

Dławiki w filtrach kompensacyjnych pasywnych

Tadeusz Glinka

1. Filtry wyższych harmonicznyc

Nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej nie są kompatybilne z siecią elektroenergetyczną i innymi odbiornikami energii elektrycznej, gdyż generują do sieci wyższe harmoniczne prądu, które zakłócają sinusoidalny przebieg napięcia w sieci. Należą do nich przede wszystkim odbiorniki dużej mocy, takie jak hutnicze piece łukowe, prostowniki i falowniki zasilające silniki elektryczne. Wpływ odbiorników nieliniowych na odkształcenie napięcia sieci klasyfikuje się według współczynnika zwarcia k_z , zdefiniowanego jako stosunek mocy zwarcia sieci S_{ZS} w punkcie przyłączenia odbiornika nieliniowego do znamionowej mocy pozornej odbiornika nieliniowego S_N [3].

$$k_z = \frac{S_{ZS}}{S_N}$$

Jeśli $k_z > 200$, to współczynnik odkształcenia napięcia

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_1} 100\%$$

nie przekracza wartości dopuszczalnych podanych w Rozporządzeniu [1] i filtrów wyższych harmonicznyc można nie stosować. Jeśli ($200 > k_z > 100$), to istnieje ryzyko przekroczenia dopuszczalnej wartości współczynnika THD_U , stosowanie przynajmniej jednego filtru dla najwyższej harmonicznej jest wskazane. Przy ($k_z < 100$) stosowanie filtrów dla kilku harmonicznyc o najwyższej wartości staje się konieczne. Na przykład układ napędowy o mocy 100 kW i napięciu 400 V, składający się z układu energoelektronicznego (prostownika bądź falownika) i silnika, jest zasilany z transformatora sieciowego o parametrach znamionowych: 1,5 MVA; 6/0,4 V; $u_{z\%} = 6\%$; jak na rys. 1. Moc zwarcia sieci na napięciu 400 V, liczona z uwzględnieniem tylko impedancji transformatora, wynosi 25 MVA. Współczynnik zwarcia $k_z = 250$, a więc nie ma ryzyka przekroczenia dopuszczalnej wartości odkształcenia napięcia THD_U dla innych odbiorców energii elektrycznej. W przypadku zasilania z wymienionego transformatora trzech podobnych układów napędowych o tej samej mocy współczynnik zwarcia obniży się ($k_z = 83$). Pożądana jest zatem filtracja harmonicznyc o największej wartości.

Filtry pasywne wyższych harmonicznyc prądu są układami szeregowymi LC rezonansowymi i są włączane do sieci równolegle z odbiornikiem nieliniowym. Impedancja filtru dla harmonicznej ν

Streszczenie: Filtry pasywne wyższych harmonicznyc są stosowane w sieciach elektroenergetycznych, do których są przyłączone nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej dużej mocy. Filtr pasywny jest układem szeregowym indukcyjności L i pojemności C , tak dobranych, aby dla pulsacji ω_ν były w rezonansie. Pojedynczy filtr składa się z dławika indukcyjnego i baterii kondensatorów. Zarówno dławiki, jak i kondensatory powinny mieć znamionową moc pozorną dopasowaną do mocy harmonicznej, którą kompensują. Jeśli moc filtru jest za mała, to istnieje zagrożenie przegrzania termicznego dławika bądź baterii kondensatorów. Rdzenie magnetyczne dławików są dzielone tak, aby w obwodzie magnetycznym było kilka szczelin powietrznych. Segmenty rdzeni w zmiennym polu magnetycznym drgają. Drgania te przy słabym zamocowaniu rdzenia prowadzą do uszkodzenia mocowania i uszkodzenia uzwojenia. Załączono zdjęcia dławika z przegrzaniem uzwojeniem i uszkodzonym mocowaniem rdzenia.

