

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA  
KHOA ĐIỆN

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP  
CAPSTONE PROJECT  
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN  
CHUYÊN NGÀNH: HỆ THỐNG ĐIỆN

ĐỀ TÀI:  
NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TẦN SỐ  
CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ MÁY PHÁT ĐIỆN

GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN: PGS.TS LÊ ĐÌNH DƯƠNG

CÁN BỘ HƯỚNG DẪN: ThS BÙI THANH TÂN

SINH VIÊN THỰC HIỆN: Tôn Văn Luyện MSSV: 105200095

Trần Hoàng Huy MSSV: 105200092

Bùi Công Quyền MSSV: 105200143

LỚP: 20D1

20D2

*Đà Nẵng, tháng 6 năm 2025*

## TÓM TẮT

Tên đề tài: Nghiên cứu đáp ứng tần số của hệ thống kích từ máy phát điện.

Loại đề tài: Đồ án tốt nghiệp hệ kỹ sư theo hình thức Capstone Project làm với doanh nghiệp.

|                                 |                             |           |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|
| Họ tên sinh viên: Tôn Văn Luyến | Số thẻ sinh viên: 105200095 | Lớp: 20D1 |
| Trần Hoàng Huy                  | Số thẻ sinh viên: 105200092 | Lớp: 20D1 |
| Bùi Công Quyền                  | Số thẻ sinh viên: 105200143 | Lớp: 20D2 |

Đề tài “NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ MÁY PHÁT ĐIỆN” sẽ tập trung nghiên cứu về hệ thống kích từ của máy phát điện. Đồ án gồm có 4 chương:

- Chương 1: Tổng quan về hệ thống kích từ và AVR máy phát điện đồng bộ.

Chương này sẽ trình bày tổng quan về hệ thống kích từ, chức năng và nhiệm vụ của hệ thống kích từ. Phân tích vai trò của bộ AVR máy phát. Tìm hiểu về phân loại các loại kích từ hiện nay

- Chương 2: Điều khiển PID và phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.

Chương này sẽ trình bày về khái niệm bộ điều khiển PID trong hệ thống điều khiển tự động. Các quy luật điều khiển bộ PID. Nghiên cứu về các tiêu chuẩn đánh giá đáp ứng tần số, tiêu chuẩn ổn định Nyquist, tiêu chuẩn ổn định Bode

- Chương 3: Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống trong Matlab/Simulink.

Chương này giới thiệu về các phần tử để mô phỏng trong Matlab/Simulink. Mô hình hoá hệ thống kích từ cụ thể và thực hiện mô phỏng trong Matlab/Simulink. Tính toán các thông số của bộ PID để điều khiển hệ thống.

- Chương 4: Thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.

Chương này phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ đã được mô hình hoá và điều khiển bằng bộ PID. Sử dụng phương pháp thử-sai của từng thông số  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , để đáp ứng độ ổn định của hệ thống

Qua 4 chương trên đề tài sẽ cung cấp những lý thuyết khái quát nhất về hệ thống kích từ của máy phát, hiểu được các cách để sử dụng bộ điều khiển PID để điều khiển hệ thống kích từ và chỉnh định các tham số để đáp ứng của hệ thống ổn định khi có nhiễu tần số tác động.

## NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

| TT | Họ và tên sinh viên | Số thẻ SV | Lớp  | Ngành         |
|----|---------------------|-----------|------|---------------|
| 1  | Tôn Văn Luyến       | 105200095 | 20D1 | Kỹ thuật điện |
| 2  | Trần Hoàng Huy      | 105200092 | 20D1 | Kỹ thuật điện |
| 3  | Bùi Công Quyền      | 105200143 | 20D2 | Kỹ thuật điện |

- Tên đề tài đồ án: Nghiên cứu đáp ứng tần số của hệ thống kích từ máy phát điện.
- Đề tài thuộc diện:  Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện
- Các số liệu và dữ liệu ban đầu:
- Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:

a. Phần chung:

Chương 1: Tổng quan về hệ thống kích từ và AVR máy phát điện đồng bộ

Chương 2: Điều khiển PID và phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.

Chương 3: Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống trong Matlab/Simulink.

Chương 4: Thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.

Kết luận:

b. Phần riêng:

| TT | Họ và tên sinh viên | Nội dung   |
|----|---------------------|--|
| 1  | Tôn Văn Luyến       | Chương 1: Tổng quan về hệ thống kích từ và AVR máy phát điện đồng bộ<br>Chương 2: Điều khiển PID và phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.<br>Chương 3: Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống trong Matlab/Simulink.<br>Chương 4: Thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống kích từ. |
| 2  | Trần Hoàng Huy      | Chương 3: Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống trong Matlab/Simulink.<br>Chương 4: Thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.   |
| 3  | Bùi Công Quyền      | Chương 1: Tổng quan về hệ thống kích từ và AVR máy phát điện đồng bộ<br>Chương 2: Điều khiển PID và phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ.   |

5. Các bản vẽ, đồ thị ( ghi rõ các loại và kích thước bản vẽ ):

6. Họ tên người hướng dẫn:

| TT | Họ và tên người hướng dẫn | Đơn vị  |
|----|---------------------------|---|
| 1  | PGS.TS. Lê Đình Dương     | Khoa điện, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Đà Nẵng   |
| 2  | ThS. Bùi Thanh Tân        | Phó Giám đốc Trung tâm Bảo trì Thủy điện và Dịch vụ kỹ thuật (AVSC), thuộc Công ty CP Thủy điện A Vương (AVC) |

7. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 17/ 02/ 2025

8. Ngày hoàn thành đồ án: 12/ 06/2025

Đà Nẵng, ngày 17 tháng 02 năm 2025

Phụ trách bộ môn  
Hệ thống điện

Người hướng dẫn

Người hướng dẫn

TS. Lê Hồng Lâm

PGS.TS. Lê Đình Dương

ThS. Bùi Thanh Tân

## LỜI NÓI ĐẦU

Trong suốt quá trình học tập tại Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, chúng em luôn nhận được sự quan tâm, giảng dạy và hỗ trợ tận tình từ quý Thầy Cô, nhờ đó đã tích lũy được nhiều kiến thức chuyên môn cũng như kinh nghiệm thực tiễn trong lĩnh vực ngành học.

Quảng thời gian thực hiện đề tài tốt nghiệp vừa qua là cơ hội quý báu để chúng em hệ thống, ôn tập và củng cố lại những kiến thức đã được tiếp thu trong suốt những năm học, đồng thời mở rộng thêm hiểu biết mới, góp phần nâng cao tư duy và kỹ năng nghiên cứu thực tế.

Sau thời gian tìm hiểu và nghiên cứu đề tài: “NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ MÁY PHÁT ĐIỆN” đã hoàn thành.

Chúng em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến:

Thầy PGS.TS. Lê Đình Dương – Giảng viên hướng dẫn, ThS. Bùi Thanh Tân - Phó Giám đốc Trung tâm Bảo trì Thủy điện và Dịch vụ kỹ thuật (AVSC), thuộc Công ty CP Thủy điện A Vương (AVC) đã nhiệt tình giúp đỡ chúng em nghiên cứu và hoàn thành đề tài đúng thời gian quy định.

Tập thể quý Thầy Cô KHOA ĐIỆN cùng toàn thể quý Thầy Cô Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng đã giúp đỡ chúng em có được những kiến thức chuyên môn cần thiết để thực hiện đề án tốt nghiệp cũng như hoàn thành tốt chương trình học Đại Học.

Mặc dù đã cố gắng và nỗ lực hết mình khi thực hiện đề tài, nhưng do kiến thức và thời gian còn hạn chế nên không tránh khỏi những thiếu sót. Chúng em rất mong nhận được những sự góp ý của quý Thầy Cô để chúng em có được đề tài hoàn thiện nhất.

Cuối cùng chúng em kính chúc toàn thể quý Thầy Cô Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng, lời chúc sức khỏe và công tác tốt.

Đà Nẵng, ngày tháng 06 năm 2025

Nhóm sinh viên thực hiện

Tôn Văn Luyến

Trần Hoàng Huy

Bùi Công Quyền

## CAM ĐOAN

Chúng em xin cam đoan rằng:

- Số liệu và kết quả nghiên cứu trong báo cáo đồ án tốt nghiệp này là hoàn toàn trung thực và đề tài không trùng lặp với bất kỳ đề tài tốt nghiệp nào trước đây.
- Mọi sự giúp đỡ trong việc thực hiện đồ án này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong đồ án tốt nghiệp đã được chỉ rõ nguồn gốc rõ ràng và được phép công bố.

Đà Nẵng, ngày tháng 06 năm 2025

Nhóm sinh viên thực hiện

Tôn Văn Luyện

Trần Hoàng Huy

Bùi Công Quyền

# MỤC LỤC

TÓM TẮT

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

|   |     |
|---|-----|
| LỜI NÓI ĐẦU.....  | i   |
| CAM ĐOAN.....   | ii  |
| MỤC LỤC .....   | iii |
| DANH MỤC BẢNG .....   | iv  |
| DANH MỤC HÌNH ẢNH.....  | v   |
| Mở Đầu .....  | 1   |
| CHƯƠNG 1:TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG KÍCH TỪ VÀ AVR MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ ..... | 4   |
| 1.1. Giới thiệu chung về hệ thống kích từ .....                           | 4   |
| 1.1.1. Chức năng và nhiệm vụ của hệ thống kích từ.....                    | 4   |
| 1.1.2. Tính năng của hệ thống kích từ.....                                | 5   |
| 1.1.3. Các thành phần chính của hệ thống kích từ .....                    | 6   |
| 1.1.4. Chức năng điều khiển của hệ thống kích từ.....                     | 6   |
| 1.1.4.1. Bộ điều chỉnh AC và DC.....                                      | 7   |
| 1.1.4.2. Mạch ổn định hệ thống kích từ.....                               | 9   |
| 1.1.5. Các bộ giới hạn và bảo vệ .....                                    | 10  |
| 1.1.5.1. Giới hạn khả năng phát công suất phản kháng.....                 | 10  |
| 1.1.5.2. Bộ giới hạn thiếu kích thích .....                               | 16  |
| 1.1.5.2. Bộ giới hạn quá kích thích .....                                 | 17  |
| 1.1.5.2. Bộ giới hạn V/Hz và bảo vệ .....                                 | 17  |
| 1.2. Các loại hệ thống kích từ.....                                       | 18  |
| 1.2.1. Hệ thống kích từ một chiều.....                                    | 18  |
| 1.2.2. Hệ thống kích từ xoay chiều .....                                  | 19  |
| 1.2.3. Hệ thống kích từ tĩnh.....   | 20  |
| 1.3. Bộ điều chỉnh điện áp AVR.....                                       | 21  |
| 1.3.1. Nguyên lí hoạt động của bộ AVR.....                                | 21  |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1.3.2.  | Cấu trúc bộ AVR.....                                 | 21 |
| 1.4.  | Kết luận.....  | 24 |
| CHƯƠNG 2: ĐIỀU KHIỂN PID VÀ PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỬ ..... |  | 25 |
| 2.1.  | Tổng quan về điều khiển PID .....                    | 25 |
| 2.1.1.  | Lý thuyết về bộ điều khiển PID .....                 | 25 |
| 2.1.2.  | Các quy luật hiệu chỉnh.....                         | 27 |
| 2.1.2.1   | Khái niệm .....                                      | 27 |
| 2.1.2.2   | Hiệu chỉnh tỷ lệ vi phân (PD).....                   | 28 |
| 2.1.2.3.  | Hiệu chỉnh tỷ lệ tích phân PI .....                  | 29 |
| 2.1.2.4.  | Hiệu chỉnh tỷ lệ vi tích phân PID .....              | 29 |
| 2.2.  | Ứng dụng của bộ điều khiển PID .....                 | 30 |
| 2.3.  | Đánh giá đáp ứng của hệ thống .....                  | 32 |
| 2.3.1.  | Đáp ứng thời gian.....                               | 32 |
| 2.3.2.  | Đáp ứng tần số.....                                  | 33 |
| 2.3.2.1.  | Biểu đồ BODE.....                                    | 35 |
| 2.3.2.2.  | Biểu đồ Nyquist.....                                 | 36 |
| 2.3.3.  | Đánh giá về đáp ứng tần số .....                     | 36 |
| 2.4.  | Kết luận .....                                       | 37 |
| CHƯƠNG 3: MÔ HÌNH HOÁ VÀ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRONG MATLAB/SIMULINK .....          |  | 38 |
| 3.1.  | Giới thiệu về Simulink Toolbox .....                 | 38 |
| 3.1.1.  | Những phần tử cơ bản.....                            | 38 |
| 3.1.2.  | Các bước xây dựng mô hình trên Simulink .....        | 39 |
| 3.2.  | Mô hình hoá các phần tử trong hệ AVR – máy phát..... | 40 |
| 3.3.  | Tổng hợp mô hình hoá các phần tử .....               | 42 |
| 3.4.  | Đánh giá đáp ứng tần số của hệ thống.....            | 46 |
| 3.5.  | Tối ưu bộ điều khiển PID .....                       | 47 |
| 3.5.1.  | Sử dụng phương pháp Ziegler – Nichols .....          | 47 |
| 3.5.1.1.  | Giới thiệu chung .....                               | 47 |

|   |    |
|---|----|
| 3.5.1.2. Thiết kế thông số bộ PID.....  | 47 |
| 3.6. Kết luận.....  | 51 |
| CHƯƠNG 4: THỬ NGHIỆM ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ'...                              | 52 |
| 4.1. Giới thiệu.....  | 52 |
| 4.2. Phương pháp thực hiện.....   | 52 |
| 4.3. Mô phỏng và thu thập dữ liệu.....  | 55 |
| 4.3.1. Bộ tham số $K_i$ , $K_p$ , $K_d$ ( $K_p=0.296$ , $K_i=0.488$ , $K_d=0.0488$ )..... | 55 |
| 4.3.2. Tăng giá trị $K_p$ .....   | 57 |
| 4.3.3. Tăng giá trị $K_i$ .....   | 59 |
| 4.3.4. Tăng giá trị $K_d$ .....   | 64 |
| 4.3.5. Giảm giá trị $K_p$ .....   | 66 |
| 4.3.6. Giảm giá trị $K_i$ .....   | 68 |
| 4.3.7. Giảm giá trị $K_d$ .....   | 70 |
| 4.3.8. Kết hợp tăng giảm các giá trị $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ .....                          | 72 |
| 4.3.9. Sử dụng chức năng PID Tuner của bộ điều khiển PID Controller.....                  | 75 |
| 4.4. Đánh giá và nhận xét thông số các bộ PID.....  | 78 |
| 4.5. Kết luận và hướng phát triển.....  | 78 |
| KẾT LUẬN.....   | 80 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO.....   | 82 |

## DANH MỤC BẢNG

|   |    |
|---|----|
| Bảng 3. 1: Bảng tổng hợp hàm truyền.....                                | 44 |
| Bảng 3. 2: Lập bảng Routh.....  | 48 |
| Bảng 3. 3: Tham số bộ điều khiển theo Ziegler_Nichols.....              | 49 |
| Bảng 4. 1: Biên độ và góc pha tại tần số .....                          | 55 |
| Bảng 4. 2: Biên độ và góc pha của hệ thống dung bộ thông số PID1 .....  | 58 |
| Bảng 4. 3: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID2 .....  | 60 |
| Bảng 4. 4: Biên độ và góc pha của hệ thống dung bộ thông số PID2' ..... | 62 |
| Bảng 4. 5: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID3 .....  | 64 |
| Bảng 4. 6: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID4.....   | 66 |
| Bảng 4. 7: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID5 .....  | 68 |
| Bảng 4. 8: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID6 .....  | 71 |
| Bảng 4. 9: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID7 .....  | 73 |
| Bảng 4. 10: Biên độ và góc pha.....                                     | 76 |

## DANH MỤC HÌNH ẢNH

|  |    |
|--|----|
| Hình 1. 1. Mạch bảo vệ và điều khiển của hệ thống kích từ .....  | 7  |
| Hình 1. 2. Điều chỉnh theo độ lệch điện áp .....   | 8  |
| Hình 1. 3. Bộ ổn định hệ thống kích từ có bộ bù nối tiếp .....   | 9  |
| Hình 1. 4. Giới hạn dòng điện phản ứng .....   | 11 |
| Hình 1. 5. Sơ đồ mạch tương đương và giản đồ vectơ .....   | 12 |
| Hình 1. 6. Giới hạn nhiệt dòng kích thích .....  | 13 |
| Hình 1. 7. Mặt cắt phần cuối máy phát và giới hạn nhiệt vùng biên.....                                   | 14 |
| Hình 1. 8. Đường cong điện áp V.....   | 14 |
| Hình 1. 9. Đường cong điện áp V và đường cong tổng hợp cho máy phát tại điện áp phản ứng định mức .....  | 15 |
| Hình 1. 10. Sự phối hợp giữa phần tử thiếu,mất kích thích và giới hạn ổn định .....                      | 16 |
| Hình 1. 11. Sự kết hợp của giới hạn quá kích thích với khả năng chịu nhiệt của cuộn dây kích thích ..... | 17 |
| Hình 1. 12. Hệ thống kích từ một chiều .....   | 19 |
| Hình 1. 13. Hệ thống kích từ tĩnh .....  | 20 |
| Hình 2. 1. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển vòng kín .....   | 25 |
| Hình 2. 2. Sơ đồ khối hệ thống hồi tiếp bậc 2 .....  | 28 |
| Hình 2. 3. Dạng sóng của $c(t)$ , $e(t)$ và $de(t)/dt$ .....   | 28 |
| Hình 2. 4. Hệ thống điều khiển kích từ sử dụng hồi tiếp .....  | 32 |
| Hình 2. 5. Đáp ứng thời gian .....   | 32 |
| Hình 2. 6. Đáp ứng tần số vòng hở của hệ thống .....   | 33 |
| Hình 2. 7. Đáp ứng tần số vòng kín với máy phát không tải.....   | 34 |
| Hình 2. 8. Biểu đồ BODE.....   | 35 |
| Hình 2. 9. Đường cong Nyquist .....  | 36 |
| Hình 3. 1. Cửa sổ Simulink .....   | 39 |
| Hình 3. 2. Môi trường làm việc của Simulink.....   | 40 |
| Hình 3. 3. Thư viện Simulink.....  | 40 |
| Hình 3. 4. Sơ đồ cấu trúc hệ thống kích từ tĩnh.....   | 41 |
| Hình 3. 5. Mô hình toán miêu tả máy điện đồng bộ và hệ thống kích từ.....                                | 42 |
| Hình 3. 6. Sơ đồ khối của AVR với bộ điều khiển PID .....  | 42 |
| Hình 3. 7. Sơ đồ khối cụ thể của AVR với bộ điều khiển PID .....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Hình 3. 8. Sơ đồ khối của AVR với bộ điều khiển PID .....                  | 44 |
| Hình 3. 9. Sơ đồ khối hệ thống.....  | 45 |
| Hình 3. 10. Đáp ứng đầu ra của hệ thống.....                               | 45 |
| Hình 3. 11. Hàm truyền tổng hợp của hệ thống .....                         | 46 |
| Hình 3. 12. Biểu đồ BODE.....  | 46 |
| Hình 3. 13. Sơ đồ khối cụ thể của AVR với bộ điều khiển PID .....          | 47 |
| Hình 3. 14. Sơ đồ khối của hệ thống khi sử dụng Ziegler-Nichols 2.....     | 48 |
| Hình 3. 15. Sơ đồ khối của hệ thống sau khi sử dụng Ziegler-Nichols 2..... | 50 |
| Hình 3. 16. Mô phỏng hệ thống trong Simulink .....                         | 50 |
| Hình 3. 17. Điện áp đầu ra của hệ thống khi có PID.....                    | 50 |
| Hình 4. 1. Tín hiệu Vinj.....  | 53 |
| Hình 4. 2. Sơ đồ hệ thống trong Simulink.....                              | 54 |
| Hình 4. 3. Đồ thị đáp ứng tần số.....                                      | 56 |
| Hình 4. 4. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID1 .....                           | 58 |
| Hình 4. 5. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID1 .....                | 59 |
| Hình 4. 6. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID2 .....                           | 60 |
| Hình 4. 7. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID2.....                 | 61 |
| Hình 4. 8. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID2' .....               | 63 |
| Hình 4. 9. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID3 .....                           | 64 |
| Hình 4. 10. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID3 .....               | 65 |
| Hình 4. 11. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID4 .....                          | 66 |
| Hình 4. 12. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID4.....                | 67 |
| Hình 4. 13. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID5 .....                          | 68 |
| Hình 4. 14. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID5.....                | 70 |
| Hình 4. 15. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID6 .....                          | 71 |
| Hình 4. 16. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID6.....                | 72 |
| Hình 4. 17. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID7 .....                          | 73 |
| Hình 4. 18. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID7.....                | 74 |
| Hình 4. 19. Chức năng PID Tuner.....                                       | 75 |
| Hình 4. 20. Thông số PID Tuner so với thông số điều chỉnh.....             | 75 |
| Hình 4. 21. Sơ đồ dùng PID Controller.....                                 | 76 |
| Hình 4. 22. Đáp ứng tần số của hệ thống .....                              | 77 |

## DANH MỤC KÝ TỰ CHỮ VIẾT TẮT

|     |  |
|-----|--|
| AVR | Bộ điều chỉnh điện áp tự động (Automatic Voltage Regulator). |
| PSS | Bộ ổn định hệ thống điện (Power System Stabilizer).          |
| UEL | Bộ giới hạn thiếu kích thích (Under Excitation Limiter ).    |
| OEL | Bộ giới hạn quá kích thích (Over Excitation Limiter ).       |
| PID | Proportional - Integral - Derivative.                        |
| POT | Độ vọt lố (Percent of Overshoot).                            |
| GM  | Độ dự trữ biên (Gain Margin ).                               |
| PM  | Độ dự trữ pha (Phase Margin ).                               |

## Mở Đầu

### 1. Lý do chọn đề tài

Trong hệ thống điện hiện đại, sự ổn định và chất lượng điện áp đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo sự vận hành an toàn, hiệu quả của lưới điện cũng như các thiết bị tiêu thụ. Đặc biệt trong nhà máy điện, hệ thống kích từ và bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR) đóng vai trò trung tâm trong việc duy trì điện áp đầu cực, điều chỉnh công suất phản kháng và cải thiện đặc tính quá độ của hệ thống khi có nhiễu hoặc tải thay đổi.

Thực tế vận hành cho thấy, hệ thống kích từ thường xuyên phải đối mặt với các nhiễu dao động có thành phần điều hoà và biến thiên tần số. Nếu hệ thống kích từ không được điều khiển hiệu quả thì dễ dẫn đến các vấn đề như dao động điện áp, mất đồng bộ, hoặc thậm chí gây sự cố lan truyền trong hệ thống. Do đó, việc nghiên cứu đặc tính đáp ứng tần số của hệ thống kích từ là cần thiết để đánh giá mức độ ổn định, khả năng bù điều hoà và chống nhiễu của hệ thống.

Để phục vụ quá trình mô hình hóa, tính toán và phân tích, phần mềm Matlab/Simulink được lựa chọn do khả năng mô phỏng mạnh mẽ, trực quan, tích hợp các công cụ điều khiển và phân tích miền tần số. Việc xây dựng mô hình hệ thống kích từ máy phát kết hợp với điều khiển PID trong Simulink không chỉ cho phép đánh giá định lượng qua mô phỏng mà còn tạo tiền đề cho việc tối ưu hóa điều khiển trong môi trường thực tế. Xuất phát từ các cơ sở trên, nhóm thực hiện lựa chọn đề tài: NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ MÁY PHÁT ĐIỆN. Với đề tài này, nhóm không chỉ đặt mục tiêu đạt kết quả tốt trong học tập mà còn hướng tới việc ứng dụng kiến thức lý thuyết vào bài toán thực tế, tạo tiền đề cho các nghiên cứu sâu hơn hoặc ứng dụng trong thực tiễn.

### 2. Mục đích nghiên cứu

Đề tài được thực hiện nhằm đạt được các mục đích sau:

- Hiểu rõ nguyên lý hoạt động, cấu trúc và vai trò của hệ thống kích từ và bộ AVR trong máy phát đồng bộ.
- Mô hình hóa hệ thống kích từ tĩnh và bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR) dựa trên hàm truyền và thông số thực tế.
- Thiết kế và hiệu chỉnh bộ điều khiển PID cho hệ thống kích từ để cải thiện đáp ứng quá độ, giảm độ vọt lố và rút ngắn thời gian xác lập.
- Đánh giá hiệu quả điều khiển thông qua mô phỏng đáp ứng thời gian và tần số trong môi trường Matlab/Simulink.
- Phân tích ảnh hưởng của các nhiễu tác động (nhiều tần số, điện áp) nhằm kiểm tra khả năng ổn định và độ tin cậy của hệ thống.

### 3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu: Hệ thống kích từ tĩnh của máy phát điện đồng bộ có sử dụng bộ điều khiển PID trong mạch vòng điều khiển điện áp AVR.
- Phạm vi nghiên cứu:
  - Tập trung vào mô hình hóa và điều khiển điện áp đầu cực máy phát, không xét đến các chế độ vận hành quá phức tạp như kết hợp với hệ thống điều tốc hoặc vận hành song song nhiều tổ máy.
  - Sử dụng mô hình khối tuyến tính hóa để mô phỏng trong môi trường Matlab/Simulink.
  - Áp dụng phương pháp điều chỉnh PID tiêu chuẩn (Ziegler-Nichols) để lựa chọn thông số bộ điều khiển.
  - Đánh giá hệ thống trong các tình huống cơ bản như thay đổi tải và tác động nhiễu đầu vào.

### 4. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp mô hình hóa toán học: Thiết lập hàm truyền của các khối chức năng trong hệ thống kích từ như: bộ khuếch đại, bộ kích thích, máy phát đồng bộ và khâu đo lường.

- Phương pháp mô phỏng số: Sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để xây dựng sơ đồ khối, mô phỏng hệ thống điều khiển AVR có kết hợp PID.
- Phương pháp thiết kế điều khiển: Áp dụng phương pháp Ziegler-Nichols để tìm các thông số  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  tối ưu cho bộ điều khiển PID.
- Phân tích đánh giá: Sử dụng các chỉ tiêu động học (thời gian lên, thời gian xác lập, độ vọt lố) và đáp ứng tần số (bằng biểu đồ Bode, độ dự trữ pha và biên) để đánh giá tính ổn định của hệ thống.
- Thử nghiệm mô phỏng nhiễu: Tác động các tín hiệu nhiễu vào hệ thống để kiểm tra phản ứng và khả năng chống nhiễu của bộ điều khiển.

### **5. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn**

- Về mặt khoa học: Đề tài góp phần làm rõ nguyên lý và phương pháp điều khiển hệ thống kích từ bằng PID, đồng thời ứng dụng các công cụ phân tích hiện đại trong lĩnh vực điều khiển tự động. Việc mô hình hóa và mô phỏng trên Matlab/Simulink giúp đánh giá chính xác và minh bạch hiệu quả của các thuật toán điều khiển.
- Về mặt thực tiễn: Kết quả nghiên cứu có thể áp dụng vào thực tế tại các nhà máy điện, góp phần nâng cao chất lượng điều khiển điện áp, đảm bảo khả năng phản ứng nhanh khi có sự cố hoặc biến động tải. Ngoài ra, mô hình mô phỏng có thể được dùng như công cụ hỗ trợ đào tạo kỹ sư điều khiển hệ thống điện và trong các nghiên cứu chuyên sâu về điều khiển công suất và ổn định lưới điện.

## CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG KÍCH TỪ VÀ AVR

### MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ

#### 1.1. Giới thiệu chung về hệ thống kích từ

##### 1.1.1. Chức năng và nhiệm vụ của hệ thống kích từ

Hệ thống kích từ của máy phát điện là hệ thống tạo ra dòng điện một chiều, dòng điện này kích thích từ trường của rotor máy phát điện, tạo ra dòng điện kích từ, một trong những nhân tố thiết yếu giúp máy phát ra dòng điện. Ngoài ra, dòng điện kích từ còn giúp điều chỉnh điện áp, công suất phản kháng của máy phát điện.

Chức năng cơ bản của hệ thống kích thích là cung cấp dòng điện 1 chiều cho cuộn dây rotor để tạo từ trường của máy điện đồng bộ. Hệ thống kích từ được điều khiển và bảo vệ nhằm đáp ứng công suất phản kháng cho hệ thống thông qua sự điều khiển điện áp bằng cách điều khiển dòng điện kích thích.

Chức năng điều khiển bao gồm: Điều chỉnh điện áp, phân bố công suất và nâng cao tính ổn định của hệ thống. Chức năng bảo vệ là đảm bảo được khả năng của máy điện đồng bộ, hệ thống kích thích và các thiết bị khác không được vượt quá giới hạn.

Các yêu cầu cơ bản là hệ thống kích từ cung cấp và tự động điều chỉnh dòng điện kích thích của máy phát đồng bộ để duy trì điện áp ở đầu ra cũng như giữ cho điện áp ở đầu ra biến thiên trong phạm vi “cho phép liên tục” của máy phát. Các yêu cầu này có thể tham khảo theo đặc tính hình V. Độ dự trữ cho tốc độ biến thiên của nhiệt độ, hư hỏng thiết bị, quá tải định mức khẩn cấp,... cần được quản lý công suất định mức trong trạng thái xác lập. Thông thường định mức bộ kích thích biến thiên từ  $2 \div 3,5$  kW/MVA của định mức máy phát.

Ngoài ra hệ thống kích từ phải có khả năng đáp ứng quá độ bất ổn định với từ trường cưỡng bức phù hợp với máy phát một cách tức thời và ngắn hạn. Khả năng của máy phát được giới hạn bởi các yếu tố: hư hỏng cách điện rotor ở điện áp kích thích cao, nóng rotor ở dòng điện kích thích lớn, nóng stator do dòng tải ở phần ứng lớn, lõi bị nóng trong suốt thời gian vận hành ở trạng thái thiếu kích thích và sinh nhiệt do mật độ từ trường cao (V/Hz). Giới hạn nhiệt có đặc tính độc lập với thời gian, khả năng quá tải

ngắn hạn của máy phát có thể mở rộng từ  $15 \div 60$ s. Để đảm bảo sự sử dụng tốt nhất hệ thống kích từ, cần biết đầy đủ khả năng đáp ứng của máy phát ngắn hạn miễn không vượt quá giới hạn cho phép.

Hệ thống kích thích đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển điện áp và cải thiện độ ổn định của hệ thống điện. Thông qua việc điều chỉnh từ trường của máy phát, hệ thống có khả năng phản ứng nhanh với các biến động điện áp, qua đó nâng cao độ ổn định quá độ. Đồng thời, nó cũng góp phần duy trì độ ổn định tĩnh của hệ thống, giúp hệ thống vận hành an toàn và hiệu quả hơn.

### 1.1.2. Tính năng của hệ thống kích từ

Hệ thống kích từ nhận nguồn cấp từ hệ thống điện tự dùng của tổ máy và máy biến áp kích từ. Trong giai đoạn khởi động, nguồn kích từ ban đầu (mồi từ) được lấy từ bộ ắc quy tự dùng 220VDC hoặc 110VDC để tạo điện áp mồi. Khi điện áp đầu cực máy phát đạt gần mức định mức, hệ thống chuyển sang chế độ tự kích từ, quá trình này thường diễn ra trong khoảng 20–30 chu kỳ điện (khoảng 0,5–1 giây). Hệ thống kích từ cung cấp dòng điện một chiều để tạo ra từ trường cần thiết cho máy phát đồng bộ, đảm bảo khả năng phát công suất theo yêu cầu và duy trì điện áp đầu cực ổn định, phù hợp với điều kiện vận hành của lưới điện mà máy phát hòa vào. Trong trường hợp tần số máy phát tăng cao, ví dụ khi xảy ra sự cố mất phụ tải, hệ thống kích từ có chức năng khôi phục nhanh điện áp về giá trị định mức và giữ ổn định vận hành.

Hệ thống kích từ có khả năng thực hiện các chức năng điều khiển chính xác ngay cả trong các khoảng thời gian xảy ra nhiễu loạn quá độ, chẳng hạn như sự cố ngắn mạch trên lưới điện cao áp, khi mà các rơle bảo vệ thường xử lý và loại trừ sự cố trong khoảng 0,125 giây. Ngoài ra, hệ thống cũng được thiết kế để có thể tăng cường dòng kích từ (chế độ cưỡng bức kích từ) khi cần thiết. Mức điện áp cực đại (điện áp trần) của hệ thống kích từ được đảm bảo không nhỏ hơn hai lần điện áp đầu cực máy phát ở điều kiện vận hành định mức về công suất.

Sự suy giảm dao động giữa máy phát và lưới điện được duy trì tích cực trong toàn bộ dải vận hành nằm trong giới hạn khả năng của tổ máy. Hệ thống kích từ đóng vai trò chủ đạo trong việc làm giảm biên độ dao động dưới các điều kiện này, thông qua việc sử dụng các tín hiệu phản hồi ổn định, lấy từ góc lệch giữa rotor và stator hoặc từ công

suất phát ra. Khi có sự thay đổi nhanh về công suất tuabin do điều chỉnh từ hệ thống điều tốc, các tín hiệu phản hồi giúp hạn chế mức dao động điện áp tại đầu cực máy phát, đảm bảo sai lệch không vượt quá 2% so với giá trị định mức khi máy phát đang vận hành nối lưới.

