POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 78 Electrical Engineering 2014

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

ANALIZA WPŁYWU HARMONICZNYCH W NAPIĘCIU NA STRATY MOCY W LINII NN ZASILAJĄCEJ SILNIK INDUKCYJNY Z KOMPENSACJĄ MOCY BIERNEJ PRZY ZASTOSOWANIU KONDENSATORÓW

W referacie przedstawiono przy wykorzystaniu programu Mathcad, wyniki obliczeń i analizę wartości strat mocy w odcinku linii elektroenergetycznej niskiego napięcia zasilającej silnik indukcyjny większej mocy, którego moc bierną kompensuje się przy zastosowaniu kondensatorów. W sieci z kondensatorami konieczne jest uwzględnianie harmonicznych występujących w napięciu. Prądy wymuszone tymi harmonicznymi zwiększają straty mocy. Przedmiotem referatu jest analiza wartości tych strat. Analizę przeprowadzono dla trzech klas sieci elektroenergetycznej, w zależności od dopuszczalnych wartości THD.

SŁOWA KLUCZOWE: straty mocy, linia elektroenergetyczna, harmoniczne, wskaźnik THD

1. WPROWADZENIE

Straty mocy w linii elektroenergetycznej, również tej zasilającej silniki indukcyjne, zależą od rezystancji przewodu oraz kwadratu prądu, czyli $\Delta P = RI^{2}$. Silniki indukcyjne pobierają z sieci nie tylko moc czynną P, ale również moc bierną Q, często nazywaną mocą bierną magnesującą. Wartość mocy biernej (indukcyjnej) silnika zależy nie tylko od jego charakterystycznych parametrów, ale również od obciążenia, czyli prędkości obrotowej. Zarówno wartości mocy czynnej jak biernej decydują o wartości takiego charakterystycznego parametru maszyny jak współczynnik mocy (cosφ).

Ze względu na ograniczanie strat mocy przy przesyłaniu energii elektrycznej wartość współczynnika mocy powinna być jak największa, a conajmniej taka by wartość tangensa tego kąta nie była większa niż 0.4. Taką wartość tangensa kąta określają przepisy. Takiej wartości tangensa kąta odpowiada wartość współczynnika mocy większa niż 0,928. Ponieważ naturalna wartość

* Politechnika Poznańska.

współczynnika mocy silników indukcyjnych jest mniejsza od sugerowanej przez przepisy, dla ograniczenia wartości mocy biernej pobieranej z sieci stosuje się tzw. kompensację mocy biernej indukcyjnej mocą pojemnościową. Zwykle moc bierną pojemnościową uzyskuje się z kondensatorów. Kondensatory są wygodnym elementem układu elektroenergetycznego jako źródła mocy biernej. Wadą kondensatora jest zależność jego reaktancji (X/f) od częstotliwości. Wada ta jest istotna wtedy, gdy w napięciu sieci trzeba uwzględniać tzw. wyższe harmoniczne. Obecnie uwzględnianie harmonicznych w napięciu jest niezbędne praktycznie zawsze, przy czym w zależności od dopuszczalnej zawartości harmonicznych w napięciu wyróżnia się klasy (pierwszą, drugą i trzecią). Dla klasy pierwszej dopuszcza się mniejszą zawartość harmonicznych, dla klasy drugiej wartość większą a dla klasy trzeciej największą. Dopuszczalną zawartość harmonicznych określa się na podstawie tzw. wskaźnika THD oraz dopuszczalnych wartości poszczególnych harmonicznych w napięciu. Żadna z tych wartości nie może być przekroczona. Wg obowiązujących przepisów harmoniczne w napięciu powinno się uwzględniać do rzędu 40, jednak w odniesieniu do kondensatorów można się ograniczyć np. do uwzględniania harmonicznych rzędu 17. W niektórych przypadkach można brać pod uwagę tylko harmoniczne 5 i 7, których wartości w napięciu sieci są największe. Wartości wskaźnika THD dla poszczególnych klas wynoszą: dla klasy pierwszej 5%, dla klasy drugiej 8% natomiast dla klasy trzeciej 10%. Wskaźnik THD oblicza się jako pierwiastek z sumy kwadratów dopuszczalnych wartości poszczególnych harmonicznych. Dopuszczalne wartości poszczególnych harmonicznych w napięciu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dopuszczalne wartości harmonicznych w napięciu dla klas 1, 2, 3