Słowa kluczowe: dławiki, filtry pasywne, wyższe harmoniczne, awarie

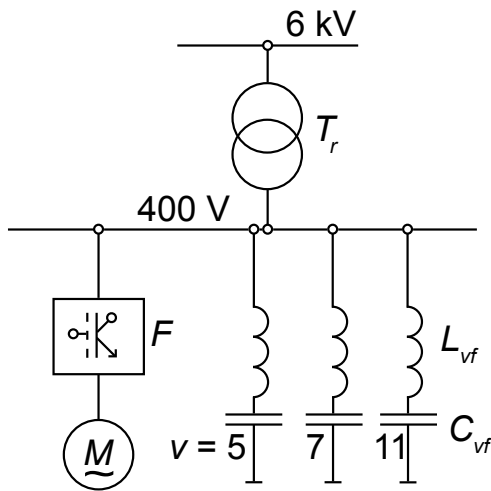
🇬🇧 CHOKES IN PASSIVE COMPENSATION FILTERS

Abstract: Harmonic passive filters are used in power networks to which non-linear high-power electric energy receivers are connected. Passive filter is built as a series connection of inductance L and capacitance C , calculated for resonance at ω_ν . A single filter consists of an induction choke and a capacitor bank. Both, chokes and capacitors, should have a nominal apparent power adjusted to the harmonic power they compensate. If the filter power is too low, there is a risk of overheating of the choke or capacitor bank. The magnetic cores of the chokes are divided so that there are several air gaps in the magnetic circuit. Segments of cores in a variable magnetic field vibrate. These vibrations lead to damage of the mounting and damage of the winding, when the core is not poorly installed. Photos of the choke with overheated winding and damaged core are attached.

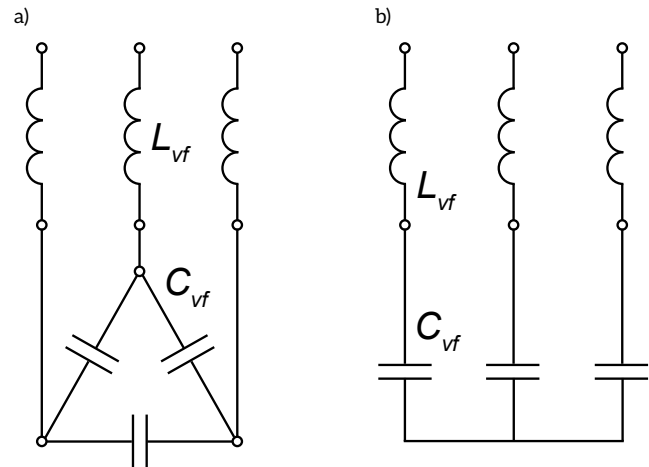
Keywords: chokes, passive filters, higher harmonics, failures

$$Z_{\nu f} = \sqrt{R_{\nu f}^2 + \left(\nu \omega_{1f} L_{\nu f} - \frac{1}{\nu \omega_{1f} C_{\nu f}} \right)^2}$$

Dla częstotliwości rezonansowej



Rys. 1. Schemat poglądowy filtracji wyższych harmonicznych układu napędowego



Rys. 2. Układy połączenia kondensatorów w filtrze trójfazowym: a - w trójkąt; b - w gwiazdę

$$v\omega_1 L_{vf} - \frac{1}{v\omega_1 C_{vf}} = 0$$

$$Z_{vf} = R_{vf}$$

R_{vf} , L_{vf} , C_{vf} – rezystancja, indukcyjność i pojemność filtra harmonicznego v ; ω_1 – jest pulsacją napięcia sieci. R_{vf} – odwzorowuje straty mocy w dławiku i kondensatorze i może być wyliczona ze strat mocy w filtrze i wartości skutecznej prądu

$$R_{vf} = \frac{\Delta P_{filtra}}{3I_{filtra}^2}$$

Zadaniem filtra jest przejmować z sieci harmoniczną prądu I_v . Funkcję tę filtr spełnia, gdy jego impedancja dla harmonicznego v jest minimalna. Minimalną impedancję uzyskuje się, gdy indukcyjność L_{vf} i pojemność C_{vf} filtra są w rezonansie. W praktyce częstotliwość rezonansową filtra f_{vf} ustawia się poniżej częstotliwości f_v harmonicznego, którą kompensuje [2]

$$f_{vf} = (0,98 \div 0,9)f_v$$

W układzie trójfazowym kondensatory mogą być połączone w trójkąt bądź w gwiazdę, jak to pokazano na rys. 2.