### **1.1.3. Các thành phần chính của hệ thống kích từ**

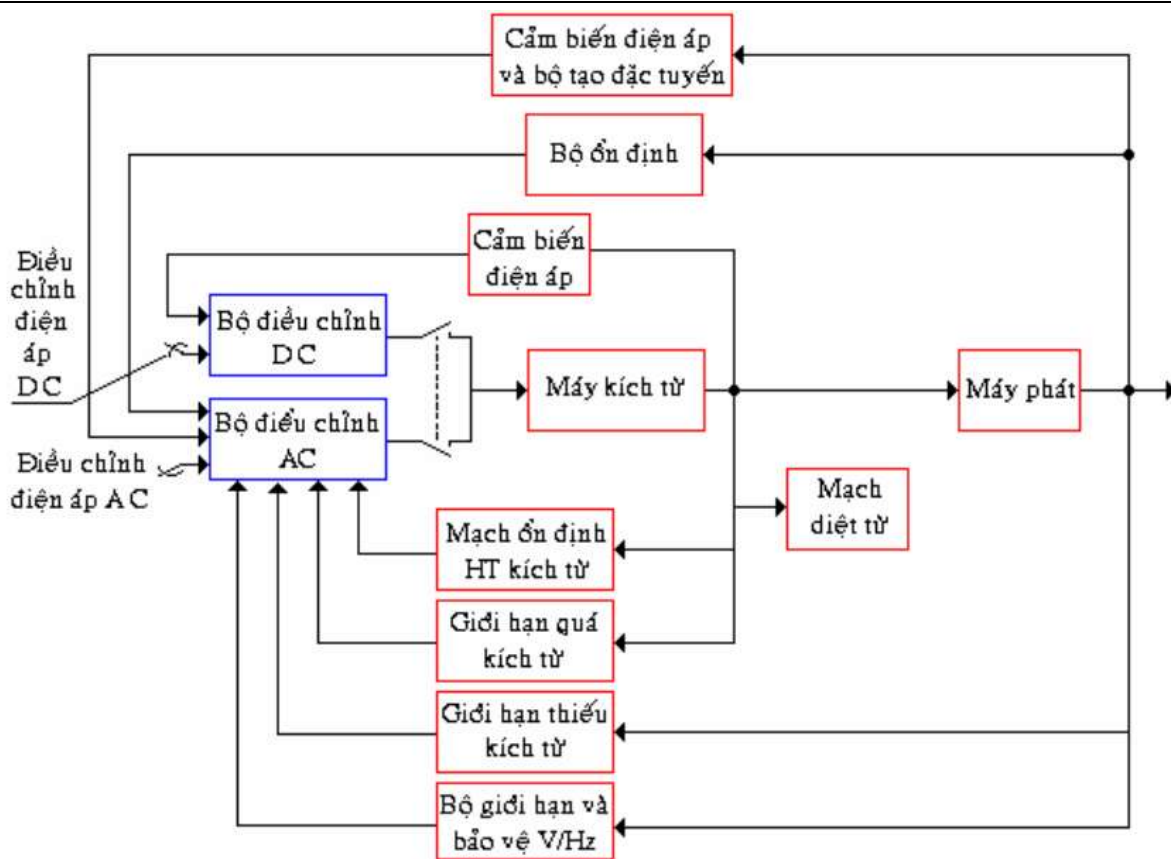
Thiết bị kích từ bao gồm máy biến áp kiểu khô, các bộ chỉnh lưu thyristor, bộ điều chỉnh tự động điện áp AVR, bộ phận diệt từ, thiết bị bảo vệ quá áp và tất cả trang thiết bị cần thiết cho việc điều khiển, bảo vệ hệ thống kích từ và máy phát trong các điều kiện vận hành bình thường và sự cố.

Bộ tự động điều chỉnh điện áp AVR đóng vai trò quan trọng trong hệ thống tổ máy phát điện, nếu mất tính năng tự động điều chỉnh này thì chất lượng điện cung cấp (điện áp) không đáp ứng được yêu cầu của hệ thống thiết bị. Bộ AVR sử dụng nguyên lý điều chỉnh PID theo độ lệch điện áp đầu cực máy phát, nó cũng có chức năng điều chỉnh hằng số hệ số công suất và hằng số dòng điện trường.

### **1.1.4. Chức năng điều chỉnh của hệ thống kích từ**

Hệ thống kích thích hiện đại gồm nhiều chức năng như: Điều chỉnh, giới hạn và bảo vệ.

- Chức năng điều khiển, điều chỉnh mỗi đại lượng cụ thể tại các cấp yêu cầu.
- Chức năng giới hạn đảm bảo rằng các đại lượng vận hành (điện áp, dòng điện, tốc độ, công suất) không vượt quá các giá trị đặt.
- Chức năng bảo vệ phát hiện các phần tử bị sự cố hoặc hoạt động bất thường và nhanh chóng tách nó ra khỏi hệ thống.



Hình 1. 1. Mạch bảo vệ và điều khiển của hệ thống kích từ

### 1.1.4.1. Bộ điều chỉnh AC và DC

Chức năng cơ bản của bộ điều chỉnh AC là duy trì điện áp stator máy phát. Ngoài ra còn có chức năng bảo vệ và điều khiển phụ khác thông qua bộ điều chỉnh AC để điều khiển điện áp kích thích máy phát.

- Bộ điều chỉnh DC giữ cho điện áp kích thích máy phát không đổi (thường đưa vào điều khiển bằng tay). Nó thường được sử dụng cho việc kiểm tra, khởi động và dự phòng khi bộ điều chỉnh AC bị sự cố.
- Dùng điều chỉnh điểm đặt để hiệu chỉnh bổ sung điện áp kích thích. Để thuận tiện điểm đặt được hiệu chỉnh tự động theo sai lệch về điện áp và công suất phản kháng.
- Các nguyên tắc làm việc của bộ điều chỉnh điện áp:

#### a) Điều chỉnh Modul dòng điện máy phát hoặc theo đại lượng nhiễu $|I_F|$

Dòng điện máy phát  $I_F$  là một trong những yếu tố chính làm thay đổi điện áp đầu cực máy phát. Dòng kích thích là hàm số của dòng  $I_F$ .

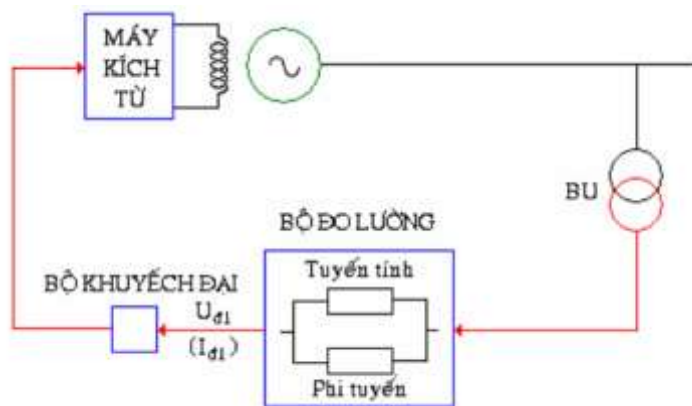
Khi P không đổi mà  $I_F$  thay đổi, ví dụ nó tăng lên sẽ làm UF giảm theo nhưng nhờ thành phần  $I_F$  được điều chỉnh tỷ lệ với  $|I_F|$  đưa tới tăng, nên sức điện động máy phát tăng theo. Kết quả là UF được duy trì ở mức cần thiết. Tuy nhiên kiểu điều chỉnh trên vẫn còn nhược điểm là chưa tính tới giá trị  $\cos\varphi$ . Vì với cùng giá trị  $I_F$  như nhau nhưng phụ tải nào có  $\cos\varphi$  nhỏ sẽ làm cho điện áp máy phát giảm nhiều hơn. Do vậy ngày nay phương pháp này không còn được sử dụng. [4]

**b) Điều chỉnh theo dòng điện stator máy phát**

Tín hiệu điều chỉnh chính của hệ thống kích từ là dòng kích từ toàn phần  $I_F$ , trong đó đã bao gồm thành phần phản ánh hệ số công suất ( $\cos\varphi$ ) của tải – đây chính là nguyên lý của hệ thống kích từ compound pha. Việc xét đến thành phần  $\cos\varphi$  giúp hệ thống kích từ điều chỉnh chính xác mức kích từ cần thiết, không chỉ phụ thuộc vào tải tác dụng mà còn bù đắp ảnh hưởng của tải phản kháng. Nhờ đó, điện áp đầu cực máy phát được giữ ổn định hơn trong các điều kiện vận hành thực tế, kể cả khi tải biến đổi về góc pha hay hệ số công suất. [4]

Cụ thể, khi tải có hệ số công suất thấp (nhiều tải phản kháng), dòng  $I_F$  được điều chỉnh tăng lên để bù lại sụt áp phản kháng, đảm bảo điện áp đầu cực không giảm ngoài giới hạn cho phép. Ngược lại, khi tải có hệ số công suất cao (gần thuần trở), hệ thống tự động giảm kích thích để tránh tăng áp không cần thiết. Nhờ cơ chế này, hệ thống kích từ compound pha giúp máy phát vận hành ổn định, cải thiện chất lượng điện áp và nâng cao độ tin cậy cung cấp điện.

**c) Điều chỉnh theo độ lệch điện áp  $\Delta U_F$**



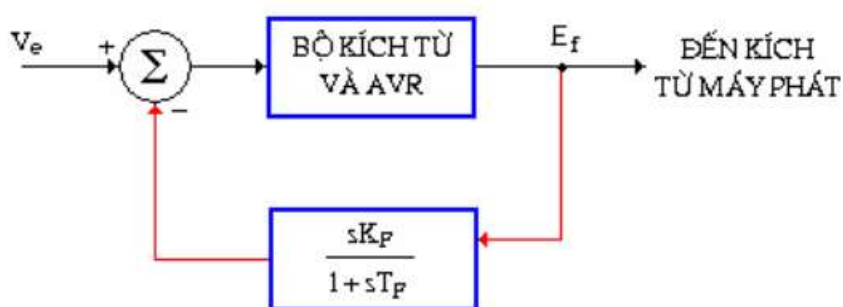
Hình 1. 2. Điều chỉnh theo độ lệch điện áp

Tín hiệu điều chỉnh tỷ lệ với độ lệch điện áp:  $I_F = f(I_{TT} - I_{FT})$ . Để phát hiện độ lệch  $\Delta U_F$  người ta dùng bộ phận đo lường gồm 2 phần tử: Phần tử tuyến tính cho dòng  $I_{TT}$  tỷ lệ với điện áp máy phát. Phần tử không tuyến tính  $I_{FT}$  không phụ thuộc tuyến tính vào điện áp máy phát. Tín hiệu đo lường là hiệu số của hai dòng này. [4]

- Tín hiệu đo lường tỷ lệ với độ lệch pha điện áp có thể là điện áp hoặc dòng điện tương ứng theo bộ khuếch đại sau nó.
- Bộ điều chỉnh này làm việc đơn giản, hiệu quả cho các máy phát có điện áp thấp và dòng điện nhỏ khoảng vài MVA.

### 1.1.4.2. Mạch ổn định hệ thống kích từ

Hệ thống kích từ bao gồm các phần tử có đặc tính quán tính thời gian lớn, dẫn đến thời gian đáp ứng chậm và đặc tính động không cao, đây là đặc điểm điển hình của các hệ thống kích từ loại AC và DC. Nếu không áp dụng biện pháp điều chỉnh, hoặc nếu chỉ sử dụng bộ điều chỉnh với hệ số khuếch đại rất thấp ở trạng thái xác lập, hệ thống điều khiển kích từ đặc biệt khi máy phát ở chế độ hở mạch sẽ trở nên không ổn định. Để đảm bảo hệ thống kích từ vận hành ổn định, người ta thường sử dụng các mạch bù nối tiếp hoặc mạch bù hồi tiếp nhằm cải thiện đặc tính động của hệ thống điều khiển. Trong thực tế, phổ biến nhất là sử dụng bộ bù hồi tiếp vi phân, như minh họa ở Hình 1.3. Tác dụng chính của bộ bù này là giảm thiểu sự lệch pha do ảnh hưởng của quán tính hệ thống trong một dải tần số nhất định, từ đó nâng cao khả năng ổn định và hiệu quả vận hành của máy phát khi hoạt động ở chế độ độc lập.



Hình 1. 3. Bộ ổn định hệ thống kích từ có bộ bù nối tiếp

Hệ thống tự động điều chỉnh điện áp máy phát đảm bảo khả năng phân phối công suất phản kháng một cách độc lập, bao gồm cả trong các tình huống như mang tải trước

khi hòa đồng bộ hoặc khi một phần tải bị cắt ra khỏi hệ thống. Các thông số phản hồi trong hệ thống có thể được điều chỉnh để nâng cao hiệu quả vận hành của tổ máy. Tùy thuộc vào cấu hình của hệ thống kích từ, hệ thống điều khiển có thể bao gồm một vòng điều chỉnh chính ở bên ngoài và các vòng điều chỉnh phụ bên trong. Đối với hệ thống kích từ tĩnh, do có độ trễ rất nhỏ nên thường không cần trang bị thêm các bộ ổn định để duy trì tính ổn định khi máy phát vận hành ở chế độ độc lập.

Bên cạnh đó, bộ ổn định hệ thống điện (PSS – Power System Stabilizer) sử dụng các tín hiệu từ thiết bị phụ trợ để tác động lên hệ thống kích từ, từ đó cải thiện đặc tính động của toàn bộ hệ thống điện. Các tín hiệu đầu vào điển hình cho PSS bao gồm tốc độ quay của trục, tần số và công suất tại đầu cực máy phát.

### 1.1.5. Các bộ giới hạn và bảo vệ

Trước khi tìm hiểu vai trò của các bộ giới hạn, chúng ta cần biết các giới hạn khả năng phát công suất của máy phát.

#### 1.1.5.1. Giới hạn khả năng phát công suất phản kháng

##### ❖ Đường cong khả năng phát công suất phản kháng

Máy phát đồng bộ được thiết kế với công suất biểu kiến cực đại và hệ số công suất danh định, thường ở mức 0,85 hoặc 0,9 trễ, để đảm bảo vận hành liên tục mà không gây ra hiện tượng quá nhiệt. Khả năng cung cấp công suất phản kháng liên tục tại đầu cực máy phát bị ràng buộc bởi ba giới hạn chính: giới hạn dòng phần ứng, giới hạn dòng kích từ, và giới hạn nhiệt tại vùng biên. Ba yếu tố này xác định phạm vi vận hành an toàn của máy phát, đảm bảo duy trì độ tin cậy và tuổi thọ của thiết bị khi hoạt động trong hệ thống điện.

##### a) Giới hạn dòng phần ứng (dòng stator máy phát)

Khi máy phát đồng bộ hòa đồng bộ vào lưới và bắt đầu tăng công suất phát, dòng điện sẽ xuất hiện trong cuộn dây phần ứng (stator). Do cuộn dây stator có điện trở, dòng phần ứng này gây ra tổn hao công suất dưới dạng nhiệt  $R I_F^2$ . Nhiệt lượng sinh ra từ tổn hao này sẽ làm tăng nhiệt độ dây dẫn, và phần nhiệt này phải được tản ra môi trường xung quanh.

Một trong những giới hạn quan trọng trong vận hành máy phát là giới hạn dòng cực đại của phần ứng, nhằm tránh hiện tượng quá nhiệt làm suy giảm hoặc phá hủy cách

điện của cuộn dây stator. Do đó, khi máy hoạt động ở chế độ định mức, dòng phản ứng phải được giới hạn ở mức sao cho không vượt quá khả năng tản nhiệt của máy. Giới hạn này tương ứng với công suất biểu kiến cực đại có thể phát liên tục mà không ảnh hưởng đến độ bền cách điện và tuổi thọ thiết bị. Công suất phát ra được tính như sau:

$$S = P + jQ = \dot{E}_F \dot{I}_F = |E_F| |I_F| (\cos\phi + j \sin\phi) \quad (1.1)$$

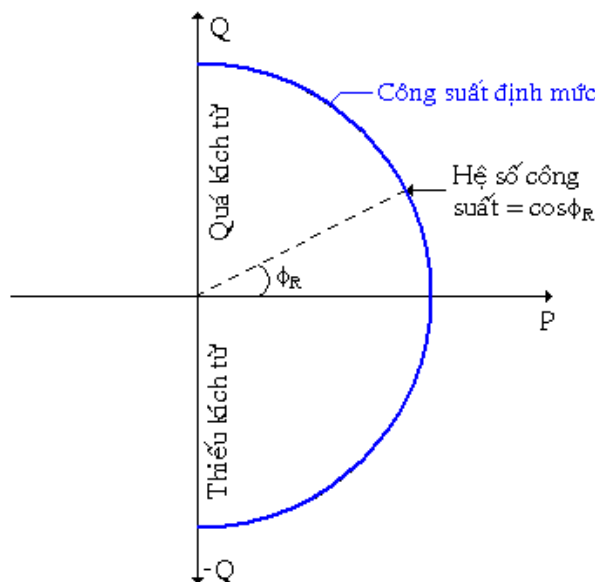
Trong đó:  $\phi$  - là góc của hệ số công suất;  $E_E$  - sức điện động;  $I_F$  - dòng điện phản ứng.

Ta có:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = (\sqrt{P^2 + Q^2})^2 \quad (1.2)$$

Đây là phương trình đường tròn với bán kính  $\sqrt{P^2 + Q^2}$

Trên mặt phẳng P, Q có thể biểu diễn đường giới hạn dòng phản ứng, đó là vòng tròn tâm với tâm tại gốc tọa độ và bán kính bằng công suất biểu kiến định mức và bằng  $\sqrt{P^2 + Q^2}$ , hình 1.4.



Hình 1. 4. Giới hạn dòng điện phản ứng

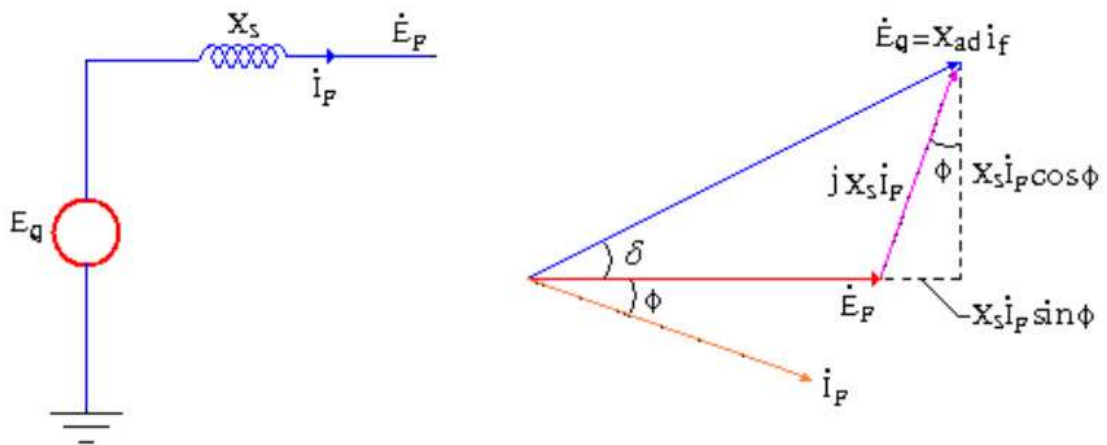
b) Giới hạn dòng kích thích

Khi dòng kích từ chạy qua cuộn dây rotor, nó tạo ra sức từ động cần thiết để hình thành từ thông trong mạch từ của máy phát, đồng thời cung cấp công suất cho năng

lượng tích lũy trong mạch từ. Phần năng lượng này bao gồm hai thành phần: một phần tổn hao trong lõi sắt dưới dạng nhiệt (do tổn hao từ và tổn hao dòng xoáy), phần còn lại là công suất phản kháng, biểu thị cho năng lượng biến thiên tuần hoàn trong từ trường. Lưu ý rằng công suất phản kháng này không bị tiêu tán trong lõi sắt mà hoàn toàn do nguồn kích từ cấp phát và hấp thụ qua lại.

Do đó, công suất phản kháng có ảnh hưởng trực tiếp đến yêu cầu về dòng kích từ và kéo theo các tổn hao trong mạch kích từ (bao gồm tổn hao điện trở và tổn hao do dòng điện mạch kích từ). Chính vì vậy, giới hạn dòng kích từ trở thành một trong các giới hạn quan trọng thứ hai cần được xem xét khi vận hành máy phát, nhằm đảm bảo không vượt quá khả năng chịu tải của mạch rotor và tránh làm suy giảm tuổi thọ cách điện rotor.

Với  $X_d = X_q = X_s$ , ta có mạch tương đương và giản đồ vectơ hình 1.5



Hình 1.5. Sơ đồ mạch tương đương và giản đồ vectơ

Với  $E_q = X_{ad} i_f$ ;  $X_{ad}$  là điện kháng rotor;  $i_f$  là dòng kích thích rotor

$$\text{Ta có: } (X_{ad} I_f) \sin \delta = X_s I_F \cos \phi \quad (1.3)$$

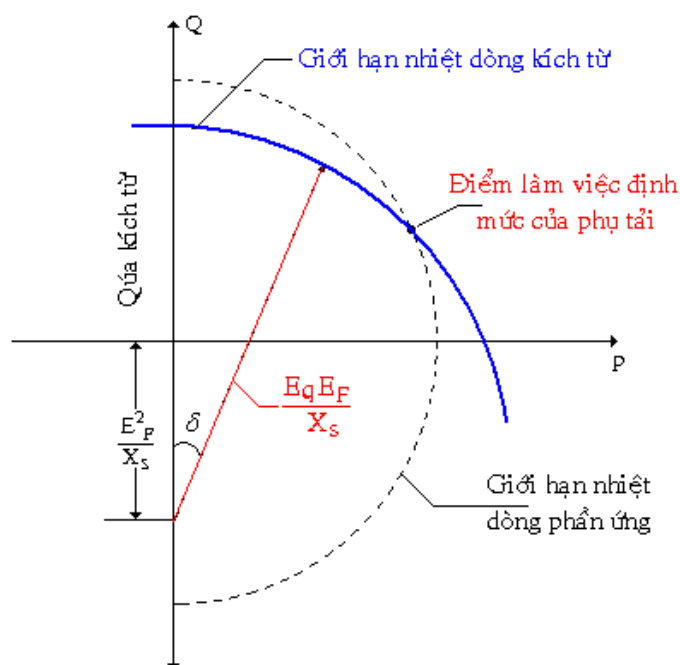
$$\begin{aligned} (X_{ad} I_f) \cos \delta &= E_F + X_s I_F \sin \phi \\ \Rightarrow I_F \cos \phi &= \frac{X_{ad} i_f \sin \delta}{X_s} ; I_F \sin \phi = \frac{X_{ad} i_f \cos \delta - E_F}{X_s} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$P = E_F I_F \cos \phi \Rightarrow P = \frac{X_{ad}}{X_s} E_F i_f \sin \delta = \frac{E_q E_F}{X_s} \sin \delta \quad (1.5)$$

$$Q = E_F I_F \sin \phi \Rightarrow Q = \frac{X_{ad}}{X_s} E_F i_f \cos \delta - \frac{E_F^2}{X_s} = \frac{E_q E_F}{X_s} \cos \delta - \frac{E_F^2}{X_s} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Với: } P^2 &= \frac{E_q^2 E_F^2}{X_S^2} \sin^2 \delta^2 ; Q^2 = \frac{E_q^2 E_F^2}{X_S^2} \cos^2 \delta^2 - \frac{E_F^4}{X_S^2} - \frac{2QE_F^2}{X_S} \\ \Rightarrow P^2 + \left(Q + \frac{E_F^2}{X_S}\right)^2 &= \left(\frac{E_q E_F}{X_S}\right)^2 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Quan hệ giữa công suất tác dụng và công suất phản kháng đối với dòng kích thích là vòng tròn có tâm nằm trên trục Q cách gốc toạ độ một đoạn là  $(-E_F^2 / X_d)$  và có bán kính bằng  $(X_{ad} / X_S) E_F I_f$ . Vì vậy tác dụng của dòng kích thích định mức cực đại trên khả năng của máy phát có thể được trình bày như Hình 1.5. Từ hình vẽ ở trạng thái xác lập, điểm làm việc (P,Q) của máy nằm trong phần tư thứ nhất. Điểm làm việc định mức (với công suất biểu kiến định mức) của máy là giao điểm của hai đường cong.



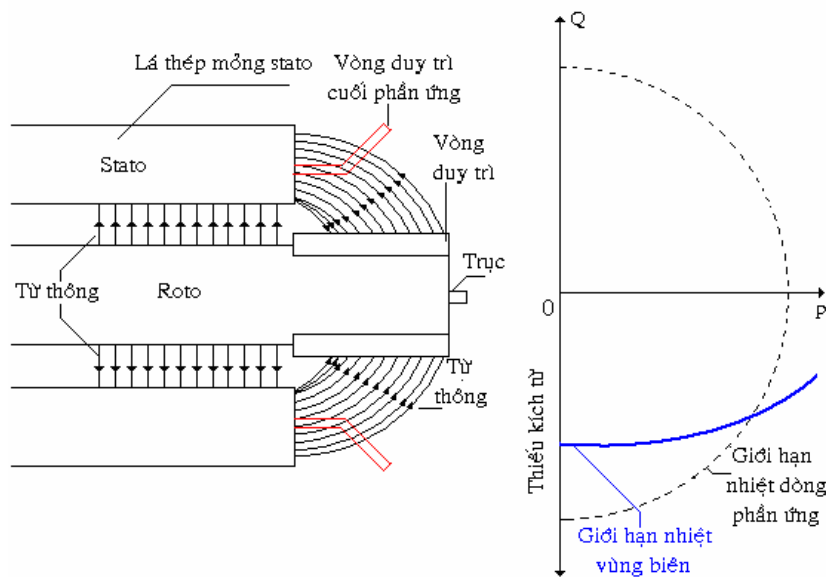
Hình 1. 6. Giới hạn nhiệt dòng kích thích

### c) Giới hạn vùng phát nóng biên

Giới hạn nhiệt tại vùng biên của phần ứng là giới hạn quan trọng thứ ba trong vận hành máy điện đồng bộ. Khi máy phát làm việc ở chế độ thiếu kích từ, từ thông tại các cuộn dây ở hai đầu phần ứng của stator có xu hướng tản ra ngoài vuông góc với các lớp thép mỏng của lõi stator. Hiện tượng này gây ra dòng điện xoáy trong các lớp thép, dẫn đến phát nhiệt cục bộ tại vùng biên.

Ở chế độ quá kích từ, dòng kích từ lớn làm cho mạch từ bão hòa, từ thông tản ở đầu cuộn dây phần ứng giảm xuống, hạn chế hiện tượng phát nhiệt này. Tuy nhiên, trong chế độ thiếu kích từ, do dòng kích từ nhỏ và mạch từ chưa bão hòa, từ thông tản tại đầu phần ứng tăng lên đáng kể. Khi đó, từ thông tản do dòng phần ứng kết hợp với từ thông từ mạch kích từ tạo ra một từ thông hướng tâm mạnh tại vùng biên, gây phát nhiệt cường độ cao. Điều này làm giảm giới hạn công suất ngõ ra của máy phát, đặc biệt rõ rệt đối với các máy phát có rotor dây quấn.

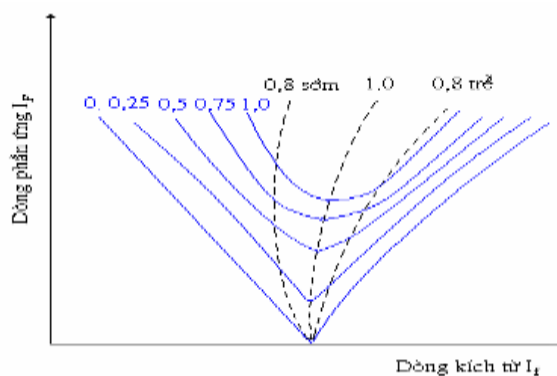
Giới hạn nhiệt tại vùng biên này thường được xem xét song song với giới hạn nhiệt do dòng phần ứng, nhằm đảm bảo máy vận hành an toàn, không vượt quá khả năng chịu nhiệt của hệ thống cách điện và lõi thép.



Hình 1. 7. Mặt cắt phần cuối máy phát và giới hạn nhiệt vùng biên

❖ Đường cong điện áp V và đường cong tổng hợp

a) Đường cong điện áp V

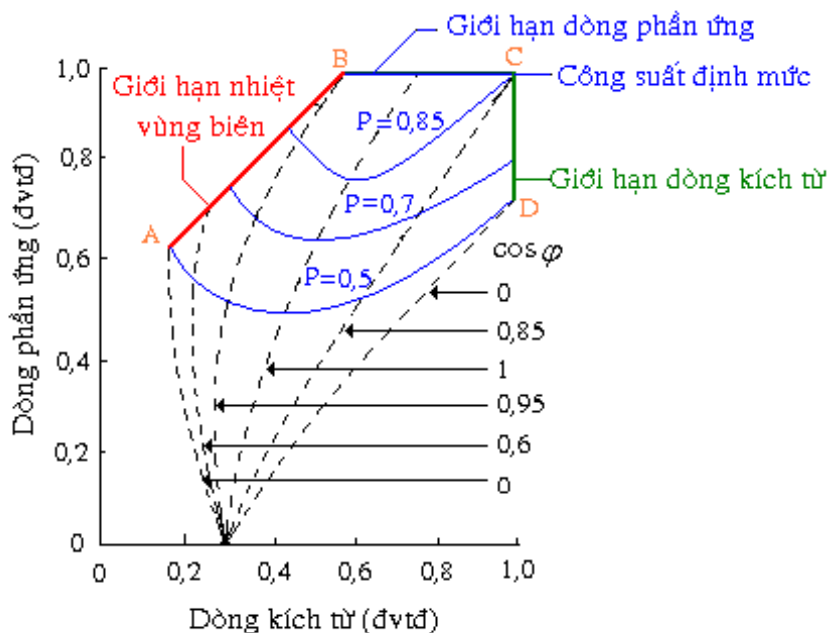


Hình 1. 8. Đường cong điện áp V

Đặc tính hình V thể hiện mối quan hệ giữa dòng điện phản ứng và dòng kích từ trong điều kiện điện áp không đổi (thường là điện áp định mức) và công suất tác dụng không đổi. Khi công suất tác dụng được giữ cố định, dòng phản ứng và do đó hệ số công suất  $\cos\varphi$  có thể được điều chỉnh thông qua việc thay đổi dòng kích từ. Trong trường hợp này, dòng phản ứng đạt giá trị nhỏ nhất khi hệ số công suất bằng 1 (thuần trở), và sẽ tăng lên khi  $\cos\varphi$  giảm, tức khi tải mang tính cảm hoặc dung nhiều hơn.

Trên đồ thị đặc tính, các đường chấm biểu diễn tập hợp các điểm có cùng hệ số công suất  $\cos\varphi$ . Phía bên phải của đường đặc tính tại  $\cos\varphi=1$  là vùng quá kích từ, tương ứng với chế độ tải cảm (dòng phản ứng trễ pha so với điện áp). Ngược lại, phía bên trái là vùng thiếu kích từ, tương ứng với chế độ tải dung (dòng phản ứng sớm pha hơn điện áp). Đồ thị đặc tính hình V thường được vẽ ứng với các mức công suất tác dụng khác nhau, ví dụ  $P=0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$  pu (đơn vị tương đối).

b) Đường cong điện áp V và đường cong tổng hợp



Hình 1. 9. Đường cong điện áp V và đường cong tổng hợp cho máy phát tại điện áp phản ứng định mức

Hình 1.9 minh họa các giới hạn khả năng phát công suất phản kháng của máy phát điện có hệ thống làm mát rotor và stator bằng khí hydro ở áp suất 45 PSIG. Trên biểu đồ, các đoạn AB, BC, CD lần lượt thể hiện ba giới hạn vận hành chính: giới hạn nhiệt tại vùng biên, giới hạn nhiệt của dòng phản ứng, và giới hạn dòng kích từ.

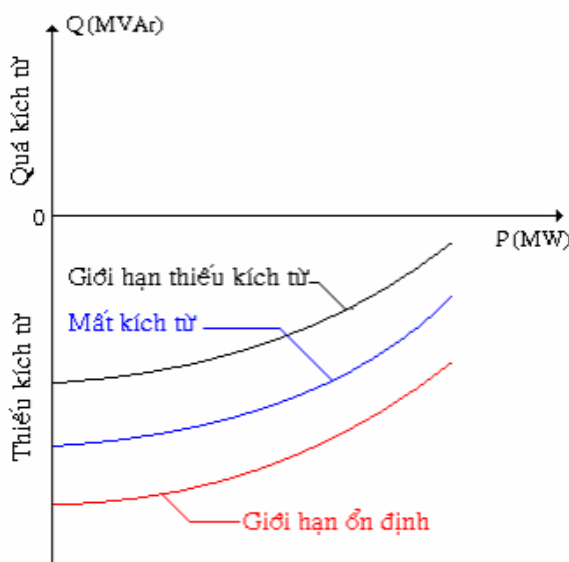
Trục tung của biểu đồ biểu diễn điện áp đầu cực stator ở giá trị định mức, đồng thời dòng phản ứng và công suất biểu kiến ngõ ra cũng được thể hiện theo đơn vị tương đối (pu), trong đó 1 pu tương ứng với giá trị định mức. Trục hoành biểu diễn dòng kích thích dưới dạng đơn vị thường (per unit), với 1 pu đại diện cho dòng kích thích cần thiết để phát công suất biểu kiến định mức tại hệ số công suất danh định.

### 1.1.5.2. Bộ giới hạn thiếu kích thích

Bộ giới hạn thiếu kích thích (Under Excitation Limiter – UEL) được sử dụng để ngăn ngừa việc giảm kích từ máy phát xuống mức thấp có thể gây mất ổn định hệ thống (ở trạng thái xác lập) hoặc vượt quá giới hạn nhiệt cho phép tại lõi sắt stator. Các thiết bị này còn được gọi là bộ giới hạn thiếu kích thích theo dòng phản kháng hoặc bộ giới hạn kích thích tối thiểu.

Tín hiệu điều khiển của bộ UEL có thể được lấy từ các đại lượng điện áp và dòng điện, hoặc từ công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát. Giới hạn bảo vệ được xác định dựa trên ngưỡng trị đặt mà khi tín hiệu vượt quá, bộ giới hạn sẽ kích hoạt can thiệp để giảm nguy cơ mất ổn định hoặc quá nhiệt. Việc thiết lập đặc tính của bộ UEL là cơ sở quan trọng để đảm bảo chức năng bảo vệ hệ thống, bao gồm cả bảo vệ chống bất ổn định và bảo vệ quá nhiệt cuộn dây stator.

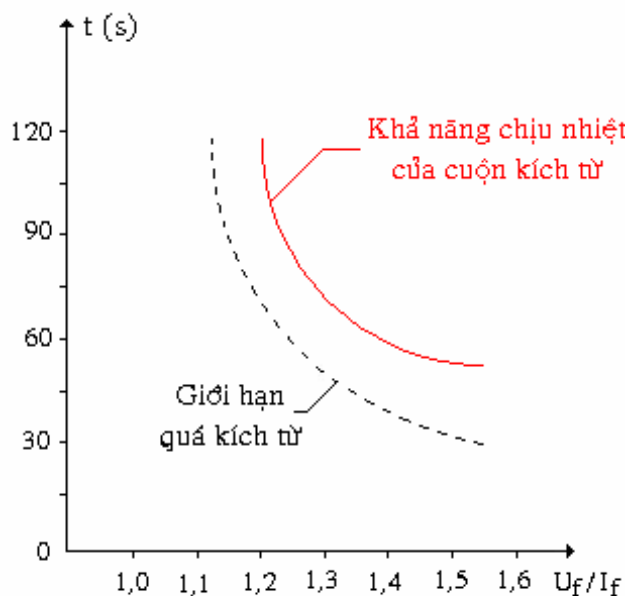
Ngoài ra, bộ giới hạn thiếu kích thích thường được phối hợp làm việc với bộ bảo vệ mất kích từ nhằm đảm bảo độ tin cậy cao hơn. Khi bộ UEL lấy tín hiệu vào từ điện áp và dòng điện stator của máy phát, các đặc tính bảo vệ sẽ được thể hiện dưới dạng các đường cong giới hạn trên mặt phẳng công suất P–Q, như minh họa trong Hình 1.10.