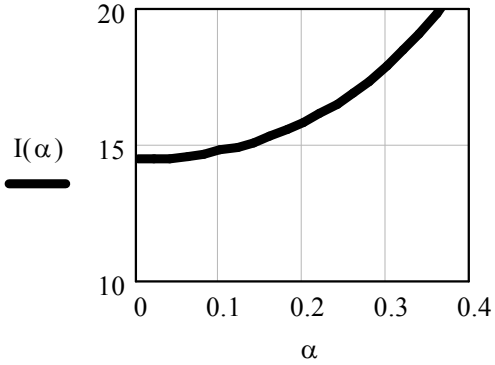
Rząd harmonicznych	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Klasa 1 Wartość napięć(%)	1	3	3	3	1.5	3	3	0.3	2
Klasa 2 Wartość napięć(%)	1	5	6	5	1.5	3.5	3	0.4	2
Klasa 3 Wartość napięć(%)	1	6	8	7	2.5	5	4.5	2	4

2. ZASADY PRZEDSTAWIANIA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH

Dla przyjętej wartości mocy czynnej obciążenia P natężenie prądu I pobieranego z sieci zależy od wartości cosφ. Przy korzystaniu z programu Mathcad korzystnie jest posługiwać się nie bezpośrednio funkcją cosinusa, ale funkcją pomocniczą cos $\alpha*2\pi/3$, gdzie α może się zmieniać w takim przedziale w jakim zamierza się zmieniać wartość cosφ.

Natężenie prądu opisuje wzór (1), w którym U jest napięciem międzyprzewodowym. W sieci niskiego napięcia znamionowe napięcie międzyprzewodowe wynosi 400 V.

$$I(\alpha) = \frac{P}{\sqrt{3}U_n \cos(\frac{2}{3}\alpha\pi)\eta} \tag{1}$$



Rys. 1. Wpływ kąta α na natężenie prądu

Na rysunku 1 przedstawiono zależność prądu odbiornika o mocy 10 kW w funkcji kąta α. Na rysunku wyraźnie widać, jak silnie współczynnik mocy wpływa na natężenie prądu. Dla α = 0.3, kiedy współczynnik mocy cosφ = 0.81 natężenie prądu wynosi 20.3 A podczas gdy dla α = 0.1, kiedy cosφ = 0.978, natężenie prądu maleje do wartości 16.76 A. Ponieważ straty mocy zależą od kwadratu natężenia prądu łatwo zauważyć, że przy takiej zmianie współczynnika mocy straty mocy zmieniają się o około 20%. Podobnie dzieje się w przypadku uwzględniana strat mocy spowodowanych harmonicznymi w prądzie.

Harmoniczne w napięciu w istotny sposób wpływają na natężenie prądu w obwodach z kondensatorami, jako że im wyższy jest rząd harmonicznej tym mniejsza jest reaktancja. Dlatego w przepisach przewidziano mniejsze dopuszczalne wartości napięć dla poszczególnych harmonicznych wyższych rzędów. Harmoniczne w napięciu, powodujące przepływy prądów wywołanych tymi harmonicznymi, wywołują nie tylko wzrost prądów w przewodach zasilających, ale również, a może przede wszystkim, w kondensatorach powodując ich intensywne nagrzewanie. Dlatego dostępne są kondensatory o zwiększonej odporności cieplnej, to znaczy o dopuszczalnym prądzie obciążenia np. 1.3 lub nawet 1.5 prądu znamionowego. Przy większych prądach harmonicznych niezbędne jest stosowanie specjalnych dławików. Prąd znamionowy kondensatora określa się dla częstotliwości znamionowej (50 Hz).