Impedancja filtra, dla podstawowej harmonicznego napięcia ($\omega_1 = 2\pi f_1$), jest pojemnościowa

$$\left| \omega_1 L_v - \frac{1}{\omega_1 C_v} \right| \approx \frac{1}{\omega_1 C_v}$$

Filtry harmonicznego v dla częstotliwości sieci f_1 pełnią funkcję kompensatorów mocy biernej. Projektując filtry, należy zbilansować moc bierną, aby nie przekompensować sieci i aby $\cos\phi$ sieci nie było pojemnościowe, gdyż napięcie sieci może wzrosnąć ponad wartość dopuszczalną i istnieje niebezpieczeństwo rezonansu równoległego. Rezonans równoległy powstaje w sieci, gdy reaktancja pojemnościowa baterii kondensatorów równa

się z indukcyjnością sieci. Rezonans może być wzbudzany przez harmoniczne generowane przez układ napędowy. W rezonansie równoległym harmoniczne napięcia i prądy są wielokrotnie wzmocnione, co może skutkować uszkodzeniem filtra, przekształtnika i innych odbiorników energii przyłączonych do sieci.

reklama

reklama

Filtry pasywne wyższych harmonicznich powiększają koszty inwestycyjne i eksploatacyjne układu napędowego. Ich dobór, zakup i instalacja kosztuje, a w czasie eksploatacji w filtrach wydzielają się straty energii, które obniżają sprawność zainstalowanego napędu. Dobrze dobrane filtry, moc bierna dławików i kondensatorów dopasowana do mocy biernej harmonicznich zapewniają bezproblemową pracę filtrów. Natomiast filtry o mocy za małej przegrzewają się i ulegają awarii.

2. Dławiki filtrów wyższych harmonicznich

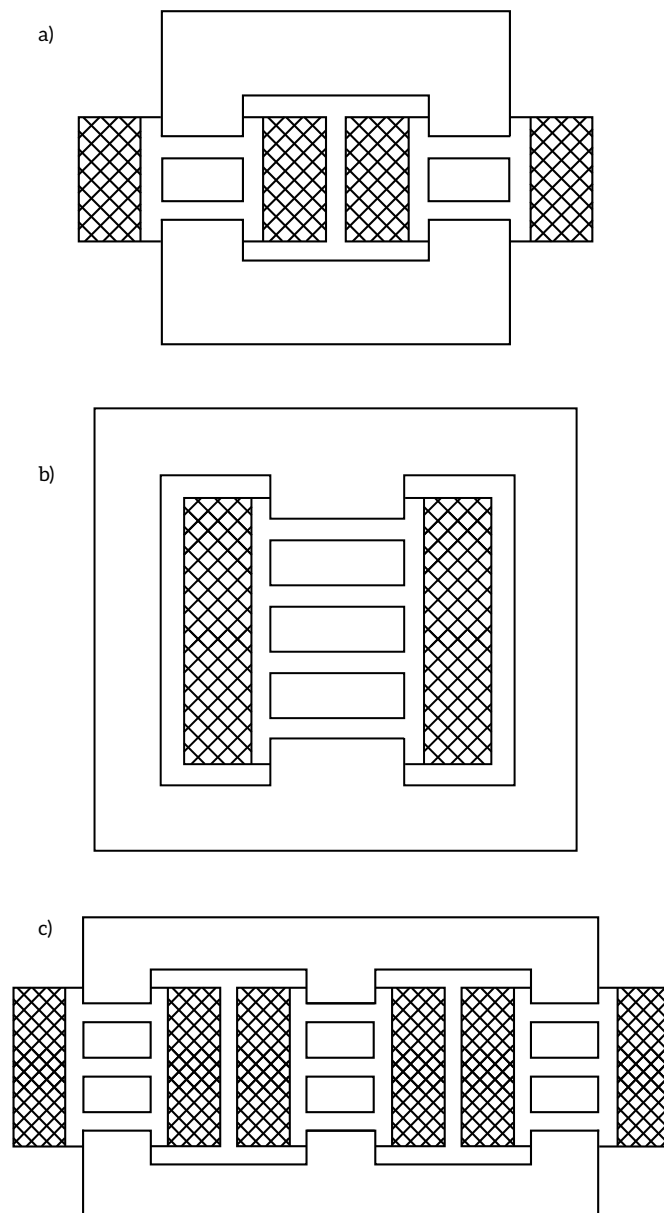
Dławiki kompensacyjne są stosowane w sieciach elektroenergetycznych w układach filtrów wyższych harmonicznich, a także do kompensacji mocy biernej pojemnościowej, jeśli taka potrzeba zachodzi. Dławik składa się z rdzenia ferromagnetycznego, na którym jest umieszczone jedno uzwojenie. Rdzeń magnetyczny dławika, podobnie jak transformatora, wykonany jest z blachy transformatorowej anizotropowej izolowanej powierzchniowo izolacją ceramiczną. Rdzeń dławika jest przemagnesowywany strumieniem magnetycznym zmieniającym się z częstotliwością napięcia sieci, na którą jest nałożona harmoniczna kompensowana. Rdzeń powinien charakteryzować się małą stratnością. Obwód magnetyczny dławika musi być nienasycony, a jego indukcyjność powinna być stała. Uzyskuje się to, budując obwód magnetyczny dławika ze szczelinami powietrznymi. Szczelin jest kilka, pokazano to na rys. 3. Strumień magnetyczny przy jednej dużej szczelinie wchodziłby na zewnątrz i przenikał do uzwojenia. Takie rozwiązanie byłoby niekorzystne, gdyż wpływałoby na rozkład gęstości prądu w przekrojach przewodów i powiększałoby straty mocy w uzwojeniu. W celu ukierunkowania strumienia magnetycznego wzdłuż rdzenia, rdzeń składa się segmentów, które dzielą szczelinę na kilka części.