Hình 1. 10. Sự phối hợp giữa phân tử thiếu, mất kích thích và giới hạn ổn định

### 1.1.5.2. Bộ giới hạn quá kích thích

Bộ giới hạn quá kích thích (Over Excitation Limiter – OEL) có nhiệm vụ bảo vệ máy phát không bị quá nhiệt do dòng kích từ vượt quá mức cho phép. Thiết bị này còn được gọi là bộ giới hạn kích thích cực đại. Cuộn kích từ của máy phát được thiết kế để vận hành liên tục ở dòng kích thích đáp ứng cho tải định mức, với khả năng chịu đựng nhiệt độ trong các điều kiện quá tải tạm thời được xác định theo các tiêu chuẩn nhất định, chẳng hạn như qua các đường cong đặc tính nhiệt (ví dụ Hình 1.11).



Hình 1. 11. Sự kết hợp của giới hạn quá kích thích với khả năng chịu nhiệt của cuộn dây kích thích

Chức năng chính của OEL là phát hiện kịp thời khi dòng kích thích tăng cao vượt mức cho phép, từ đó tác động lên bộ điều chỉnh điện áp (AVR) ở chế độ AC để hạ dòng kích thích trở về giá trị đặt trước, thường trong khoảng 100–110% dòng kích thích định mức. Nếu bộ điều chỉnh AC không thực hiện được việc này, OEL sẽ ngắt tín hiệu điều khiển đến bộ AC và chuyển điều khiển sang bộ điều chỉnh DC. Trong trường hợp bộ điều chỉnh DC cũng không thể giảm kích thích về mức an toàn, OEL sẽ can thiệp bằng cách tác động cắt máy cắt kích từ và tiến tới ngắt máy phát ra khỏi hệ thống

### 1.1.5.2. Bộ giới hạn V/Hz và bảo vệ

Bộ giới hạn tỉ số điện áp/tần số (V/Hz) được sử dụng để bảo vệ máy phát khỏi hư hỏng do hiện tượng vượt quá dòng từ hóa, vốn có thể xảy ra khi máy phát làm việc dưới điều kiện tần số thấp kết hợp với quá điện áp. Dòng từ hóa quá mức là một trong những nguyên nhân chính gây ra quá nhiệt trong lõi sắt của máy phát, dẫn đến suy giảm tuổi thọ hoặc hư hỏng thiết bị.

Giới hạn V/Hz đặc trưng của máy phát thường được cung cấp dưới dạng bảng thông số, giúp định rõ ngưỡng vận hành an toàn để bộ giới hạn này có thể phát hiện và can thiệp kịp thời, đảm bảo máy phát không vượt quá khả năng chịu đựng của hệ thống từ hóa.

*Bảng 1. 1: bảng giới hạn của đặc tính V/Hz*

|                          |      |     |      |     |          |
|--------------------------|------|-----|------|-----|----------|
| V/Hz (đvtđ)              | 1,25 | 1,2 | 1,15 | 1,1 | 1,05     |
| Thời gian phá huỷ (phút) | 0,2  | 1   | 6    | 20  | $\infty$ |

Bộ giới hạn V/Hz không chỉ điều khiển việc giới hạn điện áp kích từ mà còn đảm bảo giới hạn điện áp đầu cực máy phát khi tỉ số V/Hz vượt quá giá trị cài đặt. Khi giá trị V/Hz vượt quá ngưỡng cho phép trong khoảng thời gian cài đặt trước, bộ bảo vệ sẽ tác động ngắt máy phát ra khỏi hệ thống để ngăn ngừa hư hỏng.

Thông thường, bảo vệ V/Hz được thiết kế với hai cấp bảo vệ:

- Cấp thứ nhất được cài đặt ở mức V/Hz cao hơn với thời gian tác động ngắn hơn, nhằm phản ứng nhanh với các sự kiện nghiêm trọng.
- Cấp thứ hai có ngưỡng V/Hz thấp hơn nhưng thời gian tác động dài hơn, để bảo vệ trong các trường hợp vi phạm kéo dài nhưng ít nghiêm trọng hơn.

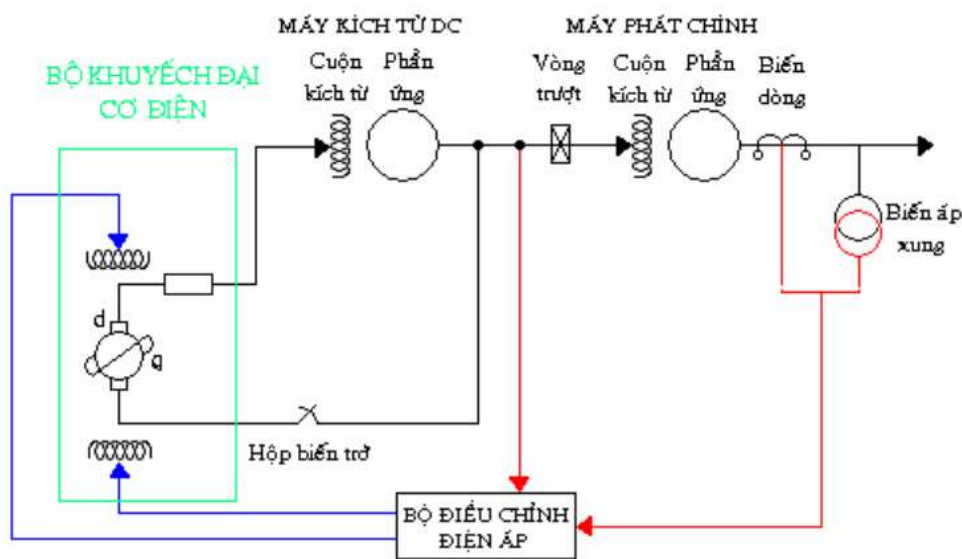
Khi sử dụng kết hợp với bộ giới hạn V/Hz, hệ thống bảo vệ này hoạt động như một tầng dự phòng bổ sung, giúp tăng cường độ tin cậy và an toàn vận hành của máy phát.

## 1.2. Các loại hệ thống kích từ

### 1.2.1. Hệ thống kích từ một chiều

Hệ thống kích thích một chiều sử dụng máy phát một chiều như nguồn năng lượng kích thích và cung cấp dòng điện cho rôto của máy điện đồng bộ thông qua các vòng trượt. Máy kích thích được kéo nhờ một động cơ hoặc gắn vào trục của máy phát. Nó có thể tự kích hoặc là kích thích độc lập. Khi kích thích độc lập từ trường của bộ kích thích được cấp bởi bộ kích thích nhỏ như là máy phát nam châm vĩnh cửu. Hệ thống kích thích một chiều là hệ thống ra đời sớm nhất vào khoảng năm 1920÷1960. Đến giữa những năm 1960 chúng được thay thế bằng các hệ thống kích thích xoay chiều hoặc hệ thống kích thích tĩnh, trong một vài trường hợp các bộ điều chỉnh điện áp độc lập được thay thế bằng các bộ điều chỉnh điện tử bán dẫn hiện đại.

Nó bao gồm một máy điện một chiều (DC) để cung cấp dòng một chiều cho cuộn kích thích máy phát chính thông qua các vòng trượt. Từ trường máy kích thích (DC) được biểu diễn bằng bộ khuếch đại điện cơ. Bộ khuếch đại điện cơ là loại máy điện đặc biệt của bộ khuếch đại quay. Nó là máy điện một chiều đặc biệt có 2 bộ chổi than đặt lệch nhau góc 90. Việc điều khiển từ trường cuộn dây được định vị trên trục (d), một cuộn bù mắc nối tiếp với phụ tải trên trục (d) sinh ra từ trường bằng và ngược chiều với phần ứng trên trục (d), do đó loại bỏ được phản hồi âm do sự phản ứng lại của dòng điện phần ứng. Bộ chổi than trên trục (q) được nối ngắn mạch. Công suất điều khiển từ trường rất nhỏ được yêu cầu để tạo ra dòng điện lớn ở phần ứng trên trục (q). Dòng điện trên trục (q) tạo ra theo nguyên tắc từ trường, năng lượng được yêu cầu để duy trì dòng điện trên trục (q) được cung cấp từ động cơ kéo bộ khuếch đại điện cơ. Kết quả là tạo ra một thiết bị khuếch đại công suất từ 10.000 ÷ 100.000 lần và hằng số thời gian nằm trong khoảng 0,02 ÷ 0,25 giây



Hình 1. 12. Hệ thống kích từ một chiều

### 1.2.2. Hệ thống kích từ xoay chiều

Hệ thống kích thích dạng này sử dụng máy phát xoay chiều làm nguồn năng lượng kích thích cho máy phát chính. Thường máy kích thích nối cùng trục với tuabin máy phát. Điện áp xoay chiều ở ngõ ra của bộ kích thích được chỉnh lưu có điều khiển (SCR) hoặc không điều khiển (Diode) để tạo ra dòng một chiều cần thiết cho từ trường máy phát. Bộ chỉnh lưu có thể là tĩnh hoặc quay.

Hệ thống kích thích xoay chiều tùy thuộc vào dạng chỉnh lưu có các dạng sau:

- Hệ thống chỉnh lưu tĩnh.
- Hệ thống chỉnh lưu quay.

### 1.2.3. Hệ thống kích từ tĩnh

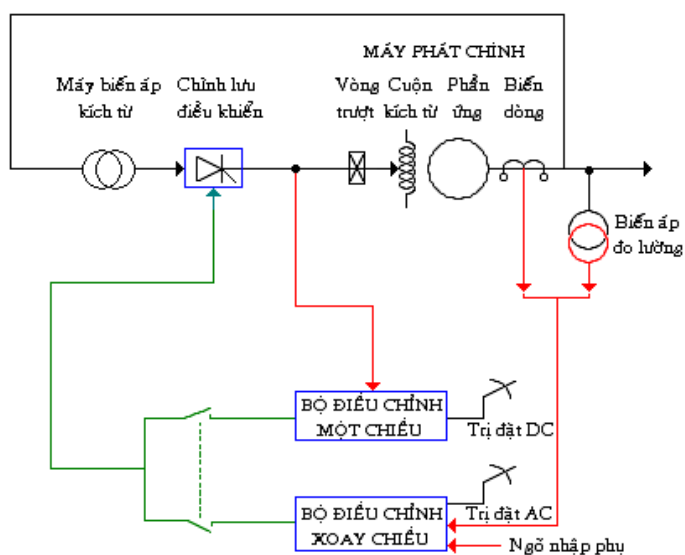
Tất cả các phần tử trong hệ thống kích thích tĩnh đều đứng yên.

Các bộ chỉnh lưu tĩnh được điều khiển hoặc không được điều khiển, cung cấp dòng kích thích trực tiếp cho từ trường chính nhờ các vòng trượt (vòng nhận điện).

Năng lượng cấp cho bộ chỉnh lưu được lấy từ máy phát chính (hoặc ở các trạm phụ) qua máy biến áp giảm áp xuống cấp thích hợp, đôi khi lấy từ cuộn phụ trong máy phát.

Khi máy phát mới khởi động chưa có nguồn áp cung cấp cho hệ thống kích thích, do đó cần phải có nguồn năng lượng khác trong vài giây để cung cấp dòng kích thích và năng lượng kích thích ban đầu cho máy phát. Phương pháp này được gọi là “kích thích ban đầu”, nguồn kích thường là nguồn acquy tự dùng nhà máy.

Năng lượng kích thích được cung cấp nhờ một máy biến áp kích thích lấy điện từ đầu cực máy phát hoặc các trạm tự dùng và được điều chỉnh bởi bộ chỉnh lưu có điều khiển. Hệ thống này vẫn có hằng số thời gian rất nhỏ.



Hình 1. 13. Hệ thống kích từ tĩnh

Điện áp ra cực đại của bộ kích thích phụ thuộc điện áp xoay chiều ngõ vào, vì vậy khi hệ thống bị sự cố sẽ làm cho điện áp đầu cực máy phát giảm xuống dẫn đến điện áp cực đại ở đầu ra bộ kích thích bị giảm theo.

Đối với máy phát nối với hệ thống có công suất lớn thì hệ thống này làm việc rất tốt.

Ngoài ra nó có thể bảo trì dễ dàng.

Hạn chế này được bù bằng đáp ứng gần như tức thời và khả năng thay đổi từ trường cường bức cao.

### 1.3. Bộ điều chỉnh điện áp AVR

#### 1.3.1. Nguyên lí hoạt động của bộ AVR

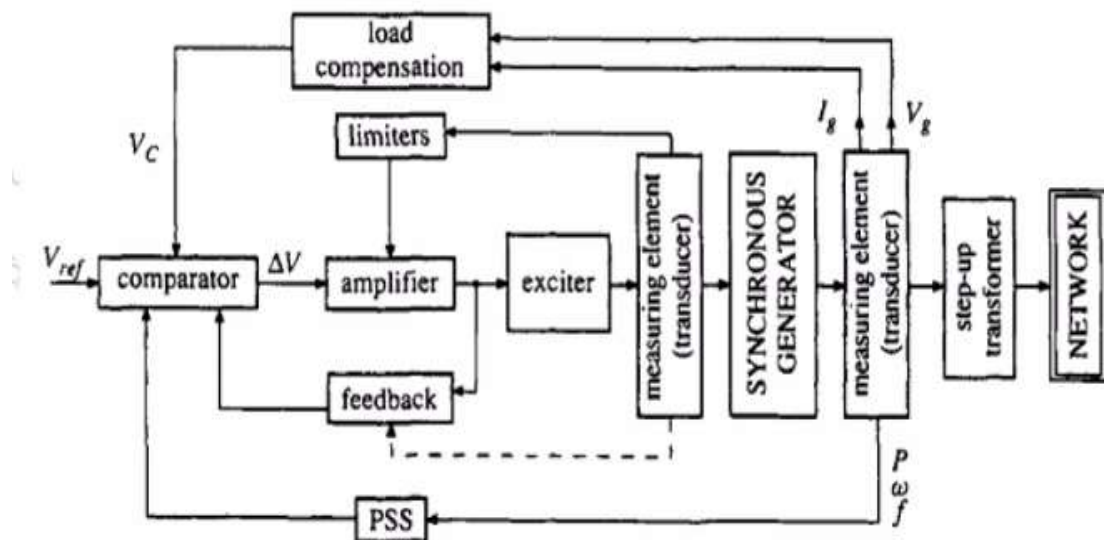
Bộ điều chỉnh điện áp tự động luôn luôn theo dõi điện áp đầu ra của máy phát điện, so sánh với một điện áp tham chiếu (giá trị đặt) để xuất lệnh tăng giảm dòng điện kích thích sao cho sai số giữa điện áp đầu cực máy phát và điện áp tham chiếu là nhỏ nhất ( $\rightarrow 0$ ). Muốn thay đổi điện áp đầu cực máy phát điện, ta chỉ cần thay đổi điện áp tham chiếu. Điện áp tham chiếu thường được đặt tại giá trị định mức khi máy phát vận hành độc lập (Isolated) hoặc là điện áp thanh cái, điện áp lưới tại chế độ vận hành hòa lưới (Paralled).

Khi khởi động tổ máy, tốc độ quay của rotor còn thấp, tần số phát ra sẽ thấp. Khi đó, bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR) sẽ có khuynh hướng tăng dòng kích thích lên sao cho đủ điện áp đầu ra như tham chiếu theo giá trị đặt hoặc điện áp lưới. Điều này dẫn đến quá kích thích: cuộn dây rotor sẽ bị quá nhiệt, các thiết bị nối vào đầu cực máy phát như biến thế chính, máy biến áp tự dòng... sẽ bị quá kích thích, bão hòa từ, và quá nhiệt. Vì vậy, thường tốc độ máy phát cần đạt đến 90% tốc độ định mức thì AVR mới được đưa vào làm việc.

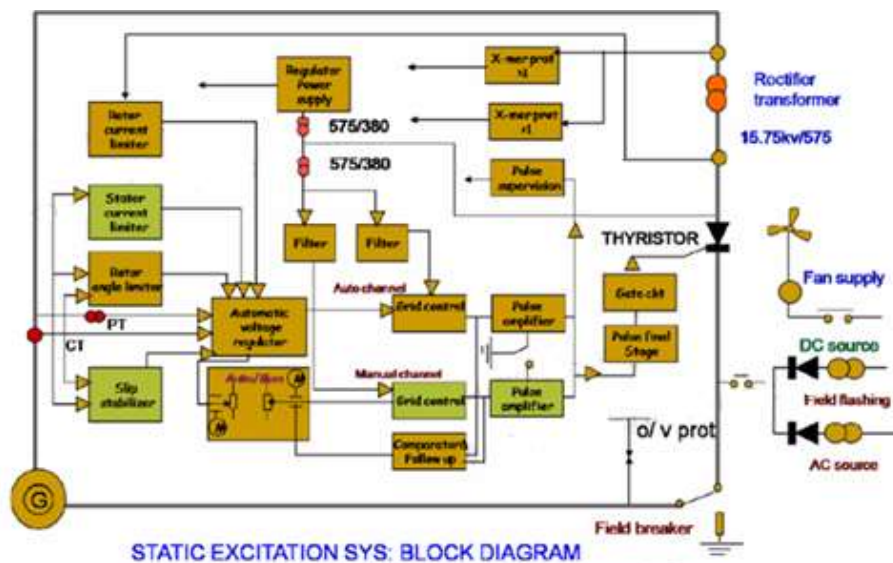
Khi máy phát chưa nối lưới, việc thay đổi dòng điện kích từ chỉ thay đổi điện áp đầu cực máy phát. Quan hệ giữa điện áp máy phát đối với dòng điện kích từ được biểu diễn bằng 1 đường cong, gọi là đặc tuyến không tải. (đặc tuyến V-A)

#### 1.3.2. Cấu trúc bộ AVR

Sơ đồ khối của thiết bị tự động điều chỉnh điện áp máy phát

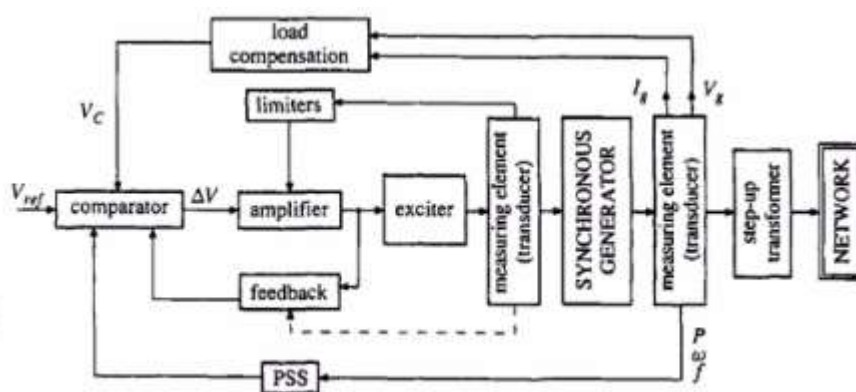
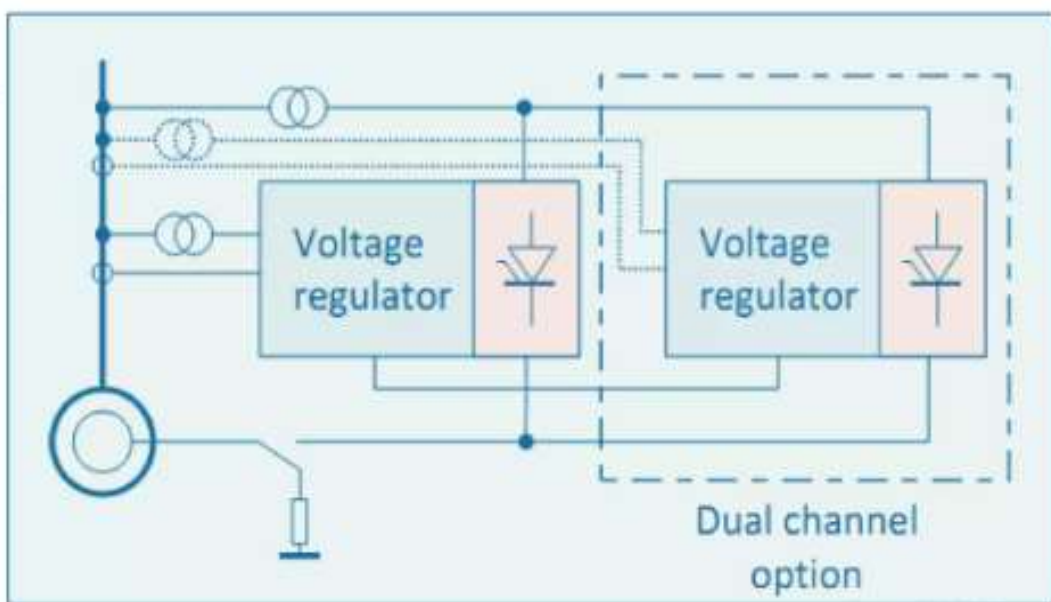


- Load compensation: Bộ phận bù tải
- Limiter: Bộ giới hạn dòng kích từ
- Comparator: Bộ so sánh
- Amplifier: Bộ khuếch đại
- PSS: Bộ ổn định công suất
- Measuring element (transducer): Phần tử đo lường
- Generator: Máy phát chính
- Step-up transformer: Biến áp tăng áp đầu cực
- Network: Phía hệ thống
- Sơ đồ khối chi tiết khác: [3]



Follow up Unit: Đảm bảo sự chuyển đổi mềm giữa chế độ tự động/chỉnh tay với các hệ thống kích từ kép (hai nhánh kích từ riêng lẻ): một nhánh được điều chỉnh chủ động, nhánh còn lại điều chỉnh phụ thuộc theo (follow up)

**Hệ thống kích từ kép (dual channel) [3]**



Bộ phận bù tải: được sử dụng khi cần điều khiển giữ không đổi điện áp tại nút phụ tải phía xa.

Điện áp rơi trên tổng trở từ máy phát đến tải:

$$V_c = \left| \overline{V_g} + (R_c + jX_c)\overline{I_g} \right| \tag{1.8}$$

Với:  $V_c$  : điện áp cần bù

$V_g$  : điện áp đầu cực máy phát

→ và  $X_c$  : tổng trở từ máy phát đến tải

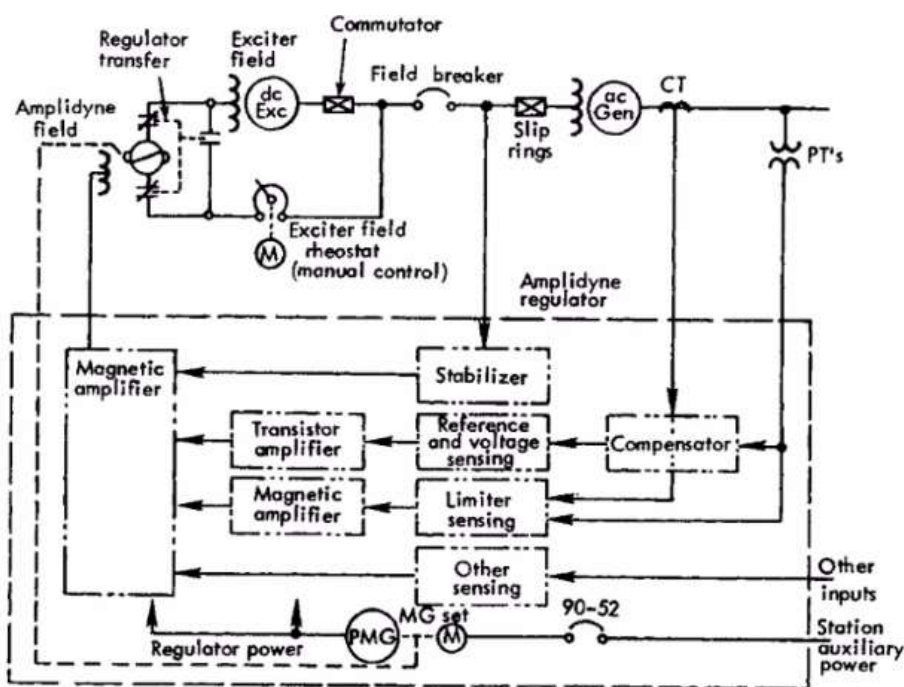
Khi không cần bù tải: đặt  $R_c=0$ ;  $X_c=0 \rightarrow$  khi đó nó sẽ giữ điện áp tại đầu cực máy phát

Bộ giới hạn dòng kích từ: giới hạn dòng kích từ cực đại và cực tiểu

Cuộn kích từ bị giới hạn về mặt phát nóng do đó phải giới hạn dòng kích từ cực đại

Với các hệ thống hiện đại: sử dụng hệ thống giới hạn dòng kích từ cực đại nhiều bậc: dòng kích từ lớn nhất cho phép tùy thuộc vào khoảng thời gian tồn tại.

Hệ thống giới hạn dòng kích từ là cần thiết để ngăn ngừa quá tải khi máy phát làm việc với hệ thống: tránh trường hợp thiếu công suất phản kháng lớn và máy phát sẽ cố điều chỉnh để bù lại sự thiếu hụt này.



#### 1.4. Kết luận

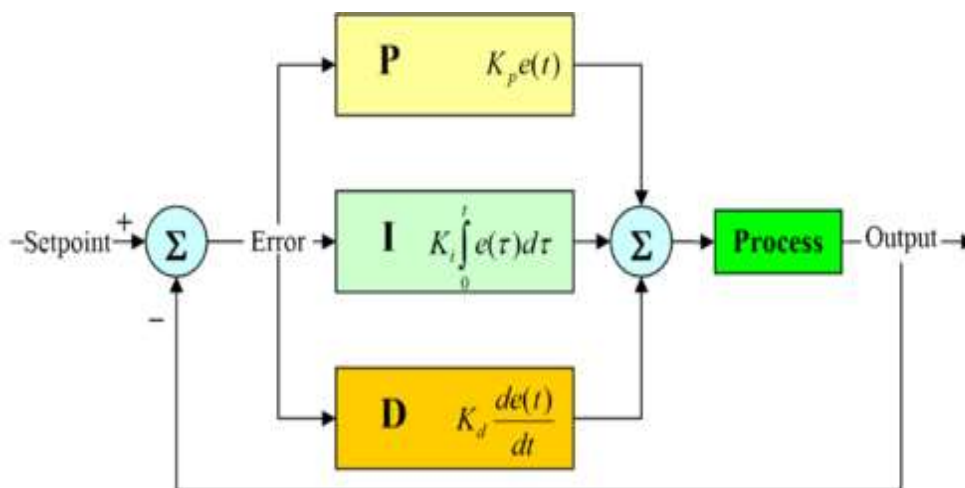
Ở chương 1, nhóm đã trình bày tổng quan về hệ thống kích từ, bao gồm các chức năng chính và nhiệm vụ cơ bản của hệ thống này trong việc đảm bảo ổn định điện áp, phân phối công suất phản kháng, cũng như duy trì khả năng vận hành an toàn của máy phát điện trong các điều kiện vận hành khác nhau. Ngoài ra, chương này cũng đã đi sâu phân tích các bộ phận cốt lõi như bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR), các bộ giới hạn (UEL, OEL, V/Hz limiter) và các thiết bị bảo vệ đi kèm, giúp bảo vệ máy phát khỏi các tình trạng nguy hiểm như mất kích từ, quá kích từ, hoặc vi phạm giới hạn nhiệt.

## CHƯƠNG 2: ĐIỀU KHIỂN PID VÀ PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ

### 2.1. Tổng quan về điều khiển PID

#### 2.1.1. Lý thuyết về bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID là cơ chế phản hồi vòng điều khiển tổng quát được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển. Bộ điều khiển PID sẽ tính toán giá trị “sai số” là hiệu số giữa giá trị đo thông số biến đổi và giá trị đặt mong muốn. Bộ điều khiển sẽ thực hiện giảm tối đa sai số bằng cách biến đổi chỉnh giá trị điều khiển đầu vào dựa trên sự kết hợp của ba bộ điều khiển: tỷ lệ, tích phân và vi phân.



Hình 2. 1. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển vòng kín

Có thể nói trong lĩnh vực điều khiển, bộ điều khiển PID được xem như một giải pháp đa năng cho các ứng dụng điều khiển tương tự hay điều khiển số. Hơn 90% các bộ điều khiển trong công nghiệp được sử dụng là bộ điều khiển PID. Nếu được thiết kế tốt, bộ điều khiển PID có khả năng điều khiển hệ thống đáp ứng tốt các chỉ tiêu chất lượng như đáp ứng nhanh, thời gian quá độ ngắn, độ quá điều chỉnh thấp, triệt tiêu được sai lệch tĩnh.

Luật điều khiển PID được định nghĩa:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Trong đó  $u$  là tín hiệu điều khiển và  $e$  là sai lệch điều khiển ( $e = Y_{sp} - y$ ). Tín hiệu điều khiển là tổng của 3 thành phần: Tỷ lệ, tích phân và vi phân. Hàm truyền của bộ điều khiển PID:

$$G_{PID}(S) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_I \frac{1}{S} + K_D S = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i S} + T_D S \right) \quad (2.2)$$

Các tham số của bộ điều khiển là  $K_p$ ,  $K_I$  (hoặc  $T_i$ ),  $K_D$  (hoặc  $T_D$ )

Mục tiêu điều khiển:

- Triệt tiêu sai số xác lập
- Giảm thời gian xác lập và độ vọt lố
- Hạn chế dao động

#### a) Thành phần tỉ lệ (P)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.3)$$

Tác động của thành phần tích phân đơn giản là tín hiệu điều khiển tỉ lệ tuyến tính với sai lệch điều khiển. Ban đầu, khi sai lệch lớn thì tín hiệu điều khiển lớn. Sai lệch giảm dần thì tín hiệu điều khiển cũng giảm dần. Khi sai lệch  $e(t) = 0$  thì  $u(t) = 0$ . Một vấn đề là khi sai lệch đổi dấu thì tín hiệu điều khiển cũng đổi dấu.

Thành phần P có ưu điểm là tác động nhanh và đơn giản. Hệ số tỉ lệ  $K_p$  càng lớn thì tốc độ đáp ứng càng nhanh, do đó thành phần P có vai trò lớn trong giai đoạn đầu của quá trình quá độ.

Tuy nhiên, khi hệ số tỉ lệ  $K_p$  càng lớn thì sự thay đổi của tín hiệu điều khiển càng mạnh dẫn đến dao động lớn, đồng thời làm hệ nhạy cảm hơn với nhiễu đo. Hơn nữa, đối với đối tượng không có đặc tính tích phân thì sử dụng bộ P vẫn tồn tại sai lệch tĩnh.

#### b) Thành phần Tích phân (I)

$$u(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

Với thành phần tích phân, khi tồn tại một sai lệch điều khiển dương, luôn làm tăng tín hiệu điều khiển, và khi sai lệch là âm thì luôn làm giảm tín hiệu điều khiển, bất kể sai lệch đó là nhỏ hay lớn. Do đó, ở trạng thái xác lập, sai lệch bị triệt tiêu  $e(t) = 0$ . Đây cũng là ưu điểm của thành phần tích phân.

Nhược điểm của thành phần tích phân là do phải mất một khoảng thời gian để đợi  $e(t)$  về 0 nên đặc tính tác động của bộ điều khiển sẽ chậm hơn. Ngoài ra, thành phần tích phân đôi khi còn làm xấu đi đặc tính động học của hệ thống, thậm chí có thể làm mất ổn định.

Người ta thường sử dụng bộ PI hoặc PID thay vì bộ I đơn thuần vừa để cải thiện tốc độ đáp ứng, vừa đảm bảo yêu cầu động học của hệ thống.

### c) Thành phần vi phân (D)

$$u(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Mục đích của thành phần vi phân là cải thiện sự ổn định của hệ kín. Do động học của quá trình, nên sẽ tồn tại một khoảng thời gian trễ làm bộ điều khiển chậm so với sự thay đổi của sai lệch  $e(t)$  và đầu ra  $y(t)$  của quá trình. Thành phần vi phân đóng vai trò dự đoán đầu ra của quá trình và đưa ra phản ứng thích hợp dựa trên chiều hướng và tốc độ thay đổi của sai lệch  $e(t)$ , làm tăng tốc độ đáp ứng của hệ.

Một ưu điểm nữa là thành phần vi phân giúp ổn định một số quá trình mà bình thường không ổn định được với các bộ P hay PI.

Nhược điểm của thành phần vi phân là rất nhạy với nhiễu đo hay của giá trị đặt do tính đáp ứng nhanh nêu ở trên.

## 2.1.2. Các quy luật hiệu chỉnh

### 2.1.2.1 Khái niệm

Khâu hiệu chỉnh khuếch đại tỷ lệ (P) được đưa vào hệ thống nhằm làm giảm sai số xác lập, với đầu vào thay đổi theo hàm nấc sẽ gây ra độ vọt lố và trong một số trường hợp là không chấp nhận được đối với mạch động lực. Sự có mặt của khâu vi phân tỉ lệ (PD) làm giảm độ vọt lố, đáp ứng ra bớt nhấp nhô và hệ thống sẽ đáp ứng nhanh hơn. Khâu tích phân tỉ lệ (PI) có mặt trong hệ thống sẽ dẫn đến sai lệch tĩnh triệt tiêu (hệ vô sai). Muốn tăng độ chính xác của hệ thống ta phải tăng hệ số khuếch đại, song với mọi hệ thống thực đều bị hạn chế và sự có mặt của khâu PI là bắt buộc. Khâu hiệu chỉnh vi tích phân tỉ lệ (PID) kết hợp ưu nhược điểm của khâu PD và PI, có khả năng tăng độ dự trữ pha ở tần số cắt, khử chậm pha. Sự có mặt của khâu PID ở vòng hồi tiếp có thể dẫn đến sự dao động trong hệ do đáp ứng quá độ bị vọt lố bởi hàm Dirac  $\delta(t)$  [2]

### 2.1.2.2 Hiệu chỉnh tỷ lệ vi phân (PD)

Hàm truyền vòng hở có dạng:

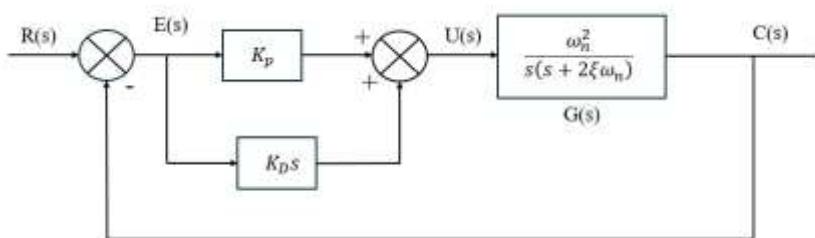
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)} \quad (2.6)$$

Hàm truyền khâu PD có dạng:

$$G_c(s) = K_p + K_D s \quad (2.7)$$

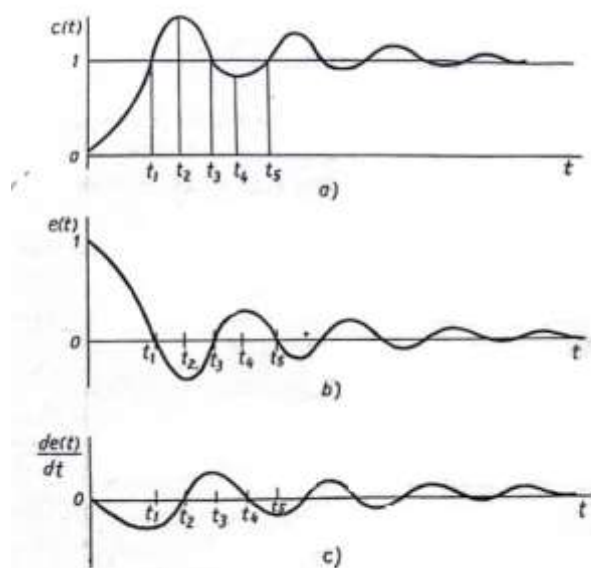
Tín hiệu điều khiển là:

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$



Hình 2. 2. Sơ đồ khối hệ thống hồi tiếp bậc 2

So với hệ ban đầu chưa thêm khâu hiệu chỉnh, hàm truyền PD tương đương với việc thêm nghiệm zero  $= -\frac{K_p}{K_D}$ . Ảnh hưởng của bộ hiệu chỉnh PD lên đáp ứng thời gian được trình bày ở hình 2.3. [2]



Hình 2. 3. Dạng sóng của  $c(t)$ ,  $e(t)$  và  $de(t)/dt$

Tín hiệu điều khiển là tổ hợp hai lượng thông tin về sai lệch và đạo hàm bậc nhất của sai lệch. Kết quả của hiệu chỉnh PD là giảm độ vọt lố và đáp ứng ra  $c(t)$  bớt nhấp nhô hơn.

