

ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG TRUYỀN TẢI HVDC DƯỚI SỰ CỐ ĐIỆN ÁP LƯỚI MẤT CÂN BẰNG

Nguyễn Xuân Phương, Cao Văn Thọ
Trường Cao đẳng nghề Cần Thơ

Tóm tắt: Cùng với sự phát triển của ngành công nghiệp năng lượng, các linh kiện bán dẫn chịu được điện áp cao và dòng điện cao cũng ra đời, các thiết bị điều khiển cũng đang phát triển mạnh mẽ. Người ta bắt đầu nghiên cứu phương pháp truyền tải điện cao áp một chiều (HVDC) thay cho phương pháp truyền tải xoay chiều truyền thống. Trong quá trình truyền tải, vì lý do nào đó, có thể xảy ra các sự cố ngắn mạch làm mất cân bằng hệ thống điện. Vì vậy, việc nghiên cứu ứng dụng các bộ điều khiển để xử lý sự cố ngắn mạch trong truyền tải điện để đảm bảo hệ thống vận hành an toàn, ổn định là rất cần thiết. Bài viết xây dựng phương pháp bảo vệ hệ thống HVDC dưới sự cố điện áp lưới mất cân bằng dựa vào nghiên cứu lý thuyết sử dụng các bộ điều khiển PI và kiểm chứng bằng phần mềm mô phỏng PSCAD/EMTDC. Kết quả mô phỏng đã chứng minh được khả năng đáp ứng tốt của bộ điều khiển PI trong trạng thái làm việc thông thường cũng như trong quá trình xảy ra sự cố ngắn mạch, đảm bảo hệ thống điện vận hành an toàn, ổn định.

Từ khóa: HVDC, VSC, bộ điều khiển PI

CONTROL OF HVDC TRANSMISSION SYSTEM UNDER UNBALANCED GRID VOLTAGE FAULTS

Abstract: Along with the development of the power industry, semiconductor devices that can resisting high voltage and high current are also born. Concurrent, control devices are also developing strongly. They started to study about transmission method of high voltage direct current (HVDC) intended for replacement of the traditional AC transmission method. During transmission, for some reason, short-circuits may occur that unbalance the power system. Therefore, it is necessary to study and apply controllers to handle short-circuit problems in power transmission to ensure safe and stable operation of the system. The paper is to make a method to protect HVDC system for unbalanced grid voltage incident based on theoretical research using PI controller and verified by PSCAD/EMTDC simulation software. Simulation results have proved the good response ability of PI controller in normal working state as well as during short circuit incidents, ensuring electrical system can operate safe and stability.

Keywords: HVDC, VSC, PI controller

Nhận bài: 13/10/2025

Phản biện: 13/11/2025

Duyệt đăng: 16/11/2025

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh nhu cầu điện năng ngày càng tăng, yêu cầu truyền tải công suất lớn trên khoảng cách xa và liên kết linh hoạt giữa các hệ thống điện khu vực đang đặt ra nhiều thách thức đối với phương thức truyền tải xoay chiều truyền thống. Hệ thống truyền tải điện một chiều điện áp cao (HVDC) với các ưu điểm như tổn thất thấp, khả năng điều khiển công suất tốt, cải thiện ổn định hệ thống và thuận lợi trong đấu nối nguồn năng lượng tái tạo ngoài khơi, đang trở thành một xu hướng tất yếu trong phát triển lưới điện hiện đại. Cùng với sự tiến bộ của linh kiện bán dẫn công suất (Thyristor, GTO, IGBT...) và kỹ thuật biến đổi nguồn áp VSC, các cấu hình HVDC ngày càng có tính khả thi cao trong thực tiễn thiết kế và vận hành.

Tuy nhiên, trong quá trình truyền tải, hệ thống HVDC vẫn chịu tác động của nhiều dạng sự cố trên lưới xoay chiều, đặc biệt là các sự cố ngắn mạch gây mất cân bằng điện áp lưới. Khi xảy ra mất cân bằng pha, dòng điện, điện áp và công suất đều biến đổi đột ngột, đe dọa đến tính liên tục cung cấp điện và ổn định của hệ thống. Vì vậy,

bài toán xây dựng chiến lược điều khiển và bảo vệ phù hợp cho hệ thống HVDC sử dụng VSC dưới các điều kiện sự cố là hết sức cấp thiết, nhằm khai thác hết ưu điểm của công nghệ truyền tải một chiều mà vẫn bảo đảm an toàn, tin cậy.

Trên cơ sở đó, bài báo tập trung nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển PI cho phía chỉnh lưu của hệ thống HVDC sử dụng bộ biến đổi nguồn áp, mô hình hóa trên phần mềm PSCAD/EMTDC để đánh giá đáp ứng của hệ thống trong chế độ vận hành bình thường và dưới sự cố ngắn mạch gây mất cân bằng điện áp lưới. Kết quả mô phỏng cho phép kiểm chứng khả năng duy trì ổn định điện áp, dòng điện và công suất, đồng thời là cơ sở khoa học cho việc đề xuất, hoàn thiện các giải pháp điều khiển – bảo vệ hệ thống HVDC trong thực tiễn.

