TỔNG LIÊN ĐOÀN LAO ĐỘNG VIỆT NAM TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÔN ĐỨC THẮNG KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ



TRẦN THANH PHONG

ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ KHI THAY ĐỔI TẢI TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN ĐA KHU VỰC DÙNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

LUẬN ÁN TIẾN SĨ NGÀNH

Kỹ THUẬT ĐIỆN

(TÓM TẮT)

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, NĂM 2024

TỔNG LIÊN ĐOÀN LAO ĐỘNG VIỆT NAM TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÔN ĐỨC THẮNG KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ



TRẦN THANH PHONG

ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ KHI THAY ĐỔI TẢI TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN ĐA KHU VỰC DÙNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

LUẬN ÁN TIẾN SĨ NGÀNH KỸ THUẬT ĐIỆN (TÓM TẮT)

Tập thể hướng dẫn:

TS. Huỳnh Văn Vạn TS. Đồng Sĩ Thiên Châu

THÀNH PHỐ HỎ CHÍ MINH, NĂM 2024

TÓM TẮT

Nhằm đạt được và duy trì sự vận hành ổn định trong các hệ thống điện (PS) là một nhiệm vụ đầy thách thức nhằm thỏa mãn cả người tiêu dùng và nhà cung cấp điện. Kiểm soát và ổn định trong các hệ thống điện liên quan đến việc giải quyết nhiều thách thức khác nhau. Để đảm bảo vận hành ổn định, các vòng điều khiển khác nhau được thực hiện để điều chỉnh các thông số khác nhau. Chẳng hạn, Điều khiển tần số tải (LFC) hoặc Điều khiển tự động máy phát điện (AGC) được sử dụng để giữ tần số gần với giá trị danh định của nó. Ngoài ra, vòng điều khiển này còn có nhiệm vụ duy trì trao đổi điện năng theo kế hoạch giữa các khu vực điều khiển liên kết thông qua các đường dây liên kết. Trọng tâm của luận văn này là giải quyết vấn đề trong hệ thống điện đa khu vực (MAPS):

Nghiên cứu thứ nhất, việc sử dụng bộ điều khiển trượt (SMC) trong việc điều khiển tần số tải (LFC) của mạng lưới điện (PN) đặt ra những thách thức do hiện tượng hiện tượng chattering các trạng thái xung quanh mặt trượt liên quan đến chuyển mạch tần số cao. Các vấn đề dao động chattering này có thể gây hại nghiêm trọng cho các cơ cấu chấp hành được sử dụng trong hệ thống điện. Phương pháp được đề xuất, được gọi là điều khiển chế độ trượt tích phân bậc hai (SOISMC), không chỉ loại bỏ hiệu quả dao động chattering trong đầu vào điều khiển mà còn đảm bảo khả năng thích ứng của hệ thống điện đa khu vực. Một kỹ thuật LMI mới được phát triển để đảm bảo tính ổn định của toàn bộ hệ thống thông qua lý thuyết Lyapunov. Ngoài ra, các kết quả thu được từ các mô phỏng nhấn mạnh tính phù hợp của bộ điều khiển SOISMC đề xuất cho việc triển khai thực tế trong hệ thống điện đa khu vực, nơi nó hiệu quả trong việc giảm thiểu sự không chắc chấn về thông số cao và nhiễu tải, cũng như độ trễ trong giao tiếp của hệ thống điện.

Nghiên cứu thứ hai, để đáp ứng nhu cầu điện ngày càng tăng và cần cân bằng tổng công suất phát điện, việc giải quyết các vấn đề này được thực hiện thông qua việc áp dụng bộ quan sát trạng thái dựa trên điều khiển chế độ trượt một pha (SPSMCBSO) cho hệ thống điện khí-thủy-nhiệt hai khu vực (TAGHTPS). Cách tiếp cận này mang lại một số đóng góp đáng chú ý. Thứ nhất, mô hình hệ thống điện TAGHTPS tính đến các bất định trong cả tham số và trạng thái ma trận liên kết. Thứ hai, một bộ quan sát trạng thái được sử dụng để xác định các biến trạng thái, cải thiện điều khiển phản hồi. Thứ ba, kỹ thuật bộ điều khiển SPSMCBSO điều chỉnh cho hệ thống trượt truyền thống, do đó cải thiện hiệu suất của TAGHTPS trong bối cảnh quá độ và thời gian để ổn định. Một đánh giá về tính ổn định của TAGHTPS được thực hiện bằng cách sử dụng một sơ đồ bất đẳng thức ma trận tuyến tính LMI mới dựa trên giả thuyết về tính ổn định được đề xuất bởi Lyapunov. Cuối cùng, kết quả của mô phỏng được trình bày và so sánh với các kỹ thuật điều khiển truyền thống đáng tin cậy, bộ điều khiển SPSMCBSO tiếp tục cho thấy tính ổn định cao và không bị ảnh hưởng bởi sự lệch tham số của hệ con, nhiễu tải ngẫu nhiên và bất định tham số trong trạng thái và ma trận liên kết, và sự dao động vốn có trong các nguồn năng lượng tái tạo.

Nghiên cứu thứ ba, trong nghiên cứu này cũng giới thiệu một phương pháp LFC mới sử dụng điều khiển chế độ trượt bậc hai với bề mặt trượt tích hợp kép (SOSDISS), nhằm nâng cao điều chỉnh tần số, quản lý công suất đường dây và độ tin cậy tổng thể của hệ thống điện đa khu vực (MAPS). Đáng chú ý, phương pháp này không chỉ cải thiện tính ổn định tiệm cận và độ tin cậy của hệ thống điện hơi-thủynhiệt đa khu vực (MASHPS) mà còn giảm thiểu hiện tượng chattering vốn có trong điều khiển chế độ trượt bậc nhất. Ngoài ra, nghiên cứu sử dụng một bất đẳng thức ma trận tuyến tính LMI mới dựa trên tính ổn định Lyapunov để phân tích toàn diện sự ổn định của toàn bộ hệ thống điện. Để đánh giá hiệu quả của chiến lược đề xuất cho LFC, một hệ thống điện hơi-thủy hai khu vực (TASHPS) được nghiên cứu. Thông qua các mô phỏng, hiệu quả và độ tin cậy của sơ đồ điều khiển đề xuất được chứng minh qua các phản ứng tần số nhanh và khả năng chống chịu với các yếu tố như dao động tham số, nhiễu tải, biến đổi tải, thời gian trễ, và các hiệu ứng phi tuyến của dải chết của bộ điều tốc GDB (Governor Dead Band), giới hạn tốc độ của máy phát điện (Generation rate constrain)IEEE 39 bus trên mạng lưới điện (PN).

Từ khóa: Hệ thống điện, Điều khiển chế độ trượt, Điều khiển tần số tải, Điều khiển phát điện tự động, Giao tiếp thời gian trễ, Dải chết của bộ điều tốc, Giới hạn tốc độ của máy phát điện, Nhà máy điện gió, Giao tiếp thời gian trễ.

LIST OF PUBLISHED PAPERS BY AUTHOR

1. Huynh, Van Van, **Phong Thanh Tran***, Bui Le Ngoc Minh, Anh Tuan Tran, Dao Huy Tuan, Tam Minh Nguyen, and Phan-Tu Vu. "New second-order sliding mode control design for load frequency control of a power system." *Energies* 13, no. 24 (2020): 6509 (**ISI**).

2. Huynh, Van Van, **Phong Thanh Tran***, Tien Minh Nguyen, Van-Duc Phan, and Viet-Thanh Pham. "Advanced sliding mode observer design for load frequency control of multiarea multisource power systems" *International Transactions on Electrical Energy Systems* (2022) (**ISI**).

3. Van Van Huynh, **Phong Thanh Tran***, and Chau Si Thien Dong, Bach Dinh Hoang, "Sliding surface design for sliding mode load frequency control of multi area multi source power system", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024 **(ISI)**.

4. **Phong Thanh Tran**, Van Van Huynh and Chau Si Thien Dong, Bach Dinh Hoang, "Automatic generation control based sliding mode observer design for multiarea multi-source power systems", the 7th International Conference on Advanced Engineering – Theory and Applications, 2022.

5. **Phong Thanh Tran**, Van Van Huynh, Chau Thien Si Dong, and Bach Hoang Dinh. "Sliding mode-based load frequency control of a power system with multi-source power generation" In 2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), pp. 142-147. IEEE, 2023.

6. Tran, Anh-Tuan, Bui Le Ngoc Minh, **Phong Thanh Tran**, Van Van Huynh, Van-Duc Phan, Viet-Thanh Pham, and Tam Minh Nguyen. "Adaptive integral second order sliding mode control design for load frequency control of large-scale power system with communication delays" Complexity 2021 (2021) (**ISI**).

7. Van Huynh, Van, **Phong Thanh Tran**, Tuan Anh Tran, Dao Huy Tuan, and Van-Duc Phan. "Extended state observer-based load frequency controller for three area interconnected power system" *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 19, no. 3 (2021): 1001-1009 (**Scopus**).

8. Huynh, Van Van, Bui Le Ngoc Minh, Emmanuel Nduka Amaefule, Anh-Tuan Tran, and **Phong Thanh Tran.** "Highly robust observer sliding mode-based frequency control for multi area power systems with renewable power plants" Electronics 10, no. 3 (2021): 274 (**ISI**).

9. Tran, Anh-Tuan, Bui Le Ngoc Minh, Van Van Huynh, **Phong Thanh Tran**, Emmanuel Nduka Amaefule, Van-Duc Phan, and Tam Minh Nguyen. "Load frequency regulator in interconnected power system using second order sliding mode control combined with state estimator" *Energies* 14, no. 4 (2021): 863 (**ISI**).

10. Huynh, Van Van, Bui Le Ngoc Minh, Emmanuel Nduka Amaefule, Anh-Tuan Tran, **Phong Thanh Tran**, Van-Duc Phan, Viet-Thanh Pham, and Tam Minh Nguyen. "Load frequency control for multi-area power plants with integrated wind resources" *Applied Sciences* 11, no. 7 (2021): 3051 (**ISI**).

11. Tran, Anh-Tuan, **Phong Thanh Tran**, and Van Van Huynh. "Load frequency control for power system using generalized extended state observer" Journal of Advanced Engineering and Computation 5, no. 1 (2021): 1-18.

CHƯƠNG 1. PHẦN GIỚI THIỆU

1.1. Tính cấp thiết của luận án:

Hệ thống điện (PS), hệ thống điện truyền thống PS điện, hệ thống điện thông thường được cấu trúc xung quanh cấu trúc này. Nói chi tiết hơn, các công ty điện lực chịu trách nhiệm toàn bộ quá trình phát điện, truyền tải và phân phối điện trong các khu vực được chỉ định của họ, được gọi là các khu vực cân bằng hoặc khu vực điều khiển. Do đó, các yêu cầu thiết kế và điều khiển cho hệ thống này đã được thiết lập rõ ràng và có thể quản lý được về mặt độ phức tạp. Sự phát triển và thay đổi liên tục trong hệ thống điện gắn liền với những tiến bộ trong công nghệ thông tin và truyền thông. Tiến trình này được dự đoán sẽ định hình một hệ thống điện mới nổi, tối ru hóa việc sử dụng hệ thống mạng lưới, thích ứng với nhu cầu của thị trường đang phát triển, ru tiên tính bền vững môi trường, và nâng cao hiệu quả, an toàn và độ tin cậy tổng thể của lưới điện. Sự thay đổi này trong bối cảnh sự phát triển của hệ thống điện lực, cùng với những phức tạp ngày càng tăng của lưới điện, được minh họa trong Hình 1.1. (Willis, H. L., & Philipson, L., 2018).



Hình 1.1. Quá trình phát triển của sự chuyển đổi sang một lưới điện thông minh trong tương lai

Để đảm bảo hoạt động hiệu quả của lưới điện trong tương lai, các công nghệ cho phép cụ thể là cần thiết (Edris, A. A., & D'Andrade, B. W., 2017). Các mục tiêu chính của việc điều khiển tần số thay đổi theo tải trong hệ thống điện là đáng chú ý 2 vấn đề. Thứ nhất, nó đảm bảo cung cấp điện năng cần thiết từ các nhà máy phát điện để đáp ứng các yêu cầu tải biến đổi. Thứ hai, nó duy trì điện năng trao đổi ở các giá trị đã quy định giữa các khu vực điều khiển (CA) liên kết. Bằng cách đạt được những mục tiêu này, vòng điều khiển LFC đóng góp vào việc cải thiện tính ổn định của hệ thống điện. Nó nhằm vào việc loại bỏ các sai số ổn định trong sự lệch công suất trên đường dây và sự dao động tần số.

1.2. Mục tiêu của nghiên cứu:

Trong nghiên cứu này, việc duy trì tần số ổn định là rất quan trọng để đảm bảo hoạt động hiệu quả của hệ thống điện. Các biến đổi về tần số có thể gây ra những tác động có hại đến hiệu suất, độ tin cậy và hiệu quả của hệ thống điện. Sự biến động đáng kể về tần số có thể dẫn đến hỏng hóc thiết bị, suy giảm hiệu suất tải, quá tải đường truyền, và gây ra sự cản trở trong cơ chế bảo vệ hệ thống. Biến đổi về tần số cũng có ảnh hưởng tiêu cực đến điều khiển tốc độ và hoạt động của cả máy không đồng bộ và máy đồng bộ.

Nếu một thay đổi tải đột ngột xảy ra trong một vùng điều khiển của hệ thống điện liên kết, nó sẽ dẫn đến biến động về tần số và điện năng trao đổi. Các mục tiêu của nghiên cứu này là:

1. Bảo toàn tần số thực tế và công suất điều khiển (MW) quy định trong hệ thống điện nhiều nguồn, nhiều khu vực.

2. Điều tiết sự thay đổi công suất liên kết giữa các vùng quy định.

