

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

PHẠM QUỐC KHANH

**NHẬN DẠNG VÀ ĐIỀU KHIỂN NÂNG CAO
MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU**

Ngành: Kỹ Thuật Điện
Mã số ngành: 62520202

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn 1: GS. TS. HỒ PHẠM HUY ÁNH

Người hướng dẫn 2:

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU

1.1 Đặt vấn đề

1.1.1 Vấn đề điện khí hóa trong giao thông, công nghiệp và dân dụng

Các phương tiện vận tải sử dụng điện là một sự thay thế hợp lý trong lĩnh vực vận tải nhằm giải quyết tình trạng ô nhiễm môi trường và tăng hiệu quả sử dụng năng lượng. Nhiều hãng ô tô truyền thống đã bắt đầu bắt tay vào việc sản xuất các chiếc ô tô điện như là GM, Tesla, Nissan, Toyota, Honda, Benz như được thống kê bởi Tao Deng trong [12].

Một số nghiên cứu về động cơ điện trong các ứng dụng truyền động điện di động [15][16][17] có kết luận rằng thấy rằng các động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM) có công suất lớn, mật độ công suất cao, khả năng điều khiển vận tốc linh hoạt hơn khi so với động cơ không đồng bộ (Alternating Current Induction Motor – ACIM), động cơ từ trở (Switch Reluctance Motors – SRM) và động cơ điện một chiều (Direct Current Motor – DCM). Ngoài ra, xét về mặt vận hành, động cơ PMSM có yêu cầu tri bảo dưỡng ít hơn so với các động cơ ACIM và DCM. Với các ưu điểm này của động cơ PMSM, các hệ thống truyền động điện sử dụng động cơ PMSM được ưu tiên [18].

Ngoài ra, giá thành sản xuất nam châm giảm xuống và công nghệ sản xuất nam châm được nâng cao đã dẫn đến chi phí sản xuất động cơ PMSM cũng được giảm xuống. Giá giảm đã giúp nâng cao tỉ trọng của các hệ thống truyền động PMSM so với các dòng động cơ khác.

1.1.2 Các hạn chế và giải pháp khắc phục cho các bộ truyền động PMSM

1.1.2.1 Bài toán tăng tốc độ PMSM lên trên tốc độ định mức

1.1.2.2 Bài toán điều khiển không cảm biến tốc độ động cơ PMSM

1.1.2.3 Bài toán ước lượng thông số động cơ PMSM

1.2 Phạm vi nghiên cứu

Vấn đề điều khiển toàn diện các bộ truyền động của động cơ PMSM là phức tạp, đòi hỏi cơ sở vật chất về các thiết bị PMSM, vật liệu, thiết bị đo lường, ... Trong đó, cần phải thực hiện các nghiên cứu cải tiến cấu trúc động cơ hiện hữu và nghiên cứu áp dụng vật liệu mới. Ngoài ra, cũng cần phải giải quyết nhiều vấn đề khác như khả năng đồng bộ các khoá bán dẫn, sự trễ trong đáp ứng tín hiệu điều khiển, các nhiễu tham gia vào khâu đo lường hoặc các sự cố trong quá trình thực nghiệm, khả năng đáp ứng xung dòng điện của động cơ, khả năng bảo vệ quá dòng điện cho bán dẫn công suất, sự khác nhau giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm khi nhiệt độ nam châm tăng khi có tải, dẫn đến từ thông thay đổi, ... Do đó, trong luận án sẽ chưa thực hiện đánh giá tính khả thi toàn diện trong quá trình tiến hành thực nghiệm như khả năng đáp ứng xung dòng điện của động cơ, khả năng bảo vệ quá dòng điện cho bán dẫn công suất, hay vấn đề chống nhiễu bên ngoài vào hệ thống truyền động và chống nhiễu trong quá trình đo lường thực tế”.

Do đó, với yêu cầu của một luận án tiến sĩ, Nghiên cứu sinh lựa chọn giải quyết một số vấn đề như sau:

- Nâng cao hiệu quả hoạt động của động cơ PMSM dựa trên việc cải tiến các thuật toán điều khiển tốc độ. Đánh giá hiệu quả các thuật toán điều khiển thông minh trong vấn đề nâng cao chất lượng điều khiển và khả năng áp dụng của các bộ truyền động điện PMSM.
- Phát triển các giải pháp nhận dạng để từng bước nhúng vào hệ thống điều khiển động cơ PMSM.
- Trên cơ sở các nghiên cứu giải pháp tiến tới xây dựng và hoàn thiện hệ thống thực nghiệm trên PMSM

1.3 Mục tiêu nghiên cứu

Qua phân tích chi tiết các vấn đề cần phải giải quyết trong bài toán điều khiển tốc độ động cơ PMSM, luận án nhận thấy mục tiêu cần phải giải quyết đó là mở rộng dải tốc độ hoạt động của động cơ PMSM, áp dụng thuật toán thông minh trong điều khiển tốc độ không cảm biến và nhận dạng thông số động cơ PMSM.

Đối với các hệ thống truyền động tốc độ thay đổi, vấn đề mở rộng dải tốc độ vận hành luôn là một yêu cầu bắt buộc. Bài toán mở rộng dải vận tốc hoạt động của động cơ thay vì các phương pháp thay đổi cấu trúc cơ khí như hộp số, tỉ lệ bánh răng sẽ giúp tận dụng lại các linh kiện này và không tốn thêm chi phí hay thay đổi kết cấu cho bộ truyền động. Điều này là phù hợp với trình độ công nghệ và khả năng kinh tế của nước ta hiện nay. Mục tiêu chính của luận án là làm rõ bản chất, cách thức hoạt động và đề xuất các phương pháp điều khiển mới nhằm nâng cao hơn nữa chất lượng hoạt động của các động cơ PMSM trong vùng FW.

Trong điều khiển tốc độ động cơ PMSM không cảm biến, tốc độ ước lượng bằng thuật toán không đứng yên mà luôn giao động quanh giá trị thực trong trạng thái tĩnh, hoặc không bắt kịp tốc độ thực tế trong quá trình quá độ khi thay đổi điều kiện làm việc. Điều này làm cho chất lượng điều khiển tốc độ giảm xuống. Để nâng cao chất lượng điều khiển tốc độ, luận án đề xuất áp dụng phương pháp điều khiển thông minh vào vấn đề ước lượng tốc độ động cơ.

Thông số động cơ ảnh hưởng rất lớn đến việc xác định các thông số bộ điều khiển và từ đó tác động đến chất lượng điều khiển tốc độ cũng như ảnh hưởng đến độ chính xác của các vận tốc ước lượng bằng thuật toán. Luận văn đề xuất phương pháp xác định thông số động cơ PMSM thông qua các thuật toán tối ưu

1.4 Nội dung nghiên cứu của luận án

Với mục tiêu nghiên cứu được đề xuất và phân tích ở phần trên là mở rộng vận tốc hoạt động và nhận dạng thông số PMSM, luận án đề xuất các mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu như sau:

Về mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu trong mở rộng dải vận tốc PMSM:

- Nâng cao độ ổn định giảm nhấp nhô dòng điện và mô-men trong quá trình chuyển từ vùng vận tốc dưới định mức sang vùng FW. Như phân tích ở phần trên, nguyên lý chuyển đổi vận tốc qua lại giữa vùng mô-men hằng số và công suất hằng số phải đảm bảo việc chuyển đổi được diễn ra đơn giản, chuyển đổi tự động dựa trên các biến điều khiển đo lường được.
- Giảm sự dao động tốc độ động cơ PMSM trong quá trình thay đổi vận tốc rô-to trong vùng trên vận tốc định mức. Tại vùng công suất hằng số,

vận tốc rô-to lớn hơn vận tốc định mức và mô-men điện từ tạo ra thấp đã làm cho việc điều khiển vận tốc gặp nhiều khó khăn khi phải giải quyết đồng thời hai nhiệm vụ là giới hạn dòng điện và giới hạn điện áp.

- Nâng cao độ ổn định giảm nhấp nhô dòng điện và mô-men trong quá trình thay đổi mô-men tải đầu trục khi động cơ hoạt động trong vùng FW. Cần phải có các phương pháp tăng mô-men điện một cách hiệu quả tránh gây mất ổn định bộ điều khiển.

