**Kết quả thực nghiệm**

**1. Các trường hợp thử nghiệm**

Để kiểm nghiệm thuật toán điều khiển và mô hình hoạt động hiệu quả, nhóm sinh viên đã đưa ra các trường hợp thử nghiệm và phương pháp đánh giá như sau:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ĐỘ ƯU TIÊN** | **NỘI DUNG** | **MỤC ĐÍCH** | **ĐIỀU KIỆN ĐẦU VÀO** | **NHẬN XÉT** |
| **1** | Thử nghiệm không tải | Đánh giá phản hồi PID trong điều kiện lý tưởng | Speed\_Ref cố định | Sai số tốc độ, ổn định trạng thái, độ gợn. |
| **2** | Thử nghiệm tăng tốc | Đánh giá hiệu suất bám tốc độ | Tăng Speed\_Ref (ramp) | Thời gian đáp ứng, độ vượt, độ mượt. |
| **3** | Thử nghiệm tải tăng dần | Kiểm tra độ ổn định dưới tải tăng dần | Mức tải được tăng / giảm dần | Mức độ ổn định, sai số tốc độ, dòng tối đa. |
| **4** | Thử nghiệm giới hạn dòng | Xác định giới hạn dòng hệ thống và phản ứng khi quá tải | Tải tăng dần | Dòng tối đa. |
| **5** | Thử nghiệm tải dạng bước | Quan sát hành vi khi tải tăng đột ngột | Tải được tăng / giảm theo bước | Sai số tốc độ, thời gian ổn định, dòng tăng. |
| **6** | Thử nghiệm tải ngắt quãng | Đánh giá khả năng điều khiển khi tải bật/tắt liên tục | Tải bật/tắt theo chu kỳ | Gợn tốc trong chuyển tiếp, quá điều chỉnh. |
| **7** | Thử nghiệm tải cùng chiều quay Motor | Đánh giá độ ổn định và khả năng đáp ứng | Tải cùng chiều với chiều quay motor | Độ ổn định và mực gợn tốc độ, đáp ứng dòng điện. |

*Bảng xx. Các trường hợp thử nghiệm mô hình*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **CHỈ SỐ** | **MÔ TẢ** | **CÁCH ĐO LƯỜNG** |
| **Sai số tốc độ** | Chênh lệch giữa tốc độ đặt và tốc độ đo | So sánh *Speed\_Ref* với *Speed\_Meas* |
| **Thời gian đáp ứng** | Thời gian để hệ thống ổn định sau khi thay đổi | Quan sát thời gian ổn định trên đồ thị tốc độ đã ghi |
| **Độ gợn tốc độ** | Dao động xung quanh tốc độ ổn định (trung bình hoặc biên độ đỉnh) | Tính độ gợn từ *Speed\_Meas* sau khi đã ổn định |
| **Dòng tiêu thụ** | Mức độ tiêu thụ điện dưới các điều kiện tải khác nhau | Ghi lại *Idc\_meas* hoặc sử dụng cảm biến dòng pha |
| **Khả năng kháng nhiễu** | Khả năng của hệ thống phục hồi sau khi bị tác động từ tải ngoài | Quan sát khả năng khôi phục tốc độ sau các bước tải |

*Bảng xx. Các tiêu chí đánh giá thử nghiệm*

**2. Thực nghiệm**

**2.1. Thử nghiệm không tải**

Tiến hành thử nghiệm mô hình ở chế độ không tải (motor tải tắt) với tốc độ motor cố định ở các mức từ nhỏ đến lớn cho ra kết quả như sau:

A group of graphs showing different colored lines

AI-generated content may be incorrect.

