

Phương pháp điều khiển trực tiếp mô men với quỹ tích từ thông 18 cạnh cho động cơ điện kéo không đồng bộ trên đầu máy

Direct torque control algorithm of asynchronous traction motors on the locomotive with eighteen-corner stator flux locus

Phạm Văn Tiến

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: vantienpham@utc.edu.vn

Mobile: 0978319258

Tóm tắt

Từ khóa:

Đầu máy; Điều khiển trực tiếp mô men; Động cơ điện kéo không đồng bộ; Mô phỏng Quỹ tích từ thông mười tám cạnh;

Bài báo giới thiệu mô hình hệ thống điều khiển trực tiếp mô men (direct torque control, DTC) với quỹ tích từ thông mười tám cạnh cho động cơ điện kéo không đồng bộ trên đầu máy. Ưu điểm của phương pháp điều khiển này là thuật toán đơn giản, ít phụ thuộc vào tham số của động cơ và đặc biệt là tốc độ đáp ứng nhanh. Phân tích lý thuyết và kết quả mô phỏng đã kiểm nghiệm được tính chính xác và hiệu quả của phương pháp điều khiển.

Abstract

Keywords:

Locomotive; Direct torque control; Asynchronous traction motor; Simulation; Eighteen-corner stator flux locus.

This paper proposes a model of DTC system with Eighteen-corner stator flux locus of asynchronous traction motors on locomotives. The advantages of this method are its simplification, fast dynamic response, and low dependence on motor parameters. Its effectiveness and feasibility are demonstrated by both theoretical analysis and experimental results.

Ngày nhận bài: 02/07/2018

Ngày nhận bài sửa: 05/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Do những ưu điểm nổi trội về mặt kết cấu, về độ tin cậy làm việc, về khả năng đáp ứng được những yêu cầu đòi hỏi nâng cao công suất và tốc độ vận hành của đầu máy, cùng với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, ngày nay động cơ điện kéo không đồng bộ (ĐCĐKKĐB) loại rotor lồng sóc ngày càng được sử dụng rộng rãi trên đầu máy, đặc biệt là ở các nước phát triển như Đức, Pháp, Nhật, Trung Quốc [1, 2, 3]... Hiện tại ở nước ta ĐCĐKKĐB đã được sử dụng trên đầu máy D20E nhập từ Đức, và tiến tới là trên các đoàn tàu điện cho giao thông thành phố.

Điều khiển ĐCĐKKĐB trên đầu máy sử dụng ba phương pháp là: điều khiển tần số trượt, điều khiển tựa theo từ thông rotor hay còn gọi là điều khiển vector, và DTC [1, 3, 4]. Trong đó phương pháp DTC có ưu điểm ít chịu ảnh hưởng từ các tham số của động cơ vì dùng tham số phía stator để tính toán từ thông móc vòng và mô men điện từ, mạch điện điều khiển đơn giản,

không yêu cầu biến đổi hệ trục tọa độ phức tạp, đặc biệt là tốc độ đáp ứng nhanh rất phù hợp với yêu cầu sử dụng trên đầu máy [1, 3, 5].

Phương pháp DTC có hai mô hình điều khiển điển hình dựa trên hình dạng của quỹ tích từ thông móc vòng stator là mô hình DTC với quỹ tích từ thông hình tròn (Swiching-Table-Base-DTC, ST-DTC) và mô hình DTC với quỹ tích từ thông hình lục giác (Direct Self Control, DSC) [6], trong đó mô hình trước thường được ứng dụng trong lĩnh vực truyền động điện xoay chiều tốc độ thấp và công suất trung bình nhỏ, mô hình sau áp dụng cho trường hợp công suất lớn (như lĩnh vực truyền động điện đầu máy). Nhược điểm chính của DSC là thành phần sóng hài dòng điện nhiều, giải pháp cơ bản để giải quyết vấn đề này là tăng số cạnh của quỹ tích từ thông. Khi tăng số cạnh này lên 18 thì có thể loại bỏ được một số thành phần sóng hài nhất định [7, 8].

Trong bài báo này tác giả trước tiên giới thiệu khái quát về nguyên lý của phương pháp DTC và mô hình hệ thống DTC với quỹ tích từ thông 18 cạnh, trên cơ sở đó ứng dụng phần mềm Matlab/Simulink để tiến hành mô phỏng.