Trong toàn dải tần số, tín hiệu ra luôn luôn vượt trước tín hiệu vào nên quy luật PD tác động nhanh hơn quy luật tỷ lệ nhưng quá trình điều chỉnh vẫn không có khả năng triệt tiêu sai lệch dư giống như quy luật tỷ lệ. Phần tử vi phân tăng tốc độ tác động nhưng đồng thời cũng rất nhạy cảm với nhiễu ở tần số cao. Vì vậy, trong công nghiệp, quy luật tỷ lệ vi phân chỉ sử dụng khi quy trình công nghệ cho phép có sai lệch dư và đòi hỏi tốc độ tác động rất nhanh.

### 2.1.2.3. Hiệu chỉnh tỷ lệ tích phân PI

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (2.9)$$

Với sơ đồ *Hình 2.2* thay hiệu chỉnh là khâu PI, hàm truyền vòng hở hệ thống là:

$$G_C(s)G(s) = \frac{\omega_n^2(K_p s + K_I)}{s^2(s + 2\xi\omega_n)} \quad (2.10)$$

Bộ hiệu chỉnh PI tương đương với việc thêm nghiệm zero  $= -\frac{K_I}{K_p}$  và nghiệm cực

$S = 0$  vào hàm truyền vòng hở. Hiệu quả là bậc của hệ thống tăng lên 1, thêm một khâu tích phân vào hàm truyền hệ chưa hiệu chỉnh và điều quan trọng là loại hệ thống cũng được tăng lên 1. Sai số xác lập của hệ có khâu PI sẽ bằng 0 với tín hiệu vào là hàm nấc, và bằng hằng số tỉ lệ nghịch với giá trị  $K_p$  nếu tín hiệu vào là hàm RAMP. Khi đó vấn đề đặt ra là phải chọn tương quan giữa  $K_p$  và  $K_I$  sao cho hệ thỏa mãn yêu cầu thiết kế.

### 2.1.2.4. Hiệu chỉnh tỷ lệ vi tích phân PID

$$\text{Hàm truyền: } G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.11)$$

Có thể xem khâu hiệu chỉnh PID gồm một khâu PI mắc nối tiếp với một khâu

$$\text{PD. } G_C(s) = K_{p1} + \left(1 + \frac{1}{T_{i1}s}\right) + (1 + K_{D2}s) \quad (2.12)$$

Trong đó  $T_{i1} > T_{D2}$ . Dễ dàng suy ra được mối quan hệ giữa các hệ số trong hai cách biểu diễn (2.11) và (2.12) như sau:

$$K_P = K_{p1} \left( 1 + \frac{T_{D2}}{T_{I1}} \right) \quad (2.13)$$

$$K_I = \frac{K_{I1}}{T_{I1}} \quad (2.14)$$

$$K_D = K_{p1} T_{D2} \quad (2.15)$$

Do khâu hiệu chỉnh PID có thể xem là khâu PI mắc nối tiếp với khâu PD nên nó có các ưu điểm của khâu PI và PD. Nghĩa là khâu hiệu chỉnh PID cải thiện đáp ứng quá độ (giảm vọt lố, giảm thời gian quá độ) và giảm sai số xác lập (nếu đối tượng không có khâu vi phân lý tưởng thì sai số xác lập đối với tín hiệu vào là hàm bậc bằng 0). Chúng ta vừa khảo sát xong ảnh hưởng của các khâu hiệu chỉnh nối tiếp thường dùng đến chất lượng của hệ thống, mỗi khâu hiệu chỉnh có những ưu điểm cũng như khuyết điểm riêng. Do vậy cần phải hiểu rõ đặc điểm của từng khâu hiệu chỉnh chúng ta mới có thể sử dụng linh hoạt và hiệu quả được. Tùy theo đặc điểm của từng đối tượng điều khiển cụ thể và yêu cầu chất lượng mong muốn mà chúng ta phải sử dụng khâu hiệu chỉnh thích hợp. Khi đã xác định được khâu hiệu chỉnh cần dùng thì vấn đề còn lại là xác định thông số của nó.

## 2.2. Ứng dụng của bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID (Proportional–Integral–Derivative) là một trong những giải pháp điều khiển vòng kín được ứng dụng rộng rãi nhất trong các hệ thống công nghiệp, đặc biệt là trong lĩnh vực điện, nhờ khả năng kết hợp ưu việt của ba thành phần điều khiển: tỉ lệ (P), tích phân (I) và vi phân (D).

### a) Thành phần tỉ lệ (Proportional – P)

Thành phần tỉ lệ quyết định mức độ phản ứng của hệ thống dựa trên độ lớn của sai số. Khi sai số tăng, tín hiệu điều khiển tăng tuyến tính theo hệ số  $K_p$ .

- Ưu điểm:
  - Cải thiện tốc độ đáp ứng, làm hệ thống phản ứng nhanh với sai lệch.
  - $K_p$  càng lớn thì sai số xác lập càng nhỏ (nhưng không thể triệt tiêu)
- Nhược điểm:
  - $K_p$  càng lớn thì các cực của hệ thống có xu hướng di chuyển ra xa trục thực => Hệ thống càng dao động và độ vọt lố càng cao.
  - Nếu  $K_p$  tăng quá giá trị giới hạn thì hệ thống sẽ dao động không tắt dần => mất ổn định

Trong thực tế trong bộ AVR của máy phát, thành phần P giúp máy phát nhanh chóng điều chỉnh điện áp khi tải thay đổi. Trong điều khiển tốc độ động cơ, thành phần P giúp động cơ đạt gần đúng tốc độ đặt mà không bị chậm trễ.

*b) Thành phần tích phân (Integral – I)*

Thành phần I tính toán tổng sai số theo thời gian, cho phép hệ thống nhớ sai số tích lũy và tự động hiệu chỉnh để loại bỏ sai số xác lập.

- Ưu điểm
  - Tín hiệu ngõ ra được xác định bởi sai số
  - $K_I$  càng lớn thì sai số xác lập càng nhỏ. Đặc biệt hệ số khuếch đại của khâu tích phân bằng vô cùng khi tần số bằng 0  $\Rightarrow$  triệt tiêu sai số xác lập với hàm nấc.
- Nhược điểm
  - $K_I$  càng lớn thì đáp ứng quá độ càng chậm
  - $K_I$  càng lớn thì độ vọt lố càng cao

Trong thực tế thành phần tích phân I được ứng dụng để điều chỉnh công suất phản kháng của máy phát để duy trì hệ số công suất yêu cầu. Bộ tự động trên lưới điện đảm bảo  $\cos\varphi$  ổn định trong dài hạn

*c) Thành phần vi phân (Derivative-D)*

Thành phần D tính toán tốc độ thay đổi của sai số, giúp hệ thống dự đoán xu hướng sai số và phanh tín hiệu điều khiển trước khi xảy ra quá điều chỉnh.

- Ưu điểm
  - $K_D$  càng lớn thì đáp ứng quá độ càng nhanh.
  - $K_D$  càng lớn thì độ vọt lố càng nhỏ.
- Nhược điểm
  - Hệ số khuếch đại tại tần số cao là vô cùng lớn nên khâu hiệu chỉnh D rất nhạy với nhiễu tần số cao.
  - Khâu vi phân không thể sử dụng một mình mà phải dùng kết hợp với các khâu P hoặc I.

Trong thực tế hệ thống điều khiển kích từ sử dụng thành phần vi phân D để hạn chế các dao động điện áp khi xảy ra ngắn mạch hoặc sự cố lưới. Điều khiển tần số lưới điện ở các nhà máy điện độc lập giúp giảm dao động tần số khi thay đổi tải nhanh.

Bộ điều khiển PID không chỉ giúp nâng cao hiệu suất và chất lượng điện năng mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì độ tin cậy của hệ thống điện hiện đại. Việc lựa chọn tham số PID thích hợp (dựa trên các phương pháp Ziegler-Nichols,

Cohen-Coon, hoặc tối ưu hóa tự động) là một bước nghiên cứu cần thiết để đạt được mục tiêu điều khiển tối ưu, nhất là trong các hệ thống phức tạp, nhiều nhiễu động.

### 2.3. Đánh giá đáp ứng của hệ thống

Hiệu quả trong việc nâng cao độ ổn định của hệ thống điện được đánh giá dựa trên một số đặc tính quan trọng của hệ thống. Trong phần này, chúng ta sẽ nghiên cứu và định nghĩa các phương pháp đo lường cũng như các chỉ tiêu cơ bản dùng để đánh giá và ước lượng các đặc tính đó. Đồng thời, nội dung này cũng giúp xác định rõ hiệu suất và khả năng làm việc của hệ thống điều khiển kích từ, làm cơ sở phân tích, thiết kế và tối ưu hóa hệ thống điều khiển trong thực tế vận hành.

Hình 2.4 trình bày toàn bộ hệ thống điều khiển kích thích dạng cổ điển đã được sử dụng để mô tả hệ thống điều khiển hồi tiếp



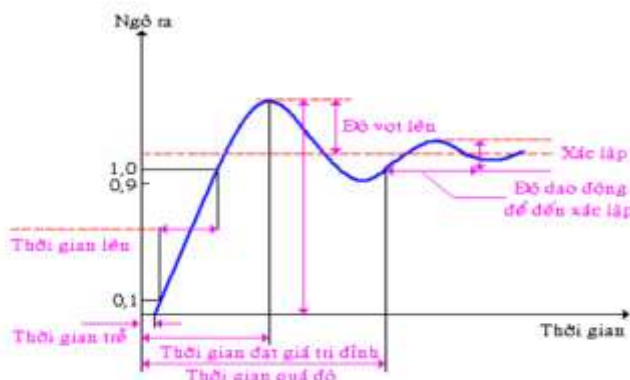
Hình 2. 4. Hệ thống điều khiển kích từ sử dụng hồi tiếp

- Sự làm việc của hệ thống điều khiển kích thích phụ thuộc vào đặc tuyến của hệ thống kích thích, máy phát và hệ thống điện.

- Vì hệ thống không tuyến tính, khảo sát hai dạng tín hiệu sẽ được khảo sát là đặc tính tín hiệu lớn và đặc tính tín hiệu nhỏ. Đối với đặc tính tín hiệu lớn, không tuyến tính là đáng kể. Đối với đặc tính tín hiệu nhỏ, đáp ứng chính là tuyến tính.

#### 2.3.1. Đáp ứng thời gian

Đáp ứng thời gian của hệ thống điều khiển có hồi tiếp, có đặc trưng là thay đổi từng cấp ở ngõ ra được trình bày ở hình 2.5



Hình 2. 5. Đáp ứng thời gian

Trong đánh giá đặc tính động của hệ thống điều khiển kích từ, ba thông số quan trọng cần được phối hợp và phân tích là thời gian lên, độ vọt lố và thời gian quá độ.

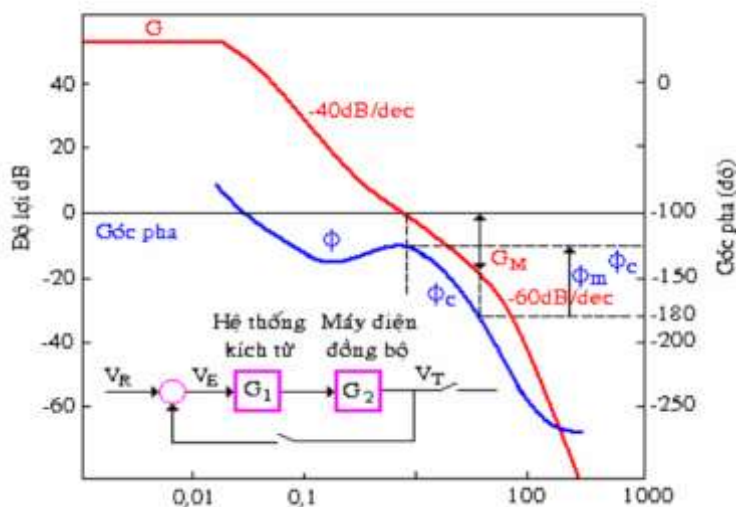
- Thời gian lên (rise time,  $t_r$ ): Là khoảng thời gian để tín hiệu đầu ra  $c(t)$  tăng từ 10% đến 90% giá trị xác lập. Thông số này phản ánh tốc độ đáp ứng ban đầu của hệ thống.
- Độ vọt lố (Percent of Overshoot, POT): Là tỷ lệ phần trăm mà tín hiệu đầu ra vượt quá giá trị xác lập trong lần vượt đầu tiên so với giá trị xác lập đó. Chỉ tiêu này đặc biệt quan trọng để đánh giá mức độ dao động và ổn định của hệ thống.

$$POT = \frac{C_{max} - C_{xl}}{C_{xl}} * 100\% \quad (2.16)$$

- Thời gian quá độ (settling time): Là khoảng thời gian để sai số giữa  $c(t)$  và giá trị xác lập giảm xuống dưới một ngưỡng nhất định, thường lấy  $e=5\%$  hoặc  $e=2\%$ . Đây là chỉ số thể hiện tốc độ hệ thống đạt trạng thái ổn định sau nhiễu loạn hoặc thay đổi tham số.

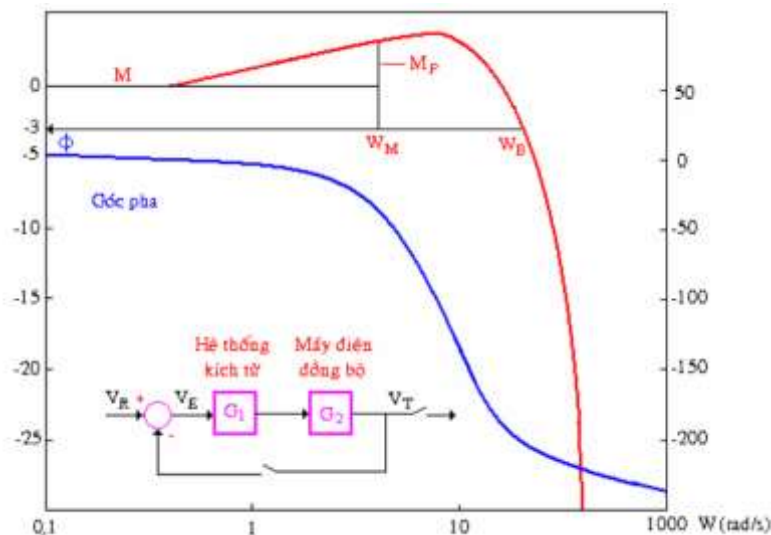
### 2.3.2. Đáp ứng tần số

Đặc tính đáp ứng tần số vòng hở tiêu biểu của hệ thống điều khiển kích từ ở trạng thái máy phát không tải được minh họa ở hình 2.6



Hình 2. 6. Đáp ứng tần số vòng hở của hệ thống

Đặc tính đáp ứng tần số vòng kín tiêu biểu của một hệ thống điều khiển kích từ ở trạng thái máy phát không tải được minh họa ở hình 2.7



Hình 2. 7. Đáp ứng tần số vòng kín với máy phát không tải

Định nghĩa về đáp ứng tần số: đáp ứng tần số của hệ thống là tỉ số giữa tín hiệu ra ở trạng thái xác lập và tín hiệu vào hình sin

Người ta chứng minh được:

$$\text{Đặc tính tần số} = G(s)_{s=j\omega} = G(j\omega) = \frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} \quad (2.16)$$

Tổng quát  $G(j\omega)$  là một hàm phức nên có thể biểu diễn ở dạng đại số hoặc dạng cực:  $G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = M(\omega).e^{j\varphi(\omega)}$

Trong đó:  $M(\omega) = |G(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$  : gọi là đáp ứng biên độ

$$\varphi(\omega) = \angle G(j\omega) = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \right] \quad : \text{gọi là đáp ứng pha}$$

Đặt:  $L(\omega) = 20 \log M(\omega)$  : là đáp ứng biên độ tính theo đơn vị dB

Đặc tính đáp ứng tần số thông qua các thông số sau:

- Đỉnh cộng hưởng ( $M_p$ ): là giá trị cực đại của  $M(\omega)$
- Tần số cộng hưởng  $\omega(p)$ : là tần số tại đó có đỉnh cộng hưởng
- Tần số cắt biên ( $\omega_c$ ) là tần số mà tại đó biên độ của đặc tính bằng 1 hay bằng 0 dB  $M(\omega_c) = 1$  hay  $L(\omega_c) = 0$
- Tần số cắt pha ( $\omega_{-\pi}$ ) là tần số mà tại đó góc pha của đặc tính tần số bằng  $-\pi$  (hay bằng  $-180^0$ )  $\varphi(\omega_{-\pi}) = -180^0 \Leftrightarrow \varphi(\omega_{-\pi}) = -\pi \text{ rad}$
- Độ dự trữ biên (GM – Gain Margin):

$$G_M = \frac{1}{M(\omega_{-\pi})} \Leftrightarrow GM = -L(\omega_{-\pi}) \text{ dB} \quad (2.17)$$

- Độ dự trữ pha ( $\phi M$  - Phase Margin)

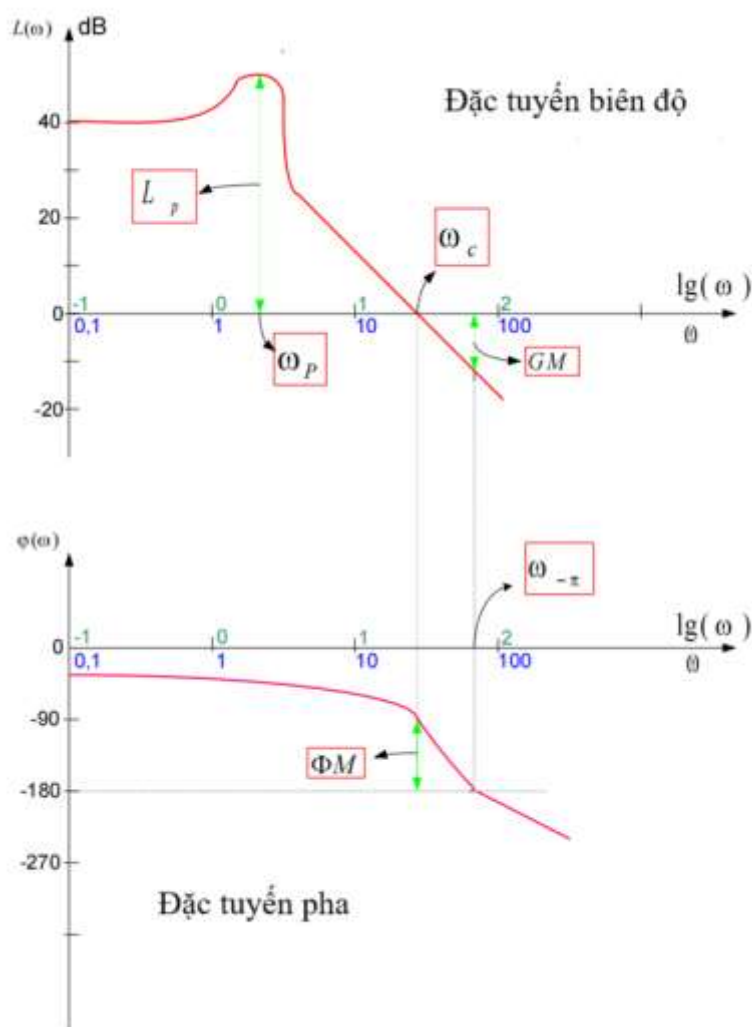
$$\phi M = 180^\circ + \varphi(\omega_c) \tag{2.18}$$

### 2.3.2.1. Biểu đồ BODE

Là hình vẽ gồm 2 thành phần

- Biểu đồ BODE về biên độ: là đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa logarit của đáp ứng biên độ  $L(\omega)$  theo tần số  $\omega$
- Biểu đồ BODE về pha: là đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa đáp ứng pha  $\varphi(\omega)$  theo tần số  $\omega$

Cả 2 đồ thị đều được vẽ trong hệ trục tọa độ vuông góc, trục hoành  $\omega$  cũng đã được chia theo logarit

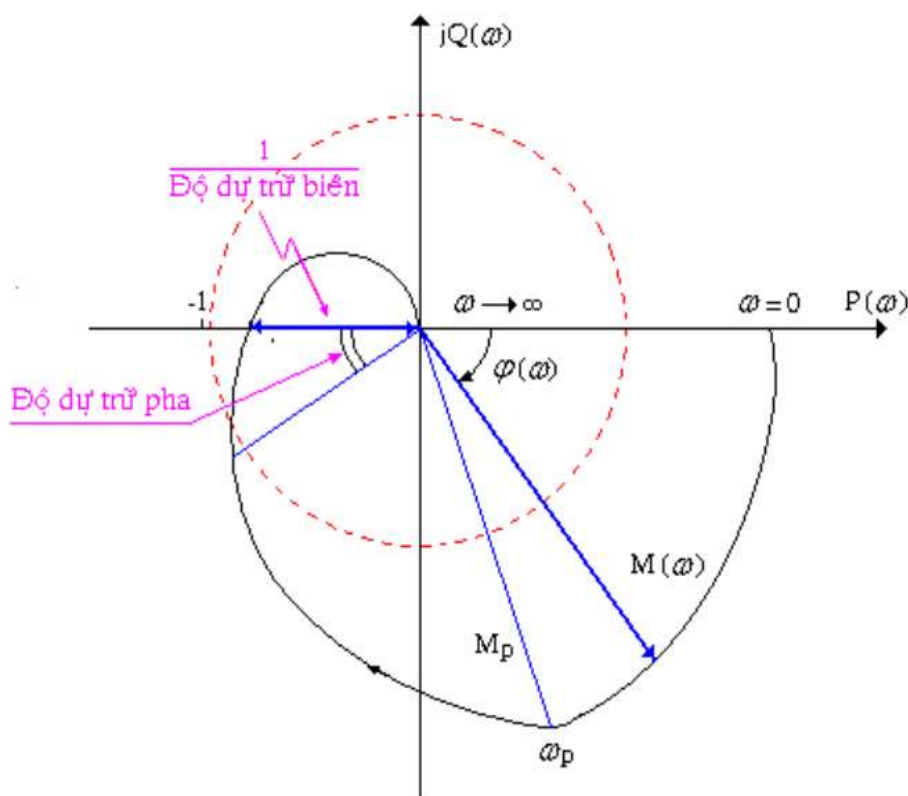


Hình 2. 8. Biểu đồ BODE

Hệ thống kín  $G(s)$  ổn định nếu hệ thống hở  $G(s)$  có độ dự trữ biên và độ dự trữ pha dương  $G_M > 0, \phi M > 0$

### 2.3.2.2. Biểu đồ Nyquist

Biểu đồ Nyquist (đường cong Nyquist): là đồ thị biểu diễn đặc tính tần số  $G(j\omega)$  trong hệ tọa độ cực khi  $\omega$  thay đổi từ  $0 \rightarrow \infty$ . Nói cách khác đường cong Nyquist là tập hợp tất cả các điểm ngọn của vectơ biểu diễn số phức  $G(j\omega)$  ( biên độ vectơ là  $M(\omega)$  góc của vectơ là  $\varphi(\omega)$  khi  $\omega$  thay đổi từ  $0 \rightarrow \infty$ )



Hình 2. 9. Đường cong Nyquist

### 2.3.3. Đánh giá về đáp ứng tần số

Trị số của GM càng lớn : điều chỉnh điện áp xác lập càng tốt.

Tần số cắt pha  $\omega_c$  càng lớn: sẽ cho đáp ứng nhanh hơn.

Độ dự trữ pha  $\Phi_M$  càng lớn và độ dự trữ biên GM càng lớn: sẽ cho điều khiển kích thích ổn định hơn.

Khi ta hiệu chỉnh trong bộ AVR, nhằm cải thiện hoặc thay đổi một chỉ tiêu này, thì ta đã làm xáo trộn những chỉ tiêu khác.

Một số chỉ tiêu: Thông thường độ dự trữ pha  $\Phi_M$  khoảng 40 độ hoặc hơn và độ dự trữ biên GM khoảng 6dB hoặc hơn, độ vọt lố POT= 5 ÷ 15%,  $M_p = 1,1 \div 1,6$  :sẽ

được xem như là một thiết kế tốt để đạt được độ ổn định và hệ thống điều áp không dao động.

Những chỉ tiêu khác như: thời gian lên, thời gian quá độ và dải thông sẽ được xác định qua các đường cong động lực học của máy phát đồng bộ .

Sự vận hành ổn định của hệ thống điều khiển kích thích máy phát sẽ dựa vào những đặc tính trên và cũng sẽ được kết hợp với các kỹ thuật phân tích khác .Còn đối với những máy phát có hệ điện phức tạp, nhiều thông số, hệ thống điều khiển nhiều cấp, thì các chỉ tiêu trên không áp dụng được.

#### **2.4. Kết luận**

Ở chương nhóm đã trình bày về bộ điều khiển PID và các quy luật hiệu chỉnh của bộ điều khiển. Trình bày những kiến thức liên quan đến đánh giá đáp ứng của hệ thống tạo cơ sở để thực hiện đánh giá mô hình máy phát thực tế cho những chương tiếp theo.

## CHƯƠNG 3: MÔ HÌNH HOÁ VÀ MÔ PHÒNG HỆ THỐNG TRONG MATLAB/SIMULINK

### 3.1. Giới thiệu về Simulink Toolbox

Simulink là một phần mở rộng đồ họa (graphical extension) của phần mềm MATLAB, được sử dụng để mô hình hóa và mô phỏng các hệ thống. Một trong những ưu điểm nổi bật của Simulink là khả năng mô phỏng các hệ phi tuyến, điều mà các hàm truyền thông thường không thể thực hiện được. Ngoài ra, Simulink còn cho phép người dùng khai báo và sử dụng các điều kiện ban đầu, thay vì giả định mặc định các điều kiện ban đầu bằng không như khi sử dụng hàm truyền.


Trong môi trường Simulink, các hệ thống được xây dựng dưới dạng sơ đồ khối (block diagram) hiển thị trực quan trên màn hình. Thư viện khối của Simulink cung cấp sẵn các phần tử cơ bản như hàm truyền (transfer function), điểm tổng (summing junction), cùng nhiều thiết bị đầu vào và đầu ra ảo (virtual input/output devices) như bộ phát tín hiệu (generator) và máy hiện sóng (oscilloscope). Simulink được tích hợp chặt chẽ với MATLAB, cho phép truyền dữ liệu dễ dàng giữa hai môi trường.



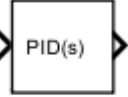
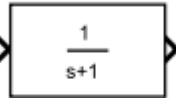
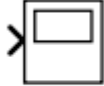
Trong phạm vi nghiên cứu này, Simulink sẽ được áp dụng để minh họa các ví dụ từ MATLAB nhằm phục vụ việc mô hình hóa hệ thống, xây dựng bộ điều khiển và thực hiện mô phỏng, từ đó đánh giá hiệu suất và đặc tính động của hệ thống.

#### 3.1.1. Những phần tử cơ bản

Có hai lớp lớn các phần tử trong Simulink: khối (block), và đường (line). Các khối được sử dụng để tạo ra, điều chỉnh, kết hợp, ngõ ra, và hiện tín hiệu. Các đường được sử dụng để truyền tín hiệu từ một khối đến khối khác.

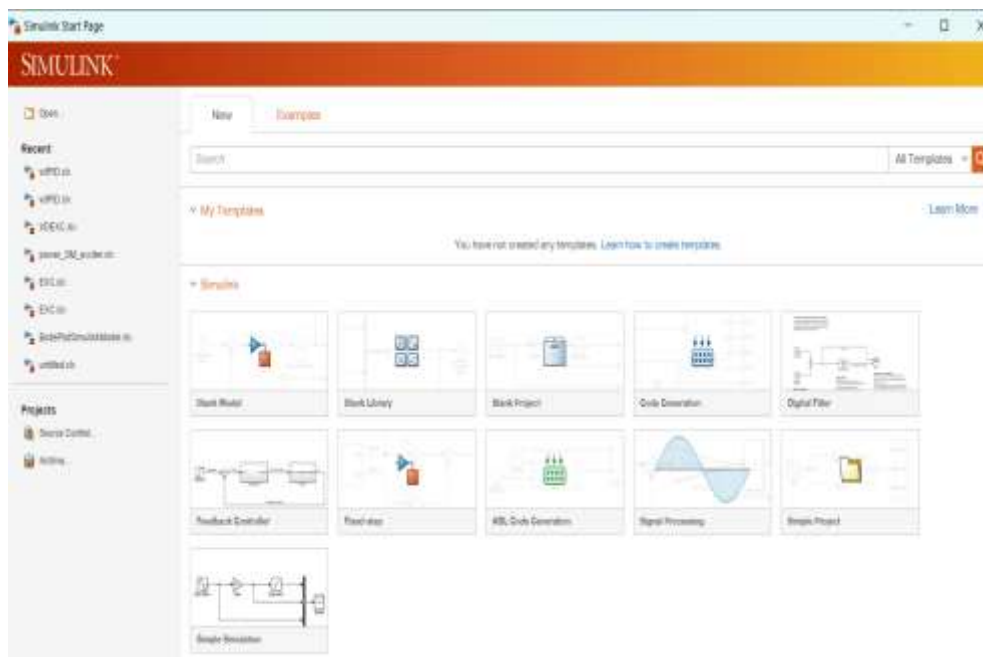
- Những khối hay sử dụng trong Simulink

|   |   |
|---|---|
|  | <p>Khối Step có chức năng xuất ra tín hiệu hàm nấc. Các thông số của khối:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Step time: Khoảng thời gian ngõ ra chuyển sang mức Final value kể từ lúc bắt đầu mô phỏng</li> <li>• Initial value: Giá trị đầu</li> <li>• Final value: Giá trị cuối. Cài đặt theo giá trị ta muốn tác động tới hệ thống. Nếu là hàm nấc đơn vị này thì giá trị này bằng 1</li> <li>• Sample time: Thời gian lấy mẫu</li> </ul> |
|---|---|

|   |  |
|---|--|
| <br>Mux            | Khối mux là bộ ghép kênh nhiều ngõ vào và 1 ngõ ra, từ ngõ ra này ta đưa Scope để xem nhiều tín hiệu trên cùng một cửa sổ  |
| <br>Sum            | Khối Sum là bộ tổng (cộng hay trừ) các tín hiệu, thường dùng để lấy hiệu số của tín hiệu đặt với tín hiệu phản hồi.  |
| <br>PID Controller | Khối PID Controller là bộ điều khiển PID   |
| <br>Transfer Fcn   | Khối Transfer Fcn là hàm truyền của hệ tuyến tính. Các thông số cài đặt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerator: Các hệ số của đa thức tử số</li> <li>• Denominator: Các hệ số của đa thức mẫu số</li> </ul> |
| <br>Scope         | Khối Scope là cửa sổ xem các tín hiệu theo thời gian, tỉ lệ xích của các trục được điều chỉnh tự động để quan sát tín hiệu một cách đầy đủ.  |

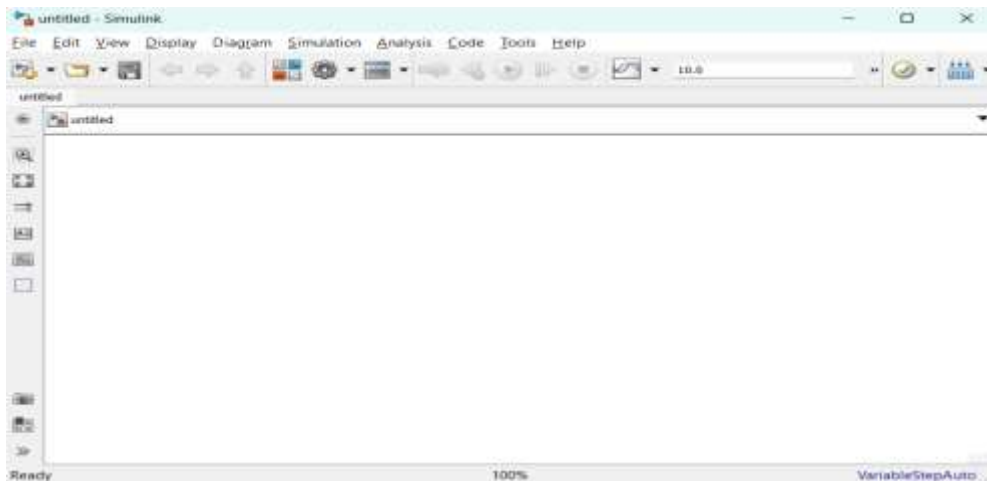
**3.1.2. Các bước xây dựng mô hình trên Simulink**

Khởi động Simulink bằng cách click vào biểu tượng Simulink trên cửa sổ Matlab hoặc gõ lệnh >>Simulink trong cửa sổ Command Window



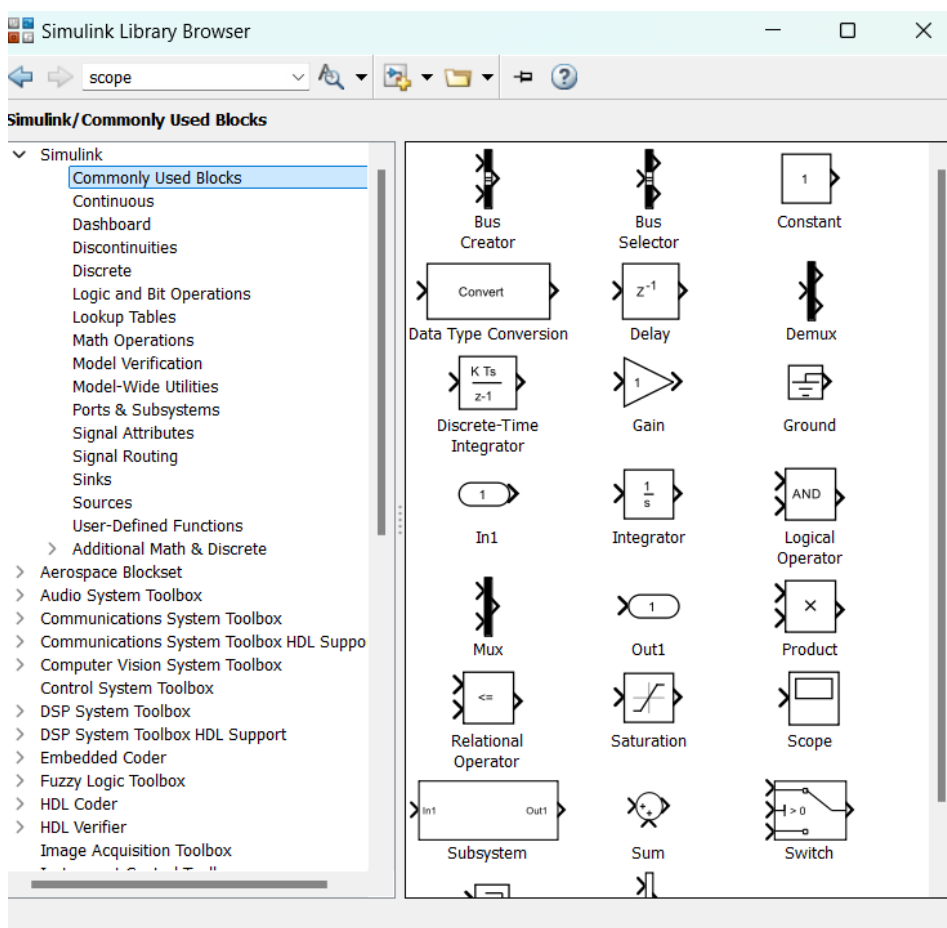
Hình 3. 1. Cửa sổ Simulink

Tiếp đó chọn Blank model, sẽ hiện ra giao diện làm việc Simulink



Hình 3. 2. Môi trường làm việc của Simulink

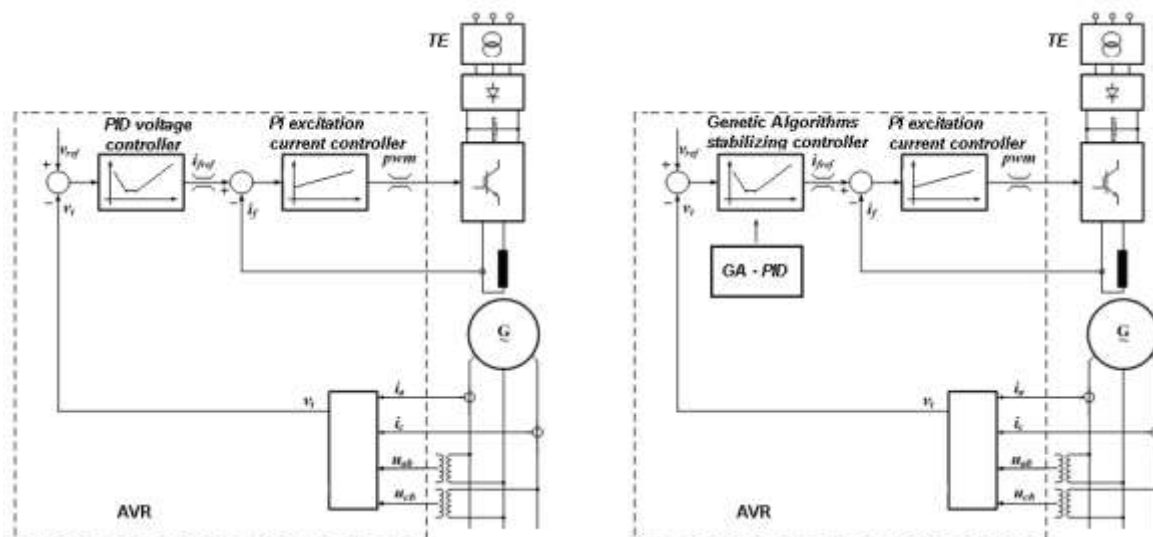
Click vào biểu tượng Library Browser để đi đến thư viện của Simulink



Hình 3. 3. Thư viện Simulink

### 3.2. Mô hình hoá các phần tử trong hệ AVR – máy phát

Ở phạm vi đề án này chỉ quan tâm đến hệ thống kích từ tĩnh có điều khiển nguồn áp, để đi đến quá trình tổng hợp thiết kế hệ thống.