Dławiki jednofazowe budowane są z rdzeniami dwukolumnowymi i trójkolumnowymi – rys. 3 a, b. Dławiki trójfazowe są zwykle trójkolumnowe. Gabaryt dławika trójfazowego trójkolumnowego jest mniejszy od gabarytu trzech dławików jednokolumnowych. Dławiki trójfazowe stosuje się do filtracji harmonicznich ($v = 6n \pm 1$). W prądach transformatorów zasilających piece łukowe w hutach występują także harmoniczne parzyste, np. ($v=2$). Dla filtracji harmonicznich parzystej korzystnie jest stosować trzy dławiki jednofazowe bądź jeden dławik trójfazowy pięciokolumnowy. Uzwojenia dławików standardowo wykonane są z miedzi, zwykle przewodem o przekroju profilowym izolowanym (lakier, szkło, nomex). Na rdzeniu dwukolumnowym uzwojenie składa się z dwóch cewek, a na rdzeniu trójkolumnowym z jednej cewki, jak to pokazano na rys. 3.

3. Narażenie dławików na uszkodzenia

Uzwojenie i rdzeń dławika narażone są na działania termiczne i dynamiczne. Jak już powiedziano, w filtrze generowane są straty mocy

$$\Delta P_{f\text{iltra}} = \frac{m}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_C$$



Rys. 3. Budowa dławików: a – jednofazowego dwukolumnowego; b – jednofazowego trójkolumnowego; c – trójfazowego trójkolumnowego

W dławiku rozprasza się moc w uzwojeniu ΔP_{Cu} i rdzeniu ΔP_{Fe} , a w kondensatorach moc ΔP_C . Głównym źródłem strat mocy są napięcie i prąd podstawowej harmonicznnej ($v=1$) i harmonicznnej kompensowanej f_v . Wartość skuteczną pierwszej harmonicznnej prądu determinuje pojemność kondensatora C_v , (przy połączeniu kondensatorów w trójkąt należy pojemności transformować na układ gwiazdy) – rys. 2 b

$$I_1 \approx \omega_1 C_v U_1$$

Harmoniczną prądu I_v determinuje impedancja Z_{vf}

$$I_v = \frac{U_v}{Z_v}$$

Straty mocy w filtrze trójfazowym

$$\Delta P_{filtra} = 3(U_1 I_1 \cos \varphi_1) + 3(U_v I_v \cos \varphi_v)$$

U_1 i U_v – napięcia fazowe w układzie gwiazdy.