Dla obliczenia natężenia prądu występującego w obwodzie, z uwzględnieniem wybranych harmonicznych w prądach wymuszonych harmonicznymi w napięciu

(pierwszej, trzeciej, piątej, siódmej, dziewiątej, jedenastej, trzynastej oraz siedemnastej) można posługiwać się wzorem (2):

$$I = \sqrt{I_{1h}^2 + I_{3h}^2 + I_{5h}^2 + I_{7h}^2 + I_{9h}^2 + I_{11h}^2 + I_{13h}^2 + I_{15h}^2 + I_{17h}^2} \tag{2}$$

w którym prądy poszczególnych harmonicznych I_{xh} oblicza się ze wzorów:

– prąd od pierwszej harmonicznej napięcia wynosi:

$$I_{1h} = \frac{U_f}{X_{c1}}$$

gdzie U_f jest znamionowym napięciem fazowym, natomiast X_{c1} jest reaktancją dla pierwszej harmonicznej napięcia kondensatora o pojemności C_t:

$$X_{c1} = \frac{1}{2\pi f_n C_t}$$

Dla kolejnych harmonicznych napięcia otrzymuje się odpowiednio:

$$I_{3h} = u_{3h} \frac{U_f}{X_{c3}}$$

gdzie u_{3h} jest dopuszczalną wartością trzeciej harmonicznej napięcia według Tabeli 1, natomiast X_{c3} jest reaktancją kondensatora dla trzeciej harmonicznej

$$X_{c3} = \frac{1}{2\pi 3 f_n C_t}$$

Dla piątej harmonicznej napięcia otrzymuje się związek:

$$I_{5h} = u_{5h} \frac{U_f}{X_{c5}}$$

gdzie u_{5h} jest dopuszczalną wartością piątej harmonicznej napięcia według Tabeli 1, natomiast X_{c5} jest reaktancją kondensatora dla piątej harmonicznej

$$X_{c5} = \frac{1}{2\pi 5 f_n C_t}$$

Siódmą harmoniczną napięcia przedstawia zależność:

$$I_{7h} = u_{7h} \frac{U_f}{X_{c7}}$$

gdzie u_{7h} jest dopuszczalną wartością siódmej harmonicznej napięcia , natomiast X_{c7} jest reaktancją kondensatora dla siódmej harmonicznej:

$$X_{c7} = \frac{1}{2\pi 7 f_n C_t}$$

Dla dziewiątej harmonicznej napięcia otrzymuje się wzór:

$$I_{9h} = u_{9h} \frac{U_f}{X_{c9}}$$

gdzie u_{9h} jest dopuszczalną wartością dziewiątej harmonicznej napięcia, natomiast X_{c9} jest reaktancją kondensatora dla dziewiątej harmonicznej:

$$X_{c9} = \frac{1}{2\pi 9 f_n C_t}$$

Jedenastą harmoniczną napięcia opisuje związek:

$$I_{11h} = u_{11h} \frac{U_f}{X_{c11}}$$

gdzie u_{11h} jest dopuszczalną wartością jedenastej harmonicznej napięcia, natomiast X_{c11} jest reaktancją kondensatora dla jedenastej harmonicznej:

$$X_{c11} = \frac{1}{2\pi 11 f_n C_t}$$

Dla trzynastej harmonicznej napięcia otrzymuje się:

$$I_{13} = u_{13h} \frac{U_f}{X_{13}}$$

gdzie u_{13h} jest dopuszczalną wartością trzynastej harmonicznej napięcia, natomiast X_{c13} jest reaktancją kondensatora dla trzynastej harmonicznej:

$$X_{c13} = \frac{1}{2\pi 13 f_n C_t}$$

Dla piętnastej harmonicznej napięcia otrzymuje się wzór:

$$I_{15} = u_{15h} \frac{U_f}{X_{15}}$$

gdzie u_{15h} jest dopuszczalną wartością piętnastej harmonicznej napięcia, natomiast X_{c15} jest reaktancją kondensatora dla piętnastej harmonicznej

$$X_{c15} = \frac{1}{2\pi 15 f_n C_t}$$

Dla siedemnastej harmonicznej napięcia otrzymuje się odpowiednio:

$$I_{17} = u_{17h} \frac{U_f}{X_{17}}$$

gdzie u_{17h} jest dopuszczalną wartością siedemnastej harmonicznej napięcia, natomiast X_{c17} jest reaktancją kondensatora dla siedemnastej harmonicznej:

$$X_{c17} = \frac{1}{2\pi 17 f_n C_t}$$

Poniżej zestawiono, dla zilustrowania zjawiska, wartości poszczególnych reaktancji oraz dopuszczalnych wartości napięć harmonicznych dla klasy trzeciej i odpowiadające im natężenia prądów poszczególnych harmonicznych;