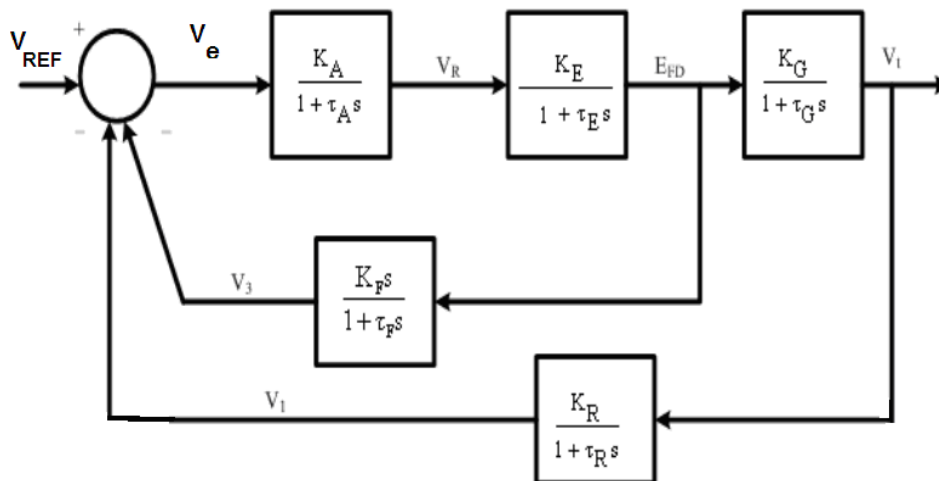
Hình 3. 4. Sơ đồ cấu trúc hệ thống kích từ tĩnh

Sơ đồ khối của bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR) được xây dựng dựa trên tiêu chuẩn IEEE loại DC2A, vốn được áp dụng phổ biến trong các hệ thống điện quy mô lớn có máy phát nối lưới công suất cao.

Bộ điều khiển trong hệ thống này áp dụng phương pháp điều khiển tỉ lệ – tích phân (PI), kết hợp với bộ chỉnh lưu có hệ số khuếch đại  $K_A$  và hằng số thời gian đặc trưng  $\tau_A$ . Điện áp cung cấp đầu vào cho bộ điều chỉnh ( $V_R$ ) được giới hạn trong một dải xác định bởi  $V_{Rmax}$  và  $V_{Rmin}$ , nhằm đảm bảo an toàn cũng như tránh tình trạng vượt quá khả năng chịu tải của hệ thống.

Khi tuyến tính hóa mô hình, mối quan hệ giữa điện áp ra của máy phát và điện áp kích từ được biểu diễn thông qua một khối khuếch đại  $K_G$  cùng với hằng số thời gian  $\tau_G$ .

Mô hình toán học được phát triển từ sơ đồ cấu trúc này bao gồm hai vòng điều khiển chính:

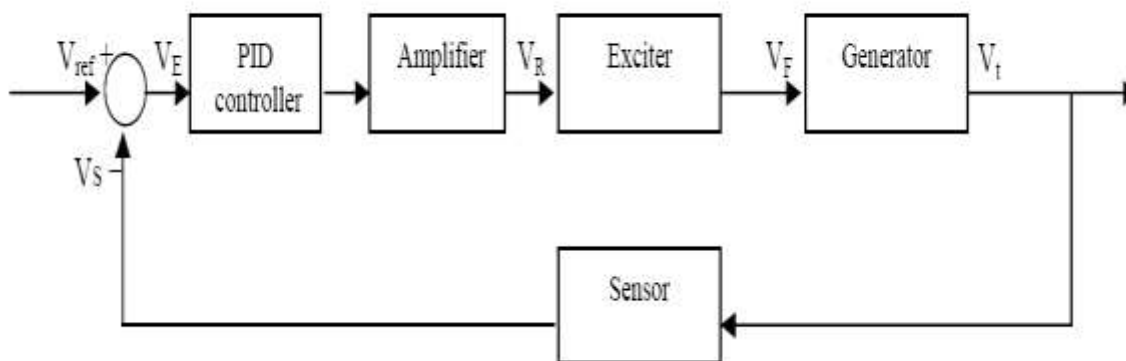


Hình 3. 5. Mô hình toán miêu tả máy điện đồng bộ và hệ thống kích từ

### 3.3. Tổng hợp mô hình hoá các phân tử

Để đảm bảo điện áp đầu cực của máy phát luôn duy trì ổn định, hệ thống điều khiển thường sử dụng cấu trúc điều khiển hai vòng: mạch vòng điều chỉnh dòng kích thích kết hợp với bộ điều khiển PI và mạch vòng điều chỉnh điện áp kết hợp với bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, do hạn chế về thời gian nghiên cứu và xét đến thực tế rằng nguyên lý thiết kế của mạch vòng điều chỉnh dòng kích thích có nhiều điểm tương đồng với mạch vòng điều chỉnh điện áp, trong phạm vi đề án này, nhóm tập trung phân tích và nghiên cứu mạch vòng điều chỉnh điện áp (AVR) tích hợp với bộ điều khiển PID.

Sơ đồ khối mô tả cấu trúc của hệ thống AVR có kết hợp bộ điều khiển PID được trình bày dưới đây:



Hình 3. 6. Sơ đồ khối của AVR với bộ điều khiển PID

Chức năng chính của bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR) là duy trì điện áp đầu cực của máy phát ổn định trong phạm vi giá trị đặt trước, đảm bảo đáp ứng các yêu cầu vận hành của hệ thống điện. Một mô hình AVR đơn giản hóa thường bao gồm bốn thành phần cơ bản: bộ khuếch đại, máy phát điện, bộ kích thích và cảm biến đo lường.

Trong đó:

Hàm truyền bộ khuếch đại có dạng:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (3.1)$$

Đặc tính của bộ khuếch đại trong hệ thống AVR được biểu diễn thông qua hằng số khuếch đại  $K_A$  và hằng số thời gian  $\tau_A$ . Thông thường, giá trị  $K_A$  dao động trong khoảng từ 10 đến 400, trong khi  $\tau_A$  thường rất nhỏ, nằm trong khoảng 0,02 đến 0,1 giây, phản ánh tốc độ đáp ứng nhanh của khối khuếch đại.. Do đó chọn  $K_A=30$ ;  $\tau_A = 0.02$

Hàm truyền bộ kích từ hiện đại có dạng:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (3.2)$$

Được thể hiện bởi hằng số khuếch đại  $K_E$  và hằng số thời gian  $\tau_E$ . Giá trị tiêu biểu của  $K_E$  nằm trong phạm vi từ 1 đến 400, hằng số thời gian khuếch đại  $\tau_E$  nằm trong khoảng từ 0,5 đến 1 sec. Do đó chọn  $K_E = 5$ ;  $\tau_E = 0.75$ .

Hàm truyền máy phát điện đồng bộ có dạng:

$$\frac{V_i(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (3.3)$$

Mối quan hệ giữa điện áp đầu cực của máy phát và điện áp kích từ được biểu diễn dưới dạng hàm truyền, đặc trưng bởi hằng số khuếch đại  $K_G$  và hằng số thời gian  $\tau_G$ . Các thông số này chịu ảnh hưởng trực tiếp từ điều kiện tải. Cụ thể,  $K_G$  thường dao động trong khoảng từ 0,7 đến 1, trong khi  $\tau_G$  biến đổi từ 1 đến 2 giây, tương ứng với trạng thái từ không tải đến đầy tải. Do đó chọn  $K_G = 1$ ;  $\tau_G = 1$

Hàm truyền khâu đo lường có dạng:

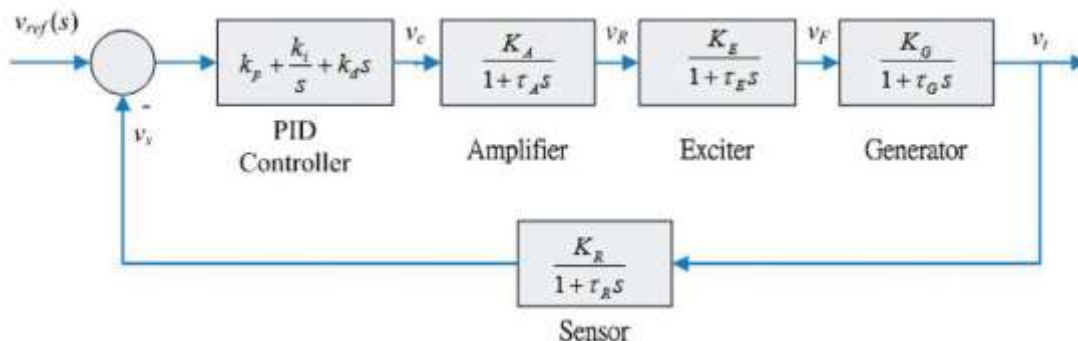
$$\frac{V_S(s)}{V_i(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s} \quad (3.4)$$

Được thể hiện bởi hằng số khuếch đại  $K_R$  và hằng số thời gian  $\tau_R$ . Giá trị tiêu biểu của  $K_R$  là 1, hằng số thời gian khuếch đại  $\tau_R$  là rất nhỏ từ 0,001 đến 0,06 sec. Do đó chọn  $\tau_R = 0.005$

Hàm truyền PID có dạng:

$$G_c(s) = k_p + k_d s + \frac{k_i}{s} \quad (3.5)$$

Từ các phân tích trên ta mô hình cụ thể của bộ AVR máy phát điện đồng bộ như sau:

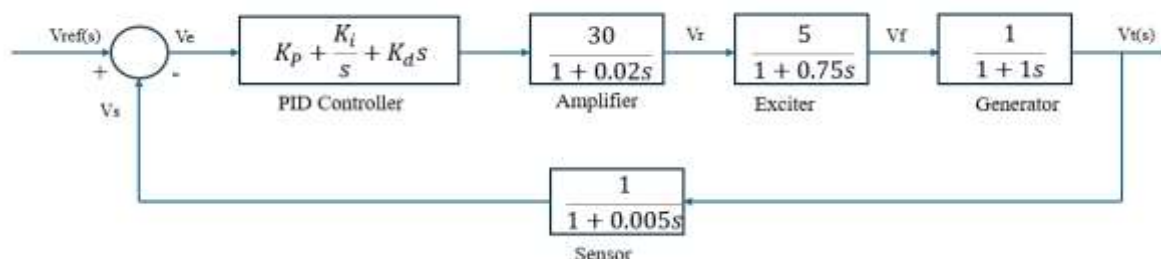


Hình 3. 7. Sơ đồ khối cụ thể của AVR với bộ điều khiển PID

Bảng 3. 1: Bảng tổng hợp hàm truyền

| AVR | $K_A$ | $\tau_A$ | $K_E$ | $\tau_E$ | $K_G$ | $\tau_G$ | $K_R$ | $\tau_R$ |
|-----|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
|     | 30    | 0.02     | 5     | 0.75     | 1     | 1        | 1     | 0.005    |

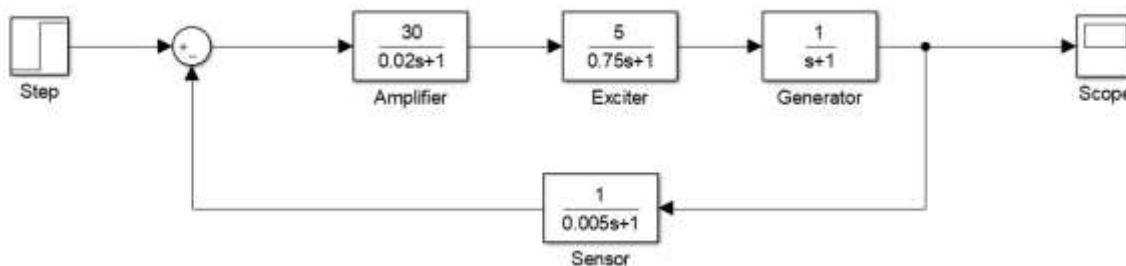
Từ bảng thông số chi tiết như trên ta có sơ đồ khối chứa các thông số của AVR như sau:



Hình 3. 8. Sơ đồ khối của AVR với bộ điều khiển PID

Ta sẽ xem xét xem hệ thống sẽ đáp ứng đầu ra như thế nào nếu không có bộ điều khiển PID. Ta tiến hành mô phỏng trong Simulink:

Trong cửa sổ làm việc của Simulink ta tiến hành mô phỏng hệ thống theo sơ đồ khối sau:



Hình 3. 9. Sơ đồ khối hệ thống

Sau khi thực hiện mô phỏng ta có được đáp ứng đầu ra của hệ thống



Hình 3. 10. Đáp ứng đầu ra của hệ thống

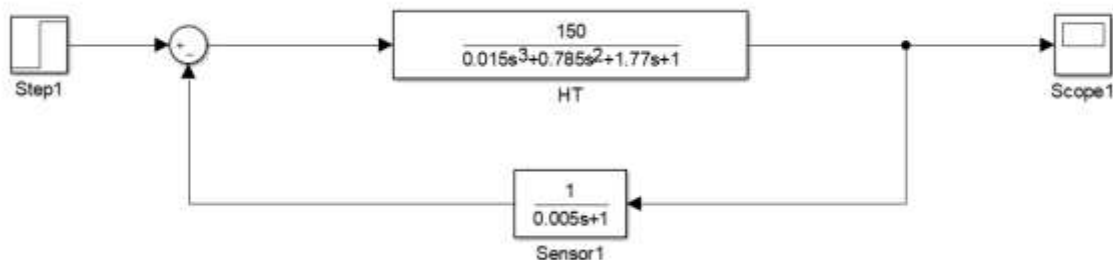
*Nhận xét:*

Dựa trên kết quả mô phỏng ta thấy được hệ thống không có bộ điều khiển PID có đáp ứng rất kém. Biên độ dao động đạt giá trị cực lớn. Ngoài ra tín hiệu đầu ra không đạt được tín hiệu đặt xuất hiện dao động mạnh ở đoạn cuối. Do không có bộ điều khiển PID nên các tín hiệu sai lệch không được triệt tiêu dẫn đến tích lũy các sai số và làm hệ thống bị dao động mạnh gây sai lệch giá trị điện áp đầu cực mà còn gây nguy hiểm cho thiết bị,

Để cải thiện đáp ứng của hệ thống cần tích hợp bộ điều khiển PID vào mạch vòng điều khiển. Việc sử dụng PID sẽ giúp hệ thống đạt trạng thái ổn định. Do đó ta cần tính toán các tham số  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  của bộ điều khiển PID bằng các phương pháp tối ưu hoá như Ziegler-Nichols hoặc autotune để đạt hiệu quả điều khiển cao nhất.

### 3.4. Đánh giá đáp ứng tần số của hệ thống

Tổng hợp hàm truyền của hệ thống ta được sơ đồ như sau:

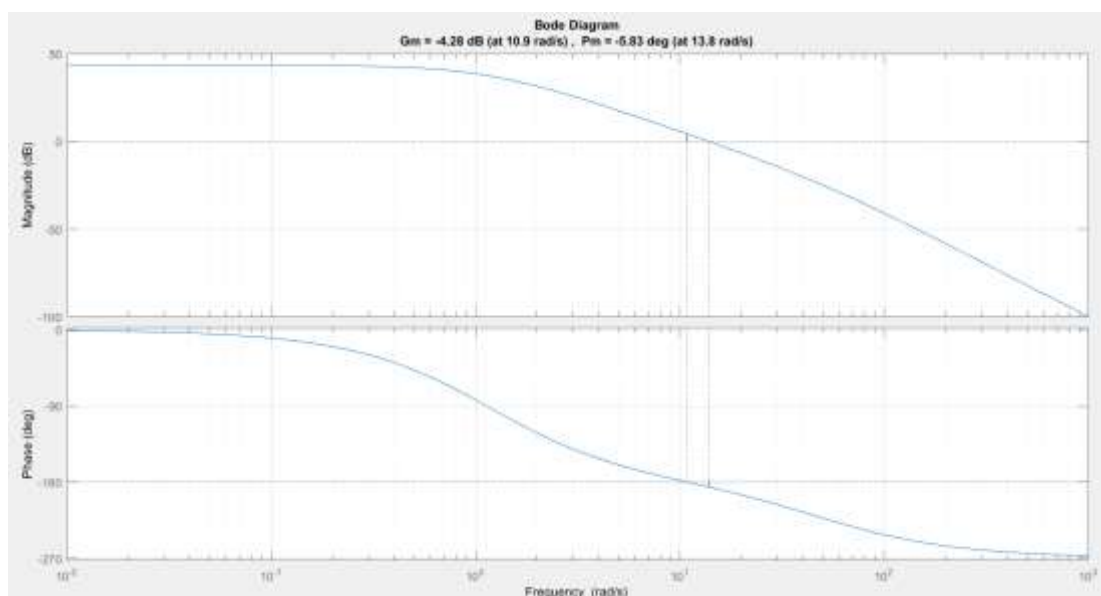


Hình 3. 11. Hàm truyền tổng hợp của hệ thống

Để đánh giá đáp ứng tần số của hệ thống theo phương pháp biểu đồ Bode thì hệ thoả mãn điều kiện Hệ thống kín  $G(s)$  ổn định nếu hệ thống hở  $G(s)$  có độ dự trữ biên và độ dự trữ pha dương  $G_M > 0, \phi_M > 0$ . Do đó ta vẽ biểu đồ Bode của hệ thống trong matlab. Ta thực hiện các thao tác sau:

```
clear all;
close all;
clc;
num = [150];
den = [0.015 0.785 1.77 1];
G = tf(num,den)
bode(G)
margin(num,den)
```

Sau khi thực hiện chương trình ta có biểu đồ Bode biên độ và pha của hệ thống:



Hình 3. 12. Biểu đồ BODE

*Nhận xét:*

Độ dự trữ biên GM = -4,28 dB tại 10,9 rad/s

Độ dự trữ pha Pm = -5,83° tại 13,8 rad/s

Từ biểu đồ Bode biên độ và pha theo tần số ta thấy độ dự trữ pha và độ dự trữ biên đều âm. Điều đó chứng tỏ hệ thống không ổn định dễ bị dao động khi có nhiễu hoặc dao động từ môi trường. Do đó ta cần thiết kế bộ điều khiển PID để tăng độ dự trữ và biên độ và pha giúp hệ thống ổn định hơn.

### 3.5. Tối ưu bộ điều khiển PID

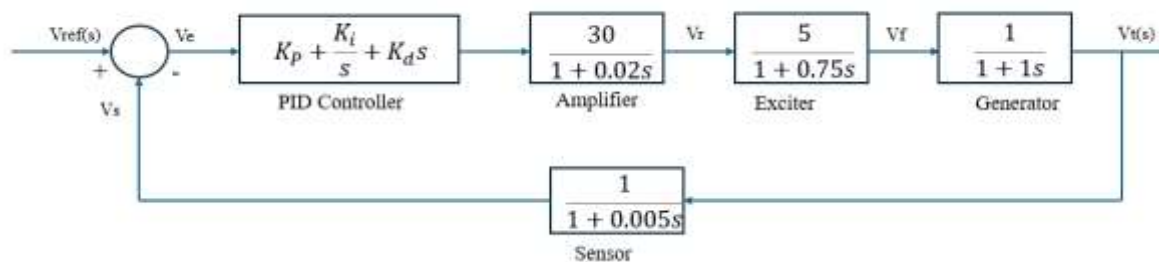
#### 3.5.1. Sử dụng phương pháp Ziegler – Nichols

##### 3.5.1.1. Giới thiệu chung

Trong thực tế, có nhiều phương pháp được áp dụng để thiết kế bộ điều khiển PID, chẳng hạn như phương pháp quỹ đạo nghiệm số, giản đồ Bode, hoặc phương pháp giải tích. Tuy nhiên, các phương pháp này ít được sử dụng trong thực tế công nghiệp do gặp nhiều khó khăn trong việc xây dựng hàm truyền chính xác của đối tượng điều khiển. Phương pháp phổ biến nhất hiện nay trong việc lựa chọn tham số PID là phương pháp Ziegler-Nichols. Đồ án này lựa chọn phương pháp Ziegler-Nichols loại 2 (ZN-2), dựa trên đặc tính dao động tới hạn (đặc tính tần số), để xác định các tham số của bộ điều khiển PID nhằm đảm bảo tính ổn định và cải thiện đáp ứng động của hệ thống.

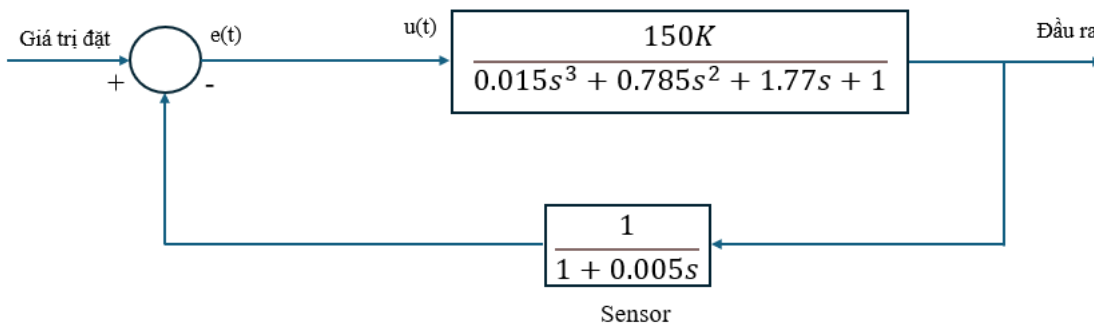
##### 3.5.1.2. Thiết kế thông số bộ PID

Sơ đồ bộ AVR đã được chọn ở trên với bộ điều khiển PID:



Hình 3. 13. Sơ đồ khối cụ thể của AVR với bộ điều khiển PID

Để tìm thông số bộ điều khiển PID theo phương pháp Ziegler-Nichols 2 (ZN2) ta thay bộ điều khiển PID trong hệ kín bằng bộ khuếch đại K, tức cho  $T_i = \infty$  và  $T_d = 0$ . Ta được sơ đồ khối như sau:



Hình 3. 14. Sơ đồ khối của hệ thống khi sử dụng Ziegler-Nichols 2

Ta thu được hàm truyền của hệ kín như sau:

$$W(s) = \frac{150K}{0.000075s^4 + 0.018925s^3 + 0.79385s^2 + 1.775s + 150K + 1}$$

Giá trị K làm cho hệ thống xuất hiện dao động duy trì có thể tìm được bằng cách sử dụng các tiêu chí ổn định Routh. Từ hàm truyền của hệ kín như trên ta có phương trình đặc trưng như sau: [1]

$$0.000075s^4 + 0.018925s^3 + 0.79385s^2 + 1.775s + 150K + 1 = 0$$

Ta tiến hành lập bảng Routh:

Bảng 3. 2: Lập bảng Routh

|       |                |         |        |
|-------|----------------|---------|--------|
| $s^4$ | 0.000075       | 0.79385 | 150K+1 |
| $s^3$ | 0.018925       | 1.775   | 0      |
| $s^2$ | 0.7868         | 150K+1  | 0      |
| $s^1$ | 1.779 - 3.608K | 0       | 0      |
| $s^0$ | 150K+1         | 0       | 0      |

Khảo sát những hệ số ở cột đầu tiên để hệ thống ổn định tất cả các phần tử ở cột đầu tiên phải mang dấu dương do đó ta có:

$$150K+1 > 0 \Rightarrow K > -0.006$$

$$1.779 - 3.608K > 0 \Rightarrow K < 0.493$$

Do đó để hệ dao động ổn định thì  $K_{th} = 0.493$

Với  $K_{th} = 0.493$  thay vào phương trình:

$$0.000075s^4 + 0.018925s^3 + 0.79385s^2 + 1.775s + 74,95 = 0$$

Thay  $j\omega$  vào phương trình trên ta có:

$$0.000075j\omega^4 + 0.018925j\omega^3 + 0.79385j\omega^2 + 1.775j\omega + 74,95$$

Suy ra:

$$0.000075\omega^4 - 0.018925j\omega^3 - 0.79385\omega^2 + 1.775j\omega + 74,95$$

Suy ra:  $\omega = 4.74 \text{ rad/s}$

$$\text{Suy ra: } T_{th} = \frac{2\pi}{4.74} = 1.32$$

Áp dụng phương pháp Ziegler-Nichols 2 (ZN-2) ta có được các tham số của bộ điều khiển theo bảng sau:

Bảng 3. 3: Tham số bộ điều khiển theo Ziegler\_Nichols

| Dạng điều khiển | $K_p$         | $T_i$          | $T_d$          |
|-----------------|---------------|----------------|----------------|
| P               | $0.5 K_{th}$  | $\infty$       | 0              |
| PI              | $0.45 K_{th}$ | $1/1.2 T_{th}$ | 0              |
| PID             | $0.6 K_{th}$  | $0.5 T_{th}$   | $0.125 T_{th}$ |

Tiến hành thiết kế bộ PID, ta có:

-  $K_p = 0.296$ .

-  $T_i = 0.5 * 1.32 = 0.66$  suy ra  $K_I = \frac{K_p}{T_i} = \frac{0.296}{0.66} = 0.448$

-  $T_d = 0.125 * 1.32 = 0.165$  suy ra  $K_D = K_p * T_d = 0.296 * 0.165 = 0.0488$

Thực hiện với bộ điều khiển PID, ta có:

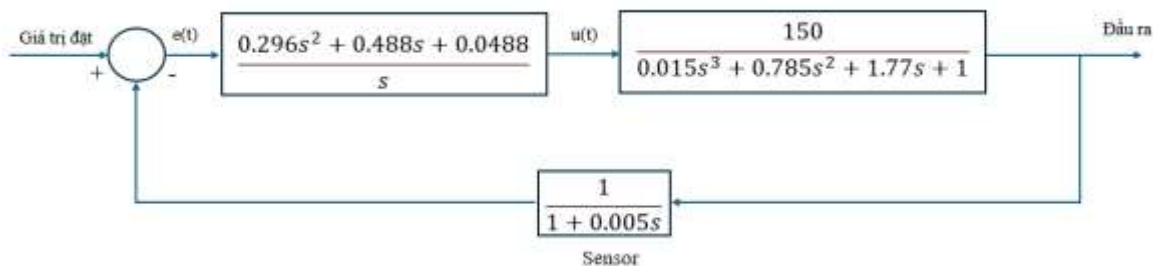
- Hàm truyền của bộ điều khiển PID có dạng:

$$G(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{3.6}$$

- Thay vào ta được:  $G(s) = 0.296 \left( 1 + \frac{1}{0.66s} + 0.165s \right)$  (3.7)

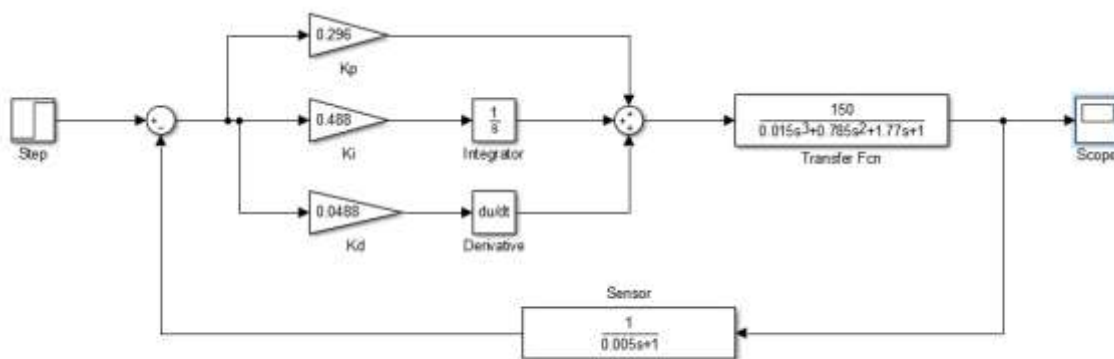
- Suy ra:  $G(s) = \frac{0.296s^2 + 0.488s + 0.0488}{s}$  (3.8)

Từ đó ta có sơ đồ khối của hệ thống như sau:



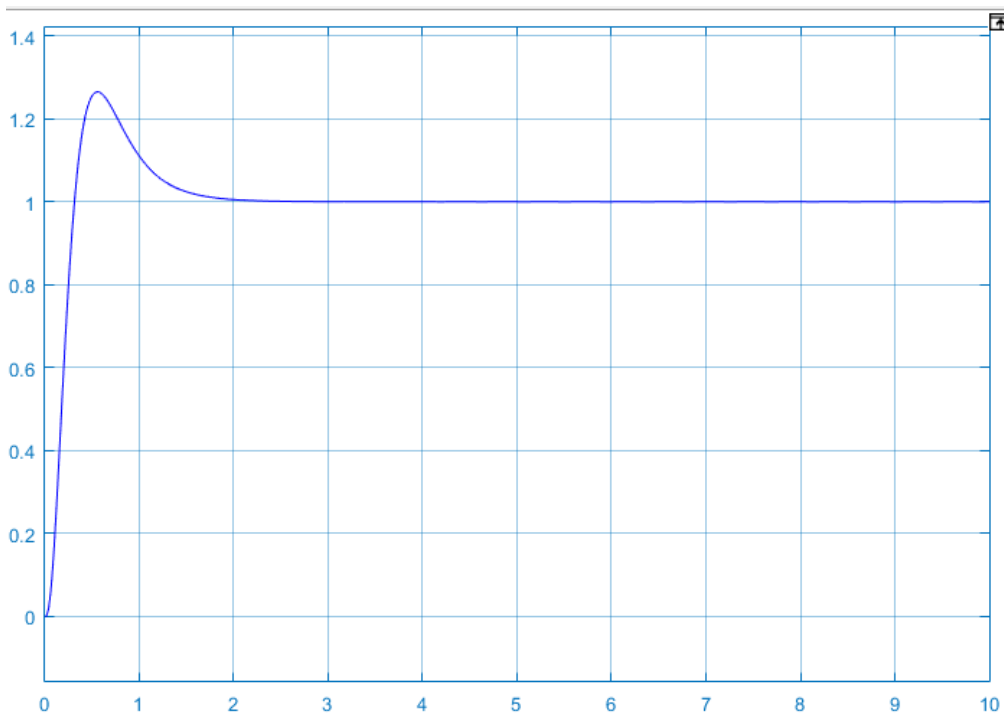
Hình 3. 15. Sơ đồ khối của hệ thống sau khi sử dụng Ziegler-Nichols 2

Để xem đáp ứng đầu ra của hệ thống ta thực hiện mô phỏng trong Simulink:



Hình 3. 16. Mô phỏng hệ thống trong Simulink

Đáp ứng điện áp đầu ra khi có PID:



Hình 3. 17. Điện áp đầu ra của hệ thống khi có PID

*Nhận xét:*

- Sau khi sử dụng bộ điều khiển PID cho thấy điện áp đầu ra của hệ thống đạt ổn định sau quá trình quá độ. Điều này chứng tỏ hệ thống đạt ổn định với sai lệch tĩnh gần như bằng 0, phù hợp với yêu cầu của một hệ thống điều khiển ổn định

- Độ vọt lố của hệ thống khoảng từ 25%-30% giá trị cực đại khoảng 1.26-1.28 lần so với giá trị đặt

- Thời gian lên để điện áp tăng từ 10% đến 90% giá trị ổn định khoảng 0.7s. Điều này cho thấy tốc độ đáp ứng ban đầu của hệ thống.