1.3. Phạm vi nghiên cứu:

Trong phạm vi nghiên cứu này, điều khiển tần số tải (LFC) được tập trung và khảo sát một cách chi tiết. Trong một hệ thống điện ổn định, đáng tin cậy và an toàn, điều quan trọng là phải khôi phục nhanh chóng tần số và lưu lượng công suất trên các đường dây kết nối giữa các khu vực về giá trị đã định trước sau khi xảy ra sự cố tải và dưới tác động của nhiễu của các yếu tố không chắc chấn. Điều này được thực hiện bằng cách đồng bộ hóa công suất phát với nhu cầu, đồng thời xem xét tổn thất trên đường dây liên kết. Phương pháp điều khiển này, được gọi là LFC, cho phép các máy phát điện đồng bộ điều chỉnh sản lượng của chúng để đáp ứng yêu cầu tải, đảm bảo rằng các dao động và sự khác biệt về tần số khu vực và lưu lượng trên các đường dây kết nối hội tụ về không. Phần mềm MATLAB/SIMULINK là một công cụ có giá trị để tối ưu hóa hiệu suất của các bộ điều khiển, đặc biệt trong các kịch bản mô phỏng. Điều này bao gồm việc sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa đơn giản và hiệu quả để xác định các giá trị tối ưu cho các thông số đề xuất của các bộ điều khiển. Thông qua mô phỏng, các kỹ thuật này giúp tinh chỉnh cài đặt bộ điều khiển, đảm bảo rằng hệ thống hoạt động với hiệu suất tốt nhất có thể.

1.4. Phương pháp nghiên cứu:

Trong một khảo sát toàn diện hơn, để đánh giá hiệu quả và tính phù hợp của các hệ thống điều khiển tần số tải (LFC) đề xuất, các phương pháp này được áp dụng cho các hệ thống điện nhiều khu vực với nhiều nguồn khác nhau dưới các điều kiện vận hành đa dạng. Để đạt được mục tiêu, các quy trình chi tiết sau đây được thực hiện:

1. Để thực hiện một quá trình kiểm tra toàn diện về bộ điều khiển LFC, đi sâu vào những khám phá các vấn đề quan trọng, các lĩnh vực nghiên cứu hiện tại, và các vấn đề tiềm năng, cùng với các giải pháp tương ứng của chúng, liên quan đến dao động tần số trong các hệ thống điện hiện đại.

2. Thiết kế và triển khai một bộ điều khiển trượt bậc hai tích phân mới (SOISMC) trong hệ thống điện nhiều khu vực, với các phản ứng đạo hàm đã được lọc cho LFC và hệ thống điện liên kết hai khu vực, nhằm giảm thiểu hiệu quả các bất định tham số cao và nhiễu loạn tải, cũng như độ trễ truyền thông giữa các khu vực.

3. Thiết kế các bộ điều khiển trượt tích phân mới, cụ thể là bộ quan sát trạng thái dựa trên điều khiển trượt một pha (SPSMCBSO), để điều chỉnh tần số hiệu quả trong thí nghiệm liên quan đến hệ thống điện đa nguồn hai khu vực, chẳng hạn như hệ thống điện khí-thủy-nhiệt, đồng thời đảm bảo rằng sự trao đổi công suất nằm trong các giới hạn đã được xác định trước.

4. Đề xuất một thiết kế mới cho bộ điều khiển trượt bậc hai với bề mặt trượt tích phân kép (SOSDISS) và cung cấp một dẫn xuất toán học toàn diện. Thiết kế này được áp dụng trong các mô hình hệ thống đa nguồn, cụ thể là những hệ thống đại diện cho hệ thống điện khí-thủy-nhiệt hai khu vực (TAGHTPS).

5. Sự ổn định của các hệ thống điện khác nhau được nghiên cứu bằng cách sử dụng các kỹ thuật LMI mới dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov.

6. Để tối ưu hóa hiệu suất của các bộ điều khiển như SOISMC, SPSMCBSO, SOSDISS trong mô phỏng bằng cách sử dụng MATLAB/SIMULINK, các kỹ thuật tối ưu hóa đơn giản và hiệu quả được sử dụng để xác định các giá trị tối ưu cho các thông số đề xuất của các bộ điều khiển.

7. Để đánh giá sâu rộng khả năng phục hồi và hiệu quả của các phương pháp điều khiển đề xuất, một cuộc kiểm tra kỹ lưỡng được thực hiện. Điều này bao gồm việc đưa hệ thống vào các điều kiện vận hành khác nhau và sau đó so sánh kết quả với các kỹ thuật điều khiển đã được đề xuất trước đó.

1.5. Những đóng góp mới của nghiên cứu này:

Mục tiêu của luận án này là khám phá khả năng tạo ra các hệ thống điều khiển LFC mạnh mẽ nhằm nâng cao hiệu suất động của hệ thống điện nhiều khu vực. Điều này bao gồm việc đảm bảo rằng sự biến đổi tần số và sự sai lệch công suất trên các đường dây liên kết duy trì trong giới hạn chấp nhận được, ngay cả khi xảy ra hiện tượng nhiễu loạn.

Các đóng góp đáng kể của nghiên cứu này bao gồm:

- Xây dựng và triển khai các chiến lược điều khiển mới được gọi là điều khiển trượt bậc hai tích phân (SOISMC) trong các mô hình điện nhiều khu vực được nghiên cứu cho LFC.

- Thực hiện một thiết kế đổi mới và sử dụng bộ quan sát trạng thái dựa trên điều khiển trượt pha đơn (SPSMCBSO) cho mục đích điều khiển tần số trong ngữ cảnh của hệ thống điện khí-thủy-nhiệt hai khu vực (TAGHTPS).

- Sử dụng kỹ thuật mới của điều khiển trượt bậc hai với các bề mặt trượt kép tích phân, nhằm mục đích tăng cường điều chỉnh tần số, quản lý công suất trên đường dây kết nối và độ tin cậy tổng thể của hệ thống MASHPS. Thực hiện một phương pháp LFC mới được tùy chỉnh cho hệ thống điện hơi-nước nhiều khu vực (MASHPS) dưới sự không chắc chắn về tham số và các điều kiện khác nhau.

1.6. Cấu trúc của luận án:

Phần này cung cấp thông tin tổng quan về luận án và trọng tâm chính của mỗi chương trong luận án này.

Chapter 1: Phần này cung cấp nguồn gốc của chủ đề, phương pháp nghiên cứu, mục tiêu, đối tượng, đóng góp và mục đích của nghiên cứu, cùng với tuyên bố vấn đề.

Chapter 2: Trong chương này, một bản đánh giá về tài liệu nghiên cứu hiện tại và chi tiết được trình bày, bao gồm các chiều của điều khiển tần số tải trong hệ thống điện, bao gồm các yếu tố như kích thước hệ thống, loại hệ thống, các phương pháp và chiến lược LFC được đề xuất. Mỗi phần trong chương này được đánh giá và cung cấp một tóm tắt ngắn gọn.

Chapter 3: Thiết kế một bộ điều khiển trượt bậc hai mới cho điều khiển tần số tải của hệ thống điện.

Chapter 4: Thiết kế một bộ quan sát trượt bậc cao cấp cho điều khiển tần số tải trong hệ thống điện nhiều khu vực nhiều nguồn.

Chapter 5: Thiết kế bề mặt trượt cho điều khiển tần số tải bằng phương pháp trượt của hệ thống điện nhiều khu vực nhiều nguồn.

Chapter 6: Chương này cung cấp một tóm tắt về luận văn, chỉ ra kết luận và đề xuất hướng đi rõ ràng cho các nghiên cứu trong tương lai.

CHƯƠNG 2: TÔNG QUAN

Phần này trình bày một đánh giá tổng quan về LFC trong cả hệ thống điện truyền thống và hiện đại. Nó bắt đầu bằng một cái nhìn tổng quan về điều khiển LFC và tiếp tục khám phá các đặc điểm của các cấu hình hệ thống điện khác nhau. Chương cũng xem xét các chiến lược điều khiển khác nhau được áp dụng cho LFC, bao gồm cả các phương pháp tiếp cận tập trung và phân tán. Hơn nữa, nó thảo luận về các kế hoạch LFC dựa trên các phương pháp điều khiển truyền thống, tối ưu, thích ứng, mạnh mẽ và tính toán mềm sử dụng trí tuệ nhân tạo.

2.1. Hệ thống điện

Trong hệ thống điện qui mô lớn, bao gồm nhiều khu vực điều khiển liên kết, mục tiêu chính là đảm bảo việc phát và phân phối điện liên tục trong khi duy trì các thông số quan trọng như tần số và điện áp trong phạm vi chấp nhận được. Phương pháp phổ biến nhất để giải quyết biến động tần số là điều khiến phân cấp, thường được phân loại thành ba cấp độ: điều khiển cấp 1, điều khiển cấp 2 và điều khiển cấp 3 (Bevrani, 2014). Trong những trường hợp tần số lệch rất xa khỏi giá trị mặc định của nó, có thể cần thiết có một vòng điều khiển khẩn cấp để thiết lập lại tần số của hệ thống điện. (F. M. Gonzalez-Longatt and J. Luis Rueda, Eds., 2014). Dưới điều kiên vân hành bình thường, các biến động nhỏ trong tần số được giảm bớt bằng điều khiển cấp 1, hoạt động trong khoảng vài giây. Trong các tình huống có sự lệch lớn hơn về tần số (trong quá trình hoat đông bất thường) và phu thuộc vào nguồn công suất dư trữ có sẵn, một vòng điều khiển cấp 2, còn được gọi là LFC, được triển khai để đưa tần số trở lại bình thường. Quá trình này có thể mất vài phút. Tuy nhiên, trong các tình huống đặc trưng bởi sự mất cân bằng lớn giữa việc phát điện và nhụ cầu tải do một sự cố lớn, việc khôi phục tần số về giá trị mặc định của nó bằng vòng điều khiển LFC có thể không khả thi. Trong những trường hợp như vậy, các cơ chế điều khiển cấp 3 trở nên cần thiết.



Hình 2.1. Các vòng điều khiển để điều chỉnh tần số trong một hệ thống điện

Ngoài ra, các giải pháp điều khiển khẩn cấp được sử dụng để giảm bớt hoặc làm giảm nguy cơ của các sự cố truyền dẫn (xem Hình 2.1) (Bevrani, 2014). Xây dựng trên thông tin trước đó, LFC hoặc AGC nổi lên như một giải pháp quan trọng quyết định để đảm bảo hoạt động hiệu quả của hệ thống điện. (H. Bevrani and T. Hiyama, 2017).

2.2. Mô hình hóa đáp ứng tần số và mô hình động học hệ thống điện

Tần số của hệ thống điện phụ thuộc vào sự cân bằng của công suất thực. Bất kỳ thay đổi nào trong nhu cầu công suất thực trên mạng lưới đều ảnh hưởng đến toàn bộ hệ thống bằng cách gây ra một sự thay đổi trong tần số. Do đó, tần số hệ thống đóng vai trò như một chỉ số quý giá của sự cân bằng giữa sản xuất và tải của hệ thống. Việc điều khiển sản lượng công suất thực từ máy phát phụ thuộc vào công suất cơ cấu do động cơ chính tạo ra, có thể là một tuabin hơi, một tuabin khí, một tuabin thủy lực, hoặc một động cơ diesel, tùy thuộc vào loại máy phát. Trong các trường hợp liên quan đến tuabin hơi hoặc thủy lực, việc điều chỉnh công suất cơ cấu được thực hiện bằng cách điều khiển van để điều chỉnh lưu lượng hơi hoặc nước vào tuabin. Việc quản lý liên tục nguồn cung cấp hơi (hoặc nước) đến các máy phát để điều chỉnh nó với nhu cầu công suất thực là rất quan trọng; nếu không, sự biến đổi trong tốc độ máy sẽ xảy ra, dẫn đến sự thay đổi trong tần số. Để đảm bảo hoạt động hiệu quả của một hệ thống điện, việc duy trì một tần số gần như không đổi là rất quan trọng. (P. M. Anderson and A. A. Fouad, 2008). Ngoài điều khiển tần số chính, nhiều máy phát đồng bộ lớn được trang bị một vòng điều khiển tần số phụ. Trong Hình 2.2, bộ điều tốc xác định các thay đổi trong tốc độ (tần số) thông qua cả vòng điều khiển tần số chính/sơ cấp và phụ/thứ cấp.



Hình 2.2. Biểu đồ khối biểu diễn một máy phát đồng bộ với các vòng điều khiển tần số cơ bản

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào vòng điều khiển cấp 2 hoặc điều khiển tần số tải áp dụng cho nhiều loại hệ thống điện nhiều khu vực.

2.2.1 Điều tần cấp hai hay điều khiển tần số tải:

Các máy phát đồng bộ lớn thường tích hợp một vòng điều khiển SFC bên cạnh PFC. Biểu đồ khối mô tả cho máy phát minh họa cả hai vòng điều khiển chính và SFC (Bevrani, 2014). Vòng điều khiển bổ sung này đưa phản hồi vào PFC thông qua một lược đồ điều khiển động, sử dụng lệch tần số như tín hiệu phản hồi. Tín hiệu nhận được này được sử dụng để điều chỉnh tần số của hệ thống. Trong thực tế, lược đồ điều khiển động này thường là một lược đồ điều khiển tổng hoặc tổng tích phân cơ bản. Sau một thay đổi tải, phản hồi này cung cấp tín hiệu thích hợp cho tuabin. ΔP_m để theo dõi tải và khôi phục tần số, như được mô tả trong Hình 2.3. (Bevrani, 2014)



Hình 2.3. Bộ điều tốc-tuabin với vòng điều khiển tần số cấp 2

2.2.2 Điều khiển tần số trong hệ thống điện liên kết

Cũng có khả năng nhóm nhiều vùng điều khiển thành một vùng điều khiển lớn hơn, được gọi là vùng điều khiển tổng hợp, trong đó những vùng lớn này hoạt động phối hợp với nhau. Các vùng điều khiển đơn lẻ này được kết nối với nhau thông qua đường dây liên kết, cho phép trao đổi công suất giữa chúng, thường dựa trên các thỏa thuận đã được xác định trước, xem xét các chi phí vận hành của công ty bán điện (Alhelou, H. H., Hamedani-Golshan, M. E., Zamani, R., Heydarian-Forushani, E., & Siano, P., 2018). Để minh họa điều này, hãy tham khảo Hình 2.4, mô tả một Hệ thống Điện bao gồm N khu vực điều khiển:



Hình 2.4. Một sơ đồ mô tả của một hệ thống điện liên kết N vùng.

Để tính đến sự đa dạng về động lực học của việc phát điện và các mức độ tham gia khác nhau trong điều khiển phụ, mô hình hệ thống điện cho vùng điều khiển i được mô tả trong Hình 2.5.



Hình 2.5. Hệ thống LFC với các yếu tố đóng góp và đơn vị phát điện đa dạng trong khu vực i.

Trong hệ thống điện hiện đại, đảm bảo ổn định tần số là một vấn đề quan trọng, đặc biệt là trong các hệ thống điện quy mô lớn có liên quan đến trễ truyền thông. Trong nghiên cứu này, Hình 2.6 mô tả sơ đồ các khối thành phần cho vùng thứ i trong hệ thống điện quy mô lớn tính đến trễ truyền thông (Pradhan, S. K., & Das, D. K., 2020) (Fu, C., Wang, C., & Shi, D., 2020).



