

## Điều khiển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu chìm (IPMSM) cho ô tô điện

### *Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles*

Nguyễn Bảo Huy, Nguyễn Dũng, Đỗ Văn Hân, Tạ Cao Minh  
Trung tâm Nghiên cứu Ứng dụng và Sáng tạo Công nghệ, ĐH Bách Khoa Hà Nội  
e-Mail: [huy.nguyenbao@hust.edu.vn](mailto:huy.nguyenbao@hust.edu.vn), [nguyenzung92@gmail.com](mailto:nguyenzung92@gmail.com),  
[dovanhan.tdh4@gmail.com](mailto:dovanhan.tdh4@gmail.com), [minh.tacao@hust.edu.vn](mailto:minh.tacao@hust.edu.vn)

#### Tóm tắt

Thiết kế hệ truyền động điều khiển động cơ nam châm vĩnh cửu chìm (IPM) cho ô tô điện (EV) có những đặc thù riêng. Trong bài báo, bên cạnh phương pháp điều khiển vector cho hệ truyền động, nhóm tác giả sẽ trình bày các giải pháp nâng cao chất lượng trong điều khiển dòng điện (một yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến đáp ứng mômen) sử dụng các kỹ thuật bù deadtime, cực đại mômen trên dòng điện (MTPA) và quan sát nhiễu (DOB). Hiệu quả của các chiến lược này sẽ được thể hiện qua các mô phỏng và kết quả thực nghiệm trên hệ thống ô tô điện i-MiEV tại CTI.

**Từ khóa:** Điều khiển động cơ, IPM, ô tô điện, deadtime, MTPA, DOB.

#### Abstract:

Design of interior permanent magnet (IPM) motor drive for electric vehicles is special. In this paper, the authors developed the solution included deadtime compensation, maximum torque per ampere (MTPA) and disturbance observe (DOB) to improve response of current which directly affects torque ripple. The effectiveness of this strategy is demonstrated by simulation results and experiment in i-MiEV at the Center for Technology and Innovation.

**Keywords:** motor control, IPM, electric vehicles, deadtime, MTPA, DOB.

#### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$P_p$		Số đôi cực
$\Phi$	[Wb]	Từ thông nam châm vĩnh cửu
$R$	[ $\Omega$ ]	Điện trở stator
$V_{dc}$	[V]	Điện áp DC
$\omega_e$	[rad/s]	Tốc độ điện của động cơ
$\omega_r$	[rad/s]	Tốc độ cơ của động cơ
$T$	[Nm]	Mômen điện từ
$T_l$	[Nm]	Mômen tải
$J$	[kg.m <sup>2</sup> ]	Mômen quán tính
*		giá trị đặt, giá trị cần

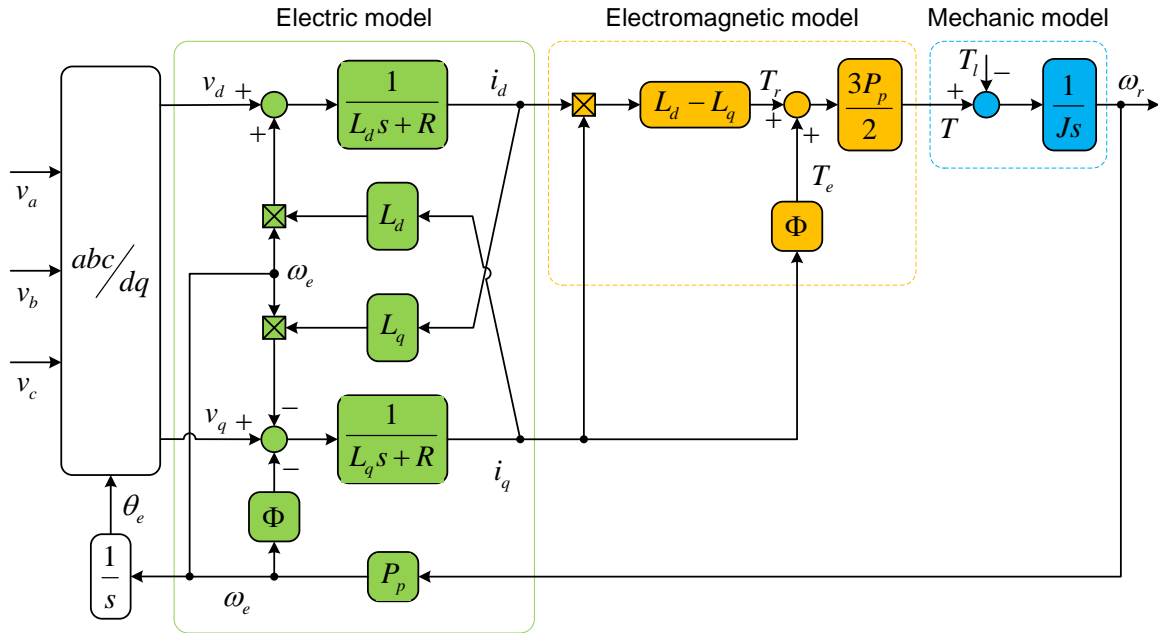
### 1. Phần mở đầu

Thế giới đang đứng trước hai thách thức lớn của phát triển bền vững là ô nhiễm môi trường và sự cạn kiệt