- Thời gian quá độ khoảng 1.8s đây là thời gian hệ thống dao động trong phạm vi cho phép  $e=5\%$

Đáp ứng thời gian cho thấy hệ thống đạt được sự ổn định với thời gian ngắn với tốc độ đáp ứng nhanh. Tuy nhiên, hệ thống có vọt lố đáng kể trước khi ổn định. Tổng thể hệ thống đảm bảo được yêu cầu về ổn định và tốc độ phản ứng.

### **3.6. Kết luận**

Ở chương này, nhóm đã thực hiện việc mô phỏng hệ thống kích từ bằng phần mềm Matlab/Simulink và tiến hành đánh giá độ ổn định của hệ thống dựa trên các chỉ tiêu động lực học như thời gian lên, thời gian định hình và mức vọt lố. Đồng thời, nhóm đã thiết kế tham số PID bằng các phương pháp tối ưu nhằm đảm bảo đầu ra của hệ thống đạt trạng thái ổn định với đáp ứng nhanh và giảm thiểu dao động. Kết quả cho thấy hệ thống đáp ứng tốt yêu cầu điều khiển cơ bản, đảm bảo tính ổn định và tốc độ đáp ứng. Ở chương tiếp theo, nhóm sẽ tiếp tục thực hiện việc tạo nhiễu tác động vào hệ thống để phân tích sâu hơn khả năng chống nhiễu và độ ổn định của hệ thống trong các điều kiện vận hành thực tế.

## CHƯƠNG 4: THỬ NGHIỆM ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ

### 4.1. Giới thiệu

Chương này phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ đã được mô hình hoá và điều khiển bằng bộ PID. Mục tiêu chung là đánh giá sự ổn định của hệ thống kích từ với các bộ thông số PID khác nhau so với bộ đã được tính toán ở Chương 3. Để đạt được mục tiêu này theo Quyết định Số: 25/QĐ-ĐTĐL của Cục Điều tiết điện lực ban hành Quy trình Thử nghiệm và giám sát thử nghiệm, kích thích vào bộ điều chỉnh điện áp của hệ thống kích từ một tín hiệu điện áp Vinj có tần số từ 0.05Hz đến 3Hz với bước nhảy tần số là 0.05Hz khi máy phát điện không nối lưới. Tín hiệu biên độ và góc pha của điện áp đầu ra so với tín hiệu Vinj được thu thập và sử dụng để vẽ biểu đồ Bode từ đó đánh giá độ ổn định của hệ thống AVR cho từng bộ thông số PID.

### 4.2. Phương pháp thực hiện

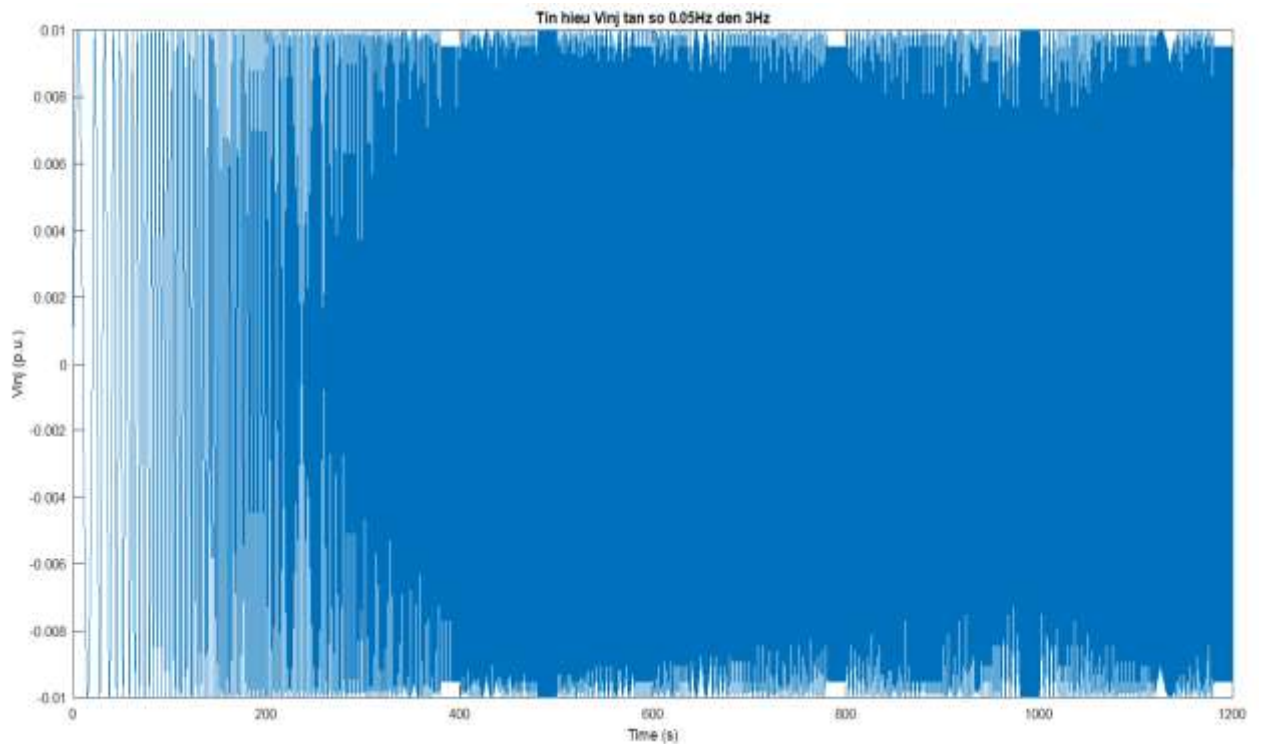
Nhằm mục tiêu phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ khi có nhiễu tác động, trong phần này, một tín hiệu nhiễu được tạo ra với tần số thay đổi liên tục trong khoảng từ 0.05Hz đến 3Hz, biên độ của tín hiệu Vinj có giá trị để đảm bảo điện áp đầu cực máy phát dao động không quá 1% điện áp định mức. Tín hiệu được lưu dưới dạng biến trong Workspace của Matlab với tên là Vinj\_signal. Từ màn hình soạn thảo của matlab thực hiện thao tác sau:

```
% Cấu hình HT
f_start = 0.05;    % Hz
f_step = 0.05;    % Bước tần số
num_steps = 60;   % Số bước
duration_per_step = 20; % Thời gian mỗi bước (giây)
amplitude = 0.01; % Biên độ 1% (p.u.)
% Tạo thời gian chi tiết
dt = 0.1; % Bước thời gian
t_total = num_steps * duration_per_step;
t = (0:dt:t_total)';
% Khởi tạo Vinj
Vinj = zeros(size(t));
```

```

% Tao tin hieu tung doan
for i = 1:num_steps
    % Tinh thoi gian tong
    f_current = f_start + (i - 1) * f_step;
    % Xac dinh khoang thoi gian
    t_start = (i - 1) * duration_per_step;
    t_end = i * duration_per_step;
    idx = (t >= t_start) & (t <= t_end);
    % Tao sóng sin
    Vinj(idx) = amplitude * sin(2 * pi * f_current * (t(idx) - t_start));
end
% Gop thanh bien cho From Workspace
Vinj_signal = [t Vinj];
% (Optional) Ve
figure;
plot(t, Vinj);
xlabel('Time (s)');
ylabel('Vinj (p.u.)');
title('Tin hieu Vinj tan so 0.05Hz den 3Hz');
    
```

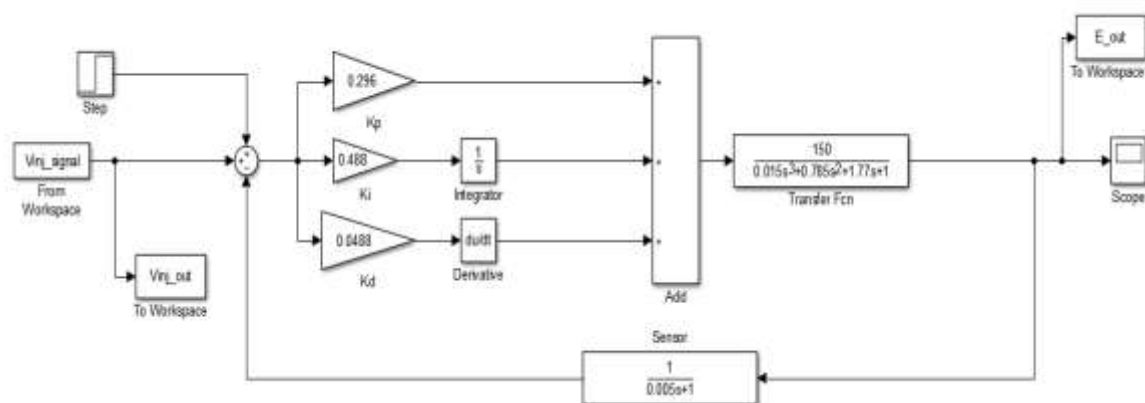
Ta thu được tín hiệu Vinj có tần số từ 0.05Hz đến 3Hz với biên độ 1%(p.u)



Hình 4. 1. Tín hiệu Vinj

Sau khi thu được tín hiệu nhiễu Vinj trong mô hình Simulink, tín hiệu Vinj được đưa vào hệ thống thông qua khối From Workspace thuộc thư viện Simulink > Sources, khối này đóng vai trò trung gian truyền dữ liệu từ môi trường Matlab sang môi trường Simulink và đặt Data name là Vinj\_signal.

Cấu hình mô phỏng đưa tín hiệu Vinj\_signal đầu vào của hệ thống kết hợp với tín hiệu đặt Vref (step). Hai tín hiệu này cộng lại thông qua khối Sum để tạo tín hiệu điều khiển tác động vào đầu vào của bộ PID.



Hình 4. 2. Sơ đồ hệ thống trong Simulink

Kết quả điện áp đầu ra của hệ thống được lưu trữ thông qua khối To Workspace trong Simulink, với tên biến là E\_out. Đồng thời, tín hiệu nhiễu đầu vào Vinj\_signal cũng được ghi lại dưới tên biến Vinj\_out, nhằm phục vụ cho quá trình phân tích và xử lý dữ liệu sau mô phỏng.

Sau khi mô phỏng hoàn tất, hai tín hiệu này được xử lý trong môi trường MATLAB để xác định các thông số đặc trưng quan trọng, bao gồm:

- Độ khuếch đại giữa điện áp đầu cực máy phát điện (tín hiệu đầu ra) so với đầu vào (điện áp kích thích Vinj), từ đó tìm được tỷ số biên độ theo đơn vị dB.
- Góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát (tín hiệu đầu ra) và đầu vào (điện áp kích thích Vinj), biểu thị mức độ trễ hoặc sớm của phản ứng hệ thống tại mỗi tần số kích thích.

Việc phân tích các yếu tố này cho phép đánh giá đáp ứng tần số và độ ổn định của hệ thống điều khiển kích từ dưới tác động của nhiễu.

Để lựa chọn bộ thông số PID tối ưu nhất, hệ thống được thử nghiệm với nhiều bộ tham số khác nhau. Các bộ này được xây dựng bằng cách thay đổi giá trị các hệ số  $K_p, K_i, K_d$  từ 20% đến 50% so với bộ PID đã được thiết kế và tính toán trong Chương 3. Việc này nhằm khảo sát ảnh hưởng của từng hệ số đến độ ổn định của hệ thống và xác định cấu hình PID mang lại hiệu quả điều khiển tốt nhất, đặc biệt trong điều kiện có nhiễu dao động trong dải tần từ 0.05 Hz đến 3 Hz.

### 4.3. Mô phỏng và thu thập dữ liệu

#### 4.3.1. Bộ tham số $K_i, K_p, K_d$ ( $K_p=0.296, K_i=0.488, K_d=0.0488$ )

Trong Chương 3, bộ điều khiển PID đã được thiết kế và tính toán với các hệ số tối ưu ban đầu như sau:

$$K_p = 0.296$$

$$K_i = 0.488$$

$$K_d = 0.0488$$

Bộ PID này được sử dụng để điều khiển điện áp kích từ đầu vào cho hệ thống kích từ của máy phát điện. Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển trong miền tần số, một tín hiệu nhiễu  $V_{inj\_signal}$  được đưa vào hệ thống, và kết quả đầu ra là điện áp đầu cực máy phát được ghi nhận thông qua biến  $E_{out}$ .

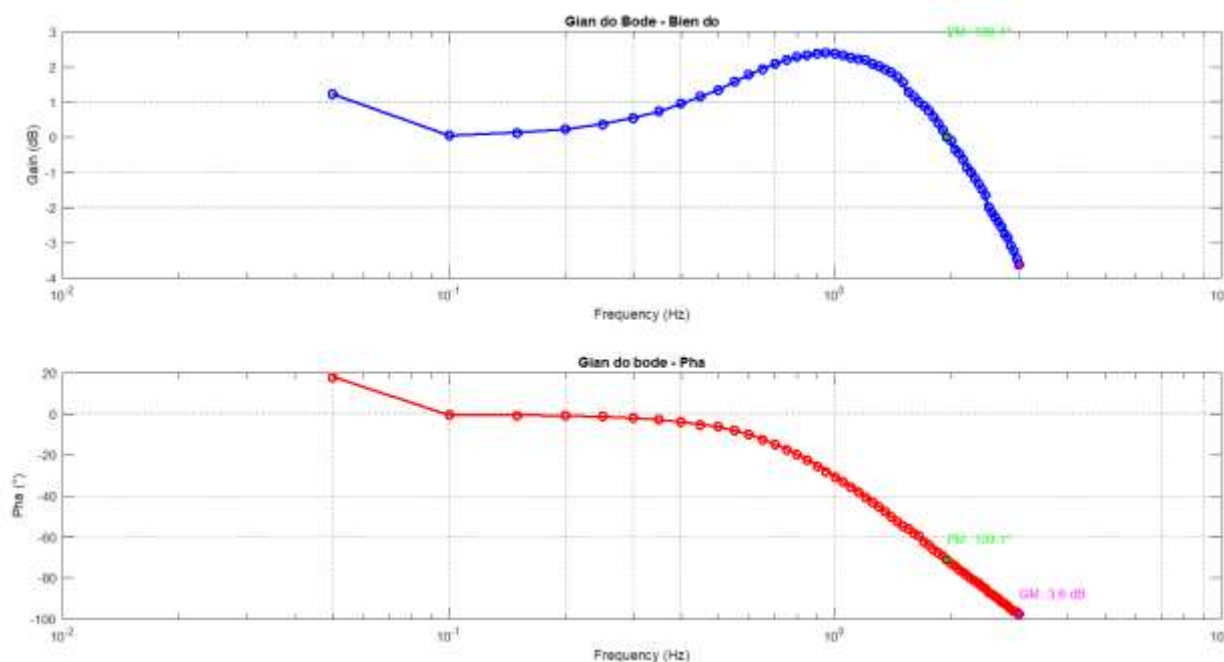
Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích  $V_{inj}$  như sau:

Bảng 4. 1: Biên độ và góc pha tại tần số

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |      |      |        |
|----------------|-----------|-------------|------|------|--------|
| 0,05           | 1,24      | 18,00       | 0,6  | 1,79 | -9,96  |
| 0,1            | 0,06      | -0,32       | 0,65 | 1,96 | -12,33 |
| 0,15           | 0,13      | -0,52       | 0,7  | 2,10 | -14,83 |
| 0,2            | 0,24      | -0,84       | 0,75 | 2,22 | -17,36 |
| 0,25           | 0,38      | -1,17       | 0,8  | 2,30 | -19,82 |
| 0,3            | 0,56      | -1,84       | 0,85 | 2,35 | -22,53 |
| 0,35           | 0,75      | -2,70       | 0,9  | 2,40 | -25,26 |
| 0,4            | 0,97      | -3,80       | 0,95 | 2,41 | -27,89 |
| 0,45           | 1,16      | -5,16       | 1    | 2,38 | -30,51 |
| 0,5            | 1,36      | -6,10       | 1,05 | 2,35 | -32,97 |
| 0,55           | 1,59      | -7,92       | 1,1  | 2,28 | -35,47 |
|                |           |             | 1,15 | 2,24 | -37,88 |
|                |           |             | 1,2  | 2,20 | -40,42 |

|      |       |        |      |       |        |
|------|-------|--------|------|-------|--------|
| 1,25 | 2,10  | -42,68 | 2,15 | -0,63 | -77,05 |
| 1,3  | 2,03  | -45,15 | 2,2  | -0,84 | -78,47 |
| 1,35 | 1,94  | -47,48 | 2,25 | -0,97 | -79,91 |
| 1,4  | 1,85  | -50,12 | 2,3  | -1,14 | -81,13 |
| 1,45 | 1,72  | -52,39 | 2,35 | -1,30 | -82,52 |
| 1,5  | 1,57  | -54,66 | 2,4  | -1,47 | -83,88 |
| 1,55 | 1,31  | -55,74 | 2,45 | -1,63 | -84,85 |
| 1,6  | 1,16  | -57,88 | 2,5  | -1,98 | -86,78 |
| 1,65 | 1,02  | -59,37 | 2,55 | -2,13 | -87,72 |
| 1,7  | 0,90  | -62,03 | 2,6  | -2,27 | -88,85 |
| 1,75 | 0,78  | -63,91 | 2,65 | -2,39 | -90,06 |
| 1,8  | 0,59  | -65,85 | 2,7  | -2,52 | -91,43 |
| 1,85 | 0,42  | -67,47 | 2,75 | -2,73 | -92,32 |
| 1,9  | 0,23  | -69,03 | 2,8  | -2,84 | -93,30 |
| 1,95 | 0,03  | -70,91 | 2,85 | -3,06 | -94,78 |
| 2    | -0,10 | -72,85 | 2,9  | -3,21 | -95,94 |
| 2,05 | -0,33 | -74,16 | 2,95 | -3,43 | -96,44 |
| 2,1  | -0,45 | -75,71 | 3    | -3,61 | -97,43 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 3. Đồ thị đáp ứng tần số

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 3.6$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 109.1^\circ$  tại tần số 1.95 Hz

Các giá trị này cho thấy độ dự trữ biên và độ dự trữ pha theo lý thuyết đáp ứng tần số chỉ cần lớn hơn 0. Tuy nhiên theo khuyến nghị của các tài liệu kỹ thuật điều khiển như IEEE Std 421.5 thì độ dự trữ biên thấp hơn mức khuyến nghị tối thiểu ( $>6$ dB). Điều này cho thấy hệ thống khá nhạy với sự thay đổi biên độ. Độ dự trữ pha ở một giá trị rất tốt vượt xa ngưỡng yêu cầu ( $>45^\circ$ ) cho thấy hệ thống có khả năng chống dao động mạnh, phản ứng tốt khi có nhiễu tác động.

Mặc dù hệ thống có độ dự trữ pha lớn nhưng độ dự trữ biên còn thấp hơn mức khuyến nghị, đặc biệt tại tần số cao 3Hz. Vì vậy để nâng cao khả năng ổn định việc hiệu chỉnh thử nghiệm các bộ thông số PID khác nhau là cần thiết. Thông qua quá trình thay đổi các tham số  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  để lựa chọn được bộ PID tối ưu giúp hệ thống:

- Duy trì ổn định ở mọi dải tần
- Giảm cộng hưởng tại tần số cao
- Phản ứng nhanh nhưng không gây dao động tại tần số thấp

#### 4.3.2. Tăng giá trị $K_p$

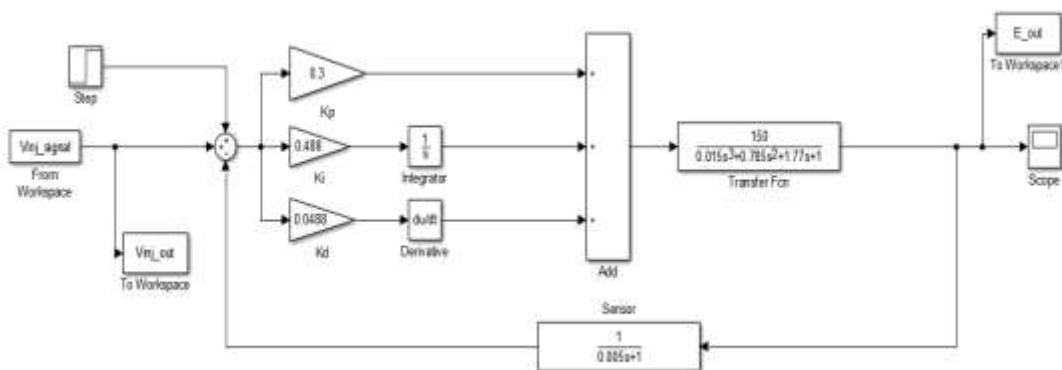
Trong hệ thống điều khiển hệ số  $K_p$  đóng vai trò xác định mức độ phản ứng của hệ thống. Thành phần tỷ lệ P tạo ra tín hiệu điều khiển tỷ lệ thuận với độ sai lệch. Tăng hệ số  $K_p$  là phương pháp cơ bản để cải thiện tốc độ phản hồi. Tuy nhiên cần điều chỉnh hợp lý tránh gây mất ổn định hệ thống.

$$K_{p1} = 0.3$$

$$K_{i1} = 0.488$$

$$K_{d1} = 0.0488$$

Ta có sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 4. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID1

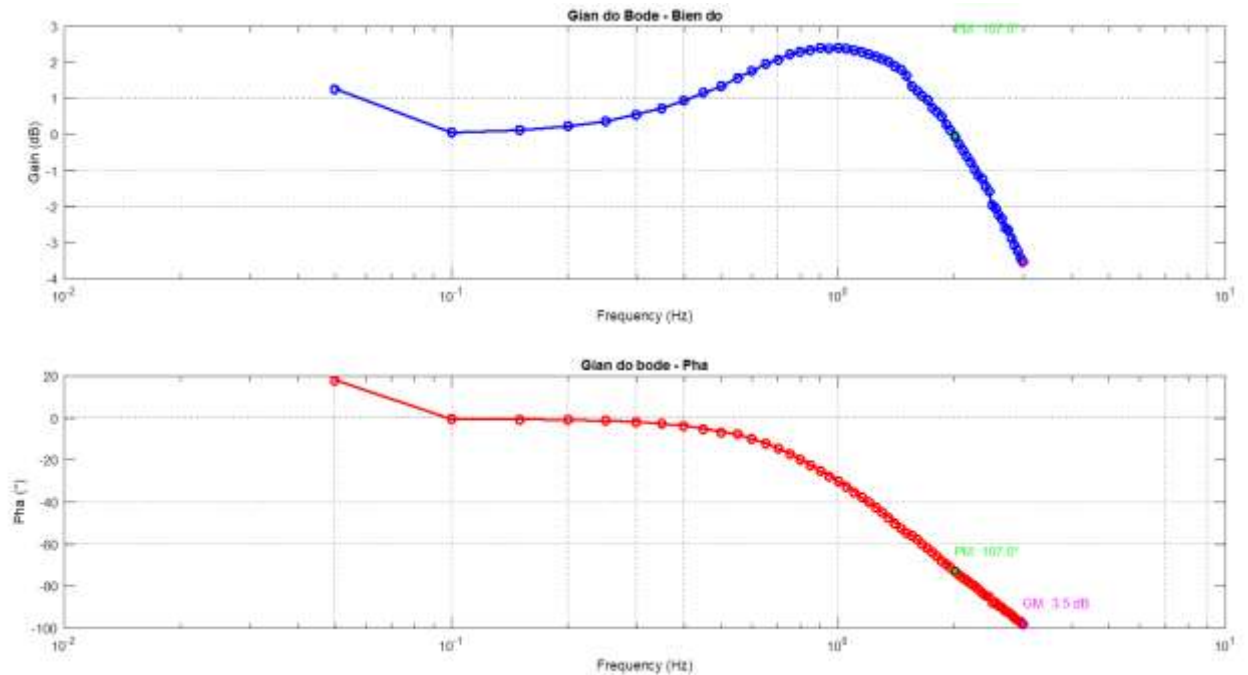
Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích Vinj như sau:

Bảng 4. 2: Biên độ và góc pha của hệ thống dung bộ thông số PID1

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |
|----------------|-----------|-------------|
| 0,05           | 1,26      | 18,05       |
| 0,1            | 0,06      | -0,30       |
| 0,15           | 0,13      | -0,55       |
| 0,2            | 0,24      | -0,77       |
| 0,25           | 0,38      | -1,12       |
| 0,3            | 0,55      | -1,79       |
| 0,35           | 0,74      | -2,60       |
| 0,4            | 0,95      | -3,69       |
| 0,45           | 1,17      | -5,13       |
| 0,5            | 1,35      | -6,65       |
| 0,55           | 1,57      | -7,67       |
| 0,6            | 1,76      | -9,88       |
| 0,65           | 1,97      | -12,06      |
| 0,7            | 2,09      | -14,50      |
| 0,75           | 2,23      | -16,96      |
| 0,8            | 2,31      | -19,67      |
| 0,85           | 2,35      | -22,33      |
| 0,9            | 2,41      | -24,98      |
| 0,95           | 2,38      | -27,50      |
| 1              | 2,41      | -30,12      |
| 1,05           | 2,38      | -32,50      |
| 1,1            | 2,34      | -35,22      |
| 1,15           | 2,31      | -37,54      |
| 1,2            | 2,23      | -39,97      |
| 1,25           | 2,17      | -42,44      |
| 1,3            | 2,10      | -44,78      |
| 1,35           | 2,04      | -47,34      |
| 1,4            | 1,89      | -49,95      |
| 1,45           | 1,82      | -52,19      |
| 1,5            | 1,64      | -54,81      |
| 1,55           | 1,35      | -55,76      |
| 1,6            | 1,22      | -57,62      |
| 1,65           | 1,08      | -59,96      |
| 1,7            | 0,97      | -61,86      |
| 1,75           | 0,75      | -63,68      |
| 1,8            | 0,65      | -65,72      |
| 1,85           | 0,51      | -67,77      |
| 1,9            | 0,28      | -69,25      |
| 1,95           | 0,14      | -70,98      |
| 2              | -0,04     | -72,99      |
| 2,05           | -0,25     | -74,23      |
| 2,1            | -0,42     | -75,94      |
| 2,15           | -0,61     | -77,20      |
| 2,2            | -0,75     | -78,54      |
| 2,25           | -0,95     | -79,71      |
| 2,3            | -1,14     | -81,16      |
| 2,35           | -1,23     | -82,96      |
| 2,4            | -1,42     | -84,05      |
| 2,45           | -1,56     | -85,11      |
| 2,5            | -1,94     | -87,57      |

|      |       |        |      |       |        |
|------|-------|--------|------|-------|--------|
| 2,55 | -2,05 | -87,65 | 2,8  | -2,85 | -93,52 |
| 2,6  | -2,22 | -89,08 | 2,85 | -3,05 | -95,06 |
| 2,65 | -2,34 | -90,07 | 2,9  | -3,22 | -95,93 |
| 2,7  | -2,57 | -91,45 | 2,95 | -3,41 | -96,69 |
| 2,75 | -2,63 | -92,33 | 3    | -3,53 | -97,76 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 5. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID1

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 3.5$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 107^\circ$  tại tần số 2 Hz

Khi tăng giá trị  $K_P$  thì độ dự trữ biên và độ dự trữ pha đều giảm so với bộ thông số đã tính toán ở chương 3. Điều này cho thấy việc tăng  $K_P$  giúp cho hệ thống đáp ứng nhanh hơn nhưng khiến cho hệ thống nhạy hơn và kém ổn định hơn. Do đó việc tăng tham số  $K_P$  là không khả thi.

### 4.3.3. Tăng giá trị $K_I$

Thành phần  $K_I$  giúp loại bỏ sai số tĩnh bằng cách tích lũy sai số theo thời gian. Việc tăng  $K_I$  tăng khả năng loại bỏ sai lệch, duy trì đầu ra ổn định trước các nhiễu. Tuy

nhiên nếu tăng  $K_I$  quá cao có thể dẫn đến giảm độ dự trữ pha và tăng nguy cơ cộng hưởng ở tần số trung bình.

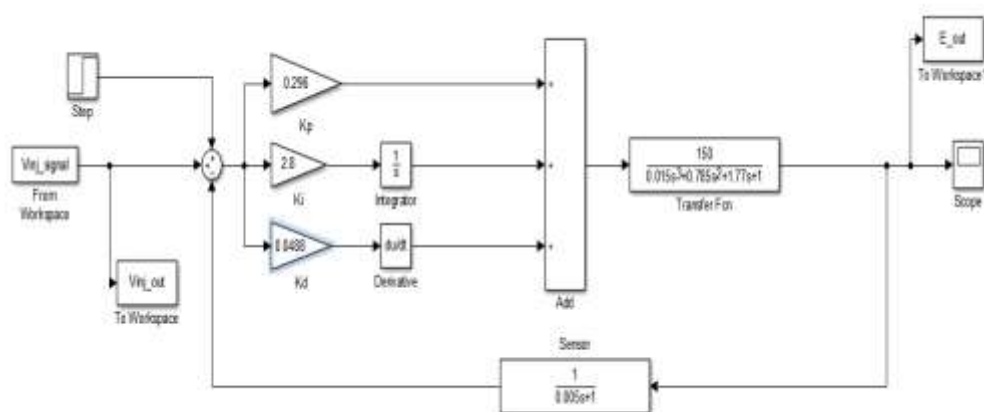
Bộ thông số PID2 để thử nghiệm:

$$K_{P2} = 0.296$$

$$K_{I2} = 2.8$$

$$K_{D2} = 0.0488$$

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 6. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID2

Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích  $V_{inj}$  như sau:

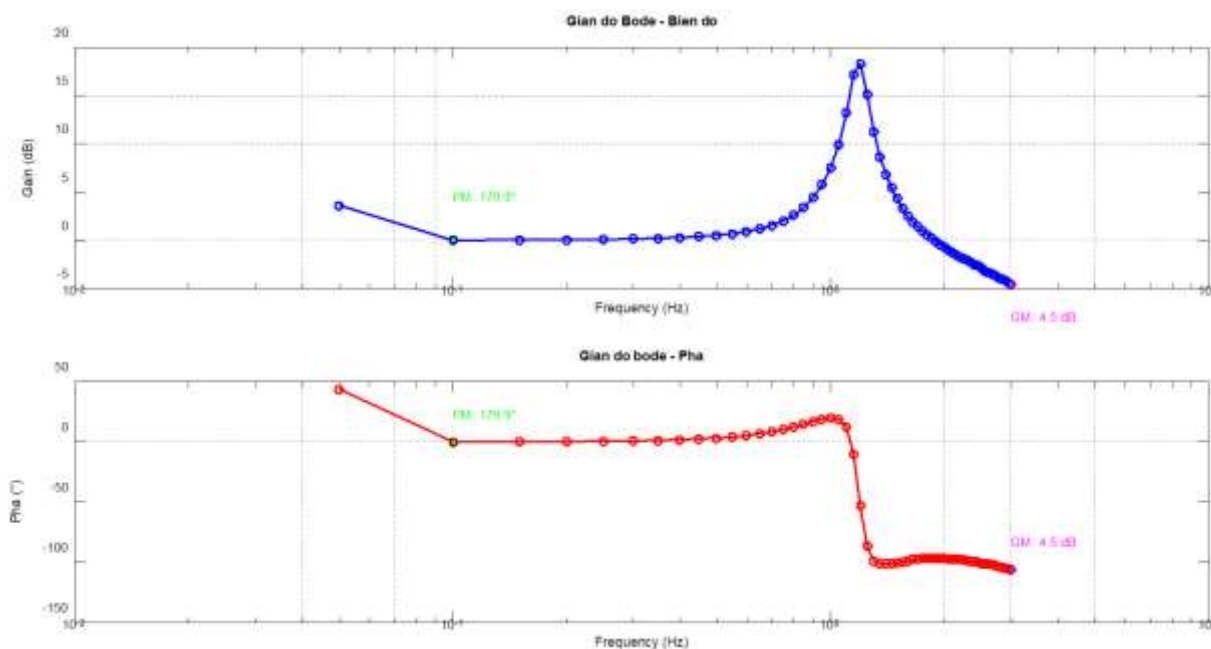
Bảng 4. 3: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID2

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |
|----------------|-----------|-------------|
| 0,05           | 3,60      | 43,51       |
| 0,1            | 0,01      | -0,06       |
| 0,15           | 0,03      | 0,21        |
| 0,2            | 0,06      | 0,35        |
| 0,25           | 0,09      | 0,55        |
| 0,3            | 0,14      | 0,85        |
| 0,35           | 0,20      | 1,26        |
| 0,4            | 0,28      | 1,79        |
| 0,45           | 0,38      | 2,49        |
| 0,5            | 0,53      | 2,98        |
| 0,55           | 0,69      | 4,08        |
| 0,6            | 0,92      | 5,24        |
| 0,65           | 1,21      | 6,76        |
| 0,7            | 1,54      | 8,43        |
| 0,75           | 2,02      | 10,44       |
| 0,8            | 2,62      | 12,45       |
| 0,85           | 3,42      | 14,86       |
| 0,9            | 4,43      | 16,91       |
| 0,95           | 5,79      | 18,83       |
| 1              | 7,51      | 19,91       |
| 1,05           | 9,95      | 18,78       |
| 1,1            | 13,21     | 12,21       |
| 1,15           | 17,17     | -10,39      |
| 1,2            | 18,34     | -53,05      |
| 1,25           | 15,10     | -86,68      |
| 1,3            | 11,24     | -98,84      |
| 1,35           | 8,62      | -101,05     |
| 1,4            | 6,84      | -101,21     |
| 1,45           | 5,48      | -100,91     |
| 1,5            | 4,39      | -100,40     |
| 1,55           | 3,33      | -99,48      |

|      |       |        |
|------|-------|--------|
| 1,6  | 2,55  | -98,94 |
| 1,65 | 1,96  | -97,42 |
| 1,7  | 1,47  | -97,35 |
| 1,75 | 0,95  | -96,71 |
| 1,8  | 0,60  | -96,77 |
| 1,85 | 0,23  | -96,70 |
| 1,9  | -0,11 | -96,67 |
| 1,95 | -0,41 | -96,68 |
| 2    | -0,71 | -96,72 |
| 2,05 | -0,99 | -97,12 |
| 2,1  | -1,26 | -96,98 |
| 2,15 | -1,48 | -97,14 |
| 2,2  | -1,75 | -97,13 |
| 2,25 | -1,91 | -97,56 |
| 2,3  | -2,07 | -98,25 |

|      |       |         |
|------|-------|---------|
| 2,35 | -2,26 | -98,89  |
| 2,4  | -2,52 | -99,16  |
| 2,45 | -2,61 | -99,53  |
| 2,5  | -2,81 | -100,65 |
| 2,55 | -3,14 | -101,05 |
| 2,6  | -3,30 | -100,98 |
| 2,65 | -3,35 | -101,49 |
| 2,7  | -3,51 | -101,65 |
| 2,75 | -3,68 | -102,73 |
| 2,8  | -3,96 | -103,21 |
| 2,85 | -4,04 | -104,13 |
| 2,9  | -4,16 | -104,71 |
| 2,95 | -4,37 | -105,13 |
| 3    | -4,54 | -105,73 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 7. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID2

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 4.5$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 179.9^\circ$  tại tần số 0.1 Hz

Khi tăng hệ số  $K_I$  độ dự trữ biên và độ dự trữ pha của hệ thống tăng hơn so với bộ thông số PID ban đầu. Tuy nhiên độ dự trữ biên vẫn thấp hơn mức kiến nghị (>6dB).