2. NGUYÊN LÝ CƠ BẢN CỦA PHƯƠNG PHÁP DTC

2.1. Phương trình cơ bản của động cơ không đồng bộ ba pha

Trên hệ tọa độ cố định, phương trình véc tơ từ thông stator và mô men điện từ của ĐCĐKKĐB được viết như sau:

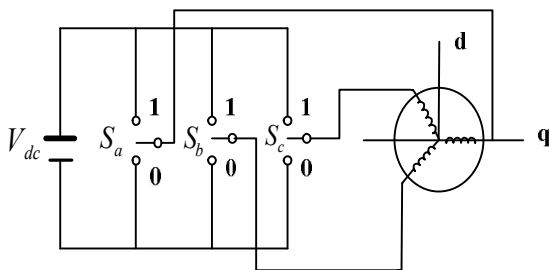
$$V_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$M_e = \frac{1.5p_n}{L_\sigma} |\Psi_s| |\Psi_r| \sin\varphi \quad (2)$$

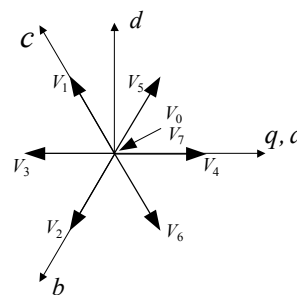
Trong đó: V_s là vector điện áp không gian của stator; i_s là vector dòng điện không gian của stator; Ψ_s , Ψ_r lần lượt là vector từ thông không gian của stator và rotor; L_σ là tổng điện cảm tản của stator và rotor; p_n là số đôi cực; φ là góc kẹp giữa từ thông stator và từ thông rotor, hay chính là góc từ thông.

2.2. Mô hình bộ nghịch lưu và véc tơ không gian điện áp

Sơ đồ nguyên lý mô hình bộ nghịch lưu nguồn áp được mô tả như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nghịch lưu nguồn áp



Hình 2. Phân bố của các vector điện áp

Từ sơ đồ cho thấy, bộ nghịch lưu được tạo thành bởi sáu van, chia làm ba cầu. Khi làm việc, trên mỗi cầu trạng thái của các van trái ngược nhau, do vậy nhiều nhất là có tám tổ hợp

trạng thái được tạo ra, và hoàn toàn được xác định bởi trạng thái của (S_a, S_b, S_c) , dùng 1 biểu thị trạng thái dẫn của van và 0 là trạng thái ngắt của van, như vậy tám tổ hợp trạng thái tương ứng là: $(S_a, S_b, S_c) = (000), (001), (010), (011), (100), (101), (110), (111)$.

Vector tổng hợp điện áp cấp cho động cơ

$$V_s(t) = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j2\pi/3} + u_c e^{-j2\pi/3}) \quad (3)$$

Trong đó, u_a, u_b, u_c lần lượt là điện áp pha của ba pha a, b, c phía stator, và lệch pha nhau 120° .

Tương ứng với tám tổ hợp trạng thái của bộ nghịch lưu, là tám vector không gian điện áp của động cơ: $V_0(000), V_1(001), V_2(010), V_3(011), V_4(100), V_5(101), V_6(110), V_7(111)$. Trong đó, $V_0(000)$ biểu thị ba van trên của ba cầu đều ngắt, $V_7(111)$ biểu thị ba van dưới của ba cầu đều dẫn, khi đó điện áp cấp cho động cơ là bằng không, do vậy gọi hai vector này là vector điện áp không, có vị trí tại gốc tọa độ, các vector còn lại đều có biên độ bằng $2V_{dc}/3$, nằm cách nhau 60° và được gọi là các vector điện áp phi không. Sự phân bố của các vector trong không gian như hình 2.

2.3. Ảnh hưởng của vector không gian điện áp đối với từ thông stator và mô men

2.3.1. Ảnh hưởng của vector không gian điện áp đối với từ thông stator

Từ biểu thức (1), nếu bỏ qua điện áp rơi trên điện trở ta được:

$$\Psi_s = \int V_s dt \quad (4)$$

Biểu thức (4) cho thấy, khi vector tổng hợp điện áp phi không đặt lên động cơ, vector từ thông móc vòng stator di động với tốc độ tỉ lệ thuận với điện áp đặt vào và theo phương của véc tơ điện áp tổng hợp. Lượng biến đổi là $\Delta\Psi_s = V_s \Delta t$; Nếu đặt lên động cơ vector tổng hợp điện áp không $V_0(000)$ hoặc $V_7(111)$, thì vector từ thông stator sẽ đứng im trong không gian. Do vậy, điều khiển thích hợp tám tổ hợp trạng thái của bộ nghịch lưu thì có thể thực hiện được quỹ tích từ thông là đa giác với tốc độ quay nhất định, và khi số cạnh của đa giác là rất lớn thì có thể xem quỹ tích từ thông là hình tròn.