Hình 2.6. Cấu hình của vùng thứ i trong hệ thống điện quy mô lớn.



Hình 2.7. Sơ đồ khối tương tự cho mạng vùng thứ i, bao gồm một trang trại điện gió.

Hơn nữa, để đánh giá hành vi của hệ thống điện khi áp dụng thuật toán mới, chúng ta giới thiệu tỉ lệ năng lượng gió trong hệ thống điện đang tăng lên, biểu đồ về tốc độ gió được hiển thị trong Hình 2.7. Tuy nhiên, sự biến động tự nhiên trong các nguồn năng lượng tái tạo và sự thay đổi trong tải có thể tạo ra thách thức cho LFC. Trong trường hợp này, mô hình phát điện gió được thêm vào hệ thống điện. Cả mô hình phát điện gió và tải đều không chắc chắn.

2.3. Các mô hình hệ thống điện dựa trên điều khiển LFC:

Trong lĩnh vực hệ thống điện (PS), LFC đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo rằng khách hàng nhận được nguồn cung cấp điện đủ và đáng tin cậy. Chương này cung cấp một đánh giá tài liệu toàn diện và hiện đại về LFC trong PS. Cuộc khảo sát chủ yếu tập trung vào các mô hình LFC được thiết kế cho hệ thống điện truyền thống, do tầm quan trọng của chúng trong lĩnh vực này. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng khám phá những tiến bộ gần đây trong các phương pháp LFC, giải quyết các khía cạnh độc đáo của hệ thống điện hiện đại, bao gồm PS được điều chỉnh, lưới điện thông minh, lưới điện nhỏ và hệ thống điện tích hợp với các nguồn năng lượng tái tạo. Hơn nữa, chương này cung cấp một cuộc thảo luận ngắn gọn về các chiến lược điều khiển khác nhau. Cuối cùng, chương này xem xét nhiều phương pháp điều khiển

được áp dụng cho LFC trong các hệ thống điện đa dạng như: phương pháp điều khiển tập trung, phương pháp điều khiển phân tán, các loại LFC dựa trên các chiến lược điều khiển khác nhau: phương pháp điều khiển cổ điển, điều khiển tối ưu và dưới tối ưu, điều khiển thích ứng cho mạng lưới điện LFC, điều khiển mạnh, các phương án trí tuệ nhân tạo, phương pháp điều khiển trượt và các phương pháp khác. Lợi ích và nhược điểm có thể có của từng phương pháp được xem xét kỹ lưỡng.

Đáng chú ý, đánh giá này nhấn mạnh rằng LFC dựa trên một kế hoạch phân tán, sử dụng các kỹ thuật tính toán mềm kết hợp với các nguồn năng lượng tái tạo, là một khu vực nghiên cứu rộng rãi vẫn cần được cải thiện thêm, do sự phổ biến của nó trong hệ thống điện hiện đại.

2.4. Kết luận

Nói tóm lai, chúng ta thấy phần đánh giá tổng quan này nhấn manh một khoảng trống nghiên cứu đáng chú ý trong lĩnh vực các hệ thống LFC, đặc biệt là trong việc áp dụng các kỹ thuật tính toán dự trên các kỹ thuật. Đáng chú ý, không có nỗ lực trước đây nào được ghi nhận trong việc sử dụng các kế hoạch khác nhau của SMC cho thiết kế điều khiến tần số phụ trong PS. Hiệu quả và ưu việt được chứng minh của các kỹ thuật SMC mới lạ như một công cụ tối ưu hóa trong nhiều lĩnh vực đã thúc đẩy tác giả khám phá các kỹ thuật tối ưu hóa mạnh mẽ này. Trong việc tìm kiếm hiệu suất động cao nhất, nhiều kế hoạch SMC sáng tạo đã được sử dụng cho việc tối ưu hóa. a) Để định hình và triển khai các chiến lược điều khiển mới lạ được gọi là điều khiển trượt bậc hai tích phân (SOISMC) trong các mô hình điện nhiều khu vực được nghiên cứu cho LFC. b) Để hoàn thành một thiết kế đổi mới và sử dụng một bộ quan sát trang thái dưa trên điều khiển trươt pha đơn (SPSMCBSO) cho mục đích LFC trong ngữ cảnh của một hệ thống điện khí-thủy-nhiệt hai khu vực. c) Để đưa vào thực hành một phương pháp LFC mới la được điều chỉnh cho MASHPS dưới sự không chắc chắn về tham số và các điều kiên khác nhau. Kỹ thuật được đề xuất sử dụng một SMC bậc hai với các bề mặt trượt kép tích phân (SOSDISS), nhằm mục đích tăng cường điều chỉnh tần số, quản lý công suất trên đường dây kết nối và độ tin cậy tổng thể của MASHPS

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỄN TRƯỢT BẬC HAI MỚI CHO ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ TẢI HỆ THỐNG ĐIỆN

Trong chương này, vấn đề dao động chattering gây ra rủi ro đáng kể cho các bộ chấp hành được sử dụng trong hệ thống điện. Điều khiển trượt bậc hai tích phân được đề xuất (SOISMC) không chỉ giảm thiểu hiệu quả dao động trong đầu vào điều khiển mà còn nâng cao độ bền vững của hệ thống điện nhiều khu vực, làm cho nó trở nên bền vững hơn đối với các bất định tham số, bao gồm biến động tải và sự không khớp tham số. Một kỹ thuật LMI mới được phát triển để đảm bảo sự ổn định tổng thể của hệ thống thông qua việc áp dụng lý thuyết Lyapunov. Ngoài ra, các nghiên cứu mô phỏng số cho thấy bộ điều khiển được đề xuất có hiệu quả cao trong việc duy trì hiệu suất chất lượng cao dưới nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Độ bền vững này đặc biệt có giá trị trong trường hợp tải thay đổi và các bất định tham số khớp hoặc không khớp, cùng với các bất định tham số khác mà nó hiệu quả giảm thiểu các bất định tham số cao và các nhiễu tải, độ trễ thời gian.

3.1. Xây dựng mô hình toán học cho hệ thống điện đa vùng liên kết

Trong phần này, luật điều khiển LFC được đề xuất được điều chỉnh phù hợp cho hệ thống điện đa vùng liên kết, như minh họa trong Hình 3.1. (Jianping, 2019) (Le, N. M. B.; Van, V. H.; Nguyen, T. M.; Tsai, Y. W., 2018).



Hình 3.1. Sơ đồ khối đơn giản mô tả vùng thứ ith trong hệ thống điện đa vùng.

Do đó, biểu diễn không gian trạng thái của vùng thứ i dưới dạng ma trận là (Huynh, Van Van, Phong Thanh Tran, Bui Le Ngoc Minh, Anh Tuan Tran, Dao Huy Tuan, Tam Minh Nguyen, and Phan-Tu Vu., 2020), như được mô tả trong các phương trình động từ (3.1) đến (3.5), có thể được biểu diễn như sau (3.6):

$$\dot{x}_{i}(t) = A_{Ti}x_{i}(t) + B_{Ti}u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} H_{Tij}x_{j}(t) + F_{Ti}\Delta P_{Tdi}(t)$$
(3.6)

Trong đó, $x_i(t) = \begin{bmatrix} \Delta f_i(t) & \Delta P_{ti}(t) & \Delta P_{gi}(t) & \Delta E_i(t) & \Delta P_{tie}^{ij}(t) \end{bmatrix}^T$

Trong hệ thống điện thực tế, trạng thái vận hành luôn dao động do các sự cố về tải và biến động trong hệ thống điện. Khi xem xét sự không chắc chắn và biến động trong các thông số, mô hình hệ thống điện có thể được mô tả như sau:

$$\dot{x}_{i}(t) = [A_{Ti} + \Theta_{i}(x_{i}, t)]x_{i}(t) + B_{Ti}[u_{i}(t) + \xi_{i}(x_{i}, t)] + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} [H_{Tij} + \Xi_{ij}(x_{j}, t)]x_{j}(t) + F_{Ti}\Delta P_{Tdi}(t)$$
(3.7)

Trong đó $\Theta_i(x_i,t)$ đề cập đến sự không chắc chắn của các thông số thay đổi theo thời gian bên trong ma trận trạng thái, $\Xi_{ij}(x_j,t)$ đề cập đến sự không chắc chắn trong các thông số biến đổi theo thời gian của ma trận liên kết, and $\xi_i(x_i,t)$ là đầu vào điều khiển nhiễu. Ngoài ra, chúng ta có thể đề cập đến sự không chắc chắn kết hợp, với số lượng vùng từ 1 đến N:

$$\overline{L}_{Ti}(x_i,t) = \Theta_i(x_i,t)x_i(t) + B_{Ti}\xi_i(x_i,t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^N \Xi_{ij}(x_j,t)x_j(t) + F_{Ti}\Delta P_{Tdi}(t)$$
(3.8)

Do đó, mô hình động (3.6) cũng có thể được biểu diễn như sau:

$$\dot{x}_{i}(t) = A_{Ti}x_{i}(t) + B_{Ti}u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} H_{Tij}x_{j}(t) + \overline{L}_{Ti}(x_{i},t)$$
(3.9)

Trong ngữ cảnh này, thuật ngữ tổng hợp nhiễu $\overline{L}_{Ti}(x_i,t)$ bao gồm sự không chắc chắn, bao gồm cả các thành phần phù hợp và không phù hợp.

3.2. Giới thiệu một thiết kế kiểm soát tần số tải trượt bậc hai mới 3.3.1. Giới thiệu phương pháp điều khiển LFC

Trong phần này, chúng tôi trình bày một phương pháp tiếp cận mới có tên SOISMC để giải quyết các mạng lưới điện đang gặp phải những thách thức như sự không chắc chắn và nhiễu loạn tham số. Sau đó, chúng tôi giới thiệu việc thiết kế định luật SMC bậc hai dựa trên định lý ổn định Lyapunov. Thiết kế này cho thấy rằng các trạng thái của hệ thống hội tụ về đa tạp trượt và duy trì trên đó ngay cả khi có sự không chắc chắn về các thông số bên trong và sự gián đoạn bên ngoài.

3.3.2. Sơ đồ thiết kế LFC trượt bậc 2

Trong phần này, để giải quyết những thách thức này, chúng tôi phác thảo một cách có hệ thống quy trình từng bước để thiết kế và triển khai phương pháp điều khiển cải tiến này.

3.4.2.1 Bề mặt trượt tích phân của bộ trượt bậc 2.

Để giải thích rõ hơn, chúng tôi bắt đầu quá trình bằng cách phát triển và xây dựng một bề mặt trượt tích hợp được thiết kế cho MAPS (3.9) một cách chính xác.

$$\sigma_{Ti}[x_i(t)] = G_{Ti}x_i(t) - \int_0^t G_{Ti}(A_{Ti} - B_{Ti}K_{Ti})x_i(\tau)d\tau$$
(3.11)

Trong đó G_{Ti} là một ma trận liên tục và K_{Ti} là ma trận thiết kế, ma trận G_{Ti} được chọn để đảm bảo rằng ma trận $G_{Ti} B_{Ti}$ là ma trận không suy biến. Ma trận thiết kế $K_{Ti} \in \mathbb{R}^{m_i \times n_i}$ được chọn sao cho thỏa mãn điều kiện bất đẳng thức của hệ thống điện.

$$\operatorname{Re}[\lambda_{\max}(A_{Ti} - B_{Ti}K_{i})] < 0 \tag{3.12}$$

Khi kết hợp (3.9) với khả năng nhận biết và phân biệt $\sigma_{Ti}[x_i(t)]$ theo hàm thời gian thì:

$$\dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] = G_{Ti}[A_{Ti}x_i(t) + B_{Ti}u_i(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} H_{Tij}x_j(t) + \overline{L}_{Ti}(x_i,t)$$
(3.13)

 $-G_{Ti}(A_{Ti}-B_{Ti}K_i)x_i(t)]$

Vì vậy, cấu hình $\sigma_{Ti}[x_i(t)] = \dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] = 0$, điều khiển tương đương có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$u_{i}^{eq}(t) = -(G_{Ti}B_{Ti})^{-1}[G_{Ti}A_{Ti}x_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}G_{Ti}H_{Tij}x_{j}(t) + G_{Ti}\overline{L}_{Ti}(x_{i},t)$$
(3.14)

$$-G_{Ti}(A_{Ti} - B_{Ti}K_{Ti})x_i(t)]$$

Tiếp đó $u_i(t)$ với $u_i^{eq}(t)$ vào PS (3.9) tạo ra chuyển động trượt:

$$\dot{x}_{i}(t) = (A_{Ti} - B_{Ti}K_{Ti})x_{i}(t) + [I_{i} - B_{Ti}(G_{Ti}B_{Ti})^{-1}G_{Ti}]\overline{L}_{Ti}(x_{i}, t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} [I_{i} - B_{Ti}(G_{Ti}B_{Ti})^{-1}G_{Ti}]H_{Tij}x_{j}(t)$$
(3.15)

Định lý tiếp theo thiết lập một điều kiện trong đó phương trình động học chế độ trượt bậc hai (3.15) thể hiện sự ổn định tiệm cận.

