

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

ANALIZA WPŁYWU NIESYMETRII NAPIĘCIA SIECI NA OBCIĄŻALNOŚĆ TRÓJFAZOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

W referacie przedstawiono, przy wykorzystaniu programu Mcad, wyniki analizy wpływu niesymetrii napięcia sieci elektroenergetycznej na obciążalność trójfazowych silników indukcyjnych. Przedstawiono charakterystyki momentu elektromagnetycznego dla składowych symetrycznych – zgodnej i przeciwnej. Przeprowadzono analizę uzyskanych wyników.

SŁOWA KLUCZOWE: maszyny elektryczne, maszyna indukcyjna

1. WPROWADZENIE

Właściwości eksploatacyjne silników indukcyjnych zależą, w dużym stopniu, od wartości napięcia na wejściowych zaciskach silnika. Ta właściwość silnika będąca, w pewnym sensie jego wadą, wynika z tego, że moment elektromagnetyczny silnika jest zależny od kwadratu napięcia. W warunkach eksploatacyjnych silników indukcyjnych napięcia sieci nie zawsze są znamionowe, a najczęściej są niższe od wartości znamionowych. Równocześnie trzeba mieć na uwadze, że w sieci występują również niesymetryczne obciążenia, które wymuszają niesymetrie napięć powodujące w konsekwencji obniżenie efektywności silników indukcyjnych. W wielu przypadkach eksploatacyjnych, co prawda obecnie coraz rzadziej ze względu na rozpowszechnione stosowanie złożonych układów energoelektronicznych, użytkowane są różnego rodzaju niesymetrie napięć, w tym specjalne połączenia uzwojeń, wprowadzane w celu uzyskania określonych celów użytkowych silników. Przy stosowaniu różnorodnych nietypowych układów połączeń trójfazowych silników indukcyjnych, niezbędne jest porównywanie ich warunków użytkowania ze standardowymi, obowiązującymi dla silników przeznaczonych dla powszechnego wykorzystania. Warunkiem podstawowym

* Politechnika Poznańska.

użytkowania wszystkich typów silników jest takie ich obciążanie, by nie została przekroczona temperatura dopuszczalna dla danej klasy izolacji. Parametrem decydującym jest zwykle nie przekraczanie znamionowej wartości prądów uzwojeń. Przy wielu układach nietypowych połączeń uzwojeń silników należy się liczyć z koniecznością ograniczania znamionowego ich obciążenia.

2. UNORMOWANIA PRAWNE

Twórcy przepisów i norm zwykle sugerują takie warunki pracy silników, by nie dopuszczać do ich termicznego przeciążenia. Ograniczeniem podstawowym i decydującym jest zwykle pomiar natężenia prądów. Działając profilaktycznie obowiązujące przepisy ograniczają dopuszczalne odchyłki napięcia sieci do wartości +/- 10%, a równocześnie ograniczają między innymi stopień niesymetrii trójfazowego układu napięć zasilających silniki. Stopień niesymetrii napięć układu trójfazowego jest zdefiniowany przez stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięć do kolejności zgodnej, który nie powinien przekraczać wartości 0,02. Ta z pozoru mała wartość stopnia niesymetrii wymusza jednak pewne wartości niesymetrii napięć. Np. dla 2% stopnia niesymetrii napięć wartości napięć mogą się różnić nawet o 3 %. Np. dla sieci o napięciu znamionowym 400 V, przy 2 % stopniu niesymetrii, napięcia mogą przyjmować wartości 400 V, 400 V oraz np 412 V. Przy wartości napięć 400 V, 400 V oraz 440 V współczynnik niesymetrii wzrasta do wartości 0,065, która znacznie przekracza, określoną przez przepisy, wartość dopuszczalną czyli 0,02.