Về mục tiêu nghiên cứu giảm thiểu hiện tượng dao động tốc độ ước lượng trong ước lượng tốc độ động cơ

- Đề xuất ứng dụng tính toán thông minh trong các thuật toán ước lượng tốc độ động cơ. Các thuật toán thông minh có tiềm năng rất lớn trong việc giải các bài toán phức tạp với nhiều đặc tính khác nhau của đối tượng điều khiển phi tuyến.

Về mục tiêu nghiên cứu trong nhận dạng thông số động cơ PMSM:

- Tìm hiểu tổng quan các phương pháp nhận dạng thông số động cơ đã được công bố gần đây. Thông qua các phương pháp nhận dạng này, đề xuất phương pháp nhận dạng thông số động cơ mới có độ chính xác cao hơn.

1.5 Bố cục luận án

Luận án được bố cục thành 5 chương với các chức năng cụ thể như sau:

- Chương 1: Giới thiệu chung.
- Chương 2: Giới thiệu tổng quan về PMSM.
- Chương 3: Bài toán nhận dạng thông số động cơ PMSM.
- Chương 4: Bài toán mở rộng dãy vận tốc hoạt động của PMSM.
- Chương 5: Bài toán điều khiển không cảm biến trong điều khiển tốc độ động cơ PMSM và thực nghiệm điều khiển tốc độ động cơ PMSM.
- Chương 6: Kết luận và kiến nghị.

CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN

2.1 Giới thiệu về động cơ PMSM

2.2 Tổng quan các phương pháp mở rộng dải tốc độ điều khiển của PMSM

2.2.6 Hướng nghiên cứu đề xuất của luận án về mở rộng dải tốc độ PMSM

Để nâng cao hiệu quả hoạt động của động cơ PMSM so với các phương pháp điều khiển đã có, luận án hướng đến giải pháp xây dựng thuật toán điều khiển mới có khả năng loại bỏ sự chuyển vùng khi tốc độ động cơ vượt quá hay giảm xuống dưới tốc độ định mức. Khi loại bỏ triệt để vấn đề chuyển vùng thì hiệu quả điều khiển sẽ tăng lên khi không có sự xáo trộn giữa các bộ điều khiển.

2.3 Điều khiển tốc độ không cảm biến cho động cơ PMSM

2.3.5 Hướng nghiên cứu về điều khiển tốc độ PMSM không cảm biến.

Để nâng cao chất lượng điều khiển không cảm biến luận án đề xuất sử dụng mô hình hình Fuzzy PI để thay thế cho bộ điều khiển PI truyền thống. Các thông số của bộ điều khiển sẽ được thay đổi dựa trên luật hiệu chỉnh mờ Fuzzy cho sai số giữa giá trị đo được bởi động cơ và mô hình toán của động cơ.

2.4 Nhận dạng thông số PMSM

2.4.5 Hướng nghiên cứu về nhận dạng thông số PMSM của luận án

Dựa vào các phân tích về các phương pháp nhận dạng thông số động cơ PMSM, hướng nghiên cứu được đề xuất trong luận án này là sử dụng các thuật toán tối ưu kết hợp với phương pháp bình phương cực tiểu trong nhận dạng thông số động cơ PMSM.

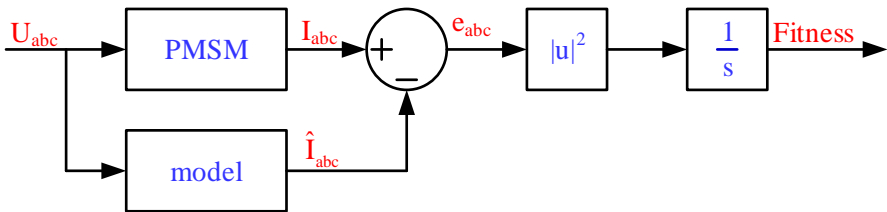
CHƯƠNG 3 NHẬN DẠNG THÔNG SỐ ĐỘNG CƠ PMSM

3.1 Giới thiệu

3.2 Nhận dạng thông số PMSM dựa trên các thuật toán tối ưu

3.2.1 Mô tả phương pháp thực hiện

Nếu hai động cơ PMSM có cùng một bộ thông số ($R_s, L_d, L_q, \lambda_{pm}, J, F, T_L$) thì coi như hai động cơ này giống hệt nhau về mặt điều khiển khi chúng sẽ cho ra cùng một kết quả tốc độ và dòng điện trong quá trình vận hành. Nói cách khác, hai động cơ có cùng bộ thông số ($R_s, L_d, L_q, \lambda_{pm}, J, F, T_L$) này là một.



Hình 3.2 Nguyên lý xác định tổng bình phương sai số dòng điện trong phương pháp nhận dạng thông số PMSM dựa trên các thuật toán tối ưu

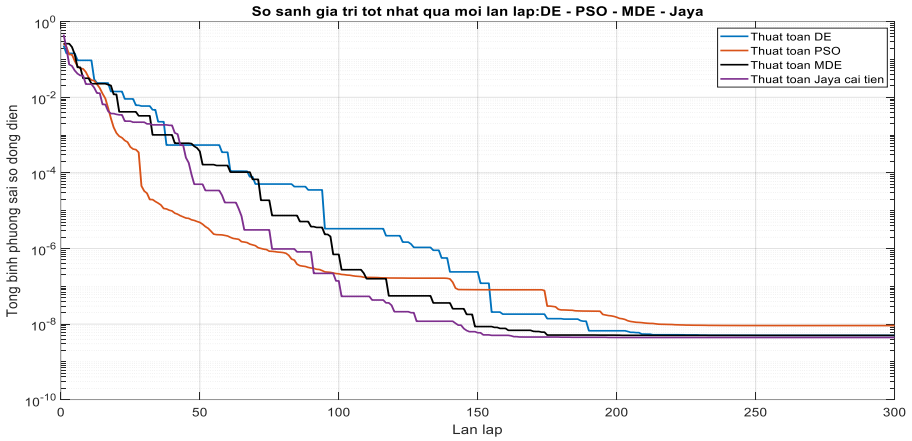
3.3 Ước Lượng Thông Số PMSM dựa trên thuật toán tiến hóa vi sai

3.4 Nhận dạng thông số PMSM sử dụng thuật toán tiến hoá vi sai nâng cao

3.5 Nhận dạng thông số PMSM dựa trên thuật toán tối ưu Jaya sửa đổi

3.5.1 Kết quả nhận dạng thông số PMSM dựa trên thuật toán Jaya sửa đổi

Hình 3.17 thể hiện so sánh hiệu quả nhận dạng thông số động cơ giữa các phương pháp tối ưu khác nhau là thuật toán PSO, thuật toán DE, thuật toán DE cải tiến và thuật toán Jaya cải tiến. Kết quả trực quan cho thấy rằng phương pháp nhận dạng thông số động cơ PMSM dựa trên thuật toán Jaya cải tiến có số lần lặp để tiến về điểm hội tụ thấp hơn, có giá trị hàm mục tiêu thấp hơn khi có cùng điều kiện tính toán là số cá thể trong quần thể và số lần lặp tối đa. Điều này cho thấy rằng phương pháp nhận dạng thông số động cơ PMSM DE cải tiến được đề xuất có hiệu quả tốt nhất trong số các thuật toán tối ưu được sử dụng trong luận án.



Hình 3.17 So sánh giá trị hàm mục tiêu của các phương pháp nhận dạng thông số động cơ PMSM bằng thuật toán DE, PSO, MDE và Jaya cải tiến

Bảng 3.10 trình bày kết quả tính toán chất lượng nhận dạng thông qua giá trị ước lượng trung bình và giá trị thực tế của động cơ PMSM trong các phương pháp nhận dạng thông số động cơ khác nhau. Qua số liệu nhận thấy độ sai lệch giữa giá trị trung bình ước lượng với giá trị thực tế trong mỗi thông số của thuật toán Jaya cải tiến là thấp hơn so với ba phương pháp nhận dạng thông số khác là PSO, DE và DE cải tiến.