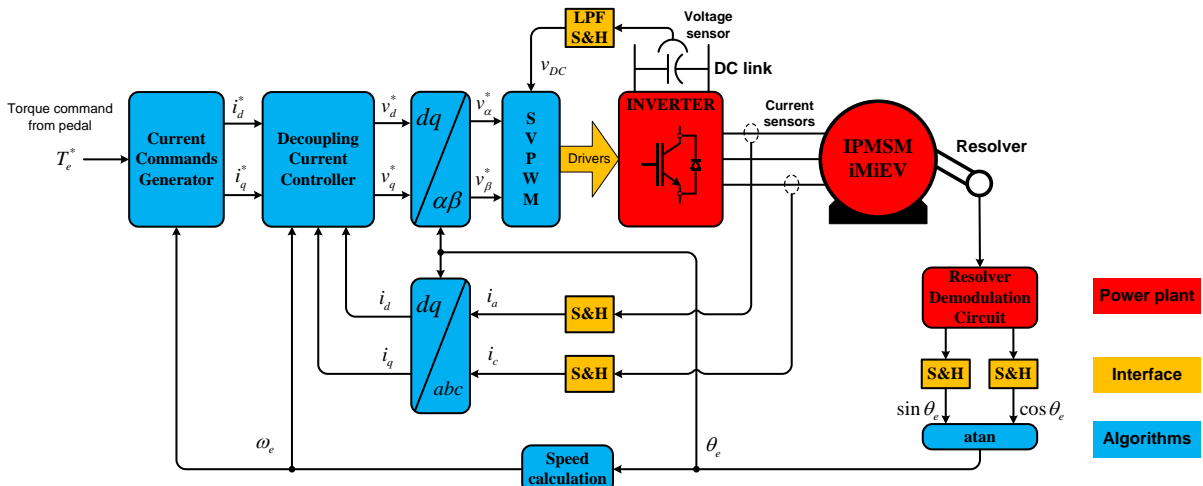
của các nguồn năng lượng hóa thạch (than đá, dầu mỏ, và khí đốt). Ô tô điện (Electric Vehicles – EV) và các phương tiện chạy điện nói chung là một giải pháp hiệu quả cho những vấn đề này. Ô tô điện, do đó, hiện đang là một chủ đề thu hút rất nhiều sự quan tâm của giới nghiên cứu trong các trường đại học cũng như các doanh nghiệp ô tô.

Ô tô điện là một lĩnh vực nghiên cứu đa ngành, có nhiều cách tiếp cận khác nhau theo nhiều “trường phái”. Việc lựa chọn và giới hạn đối tượng nghiên cứu cũng là cả một vấn đề. Nhằm mục đích từng bước làm chủ những công nghệ cốt lõi của ô tô điện, chúng tôi tập trung vào vấn đề thiết kế và chế tạo hệ truyền động và điều khiển cho ô tô điện.

Câu trúc của bài báo như sau. Trong Mục 2, chúng tôi trình bày cấu hình hệ điều khiển vector động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu chìm IPMSM. Đây là loại động cơ có nhiều tính chất ưu việt, đặc biệt phù hợp cho truyền động kéo ô tô điện. Cấu hình hệ điều khiển vector này đóng vai trò là framework để phát triển các thuật toán điều khiển nâng cao nhằm cải tiến chất lượng hệ truyền động. Mục 3 trình bày vấn đề ảnh hưởng của thời gian chết deadtime đến chất lượng hệ điều khiển dòng điện và phương pháp bù nhằm giảm thiểu ảnh hưởng đó. Với vai trò là hệ truyền động kéo cho ô tô điện, vấn đề hiệu suất là rất quan trọng đối với vấn đề điều khiển động cơ. Trong Mục 4, chúng tôi trình bày thuật toán điều khiển cực đại tỷ số mômen trên dòng điện MTPA. Thuật toán này cho phép giảm dòng điện cần thiết để sinh ra một lượng mômen không đổi, qua đó làm tăng hiệu suất hệ truyền động. Trong hệ truyền động điện, mạch vòng điều khiển dòng điện là mạch vòng cơ bản nhất. Khi những yếu tố sai số về đo lường và/hoặc nhận dạng hệ thống khiến cho thông số của mô hình đối tượng thiếu chính xác, hoặc khi những thông số này biến thiên trong quá trình làm việc thì chất lượng điều khiển bị suy giảm. Chúng tôi đề xuất một cấu trúc điều khiển bền vững đơn giản dựa trên cơ sở bộ quan sát nhiễu (Disturbance Observer – DOB) trong Mục 5 của bài báo. Các kết quả mô phỏng được trình bày kèm theo mô tả thuật toán. Trong Mục 6, chúng tôi mô tả hệ thống thực nghiệm trên ô tô điện i-MiEV và kết quả thí nghiệm.



H.1 Mô hình toán học động cơ đồng bộ nam châm chìm IPMSM



H.2 Hệ truyền động điều khiển vector động cơ IPM trong ô tô điện iMiEV.

## 2. Hệ truyền động điều khiển vector động cơ IPM cho EV

### 2.1 Mô hình động cơ IPM

Động cơ IPM là loại động cơ đồng bộ có nam châm vĩnh cửu được gắn chìm trong rotor; điều đó khiến cho loại động cơ này có điện cảm dọc trục và ngang trục khác nhau, cụ thể là  $L_d < L_q$ . Mô hình toán học của động cơ gồm có các phương trình điện, phương trình điện từ, và phương trình động lực học. Mô hình điện của động cơ trong hệ trục tọa độ quay đồng bộ  $d-q$  được cho như sau [7]:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Điện áp trên mỗi trục bao gồm ba thành phần: thành phần động học của bản thân mạch điện ( $R + sL_{d,q}$ ), thành phần tương tác chéo ( $\pm \omega_e L_{d,q}$ ), và sức phản điện động ( $\omega_e \Phi$ ).