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Hệ thống truyền tải HVDC

2.1.1. Giới thiệu hệ thống HVDC

Hệ thống truyền tải điện một chiều điện áp cao (HVDC - High Voltage Direct Current) là một phương pháp truyền tải điện năng với công suất

lớn với khoảng cách xa. Kỹ thuật truyền tải một chiều này bắt đầu được phát triển mạnh từ thập niên ba mươi thế kỷ trước. Trước thập niên 70 các van hồ quang thủy ngân được sử dụng rộng rãi trong việc thiết kế các hệ thống truyền tải một chiều, sau đó các hệ thống truyền tải một chiều chỉ còn sử dụng các thiết bị bán dẫn trạng thái rắn (Solid – State Semiconductor Device). Cùng với sự phát triển của các van điện tử công suất có điều khiển (Thyristor, GTO, IGBT...) đã khiến cho công nghệ truyền tải điện một chiều trở nên có tính khả thi cao. Đến nay trên thế giới, nhiều nước đã và đang áp dụng hệ thống truyền tải điện một chiều, dưới đây là một số ví dụ được nhiều người biết tới:

- Ở Itaipu, Brazil, hệ thống HVDC được lựa chọn để cung cấp công suất tần số 50 Hz vào hệ thống 60 Hz, và để truyền tải một lượng công suất lên tới 12.600 MW của nhà máy thủy điện qua khoảng cách 800 km.

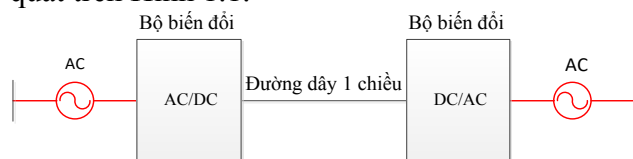
- Ở Leyte - Luzon, Philippine, hệ thống truyền tải HVDC được sử dụng để truyền tải điện năng giữa các đảo và nâng cao độ tin cậy cho lưới điện Manila.

- Ở Rihand – Delhi, Ấn Độ, hệ thống truyền tải HVDC được lựa chọn để truyền tải lượng công suất 1.500 MW tới New Delhi để đảm bảo mục tiêu tổn thất và hành lang tuyến nhỏ nhất và độ tin cậy và khả năng điều khiển tốt hơn.

2.1.2. Các phần tử hệ thống HVDC

Hệ thống truyền tải HVDC gồm có 2 trạm chuyển đổi chính. Trạm chuyển đổi phía đầu gửi là bộ chỉnh lưu, có nhiệm vụ chuyển đổi từ điện xoay chiều trở thành điện một chiều. Bộ chuyển đổi phía đầu nhận là bộ nghịch lưu, có nhiệm vụ chuyển đổi từ điện một chiều trở thành điện xoay chiều. Bộ biến đổi sử dụng các khóa bán dẫn để điều khiển dòng điện và điện áp, từ đó điều khiển được công suất. Các khóa bán dẫn phải có công suất lớn, chịu được điện áp cao và dòng điện cao. Hệ thống HVDC thông thường được thiết kế sao cho hai trạm này có thể chuyển đổi vai trò với nhau, thông qua đó có thể thay đổi hướng truyền của công suất.

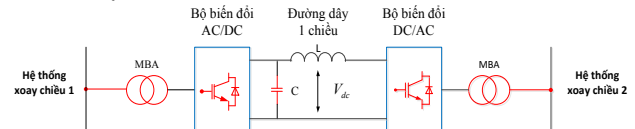
Hệ thống HVDC điển hình được thể hiện khái quát trên Hình 1.1.



Hình 1.1 Sơ đồ khối đơn giản hệ thống HVDC

Bộ biến đổi nguồn áp

Hệ thống HVDC sử dụng bộ chuyển đổi nguồn áp (VSC) là một kỹ thuật mới cho kỹ thuật truyền tải HVDC, VSC sử dụng các khóa bán dẫn với khả năng đóng cắt, khóa bán dẫn chủ yếu là các IGBT [5- 7]. Cấu hình hệ thống HVDC sử dụng VSC được biểu diễn ở Hình 1.2.



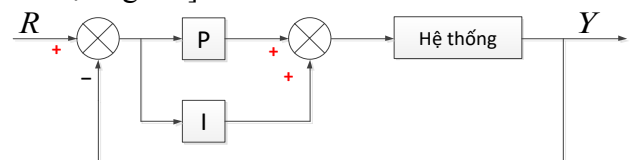
Hình 1.2. Cấu hình hệ thống HVDC

sử dụng bộ biến đổi nguồn áp (VSC)

Dù đây là kỹ thuật khá mới trong ứng dụng truyền tải HVDC nhưng VSC đã được áp dụng cho các lĩnh vực công nghiệp từ rất lâu. Kể từ lần đầu tiên sử dụng bộ chuyển đổi này cho hệ thống HVDC vào năm 1997, VSC vẫn đang phát triển một cách ổn định về khả năng chịu điện áp cũng như khả năng truyền tải công suất.