Straty mocy w dławiku

$$\Delta P_L = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} \approx 3(U_{L1} I_1 \cos \varphi_1 + U_{Lv} I_v \cos \varphi_v)$$

Straty mocy w kondensatorach

$$\Delta P_C \approx 3(U_{C1} I_1 \cos \varphi_1 + U_{Cvf} I_{vf} \cos \varphi_{vf})$$

W filtrach zainstalowanych można zmierzyć napięcia na dławikach U_{L1} i U_{Lv} ; kondensatorach U_{C1} , U_{Cv} ; prądy I_1 i I_v oraz moce ΔP_{filtra} , ΔP_L i ΔP_C , weryfikując poprawny dobór filtra.

Rozdzielenie mocy strat w dławiku ΔP_L na uzwojenie ΔP_{Cu} i rdzeń ΔP_{Fe} z danych pomiarowych nie jest możliwe. Obliczenie strat w uzwojeniu, bazując na rezystancji uzwojenia R_{Cu} zmierzonej prądem stałym, nie jest poprawne, gdyż rozkład gęstości prądu harmonicznego w przekrojach przewodów nie jest stały i straty mocy są większe. Straty te można obliczyć metodą elementów skończonych z rozkładu indukcji w rdzeniu i uzwojeniu. Obliczenia te nie są łatwe, gdyż rozkład gęstości prądu w przekroju każdego zwoju, w obrębie szczelin, jest inny.

Energia strat w dławiku rozprasza się w formie ciepła

$$Q_L = \int_0^t \Delta P_L dt$$

Ciepło Q_L stwarza zagrożenie przegrzania uzwojenia i rdzenia. Na rysunku 4 przedstawiono dławik nowy, a na rysunkach 5 i 6 dławik z rdzeniem i uzwojeniem przegrzanym. Przegrzaniu



Rys. 4. Nowy dławik trójfazowy



Rys. 5. Przegrzane uzwojenie i rdzeń dławika



Rys. 6. Przegrzana cewka uzwojenia

uległa cewka uzwojenia fazy środkowej, która jest słabo chłodzona. Przegrzewa się także rdzeń.

W dławiku działają także siły dynamiczne na uzwojenie i na rdzeń. Prąd dławika $[i_1(t) + i_v(t)]$ wzbudza rozkład indukcji magnetycznej w przestrzeni uzwojenia $[B_1(t) + B_v(t)]$, która współdziałając z prądem w uzwojeniu, generuje siłę elektrodynamiczną, działającą na każdy zwój. Z dużym przybliżeniem można opisać przebieg rozkładu obwodowego siły elektrodynamicznej działającej na uzwojenie, zastępując cewkę jednym zwojem umieszczonym w środku. Kierunek działania rozkładu obwodowego siły będzie promieniowy odśrodkowy

$$\frac{F_{Cu}(t)}{\pi D} = N[i_1(t) + i_v(t)][B_1(t) + B_v(t)]$$

Strumień magnetyczny w rdzeniu

$$\Phi(t) \approx N \left(\frac{i_1(t)}{R_{\mu 1}} + \frac{i_v(t)}{R_{\mu v}} \right)$$

także generuje siłę elektrodynamiczną

$$F_{ed} = K\Phi^2(t)$$

Poszczególne parametry oznaczają: D – średnicę średnią uzwojenia; N – liczbę zwojów uzwojenia; $R_{\mu 1}$ i $R_{\mu v}$, reluktancje obwodu magnetycznego; K – parametr proporcjonalny do przekroju poprzecznego rdzenia.