Bảng 3.10 Bảng so sánh chất lượng nhận dạng thông số động cơ PMSM giữa bốn phương pháp tối ưu DE, PSO, MDE và Jaya cải tiến

Thông số		Ld	Lq	R	λ
Giá trị thực tế		8.5	8.5	2.7	0.0615
Giá trị ước lượng	Jaya	8.5051	8.4976	2.6997	0.0616
	MDE	8.5059	8.5037	2.698	0.06159
	DE	8.5071	8.4936	2.6972	0.06163
	PSO	8.5083	8.4906	2.704	0.06163
Sai số (%)	Jaya	0.06	0.028	0.011	0.163
	MDE	0.069	0.044	0.074	0.146
	DE	0.084	0.075	0.104	0.211
	PSO	0.098	0.111	0.148	0.211
Độ lệch chuẩn	Jaya	0.0063	0.01	0.0017	$99,1 \cdot 10^{-6}$

	MDE	0.0057	0.0094	0.0029	$86,6.10^{-6}$
	DE	0.0243	0.0183	0.0041	146.10^{-6}
	PSO	0.0132	0.0317	0.0054	203.10^{-6}
Sai số chuẩn	Jaya	0.002	0.0031	0.0005	$31,3.10^{-6}$
	MDE	0.0018	0.003	0.0009	$27,4.10^{-6}$
	DE	0.0077	0.0058	0.0013	$46,4.10^{-6}$
	PSO	0.0042	0.01	0.0017	$64,3.10^{-6}$

3.6 Kết luận

Luận án đã đề xuất giải pháp xác định thông số động cơ PMSM dựa trên các thuật toán tối ưu DE, PSO, MDE và Jaya cải tiến. Hàm mục tiêu để thực thi các thuật toán tối ưu trong nhận dạng thông số động cơ là tổng bình phương sai số giữa dòng điện từ mô hình động cơ PMSM và dòng điện tính toán được từ hình toán động cơ PMSM với các thông số động cơ là các phần tử của cá thể.

Luận án đã trình bày được ba phương pháp nhận dạng thông số động cơ PMSM dựa trên thuật toán tiến hóa vi sai, thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến và thuật toán Jaya cải tiến. Các thuật toán tối ưu cho phép xác định thông số động cơ PMSM dựa trên việc thử sai có điều kiện. Các công bố liên quan đến nhận dạng thông số động cơ PMSM dựa trên phương pháp tối ưu bao gồm:

- Phương pháp nhận dạng thông số PMSM dựa trên thuật toán tiến hóa vi sai được công bố qua bài báo [9] tại Hội nghị toàn quốc lần thứ 8 về Cơ Điện tử - VCM-2016.
- Phương pháp nhận dạng thông số PMSM dựa trên thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến được công bố qua bài báo [8] tại Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 4 về Điều khiển và Tự động hoá năm 2017.
- Phương pháp nhận dạng thông số PMSM dựa trên thuật toán tối ưu Jaya sửa đổi được công bố qua bài báo [7] tại Hội nghị quốc tế “2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)” năm 2019 [7].

CHƯƠNG 4 MỞ RỘNG DÃY TỐC ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA PMSM

4.1 Giới thiệu

4.1.1 Các vùng làm việc của động cơ PMSM phân loại theo tốc độ rô-to

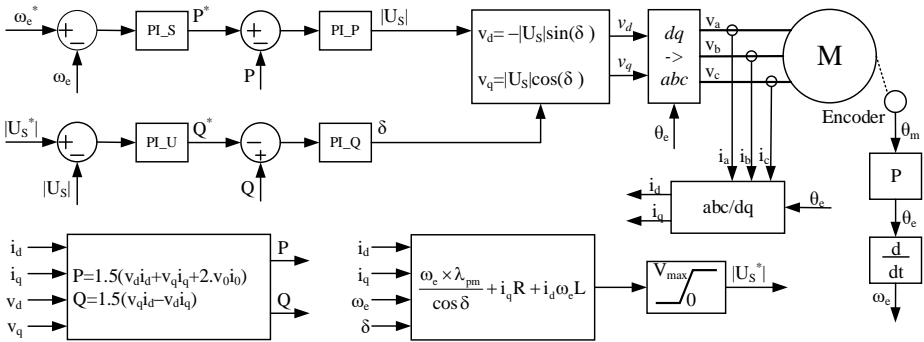
4.1.2 Giới thiệu về mở rộng dãy tốc độ PMSM

4.2 Phương pháp điều khiển tốc độ PMSM dựa trên công suất tác dụng và công suất phản kháng bộ nghịch lưu

4.2.1 Nguyên tắc truyền công suất từ bộ nghịch lưu vào động cơ điện

4.2.2 Nguyên tắc điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất PQ của bộ nghịch lưu

Sơ đồ nguyên lý điều khiển tốc độ PMSM được thể hiện trong Hình 4.3.



Hình 4.3 Nguyên tắc điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất phản kháng và tác dụng của biến tần

4.3 Mô hình hóa hệ thống truyền động PMSM

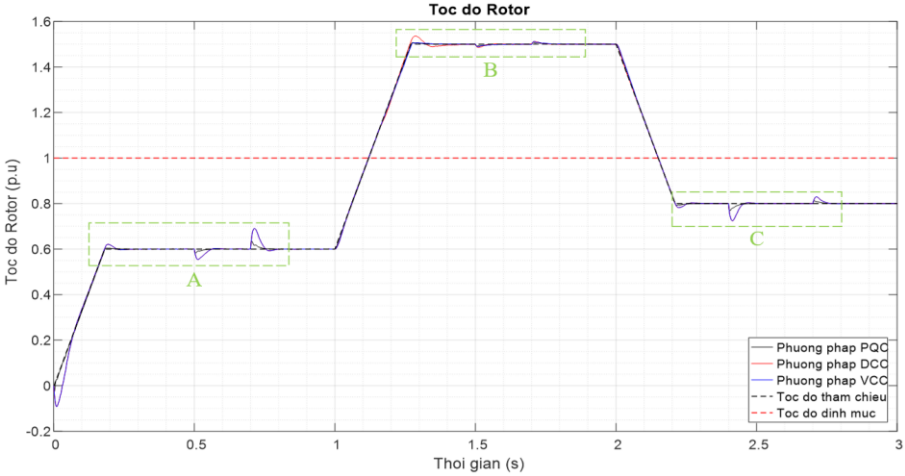
4.4 Thiết lập mô phỏng trong đánh giá hiệu quả điều khiển tốc độ PMSM

4.5 Mô phỏng điều khiển tốc độ PMSM bằng trên phương pháp điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng từ bộ nghịch lưu

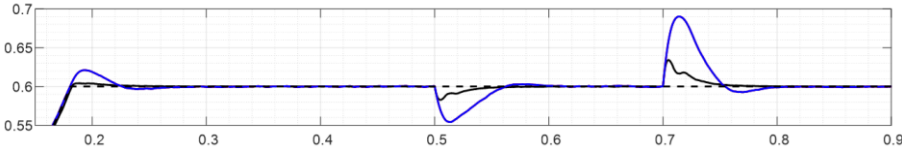
4.5.3 Trường hợp PMSM vận hành trong toàn dãy tốc độ

Kết quả tốc độ PMSM khi tốc độ tham chiếu thay đổi giữa hai vùng làm việc được thể hiện như trong Hình 4.22. Nhận thấy cả ba phương pháp điều khiển tốc độ đều có khả năng bám theo tốc độ tham chiếu sau một thời gian quá độ bởi sự thay đổi tốc độ tham chiếu hay thay đổi mô-men tải. Hình 4.22 (b) và (d) cho thấy sự ổn định và giống nhau của hai phương pháp điều khiển tốc độ VCC và DCC. Điều này là hệ quả của việc sử dụng chung một bộ tham số điều khiển cho

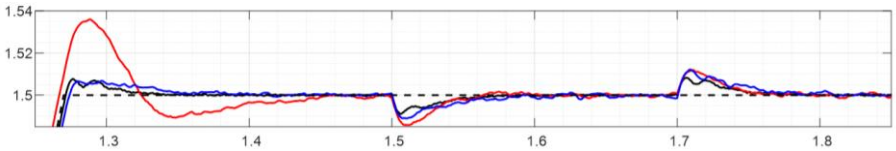
vòng điều khiển tốc độ và bộ tham số điều khiển cho vòng điều khiển dòng điện. Khi vào vùng từ thông yếu, phương pháp điều khiển khác nhau sẽ cho ra tốc độ động cơ khác nhau của các phương pháp điều khiển. Chất lượng điều khiển của phương pháp điều khiển được đề xuất cao hơn so với phương pháp còn lại khi nó có độ vọt lố thấp hơn và thời gian trở về đạt tốc độ tham chiếu ngắn hơn.