Phân tích tính ổn định của MAPS trong động lực học chế độ trượt:

Định lý 3.1. Chuyển động trượt (3.15) chỉ ổn định tiệm cận khi có ma trận xác định dương đối xứng P_i , i = 1, 2, ..., N, và các hằng số vô hướng dương $\hat{\varepsilon}_i$ và α_j nhờ đó thu được các LMI tiếp theo.

$$\begin{bmatrix} (A_{Ti} - B_{Ti}K_{Ti})^T P_i + P_i(A_{Ti} - B_{Ti}K_{Ti}) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^N \alpha_j^{-1} H_{Tji}^T H_{Tji} & P_i[I_i - B_{Ti}(G_{Ti}B_{Ti})^{-1}G_{Ti}] \\ [I_i - B_{Ti}(G_{Ti}B_{Ti})^{-1}G_{Ti}]^T P_i & -\hat{\varepsilon}_i^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (3.16)$$

3.3.3. Thiết kế bộ điều khiển tần số tải

Trong bước tiếp theo, chúng tôi giới thiệu sơ đồ SOISMC mới cho MAPS. Sơ đồ này được thiết kế để giảm thiểu các vấn đề về rung lắc và dao động liên quan đến ISS. Đa tạp trượt được xác định và thiết lập $S_{Ti}[x_i(t)]$ như sau

$$S_{Ti}[x_i(t)] = \dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] + \delta_i \sigma_{Ti}[x_i(t)]$$
(3.17)

và

$$\overline{S}_{Ti}[x_i(t)] = \overline{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] + \delta_i \overline{\sigma}_{Ti}[x_i(t)]$$
(3.18)

Trong đó $\delta_i > 0$ là hằng số dương. Dựa vào phương trình (3.9), phương trình (3.18) có thể được biểu diễn dưới dạng

$$\dot{\bar{S}}_{Ti}[x_i(t)] = G_i[A_{Ti}\dot{x}_i(t) + B_{Ti}\dot{u}_i(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^N H_{Tij}\dot{x}_j(t) + \dot{\bar{L}}_{Ti}(x_i,t)]$$

$$= G_i(A_{Ti} - B_{Ti}K_{Ti})\dot{x}_i(t) + \delta\dot{\sigma}_i[x_i(t)]$$
(3.19)

$$-G_{Ti}(A_{Ti}-B_{Ti}K_{Ti})\dot{x}_i(t)+\delta_i\dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)]$$

Dựa trên các định nghĩa về mặt trượt và đa tạp trượt, chúng ta có thể xây dựng mô hình trượt bậc hai phân tán liên tục LFC cho mạng hệ thống điện như sau:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{i}(t) &= -(G_{Ti}B_{Ti})^{-1} [\|G_{Ti}\|\|B_{Ti}\|\|K_{Ti}\|\|\dot{x}_{i}(t)\| + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \|G_{Tj}\|\|H_{Tji}\|\|\dot{x}_{i}(t)\| + \delta_{i}\|\dot{\sigma}_{Ti}[x_{i}(t)]\| \\ &+ \|G_{Ti}\|\bar{\gamma}_{i} + \bar{\varepsilon}] \frac{\bar{S}_{Ti}[x_{i}(t)]}{\|\bar{S}_{Ti}[x_{i}(t)]\|} \end{aligned}$$
(3.20)

3.3. Những kết quả mô phỏng và các thảo luận liên quan

3.3.1. Điều khiển tần số trong hệ thống điện thực tế

Trong hệ thống điện (PS) thực tế, bằng cách làm như vậy, chúng tôi mong muốn nâng cao hiệu suất của PS, chủ yếu bằng cách giảm thiểu hiện tượng rung lắc so với việc sử dụng cùng một kỹ thuật SMC. Việc đánh giá này được thực hiện trên một PS được kết nối hai khu vực, như mô tả trong Hình 3.2.



Hình 3.2. Sơ đồ khối đơn giản minh họa kết nối giữa vùng điều khiển 1 và 2.3.3.2. Các trường hợp mô phỏng khác nhau

Trong một nhà máy điện, để đạt được tần số danh nghĩa của hệ thống (thường là 50 Hz) và trao đổi công suất được thiết kế với các hệ thống xung quanh, AGC cân bằng tổng lượng phát và tải (bao gồm cả tổn thất). Việc báo cáo các mô phỏng khác nhau được kiểm tra dựa trên các trường hợp vận hành khác nhau được nêu dưới đây:

3.3.2.1. Bộ điều khiển trượt bậc 2

Trong nghiên cứu này, chúng tôi kiểm tra PN thông thường hai vùng tiêu chuẩn trong Hình 3.3. Mục đích là để đánh giá và phân tích bộ điều khiển được đề xuất trong hệ thống này, thể hiện sức mạnh và hiệu quả của nó, như đã nêu cho SOISMC.



Hình 3.3. Mô hình hàm truyền của hệ thống nhiệt đa vùng với bộ điều khiển SMC.

Mô phỏng 1:

Trong phần này, ba kịch bản hoặc trường hợp khác nhau sẽ được điều tra hay khảo sát. Các tham số hệ thống điện cho cho hệ thống điện hai vùng đã được cung cấp ở phần trước (Guo, J., 2019).

Trường hợp 1. Để tiếp tục, một lần nữa hãy giả sử rằng hệ thống đang hoạt động với các tham số danh nghĩa. Nhiễu loạn tải được đưa vào hệ thống tại $\Delta P_{d1} = 0.01$ giây cho khu vực 1 tại $t_1 = 1$ s và $\Delta P_{d2} = 0.02$ giây cho khu vực 2 tại t = 1 s trong hệ thống điện. Như minh họa trong Hình 3.4 (a), các tín hiệu lệch tần cho vùng điều khiển 1 và 2 được hiển thị.



Hình 3.4. Biến thiên tần số [Hz] (a) và biến thiên công suất đường dây [p.u.MW] (b) của cả hai khu vực điều khiển có nhiễu tương ứng.

Hình 3.4 (b) trình bày các tín hiệu dòng điện liên kết cho từng khu vực. Với sơ đồ điều khiển mới, những kết quả này nhấn mạnh khả năng phản ứng nhất thời nhanh chóng và hiệu quả của PS trong việc giảm thiểu và loại bỏ vấn đề rung lắc. Rõ ràng là các lỗi tần số, lỗi nguồn điện liên kết và lỗi điều khiển từng khu vực (CA) đều

hội tụ về 0 trong một khoảng thời gian ngắn, trái ngược hoàn toàn với các phương pháp điều khiển trước đây được nêu trong (Guo, J., 2019).

Nhận xét 3.1. Tùy thuộc vào phạm vi biến đổi tần số, điều khiển tần số tải khác nhau có thể cần thiết để duy trì sự ổn định tần số trong hệ thống điện. Nếu không có bộ điều khiển dành cho hệ thống điện, độ lệch tần số đáng kể có thể dẫn đến nhiều vấn đề khác nhau, bao gồm hư hỏng thiết bị, hiệu suất tải suy giảm, quá tải đường truyền và can thiệp vào các sơ đồ bảo vệ hệ thống. Cuối cùng, điều này có thể dẫn đến tình trạng không ổn định cho hệ thống điện. Do đó, sự hiện diện của bộ điều khiển tần số là cần thiết cho hoạt động của hệ thống điện.

Trường hợp 2. Trong các kịch bản trước, để nghiên cứu sâu hơn về độ bền của nó trong các điều kiện khác nhau, chúng tôi đã đưa ra sai lệch ±20% so với các tham số danh nghĩa và nhiễu loạn tải áp dụng. Điều này cho phép chúng tôi đánh giá tính mạnh mẽ và hiệu quả của chương trình SOISMC mới. Hình 3.5 (c) minh họa độ lệch tần số của máy phát, nhấn mạnh rằng sơ đồ bậc hai được đề xuất cho phép PS trở về giá trị danh định trong vòng khoảng 5–6 giây sau khi gặp nhiễu tải. Các giá trị dự kiến của độ lệch công suất đường dây được mô tả trong Hình 3.5 (d).



Figure 3.5. Tần số [Hz] (c) và công suất đường dây nối [p.u.MW] (d) cả hai đều là vùng điều khiển trong điều kiện nhiễu loạn.

Nhận xét 3.2. Bằng cách thực hiện luật điều khiển bậc hai, việc đạt được thời gian ổn định ngắn hơn, độ lệch nhất thời nhỏ hơn và giảm dao động khi xử lý nhiễu tải sẽ trở nên khả thi. Cách tiếp cận này giải quyết một cách hiệu quả một số hạn chế được quan sát thấy trong các chiến lược kiểm soát khác được trình bày trong bài báo của (Guo, J., 2019), đặc biệt là về việc giảm hiệu ứng chattering và tăng cường phản ứng nhất thời hay giảm thời gian xác lập của hệ thống.

Trường hợp 3. Trong trường hợp cuối cùng, chúng tôi kiểm tra tác động của độ lệch tải và độ không đảm bảo của tham số không khớp trong PS hai vùng. Để chứng minh những ưu điểm của sơ đồ SOISMC được đề xuất, độ lệch tải ngẫu nhiên được áp dụng cho hệ thống điện (PN) hai vùng trong Hình 3.6.



Figure 3.6. Sự biến thiên của tải ở cả hai khu vực của hệ thống điện.

Các kết quả mô phỏng, được hiển thị trong Hình 3.7 (e) đến 3.7 (f), thể hiện độ lệch tần số, công suất đường dây, cung cấp sự thể hiện rõ ràng về hiệu suất trong các tình huống khác nhau liên quan đến độ lệch tải và độ không đảm bảo của tham số hệ thống điện.



Hình 3.7. Sự thay đổi tần số [Hz] và độ lệch công suất đường dây [p.u.MW] dưới tải và độ không đảm bảo trong các tham số của hệ thống.

Mô phỏng 2: Trong PN hiện đại, việc đảm bảo ổn định tần số là mối quan tâm cốt yếu, đặc biệt là trong PS quy mô lớn liên quan đến độ trễ truyền thông.



Hình 3.8. Bố trí của PN được kết nối với nhau với độ trễ thời gian.

Trong nghiên cứu này, Hình 3.8 cho thấy cách bố trí của PN được kết nối với nhau để giải quyết độ trễ truyền thông (Pradhan, S. K., & Das, D. K., 2020) (Fu, C.,

Wang, C., & Shi, D., 2020). Trong các kịch bản khác nhau và trong các điều kiện khác nhau, hiệu quả và khả năng phục hồi của phương pháp SOISMC được đề xuất bằng cách sử dụng PN có độ trễ thời gian được kết nối với nhau. Phương pháp LFC dựa trên SOISMC, như được trình bày ở đây, phải được phân tích so sánh với phương pháp LFC truyền thống được trình bày chi tiết trong (Sarkar, M. K., Dev, A., Asthana, P., & Narzary, D., 2018. Trong trường hợp cụ thể này, nhiễu loan tải có cường đô (tính theo đơn vị MW) xảy ra tại thời điểm t=0 s trong LSPS ba khu vực. Các biến thể tần số tương ứng cho PS quy mô lớn, kết hợp với thời gian trễ của $\tau_i = 3$ s, được minh họa từ Hình 3.9 (a) đến Hình 3.9 (b).



Figure 3.9. Độ lệch tần số của hệ thống điện (g) và độ lệch đường nối của hệ thống điện (h).

Nhận xét 3.3: Trong thiết lập này, chúng tôi đã xem xét ảnh hưởng của tín hiệu trễ thời gian nhằm mục đích cho ba vùng MAPS trong điều kiện nhiễu tải ngẫu nhiên. Rõ ràng là SOISMC dưa trên bề mặt chuyển mạch được cung cấp không chỉ đạt được tốc đô phản hồi vượt trôi mà còn nâng cao hiệu suất nhất thời, dẫn đến giảm thiểu các lưới điện có độ trễ thời gian được kết nối với nhau trên nhiều khu vực.

Kết luân 3.4.

Tóm lại, nghiên cứu này giới thiệu một phương pháp SOISMC mới mẻ để quản lý hiệu quả sự cân bằng công suất hoạt động trong một MAPS. Điều này được thực hiện bằng cách ưu tiên việc cân bằng công suất hoạt động, giảm thiểu sự vượt quá mức và tăng tốc độ phản ứng tần số chuyển động bằng cách sử dụng một bề mặt trượt tích hợp dựa trên phương pháp SMC bậc hai. Việc giải quyết vấn đề rung lắc thể hiện sư hiệu quả của MAPS và cho thấy những lợi ích so với các kỹ thuật điều khiển trước đó. Đáng chú ý, trong các ứng dụng thực tế, kỹ thuật SMC được đề xuất kết hợp với phương pháp FLC cung cấp một giải pháp mạnh mẽ và hiệu quả trong khi loại bỏ rung lắc. Bằng cách giảm thiểu rung lắc trong đầu vào điều khiển, lược đồ điều khiển được đề xuất cung cấp tín hiệu chính xác để kiểm soát công suất quán tính cơ học, giúp nó phù hợp với hiệu chỉnh hoặc yêu cầu thay đối tải một cách hiệu quả. Khả năng này làm cho nó rất phù hợp cho các hệ thống điện thực tế đang phải đối mặt với các không chắc chắn về thông số quan trong, sự cố về tải, và trễ truyền thông trong hê thống điên.

CHƯỜNG 4: THIẾT KẾ BỘ QUAN SÁT CHẾ ĐỘ TRƯỢT NÂNG CAO ĐẾ KIỀM SOÁT TÀN TẢI TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN ĐA NGUỒN ĐA KHU VƯC

Trong phần này, thiết bị quan sát trạng thái dựa trên điều khiển chế độ trượt một pha (SPSMCBSO) được sử dụng để giới thiệu LFC của hệ thống nhiệt điện khíthủy điện hai khu vực (TAGHTPS). Thứ hai, các biến trạng thái để kiểm soát phản hồi được ước tính bằng cách sử dụng trình quan sát trạng thái. Thứ ba, SPSMCBSO được thiết kế để thay đổi SMC cơ bản nhằm nâng cao hiệu suất của TAGHTPS liên quan đến thời gian vượt quá và ổn định. Hơn nữa, để giải quyết thách thức đo lường biến trạng thái, SPSMCBSO được thiết kế để hoàn toàn dựa vào bộ quan sát trạng thái. Thứ tư, một giả thuyết ổn định LMI-Lyapunov mới đã được áp dụng để thực hiện nghiên cứu độ ổn định TAGHTPS. Kết quả của thí nghiệm được trình bày và so sánh với các kỹ thuật điều khiển truyền thống có uy tín, SPSMCBSO tiếp tục thể hiện sự mạnh mẽ và không bị ảnh hưởng bởi độ lệch tham số hệ thống con, nhiễu loạn tải ngẫu nhiên và độ không đảm bảo tham số ở trạng thái và ma trận liên kết, những biến động vốn có trong các nguồn năng lượng tái tạo.

4.1. Mô hình toán học của hệ thống điện đa nguồn đa vùng kết nối liên thông

Do đó, phần này bao gồm, như được thấy trong Hình 4.1, chúng tôi tính đến TAGHTPS ở từng khu vực trong phần này. Vùng thứ i của không gian trạng thái PS trong mô hình thu được bằng cách xác định các tham số PS và áp dụng biểu thức động học từ (4.1) đến (4.13) (Huynh, V. V., Tran, P. T., Nguyen, T. M., Phan, V. D., & Pham, V. T., 2022), được cung cấp bởi (4.14).

$$\dot{x}_{i}(t) = A_{Ti}x_{i}(t) + B_{Ti}u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} H_{Tij} + \Delta H_{Tij}x_{j}(t) + F_{Ti}\Delta P_{Tdi}(t)$$
(4.14)

trong đó câu trúc không gian trạng thái của TAGHTPS được biểu diễn bằng công thức (4.14)

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \begin{bmatrix} \Delta f_i & \Delta P_{pt_i} & \Delta P_{Gt_i} & \Delta X_{Et_i} & \Delta P_{Gh_i} & \Delta P_{Rh_i} & \Delta X_{Eh_i} \end{bmatrix} \\ \Delta P_{Gg_i} & \Delta P_{Rg_i} & \Delta P_{Vg_i} & \Delta X_{Eg_i} & \Delta ACE_i & \Delta P_{tie_{ij}} \end{bmatrix}^T \text{là vecto trạng thái, } x_j(t) \text{ là vecto trạng thái, } x_j(t) \text{ la vecto tr$$



Hình 4.1. Sơ đồ khối LFC của TAMSPS.