Wzory powyższe są przybliżone. Ich celem jest wskazać na funkcje elektrodynamiczne generujące drgania uzwojenia i drgania segmentów rdzenia. W oparciu o te równania można określić częstotliwości tych drgań, które wynoszą: $2f_1$, $(f_1 + f_v)$, $2f_v$. Dokładne obliczenia rozkładu obwodowego siły elektrodynamicznej działającej na uzwojenie i siły elektrodynamicznej działającej na rdzeń można wykonać metodą elementów skończonych, modelując cały dławik w przestrzeni 3D.

Drgania generowane przez te siły oddziałują zarówno na uzwojenie, jak i na rdzeń. Uzwojenie jest impregnowane



Rys. 7. Zniszczone mocowanie rdzenia i przesunięte fragmenty rdzenia

lakierem, który je zespała, i mniej jest podatne na drgania. Natomiast rdzeń składa się z dzielonych segmentów umieszczonych w tulei izolacyjnej bądź obłożony jest płytkami z tworzywa skrępowanymi z rdzeniem taśmą szklaną. Fragmenty rdzenia drgają, co objawia się głośną pracą dławika, a z czasem pod wpływem drgań segmentów rdzenia zostaje zniszczone mocowanie rdzenia. Wówczas segmenty rdzenia przemieszczają się na boki i uszkadzają izolację cewek, powodując zwarcia zwojowe. Na rysunku 7 pokazano segmenty rdzenia, które były poprzesuwane w stronę uzwojenia i uszkodziły izolację uzwojenia oraz miedź przewodów. Na rysunku 8 pokazano segmenty rdzenia i osłonę bakelitową z widocznymi odciskami blach i zmienioną barwą, co świadczy o jej przegrzaniu.

Wnioski

Nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej generują do sieci elektroenergetycznej wyższe harmoniczne prądu, które zakłócają sinusoidalny przebieg napięcia sieci. Równoległe z odbiornikiem nieliniowym należy stosować filtry, które przejmują harmoniczne prądu. Filtry pasywne są układami szeregowymi L , C rezonansowymi.

Filtry pasywne wyższych harmonicznych powiększają koszty inwestycyjne i eksploatacyjne układu napędowego. Ich dobór, zakup i instalacja kosztują, a w czasie eksploatacji w filtrach wydzielają się straty energii, które obniżają sprawność zainstalowanego napędu.



Rys. 8. Przegrzana osłona rdzenia

Pojedynczy filtr składa się z dławika indukcyjnego i baterii kondensatorów. Zarówno dławiki, jak i kondensatory powinny mieć znamionową moc pozorną dopasowaną do mocy harmonicznej, którą kompensują. Jeśli moc filtru jest za mała, to istnieje zagrożenie przegrzania termicznego: uzwojenia, rdzenia bądź baterii kondensatorów. Rdzenie magnetyczne dławików są dzielone tak, aby w obwodzie magnetycznym było kilka szczelin powietrznych połączonych szeregowo. Segmenty rdzenia w zmiennym polu magnetycznym drgają. Drgania te, przy słabym zamocowaniu rdzenia, prowadzą do uszkodzenia uzwojenia.

Dobrze dobrane filtry, moc bierna dławików i kondensatorów dopasowana do mocy biernej harmonicznych zapewniają bezproblemową pracę filtrów. Natomiast filtry o mocy za małej przegrzewają się i ulegają awarii. Na rysunkach 5 do 8 pokazano dławik, który uległ awarii.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 4 maja 2007 r. w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemów elektroenergetycznych. (Dziennik Ustaw 93 z dnia 29 maja 2007, poz. 623).
- [2] WARECKI J., GAJDZICA M.: *Praktyka doboru filtrów harmonicznych dla układów zasilania pieców łukowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. „Electrical Engineering” 84/2015.
- [3] ZUCHLSDORF P., CHOJNOWSKI P., IWANIAK A.: *Kompensacja mocy biernej i tłumienie wyższych harmonicznych za pomocą aktywnych filtrów sieciowych*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 9/2001.
- [4] PN-EN 60076-1 – Transformatory – Część 1: Wymagania ogólne.
- [5] PN-EN 60076-2 – Transformatory – Część 2: Przyrosty temperatury dla transformatorów olejowych.
- [6] PN-EN 60076-6 – Transformatory – Część 6: Dławiki.