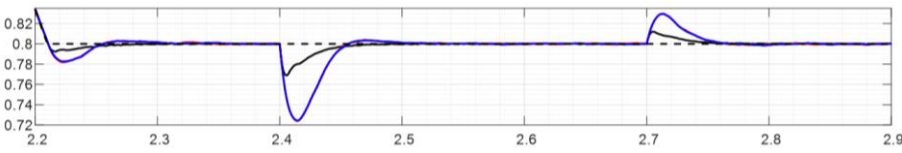
(a) Kết quả điều khiển tốc độ trên toàn thời gian mô phỏng



(b) Phóng to tốc độ PMSM tại vùng A trong hình a



(c) Phóng to tốc độ PMSM tại vùng B trong hình a



(d) Phóng to tốc độ PMSM tại vùng C trong hình a

Hình 4.22 Tốc độ PMSM dựa trên PQD trong toàn dãy tốc độ

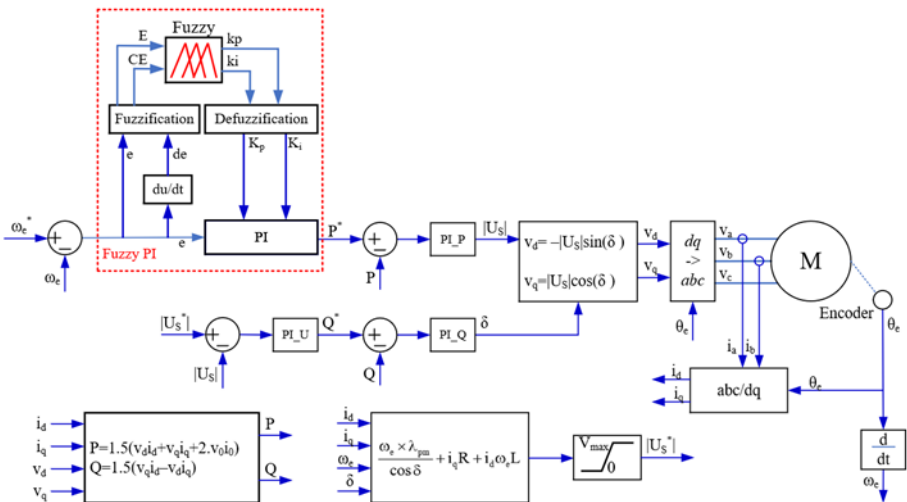
Kết quả tính toán các chỉ tiêu đánh giá sai số với các phương pháp điều khiển tốc độ khác nhau được trình bày cụ thể như trong Bảng 4.7. Nhận thấy rằng sai số xác lập của các phương pháp điều khiển là tương đồng nhau, nên các chỉ số đánh giá chất lượng sai số thể hiện sự sai lệch tốc độ trong quá trình quá độ. Qua các giá trị thu được có thể thấy phương pháp điều khiển PQC được đề xuất cho kết quả bám theo tốc độ tham chiếu là tốt nhất khi các giá trị biểu thị chất lượng của phương pháp này là thấp nhất.

Bảng 4.7 Chất lượng điều khiển tốc độ PMSM trong toàn dải tốc độ

Tiêu chuẩn đánh giá	IAE	ISE	ITAE
phương pháp PQC	0.651	1.745	0.866
phương pháp VCC	1.951	30.197	2.006
phương pháp DCC	2.05	31.254	2.085

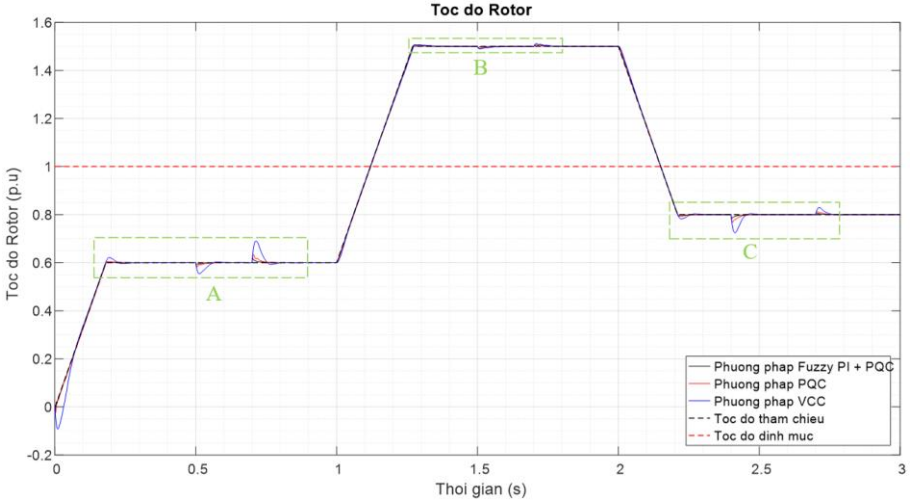
4.6 Cải tiến chất lượng điều khiển tốc độ PMSM sử dụng phương pháp Fuzzy PI cho phương pháp điều khiển công suất tác dụng và phản kháng

4.6.1 Cải tiến chất lượng điều khiển tốc độ PMSM sử dụng phương pháp Fuzzy PI cho phương pháp điều khiển công suất tác dụng và phản kháng

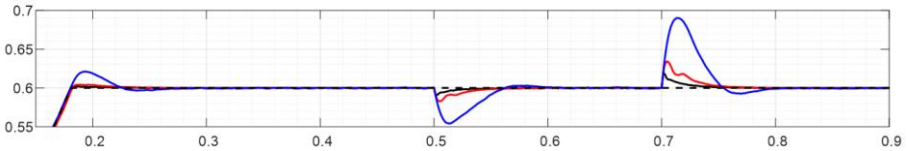


Hình 4.26 Nguyên tắc điều khiển tốc độ PMSM dựa trên Fuzzy PI kết hợp phương pháp điều khiển công suất phản ứng và công suất tác dụng

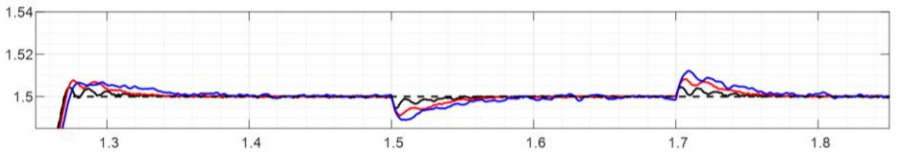
4.6.2 Kết quả cải tiến chất lượng điều khiển tốc độ PMSM sử dụng phương pháp điều khiển công suất tác dụng và phản kháng cải tiến



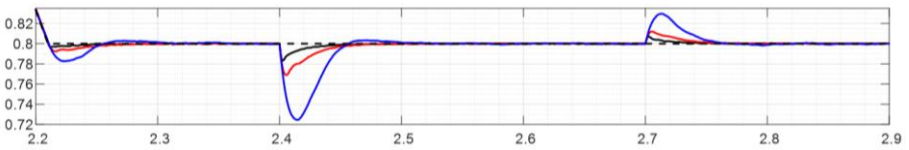
(a) Kết quả điều khiển tốc độ trên toàn thời gian mô phỏng



(b) Phóng to tốc độ PMSM tại vùng A trong hình a



(c) Phóng to tốc độ PMSM tại vùng B trong hình a



(d) Phóng to tốc độ PMSM tại vùng C trong hình a

Hình 4.29 Tốc độ PMSM dựa trên phương pháp Fuzzy PQC

Đồ thị tốc độ động cơ phóng to trong Hình 4.29 (b, c, d) nhằm xem xét hiệu quả điều khiển tốc độ PMSM một cách trực qua của các phương pháp điều khiển khác nhau. Dựa trên dạng sóng đồ thị tốc độ PMSM có thể thấy được rằng độ vọt ló

của phương pháp điều khiển Fuzzy PI + PQC cho đáp ứng tốt hơn về độ vọt lố và thời gian hội tụ so với phương pháp điều khiển PQC và VCC.

Bảng số liệu liệt kê các giá trị đánh giá chất lượng cho các phương pháp điều khiển tốc độ khác nhau được thể hiện trong Bảng 4.10. Khi so sánh với phương pháp điều khiển PQC và VCC thì phương pháp điều khiển Fuzzy PI + PQC được đề xuất cho ra giá trị thấp hơn. Điều này xác nhận rằng phương pháp điều khiển Fuzzy PI + PQC được đề xuất đã cải thiện được chất lượng bám theo tốc độ tham chiếu của phương pháp điều khiển PQC.