Tiếp theo, phương trình điện từ là mối quan hệ sinh mômen của động cơ:

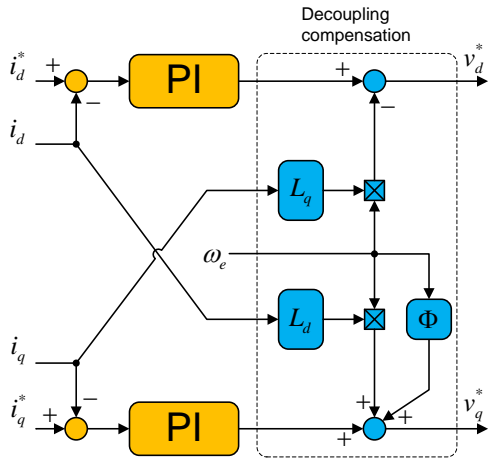
$$T = \frac{3P_p}{2} [\Phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (2)$$

Trong phương trình này, ta thấy rõ mômen điện từ của động cơ gồm hai thành phần là mômen do nam châm sinh ra và mômen từ trở do chênh lệch điện cảm  $L_d$  và  $L_q$ .

Cuối cùng, phương trình động lực học là mối quan hệ giữa mômen điện từ, mômen tải, và tốc độ của động cơ:

$$T - T_l = J \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (3)$$

Sau khi đã có mô hình trên miền  $d-q$ , các khâu chuyển đổi Park và Clarke thuận và ngược giúp cho mô hình động cơ có thể kết nối với hệ thống bên ngoài. Mô hình toàn thể của động cơ được biểu diễn như trên Hình 1.



H.3 Bộ điều khiển tách kênh dòng điện.

## 2.2 Cấu trúc hệ điều khiển vector động cơ IPM

Với những ưu việt về chất lượng động học, cấu trúc điều khiển vector (còn gọi là FOC) đã trở thành phương pháp chuẩn mực được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp [1-3], [8]. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng cấu trúc này như một nền tảng (framework) để triển khai các thuật toán điều khiển nâng cao chất lượng hệ truyền động ô tô điện trong các mục tiếp theo. Cấu trúc hệ điều khiển vector được cho trên Hình 2. Động cơ IPM của ô tô điện được cấp nguồn từ bộ nghịch lưu ba pha nguồn áp. Động cơ có gắn resolver để đưa ra thông tin về vị trí góc  $\theta_e$  của rotor. Hệ thống điều khiển bao gồm các khối chuyển hệ tọa độ, các khâu tính toán và điều khiển.

Khâu tạo giá trị đặt của dòng điện (Current Commands Generator) có đầu vào là lượng đặt mômen lấy từ chân ga điện tử của ô tô, đầu ra là các lượng đặt dòng điện  $i_d^*$  và  $i_q^*$ . Các thuật toán điều khiển MTPA và/hoặc giảm từ thông có thể được triển khai trong khâu này. Với phương pháp điều khiển vector thông thường cho động cơ PMSM nói chung, do động cơ đã có nam châm vĩnh cửu tạo từ thông nên ta thường đặt  $i_q^*$  tỷ lệ với mômen đặt và  $i_d^* = 0$ .

Khối điều khiển tách kênh dòng điện (Decoupling Current Controller) có cấu trúc như trên Hình 3. Như ta thấy trong (1), các thành phần điện áp  $v_d$  và  $v_q$  có sự tương tác xen kênh với nhau. Để có thể điều khiển từng kênh độc lập, bộ điều khiển dòng điện cần có khâu tách kênh (decoupling compensation) để loại bỏ ảnh hưởng của tương tác chéo và sức phản điện động EMF.

## 3. Ảnh hưởng của deadtime và thuật toán bù

### 3.1 Ảnh hưởng của deadtime

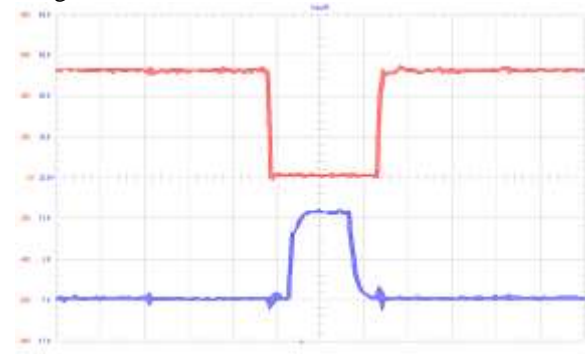
Nghịch lưu nguồn áp có cấu tạo gồm các nhánh van, mỗi nhánh van gồm một van trên (high side) và một van dưới (low side), hai van này thường được điều khiển với hai trạng thái ngược nhau hoặc cùng khóa, không được để hai van cùng mở vì sẽ làm ngắn mạch nguồn áp. Việc chuyển mạch của van là không lý tưởng, các van bán dẫn cần có một thời gian nhất định

để mở hoàn toàn ( $t_{on}$ ) và khóa hoàn toàn ( $t_{off}$ ). Do vậy, để tránh tình trạng van này chưa khóa van kia đã mở, ta cần đảm bảo một khoảng thời gian chết khi chuyển mạch van, gọi là deadtime ( $t_d$ ). Khi một van nhận tín hiệu khóa thì phải sau khoảng thời gian  $t_d$  van kia mới được nhận tín hiệu mở. Hình 4 là hình ảnh thực nghiệm của xung điện áp trên van  $v_{CE}$  và xung điện áp mở van  $v_{GE}$ . Trên hình, ta thấy khoảng thời gian deadtime ( $2\mu s$ ) được thiết lập để đảm bảo quá trình on và off của hai van không gây ra trùng dẫn.

