УДК 621.314

А.О. Отрошко
С.М. Ковбаса

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ МЕРТВОГО ЧАСУ В ІНВЕРТОРАХ НАПРУГИ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація

Представлено спосіб моделювання впливу мертвого часу в інверторах напруги на процеси керування асинхронним двигуном, який базується на даних про полярність вихідного струму. Представлене рішення дозволяє коректно оцінити вплив не тільки мертвого часу, а і інших нелінійностей викликаних неідеальними характеристиками ключів інвертора. Спосіб реалізовано у пакеті математичного моделювання Matlab Simulink.

Ключові слова: мертвий час, автономний інвертор напруги, перетворювач частоти.

Abstract

The method for dead-time effect impact on induction motor control modelling in voltage-source inverters is presented. Method is based on current polarity detection and allows to evaluate correctly not only influence of dead time but also other nonlinearities which are caused by non-ideal parameters of inverter switches. The method is implemented in Matlab Simulink.

Keywords: dead-time, voltage source inverter, frequency converter.

Вступ

Для формування напруги живлення електричних двигунів в електромеханічних системах широко застосовуються автономні інвертори напруги з електронними напівпровідниковими ключами. Внаслідок неідеальностей реальних напівпровідникових ключів, таких як кінцевий час відкривання-закривання, наявність падіння напруги на відкритому ключі та зворотному діоді, реальна напруга, яка прикладається до навантаження відрізняється від заданої. Найбільш значним із збурюючих факторів є мертвий час інвертора, який вводиться між імпульсами керування ключами для запобігання короткого замикання у стійці інвертора. Такі зміни в керуючому сигналі призводять до зменшення амплітуди вихідної напруги та погіршення її гармонічного складу. В разі якщо інвертор застосовується у складі електромеханічних систем з двигунами змінного струму, це призводять до погіршення показників якості керування та значних пульсацій моменту двигуна. Для дослідження процесів перетворення енергії в електромеханічних системах з врахуванням мертвого часу, а також для розробки та налаштування методів компенсації мертвого часу необхідно мати модель інвертора, що відтворює негативний вплив цього явища.

Метою роботи є розробка моделюючої програми для дослідження процесів перетворення електричної енергії в автономних інверторах напруги з урахуванням явища мертвого часу.

Результати дослідження

За основу даного способу моделювання, було взято дані про аналіз негативного впливу мертвого часу зі статті [1]. Як відомо, на тривалість імпульсу керування впливає крім безпосередньо мертвого часу T_d, затримки увімкнення T_{on} та вимкнення ключа T_{off}. Тобто похибка тривалості імпульсу запишеться як:

$$M = T_{off} - T_{on} - T_d \tag{1}$$

Відповідно, тривалість імпульсу керування можна виразити наступним чином:

$$T_k = T_k^* + sign(i_k) \cdot M \tag{2}$$

де T_k - дійсна тривалість імпульсу керування для *k*-ї фази, T_k^* - задана тривалість, i_k - - значення струму *k*-ї фази, $k \in \{a,b,c\}$.

Додатково до зміни тривалості імпульсу, на вихідну напругу інвертора впливають падіння напруги на ключі V_{ce} та зворотному діоді V_d. Аналізуючи негативний вплив падінь напруги, дійсне значення вихідної напруги *k*-ї фази може бути записане у формі:

$$V_k = (2V_{DC} - V_{ce} + V_d)\left(\frac{T_k}{T_s} - \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2}sign(i_k)(V_{ce} + V_d) \tag{3}$$

де V_k - напруга *k*-ї фази, V_{DC} - напруга ланки постійного струму, T_s - період ШІМ.

Напруга у фазі інвертора може бути розрахована як сума напруги у фазному проводі та напруги зміщення нейтралі:

$$V_k = V_{ks} + V_n \tag{4}$$

де V_{ks} - напруга у фазному проводі *k*-ї фази, V_n - напруга зміщення нейтралі.

Приймаючи, що двигун змінного струму є навантаження симетричне і нейтральний провід у системі відсутній, можна записати вирази (5):

$$\begin{aligned} \sum V_{ks} &= 0; \\ \sum i_k &= 0. \end{aligned} \tag{5}$$

З виразів (3)-(5) отримаємо значення напруги зміщення нейтралі (6):

$$V_n = \frac{1}{3}\sum V_k = \frac{1}{3}(2V_{DC} - V_{ce} + V_d)\left(\frac{\sum T_k}{T_s} - \frac{3}{2}\right) - \frac{1}{6}(V_{ce0} + V_{d0}) \cdot \sum sign(i_k) \tag{6}$$