Bảng 4.10 Chất lượng điều khiển tốc độ PMSM dựa trên phương pháp Fuzzy PQC

Tiêu chuẩn đánh giá	IAE	ISE	ITAE
Phương pháp Fuzzy PQC	0,277	0,32	0,372
Phương pháp PQC	0,651	1,745	0,866
Phương pháp VCC	1,951	30,197	2,006

4.7 Kết luận

Chương 4 đã thực hiện việc phân tích, đề xuất và thực thi đánh giá hiệu quả mở rộng dải tốc độ làm việc của động cơ PMSM thông qua phương pháp điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng của bộ nghịch lưu. Giải thuật này có hiệu quả điều khiển cao khi có yêu cầu nâng tốc độ làm việc lên trên tốc độ định mức. Với việc chuyển phương pháp điều khiển theo dòng điện thuần túy về điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng thì phương pháp mới được đề xuất đã xóa bỏ ranh giới giữa hai vùng điều khiển tốc độ khác nhau của động cơ PMSM. Đây là đóng góp quan trọng giúp nâng cao hiệu quả mở rộng dải tốc độ làm việc của động cơ PMSM.

Phương pháp điều khiển tốc độ động cơ PMSM dựa trên điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng trong bộ nghịch lưu được kết hợp với bộ điều khiển Fuzzy PI thay cho bộ điều khiển PI truyền thống cũng được đề xuất. Kết quả là chất lượng điều khiển động cơ được nâng cao hơn khi bộ điều khiển Fuzzy PI cho phép thay đổi linh hoạt các thông số điều khiển của bộ điều khiển PI dựa

trên sai số của tốc độ động cơ và tốc độ tham chiếu được thiết lập. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh cho hiệu quả của phương pháp điều khiển cải tiến này. Phương pháp điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng của bộ biến tần đã được công nhận tính mới về mặt phương pháp điều khiển khi các kết quả được công bố trong nghiên cứu khoa học đăng ở tạp chí SCIE [3] năm 2021 (Energies, ISSN:1996-1073, IF: 3.252). Energies là tạp chí được xếp loại Q2 bởi Scimago.

Phương pháp điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng của bộ biến tần cải tiến (phương pháp điều khiển Fuzzy PI + PQC) đã được công nhận tính mới về phương pháp điều khiển khi các kết quả được công bố trong nghiên cứu khoa học được đăng tại tạp chí SCIE [1] năm 2023 (Ain Shams Engineering Journal, ISSN: 2090-4479, IF: 5.10). Ain Shams Engineering Journal là tạp chí được xếp loại Q1 bởi Scimago. Ngoài ra, các kết quả của phương pháp điều khiển này cũng được đăng tạp chí Scopus [5] năm 2023. (Lecture Notes in Networks and Systems; ISSN: 2367-3389). Lecture Notes in Networks and Systems là tạp chí được xếp loại Q4 bởi Scimago.

Trong quá trình thực hiện nghiên cứu về mở rộng dải tốc độ hoạt động của động cơ PMSM, ngoài giải pháp điều khiển tốc độ động cơ PMSM dựa trên điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng được trình bày ở trên, phương pháp điều khiển lai giữa phương pháp điều khiển véc-tơ dòng điện và phương pháp điều khiển véc-tơ tựa từ thông cũng được nghiên cứu và công bố trong bài báo [4] tại tạp chí Scopus Q2 năm 2021 (International Journal of Electrical and Computer Engineering ISSN: 2088-8708).

CHƯƠNG 5 ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ PMSM KHÔNG CẢM BIẾN

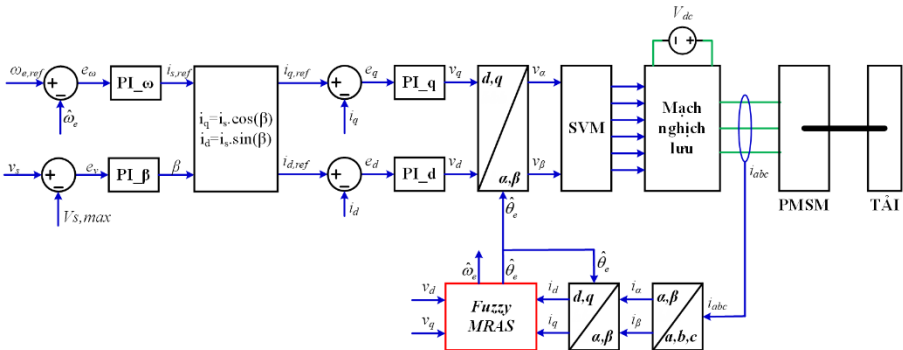
5.1 Giới thiệu

5.2 Phương pháp điều khiển Fuzzy-MRAS

5.2.1 Xây dựng mô hình MRAS

5.2.2 Điều khiển tốc độ PMSM dựa trên Fuzzy-MRAS

5.2.3 Mô hình hóa hệ thống điều khiển tốc độ PMSM không cảm biến sử dụng thuật toán Fuzzy MRAS

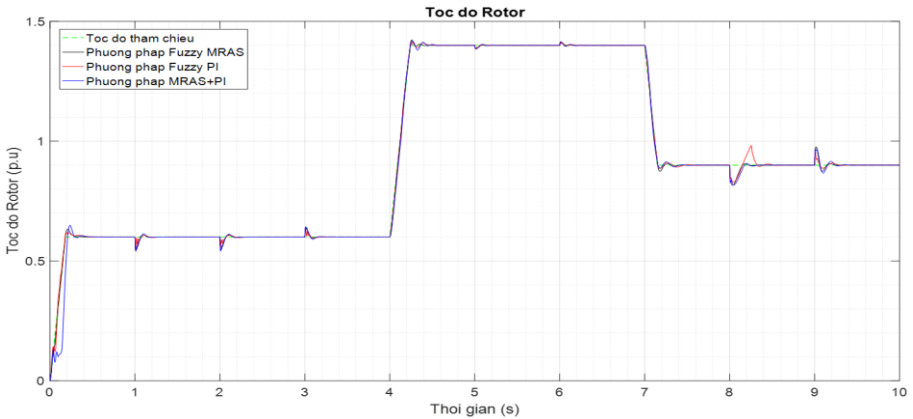


Hình 5.5 Nguyên lý điều khiển PMSM không cảm biến sử dụng Fuzzy MRAS

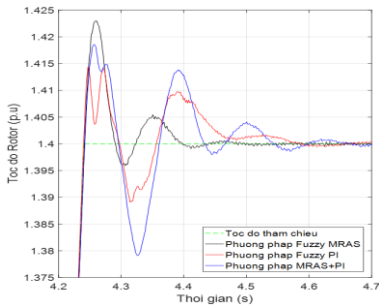
5.3 Kết quả thực hiện

5.3.3 Trường hợp PMSM vận hành trong toàn dải tốc độ

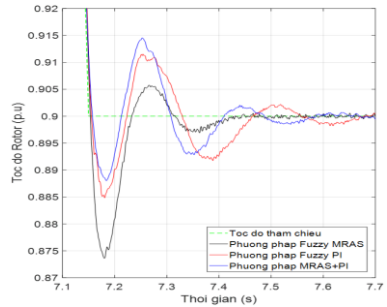
Khi tốc độ tham chiếu tăng lên, đáp ứng tốc độ của động cơ qua phương pháp điều khiển tốc độ Fuzzy MRAS cho thời gian hội tụ thấp hơn và độ vọt lố ít hơn như thể hiện trong Hình 5.18b. Kết quả đáp ứng của động cơ PMSM khi điện áp tham chiếu giảm xuống được thể hiện trong Hình 5.18c. Có thể nhận thấy rằng dù độ vọt lố có cao hơn hai phương pháp còn lại nhưng thời gian hội tụ của phương pháp điều khiển Fuzzy MRAS là ngắn nhất. Điều này cho thấy còn nhiều cải tiến thêm để có khả năng điều khiển giảm sự vọt lố trong quá trình giảm tốc độ tham chiếu đối với phương pháp điều khiển tốc độ Fuzzy MRAS.