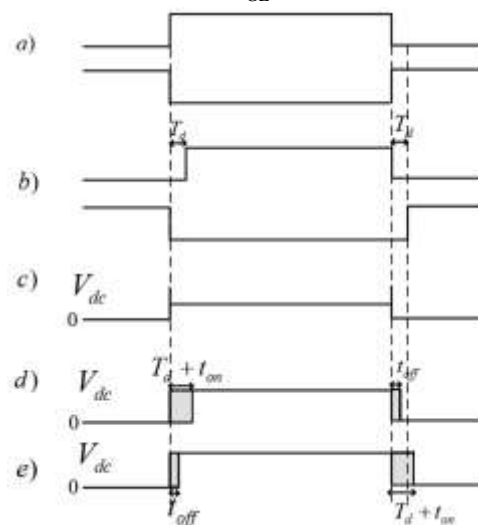
Tuy đảm bảo được sự an toàn cho bộ biến đổi, thời gian deadtime này gây ra những ảnh hưởng đến hệ thống. Cụ thể, nó khiến cho điện áp điều chế sau nghịch lưu có giá trị khác với lượng đặt. Cụ thể, lượng sai lệch điện áp một pha do deadtime gây ra là:

$$\Delta V_{an} = \begin{cases} -\frac{\Delta T}{T_{pwm}} V_{dc} & \text{khi } i_a > 0 \\ +\frac{\Delta T}{T_{pwm}} V_{dc} & \text{khi } i_a < 0 \end{cases} \quad (4)$$

trong đó  $\Delta T = t_d + t_{on} - t_{off}$ . Chi tiết về lượng sụt điện áp trong mỗi chu kỳ chuyển mạch được phân tích trong Hình 5.



H.4 (Thực nghiệm) Dạng sóng điện áp  $v_{CE}$  (trên) và  $v_{GE}$  (dưới).



H.5 Điện áp pha khi tính đến ảnh hưởng của deadtime

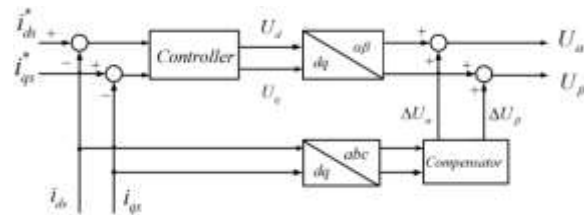
### 3.2 Thuật toán bù ảnh hưởng của deadtime

Ngày nay, bù hiệu ứng deadtime trở thành một bài toán quan trọng trong công nghiệp bởi ảnh hưởng rất lớn của nó đến chất lượng của hệ thống. Nhiều phương pháp bù đã được đề xuất và áp dụng thành công trong các thiết bị điện tử công suất [9-11]. Các phương pháp này phát triển dựa trên lý thuyết trung bình bằng cách cộng thêm một lượng điện áp cố định được tính dựa trên tần số PWM và thời gian deadtime, vào điện áp đặt để làm giảm sự ảnh hưởng của hiệu ứng deadtime.

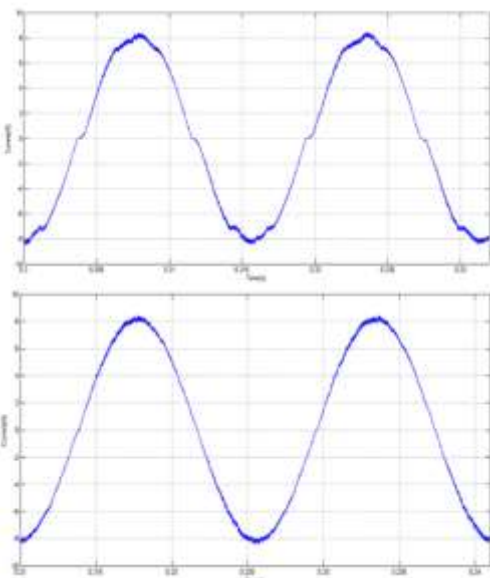
Trong bài báo này, do việc điều biến độ rộng xung được thực hiện bằng phương pháp điều chế vector không gian SVPWM, chúng tôi thực hiện việc bù điện áp trên miền  $\alpha - \beta$  như sau:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_\alpha \\ \Delta v_\beta \end{bmatrix} = -\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \text{sgn}(i_a) & -\frac{1}{2}\text{sgn}(i_b) & -\frac{1}{2}\text{sgn}(i_c) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\text{sgn}(i_b) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\text{sgn}(i_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ T_{pwm} V_{dc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

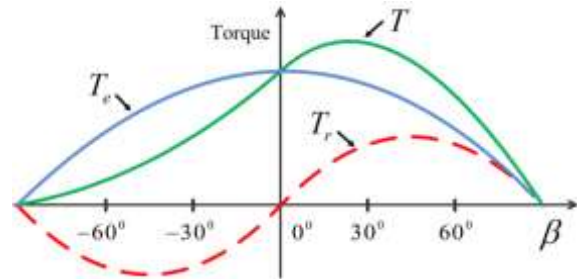
Cấu trúc của bộ bù sai lệch điện áp được thực hiện như trên Hình 6. Hiệu quả của thuật toán trong việc giảm độ méo hài dòng điện được kiểm chứng bằng kết quả mô phỏng trên Hình 7.