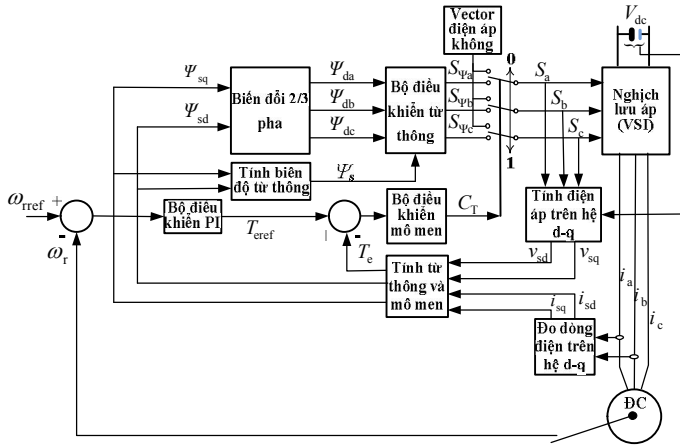
2.3.2 Ảnh hưởng của vector không gian điện áp đối với mô men

Từ biểu thức (2) cho thấy, mô men điện từ của động cơ tỉ lệ thuận với giá trị biên độ của từ thông stator, từ thông rotor và góc từ thông.

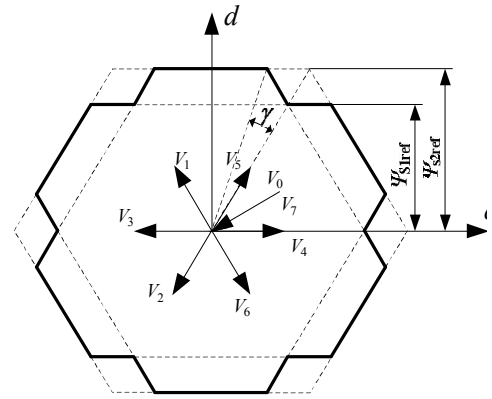
Trong thực tế điều khiển vận hành động cơ điện, do tốc độ đáp ứng điều khiển rất nhanh, vì vậy trong một khoảng thời gian ngắn có thể coi giá trị từ thông stator và từ thông rotor không đổi, khi đó thông qua thay đổi góc từ thông thì có thể nhanh chóng thay đổi được mô men. Trong DTC, ý tưởng điều khiển cơ bản là thông qua vector không gian điện áp để điều khiển tốc độ quay của từ thông móc vòng stator, từ đó thay đổi giá trị góc từ thông, nhằm đạt được mục đích điều khiển mô men điện từ của động cơ.

2.4. Hệ thống DTC với quỹ tích từ thông 18 cạnh

Hình 3 là sơ đồ khối hệ thống điều khiển ĐCĐKKĐB sử dụng phương pháp DTC với quỹ tích từ thông 18 cạnh.



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống DTC với quỹ tích từ thông 18 cạnh



Hình 4. Quỹ tích từ thông 18 cạnh

Trong sơ đồ hệ thống này, quỹ tích từ thông 18 cạnh được thực hiện bởi bộ điều khiển từ thông. Trên cơ sở chiều quay của động cơ, bộ điều khiển từ thông căn cứ vào các giá trị từ thông đặt và từ thông tính toán được sẽ xác định phù hợp thứ tự và thời điểm tác động của từng vector điện áp trong số sáu vector điện áp phi không, từ đó đưa ra quy luật tín hiệu đóng mở các van của nghịch lưu để nhận được quỹ tích từ thông của động cơ điện kéo như hình 4 (đường nét liền đậm).