(a) Đồ thị tốc độ PMSM trong toàn thời gian mô phỏng



(b) Tốc độ PMSM khi tăng tốc



(c) Tốc độ PMSM khi giảm tốc

Hình 5.18 Tốc độ động cơ PMSM dựa trên Fuzzy MRAS trong toàn dãy tốc độ

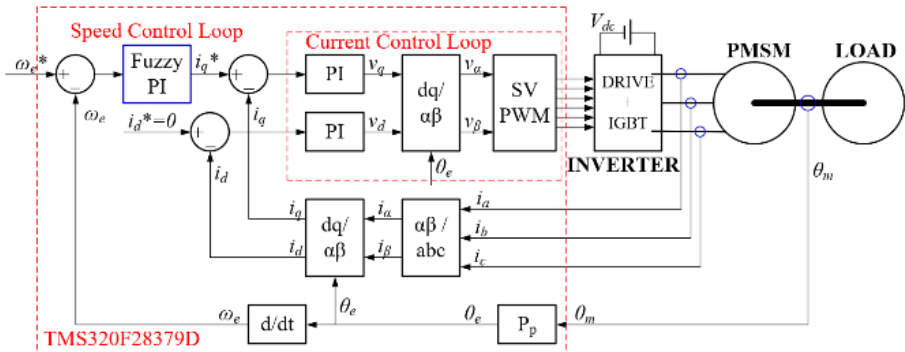
Bảng 5.6 Chất lượng điều khiển tốc độ PMSM dựa trên phương pháp Fuzzy MRAS trong toàn dãy tốc độ

Tiêu chuẩn đánh giá	IAE	ISE	ITAE
phương pháp Fuzzy MRAS	1.07	11.6	5.606
phương pháp Fuzzy PI	1.254	12.119	6.878
phương pháp MRAS	2.302	86.47	7.418

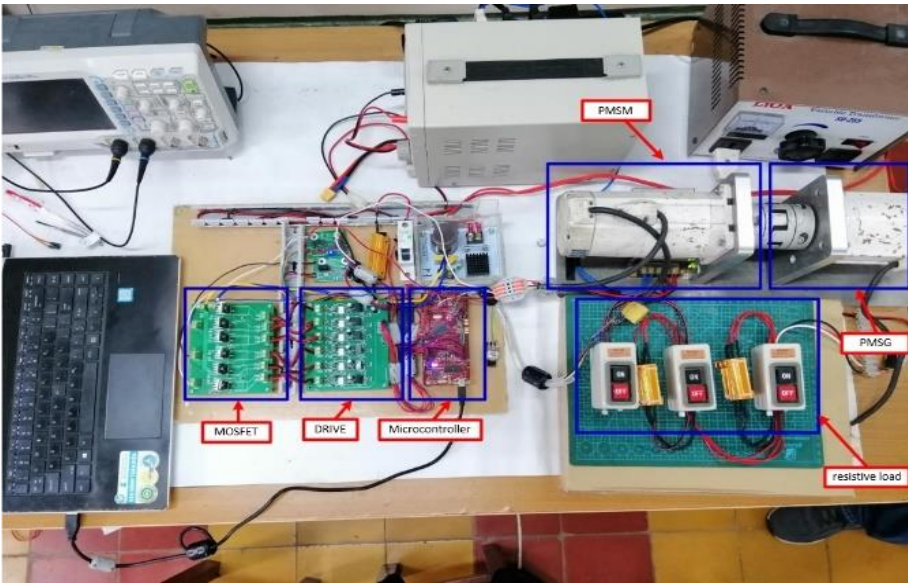
5.4 Thực nghiệm điều khiển thông minh trong điều khiển tốc độ PMSM

5.4.1 Giới thiệu

5.4.2 Mô hình thực nghiệm điều khiển tốc độ PMSM



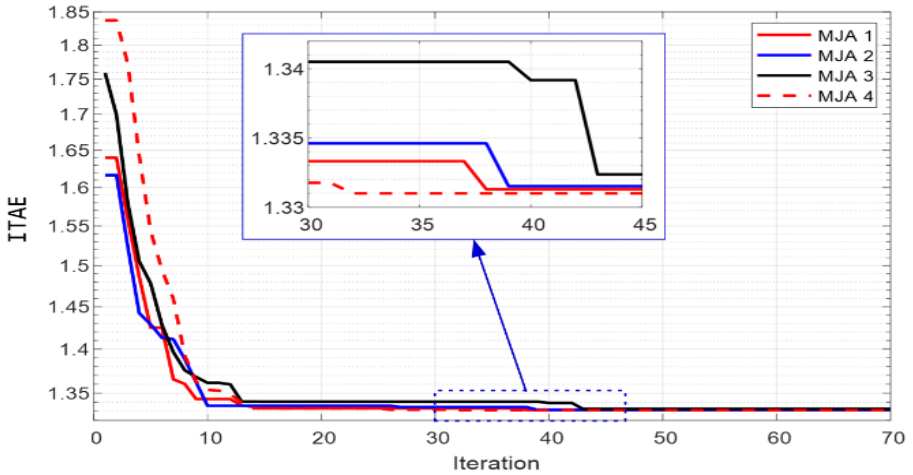
Hình 5.27 Nguyên lý hoạt động của mô hình thực nghiệm điều khiển tốc độ động cơ PMSM dựa trên bộ điều khiển Fuzzy PI



Hình 5.29 Mô hình thực nghiệm điều khiển tốc độ PMSM

5.4.3 Thuật toán Jaya cải tiến trong tối ưu thông số bộ Fuzzy PI

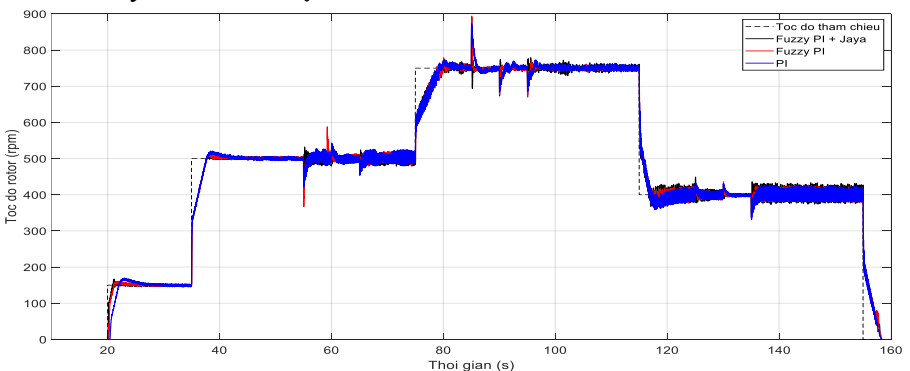
5.4.3.2 Kết quả tối ưu giá trị thông số bộ điều khiển Fuzzy PI



Hình 5.30 Kết quả hàm mục tiêu tối thiểu trong tối ưu thông số bộ điều khiển Fuzzy PI dựa trên thuật toán Jaya cải tiến

Chương trình tối ưu được thực hiện nhiều lần để kiểm tra tính hiệu quả và khả năng hội tụ. Chương trình được thực thi với số cá thể trong một quần thể là 10, thiết lập số lần lặp tối đa là 70, hệ số C1 và C2 lần lượt là 1 và 0.4

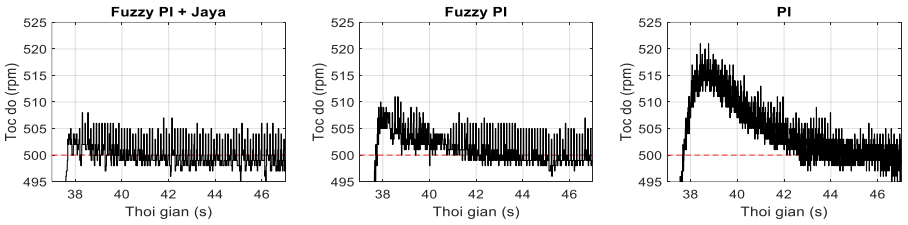
5.4.4 Kết quả thực nghiệm điều khiển tốc độ PMSM dựa trên bộ điều khiển Fuzzy PI tối ưu được đề xuất



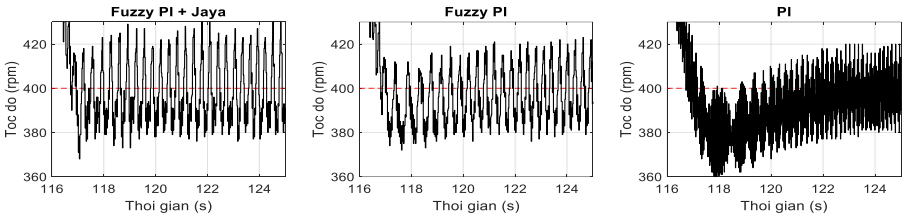
Hình 5.31 Đáp ứng tốc độ PMSM khi tốc độ tham chiếu và mô-men tải thay đổi