*Thử nghiệm không tải ở tốc độ 300 rpm*

Trong thử nghiệm không tải tại tốc độ tham chiếu khoảng 300 RPM, hệ điều khiển cho thấy hiệu suất bám tốc độ còn hạn chế. Cụ thể, sai số tốc độ đạt 31.50 RPM, tương đương 10.25%, là một giá trị khá cao trong điều kiện lý tưởng khi không có tải tác động. Đồ thị tốc độ motor cho thấy dao động lớn quanh giá trị trung bình, phản ánh độ gợn tốc độ đáng kể, có thể do nhiễu điều khiển hoặc bộ PID chưa được hiệu chỉnh phù hợp. Dòng tiêu thụ tối đa là 0.21 A, nằm trong mức chấp nhận được nhưng vẫn có biên độ dao động rõ rệt dù không có tải, cho thấy hệ thống điều khiển có thể hoạt động chưa ổn định.

A close-up of several graphs

AI-generated content may be incorrect.

*Thử nghiệm không tải ở tốc độ 1037 rpm*

Trong thử nghiệm không tải tại tốc độ tham chiếu 1037.84 RPM, hệ điều khiển thể hiện khả năng bám tốc độ tương đối tốt với sai số chỉ 8.72 RPM, tương ứng 0.84%. Đây là một cải thiện rõ rệt so với thử nghiệm trước đó ở tốc độ thấp. Dòng điện trung bình đạt 0.19 A, cực đại 0.24 A, dao động trong biên độ hợp lý nhưng vẫn cần được theo dõi để đảm bảo tính ổn định lâu dài.

A group of graphs showing different colors

AI-generated content may be incorrect.

*Thử nghiệm không tải ở tốc độ 2000 rpm*

Tại tốc độ tham chiếu 2000 RPM, hệ thống có hiệu suất tương tự nữa với sai số 20.15 RPM, tương đương 1.01%.

A group of graphs showing different colors

AI-generated content may be incorrect.

*Thử nghiệm không tải ở tốc độ 3000 rpm*

Trong thử nghiệm không tải tại tốc độ tham chiếu cao nhất ~ 2998.92 RPM, hệ điều khiển đạt hiệu quả cao với sai số tốc độ chỉ 20.15 RPM (0.67%), cho thấy khả năng bám tốc tốt. Tổng thể, hệ thống hoạt động ổn định ở tốc độ cao, nhưng vẫn cần giảm nhiễu dòng và tín hiệu để tối ưu hiệu suất.

A graph of a graph

AI-generated content may be incorrect.

*Thử nghiệm không tải với Speed\_Ref tăng / giảm dần*

Trong thử nghiệm không tải với tốc độ tham chiếu thay đổi tuyến tính (tăng và giảm dần), hệ thống cho thấy khả năng bám tốc độ tốt với sai số trung bình 93.20 RPM (3.17%) ở tốc độ đỉnh 2937.2 RPM. Thời gian đáp ứng được ghi nhận rõ ràng (Max = 0.090 s, Mean = 0.031 s), chứng tỏ phản ứng nhanh và ổn định. Tuy nhiên, dòng điện tiêu thụ tăng đáng kể khi tốc độ thay đổi, đạt đỉnh 0.57 A, cho thấy bộ điều khiển phải hoạt động tích cực hơn để theo kịp biến thiên tốc độ. Dù vậy, độ gợn dòng vẫn trong giới hạn chấp nhận được (TRUNG BÌNH = 0.23 A).

A screenshot of a graph

AI-generated content may be incorrect.

*Thử nghiệm không tải với Speed\_Ref dạng sin*

Trong thử nghiệm không tải với tín hiệu tốc độ tham chiếu dạng hình, hệ thống điều khiển duy trì khả năng bám tốc tương đối tốt với sai số 137.29 RPM (5.68%) ở tốc độ đỉnh gần 3000 RPM. Tín hiệu phản hồi bám khá sát với tham chiếu, tuy vẫn tồn tại độ trễ nhẹ. Thời gian đáp ứng ghi nhận khá rõ (0.041s), cho thấy hệ thống phản ứng ổn định theo chu kỳ thay đổi tốc độ. Dòng tiêu thụ trung bình là 0.26 A và dòng cực đại đạt 0.71 A, phản ánh mức độ hoạt động tích cực hơn của bộ điều khiển khi theo tín hiệu liên tục.