3. OBLICZANIE STOPNIA NIESYMETRII

Stopień niesymetrii napięć można najłatwiej obliczać posługując się wzorem

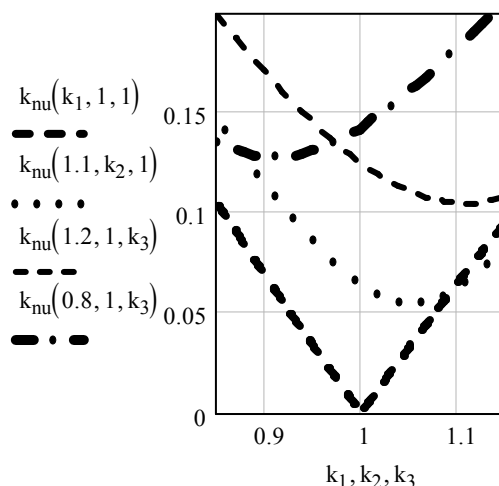
$$k_{nu}(k_1, k_2, k_3) = \sqrt{6 \frac{(U_{uv}^2 k_1^2 + U_{vw}^2 k_2^2 + U_{wu}^2 k_3^2)}{(U_{uv} k_1 + U_{vw} k_2 + U_{wu} k_3)^2} - 2}$$

w którym występują wyłącznie wartości napięć międzyfazowych U_{uv} , U_{vw} , U_w lub wzorem (4), w którym występują specjalne współczynniki k_1 , k_2 , k_3 umożliwiające posługiwanie się względnymi wartościami napięć międzyfazowych, np. 0,98 lub 1,03.

$$k_{nu}(k_1, k_2, k_3) = \sqrt{6 \frac{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}{(k_1 + k_2 + k_3)^2} - 2}$$

Wpływ wartości napięć fazowych na stopień niesymetrii można prześledzić na rysunku 1. Na rysunku krzywa 1 ilustruje wpływ zmiany napięcia fazy pierwszej na współczynnik niesymetrii. Krzywa 2 ilustruje wpływ, na ten sam współczynnik, wartości napięcia fazy drugiej, przy zmienionej wartości napięcia

fazy pierwszej. Podobnie krzywa 3 oraz 4 ilustrują wpływ, na współczynnik niesymetrii wartości napięcia fazy trzeciej, przy zmienionej wartości napięcia fazy pierwszej.



Rys. 1. Ilustracja wpływu niesymetrycznych napięć fazowych na współczynnik niesymetrii napięć

Aby, przy obliczaniu współczynnika niesymetrii posługiwać się wzorami obowiązującymi w metodzie składowych symetrycznych, trzeba wyliczyć wskaźnik niesymetrii ze stosunku napięć składowej symetrycznej kolejności przeciwnej (U_2) do napięcia składowej zgodnej (U_1). Jest to droga dłuższa i bardziej złożona. Trzeba bowiem obliczyć składową symetryczną kolejności zgodnej

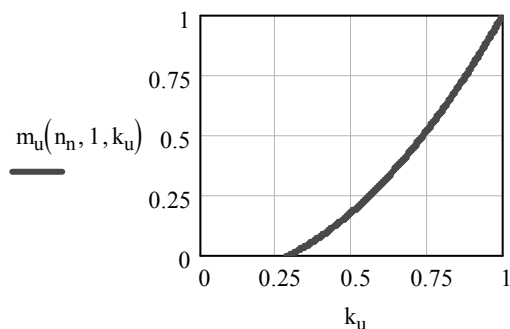
$$U_1 = \frac{U_u + a^2 U_v + a U_w}{3}$$

oraz składową kolejności przeciwnej

$$U_2 = \frac{U_u + a U_v + a^2 U_w}{3}$$

a następnie obliczyć stosunek tych składowych, U_2/U_1 czyli współczynnik niesymetrii napięć. Widać więc, że posługiwanie się wzorem (4) jest dużo prostsze.

Momenty elektromagnetyczne silników indukcyjnych można obliczać różnymi metodami, posługując się odpowiednimi. Na rys. 2 pokazano wpływ współczynnika niesymetrii na moment elektromagnetyczny silnika, przy stałej wartości prędkości obrotowej oraz częstotliwości.