H.6 Cấu trúc bộ điều khiển dòng có thuật toán bù ảnh hưởng của deadtime



H.7 (Mô phỏng) Dạng sóng dòng điện trước (trên) và sau (dưới) khi thực hiện bù ảnh hưởng của deadtime



H.8 Khả năng sinh mô men của động cơ IPM

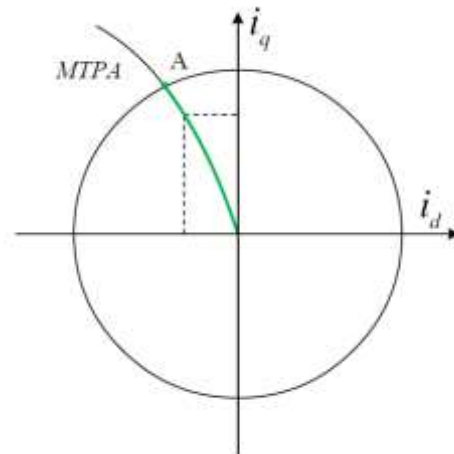
### 4. Thuật toán MTPA

Một đặc điểm nổi bật của động cơ IPM là khả năng sinh một lượng mômen từ trễ  $T_r$  (phương trình (2)). Tuy nhiên, Hình 8 chỉ ra rằng với cùng giá trị  $I_s$ , lượng mômen từ trễ đó sẽ thay đổi phụ thuộc góc pha dòng điện  $\beta$  (góc giữa vector dòng stator  $I_s$  và trục  $q$ ). Như vậy, đặc điểm này chỉ biến thành lợi điểm trong trường hợp  $\beta$  có giá trị hợp lý, dễ thấy, đây là đại lượng có thể được gián tiếp điều khiển thông qua giá trị  $i_q$  và  $i_d$ .

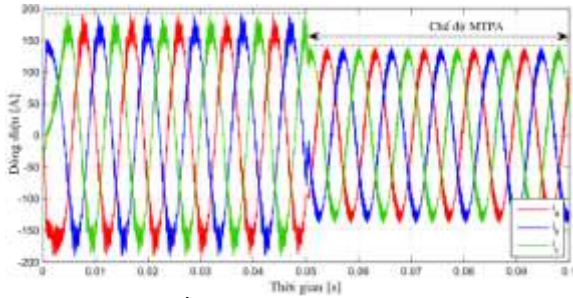
Bằng cách đạo hàm phương trình mômen tổng  $T$  phụ thuộc vào góc  $\beta$ , quỹ đạo các cặp điểm  $(i_d, i_q)$  khiến cho mômen cực đại được thể hiện trên Hình 9 hay qua quan hệ [7]:

$$i_d = \frac{\Phi}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Phi^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (6)$$

Như vậy, để ứng dụng thuật toán MTPA, ta sử dụng phương pháp tra bảng: (1) Lập bảng giá trị quan hệ giữa  $i_d, i_q$  và  $T$  (sử dụng phương trình (2) và (6)); (2) Cài đặt bảng này vào khâu tạo lượng đặt dòng điện. Khi khảo sát kết quả đo thực nghiệm, chúng tôi nhận thấy rằng động cơ trong i-MiEV có khả năng hoạt động ở tốc độ rất cao mà không chạm tới giới hạn điện áp nguồn DC, hay nói cách khác, sẽ không cần thiết phải đi vào vùng giảm từ thông để đạt tốc độ cực đại theo thiết kế của xe. Điều này cũng đồng nghĩa với việc thuật toán MTPA có thể áp dụng trên toàn dải hoạt động của động cơ, rõ ràng, hiệu suất của động cơ được tính toán nâng cao phục vụ điều khiển ngay từ khâu thiết kế.



H.9 Quỹ đạo vector dòng điện đảm bảo tỷ số mômen trên dòng điện đạt cực đại



H. 10 Kết quả mô phỏng thuật toán MTPA

Hình 10 thể hiện kết quả mô phỏng thuật toán MTPA. Có thể thấy rằng, với một lượng mômen sinh ra đảm bảo giữ nguyên, dòng điện ba pha sau khi MTPA được áp dụng đã giảm xuống một lượng đáng kể. Việc nâng cao hiệu suất theo xu hướng này đặc biệt có lợi cho ô tô chạy trong vùng đô thị, nơi mà vấn đề tắc đường khiến ô tô thường xuyên phải nâng cao mômen (dòng điện) để khởi động.

### 5. Cải tiến chất lượng đáp ứng dòng điện sử dụng bộ quan sát nhiễu

Cấu trúc điều khiển PI được sử dụng phổ biến trong công nghiệp bởi tính hiệu quả và bền vững của nó. Tuy nhiên, phương pháp này có những hạn chế mà một trong những vấn đề quan trọng là sự phụ thuộc của nó vào các thông số của mô hình đối tượng. Các thông số này có thể không chính xác do các sai số đo lường, nhận dạng, hoặc thậm chí thông số do nhà sản xuất cung cấp cũng có thể thiếu chính xác. Bên cạnh đó, trong quá trình hoạt động của hệ thống, các thông số này cũng có thể bị thay đổi, ví dụ như điện trở động cơ thay đổi khi nhiệt độ tăng sau một thời gian vận hành.

Có rất nhiều các thuật toán điều khiển bền vững và điều khiển thích nghi đã được nghiên cứu để giải quyết vấn đề trên. Mặc dù các phương pháp đó cho chất lượng rất tốt nhưng việc tính toán và thực hiện thường khá phức tạp. Chúng tôi đề xuất một phương pháp đơn giản nhưng hiệu quả sử dụng bộ quan sát nhiễu để giải quyết vấn đề này.

Ban đầu, kỹ thuật quan sát nhiễu được tạo ra để nâng cao chất lượng hệ thống điều khiển chuyển động, đặc biệt là trong robotics, bằng việc loại bỏ ảnh hưởng của nhiễu tải [4-6]. Tư tưởng của phương pháp được minh họa trong Hình 11 và được mô tả như sau:

Đầu ra  $y$  của hệ được đưa qua mô hình ngược  $P_n^{-1}$  của đối tượng và sau đó được đem so sánh với tín hiệu điều khiển  $u$  để lấy thông tin về nhiễu tải tác động. Tuy nhiên, trong thực tế, ta không thể thực hiện trực tiếp phương pháp này. Nguyên nhân có thể được diễn giải theo hai cách:

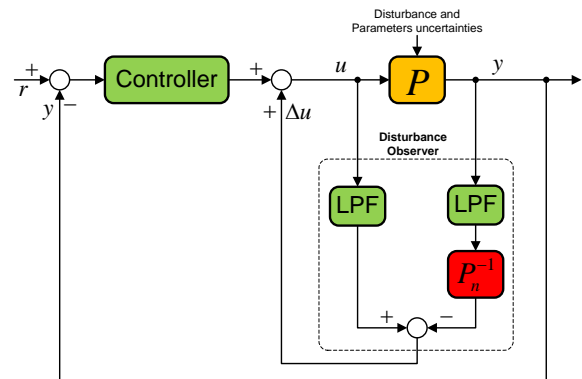
- Trên phương diện lý thuyết điều khiển, mô hình ngược của một đối tượng thực là không nhân quả (non-causal);
- Trên phương diện thực tiễn, một mô hình có chứa những thành phần đạo hàm như vậy sẽ rất nhạy cảm với nhiễu đo.

Để giải quyết vấn đề này, một bộ lọc thông thấp (LPF) được sử dụng. Do bộ lọc thông thấp có đặc tính tự nhiên là gây trễ, ta dùng thêm một bộ lọc nữa ở phía tín hiệu điều khiển  $u$  để cân bằng độ trễ này.

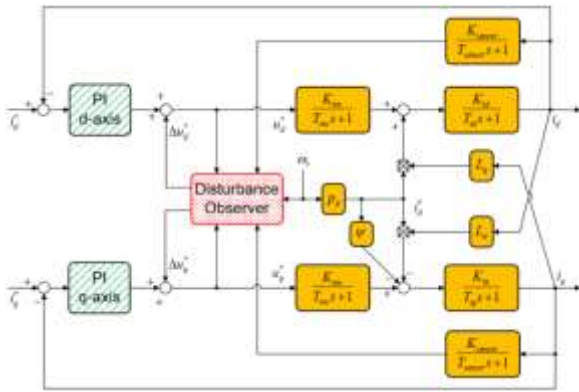
Tác dụng của khâu quan sát nhiễu không chỉ là loại bỏ nhiễu tải mà còn có khả năng giảm thiểu ảnh hưởng của sai lệch thông số mô hình. Do đó, chúng tôi đề xuất cấu trúc sử dụng bộ quan sát nhiễu cho hai vòng điều khiển dòng điện của động cơ IPM như trên Hình 12. Các khối có hàm truyền (màu vàng) là mô hình đối tượng cần điều khiển, bao gồm bộ nghịch lưu, các cảm biến dòng điện, thành phần động học dòng điện của động cơ, các thành phần tương tác chéo và sức phản điện động. Hai khối PI là các bộ điều khiển PI thông thường. Khâu bù tách kênh được đưa vào thực hiện trong khâu quan sát nhiễu.

Khâu quan sát nhiễu có đầu vào là các dòng điện  $i_d$  và  $i_q$ , các lượng đặt điện áp  $v_d^*$  và  $v_q^*$ , và tốc độ rotor để bù tách kênh. Đầu ra của khâu quan sát nhiễu là các lượng điện áp  $\Delta v_d$  và  $\Delta v_q$  để cộng vào lượng đặt  $v_d^*$  và  $v_q^*$ .

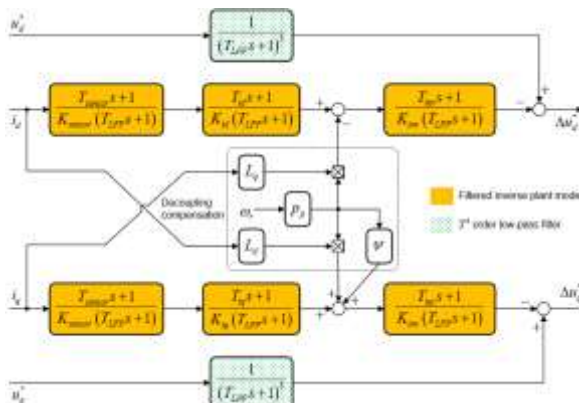
Cấu trúc chi tiết của bộ quan sát nhiễu được cho trong Hình 13. Ở mỗi nhánh  $d$  và  $q$  có ba hàm truyền ngược của bộ nghịch lưu, cảm biến dòng điện, và động học dòng điện. Mỗi hàm truyền đó cần được tích hợp với một bộ lọc thông thấp bậc nhất  $1/(sT_{LPF} + 1)$ . Hằng số thời gian  $T_{LPF}$  của bộ lọc được chọn bằng với chu kỳ trích mẫu  $T_s$  của hệ điều khiển, và do đó cũng bằng chu kỳ điều chế xung  $T_{PWM}$ . Do khâu lọc thông thấp bậc nhất được sử dụng ba lần để cân bằng với mô hình ngược của đối tượng nên một khâu lọc thông thấp bậc ba  $1/(sT_{LPF} + 1)^3$  sẽ được sử dụng để làm trễ tín hiệu điều khiển  $v_d^*$  và  $v_q^*$ . Khâu bù tách kênh vẫn được thực hiện như với bộ điều khiển PI thông thường. Kết quả mô phỏng trên Hình 14 cho thấy rõ tác dụng của bộ quan sát nhiễu. Ở trên là đáp ứng dòng điện  $i_d$  trước (bên trái) và sau (bên phải) khi áp dụng bộ quan sát nhiễu. Tương tự như vậy là đáp ứng dòng điện  $i_q$  ở dưới.