Поєднуючи вирази (1)-(6), вираз для напруги фази А набуде вигляду (7):

$$V_a = V_a^* + V_a^{'} = \frac{1}{3}V_{DC}\frac{2T_a^* - T_b^* - T_c^*}{T_s} + V^{'}(2sign(i_a) - sign(i_b) - sign(i_c)) \tag{7}$$

Аналогічно запишуться вирази для фаз В та С:

$$V_b = V_b^* + V_b^{'} = \frac{1}{3}V_{DC}\frac{2T_b^* - T_c^* - T_a^*}{T_s} + V^{'}(2sign(i_b) - sign(i_c) - sign(i_a)) \tag{8}$$

$$V_c = V_c^* + V_c^{'} = \frac{1}{3}V_{DC}\frac{2T_c^* - T_b^* - T_a^*}{T_s} + V^{'}(2sign(i_c) - sign(i_b) - sign(i_a)) \tag{9}$$

У виразах (7)-(9) змінна $V^{'}$ дорівнює:

$$V^{'} \approx \frac{1}{6}(2V_{DC}\frac{M}{T_s} - V_{ce} - V_d) \tag{10}$$

Для отримання результатів роботи моделі інвертора, що виражається виразами (7)-(10), було складено модель у пакеті Matlab Simulink. Модель складається з таких блоків: блок формування завдання швидкості обертання ротора та модуля потокозчеплення, блок що реалізує закон частотного керування асинхронним двигуном, блок що відповідає за формування імпульсів векторної ШІМ, модель інвертора з урахуванням ефекту мертвого часу, модель асинхронного двигуна АИР90L4У3 у системі координат статора (a-b). Було проведення тестування вищеописаної моделі за таких умов: завдання кутової швидкості 10 рад/с, завдання потокозчеплення 0.99 Вб, $V_{DC} = 540$ В, $T_s = 0.0002$ *с* що відповідає частоті ШІМ 5кГц, тривалість мертвого часу $T_d = 2.4$ мкс, падіння напруги на ключі та діоді $V_{ce} = V_d = 1$ В. На рис. 1 представлено отримані графіки струму фази А за відсутності мертвого часу та з ним.

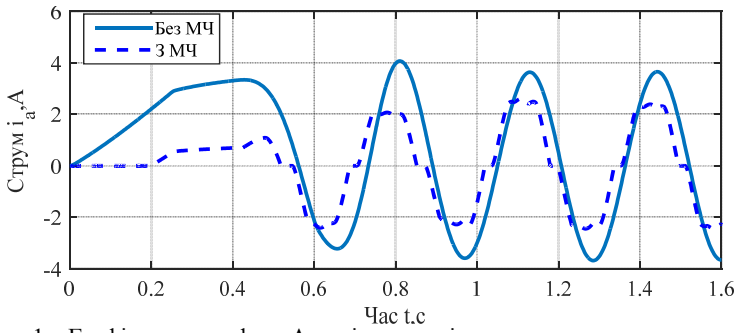

Рисунок 1 – Графіки струму фази А за відсутності мертвого часу та з ним

З рис.1 випливає що уведення мертвого часу зменшує амплітуду струму, а також вводить ділянки з нульовим значенням струму. Отримані результати доводять що негативний вплив мертвого часу моделюється коректно, що підтверджується характером поведінки струмів за результатами експериментальних досліджень [2], [3].

Висновки

Представлено спосіб врахування мертвого часу інвертора напруги при дослідженні електромеханічних систем методом математичного моделювання. Розроблено моделюючу програму, яка дозволяє швидко оцінювати негативний вплив мертвого часу інвертора на процеси керування двигунами змінного струму, а також досліджувати методи компенсації неідеальностей інвертора. Застосування розробленої програми дозволяє підвищити показники якості керування в електромеханічних системах з двигунами змінного струму за рахунок розробки та дослідження алгоритмів компенсації мертвого часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 221-227, March 1996.

2. D. Lee and J. Ahn, "A Simple and Direct Dead-Time Effect Compensation Scheme in PWM-VSI," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 5, pp. 3017-3025, Sept.-Oct. 2014.

3. Jong-Lick Lin, "A new approach of dead-time compensation for PWM voltage inverters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 476-483, April 2002.

Отрошко Андрій Олександрович – студент групи ЕП-81мн, факультет електроенерготехніки та автоматики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, e-mail: andrewotroshko@gmail.com.

Ковбаса Сергій Миколайович – канд. тех. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, e-mail: skovbasa@ukr.net.

Andrii Otroshko – student, Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, e-mail: andrewotroshko@gmail.com.

Sergii Kovbasa – PhD, Assistant professor of Automation of electromechanical and the electrical drives department, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, e-mail: skovbasa@ukr.net.