Trong MAMSPS thực tế, các biến đổi trong điều kiện vận hành liên tục tác động đến các nguồn tải động. Khi tính đến yếu tố này, phương trình (4.14) có thể được viết lại như sau:

$$\dot{x}_{i}(t) = [A_{Ti} + \Sigma_{i}(x_{i}, t)]x_{i}(t) + B_{Ti}[u_{i}(t) + \psi_{i}(x_{i}, t)] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{L} [H_{Tij} + \Xi_{ij}(x_{j}, t)]x_{j}(t) + F_{Ti}\Delta P_{Tdi}(t)$$
(4.15)

Trong đó $\Sigma_i(x_i,t)$, $\Xi_{ij}(x_j,t)$ là sự không chắc chắn gây ra bởi các tham số thay đổi theo thời gian và $B_{Ti}\psi_i(x_i,t)$ là nhiễu đầu vào. Nói cách khác, độ không đảm bảo đo tổng thể có thể được biểu thị như sau:

$$\Phi_{i}(x_{i},t) = \Sigma_{i}(x_{i},t)x_{i}(t) + B_{Ti}\psi_{i}(x_{i},t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} \Xi_{ij}x_{j}(t) + F_{Ti}\Delta P_{Tdi}(t)$$
(4.16)

Do đó, mô hình động cập nhật có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$\dot{x}_{i}(t) = A_{Ti}x_{i}(t) + B_{Ti}u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} H_{Tij}x_{j}(t) + \Phi_{i}(x_{i},t)$$
(4.17)

 $y_i = C_{Ti} x_i$

Trong đó $\Phi_i(x_i, t)$ biểu thị độ không đảm bảo của các tham số khớp và không khớp dưới dạng nhiễu kết hợp.

4.2. Thiết kế công cụ ước tính trạng thái hệ thống điện

Trong trường hợp của PS, khi một số biến trạng thái khó giải quyết, rất ít ấn phẩm đã sử dụng phương pháp quan sát để giải LFC. Vì lý do trên, chúng tôi sử dụng phương pháp quan sát để tạo lại khung TAGHTPS (4.17) ban đầu theo cách hiển thị bên dưới.

$$\dot{\hat{x}}_{i}(t) = A_{Ti}\hat{x}_{i}(t) + B_{Ti}u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} H_{Tij}\hat{x}_{j}(t) + \Gamma_{Ti}\left(y_{i} - \hat{y}_{i}\right)$$
(4.18)

 $\hat{y}_i = C_{Ti} \hat{x}_i$

Trong đó Γ_{Ti} là lợi ích của bộ quan sát, $\hat{x}_i(t)$ là ước tính của $x_i(t)$, y_i là vectơ đầu ra, \hat{y}_i tương ứng là kết quả của bộ quan sát trạng thái. Với phương pháp định vị cực, nó có thể được tính toán. Sau đó, việc thay đổi lỗi trạng thái sẽ được kiểm tra và lỗi trạng thái được báo cáo là

$$\tilde{x}_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t)$$
 (4.19)

Đạo hàm biến lỗi trạng thái \tilde{x}_i chúng ta có được

$$\dot{\tilde{x}}_{i} = (A_{Ti} - \Gamma_{Ti}C_{Ti})\tilde{x}_{i} + \sum_{\substack{j=1\\j \neq i}}^{L} H_{Tij}\tilde{x}_{j} + \Phi_{i}(x_{i}, t)$$
(4.20)

Sự hội tụ của sai số trạng thái về 0 phụ thuộc vào giá trị riêng của $(A_{Ti} - \Gamma_{Ti}C_{Ti})$.

4.3. Thiết kế bộ ước lượng trạng thái của hệ thống điện

Trong các kịch bản thực tế, sơ đồ LFC cần thể hiện mức độ mạnh mẽ cao trước các nhiễu loạn cụ thể để đảm bảo tính ổn định của MAMSPS. Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi giới thiệu SPSMCBSO cùng với bề mặt trượt không yêu cầu pha tiếp cận, được xác định như sau:

$$\eta_{Ti}[\hat{x}_i(t)] = \mathbf{M}_{Ti}\hat{x}_i(t) - \int_0^t \mathbf{M}_{Ti}(A_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti})\hat{x}_i(t)d\tau - \mathbf{M}_{Ti}\hat{x}_i(0)e^{-\delta_i t}$$
(4.21)

Trong đó M_{Ti} được chọn để đảm bảo rằng ma trận $M_{Ti}B_{Ti}$ ma trận không suy biến. Ma trận thiết kế $\Lambda_{Ti} \in R^{m_i \times n_i}$ được chọn để đáp ứng yêu cầu phi tuyến tính.

$$\operatorname{Re}[\lambda_{\max}(A_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti})] < 0 \tag{4.22}$$

nếu chúng ta lấy đạo hàm của $\eta_{Ti}[\hat{x}_i(t)]$ về mặt thời gian, chúng ta có những mục tiếp theo.

$$\dot{\eta}_{Ti} [\hat{x}_{i}(t)] = [M_{Ti}A_{Ti}\hat{x}_{i}(t) + M_{Ti}B_{Ti}u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} M_{Ti}H_{Tij}\hat{x}_{j}(t) + M_{Ti}\Gamma_{Ti}(y_{i} - \hat{y}_{i})]$$

$$- M_{i}(A_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti})\hat{x}_{i}(t) + \delta_{i}M_{Ti}\hat{x}_{i}(0)e^{-\delta_{i}t}$$

$$(4.23)$$

Khi đó $\dot{\eta}_{Ti}(t) = \eta_{Ti}(t) = 0$, thì chúng ta có thể biểu diễn điều khiển tương đương:

$$u_{i}^{eq}(t) = -(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}[M_{Ti}A_{Ti}\hat{x}_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L}M_{Ti}H_{Tij}\hat{x}_{j}(t) + M_{Ti}\Gamma_{Ti}\left(y_{i} - \hat{y}_{i}\right) - M_{Ti}(A_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti})\hat{x}_{i}(t) + \delta_{i}M_{Ti}\hat{x}_{i}(0)e^{-\delta_{i}t}] = -(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}[M_{Ti}B_{Ti}\Lambda_{Ti}\hat{x}_{i}(t) + M_{Ti}\Gamma_{Ti}\left(y_{i} - \hat{y}_{i}\right) + \delta_{i}M_{Ti}\hat{x}_{i}(0)e^{-\delta_{i}t} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L}M_{Ti}H_{Tij}\hat{x}_{j}(t)]$$

$$(4.24)$$

Để hoàn thành vòng lặp của hệ thống, chúng tôi cung cấp (4.24) vào trong (4.17)

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i}(t) &= (A_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti})x_{i}(t) + (B_{Ti}\Lambda_{Ti} - B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}\Gamma_{Ti}C_{Ti})\tilde{x}_{i}(t) \\ &+ \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} [H_{Tij} - B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}H_{Tij}]x_{j}(t) \\ &+ \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}H_{Tij}\tilde{x}_{j}(t) + \Phi_{i}(x_{i},t) - \delta_{i}B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}\hat{x}_{i}(0)e^{-\delta_{i}t} \end{aligned}$$
(4.25)

Để kiểm tra MAMSPS (4.17), chúng ta tích phân các phương trình (4.20) và (4.25) như sau.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i} \\ \dot{\tilde{x}}_{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti} & \Theta_{i} \\ 0 & A_{Ti} - \Gamma_{Ti}C_{Ti} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i} \\ \tilde{x}_{i} \end{bmatrix} + \sum_{\substack{j=1 \ j\neq i}}^{L} \begin{bmatrix} H_{Tij} - \Upsilon_{i}H_{Tij} & \Upsilon_{i}H_{Tij} \\ 0 & H_{Tij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{j} \\ \tilde{x}_{j} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \Phi_{i}(x_{i},t) \\ \Phi_{i}(x_{i},t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{i}e^{-\delta_{i}t} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Trong \,\mathrm{d}\delta, \, \Theta_{i} = B_{Ti}\Lambda_{Ti} - B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}\Gamma_{Ti}C_{Ti},$$

$$N_{i} = -\delta_{i}B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}\hat{x}_{i}(0) \, \mathrm{v}\hat{a} \, \Upsilon_{i} = B_{Ti}(M_{Ti}B_{Ti})^{-1}M_{Ti}.$$

$$(4.26)$$

Phương trình (4.25) biểu thị hệ động lực của MAMSPS. Do đó, chúng tôi tiến hành đánh giá tính ổn định (4.26) của hệ thống này bằng cách sử dụng LMI mới được cung cấp trong (4.27), kèm theo định lý tương ứng như đã nêu.

Định lý 4.1: Ôn định tiệm cận là công thức (4.26) với điều kiện ma trận dương xác định đối xứng Π_i và $\overline{\Pi}_i$ trong đó i = 1, 2, ..., L và các đại lượng dương λ_i, ρ_i và $\hat{\gamma}_i$ giả sử các điều kiện đã chỉ định, chúng ta có thể thiết lập rằng LMI mới dưới đây đúng.

$$\begin{bmatrix} X_{i} & \Pi_{i}\Theta_{i} & \Pi_{i} & \Pi_{i}N_{i} & 0\\ \Theta_{i}^{T}\Pi_{i} & \bar{X}_{i} & 0 & 0 & \bar{\Pi}_{i}\\ \Pi_{i} & 0 & -\lambda_{i}^{-1} & 0 & 0\\ N_{i}^{T}\Pi_{i} & 0 & 0 & -\hat{\gamma}_{i}^{-1} & 0\\ 0 & \bar{\Pi}_{i} & 0 & 0 & -\rho_{i}^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

$$(4.27)$$

Trong đó X_i = $\Pi_i (A_{Ti} - B_{Ti} \Lambda_{Ti}) + (A_{Ti} - B_{Ti} \Lambda_{Ti})^T \Pi_i$

$$+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} [\bar{\lambda}_{j}(H_{Tji} - \Upsilon_{j}H_{Tji})^{T}(H_{Tji} - \Upsilon_{j}H_{Tji})],$$

$$\bar{X}_{i} = \bar{\Pi}_{i}(A_{Ti} - \Gamma_{Ti}C_{Ti}) + (A_{Ti} - \Gamma_{Ti}C_{Ti})^{T}\bar{\Pi}_{i} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} [\tilde{\lambda}_{j}^{-1}H_{Tji}^{T}H_{Tji}]$$

$$+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} [\hat{\lambda}_{j}(\Upsilon_{j}\tilde{H}_{Tji})^{T}\Upsilon_{j}\tilde{H}_{Tji}].$$

4.4. Thiết kế bộ điều khiển trượt với phản hồi tổng đầu ra

Trong phần này, chúng tôi phát triển kỹ thuật SMC với sự phân cấp một pha cho LFC trong bối cảnh MAMSPS được mô tả bởi Phương trình (4.17).

$$u_{i}(t) = -(\mathbf{M}_{Ti}B_{Ti})^{-1}[\|\mathbf{M}_{Ti}\|\|B_{Ti}\|\|\Lambda_{Ti}\|\|\hat{x}_{i}(t)\| + \delta_{i}\|\mathbf{M}_{Ti}\|\|\hat{x}_{i}(0)\|e^{-\delta_{i}t} + \|\mathbf{M}_{Ti}\|\|\Gamma_{Ti}\|\|(y_{i} - \hat{y}_{i})\| + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{L} \|\mathbf{M}_{Tj}\|\|H_{Tji}\|\|\hat{x}_{i}(t)\| + \theta_{i}]\frac{\eta_{Ti}[\hat{x}_{i}(t)]}{\|\eta_{Ti}[\hat{x}_{i}(t)]\|},$$

$$(4.28)$$

$$i = 1, 2, ..., L$$

Trong đó θ_i là vô hướng dương và $u_i(t)$ đại diện cho cách tiếp cận SMC một pha phi tập trung. Trong tiểu mục này, chúng tôi cũng rút ra bằng chứng về khả năng tiếp cận của các biến trạng thái hệ thống, cùng với hàm Lyapunov liên quan đến định

lý sau. Sau đó, Hình 2 mô tả sơ đồ của kỹ thuật điều khiển chế độ trượt một pha kết hợp bộ quan sát mở rộng được đề xuất.



Hình 4.2. Hình ảnh trực quan mô tả cách tiếp cận SPSMCBSO dưới dạng sơ đồ.

Nhận xét 4.1. Chức năng cơ bản của điều khiến trượt một pha là cung cấp cường độ chuyển động trên toàn bộ không gian trạng thái. Trong chế độ trượt, kích thước của không gian trạng thái theo thứ tự của phương trình chuyển động. Như vậy, khả năng phục hồi của hệ thống điện được liên kết phức tạp có thể được đảm bảo trong suốt thời gian phản ứng của hệ thống, bắt đầu từ trường hợp đầu tiên.

4.5. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Khi có nhiễu loạn tải ngẫu nhiên và tải theo bước cũng như độ không đảm bảo của tham số, hiệu quả của SPSMCBSO được đề xuất cho LFC của TAGHTPS được thể hiện trong ba mô phỏng trong phiên hiện tại, kiểm tra tính hiệu quả và khả năng phục hồi của phương pháp điều khiển được đề xuất.

4.5.1 Mô phỏng 1

Trường hợp 1: Sử dụng tham số hệ thống con từ (G. Nidhi, K. Narendra, B. Chitti,, 2019) và nhiễu loạn tải theo bước là 1%, phản hồi TAGHTPS một lần nữa được mô phỏng bằng cách sử dụng phương pháp Jaya để tạo ra các bộ điều chỉnh có cấu trúc PID cho phương pháp Điều khiển thế hệ tối ưu hóa. Bằng cách sử dụng phương pháp được đề xuất, chúng tôi bắt chước phản hồi TAGHTPS trong trường hợp này, sử dụng các điều kiện tương tự như các điều kiện được báo cáo trong (G. Nidhi, K. Narendra, B. Chitti,, 2019).



Hình 4.3. Biến thiên tần số [Hz] ở vùng 1 (a) và vùng 2 (b).