Rys. 2. Wpływ współczynnika niesymetrii na moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego

Moment silnika indukcyjnego, przy niesymetrii napięć zasilających, można np. zapisać posługując się wzorem

$$M = M_1 - M_2$$

$$M_1 = M_{\max} \frac{2\left(\frac{U_1}{U_n}\right)^2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad M_2 = M_{\max} \frac{2\left(\frac{U_2}{U_n}\right)^2}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2 \cdot (-s)}}$$

w którym: M_{\max} – Moment maksymalny, M_1 - moment składowy kolejności zgodnej, M_2 - moment składowy kolejności przeciwnej, s – poślizg silnika przy danym obciążeniu, s_k – poślizg krytyczny, s_n – poślizg znamionowy.

Jeśli dla przykładu wziąć pod uwagę wartości napięć międzyprzewodowych 390 V, 340 V oraz 355 V, dla których współczynnik niesymetrii napięć $k_{nu} = 0,082$, otrzymuje się, że napięcie składowej zgodnej wynosi 361 V natomiast napięcie składowej przeciwnej 30 V.

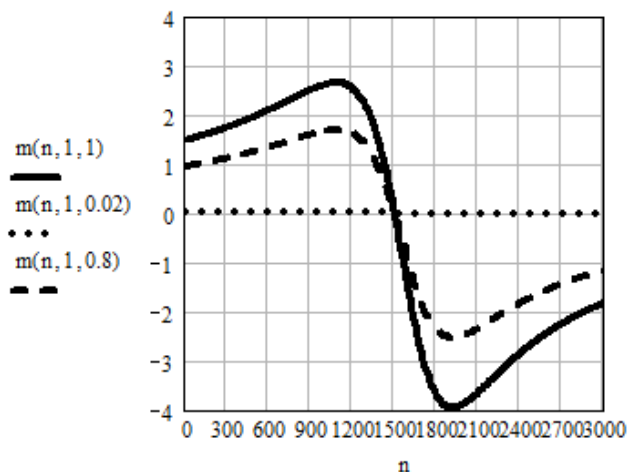
W przypadku silnika o mocy 3,2 kW moment znamionowy wynosi 21,5 Nm, moment maksymalny wynosi 57 Nm, poślizg krytyczny = 0,3, natomiast poślizg nominalny 0,06. Przy znamionowym poślizgu $s = s_n = 0,06$, moment składowy kolejności zgodnej $M_1 = 19,86$ Nm natomiast moment składowy kolejności przeciwnej $M_2 = 0,107$. Przy momencie całkowitym $19,86 - 0,107 = 19,76$ moment kolejności przeciwnej stanowi tylko 0.5 %. Widać więc, że na skutek niesymetrii napięć zmalała wartość składowej symetrycznej kolejności zgodnej napięcia i tym samym zmalała wartość składowej kolejności zgodnej momentu, jednak wpływ momentu kolejności przeciwnej jest minimalny.

Dla przykładu pokazano wpływ niesymetrii napięć na moment użyteczny silnika. I tak dla współczynnika niesymetrii 0,96 moment użyteczny silnika maleje do wartości 0,914, przy współczynniku 0,95 moment maleje do wartości

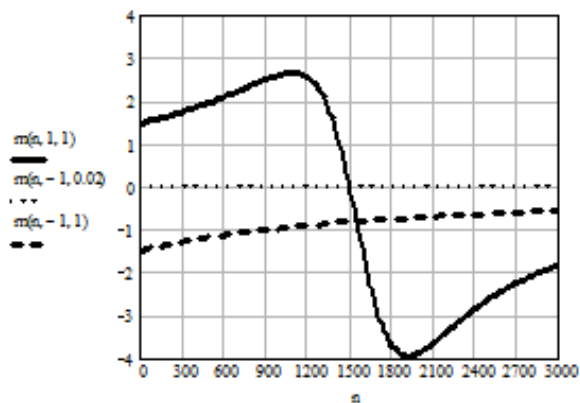
0,893 natomiast przy współczynniku 0,94 moment maleje do wartości 0,873. Wpływ ten widać wyraźnie na charakterystyce pokazanej na rys. 3

Na rys. 3 pokazano wpływ napięć na charakterystyki silników indukcyjnych.

a)



b)



Rys. 3. Ilustracja wpływu niesymetrii napięć na przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika

Niesymetria napięć wpływa na przebiegi charakterystyk momentu silnika. Na rys. 3 widać zmniejszenie się składowych zgodnych momentu na skutek malenia składowej zgodnej napięcia. Wartość momentu składowej przeciwnej jest tak mała, że praktycznie jest niedostrzegalna. Na rys. 3b widać dużą wartość składowej przeciwnej momentu, przy specjalnymysterowaniu silnika.