Trong hình 4, Ψ_{s1ref} và Ψ_{s2ref} lần lượt là các giá trị từ thông đặt ứng với các quỹ tích từ thông lục giác nhỏ phía trong và lớn ở bên ngoài (đường nét đứt mảnh), và $\Psi_{s2ref} = k \Psi_{s1ref}$. Quỹ tích từ thông 18 cạnh được tạo ra trên cơ sở các quy luật điều khiển quỹ tích lục giác trên và góc bé γ . Tùy thuộc vào giá trị của góc bé γ có thể loại bỏ được thành phần sóng hài dòng điện nhất định, bằng quan hệ hình học xây dựng được mối quan hệ giữa k và γ như biểu thức (5).

$$k = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \lambda\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{6} - \gamma\right)} \quad (5)$$

Bộ điều khiển mô men căn cứ vào tín hiệu sai số giữa mô men đo được và mô men đặt để đưa ra tín hiệu lựa chọn chuyển đổi giữa hai vector điện áp không và sáu vector điện áp phi không hình thành lên quỹ tích từ thông 18 cạnh đạt được từ bộ điều khiển từ thông. Trong đó, vector điện áp không dùng để giảm nhỏ mô men và vector điện áp phi không dùng để tăng mô men theo yêu cầu. Quy luật điều khiển mô men được mô tả như bảng 1.

Giả thiết giới hạn cho phép sai lệch giữa mô men đặt và mô men đo được là $2\varepsilon_T$, khi đó sự phối hợp điều khiển từ thông và mô men của động cơ được thực hiện như sau: khi hiệu số giữa mô men đặt và mô men đo được lớn hơn ε_T , tín hiệu điều khiển sẽ không chế nghịch lưu suất ra vector điện áp không, khi đó vector từ thông stator sẽ đứng im trong không gian, trong khi mô men bắt đầu giảm nhỏ; khi sai lệch này nhỏ hơn $-\varepsilon_T$, bộ điều khiển từ thông sẽ điều khiển sự làm việc của nghịch lưu, nghịch lưu sẽ suất ra vector điện áp phi không phù hợp, đảm bảo điểm mút đầu của vector từ thông stator di chuyển theo quỹ tích hình 18 cạnh, đồng thời khi đó mô men cũng tăng lên; khi sai lệch này nằm trong phạm vi cho phép, hệ thống điều khiển duy trì một trong hai trạng thái điều khiển trên.

Bảng 1. Quy luật điều khiển mô men

Hiện trạng mô men	C_T	Tính chất của vector điện áp ra
$T_{e,ref} - T_e \leq \varepsilon_T$	1	Do bộ điều khiển mô men xác định
$T_{e,ref} - T_e \geq -\varepsilon_T$	0	Suất ra vector điện áp không
$-\varepsilon_T \leq T_{e,ref} - T_e \leq \varepsilon_T$	Duy trì	Duy trì trạng thái cũ

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

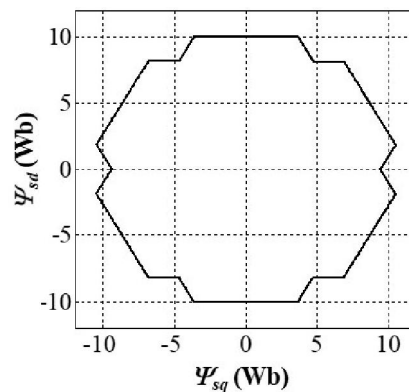
Trên cơ sở sơ đồ khối như hình 3, sử dụng phần mềm Matlab/simulink để tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng. Động cơ điện kéo không đồng bộ được sử dụng để mô phỏng là JD121 với các tham số cụ thể như: công suất định mức $P_N = 1225$ kW, điện áp định mức $U_N = 1895$ V, tốc độ định mức $n_N = 1268$ r/min, điện trở pha stator $R_s = 0,034$ Ω , điện trở rotor $R_r = 0,0309$ Ω , điện cảm pha stator $L_s = 0,929$ mH, điện cảm rotor $L_r = 0,955$ mH, hồ cảm $L_m = 25,832$ mH, số đôi cực $p_n = 2$ và mô men quán tính $J = 80$ kg.m². Tham số dùng mô phỏng như bảng 2.