Trong hình 4.3 (a), sự dao động tần số của vùng một được thể hiện. Trong Hình 4.3 (b), biến thiên tần số tải ở vùng hai được hiển thị. Hình 4.4 cung cấp nguồn điện nối dây theo thứ tự đó.



Hình 4.4. Biến đổi công suất đường dây [p.u.MW]

Độ vọt lố tốt hơn được quan sát thấy ở cả hai bộ điều khiển; tuy nhiên, thời gian xử lý 5 giây với phương pháp được đề xuất một lần nữa ít hơn nhiều so với thời gian xử lý 8 giây với bộ điều khiển được mô tả trong (G. Nidhi, K. Narendra, B. Chitti,, 2019). Điều này càng gọi ý rằng cách đơn giản hơn và ít đòi hỏi hơn để thực thi hệ thống được đề xuất là lựa chọn tốt hơn cho MAMSPS LFC.

Trường hợp 2: Trong trường hợp này, mô phỏng của chúng tôi liên quan đến việc đưa TAGHTPS vào phân tích phản hồi khi có nhiễu loạn tải ngẫu nhiên, như được mô tả trong Hình 4.8 với độ lệch ±20% trong các tham số hệ thống con. Hơn nữa, chúng tôi tính đến độ không đảm bảo không khớp trong ma trận trạng thái hệ

thống do những thay đổi về vị trí van trong TAGHTPS. Những độ không đảm bảo này được biểu thị bằng hàm cosin, hàm này làm tăng thêm một lớp phức tạp khác cho việc phân tích.



Hình 4.5. Sự thay đối trong tải ngẫu nhiên.



Hình 4.6. Biến đổi tần số [Hz] (e) và Thay đổi công suất đường dây nối [p.u.MW] (f) ở khu vực-1 và khu vực-2.

Hình 4.6 (c) hiển thị sự thay đổi tần số ở cả hai vị trí, trong khi Hình 4.6 (d) hiển thị nhiễu loạn nguồn điện trên đường dây nối. Bằng cách loại bỏ các nhiễu loạn khác nhau và duy trì tần số của chúng ở điểm vận hành có thể chấp nhận được đồng thời quản lý hiệu quả sự biến đổi của đường âm, SPSMCBSO được đề xuất có thể duy trì khả năng phục hồi tốt hơn.

Nhận xét 4.2. Phản hồi của TAGHTPS đã được mô phỏng liên quan đến nhiễu loạn tải theo từng bước và biến thể tải ngẫu nhiên, nhằm mục đích so sánh nó với bộ điều khiển tối ưu được trình bày trong (G. Nidhi, K. Narendra, B. Chitti, 2019). Kết quả của những mô phỏng này đã cho thấy sự cải thiện. Kết quả của những mô phỏng này khẳng định tính chắc chắn của sơ đồ SPSMCBSO vì nó loại bỏ những nhiễu loạn này một cách hiệu quả và duy trì tính ổn định của TAGHTPS.

4.5.2 Mô phỏng 2

Trường hợp 1: Trong kịch bản này, để đánh giá hoạt động của PS khi áp dụng thuật toán mới, chúng tôi đưa ra các thay đổi tải trọng theo từng bước cho cả khu vực 1 và khu vực 2, kết hợp với sự thay đổi tốc độ gió như mô tả trong Hình 4.7. Tỷ lệ năng lượng gió trong PS là trên Biểu đồ tốc độ gió tăng lên được thể hiện trên Hình

4.8. Tuy nhiên, những biến động vốn có của các nguồn năng lượng tái tạo và sự thay đổi về phụ tải có thể đặt ra thách thức cho LFC. Trong trường hợp này, mô hình phát điện gió được thêm vào mạng hệ thống điện. Cả công suất đầu ra và tải của mô hình phát điện gió đều không chắc chắn.



Hình 4.7. Sơ đồ khối PS hai vùng được liên kết với một đường nối



Hình 4.8. Biểu đồ tốc độ gió (m/s).

Hình 4.9 và 4.10 cho thấy tần số hệ thống và độ lệch đường kết nối của SPSMCBSO có thể giảm xuống. Vì vậy, có thể kết luận rằng sự biến động là do năng lượng tái tạo và nhiễu phụ tải gây ra. Nhưng bằng cách sử dụng bộ quan sát nhiễu được thiết kế, có thể giảm bớt nhiễu loạn của SMLFC.



Hình 4.9. Độ lệch tần số [Hz] với bước tải 1,5% ở khu vực 1 (e) và khu vực 2 (f) không có và có thay đổi tốc độ gió



Hình 4.10. Độ lệch công suất đường dây [p.u.MW].

Vì vậy, có thể kết luận rằng sự biến động do năng lượng tái tạo và nhiễu phụ tải gây ra có thể được bù đắp thông qua SPSMCBSO được thiết kế.

4.6. Kết luận của chương 4

Chương này giới thiệu một cách tiếp cận mới gọi là SPSMCBSO cho LFC trong MAMSPS. Tính thực tế và hiệu quả của kỹ thuật SPSMCBSO được đánh giá bằng mô hình TAGHTPS, mô hình này kết hợp độ không đảm bảo trong cả các biến trạng thái và các tham số liên kết với nhau. Tính ổn định của hệ thống TAGHTPS được thiết lập một cách nghiêm ngặt thông qua phương pháp LMI mới dựa trên lý thuyết Lyapunov. Phân tích so sánh kết quả mô phỏng với các phương pháp gần đây cho thấy hiệu suất vượt trội của phương pháp SPSMCBSO. Rõ ràng là việc áp dụng kỹ thuật SPSMCBSO được đề xuất đã nâng cao đáng kể hiệu suất của TAGHTPS, vượt trội so với kết quả của các phương pháp đã sử dụng trước đó.

CHƯƠNG 5: THIẾT KẾ BỀ MẶT TRƯỢT CHO TRƯỢT CHẾ ĐỘ ĐIỀU KHIẾN TẦN TẢI ĐA KHU VỰC HỆ THỐNG ĐIỆN ĐA NGUỒN

Trong chương này, bộ điều khiển trượt tích phân bậc hai mới thông qua bề mặt trượt tích hợp kép (SOSDISS) nhằm cải thiện khả năng điều chỉnh tần số MASHPS, quản lý nguồn điện liên kết và độ tin cậy. Hơn nữa, LMI mới dựa trên độ ổn định Lyapunov được sử dụng để phân tích toàn bộ quá trình ổn định MASHPS. Dưới sự không chắc chắn của tham số và các LD giả định khác nhau từ các hộ gia đình, tòa nhà thương mại và ngành công nghiệp, SOSDISS được đề xuất tỏ ra rất mạnh mẽ và cải thiện phản ứng MASHPS về mặt điều chỉnh tần số, quản lý nguồn điện liên kết và độ tin cậy của hệ thống khi so sánh với các đề xuất hiện có khác. các phương pháp xem xét độ không đảm bảo ít hơn. Hiệu suất của chiến lược điều khiển được đề xuất là hiệu quả và đáng tin cậy, bằng chứng là đáp ứng tần số nhanh và không nhạy cảm với các thay đổi tham số, nhiễu tải, biến đổi tải, thời gian trễ và hiệu ứng phi tuyến GDB và GRC trên bus PN, IEEE 39.

5.1. Mô hình động lực hệ thống thủy điện hơi nước đa vùng

Để cải thiện tính ổn định và độ tin cậy của hệ thống thủy điện hơi nước đa khu vực (MASHPS), cần có LFC.



Hình 5.1. Sơ đồ nguồn 1 vùng 2 bao gồm các nhà máy nhiệt điện sử dụng tua bin thu hồi nhiệt và nhà máy thủy điện.

LFC của PS đa nguồn khu vực thứ i, bao gồm nhà máy nhiệt điện tái tạo và nhà máy thủy điện và được trình bày trong Hình 5.1. Do đó, chúng ta có thể biểu diễn các động lực trên ở dạng không gian trạng thái bên dưới.

$$\dot{x}_{i}(t) = \bar{A}_{Ti} x_{i}(t) + \bar{B}_{Ti} u_{i}(t) + \sum_{\substack{i=1\\j\neq i}}^{N} \bar{H}_{Tij} x_{j} + \bar{F}_{Ti} \Delta \bar{P}_{TDi}(t)$$
(5.1)

Trong đó $x_i(t) = \left[\Delta f_i(t) \ \Delta P_{mi}(t) \ \Delta P_{vi}(t) \ \Delta P_{gi}(t) \ \Delta E_i(t) \ \Delta \delta_i(t) \ \Delta P'_{mi}(t) \ \Delta P'_{vi}(t) \ \Delta P'_{vi}(t)\right]^T$ và $x_i(t) \in R^{n_i}$ là vecto trạng thái, $u_i(t) \in R^{m_i}$ là vecto điều khiển đầu vào, $x_j(t) \in R^{n_j}$ là vecto trạng thái lân cận của $x_i(t)$, n_i là tổng số các biến trạng thái của vùng của khu vực thứ i, m_i là tổng số điều khiển của vùng các biến đầu vào của vùng thứ i. $\overline{A}_{Ti} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, $\overline{B}_{Ti} \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$, $\overline{F}_{Ti} \in \mathbb{R}^{n_i \times k_i}$ và \overline{H}_{Tij} là các ma trận hệ tham số danh nghĩa. Chúng được xem xét và biểu diễn trong ma trận hệ thống và đầu vào điều khiển, như được hiển thị dưới đây

$$\dot{x}_{i}(t) = [\bar{A}_{Ti} + \Theta_{Ti}(x_{i}, t)]x_{i}(t) + \bar{B}_{Ti}[u_{i}(t) + \xi_{i}(x_{i}, t)] + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} [\bar{H}_{Tij} + \Xi_{ij}(x_{j}, t)]x_{j}(t)$$
(5.2)

 $+ \overline{F}_{Ti} \Delta \overline{P}_{TDi}(t)$

Trong đó $\Theta_{Ti}(x_i,t)$ là độ không đảm bảo tham số thay đổi theo thời gian trong ma trận trạng thái, $\Xi_{ij}(x_j,t)$ là độ không đảm bảo tham số thay đổi theo thời gian của ma trận liên kết và $\xi_i(x_i,t)$ là đầu vào nhiễu. Nếu chỉ đơn giản là độ bất định trong phương trình (5.2), chúng ta có thể nhận được:

$$L_{Ti}(x_i,t) = \Theta_{Ti}(x_i,t)x_i(t) + \overline{B}_{Ti}\xi_i(x_i,t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \Xi_{ij}(x_j,t)x_j(t) + \overline{F}_{Ti}\Delta\overline{P}_{TDi}(t)$$
(5.3)

Vì vậy, dạng không gian trạng thái của (5.3) có thể được viết lại thành

$$\dot{x}_{i}(t) = \bar{A}_{Ti} x_{i}(t) + \bar{B}_{Ti} u_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \bar{H}_{Tij} x_{j}(t) + \bar{L}_{Ti}(x_{i},t)$$
(5.4)

Trong đó $\overline{L}_{Ti}(x_i,t)$ đại diện cho độ không đảm bảo đo tổng hợp bao gồm các phần khớp và không khớp. Một giả định được đưa ra và xây dựng cùng với Bổ đề đã cho để xử lý độ không đảm bảo tổng hợp đối với LFC của MASHPS (5.4) như sau.

5.2. Thiết kế bề mặt trượt tích hợp kép mới

Một bề mặt trượt tích hợp kép mới đã được thiết kế như đã cho.

$$\sigma_{Ti}[x_i(t)] = P_{Ti}x_i(t) - \int_0^t P_{Ti}(\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_i(\tau)d\tau - \int_0^t \int_0^t P_{Ti}(\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_i(\tau)d\tau d\tau$$
(5.5)

Trong đó P_{Ti} là ma trận hằng số và Λ_{Ti} là ma trận thiết kế, ma trận P_{Ti} được chọn để đảm bảo rằng ma trận $P_{Ti} \overline{B}_{Ti}$ là ma trận không suy biến. Ma trận thiết kế $\Lambda_{Ti} \in \mathbb{R}^{m_i \times n_i}$ được chọn thỏa mãn tiêu chí bất đẳng thức PS (5.1).

$$\operatorname{Re}[\lambda_{\max}(\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})] < 0$$
(5.6)

Để xác định điều khiển tương đương, chúng tôi phân biệt $\sigma_{Ti}[x_i(t)]$ về mặt thời gian như sau:

$$\dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] = P_{Ti}[\overline{A}_{Ti}x_i(t) + \overline{B}_{Ti}u_i(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \overline{H}_{Tij}x_j(t) + \overline{L}_{Ti}(x_i,t)]$$

$$P_{Ti}(\overline{A}_{Ti}, \overline{B}_{Ti}, A_{Ti}) = \sum_{j=1}^{t} P_{Ti}(\overline{A}_{Ti}, \overline{B}_{Ti}, A_{Ti}) = \sum_{j=1}^{t} P_{Ti}(\overline{A}_{Ti}, \overline{A}_{Ti})$$
(5.7)

$$-P_{Ti}(\overline{A}_{Ti}-\overline{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_i(t)-\int_{0}^{t}P_{Ti}(\overline{A}_{Ti}-\overline{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_i(\tau)d\tau$$

Vì vậy, bằng cách đánh đồng $\sigma_{Ti}[x_i(t)] = \dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] = 0$. Sau đó, điều khiển tương được thể hiện bằng.

$$u_{i}^{eq}(t) = -(P_{Ti}\overline{B}_{Ti})^{-1}[P_{Ti}\overline{A}_{Ti}x_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}P_{Ti}\overline{H}_{Tij}x_{j}(t) + P_{Ti}\overline{L}_{Ti}(x_{i},t) - P_{Ti}(\overline{A}_{Ti} - B_{Ti}\Lambda_{Ti})x_{i}(t) - \int_{0}^{t}P_{Ti}(\overline{A}_{Ti} - \overline{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_{i}(\tau)d\tau]$$
(5.8)

Để đóng hệ thống vòng lặp, chúng tôi thay thế $u_i^{eq}(t)$ vào phương trình (5.4) để thu được PS trong chuyển động trượt như sau.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i}(t) &= (\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_{i}(t) + [I_{i} - \bar{B}_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}]\bar{L}_{Ti}(t) \\ &+ \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} [I_{i} - \bar{B}_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}]\bar{H}_{Tij}x_{j}(t) \end{aligned}$$
(5.9)
$$&+ \int_{0}^{t} \bar{B}_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}(\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_{i}(\tau)d\tau \\ &+ \tilde{\delta} \text{ tro cho mệnh đề trên} \\ &\bar{z}_{i}(t) = \int_{0}^{t} x_{i}(\tau)d\tau; \ \tilde{z}_{i}(t) = x_{i}(t) \end{aligned}$$
(5.10)
Chúng ta có
$$& \dot{\bar{z}}_{i}(t) = (\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{i})\tilde{z}_{i}(t) + [I_{i} - \bar{B}_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}]\bar{L}_{Ti}(t) \end{aligned}$$
(5.11)
và