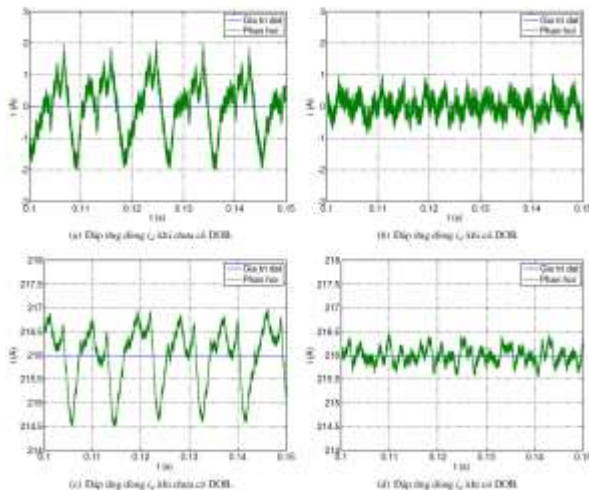
H. 11 Nguyên lý cơ bản của bộ quan sát nhiễu DOB



H. 12 Cấu trúc điều khiển dòng tích hợp bộ quan sát nhiễu



H. 13 Chi tiết khối quan sát nhiễu cho vòng điều khiển dòng điện hai trục d và q



H. 14 (Mô phỏng) Đáp ứng dòng điện  $i_d$  và  $i_q$  trước và sau khi sử dụng bộ quan sát nhiễu

## 6. Thực nghiệm và kết quả

Hệ thống thực nghiệm được triển khai trên ô tô điện iMiEV. Xe được thử nghiệm trong băng thử tải của phòng thí nghiệm như trên Hình 15. Hình ảnh của bộ nghịch lưu ba pha nguồn áp và bộ điều khiển dSPACE 1103 được cho trên Hình 16. Thông số động cơ được đo bằng thực nghiệm và cho trên Bảng 1. Các kết quả được thu thập bằng dSPACE 1103 và xử lý bằng Matlab. Hình 17 là đáp ứng dòng điện trục  $d$

của động cơ. Trong thí nghiệm ở thời điểm này, chúng tôi tạm thời chưa triển khai thuật toán điều khiển MTPA nên lượng đặt dòng điện  $i_d$  bằng không. Hình 18 là đáp ứng dòng điện  $i_q$ . Lượng đặt của dòng điện này tỉ lệ với lượng đặt của chân ga điện tử do người lái điều khiển. Hình 19 là dòng điện pha  $a$  và dòng điện  $i_q$  của động cơ. Ta thấy dòng điện trục  $q$  có giá trị bằng biên độ của dòng điện pha hình sin. Điều này xác nhận sự đúng đắn của việc triển khai phương pháp điều khiển vector. Dòng điện pha bị méo dạng do deadtime và dòng điện  $i_d$  và  $i_q$  còn chứa nhiều nhấp nhô. Sau khi triển khai thực nghiệm các thuật toán bù ảnh hưởng deadtime và bộ quan sát nhiễu thì chất lượng các đáp ứng này sẽ được cải thiện.

Bảng 1 Thông số đo thực nghiệm động cơ IPM trong ô tô điện iMiEV

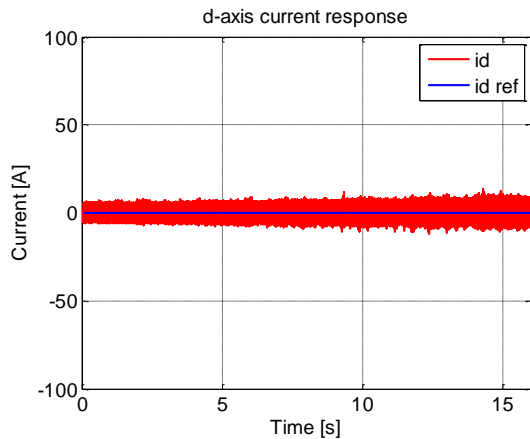
Thông số	Giá trị	Đơn vị
Điện áp DC đầu vào	330	V
Công suất cực đại	47	kW
Điện trở	12	mΩ
Điện cảm trục d	140	μH
Điện cảm trục q	213	μH
Từ thông nam châm vĩnh cửu	0.06	Wb
Số cực	8	



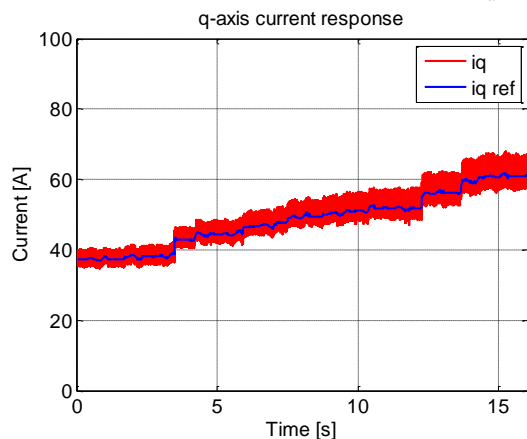
H. 15 Ô tô điện i-MiEV trên hệ thống băng thử tải



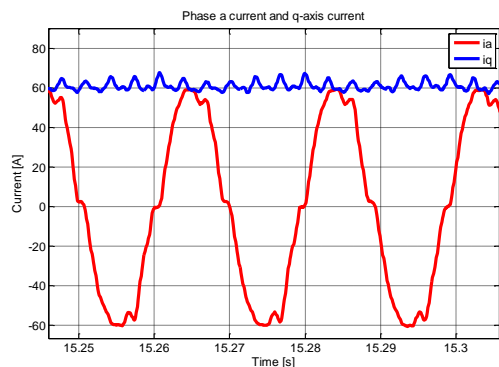
H. 16 Bộ nghịch lưu và bộ điều khiển dSPACE được lắp đặt ở vị trí băng ghế sau của ô tô