**2.2. Thử nghiệm có tải**

A group of graphs showing different colored lines

AI-generated content may be incorrect.

*Tốc độ thấp với motor tải ngược chiều quay*

Trong thử nghiệm ở tốc độ thấp với motor tải quay ngược chiều, hệ thống gặp khó khăn trong việc duy trì tốc độ mục tiêu. Tốc độ tham chiếu là 318.66 RPM nhưng sai số lớn lên đến 42.82 RPM (13.44%), cho thấy ảnh hưởng rõ rệt từ mô-men cản ngược chiều. Dòng motor đạt đỉnh 0.90 A và trung bình là 0.53 A – đều tăng cao so với các thử nghiệm không tải, phản ánh nỗ lực của hệ thống để chống lại mô-men quay ngược

*A screenshot of a graph

AI-generated content may be incorrect.*

*Tốc độ trung bình với motor tải ngược chiều quay*

Trong thử nghiệm ở tốc độ trung bình (≈1933 RPM) với motor tải quay ngược chiều, hệ thống chịu ảnh hưởng mạnh từ mô-men cản khi tải đạt mức duty lên tới 97.3%. Mặc dù sai số tốc độ vẫn trong giới hạn chấp nhận được (60.46 RPM, tương đương 3.13%), tín hiệu phản hồi bắt đầu dao động mạnh sau thời điểm tải tăng cao, cho thấy mất ổn định cục bộ. Dòng tiêu thụ trung bình tăng vọt lên 1.79 A và đạt đỉnh tới 4.37 A – rất cao so với các thử nghiệm khác, phản ánh áp lực lớn lên bộ điều khiển.

*A group of graphs showing different colors

AI-generated content may be incorrect.*

*Tốc độ tối đa với tải ngược chiều quay*

Trong thử nghiệm ở tốc độ cao nhất (2600.28 RPM) với motor tải quay ngược chiều, hệ thống chịu tải cực lớn với Load Duty đạt 97.4%, dẫn đến sai số tốc độ tương đối cao: 125.32 RPM (4.82%). Tín hiệu phản hồi bị dao động mạnh trong thời gian chịu tải, thể hiện rõ qua độ nhiễu lớn ở cả đồ thị tốc độ và dòng điện. Dòng motor đạt cực đại 6.00 A và trung bình là 2.55 A – cao vượt trội so với các điều kiện thử nghiệm khác, phản ánh mức độ quá tải gần giới hạn hệ thống. Mặc dù hệ điều khiển vẫn cố duy trì tốc độ gần với tham chiếu, tín hiệu mất ổn định rõ rệt cho thấy hệ thống đang vận hành sát giới hạn điều khiển.

*A graph of a graph

AI-generated content may be incorrect.*

*Thử nghiệm với tải bật / tắt đột ngột*

Trong thử nghiệm với tải bật/tắt đột ngột (intermittent load), hệ thống điều khiển phản ứng chưa hiệu quả trước các xung tải nhanh. Tốc độ tham chiếu là 1518.98 RPM nhưng sai số đạt tới 662.51 RPM (43.62%) – một giá trị rất lớn, cho thấy tốc độ motor bị ảnh hưởng mạnh khi tải xuất hiện. Các thời điểm bật/tắt tải gây ra dao động lớn trong cả tốc độ và dòng điện; dòng motor đạt đỉnh 4.85 A và RMS 1.18 A. Tín hiệu phản hồi tốc độ bị chệch đáng kể và không hồi phục nhanh, trong khi thời gian đáp ứng không được ghi nhận. Tổng thể, hệ thống mất ổn định rõ rệt trước tải xung, cho thấy cần cải thiện khả năng kháng nhiễu và tối ưu PID để đáp ứng nhanh hơn trước các biến đổi tải đột ngột.