Kết quả đáp ứng tốc độ PMSM khi điều kiện làm việc thay đổi được thể hiện như trong Hình 5.31. Tổng quát có thể thấy rằng các bộ điều khiển khác nhau đều có khả năng ổn định tại tốc độ tham chiếu sau thời gian quá độ gây ra

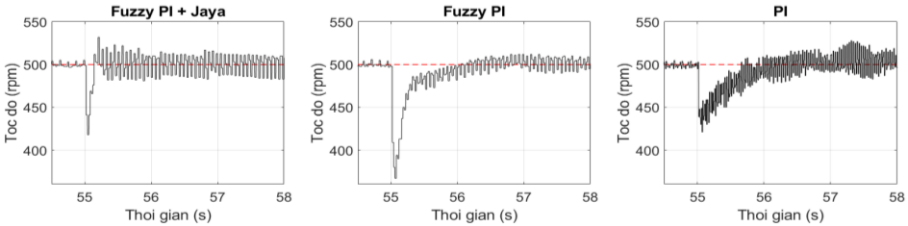
bởi thay đổi tốc độ tham chiếu hay mô-men tải. Trong thời gian quá độ, đáp ứng tốc độ của động cơ là khác nhau khi sử dụng các bộ điều khiển khác nhau.



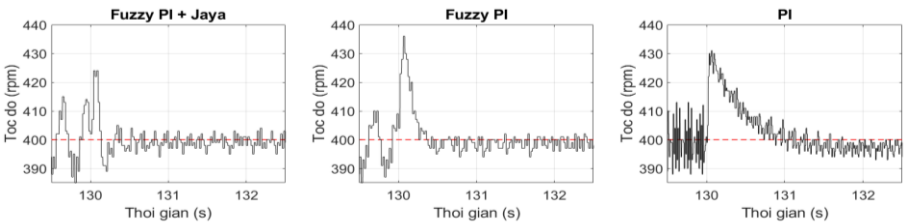
(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 5.1 Tốc độ của PMSM trong trạng thái quá độ

Đánh giá hiệu quả định lượng về chất lượng điều khiển tốc độ PMSM thu được từ các phương pháp điều khiển khác nhau được thể hiện như trong Bảng 5.12.

Các giá trị ITAE của "Optimal Fuzzy PI", "Fuzzy PI" và "PI" lần lượt là 1179, 1266 và 1321. Có thể nhận xét rằng chất lượng điều khiển tốc độ của "Optimal Fuzzy PI" tốt hơn so với phương pháp "Fuzzy PI" và cả hai phương pháp áp dụng bộ điều khiển PI mờ đều cho kết quả tốt hơn nhiều so với bộ điều khiển PI truyền thống. Các tiêu chuẩn của IAE và ISE cũng đưa ra những con số tương tự.

Bảng 5.12 Chất lượng điều khiển tốc độ PMSM trong thực nghiệm

Phương pháp điều khiển	ITAE	IAE	ISE
PI	1321	14.462	1153
Fuzzy PI	1266	13.261	1132
Optimal Fuzzy PI	1179	11.99	996

5.5 Kết luận

Trong chương này đề xuất một phương pháp điều khiển tốc độ PMSM không cảm biến dựa trên thuật toán Fuzzy MRAS nhằm nâng cao hiệu quả điều khiển tốc độ động cơ PMSM. Phương pháp điều khiển được đề xuất có khả năng giảm thiểu sai số ước lượng tốc độ động cơ so với tốc độ thực tế. Hệ quả là nâng cao khả năng bám theo tốc độ tham chiếu của động cơ. Các kết quả định tính và định lượng thu được sau quá trình mô phỏng điều khiển tốc độ PMSM trong các phần trên đã chứng minh cho hiệu quả điều khiển đem lại của phương pháp điều khiển tốc độ được đề xuất.

Dựa vào các kết quả điều khiển tốc độ động cơ tại các vùng làm việc khác nhau, thuật toán điều khiển Fuzzy MRAS được đề xuất cho thấy hiệu quả điều khiển đã tốt hơn hai phương pháp điều khiển được làm tham chiếu là phương pháp điều khiển Fuzzy PI và phương pháp điều khiển MRAS cơ bản. Phương pháp điều khiển mới đã chứng tỏ hiệu quả hoạt động khi có yêu cầu mở rộng dải tốc độ điều khiển động cơ PMSM.

Thực nghiệm thành công mô hình điều khiển tốc độ động cơ PMSM bằng phương pháp điều khiển Fuzzy PI. Việc xây dựng thành công mô hình thực nghiệm cho phép hướng nghiên cứu áp dụng các thuật toán thông minh vào điều khiển tốc độ động cơ PMSM có bước tiến xa hơn trong áp dụng các phương pháp điều khiển

mới được đề xuất vào thực nghiệm. Các kinh nghiệm và các vấn đề thực nghiệm được đúc kết thông qua từng bước thực hiện các yêu cầu khác nhau trong quá trình điều khiển. Một số nhiệm vụ cơ bản trong quá trình thực nghiệm điều khiển tốc độ động cơ đã được hoàn thành như là điều khiển tốc độ động cơ PMSM dựa trên bộ điều khiển Fuzzy PI, thực hiện ghi nhận dòng điện sta-to, giao tiếp được giữa máy tính và vi điều khiển TMS320F28379D để ghi nhận dữ liệu mô phỏng. Phương pháp điều khiển tốc độ động cơ PMSM không cảm biến dựa trên mô hình Fuzzy MRAS được đề xuất đã được kiểm chứng và các kết quả được công bố trong nghiên cứu khoa học đăng ở tạp chí SCIE [1] năm 2022 (Arabian Journal for Science and Engineering, ISSN: 2193-567X, IF:3.08). Arabian Journal for Science and Engineering là tạp chí được xếp loại Q1 bởi Scimago. Ngoài ra, kết quả thu được cũng đã được công bố tại hội nghị quốc tế “The International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation and Sustainable Development 2021 (AMAS2021)” năm 2021 [208]

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN

6.1 Kết luận

Mục tiêu chính của luận án là đề xuất các giải thuật mới và hiệu quả trong mở rộng dải tốc độ vận hành của động cơ PMSM để phù hợp hơn với yêu cầu của các bộ truyền động di động hiện nay. Ngoài mục tiêu này, mục tiêu điều khiển không cảm biến vị trí góc rô-to và nhận dạng thông số cũng được đề xuất thực hiện nhằm góp phần nâng cao hơn nữa hiệu quả truyền động và giảm chi phí đầu tư, không gian lắp đặt cho các hệ thống truyền động di động PMSM.

Các nghiên cứu liên quan đến lý thuyết điều khiển, các giải pháp mới được đề xuất và các kết quả thu được đã được trình bày cụ thể trong các phần phía trên. Tổng hợp các kết quả thu được trong luận án, một số kết luận về luận án được đưa ra chi tiết như sau.

6.1.1 Kết luận về mở rộng dải tốc độ hoạt động của PMSM

Nghiên cứu đã tìm ra và chứng minh tính hiệu quả cho các giải pháp nâng cao độ ổn định tốc độ, giảm nhấp nhô dòng điện và giảm nhấp nhô mô men điện từ trong quá trình chuyển từ vùng mô men hằng số sang vùng từ thông yếu. Như phân tích ở các phần trên, nguyên lý chuyển đổi vận tốc qua lại giữa vùng mô men hằng số và công suất hằng số phải đảm bảo việc chuyển đổi được diễn ra đơn giản, tự động dựa trên các biến điều khiển đo lường được. Vấn đề này được giải quyết bằng phương pháp điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất bộ nghịch lưu [2] được đề xuất. Các kết quả ghi nhận được trong luận án đã chứng minh được tính hiệu quả cả thuật toán điều khiển tốc độ động cơ PMSM được đề xuất có hiệu quả cao hơn trong ổn định tốc độ động cơ và giảm thiểu nhấp nhô dòng điện và mô men điện từ. Phương pháp điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất bộ nghịch lưu đã xóa bỏ việc chuyển đổi chế độ làm việc giữa hai vùng công suất hằng số và mô men hằng số. Sự cân bằng công suất giữa nhu cầu của động cơ và công suất cấp giữa bộ nghịch lưu đã giảm nhấp nhô dòng điện và mô men điện từ khi chúng có cùng nguyên nhân chung là mất cân bằng công suất giữa công suất bộ nghịch lưu và công suất tải.