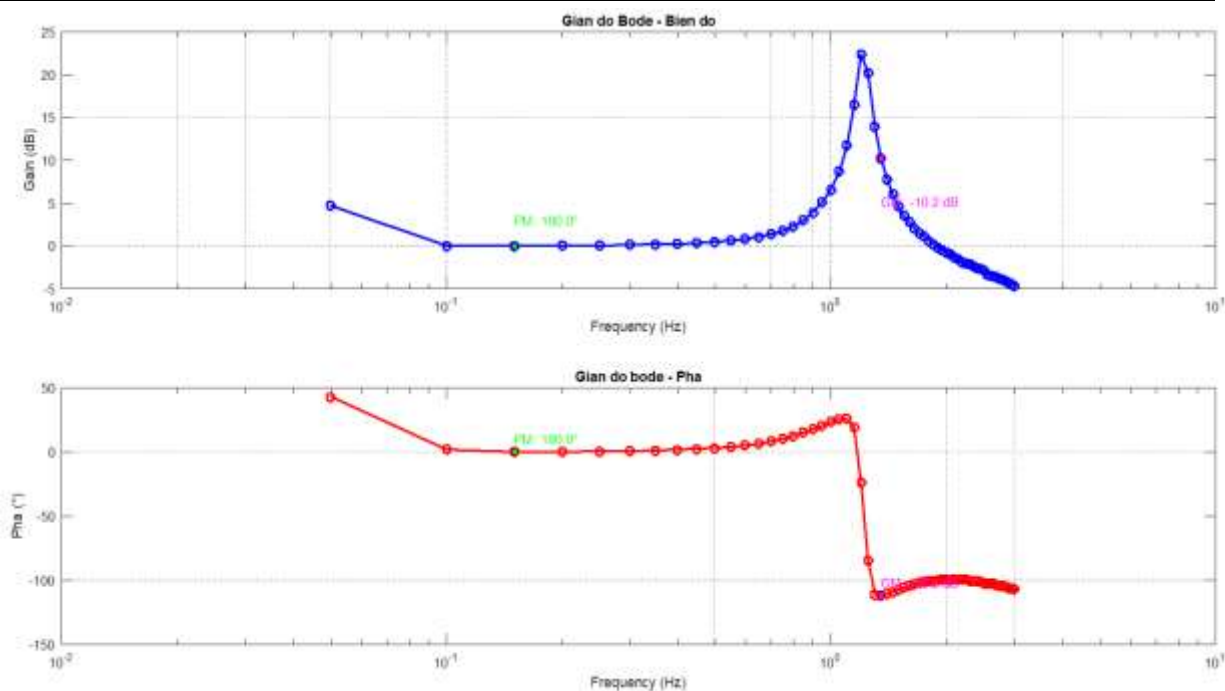
Ta tiếp tục tăng hệ số  $K_I$  để thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống:

$$K_{P2} = 0.296; K_{I2'} = 3; K_{D2} = 0.0488$$

Bảng 4. 4: Biên độ và góc pha của hệ thống dung bộ thông số PID2'

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |      |       |         |
|----------------|-----------|-------------|------|-------|---------|
| 0,05           | 4,72      | 42,81       | 1,5  | 4,61  | -107,06 |
| 0,1            | 0,03      | 1,98        | 1,55 | 3,59  | -105,63 |
| 0,15           | 0,01      | 0,03        | 1,6  | 2,80  | -104,39 |
| 0,2            | 0,05      | 0,33        | 1,65 | 2,07  | -102,76 |
| 0,25           | 0,08      | 0,54        | 1,7  | 1,50  | -101,88 |
| 0,3            | 0,13      | 0,84        | 1,75 | 1,09  | -101,07 |
| 0,35           | 0,18      | 1,18        | 1,8  | 0,58  | -100,54 |
| 0,4            | 0,27      | 1,78        | 1,85 | 0,20  | -100,51 |
| 0,45           | 0,36      | 2,43        | 1,9  | -0,22 | -99,43  |
| 0,5            | 0,48      | 2,98        | 1,95 | -0,46 | -98,96  |
| 0,55           | 0,63      | 3,95        | 2    | -0,78 | -99,09  |
| 0,6            | 0,82      | 5,12        | 2,05 | -1,00 | -99,89  |
| 0,65           | 1,05      | 6,57        | 2,1  | -1,39 | -99,24  |
| 0,7            | 1,38      | 8,30        | 2,15 | -1,56 | -99,21  |
| 0,75           | 1,78      | 10,29       | 2,2  | -1,88 | -99,05  |
| 0,8            | 2,30      | 12,61       | 2,25 | -2,05 | -99,28  |
| 0,85           | 3,01      | 15,27       | 2,3  | -2,14 | -100,29 |
| 0,9            | 3,89      | 17,98       | 2,35 | -2,38 | -100,32 |
| 0,95           | 5,07      | 20,54       | 2,4  | -2,58 | -100,52 |
| 1              | 6,58      | 23,50       | 2,45 | -2,65 | -100,80 |
| 1,05           | 8,70      | 25,52       | 2,5  | -2,91 | -101,99 |
| 1,1            | 11,72     | 25,99       | 2,55 | -3,33 | -102,35 |
| 1,15           | 16,50     | 19,13       | 2,6  | -3,39 | -102,23 |
| 1,2            | 22,40     | -23,81      | 2,65 | -3,53 | -102,41 |
| 1,25           | 20,24     | -84,36      | 2,7  | -3,64 | -103,38 |
| 1,3            | 13,91     | -110,93     | 2,75 | -3,81 | -104,05 |
| 1,35           | 10,19     | -112,02     | 2,8  | -3,93 | -104,40 |
| 1,4            | 7,73      | -110,63     | 2,85 | -4,10 | -105,01 |
| 1,45           | 6,04      | -108,87     | 2,9  | -4,31 | -105,81 |
|                |           |             | 2,95 | -4,47 | -106,12 |
|                |           |             | 3    | -4,65 | -106,61 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 8. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID2'

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = -10.1$  dB tại tần số 1.35Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 180.03^\circ$  tại tần số 0.15 Hz

Khi tăng  $K_I$  quá lớn dẫn đến độ dự trữ biên âm và độ dự trữ pha tăng quá cao. Điều này cho thấy hệ thống bị mất ổn định. Khi tăng  $K_I$  quá cao làm tăng nhanh biên độ ở vùng tần số trung bình (0.5-2Hz), đồng thời gây ra pha trễ mạnh khiến hệ thống tụt pha sớm. Hai yếu tố này kết hợp lại làm cho hệ thống rơi vào trạng thái  $G_M$  âm vừa bị trễ pha mạnh vừa khuếch đại quá mức dẫn đến xuất hiện đỉnh cộng hưởng ở tần số 1.2Hz.

- Kết luận:

Khi tiến hành tăng hệ số tích phân  $K_I$  trong bộ điều khiển PID kết quả mô phỏng cho thấy độ dự trữ biên  $G_M$  tăng do thành phần tích phân giúp nâng độ lợi ở tần số thấp đồng thời loại bỏ sai số tĩnh hiệu quả hơn giúp cải thiện hệ thống nhưng vẫn chưa đạt đến giá trị yêu cầu. Khi tiếp tục tăng thêm đến ngưỡng thì hệ thống bị mất ổn định dẫn đến độ dự trữ biên âm và độ khuếch đại lớn làm cho hệ thống mất ổn định. Xuất hiện đỉnh cộng hưởng dao động ở tần số trung bình. Do đó phương án này không khả thi.

### 4.3.4. Tăng giá trị $K_d$

Trong quá trình điều chỉnh bộ PID, việc tăng hệ số vi phân  $K_D$  được sử dụng để cải thiện độ ổn định của hệ thống và triệt tiêu dao động tại vùng tần số cộng hưởng. Tuy nhiên cần đảm bảo mức tăng không vượt ngưỡng gây khuếch đại nhiễu cao tần.

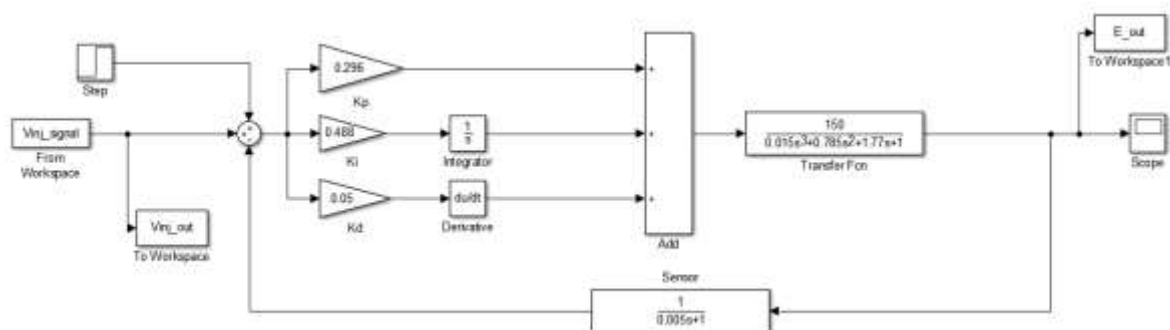
Bộ thông số PID3 để thử nghiệm:

$$K_{P3} = 0.296$$

$$K_{I3} = 0.488$$

$$K_{D3} = 0.05$$

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 9. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID3

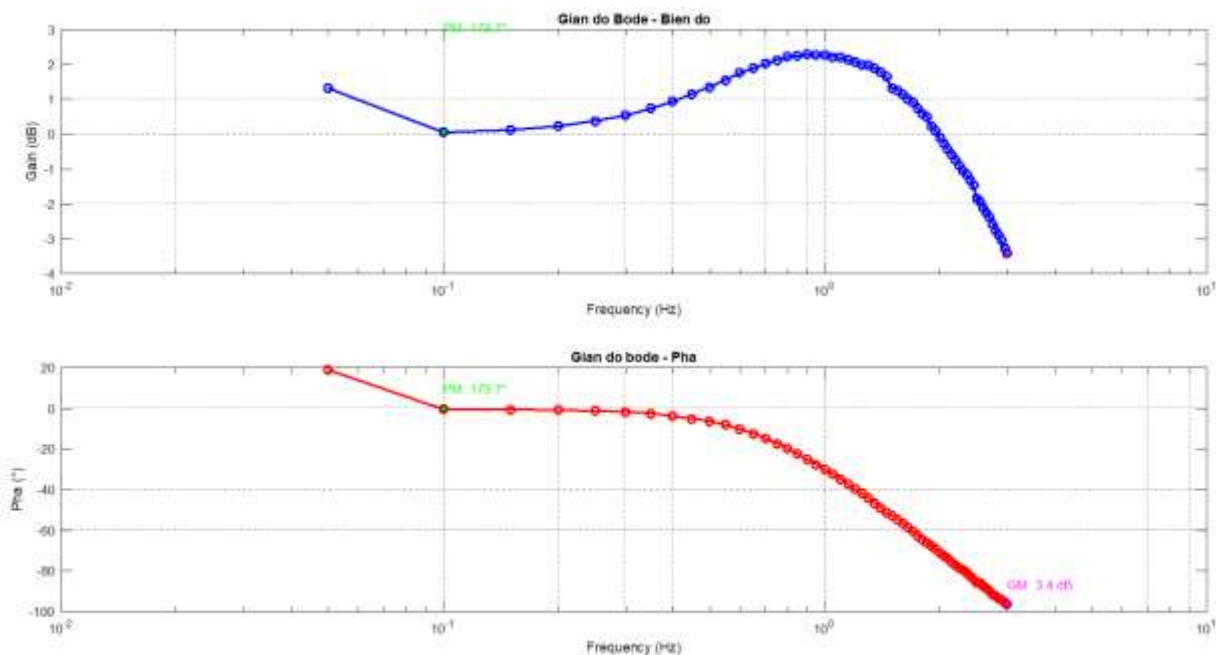
Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích  $V_{inj}$  như sau:

Bảng 4. 5: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID3

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |
|----------------|-----------|-------------|
| 0,05           | 1,32      | 19,00       |
| 0,1            | 0,06      | -0,29       |
| 0,15           | 0,13      | -0,53       |
| 0,2            | 0,24      | -0,77       |
| 0,25           | 0,39      | -1,16       |
| 0,3            | 0,55      | -1,78       |
| 0,35           | 0,75      | -2,53       |
| 0,4            | 0,95      | -3,77       |
| 0,45           | 1,16      | -5,16       |
| 0,5            | 1,36      | -6,26       |
| 0,55           | 1,56      | -7,97       |
| 0,6            | 1,76      | -10,22      |
| 0,65           | 1,90      | -12,41      |
| 0,7            | 2,04      | -14,84      |
| 0,75           | 2,13      | -17,31      |
| 0,8            | 2,23      | -19,87      |
| 0,85           | 2,26      | -22,32      |
| 0,9            | 2,30      | -25,04      |
| 0,95           | 2,28      | -27,56      |
| 1              | 2,27      | -30,05      |
| 1,05           | 2,22      | -32,40      |
| 1,1            | 2,20      | -34,80      |
| 1,15           | 2,14      | -37,14      |
| 1,2            | 2,09      | -39,59      |
| 1,25           | 1,99      | -41,81      |
| 1,3            | 1,99      | -44,16      |

|      |       |        |      |       |        |
|------|-------|--------|------|-------|--------|
| 1,35 | 1,89  | -46,56 | 2,2  | -0,72 | -77,03 |
| 1,4  | 1,79  | -48,88 | 2,25 | -0,89 | -78,43 |
| 1,45 | 1,65  | -51,31 | 2,3  | -1,05 | -79,43 |
| 1,5  | 1,33  | -52,64 | 2,35 | -1,16 | -80,88 |
| 1,55 | 1,26  | -54,49 | 2,4  | -1,30 | -82,35 |
| 1,6  | 1,15  | -56,34 | 2,45 | -1,46 | -84,31 |
| 1,65 | 1,03  | -58,42 | 2,5  | -1,83 | -85,69 |
| 1,7  | 0,93  | -60,42 | 2,55 | -1,94 | -85,93 |
| 1,75 | 0,74  | -62,43 | 2,6  | -2,10 | -87,36 |
| 1,8  | 0,60  | -64,32 | 2,65 | -2,23 | -88,35 |
| 1,85 | 0,50  | -66,18 | 2,7  | -2,37 | -89,49 |
| 1,9  | 0,25  | -67,65 | 2,75 | -2,57 | -91,43 |
| 1,95 | 0,10  | -69,22 | 2,8  | -2,74 | -92,10 |
| 2    | -0,09 | -70,95 | 2,85 | -2,88 | -93,37 |
| 2,05 | -0,26 | -72,28 | 2,9  | -3,04 | -94,14 |
| 2,1  | -0,42 | -73,78 | 2,95 | -3,25 | -95,13 |
| 2,15 | -0,57 | -75,50 | 3    | -3,41 | -96,56 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 10. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID3

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 3.4 \text{ dB}$  tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 179.7^\circ$  tại tần số 0.1 Hz

Khi tăng giá trị  $K_D$  thì độ dự trữ biên giảm và độ dự trữ pha tăng so với bộ thông số đã tính toán ở chương 3. Điều này cho thấy việc tăng  $K_D$  giúp cho hệ thống đáp ứng nhanh hơn nhưng khiến cho hệ thống nhạy hơn với nhiễu biên độ. Do đó việc tăng tham số  $K_D$  là không khả thi.

### 4.3.5. Giảm giá trị $K_p$

Khi thay đổi thông số  $K_P$  bằng việc tăng hệ số thì độ dự trữ pha giảm hơn so với bộ thông số ban đầu. Do đó tiếp tục thử nghiệm bộ thông số PID mới với  $K_P$  giảm.

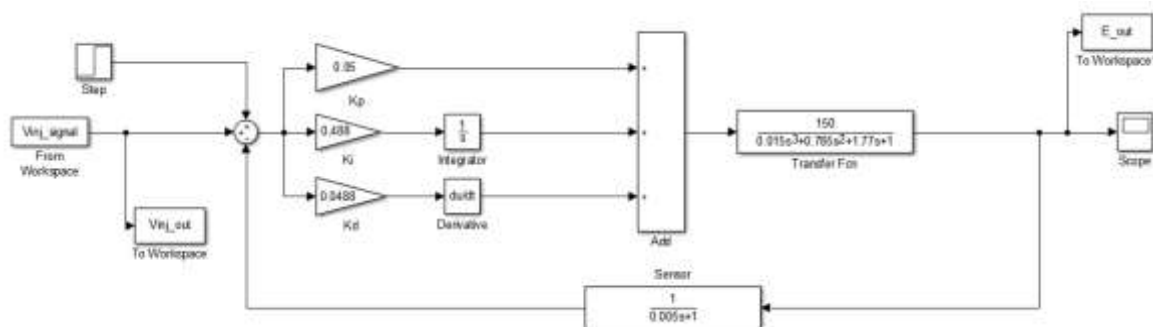
Bộ thông số PID4 để thử nghiệm:

$$K_{P4} = 0.05$$

$$K_{I4} = 0.488$$

$$K_{D4} = 0.0488$$

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 11. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID4

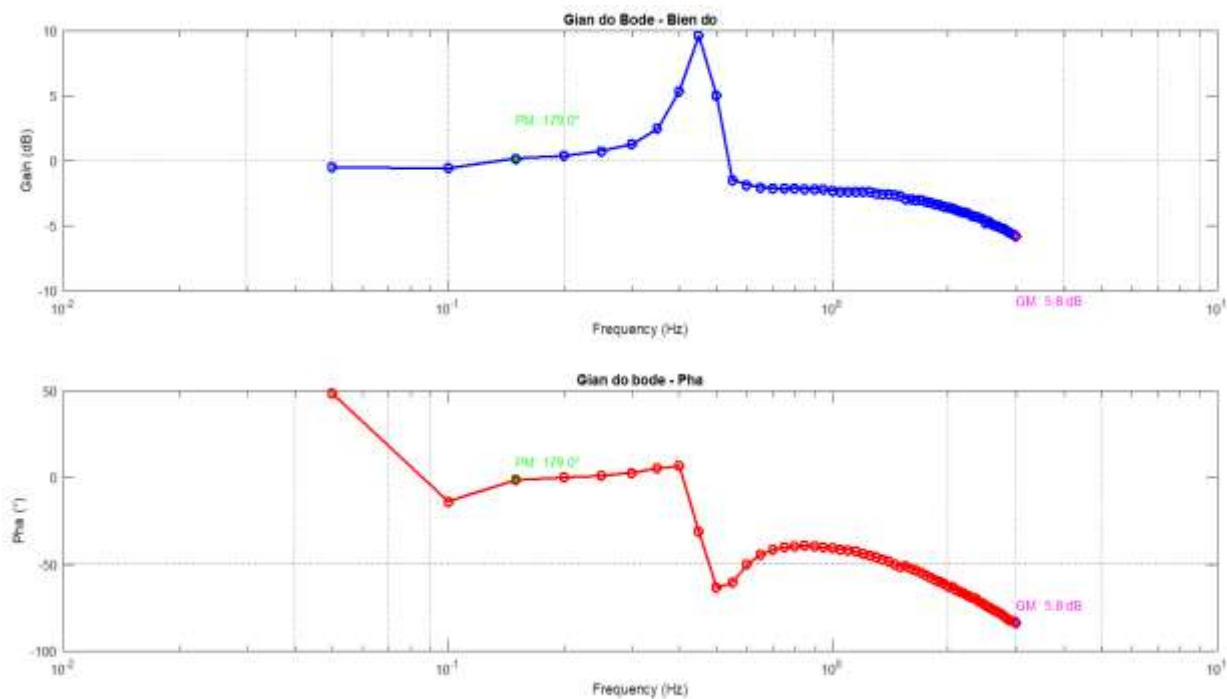
Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích Vinj như sau:

Bảng 4. 6: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID4

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |
|----------------|-----------|-------------|
| 0,05           | -0,48     | 48,72       |
| 0,1            | -0,54     | -13,77      |
| 0,15           | 0,18      | -1,02       |
| 0,2            | 0,41      | 0,35        |
| 0,25           | 0,73      | 1,26        |
| 0,3            | 1,29      | 2,86        |
| 0,35           | 2,48      | 5,56        |
| 0,4            | 5,37      | 6,81        |
| 0,45           | 9,62      | -30,92      |
| 0,5            | 5,02      | -63,41      |
| 0,55           | -1,48     | -60,48      |
| 0,6            | -1,86     | -49,93      |
| 0,65           | -2,04     | -44,43      |
| 0,7            | -2,11     | -41,45      |
| 0,75           | -2,13     | -39,95      |
| 0,8            | -2,12     | -39,50      |
| 0,85           | -2,16     | -39,20      |
| 0,9            | -2,16     | -39,59      |

|      |       |        |      |       |        |
|------|-------|--------|------|-------|--------|
| 0,95 | -2,21 | -40,04 | 2    | -3,59 | -62,68 |
| 1    | -2,28 | -40,59 | 2,05 | -3,64 | -62,90 |
| 1,05 | -2,34 | -41,20 | 2,1  | -3,77 | -64,42 |
| 1,1  | -2,35 | -41,67 | 2,15 | -3,87 | -65,53 |
| 1,15 | -2,35 | -42,32 | 2,2  | -3,94 | -66,43 |
| 1,2  | -2,37 | -43,78 | 2,25 | -4,01 | -67,88 |
| 1,25 | -2,39 | -44,52 | 2,3  | -4,20 | -68,92 |
| 1,3  | -2,49 | -45,82 | 2,35 | -4,28 | -69,57 |
| 1,35 | -2,54 | -46,99 | 2,4  | -4,32 | -71,18 |
| 1,4  | -2,55 | -48,02 | 2,45 | -4,43 | -72,10 |
| 1,45 | -2,61 | -50,13 | 2,5  | -4,78 | -73,64 |
| 1,5  | -2,69 | -51,15 | 2,55 | -4,66 | -74,52 |
| 1,55 | -2,93 | -50,65 | 2,6  | -4,85 | -75,60 |
| 1,6  | -2,95 | -52,06 | 2,65 | -4,97 | -76,39 |
| 1,65 | -2,98 | -53,47 | 2,7  | -5,03 | -77,59 |
| 1,7  | -3,00 | -54,90 | 2,75 | -5,15 | -78,30 |
| 1,75 | -3,16 | -56,20 | 2,8  | -5,22 | -79,69 |
| 1,8  | -3,17 | -57,40 | 2,85 | -5,40 | -81,11 |
| 1,85 | -3,32 | -58,75 | 2,9  | -5,53 | -82,28 |
| 1,9  | -3,38 | -59,82 | 2,95 | -5,65 | -82,56 |
| 1,95 | -3,52 | -60,88 | 3    | -5,78 | -83,53 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 12. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID4

➤ *Nhận xét:*

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 5.8$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 179^\circ$  tại tần số 0.15 Hz

Khi giảm  $K_P$  thì cả độ dự trữ biên và độ dự trữ pha đều tăng. Điều này hoàn toàn phù hợp với những bộ thông số đã thử nghiệm ở trên. Tuy nhiên xuất hiện các đỉnh dao động ở tần số thấp từ 0.05Hz đến 1Hz. Do đó cần điều chỉnh kết hợp với các hệ số khác.

### 4.3.6. Giảm giá trị $K_I$

Khi thay đổi thông số  $K_I$  bằng việc tăng hệ số thì độ dự trữ pha tăng hơn so với bộ thông số ban đầu. Do đó tiếp tục thử nghiệm bộ thông số PID mới với  $K_I$  giảm.

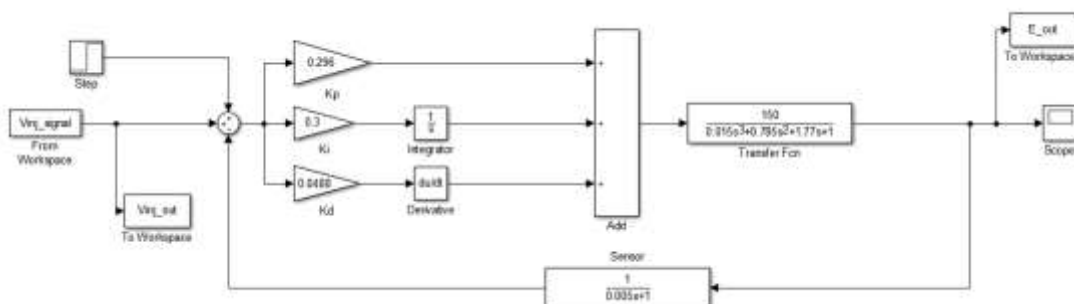
Bộ thông số PID5 để thử nghiệm:

$$K_{P5} = 0.296$$

$$K_{I5} = 0.3$$

$$K_{D5} = 0.0488$$

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 13. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID5

Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích Vinj như sau:

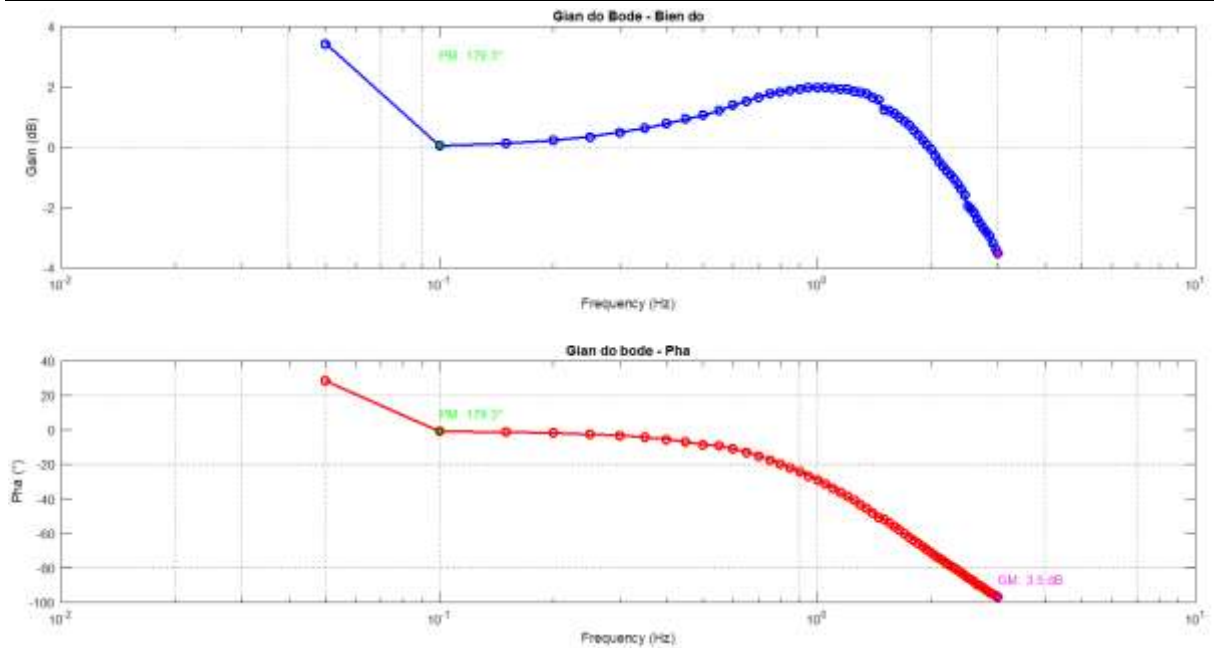
Bảng 4. 7: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID5

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |      |      |       |
|----------------|-----------|-------------|------|------|-------|
| 0,05           | 3,44      | 28,56       | 0,2  | 0,23 | -1,55 |
| 0,1            | 0,06      | -0,66       | 0,25 | 0,35 | -2,30 |
| 0,15           | 0,13      | -1,09       | 0,3  | 0,50 | -3,07 |
|                |           |             | 0,35 | 0,64 | -4,15 |
|                |           |             | 0,4  | 0,79 | -5,34 |

NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ MÁY PHÁT ĐIỆN

|      |      |        |      |       |        |
|------|------|--------|------|-------|--------|
| 0,45 | 0,95 | -6,75  | 1,75 | 0,74  | -61,94 |
| 0,5  | 1,07 | -8,33  | 1,8  | 0,57  | -63,83 |
| 0,55 | 1,22 | -9,12  | 1,85 | 0,41  | -65,60 |
| 0,6  | 1,40 | -10,93 | 1,9  | 0,24  | -67,65 |
| 0,65 | 1,54 | -12,92 | 1,95 | 0,09  | -69,23 |
| 0,7  | 1,67 | -15,04 | 2    | -0,07 | -71,11 |
| 0,75 | 1,78 | -17,34 | 2,05 | -0,26 | -72,60 |
| 0,8  | 1,84 | -19,57 | 2,1  | -0,48 | -74,18 |
| 0,85 | 1,89 | -21,89 | 2,15 | -0,63 | -75,56 |
| 0,9  | 1,94 | -24,15 | 2,2  | -0,77 | -77,16 |
| 0,95 | 1,99 | -26,56 | 2,25 | -0,90 | -78,47 |
| 1    | 1,98 | -28,79 | 2,3  | -1,06 | -79,90 |
| 1,05 | 1,98 | -31,28 | 2,35 | -1,23 | -81,26 |
| 1,1  | 1,97 | -33,61 | 2,4  | -1,38 | -82,66 |
| 1,15 | 1,94 | -36,04 | 2,45 | -1,58 | -84,46 |
| 1,2  | 1,93 | -38,26 | 2,5  | -1,93 | -85,75 |
| 1,25 | 1,87 | -40,61 | 2,55 | -2,03 | -86,61 |
| 1,3  | 1,83 | -43,08 | 2,6  | -2,17 | -88,03 |
| 1,35 | 1,77 | -45,47 | 2,65 | -2,38 | -89,39 |
| 1,4  | 1,66 | -47,80 | 2,7  | -2,51 | -90,08 |
| 1,45 | 1,58 | -50,44 | 2,75 | -2,68 | -91,42 |
| 1,5  | 1,26 | -51,48 | 2,8  | -2,80 | -92,59 |
| 1,55 | 1,22 | -53,73 | 2,85 | -2,94 | -93,82 |
| 1,6  | 1,12 | -55,97 | 2,9  | -3,16 | -94,97 |
| 1,65 | 1,00 | -57,82 | 2,95 | -3,35 | -95,62 |
| 1,7  | 0,88 | -60,02 | 3    | -3,51 | -96,67 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 14. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID5

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 3.5$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 179.3^\circ$  tại tần số 0.1 Hz

Khi giảm  $K_I$  thì cả độ dự trữ biên giảm. Điều này hoàn toàn phù hợp với phần thử nghiệm tăng giá trị thông số  $K_I$ . Độ dự trữ biên vẫn chưa đạt được yêu cầu.

#### 4.3.7. Giảm giá trị $K_D$

Khi thay đổi thông số  $K_I$  bằng việc tăng hệ số thì độ dự trữ pha tăng hơn so với bộ thông số ban đầu. Do đó tiếp tục thử nghiệm bộ thông số PID mới với  $K_D$  giảm.