$X_{h1} = 6.464$ $X_{h3} = 2.155$ $X_{h5} = 1.293$ $X_{h7} = 0.923$

$X_{h9} = 0.718$ $X_{h11} = 0.588$ $X_{h13} = 0.497$ $X_{h15} = 0.431$

$X_{h17} = 0.38$

$I_{h1} = 35.725$ $I_{h3} = 6.43$ $I_{h5} = 14.29$ $I_{h7} = 17.505$

$I_{h9} = 4.466$ $I_{h11} = 19.649$ $I_{h13} = 20.899$

$I_{h15} = 10.717$ $I_{h17} = 24.293$

Harmonicznych trzeciej i dziewiątej prądu nie uwzględnia się w obwodach trójfazowych bez przewodu neutralnego, w których te harmoniczne nie mogą płynąć.

3. PRZYKŁAD LICZBOWY

Wyniki obliczeń przedstawiono dla silnika indukcyjnego o mocy znamionowej 10 kW. Przy uwzględnieniu sprawności i znamionowego współczynnika mocy silnik ten pobiera z sieci moc 14.7 kW. Aby skompensować moc bierną pobieraną przez silnik zastosowano kondensator o pojemności 4924 mF. Dla tej pojemności moc bierna kompensująca kondensatora wynosi 8.234 kVAr. Znamionowy prąd baterii kondensatorów $I_{nk} = 35.7$ A.

Dla tego prądu obliczono prądy zastępcze uwzględniające harmoniczne w napięciu. Wzięto pod uwagę dopuszczalne wartości harmonicznych w napięciu, podane w tab. 1, dla klas pierwszej i trzeciej. Prąd zastępczy płynący do kondensatora dla klasy pierwszej harmonicznych napięcia wynosi 46.02 A. Stosunek tego prądu do prądu znamionowego kondensatora wynosi 1.288.

Dla klasy trzeciej harmonicznych napięcia obliczony prąd zastępczy wynosi 58.1 A. Stosunek tego prądu do prądu znamionowego kondensatora wynosi 1.626.

4. WNIOSKI

Łatwo zauważyć, że w obwodzie dla klasy 1 harmonicznych w napięciu natężenie prądu nie przekracza krotności prądu 1.3 dlatego wystarczy zastosowanie kondensatora o dopuszczalnym prądzie 1.3. W obwodzie klasy 3 natężenie prądu wynosi ponad 1.5 i dlatego należy zastosować dławiki. Straty mocy w przewodzie zasilającym rozpatrywany obwód, spowodowane harmonicznymi w napięciu sieci dla klasy pierwszej wzrosły 1.77 krotnie. Straty mocy w przewodzie zasilającym rozpatrywany obwód, spowodowane harmonicznymi w napięciu sieci dla klasy trzeciej wzrosły 2.22 krotnie.

LITERATURA

[1] PN-EN 60034 – 1/2001 Maszyny elektryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry.
[2] Stein Z. Eksploatacja maszyn elektrycznych, WUPP, Poznań, 1991.
[3] Z. Stein, M. Zielińska Zagadnienia kompensacji mocy biernej w sieci niskiego napięcia zakładu przemysłowego odbiornikami niesymetrycznymi Materiały Sympozjum ZKWE 2010.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF VOLTAGE HARMONIC COMPONENTS ON THE POWER LOSS IN LV LINE SUPPLYING AN INDUCTION MOTOR WITH REACTIVE POWER COMPENSATION WITH THE USE OF CAPACITORS

The paper presents the results of calculation and analysis of power loss arising in a segment of an LV electric power line supplying a high-power induction motor, the reactive power of which is compensated with the use of capacitors. The computation was carried out with the use of Mcad software. In case of a network including capacitors consideration of the voltage harmonic components is necessary. The currents forced by these harmonics increase the power loss. The paper is devoted to analysis of the value of these losses. The analysis has been carried out for three classes of electric power networks, according to allowable THD values.