Nghiên cứu đóng góp giải pháp cao độ ổn định tốc độ, giảm nhấp nhô dòng điện và nhấp nhô mô men điện từ trong quá trình thay đổi mô men tải đầu trục khi động cơ hoạt động trong vùng từ thông yếu. Việc tăng mô men điện từ trong vùng FW không được thực hiện trực tiếp qua việc tăng dòng điện trục q vì sẽ dẫn đến vi phạm vùng điện áp hoạt động. Phương pháp điều khiển tốc độ PMSM dựa trên điều khiển công suất bộ nghịch lưu [2] được đề xuất đáp ứng sự thay đổi mô men tải bằng cách thay đổi công suất P cấp cho động cơ. Nếu điện áp bộ nghịch lưu nằm dưới điện áp giới hạn của nó, việc tăng công suất được thực hiện đơn giản thông qua việc tăng biên độ điện áp bộ nghịch lưu. Ngược lại, công suất phản kháng Q được huy động hay rút ra để đảm bảo P được giảm đi hay tăng thêm mà không vi phạm giới hạn dòng điện và điện áp của động cơ. Việc thay đổi biên độ và góc pha điện áp bộ nghịch lưu được thực hiện linh hoạt và nhánh chóng thông qua bộ điều khiển. Sự cân bằng công suất tác dụng luôn được đảm bảo là nguyên nhân chính giảm thiểu nhấp nhô mô men điện từ và nhấp nhô dòng điện stator.

6.1.2 Kết luận về vấn đề điều khiển không cảm biến động cơ PMSM

Luận án đề xuất phương pháp giảm thiểu hiện tượng chattering và sai số xác lập cho tốc độ động cơ và tốc độ tham chiếu của nó bằng cách áp dụng mô hình Fuzzy MRAS [1] thay cho mô hình MRAS cơ bản. Việc ứng dụng điều khiển thông minh Fuzzy vào trong mô hình ước lượng tốc độ PMSM dựa trên MRAS giúp giảm thiểu tác động tiêu cực của hiện tượng dao động tốc độ động cơ và giảm sai số xác lập của động cơ trong quá trình hoạt động lâu dài. Kết quả mô phỏng bằng mô hình Matlab đã chứng minh cho hiệu quả đạt được khi so sánh với hai phương pháp tương đương là mô hình MRAS cơ bản và Fuzzy FOC.

6.1.3 Kết luận về vấn đề nhận dạng thông số động cơ PMSM

Luận án đã đề xuất thực hiện được các vấn đề nhận dạng thông số động cơ offline dựa trên cực tiểu hàm mục tiêu là tổng bình phương cực tiểu sai số giữa dòng điện thu được từ động cơ và dòng điện tính toán được dựa trên mô hình động cơ PMSM với các thông số được lựa chọn dựa trên thuật toán tối ưu. Cụ thể:

- Luận án đã đề xuất giải pháp xác định thông số động cơ dựa trên các phương pháp tối ưu. Các phương pháp tối ưu có nhiệm vụ tìm ra các

thông số sao cho cực tiểu tổng bình phương sai số giữa dòng điện từ khối động cơ và dòng điện tạo ra với bộ thông số đề xuất trong các giải pháp (cá thể). Giải pháp được đề xuất có ưu điểm là làm cho việc nhận dạng thông số động cơ được thực hiện đơn giản hơn khi chuyển bài toán đi tìm nhiều thông số động cơ thành bài toán cực tiểu tổng bình phương sai số. Sự tiện lợi này cho phép việc nhận dạng thông số động cơ được thực hiện một cách đơn giản hơn qua phương pháp nhận dạng offline bằng thuật toán.

- Luận án đã trình bày được ba phương pháp nhận dạng thông số động cơ PMSM dựa trên thuật toán tiến hóa vi sai, thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến và thuật toán Jaya cải tiến. Các thuật toán tối ưu cho phép xác định thông số động cơ PMSM dựa trên việc thử sai có điều kiện.

6.2 Định hướng nghiên cứu tiếp theo

Các hướng nghiên cứu đã đề xuất trong chuyên đề có tính mới, tính hiệu quả và đã được ghi nhận qua các bài báo được đăng. Tuy nhiên, nhằm nâng cao hơn nữa hiệu quả mở rộng dải tốc độ làm việc của động cơ PMSM, một số các hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất, bao gồm:

Đề xuất xây dựng mô hình điều khiển tốc độ động cơ PMSM nhằm để kiểm chứng và áp dụng thực tế cho các nghiên cứu đã đề xuất về mở rộng tốc độ hoạt động của động cơ PMSM.

Đề xuất áp dụng các phương pháp điều khiển thông minh trong bài toán điều khiển tốc độ động cơ PMSM kết hợp với hướng nghiên cứu hiện có. Nếu kết hợp được các phương pháp điều khiển thông minh, điều khiển mềm sẽ giúp nâng cao chất lượng điều khiển trong một số vấn đề còn tồn đọng như xác định trạng thái chuyển chế độ làm việc hay giảm thiểu sự nhấp nhô giá trị tham chiếu công suất và biên độ điện áp của bộ nghịch lưu.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí quốc tế

1. Pham Quoc Khanh and Ho Pham Huy Anh, “Advanced PMSM speed control using fuzzy PI method for hybrid power control technique,” *Ain Shams Engineering Journal (SCIE Q1; ISSN: 2090-4479; IF: 5.10)*, Mar. 2023,
2. Pham Quoc Khanh; Ho Pham Huy Anh, “Novel Sensorless PMSM Speed Control Using Advanced Fuzzy MRAS Algorithm,” *Arabian Journal for Science and Engineering (SCIE Q1; ISSN: 2193-567X; IF: 3.08)*, vol. 47, no. 11, pp. 14531–14542, Nov. 2022,
3. Pham Quoc Khanh, Viet-Anh Truong, and Ho Pham Huy Anh, “Extended Permanent Magnet Synchronous Motors Speed Range Based on the Active and Reactive Power Control of Inverters,” *Energies (SCIE Q2; ISSN:1996-1073; IF:2.702)*, vol. 14, no. 12, p. 3549, Jun. 2021,
4. Pham Quoc Khanh and Ho Pham Huy Anh, “Advanced deep flux weakening operation control strategies for IPMSM,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (Scopus Q2; ISSN: 2088-8708; IF: 1.94)*, vol. 11, no. 5, p. 3798, Oct. 2021,

Kỹ yếu hội nghị quốc tế

1. Pham Quoc Khanh and Ho Pham Huy Anh, “Improved PMSM Speed Control Using Fuzzy PI Method for Hybrid Active and Reactive Power Control Approach,” in *Lecture Notes in Networks and Systems (Scopus Q4; ISSN: 2367-3389; IF: 0.60)*, 2023, pp. 345–356.
2. Pham Quoc Khanh and Ho Pham Huy Anh, “Reduce Estimated Speed Ripple and Improve Sensorless PMSM Speed Control Using Advanced Fuzzy MRAS Algorithm,” in *Lecture Notes in Mechanical Engineering (Scopus Q4; ISSN: 2195-4364; IF: 0.52)*, Springer, Cham, 2022, pp. 805–809.
3. Pham Quoc Khanh, Truong Viet Anh, and Ho Pham Huy Anh, “Improve Stability of Deep Flux Weakening Operation Control Strategies for IPMSM,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing (Scopus Q4; ISSN: 2194-5365; IF: 0.61)*, vol. 1284, 2021, pp. 191–202.

4. Ho Pham Huy Anh, Pham Quoc Khanh, and C. Van Kien, “Advanced PMSM Machine Parameter Identification Using Modified Jaya Algorithm,” in *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Jul. 2019, pp. 445–450.

Kỹ yếu hội nghị trong nước

1. Pham Quoc Khanh, Ho Pham Huy Anh, “Parameter identification of PMSM machine using modified differential evolution DE algorithm,” *21st International Conference on Mechatronics Technology* October 20–23, 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2017.
2. Ho Pham Huy Anh, Pham Quoc Khanh, Cao Van Kien, “PMSM Parameter Estimation based on Differential Evolution Algorithm,” in *Hội nghị toàn quốc lần thứ 8 về Cơ Điện tử - VCM-2016*, 2016, pp. 404–409.