(5.12)

$$\dot{\tilde{z}}_{i}(t) = (\overline{A}_{Ti} - \overline{B}_{Ti}\Lambda_{i})\tilde{z}_{i}(t) + [I_{i} - \overline{B}_{Ti}(P_{Ti}\overline{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}]\overline{L}_{Ti}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} [I_{i} - \overline{B}_{Ti}(P_{Ti}\overline{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}]\overline{H}_{Tij}\tilde{z}_{j}(t)$$

$$+ \overline{B}_{Ti} (P_{Ti} \overline{B}_{Ti})^{-1} P_{Ti} (\overline{A}_{Ti} - \overline{B}_{Ti} \Lambda_{Ti}) \overline{z}_i(t)$$

Công thức trước có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_{i}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ \bar{B}_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}(\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti}) & (\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti}) \end{bmatrix} \hat{z}_{i}(t) \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ [I_{i} - \bar{B}_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}] \end{bmatrix} \bar{L}_{Ti}(t) \\ &+ \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [I_{i} - B_{Ti}(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}] \bar{H}_{Tij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{z}_{j}(t) \\ \tilde{z}_{j}(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$
(5.13)

$$\dot{\hat{z}}_{i}(t) = \tilde{A}_{Ti}\hat{z}_{i}(t) + \tilde{F}_{Ti}\overline{L}_{Ti}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}\tilde{H}_{Tij}\hat{z}_{j}(t)$$
(5.14)

Trong đó
$$\hat{z}_{i}(t) = \begin{bmatrix} \overline{z}_{i}(t) \\ \tilde{z}_{i}(t) \end{bmatrix}, \quad \tilde{F}_{i} = \begin{bmatrix} 0 \\ [I_{i} - B_{i}(P_{i}B_{i})^{-1}P_{i}] \end{bmatrix},$$

 $\tilde{A}_{i} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \overline{B}_{Ti}(P_{Ti}\overline{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}(\overline{A}_{Ti} - \overline{B}_{Ti}\Lambda_{Ti}) & (\overline{A}_{Ti} - \overline{B}_{Ti}\Lambda_{Ti}) \end{bmatrix}, \quad \forall \tilde{a} \quad \tilde{H}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [I_{i} - \overline{B}_{Ti}(P_{Ti}\overline{B}_{Ti})^{-1}P_{Ti}]\overline{H}_{Tij} \end{bmatrix}$

Hệ thống điện (5.14) ở trên là ổn định, phụ thuộc vào giá trị riêng của ma trận hệ thống và việc lựa chọn cẩn thận độ lợi ma trận không đổi P_{Ti} và thiết kế ma trận đạt được Λ_{Ti} của đầu vào điều khiển tương đương được đề xuất. Hơn nữa, chúng tôi phân tích tính ổn định của PS bằng lý thuyết Lyapunov thông qua LMI. Để làm điều này, chúng ta phát biểu định lý như sau.

Định lý 5.1: Chuyển động trượt (5.14) ổn định tiệm cận khi và chỉ khi tồn tại các ma trận xác định dương đối xứng \mathbf{M}_i , i = 1, 2, ..., N, và vô hướng dương $\hat{\varepsilon}_i$, ε_i , δ_i và β_i và thu được các LMI sau đây.

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_{T_{i}}^{T} \mathbf{M}_{i} + \mathbf{M}_{i} \tilde{A}_{T_{i}} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \delta_{j}^{-1} \tilde{H}_{T_{ji}}^{T} \tilde{H}_{T_{ji}} & \mathbf{M}_{i} & \mathbf{M}_{i} \tilde{F}_{T_{i}} & \mathbf{M}_{i} \bar{F}_{T_{i}} \\ \mathbf{M}_{i} & -\hat{\varepsilon}_{i}^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \tilde{F}_{T_{i}}^{T} \mathbf{M}_{i} & \mathbf{0} & -\varepsilon_{i} & \mathbf{0} \\ \tilde{F}_{T_{i}}^{T} \mathbf{M}_{i} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\beta_{i} \end{bmatrix} < 0$$
(5.15)



Hình 5.2. Sơ đồ đơn giản của mặt trượt tích phân truyền thống.

Nhận xét 5.1: Sơ đồ khối của các kỹ thuật điều khiển nói trên được thể hiện trong Hình 5.2 và Hình 5.3 để làm nổi bật sự khác biệt và cải tiến của các phương pháp điều khiển, trong đó bao gồm SMC tích phân cổ điển. Trong điều kiện không chắc chắn phù hợp, SMC dựa trên bề mặt tích phân kép bậc nhất có thể được sử dụng để điều tra LFC của PS trong (R. Pradhan, B. Subudhi, 2015). Tuy nhiên, trong mạng lưới điện thực tế, độ không đảm bảo tham số không phải lúc nào cũng đáp ứng được điều kiện phù hợp. Do đó, cần có một số hạn chế lớn nhất định để xây dựng SMC bậc nhất nhằm khắc phục những điểm không chắc chắn, điều này có thể đảm bảo sự hội tụ tần số danh nghĩa và độ ốn định của hệ thống, nhưng quỹ đạo của hệ thống không thể đạt đến điểm gốc. Kết quả là, phương pháp tiếp cận bề mặt trượt kép bậc hai được trình bày để đẩy quỹ đạo của hệ thống đến một điểm tương tự và cải thiện hiệu suất nhất thời.



Hình 5.3. Sơ đồ đơn giản của mặt trượt tích phân kép.

5.3. Luật điều khiển liên tục phi tập trung

Trong phân đoạn này, luật SMC bậc hai phi tập trung được đề xuất cho LFC của PS (5.9). Việc xây dựng được thực hiện đơn giản bằng cách thực hiện $\sigma_{Ti}[x_i(t)]$ và $\dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)]$ bằng 0 (tức là được gọi là đa tạp trượt) để độ ổn định của PS được cải thiện.

Nói cách khác, đa tạp trượt được xác định và thiết lập $\Theta_{Ti}[\hat{z}_i(t)]$ khi

$$\Theta_{Ti}(t) = \dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] + \gamma_i \sigma_{Ti}[x_i(t)]$$
(5.16)

và
$$\dot{\Theta}_{Ti}(t) = \ddot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)] + \gamma_i \dot{\sigma}_{Ti}[x_i(t)]$$
 (5.17)

trong đó $\gamma_i > 0$ là hằng số dương. Theo công thức (5.4), phương trình (5.33) có thể được viết lại thành

$$\dot{\Theta}_{Ti}(t) = P_{Ti}[\bar{A}_{Ti}\dot{x}_{i}(t) + \bar{B}_{Ti}\dot{u}_{i}(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \bar{H}_{Tij}\dot{x}_{j}(t) + \dot{\bar{L}}_{Ti}(x_{i},t)] - P_{Ti}(\bar{A}_{Ti} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})\dot{x}_{i}(t) - P_{Ti}(\bar{A}_{i} - \bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti})x_{i}(t) + \gamma_{i}\dot{\sigma}_{Ti}[x_{i}(t)]$$
(5.18)

Ngõ vào điều khiển của bộ điều khiển trượt phi tập trung được đề xuất sẽ được đưa ra là

$$\begin{split} \dot{u}_{i}(t) &= -(P_{Ti}\bar{B}_{Ti})^{-1}\{\|P_{Ti}\|\|\bar{A}_{Ti}\|\|\dot{x}_{i}(t)\| + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \|P_{Tj}\|\|\bar{H}_{Tji}\|\|\dot{x}_{i}(t)\| \\ &+ \|P_{Ti}\|\|(\bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti} - \bar{A}_{Ti})\|\|\dot{x}_{i}(t)\| + \|P_{Ti}\|\|(\bar{B}_{Ti}\Lambda_{Ti} - \bar{A}_{Ti})\|\|x_{i}(t)\| \\ &+ \gamma_{i}\|\dot{\sigma}_{Ti}[x_{i}(t)]\| + \|P_{Ti}\|\bar{\gamma}_{i} + \upsilon_{i}\}\frac{\Theta_{Ti}^{T}(t)}{\|\Theta_{Ti}(t)\|} \end{split}$$
(5.19)

Để đáp ứng đầu vào điều khiển (5.19) được đề xuất ở trên, các quỹ đạo biến của hệ thống phải được dẫn động cưỡng bức đến đa dạng trượt (SM) và duy trì ở đó tại thời điểm đạt hữu hạn để đảm bảo độ ổn định tiệm cận (5.9) của PS. Vì vậy, chúng tôi lại phân tích tính ổn định của hệ thống theo định lý đã cho.

5.4. Nghiên cứu trường hợp và kết quả mô phỏng.

Trong phần này, SMC bậc hai được đề xuất thông qua bề mặt trượt tích phân kép được áp dụng tương ứng cho LFC của TASHPS. Hiệu suất của bộ điều khiển đề xuất được xác thực khi các kết quả mô phỏng khác nhau được so sánh với các phương pháp gần đây, được thảo luận ngắn gọn trong các mô phỏng khác nhau trong các điều kiện khác nhau như sau.

5.4.1. Mô phỏng 1

Trường hợp 1: SMC đề xuất được thử nghiệm trong TASHPS với việc chọn các tham số hệ thống và nhiễu theo bước tương tự như trong (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020). Figures 5.4 (a) and 5.4 (b) give the control area 1 and 2 frequency variations. Hình 5.4 (a) và 5.4 (b) đưa ra các biến thể tần số của vùng điều khiển 1 và 2. Công suất liên kết TASHPS được hiển thị trong Hình 5.5. Từ việc phân tích cả hai kết quả, cả hai tần số đều không vượt quá điểm cho phép là -0,5Hz. Do đó, ngụ ý rằng SMC được đề xuất vượt trội hơn so với phương pháp PID mờ dựa trên GWO về hiệu suất điều khiển.



Hình 5.4. Tần số [Hz] (a) và (b) của vùng điều khiển 1 và 2 trong điều kiện nhiễu.



Hình 5.5. Độ lệch công suất đường dây [p.u.MW] với nhiễu.

Nhận xét 5.2: Đáng chú ý, như có thể thấy ở (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020), bộ điều khiển mới có khả năng phục hồi tốt hơn trước các nhiễu loạn tải và phản hồi nhanh hơn.

Trường hợp 2: Vì điều này, chúng tôi xem xét sự thay đổi về nhu cầu tải từ các tòa nhà kinh doanh thương mại ở một thành phố đô thị. Nhu cầu tải của các tòa nhà thương mại từ CA 1 và 2 của TASHPS được đưa ra trong (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020). Đường cầu được vẽ và thể hiện trong Hình 5.6. Khi nhu cầu thay đổi, như được thấy từ đường cong tải, phản ứng động của TASHPS cũng thay đổi. Hình 5.7 (c) hiển thị sự thay đổi tần số của cả khu vực điều khiển 1 và khu vực 2 trong khi Hình 5.7 (d) minh họa độ lệch công suất đường dây TASHPS.



Figure 5.6. Sự biến động tải thực tế theo nhu cầu của nhà máy, hộ dân.

Từ hình 5.6, động lực TASHPS được cải thiện về thời gian xử lý và thời gian xử lý dưới/vượt mức rất ít, không vượt quá điểm có thể chấp nhận được đưa ra trong (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020). Điều này càng làm cho phương pháp đề xuất có khả năng xử lý LFC của PS lớn để giữ cho PS ổn định và đáng tin cậy.



Hình 5.7. Độ lệch tần số vùng điều khiển 1 và vùng điều khiển 2 (c) và độ lệch công suất đường dây nối TASHPS (d).

Nhận xét 5.3: Vấn đề chattering SMC đặc biệt có hại cho bộ truyền động PS. Bộ điều khiển được đề xuất tạo ra tín hiệu chính xác và sử dụng năng lượng để bù đắp cho việc giảm tần số trong bộ điều khiển chính, bao gồm bộ điều chỉnh. Do đó, việc điều khiển tốc độ giảm xuống của bộ điều tốc sẽ kích hoạt chính xác van, cung cấp hơi cần thiết cho tuabin để tăng công suất quán tính cơ học nhằm phù hợp với yêu cầu hoặc sự thay đổi tải. Kết quả là thời gian thiết lập ngắn và độ vọt lố là không đáng kể.

5.4.2. Mô phỏng 2:

Trường hợp 1: Trong kịch bản này, một PS lớn hơn và thực tế hơn, PS 39bus 10 máy phát điện của New England, được sử dụng để đánh giá thêm hiệu suất của sơ đồ LFC được đề xuất. Hệ thống thử nghiệm ở New England bao gồm 10 máy phát điện, 39 thanh cái, 19 tải, 34 đường dây truyền tải và 12 máy biến áp. Hình 5.8 mô tả sơ đồ một dòng của hệ thống thử nghiệm được lấy từ (K. Liao, Y.A. Xu, 2017).



Hình 5.8. Sơ đồ khối hệ thống điện New England 39 bus

Khi nhu cầu tải trong PS thực dao động, chúng tôi sử dụng dao động tải ngẫu nhiên tại mỗi vị trí, như trong Hình 5.9. Hình 5.10 (e) mô tả sự dao động tần số của các khu vực 1, 2 và 3 tương ứng, trong khi Hình 5.10 (f) mô tả độ lệch công suất.



Hình 5.9. Thay đổi tải ngẫu nhiên





Nhận xét 5.4. Tóm lại, kỹ thuật mới được đề xuất mang lại hiệu suất điều khiển cao hơn về mặt duy trì công suất và tần số liên kết tại điểm được phê duyệt cho PS nơi khó có thể định lượng các biến trạng thái hệ thống. Cách tiếp cận được đề xuất có tác dụng vô cùng mạnh mẽ, không chỉ làm giảm sự ồn ào mà còn đảm bảo khả năng phục hồi của MAPS.

Trường hợp 2: Đặc biệt, do tính phi tuyến tính của nó, GRC có tác động bất lợi đến hiệu suất PN với nhiễu loạn tải theo bước tương tự và các tham số hệ thống

như trong (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020). Trong hình 5.11 (K. Liao and Y. Xu, 2018) mô tả mô hình bộ điều tốc phi tuyến với GDB và mô hình tuabin phi tuyến với GRC được áp dụng trong TASHSP.