Skutki niesymetrii napięć są najbardziej widoczne w wartościach prądów uzwojenia stojana. Np. dla silnika 3,2 kW, przypadku niesymetrii napięć fazowych wynoszącej 222 V, 215 V oraz 190 V, napięcia fazowe składowych symetrycznych wynoszą: napięcie składowej kolejności zgodnej 210 V natomiast kolejności przeciwnej 17,3 V. Przy znamionowym poślizgu $s = 0,06$, prąd składowej symetrycznej kolejności zgodnej wynosi 8,1 A a prąd składowej kolejności przeciwnej wynosi 2,76 A. Stopień niesymetrii prądów wynosi 0,34. Przy tej niesymetrii napięć prądy poszczególnych faz są następujące: 10,8 A, 7,6 A oraz 6,7 A. Największy prąd fazowy wynosi 1,26 wartości znamionowej prądu fazowego. W takiej sytuacji uzwojenie tej fazy nagrzewa się z kwadratem wartości prądu czyli o prawie 60 % więcej niż przy prądzie znamionowym.

4. SZCZEGÓLNE PRZYPADKI STANÓW NIESYMETRYCZNYCH

Szczególnym przypadkiem stanu niesymetrycznego jest np. hamowanie jednofazowe. Aby uzyskać w silniku moment hamujący, do obwodu wirnika należy włączyć specjalny rezystor regulacyjny np. dla analizowanego przykładu silnika o mocy 3,2 kW rezystancja ta musi mieć wartość $R_r = 0,588 \text{ oma}$. Przy hamowaniu jednofazowym napięcia składowych symetrycznych kolejności zgodnej i przeciwnej są jednakowe i wynoszą 1/3 napięcia znamionowego. Zaletą hamowania jednofazowego jest to, że po zatrzymaniu silnik nie zacznie wirować w kierunku przeciwnym. Podczas hamowania jednofazowego trzeba zwracać uwagę na nagrzewanie się uzwojenia stojana, bowiem natężenia prądu przekraczają wartość prądu znamionowego.

Podczas hamowania z odwróconą fazą, w silniku zawsze występuje moment hamujący, niezależnie od rezystancji obwodu wirnika. Jednak moment hamujący jest większy, gdy rezystancja obwodu wirnika jest większa.

Szczególnym przypadkiem niesymetrii zasilania, jest praca silnika z trójfazowym uzwojeniem stojana i włączonym jednym kondensatorem, przy zasilaniu obwodu napięciem jednofazowym.

WNIOSKI

Podczas eksploatacji trójfazowych silników indukcyjnych stany niesymetryczne występują dość często. Jednym z powodów jest niesymetria napięć w sieci elektroenergetycznej. Mogą występować stany niesymetryczne wymuszone specjalnie, np. w przypadkach hamowania silników. Stany niesymetryczne często występują podczas zasilania silników z układów przekształtnikowych.

LITERATURA

- [1] Półrolniczak W. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny. Poznań, 2010.
- [2] Stein Z. Zagadnienia stanów niesymetrycznych trójfazowych maszyn indukcyjnych. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Poznańskiej. Seria Rozprawy, nr 79. Poznań 1976.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MAINS VOLTAGE ASYMMETRY ON LOAD CAPACITY OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

The paper presents the results of analysis of the effect of mains voltage asymmetry on load capacity of three-phase induction motors. The computation has been carried out with the use of the Mcad software. The characteristics of electromagnetic moment of the symmetric positive and negative sequence components are presented. The results obtained have been subject to analysis.