H. 17 (Thực nghiệm) Đáp ứng dòng điện  $i_d$



H. 18 (Thực nghiệm) Đáp ứng dòng điện  $i_q$



H. 19 (Thực nghiệm) Dòng điện pha  $a$  và dòng điện  $i_q$

## 7. Kết luận

Điều khiển hệ truyền động cho ô tô điện là một vấn đề thu hút nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Trong bài báo này, chúng tôi đã thiết kế và triển khai các thuật toán cơ bản và nâng cao nhằm mục đích cải thiện chất lượng của hệ truyền động trên nền tảng cấu trúc điều khiển vector cho động cơ IPM. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên ô tô điện iMiEV đã xác nhận tính đúng đắn của hệ thống điều khiển.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài cấp Nhà nước KC.03.08/11-15: “Nghiên cứu thiết kế và chế tạo hệ truyền động và điều khiển cho ô tô điện”. Chúng tôi xin cảm ơn các anh Trần Bình Dương, Nguyễn Văn Đại,

Võ Duy Thành, Bùi Đăng Quang, Đào Triệu Phi Trường, và chị Trần Thị Mai Trang đã giúp đỡ chúng tôi trong quá trình thí nghiệm.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Hyung-Tae Moon, Hyun-Soo Kim, and Myung-Joong Youn, “A Discrete-Time Predictive Current Control for PMSM,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 1, 2003, pp. 464-472.
- [2] HongZhe Jin and JangMyung Lee, “An RMRAC Current Regulator for Permanent-Magnet Synchronous Motor Based on Statistical Model Interpretation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 1, 2009, pp. 169-177.
- [3] Yasser Abdel-Rady Ibrahim Mohamed, “Design and Implementation of a Robust Current-Control Scheme for a PMSM Vector Drive With a Simple Adaptive Disturbance Observer,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, 2007, pp. 1981-1988.
- [4] Kiyoshi Ohishi, Masato Nakao, Kouhei Ohnishi, and Kunio Miyachi, “Microprocessor-Controlled DC Motor for Load-Insensitive Position Servo System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. IE-34, no. 1, 1987, pp. 44-49.
- [5] Satoshi Komada, Muneaki Ishidar, Kouhei Ohnishi, and Takamasa Hori, “Disturbance Observer-based Motion Control of Direct Drive Motors,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 6, no. 3, 1991, pp. 553-559.
- [6] Hideyuki Kobayashi, Seiichiro Katsura, and Kouhei Ohnishi, “An Analysis of Parameter Variations of Disturbance Observer for Motion Control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, 2007, pp. 3413-3421.
- [7] Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, and Yoji Takeda, “Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 4, 1994, pp. 920-926.
- [8] Kwang Hee Nam, *AC Motor Control and Electric Vehicle Applications*, CRC Press, 2010.
- [9] J. W. Choi and S.-K. Sul, “Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, no. 2, pp. 221-277, Mar. 1996.
- [10] D. Leggate and R. J. Kerkman, “Pulse Based Dead Time Compensator for PWM Voltage Inverters,” in *IEEE IECON Conf. Rec.*, 1995, pp. 474-481.
- [11] T. A. Lipo, “On-Line Dead-Time Compensation Technique for Open-Loop PWM-VSI Drives,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 4, pp. 683-689, 1999.



**Nguyễn Bảo Huy** (sinh năm 1988) nhận bằng Kỹ sư năm 2010 và bằng Thạc sĩ Khoa học năm 2015, đều thuộc ngành điều khiển và tự động hóa tại Đại học Bách Khoa Hà Nội, cũng là nơi anh công tác trong vai trò một kỹ sư nghiên cứu.

Hiện nay anh đang là nghiên cứu sinh tiến sĩ tại Đại học Lille 1 (Pháp) và Đại học Sherbrooke (Canada). Lĩnh vực nghiên cứu của anh gồm điện tử công suất, truyền động điện, kỹ thuật điều khiển, và ô tô điện.



**Đỗ Văn Hân** (sinh năm 1992) nhận bằng Kỹ sư năm 2015, thuộc ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa tại Đại học Bách Khoa Hà Nội. Hướng nghiên cứu của anh là điện tử công suất, truyền động điện, và ô tô điện.



**Nguyễn Dũng** sinh năm 1992. Anh nhận bằng Kỹ sư chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa năm 2015 tại Đại học Bách Khoa Hà Nội. Lĩnh vực nghiên cứu chính của anh gồm truyền động điện, kỹ thuật điều khiển, robot, và ô tô điện.



**Tạ Cao Minh** tốt nghiệp đại học tại Tiệp Khắc năm 1986, bảo vệ luận án Tiến sĩ tại Đại học Laval, Canada năm 1997, có 6 năm làm việc trong môi trường đại học và công nghiệp Nhật Bản (1998 - 2004), và có thời gian thỉnh giảng tại Đài Loan (2010), Úc (2012), Pháp (2015). Hiện nay PGS.

Minh công tác tại Bộ môn Tự động hóa Công nghiệp, ĐH Bách Khoa HN, đồng thời giữ vai trò Giám đốc Trung tâm Nghiên cứu Ứng dụng và Sáng tạo Công nghệ của trường. Hướng nghiên cứu của PGS. Minh tập trung vào điều khiển các hệ truyền động điện, điện tử công suất, các ứng dụng cho ô tô điện và năng lượng mới. Là tác giả của 27 bài báo trên các tạp chí, tập san hội nghị quốc tế, và 14 sáng chế đã được ứng dụng tại Nhật Bản, Mỹ, châu Âu, PGS. Minh nhận giải Nhi bài báo xuất sắc của IEEE năm 2000 và giải C sáng chế của NSK (Nhật Bản) năm 2012. PGS. Minh là Chủ tịch Chi hội IEEE Việt Nam từ 2008 đến 2011, và hiện nay là Tổng Thư ký Hội Tự động hóa Việt Nam nhiệm kỳ 2014 – 2019.