Hình 5.11. Mô hình bộ điều tốc phi tuyến với dải chết GRB và mô hình tuabin phi tuyến với GRC

Hình 5.12 (g) và 5.12 (h) hiển thị sự thay đổi tần số và công suất đường dây. Có thể thấy, với các bộ điều khiển SOSDISS được đề xuất, các dao động nhất thời được xác định trong thời gian dài hơn và có biên độ lớn hơn trong Trường hợp 1 trong Mô phỏng 1. Ngược lại với (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha , M.M. Thakreem, 2020) và Mô phỏng 1 với Trường hợp 1, phương pháp điều khiển đề xuất được cho là phù hợp ngay cả khi có sự nhiễu loạn của GRC, GDB và tải trọng bậc thang. Trong hiệu suất nhất thời của bộ điều khiển SOSDISS được đề xuất, % vượt mức và thời gian xử lý giảm đáng kể dưới tác động của GDB và GRC.



Hình 5.12. Đáp ứng tần số và đáp ứng động của nguồn điện liên kết của hai khu vực có GRC và GRB.

Nhận xét 5.5: Kết quả mô phỏng được sử dụng để so sánh Mô phỏng 1 với Trường hợp 1 xem xét hoặc không xem xét các tác động phi tuyến tính của GDB và GRC trong (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020) để chứng minh tính vững chắc của SOSDISS được đề xuất. Ngược lại với các nghiên cứu trước đây, bộ điều khiển SOSDISS được đề xuất, do đó, các biến động tần số nhỏ theo kế hoạch của SOSDISS ít ảnh hưởng hơn đến công suất dự trữ của nhà máy và thị trường điện.

Trường hợp 3: Do độ không đảm bảo tham số tương tự của ba vùng MAPS được sử dụng trong Trường hợp 1 của Mô phỏng 1, nên điểm vận hành danh nghĩa được sử dụng để kiểm tra tính hữu ích và khả năng phục hồi của bộ điều khiển được

đề xuất đối với nhiễu tải. Hình 5.13 (a) và 5.13 (b) cho thấy sự giảm nhanh của công suất đường dây và nhiễu tần số.



Hình 5.13. Các phản ứng động của sự thay đổi tần số và sức mạnh ràng buộc nằm trong ba lĩnh vực.

Hình 5.21. Do đó, bộ điều khiển SOSDISS được đề xuất sẽ được áp dụng cho PS đa vùng ba vùng, đa nguồn. Nó cũng cho thấy SOSDISS có thể ổn định hệ thống khi kết hợp với hệ thống lớn. Khi so sánh các kết quả mô phỏng, bề mặt chuyển mạch trượt kép được đề xuất và SOSDISS theo kế hoạch có thể loại bỏ tình trạng quá tải, cải thiện tốc độ phản ứng và hạn chế sự biến đổi tần số về 0.

5.4.3. Mô phỏng 3:

LFC được đề xuất dựa trên SOSDISS đã được kiểm tra với các tác động khác nhau của nhiễu loạn tải theo bước trên MAPS với các điều kiện tham số danh nghĩa trong (J. Srilekha, C.N. Kalyan, G. Stanley, K. Suneetha, M.M. Thakreem, 2020) và độ trễ thời gian trong (Y. Mi, X. Hao, Y. Liu, Y. Fu, C. Wang, P. Wang và P.C. Loh, 2017). PS được tái cấu trúc ba vùng trong Hình 5.14 có độ trễ thời gian truyền.

Nhận xét 5.6. Kết quả mô phỏng thử nghiệm được trình bày trong phần này trên các Hình 5.15 (k) đến 5.15 (l). Đặc biệt khi xem xét giao tiếp có độ trễ thời gian cho PN quy mô lớn, báo cáo kết quả có thể chứng minh sự so sánh hiệu quả. Do đó, hiệu suất hệ thống của SOSDISS được đề xuất rất cân bằng và biến thiên tần số là 0 sau 1 giây.



Hình 5.14. Hệ thống được tái cấu trúc ba khu vực với độ trễ thời gian truyền.



Hình 5.15. Độ lệch tần số và độ lệch đường nối với độ trễ thời gian tại $\tau = 5s$

5.5. Kết luận của chương 5

Tóm lại, một nghiên cứu LFC dựa trên phương pháp LFC đề xuất được phát triển với SOSDISS. Mặt khác, SOSDISS phi tập trung được cung cấp với các ma trận được lựa chọn cẩn thận để cải thiện độ ổn định tiệm cận PS và giảm hiện tượng nhiễu vốn có trong SMC bậc nhất. LMI mới dựa trên lý thuyết Lyapunov, trong đó đạo hàm của hàm Lyapunov nhỏ hơn 0, được sử dụng để kiểm tra tính ổn định tiệm cận của PS. Để kiểm tra PS quy mô lớn, SMC bậc hai được đề xuất dường như có khả năng xử lý LFC của PS, làm cho nó phù hợp với việc điều chỉnh tần số MASHPS và độ tin cậy của PS. Không có giả định nào về sự phân bố động/băng thông của mạng truyền thông với tình trạng mất gói hoặc các hạn chế của các nhà máy được kiểm soát để đánh giá hiệu suất của SMC đối với nhiễu loạn với các thông số kỹ thuật miền tần số của hệ thống điều khiển được nối mạng. Trong tương lai, chúng tôi sẽ tập trung vào các SMC mới để xử lý các nhiễu loạn khác nhau với các yêu cầu về miền tần số để đánh giá hiệu suất của PS được nối mạng hoặc sẽ xem xét động lực của mạng truyền thông có tính đến tác động của việc mất gói.

CHƯƠNG 6: KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ CHO CÔNG VIỆC TƯƠNG LAI

6.1. Kết luận

Nhiều chiến lược kiểm soát tần số thứ cấp đã được phát triển dựa trên các lý thuyết khác nhau để đảm bảo duy trì tần số trong giới hạn chấp nhận được trong hai hệ thống thử nghiệm riêng biệt. Để theo đuổi hiệu suất năng động cao nhất, nhiều sơ đồ SMC cải tiến khác nhau đã được sử dụng để tối ưu hóa. Chúng bao gồm điều khiển chế độ trượt tích phân bậc hai (SOISMC), bộ quan sát trạng thái dựa trên điều khiển chế độ trượt một pha (SPSMCBSO) và phương pháp trượt bậc hai sử dụng bề mặt trượt tích phân kép (SOSDISS).

6.2. Kiến nghị cho công việc tương lai

Nghiên cứu này có thể được mở rộng trong các lĩnh vực sau trong công việc trong tương lai:

1. Trong nghiên cứu hiện tại của chúng tôi, chúng tôi hoạt động với giả định rằng các khu vực kiểm soát PS bao gồm sự kết hợp đa dạng của các nguồn phát điện, bao gồm các nguồn nhiệt, thủy điện và khí đốt trong mỗi khu vực. Trong các nghiên cứu trong tương lai, quan điểm mở rộng này có thể bao gồm việc tích hợp các nguồn đa dạng như khí đốt, gió, dầu diesel, hạt nhân, hệ thống lưu trữ năng lượng và các thành phần khác trong từng khu vực điều khiển của PS đa nguồn đa khu vực, môi trường PS được tái cấu trúc.

2. Với phản ứng nhanh chóng do SMC đề xuất mang lại, cần thận trọng tiến hành các cuộc điều tra sâu hơn để đánh giá tính ổn định của hệ thống trong các điều kiện vận hành khác nhau. Người ta đã chứng minh rõ ràng rằng phản ứng cực nhanh có nguy cơ gây ra dao động hệ thống, khiến đây trở thành một khía cạnh quan trọng cần kiểm tra.

3. Kiểm tra các thuật toán AI thay thế như Tiến hóa vi phân, Thuật toán ong và Tìm kiếm Cuckoo để tinh chỉnh các bộ điều khiển SMC được đề xuất và đánh giá tiềm năng của chúng nhằm nâng cao hiệu suất động của các bộ điều khiển này là một hướng nghiên cứu tiếp theo có giá trị.

4. Tiếp tục nghiên cứu phát triển bộ điều khiển mờ và bộ điều khiển SMC kết hợp, với việc tối ưu hóa các hàm thành viên thông qua các kỹ thuật tiên tiến, có tiềm năng cải thiện đáng kể hiệu suất tổng thể của bộ điều khiển logic mờ mới.

5. Đáp ứng tần số phía cầu thể hiện một cách tiếp cận hiệu quả khác đảm bảo điều tra sâu hơn về việc kiểm soát tần số trong PS. Do đó, việc nghiên cứu sâu hơn về chủ đề này và đưa ra các giải pháp mới mang lại một hướng đi đầy hứa hẹn cho nghiên cứu điều khiển tần số. Những phương pháp này có khả năng có thể được mở rộng sang các nghiên cứu LFC về lưới điện vi mô, với việc đưa vào các thiết bị lưu trữ năng lượng khác nhau để tăng cường khả năng kiểm soát và độ ổn định.

REFERENCES

Momoh, J. A. (2017). *Electric power system applications of optimization*. CRC press.

A. J. Wood and Bruce F. Wollenberg Gerald B. Sheblé. (2014). *Power Generation, Operation, and Control.* New Jersey: Wiley.

A.T. Tran, B.L.N Minh, V.V. Huynh, P.T. Tran, E.N. Amaefule, V.D. Phan, T.M Nguyen, (2021). Load frequency regulator in interconnected power system using second order sliding mode control combined with state estimator. *Energies*, 863.

Asghar, R., Riganti Fulginei, F., Wadood, H., & Saeed, S. (2023). A review of load frequency control schemes deployed for wind-integrated power systems. *Sustainability*, 8380.

B. Le Ngoc Minh, V. V. Huynh, T. M. Nguyen, and Y. W. Tsai, (2018). Decentralized adaptive double integral sliding mode controller for multi-area power systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 11.

B. M. Weedy, B. J. Cory, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, and G. Strbac, (2015). Electric Power Systems, Fifth Edition. *West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.*

Bevrani, H. (2014). *Robust Power System Frequency Control*. Cham: Springer International Publishing.

Boyd, S.; Ghaoui, E.L.; Feron, E.; Balakrishna, V. (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, Pennsylvania, USA: SIAM.

Casavola, A., Franzè, G., & Tedesco, F. (2023). Centralized supervision and coordination of load/frequency control problems in networked multi-area power systems. *In Electric Transportation Systems in Smart Power Grids*, 375-423.

D. Guha, P.K. Roy, S. Banerjee, (2020). Quasi-oppositional JAYA optimized 2-degree-of-freedom PID controller for load-frequency control of interconnected power systems. *International Journal of Modelling and Simulation*, 1–23.

Devendra, K. (2008). *Techniques and Its Applications in Electrical Engineering*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

Edris, A. A., & D'Andrade, B. W. (2017). *Transmission grid smart* technologies. In The power grid. Academic Press.

F.Guo, (2020). Application of a novel adaptive sliding mode control method to load frequency control". *European Journal of Control*, 172-178.

Guo, J. (2019). Application of full order sliding mode control based on different areas power system with load frequency control. *ISA transactions*, 23-34.

Gupta, D. K., Jha, A. V., Appasani, B., Srinivasulu, A., Bizon, N., & Thounthong, P. (2021). Load frequency control using hybrid intelligent optimization technique for multi-source power systems. *Energies*, 1581.

H. Bevrani, (2014). Robust power system frequency control. Springer.

H. Bevrani, H. Golpîra, A. R. Messina, N. Hatziargyriou, F. Milano. (2021). Power system frequency control: An updated review of current solutions and new challenges. *Electric Power Systems Research*, 194.

H. Yousef. (2015). Adaptive fuzzy logic load frequency control of multiarea power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 384–

395.

Huynh, V. V., Minh, B. L. N., Amaefule, E. N., Tran, A. T., Tran, P. T., Phan, V. D., & Nguyen, T. M. (2021). Load Frequency Control for Multi-Area Power Plants with Integrated Wind Resources. *Applied Sciences*, 3051.

Ismayil, C., Sreerama, K. R., & Sindhu, T. K. (2014). Automatic generation control of single area thermal power system with fractional order PID (PI λ Dµ) controllers. *IFAC proceedings volumes*, 552-557.

J. Guo. (2021). Application of a novel adaptive sliding mode control method to the load frequency control. *European Journal of Control*, 172-178.

Le, N. M. B.; Van, V. H.; Nguyen, T. M.; Tsai, Y. W. (2018). Decentralized adaptive double integral sliding mode controller for multi-area power systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 1–11.

M. Vijay, C. James, A. Paul, A. Fouad, (2019). *Power system control and stability*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press.

Mi, Y.; Fu, Y.; Li, D.; Wang, C.; Loh, P.C.; Wang, P. (2016). The sliding mode load frequency control for hybrid power system based on disturbance observer. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 446–452.

Prabha S. Kundur, O. M. (2022). *Power System Stability and Control, Second Edition*. McGraw Hill; 2nd edition.

S. Prasad, S. Purwar, and N. Kishor, (2019). Load frequency regulation using observer-based nonlinear sliding mode control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 178-193.

Sahu, R. Kumar, P. Sidhartha, Rout, U. Kumar, Sahoo, D. Kumar. (2016). Teaching learning-based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller. *International Journal of Electrical Power* & Energy Systems, 287-301.

V.V. Huynh, B.L.N Minh, B.L.N, E.N. Amaefule, A.T. Tran, P.T. Tran, V.D. Phan, V.T. Pham, T.M. Nguyen. (2021). Load frequency control for multi-area power plants with integrated wind resources. *Applied Sciences*, 7.

V.V. Huynh, P.T. Tran, B.L.N. Minh, Tran, A.T. Tran, T.M. Nguyen, P.T. Vu, (2020). New second-order sliding mode control design for load frequency control of a power system. *Energies*, 24.

Vijay, V.; James, C; Paul, A; Fouad, A. (2019). *Power system control and stability*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press.

VV, Huynh, BNL Minh, EN Amaefule, A.T. Tran, T.P. Tran, (2021). Highly robust observer sliding mode-based frequency control for multi-area power systems with renewable power plants. *Electronics*, 274.

Y. Mi, F. Yang, D. Li, C. Wang, L.P. Chiang, W. Peng. (2016). The sliding mode load frequency control for hybrid power system based on disturbance observer. *Electrical Power and Energy Systems*, 446-452.

Y. Mi, X. Hao, Y. Liu, Y. Fu, C. Wang, P. Wang and P.C. Loh, (2017). Sliding mode load frequency control for multi-area time-delay power system with wind power integration. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4644–4653.