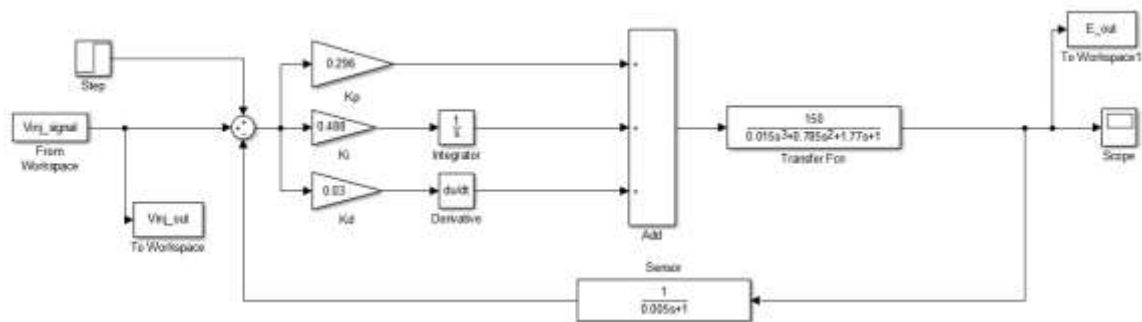
Bộ thông số PID5 để thử nghiệm:

$$K_{P6} = 0.296$$

$$K_{I6} = 0.488$$

$$K_{D6} = 0.03$$

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



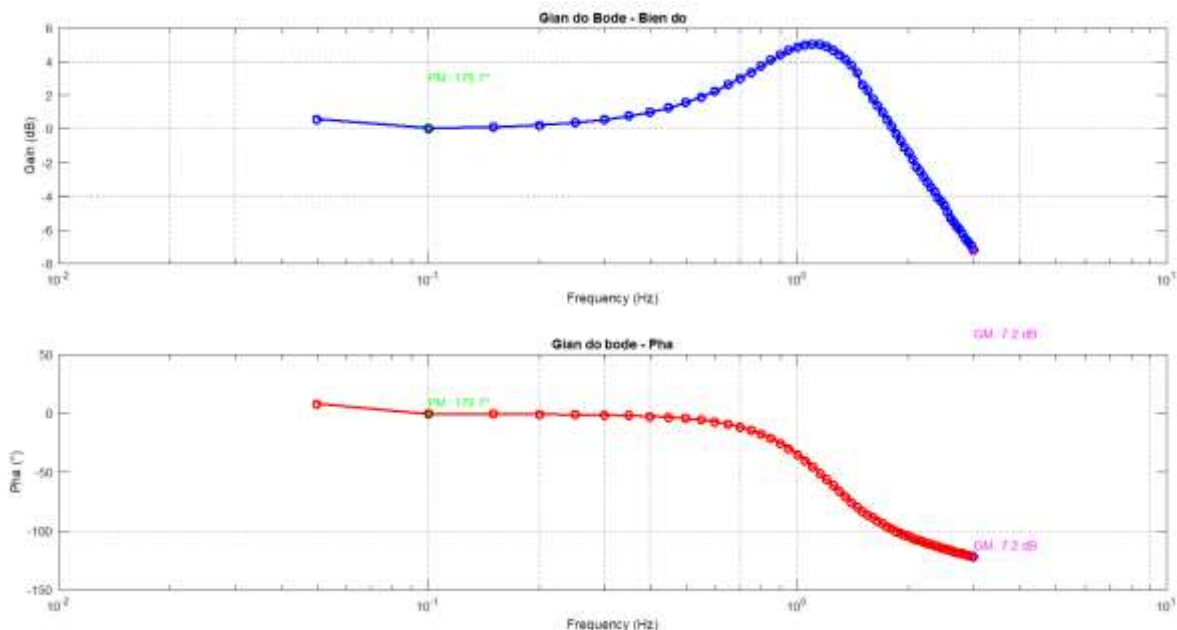
Hình 4. 15. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID6

Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích Vinj như sau:

Bảng 4. 8: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID6

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |
|----------------|-----------|-------------|
| 0,05           | 0,59      | 8,17        |
| 0,1            | 0,06      | -0,30       |
| 0,15           | 0,13      | -0,47       |
| 0,2            | 0,24      | -0,67       |
| 0,25           | 0,38      | -0,94       |
| 0,3            | 0,56      | -1,32       |
| 0,35           | 0,77      | -1,84       |
| 0,4            | 1,01      | -2,57       |
| 0,45           | 1,28      | -3,40       |
| 0,5            | 1,58      | -4,21       |
| 0,55           | 1,92      | -5,49       |
| 0,6            | 2,25      | -7,10       |
| 0,65           | 2,63      | -9,24       |
| 0,7            | 3,02      | -11,61      |
| 0,75           | 3,38      | -14,40      |
| 0,8            | 3,76      | -17,70      |
| 0,85           | 4,11      | -21,36      |
| 0,9            | 4,42      | -25,47      |
| 0,95           | 4,68      | -29,95      |
| 1              | 4,88      | -34,88      |
| 1,05           | 5,01      | -40,03      |
| 1,1            | 5,04      | -45,29      |
| 1,15           | 5,03      | -50,66      |
| 1,2            | 4,92      | -56,05      |
| 1,25           | 4,70      | -61,26      |
| 1,3            | 4,44      | -66,04      |
| 1,35           | 4,15      | -70,84      |
| 1,4            | 3,79      | -75,42      |
| 1,45           | 3,35      | -79,44      |
| 1,5            | 2,67      | -82,92      |
| 1,55           | 2,28      | -86,16      |
| 1,6            | 1,81      | -88,52      |
| 1,65           | 1,40      | -91,28      |
| 1,7            | 1,02      | -93,55      |
| 1,75           | 0,59      | -96,32      |
| 1,8            | 0,17      | -97,85      |
| 1,85           | -0,28     | -100,07     |
| 1,9            | -0,67     | -101,74     |
| 1,95           | -1,07     | -103,19     |
| 2              | -1,40     | -104,19     |
| 2,05           | -1,78     | -106,11     |
| 2,1            | -2,20     | -107,29     |
| 2,15           | -2,50     | -108,12     |
| 2,2            | -2,85     | -109,42     |
| 2,25           | -3,15     | -110,15     |
| 2,3            | -3,44     | -111,17     |
| 2,35           | -3,74     | -112,37     |
| 2,4            | -4,06     | -113,08     |
| 2,45           | -4,29     | -114,06     |
| 2,5            | -4,54     | -114,72     |
| 2,55           | -4,92     | -115,81     |
| 2,6            | -5,26     | -116,44     |
| 2,65           | -5,48     | -117,39     |
| 2,7            | -5,78     | -118,08     |
| 2,75           | -5,94     | -118,61     |
| 2,8            | -6,22     | -118,84     |
| 2,85           | -6,50     | -119,78     |
| 2,9            | -6,67     | -120,71     |
| 2,95           | -6,94     | -121,40     |
| 3              | -7,18     | -121,82     |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 16. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID6

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 7.2$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 179.7^\circ$  tại tần số 0.1 Hz

Khi giảm  $K_D$  thì cả độ dự trữ biên và độ dự trữ pha đều tăng. Giá trị dự trữ biên đã thỏa mãn yêu cầu về độ dự trữ biên của hệ thống.

#### 4.3.8. Kết hợp tăng giảm các giá trị $K_p$ , $K_i$ , $K_d$

Mỗi thành phần tham số đóng vai trò riêng trong việc cải thiện chất lượng điều khiển. Tuy nhiên, việc thay đổi đồng thời cả ba thông số là cần thiết để cân bằng giữa tốc độ phản hồi, độ chính xác, và độ ổn định của hệ thống.

Dựa vào việc thử nghiệm các bộ thông số PID ở trên cho thấy, khi giảm hệ số  $K_p$  và  $K_D$  đã cho ra được hệ thống có độ dự trữ ổn định hơn.

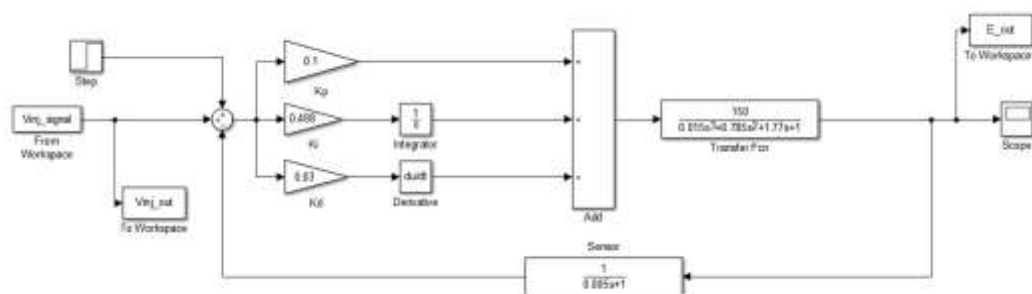
Bộ tham số PID hiệu chỉnh để thử nghiệm:

$$K_{P7} = 0.1$$

$$K_{I8} = 0.488$$

$$K_{D9} = 0.03$$

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 17. Sơ đồ mô phỏng bộ thông số PID7

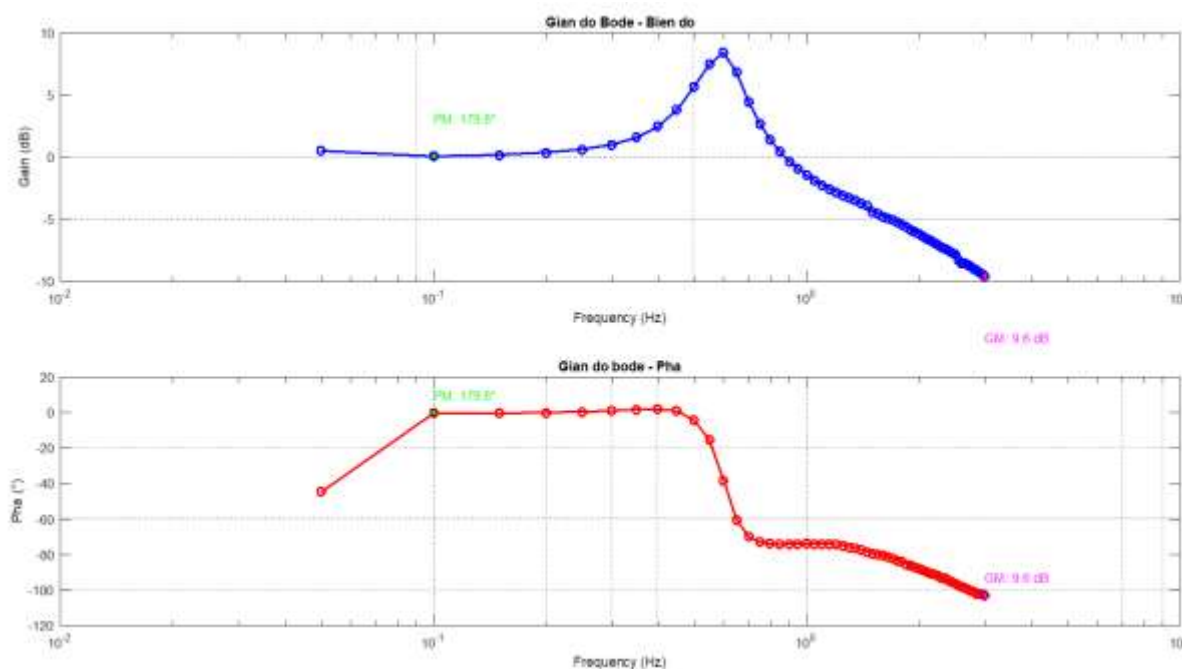
Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích Vinj như sau:

Bảng 4. 9: Biên độ và góc pha của hệ thống dùng bộ thông số PID7

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |      |       |        |
|----------------|-----------|-------------|------|-------|--------|
| 0,05           | 0,52      | -44,44      | 1,3  | -3,27 | -75,74 |
| 0,1            | 0,08      | -0,19       | 1,35 | -3,48 | -76,53 |
| 0,15           | 0,19      | -0,18       | 1,4  | -3,71 | -77,33 |
| 0,2            | 0,36      | 0,02        | 1,45 | -3,90 | -78,47 |
| 0,25           | 0,61      | 0,37        | 1,5  | -4,37 | -79,36 |
| 0,3            | 1,00      | 0,99        | 1,55 | -4,55 | -80,02 |
| 0,35           | 1,59      | 1,71        | 1,6  | -4,76 | -80,56 |
| 0,4            | 2,48      | 2,07        | 1,65 | -4,91 | -81,27 |
| 0,45           | 3,83      | 0,98        | 1,7  | -5,03 | -82,13 |
| 0,5            | 5,67      | -4,34       | 1,75 | -5,23 | -83,31 |
| 0,55           | 7,49      | -15,22      | 1,8  | -5,42 | -84,08 |
| 0,6            | 8,44      | -38,10      | 1,85 | -5,61 | -85,58 |
| 0,65           | 6,85      | -60,33      | 1,9  | -5,82 | -86,16 |
| 0,7            | 4,47      | -69,86      | 1,95 | -5,99 | -87,07 |
| 0,75           | 2,71      | -72,88      | 2    | -6,16 | -87,98 |
| 0,8            | 1,42      | -73,86      | 2,05 | -6,37 | -88,89 |
| 0,85           | 0,45      | -74,18      | 2,1  | -6,58 | -89,70 |
| 0,9            | -0,33     | -74,03      | 2,15 | -6,70 | -90,59 |
| 0,95           | -0,91     | -73,95      | 2,2  | -6,89 | -91,13 |
| 1              | -1,45     | -73,83      | 2,25 | -7,06 | -92,07 |
| 1,05           | -1,88     | -74,01      | 2,3  | -7,25 | -93,07 |
| 1,1            | -2,24     | -73,95      | 2,35 | -7,36 | -93,37 |
| 1,15           | -2,54     | -74,11      | 2,4  | -7,52 | -94,57 |
| 1,2            | -2,80     | -74,36      | 2,45 | -7,71 | -95,31 |
| 1,25           | -3,06     | -74,95      | 2,5  | -7,81 | -96,52 |
|                |           |             | 2,55 | -8,25 | -97,11 |
|                |           |             | 2,6  | -8,49 | -98,12 |

|      |       |         |      |       |         |
|------|-------|---------|------|-------|---------|
| 2,65 | -8,50 | -98,53  | 2,85 | -9,05 | -101,86 |
| 2,7  | -8,66 | -99,30  | 2,9  | -9,28 | -102,05 |
| 2,75 | -8,77 | -100,29 | 2,95 | -9,43 | -102,57 |
| 2,8  | -8,95 | -100,70 | 3    | -9,58 | -102,88 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 18. Đồ thị đáp ứng tần số của bộ thông số PID7

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

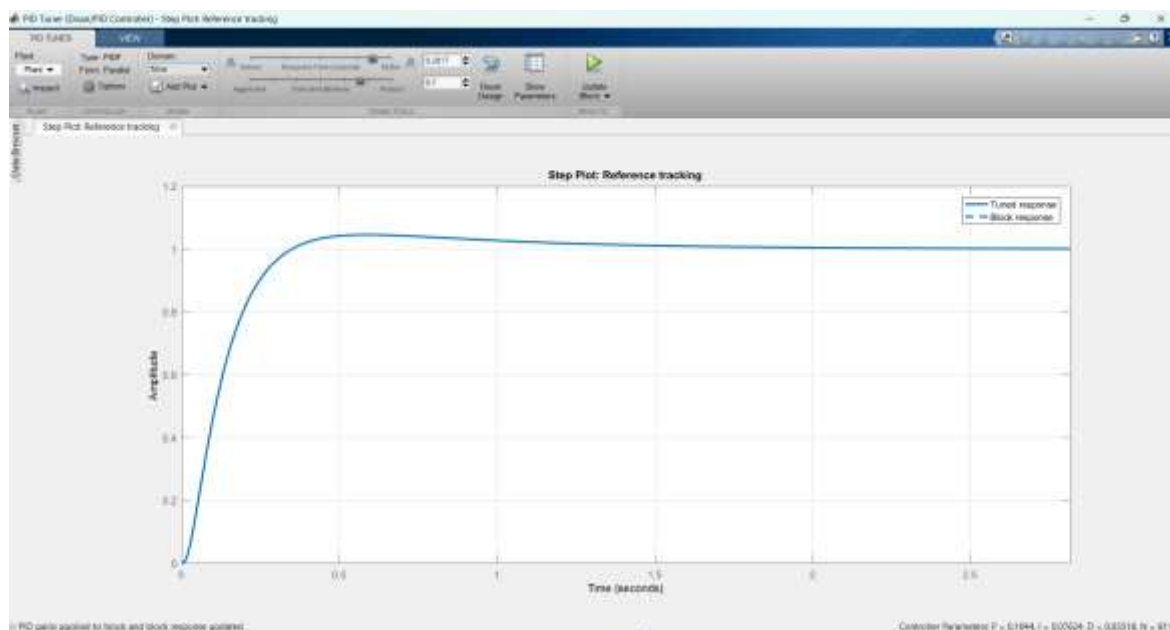
- Độ dự trữ biên:  $G_M = 9.6$  dB tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 179.8^\circ$  tại tần số 0.1 Hz

Việc giảm  $K_P$  đã làm giảm độ nhạy của hệ thống nhưng bù lại cải thiện đáng kể về độ ổn định. Hệ thống trở nên ít phản ứng với nhiễu nhỏ, nhưng lại ổn định hơn. Điều này thể hiện rằng hệ thống có khả năng chống dao động và cộng hưởng tốt. Do giảm  $K_P$  khá nhiều hệ thống có phản hồi chậm so với cấu hình hệ thống ban đầu.

Mặc dù hệ thống đã đạt được độ dự trữ biên độ yêu cầu tuy nhiên vẫn còn đỉnh cộng hưởng dao động khá cao. Do đó ta sử dụng bộ điều khiển PID Controller để tìm bộ thông số PID tối ưu thoả mãn về độ dự trữ biên độ và pha mà không gây ra đỉnh cộng hưởng dao động.

### 4.3.9. Sử dụng chức năng PID Tuner của bộ điều khiển PID Controller

Để hỗ trợ quá trình thiết kế và hiệu chỉnh bộ điều khiển PID trong các hệ thống điều khiển tự động, phần mềm MATLAB/Simulink cung cấp một công cụ tích hợp là PID Tuner – một tính năng có sẵn trong khối PID Controller thuộc thư viện Simulink Control Design. PID Tuner cho phép tự động điều chỉnh các thông số  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  dựa trên mô hình của hệ thống.

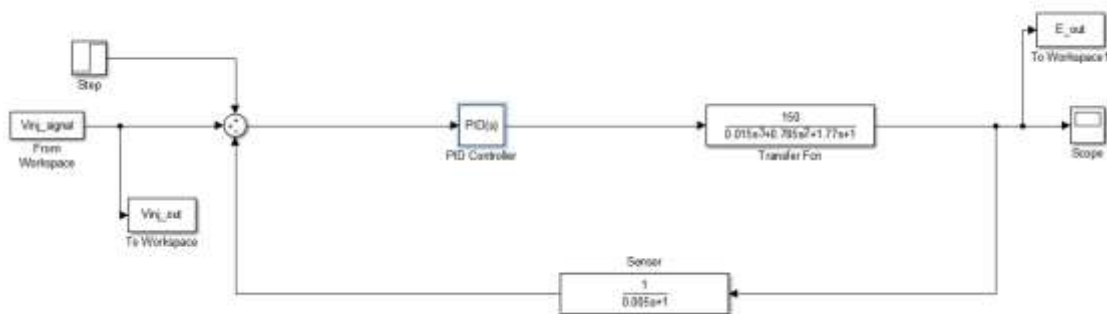


Hình 4. 19. Chức năng PID Tuner

| Controller Parameters      |                      |                       |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|
|                            | Tuned                | Block                 |
| P                          | 0.10444              | 0.1                   |
| I                          | 0.076244             | 0.488                 |
| D                          | 0.035182             | 0.03                  |
| N                          | 811.3795             | 811.3795              |
|                            |                      |                       |
|                            |                      |                       |
| Performance and Robustness |                      |                       |
|                            | Tuned                | Block                 |
| Rise time                  | 0.212 seconds        | 0.192 seconds         |
| Settling time              | 1.17 seconds         | 5.93 seconds          |
| Overshoot                  | 4.55 %               | 38.2 %                |
| Peak                       | 1.05                 | 1.38                  |
| Gain margin                | 28.6 dB @ 86.7 rad/s | -8.76 dB @ 2.86 rad/s |
| Phase margin               | 74.5 deg @ 7.1 rad/s | 34.4 deg @ 4.36 rad/s |
| Closed-loop stability      | Stable               | Stable                |

Hình 4. 20. Thông số PID Tuner so với thông số điều chỉnh

Sơ đồ mô phỏng trong Simulink



Hình 4. 21. Sơ đồ dùng PID Controller

Sau khi thực hiện mô phỏng, dữ liệu thu được cho phép xác định được độ khuếch đại (Gain) và góc lệch pha (Phase) giữa tín hiệu điện áp đầu cực và tín hiệu kích thích Vinj như sau:

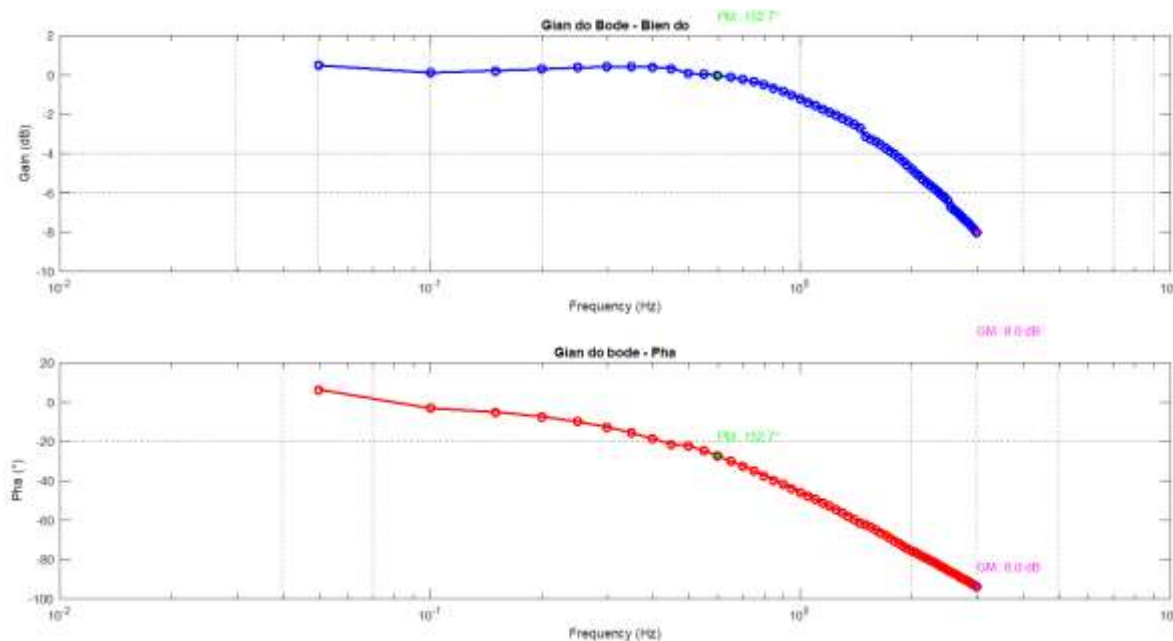
Bảng 4. 10: Biên độ và góc pha

| Frequency (Hz) | Gain (dB) | Phase (Deg) |
|----------------|-----------|-------------|
| 0,05           | 0,49      | 6,31        |
| 0,1            | 0,10      | -3,12       |
| 0,15           | 0,20      | -5,09       |
| 0,2            | 0,30      | -7,39       |
| 0,25           | 0,37      | -9,96       |
| 0,3            | 0,42      | -12,72      |
| 0,35           | 0,42      | -15,60      |
| 0,4            | 0,39      | -18,54      |
| 0,45           | 0,33      | -21,46      |
| 0,5            | 0,08      | -22,15      |
| 0,55           | 0,04      | -24,73      |
| 0,6            | -0,02     | -27,34      |
| 0,65           | -0,11     | -29,95      |
| 0,7            | -0,22     | -32,52      |
| 0,75           | -0,35     | -35,03      |
| 0,8            | -0,50     | -37,44      |
| 0,85           | -0,67     | -39,73      |
| 0,9            | -0,85     | -41,90      |
| 0,95           | -1,03     | -43,94      |
| 1              | -1,21     | -45,87      |
| 1,05           | -1,39     | -47,68      |
| 1,1            | -1,56     | -49,44      |
| 1,15           | -1,72     | -51,13      |
| 1,2            | -1,88     | -52,80      |
| 1,25           | -2,04     | -54,48      |

|      |       |        |
|------|-------|--------|
| 1,3  | -2,19 | -56,18 |
| 1,35 | -2,35 | -57,87 |
| 1,4  | -2,51 | -59,64 |
| 1,45 | -2,68 | -61,36 |
| 1,5  | -3,10 | -62,24 |
| 1,55 | -3,25 | -63,54 |
| 1,6  | -3,39 | -64,87 |
| 1,65 | -3,54 | -66,24 |
| 1,7  | -3,70 | -67,65 |
| 1,75 | -3,86 | -69,06 |
| 1,8  | -4,03 | -70,42 |
| 1,85 | -4,21 | -71,76 |
| 1,9  | -4,39 | -73,05 |
| 1,95 | -4,58 | -74,25 |
| 2    | -4,77 | -75,38 |
| 2,05 | -4,95 | -76,45 |
| 2,1  | -5,13 | -77,50 |
| 2,15 | -5,30 | -78,45 |
| 2,2  | -5,46 | -79,40 |
| 2,25 | -5,61 | -80,35 |
| 2,3  | -5,76 | -81,31 |
| 2,35 | -5,90 | -82,32 |
| 2,4  | -6,06 | -83,37 |
| 2,45 | -6,21 | -84,40 |
| 2,5  | -6,36 | -85,52 |
| 2,55 | -6,68 | -86,15 |
| 2,6  | -6,82 | -86,91 |

|      |       |        |      |       |        |
|------|-------|--------|------|-------|--------|
| 2,65 | -6,95 | -87,76 | 2,85 | -7,53 | -91,25 |
| 2,7  | -7,10 | -88,62 | 2,9  | -7,69 | -92,09 |
| 2,75 | -7,24 | -89,51 | 2,95 | -7,84 | -92,92 |
| 2,8  | -7,38 | -90,38 | 3    | -8,00 | -93,71 |

Dựa vào kết quả độ khếch đại và góc lệch pha giữa điện áp đầu cực máy phát điện và điện áp kích thích Vinj ta vẽ được đồ thị Bode của máy phát



Hình 4. 22. Đáp ứng tần số của hệ thống

➤ Nhận xét:

Từ biểu đồ Bode ta thu được:

- Độ dự trữ biên:  $G_M = 8 \text{ dB}$  tại tần số 3Hz
- Độ dự trữ pha:  $P_M = 152.7^\circ$  tại tần số 0.6 Hz

Hệ thống đạt trạng thái ổn định cả biên độ và góc pha. Không có hiện tượng cộng hưởng dao động mạnh, đáp ứng tần số mượt đảm bảo hệ thống kích từ có thể hoạt động an toàn khi có nhiễu dao động từ 0.05Hz đến 3Hz.

Qua so sánh giữa hai cấu hình PID, bao gồm một cấu hình chỉnh tay ( $K_p = 0.1$ ,  $K_i = 0.488$ ,  $K_d = 0.03$ ) và một cấu hình được tối ưu bằng công cụ PID Tuner của Simulink, có thể thấy rằng cả hai đều đáp ứng tốt các tiêu chuẩn về độ ổn định. Tuy nhiên, cấu hình PID Tuner cho thấy đường đặc tính tần số mượt và cân bằng hơn, không xuất hiện hiện tượng cộng hưởng, đồng thời vẫn giữ được dự trữ pha và biên độ rất tốt.

Do đó, bộ PID được tối ưu bằng PID Tuner được lựa chọn là cấu hình điều khiển tối ưu nhất, phù hợp cho hệ thống kích từ trong điều kiện có nhiễu dao động tần số.

#### 4.4. Đánh giá và nhận xét thông số các bộ PID

Sau khi tiến hành hiệu chỉnh bộ điều khiển PID bằng phương pháp thử sai thay đổi các hệ số  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  và sử dụng công cụ PID Tuner tích hợp trong bộ PID Controller hệ thống đã được phân tích và đánh giá thông qua giản đồ Bode – một công cụ quan trọng để phân tích đáp ứng tần số của hệ thống điều khiển.

Sau khi phân tích các kết quả cho thấy:

- Tăng  $K_P$ : Giúp hệ thống phản ứng nhanh hơn, nhưng đồng thời giúp giảm dự trữ pha và tăng nguy cơ cộng hưởng.
- Tăng  $K_I$ : Giảm sai số tĩnh hiệu quả, độ dự trữ biên được cải thiện hơn. Tuy nhiên nếu tăng  $K_I$  quá mức có thể dẫn đến độ dự trữ biên bị âm giống như kết quả đã mô phỏng.
- Tăng  $K_D$ : Giúp cải thiện rõ rệt về độ dự trữ pha làm hệ thống ổn định góc pha tuy nhiên làm giảm độ dự trữ biên  $G_M$  và tăng nhạy với nhiễu tần số cao.

Các biểu đồ Bode tương ứng với các thông số PID đã thử nghiệm đều cung cấp đủ về khả năng chống dao động và độ dự trữ pha và biên độ của hệ thống.

Một số cấu hình PID điều chỉnh thủ công cho thấy đáp ứng khá tốt nhưng vẫn còn hiện tượng cộng hưởng tần số ở dải tần số từ 1Hz-2Hz. Ngược lại khi sử dụng PID Tuner, biểu đồ cho thấy đáp ứng mượt hơn, không có đỉnh cộng hưởng phản ánh hệ thống ổn định, dễ kiểm soát.

#### 4.5. Kết luận và hướng phát triển

Việc hiệu chỉnh riêng lẻ từng thông số PID giúp hiểu rõ ảnh hưởng riêng lẻ của từng thành phần đến đáp ứng hệ thống, nhưng khó đảm bảo được tính ổn định tổng thể. Ngược lại, phương pháp hiệu chỉnh tự động bằng PID Tuner cho kết quả cân đối giữa các tiêu chí kỹ thuật, với độ ổn định tốt, phản ứng mượt hơn và khả năng chống nhiễu tần số cao ổn định hơn. Việc kết hợp giữa mô hình hoá, mô phỏng và phân tích đáp ứng tần số bằng Matlab/Simulink đã mang lại cái nhìn trực quan và toàn diện về hiệu quả của từng bộ điều khiển, tạo cơ sở để lựa chọn cấu hình bộ PID cho thực tế.

Mặc dù đề tài đã hoàn thành mục tiêu nghiên cứu về mô hình hóa và phân tích đáp ứng tần số của hệ thống kích từ sử dụng bộ điều khiển PID, tuy nhiên trong thực tế vận hành, hệ thống kích từ của máy phát điện là một hệ thống phi tuyến, có tính chất biến đổi mạnh theo tải và thường xuyên chịu tác động bởi nhiều dạng nhiễu loạn khác nhau. Để nâng cao hơn nữa khả năng điều khiển và đảm bảo hệ thống vận hành ổn định trong các điều kiện phức tạp, việc bổ sung bộ ổn định hệ thống công suất – Power System Stabilizer (PSS) là hướng phát triển rất cần thiết. Bộ PSS có chức năng tăng cường khả năng chống dao động công suất và điện áp, đặc biệt trong dải tần số thấp, giúp tổ máy phát điện duy trì đồng bộ và ổn định trong lưới điện.

Bên cạnh đó, để cải thiện khả năng điều khiển trong môi trường biến động, có thể áp dụng các phương pháp điều khiển hiện đại nhằm tối ưu hóa hiệu quả của bộ điều khiển PID. Một trong các giải pháp tiêu biểu là Fuzzy-PID, cho phép tự động điều chỉnh các tham số  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  dựa trên trạng thái tức thời của hệ thống, từ đó nâng cao tính thích nghi và độ chính xác trong điều khiển.

Ngoài ra, có thể kết hợp thêm các thuật toán tối ưu hóa như GA (Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization) để tự động tìm ra bộ thông số PID tối ưu theo các tiêu chí kỹ thuật quan trọng như: Dự trữ pha, dự trữ biên độ, thời gian đáp ứng ngắn nhất, độ vọt lố thấp.

## KẾT LUẬN

Đề tài “*NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG KÍCH TỪ MÁY PHÁT ĐIỆN*” đã được triển khai một cách hệ thống, kết hợp giữa cơ sở lý thuyết điều khiển tự động và mô phỏng thực tế trong môi trường Simulink. Quá trình thực hiện đã giúp làm rõ vai trò và ảnh hưởng của bộ điều khiển PID đến khả năng ổn định của hệ thống kích từ.

Mở đầu, đề tài đã trình bày tổng quan về hệ thống kích từ máy phát điện, vai trò của bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR), các chế độ vận hành và phương thức bảo vệ của hệ thống kích từ. Qua đó, làm nổi bật tầm quan trọng của việc điều khiển chính xác dòng kích thích để duy trì điện áp ổn định và hạn chế dao động trong quá trình vận hành máy phát.

Tiếp theo, bộ điều khiển PID được giới thiệu là giải pháp điều khiển phản hồi tuyến tính phổ biến với cấu trúc đơn giản, dễ áp dụng và hiệu quả cao. Các tiêu chí đánh giá chất lượng điều khiển trong miền tần số như độ dự trữ pha (PM) và độ dự trữ biên độ (GM) được sử dụng làm cơ sở để đánh giá mức độ ổn định của hệ thống.

Trong phần mô hình hoá và mô phỏng, hệ thống kích từ kết hợp bộ PID được xây dựng trong Matlab/Simulink. Tín hiệu nhiễu dao động điều hòa được tạo bằng sóng sin quét từ 0.05 Hz đến 3 Hz để kích thích vào hệ thống. Tín hiệu đầu ra ( $E_{out}$ ) và đầu vào nhiễu ( $V_{inj\_out}$ ) được ghi nhận và xử lý để phân tích biên độ, pha và vẽ biểu đồ Bode. Đây là cơ sở để đánh giá đặc tính đáp ứng tần số của hệ thống dưới các cấu hình PID khác nhau.

Các tham số PID ban đầu được tính toán và sau đó điều chỉnh thử nghiệm từng thành phần  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  để đánh giá ảnh hưởng riêng lẻ đến ổn định hệ thống. Kết quả cho thấy:

- Giảm  $K_P$  giúp tăng PM và GM nhưng làm chậm phản hồi.
- Tăng  $K_I$  quá mức dẫn đến cộng hưởng và mất ổn định (GM âm).
- Giảm  $K_D$  cải thiện PM nhưng cần lọc nhiễu để tránh ảnh hưởng tần số cao.

Sau đó, bộ điều khiển PID được tối ưu bằng công cụ PID Tuner, từ đó thu được cấu hình có dự trữ pha và biên độ đều đạt yêu cầu kỹ thuật ( $PM > 150^\circ$ ,  $GM > 8$  dB), đồng thời tránh được hiện tượng cộng hưởng và dao động đầu ra.

Tổng hợp kết quả từ các biểu đồ Bode, đề tài đã xác định được một số cấu hình PID có hiệu quả cao trong việc duy trì ổn định hệ thống kích từ, ngay cả khi có nhiễu điều hòa trong vùng tần số khảo sát. Đây là cơ sở quan trọng để đánh giá tính hiệu quả của bộ điều khiển và khả năng ứng dụng vào thực tế.

Trên cơ sở đó, đề tài mở ra các hướng phát triển tiếp theo:

- Tích hợp thêm bộ ổn định công suất PSS để cải thiện ổn định dao động nhỏ cho toàn tổ máy.
- Thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống kích từ khi máy phát điện nối lưới và chưa kích hoạt bộ PSS để kiểm tra hàm truyền hệ thống kích từ.
- Thử nghiệm đáp ứng tần số của hệ thống kích từ khi máy phát điện nối lưới trong trường hợp kích hoạt và không kích hoạt bộ PSS để kiểm tra khả năng dập giao động của PSS đối với các giao động liên vùng.
- Áp dụng thuật toán tối ưu thông minh (GA, PSO, Fuzzy-PID) để tự động tìm bộ thông số PID tối ưu nhất.

Nhìn chung, đề tài đã hoàn thành mục tiêu nghiên cứu đặt ra, góp phần cung cấp cái nhìn toàn diện về đáp ứng tần số của hệ thống kích từ và cơ sở lựa chọn bộ điều khiển PID phù hợp trong điều kiện vận hành thực tế.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Thị Phương Hà – Huỳnh Thái Hoàng (2005), *Lý thuyết điều khiển tự động*, NXB Đại học quốc gia Hồ Chí Minh.
- [2] Nguyễn Thị Phương Hà (1996), *Điều khiển tự động*, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội.
- [3] Trần Đình Long (2004), *Tự động hoá hệ thống điện*, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [4] Nhà máy thủy điện Ialy, *Giáo trình đào tạo công nhân thí nghiệm, sửa chữa kích từ*
- [5] Nguyễn Văn Thiện (2010), *Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển PID mờ*, Đại học Thái Nguyên.
- [6] Nguyễn Phùng Quang (2006), *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội.
- [7] Thông tư Quy định Hệ thống điện phân phối số 39/2015/TT-BCT ngày 18/11/2015 và các Thông tư sửa đổi, bổ sung số 30/2019/TT-BCT ngày 18/11/2019, Thông tư số 39/2022/TT-BCT ngày 30/12/2022 của Bộ Công Thương;
- [8] Quy trình thử nghiệm và giám sát thử nghiệm, ban hành kèm theo Quyết định số 25/QĐ-ĐTĐL ngày 26/03/2019 của Cục Điều tiết Điện lực