Bảng 2. Tham số mô phỏng

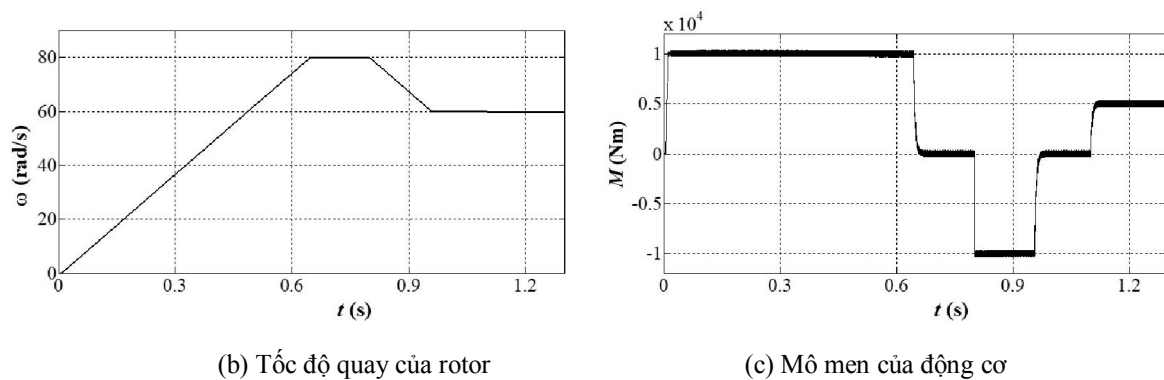
Tham số	Giá trị
Mô men đặt M_{ref}	10000 Nm
Từ thông đặt Ψ_{ref}	10 Wb
Phạm vi dao động của mô men $2\varepsilon_T$	500 Nm
Chu kì lấy mẫu T_s	2e-6 s

Để kiểm nghiệm tính năng của phương pháp điều khiển, đề ra quá trình mô phỏng như sau: tại thời điểm $t = 0$, thiết lập tốc độ đặt cho động cơ $\omega_{ref} = 80$ rad/s, phụ tải $M_t = 0$; tại thời điểm $t = 0,8$ s, thiết lập tốc độ đặt cho động cơ $\omega_{ref} = 60$ rad/s, phụ tải $M_t = 0$; tại thời điểm $t = 1,1$ s, phụ tải $M_t = 5000$ Nm, động cơ mang tải vận hành ở tốc độ ổn định $\omega = 60$ rad/s.

Hình 5(a) hiển thị kết quả mô phỏng quỹ tích từ thông stator tương ứng với góc bề $\gamma = 10^0$. Từ kết quả mô phỏng cho thấy quỹ tích từ thông có dạng đa giác 18 cạnh, vì vậy đáp ứng được yêu cầu luật điều khiển đặt ra.



(a) Quỹ tích từ thông stator



Hình 5. Kết quả mô phỏng

Hình 5(b) và 5(c) hiển thị kết quả mô phỏng mô men và tốc độ quay của động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống đáp ứng rất nhanh với bất cứ sự thay đổi nào của tốc độ và phụ tải, đồng thời quá trình vận hành ổn định cũng nhanh chóng được thiết lập.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, đầu tiên tác giả giới thiệu nguyên lý cơ bản của phương pháp điều khiển trực tiếp mô men, trên cơ sở đó đi giới thiệu mô hình hệ thống DTC với quỹ tích từ thông 18 cạnh. Ưu điểm của phương pháp điều khiển này là kết cấu điều khiển đơn giản, dễ thực hiện, ít chịu phụ thuộc vào tham số của động cơ (chỉ cần tham số điện trở stator, tuy nhiên khi động cơ vận hành ở tốc độ trung bình cao, do điện áp đã lớn nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của thông số này tới kết quả tính từ thông), đặc biệt là tốc độ đáp ứng rất nhanh.

Sau đó tác giả đã sử dụng phần mềm Matlab/simulink tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống DTC với quỹ tích từ thông 18 cạnh. Đây là một phần mềm rất mạnh và được sử dụng phổ biến trong việc mô phỏng và tính toán các hệ thống điện và hệ thống truyền động điện. Kết quả mô phỏng đã kiểm nghiệm tính khả thi và tính chính xác của phương pháp điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. 冯晓云, 2009. 电力牵引交流传动及其控制系统. 北京, 高等教育出版社.
- [2]. 连级三, 2000. 电传动机车概论. 成都, 西南交通大学出版社.
- [3]. 宋文胜, 冯晓云, 2014. 电力牵引交流传动控制与调制技术. 北京, 科学出版社.
- [4]. 周明磊, 2013. 电力机车牵引电机在全速度范围的控制策略研究. 北京交通大学.
- [5]. 李岚, 1994. 异步电机直接转矩控制. 北京, 机械工业出版社.
- [6]. Buja, G. S. and Kazmierkowski, M. P., 2004, Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(4), 744-757.
- [7]. Steimel, A., 2004. Direct self control and synchronous pulse techniques for high-power traction inverters in comparison. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(4): 810-820.
- [8]. Liao Yongheng, Feng Xiaoyun, Wang Zhen, 2012. Research on Harmonic Elimination in Low Switching Frequency Based on Direct Self Control. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 27(8): 126-132.