harmonicznych rośnie. Natomiast wzrost współczynnika tłumienia sieci i rezystancji przejścia w miejscu zwarcia powoduje zmniejszenie zawartości harmonicznych. Źródłem generującym wyższe harmoniczne może być sam dławik kompensacyjny.
4. Rezystor liniowy włączony równolegle z dławikiem kompensacyjnym w celu wymuszenia dodatkowej składowej czynnej prądu ziemnozwarciowego jest elementem zmniejszającym zawartość wyższych harmonicznych w tym prądzie, natomiast rezystor o charakterystyce nieliniowej staje się dodatkowym źródłem wyższych harmonicznych.
5. Sieci o izolowanym punkcie gwiazdowym i o punkcie gwiazdowym uziemionym przez rezystor nie zawierają elementów generujących dodatkowo wyższe harmoniczne w prądzie ziemnozwarciowym. Przyczyną wewnętrzną pojawienia się wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w tych sieciach może być nieliniowość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia przy doziemieniach o charakterze łukowym.

LITERATURA

1. Białkiewicz Z., Polaczek A.: Oddziaływanie na sieć elektroenergetyczną maszyn wyciągowych zasilanych z przekształtników tyrystorowych. Gospodarka Paliwami i Energią, 1975, nr 8-9, s. 35-38.
2. Bodura E.: Oddziaływanie przekształtników tyrystorowych na sieć zasilającą. Problemy Projektowania Hutnictwa i Przemysłu Maszynowego, 1976, nr 11, s. 317-323.
3. Brauner G.: Berechnung der Oberschwingungsverteilung in Netzen. Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN, 1981, nr 4-5, s. 154-159.
4. Geppart A., Polaczek A.: Określenie stopnia odkształcenia napięcia w sieciach zakładów przemysłowych zasilających przekształtniki. Gospodarka Paliwami i Energią, 1977, nr 4, s. 15-18.
5. Łobos T.: Przebiegi przejściowe podczas jednofazowych zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć i wykorzystanie ich w automatyce zabezpieczeniowej. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, 1975, nr 30.
6. Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Automatyczna regulacja kompensacji ziemnozwarciowej w przemysłowych sieciach kablowych 6 kV. Mat. IV Międzynarodowej Konf. Naukowej nt. „Aktualne problemy automatyki w energetyce", Gliwice 1985, t. I, s. 180-189.
7. Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M., Winkler W.: Factors affecting the levels of harmonics in earth-fault currents in industrial networks. CIGRE, Simposium Lausanne, 18-20 October 1993, Pover system electromagnetic compability, s. 1-5.
8. Schutz W.: Oberschwingugen in industrienetzen mit Stromrichterbelastung. AEG –E.Z. 1971, Ausg. B123.
9. Synal B.: Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach z małym prądem zwarcia doziemnego – problematyka zabezpieczeniowa. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, 1975, nr 31.
10. VDEW Arbeitskreis Perturbation: Überblick über die Oberschwingungsverhältnisse in öffentlichen Stromversorgungsnetzen. Elektrizitätswirtschaft, 1979, H. 25, s. 1008 - 1017.
11. Żeżelenko I.W.: Wysszyje garmoniki w sistiemach elektrosnabżenija mietallurgiczeskich zawodow. Elektriczestwo, 1971, nr 11, s. 53-57.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos

Wpłynęło do Redakcji dnia 18 marca 1994 r.

Abstract

The results of investigation the influence of various factors on contents of harmonics in the earth-fault current in medium voltage industrial networks have been presented in the paper. The factors, depending on the source of harmonics' generation, can be divided into the internal and external. The deformation of source voltages is the external factor. The non-linear elements within the equivalent scheme belong to the internal ones.

Fig. 1a shows a representative networks, which has been investigated. Its neutral, in general, can be isolated, grounded by a compensating reactor, grounded by the reactor with a shunting resistor and, at last, grounded by a resistor. Fig. 1b shows a proper equivalent scheme for one-phase earthing in this network.

From the presented results follows, that the most susceptible to harmonics' appearing in the earth-fault current is the network with a neutral grounding reactor. Contents of harmonics of earth-fault current in a network like this - at a certain level of harmonics in the source voltages - depends on a compensation coefficient (Fig. 2), quality factor of the grounding reactor and on attenuation coefficient of the network (Fig. 4). It also occurs here a big influence of the fault-resistant value; with its increase considerably increases the attenuation of harmonics.

Besides, as it arises from Fig. 2 ÷ 5, at a fixed contents of harmonics in the source voltages, the contents of a specified harmonic increases with the increase of its range.

A neutral grounding reactor can be itself a source of harmonics (Fig. 7). A shunting linear resistor switched in parallel to the reactor, aimed at forcing an active component of the earth-fault current, is - in relation to harmonics - an attenuating element, however a non-linear resistor becomes an additional source of harmonics.

Networks with an isolated neutral and with the neutral grounded by resistor do not consist elements additionally generating harmonics. The only internal case of appearing those harmonics can be non-linearity of a fault-resistance during the arc earthing.