Bộ điều khiển tỷ lệ- tích phân PI

Bộ điều khiển tỷ lệ- tích phân PI (Proportional Integral controller) là một vòng điều khiển phản hồi tính toán một tín hiệu bằng cách so sánh tín hiệu đầu vào với tín hiệu đầu ra được chuyển đổi và được phản hồi về. Dựa vào kết quả so sánh mà bộ điều khiển PI tự điều chỉnh thông số để được tín hiệu ngõ ra].

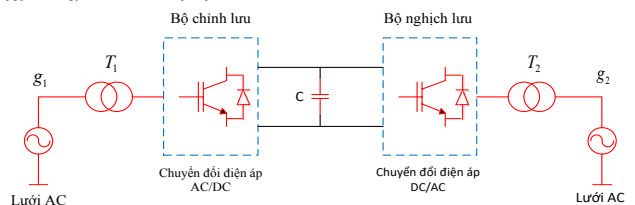


Hình 1.3. Sơ đồ khối bộ điều khiển PI

2.2. Thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống

Truyền tải cao áp một chiều

Cấu hình hệ thống truyền tải HVDC được mô tả như Hình 2.1.



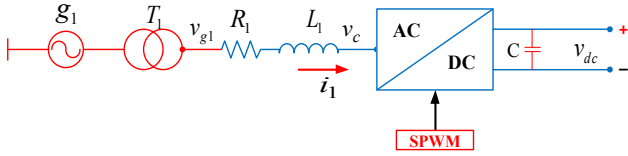
Hình 2.1. Cấu hình hệ thống truyền tải HVDC

Cấu hình của hệ thống truyền tải điện cao áp một chiều gồm có hai bộ phận chính được phân thành chỉnh lưu và phía nghịch lưu. Việc thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống vận hành ở trạng thái bình thường được phân thành việc điều khiển từ 2 phía chỉnh lưu và nghịch lưu. Tuy nhiên, bài viết này chỉ nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển phía

chỉnh lưu của hệ thống HVDC

2.2.1. Bộ điều khiển phía chỉnh lưu

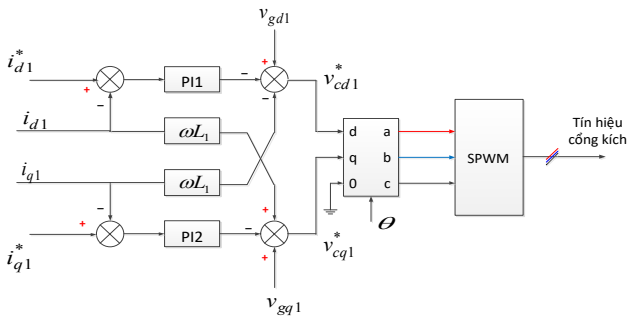
Giả sử công suất được truyền từ nguồn g1 đến nguồn g2, việc thay đổi chiều công suất thì chỉ cần thay đổi tín hiệu công suất tham chiếu. Bộ chuyển đổi phía nguồn g1 sẽ làm nhiệm vụ là bộ chỉnh lưu.



Hình 2.2. Sơ đồ khối bộ chỉnh lưu của hệ thống HVDC

2.2.2. Bộ điều khiển dòng điện phía chỉnh lưu

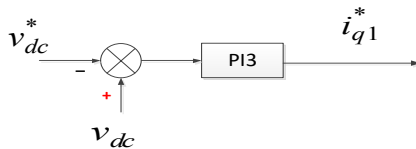
Dựa vào các kiến thức liên quan, xây dựng được sơ đồ khối bộ điều khiển dòng điện phía chỉnh lưu như Hình 2.3.



Hình 2.3. Sơ đồ khối bộ điều khiển dòng điện phía chỉnh lưu

2.2.3. Bộ điều khiển điện áp DC

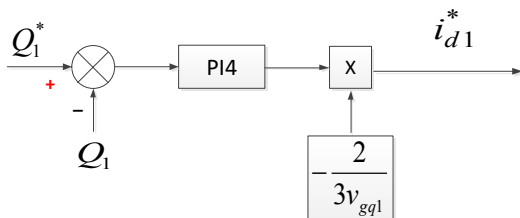
Sơ đồ khối bộ điều khiển điện áp DC như Hình 2.4.



Hình 2.4. Sơ đồ khối bộ điều khiển điện áp DC

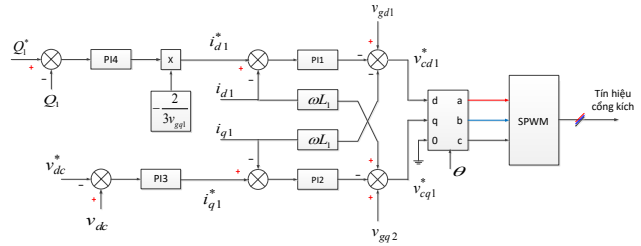
2.2.4. Bộ điều khiển công suất phía chỉnh lưu

Sơ đồ khối bộ điều khiển công suất phản kháng Hình 2.5.



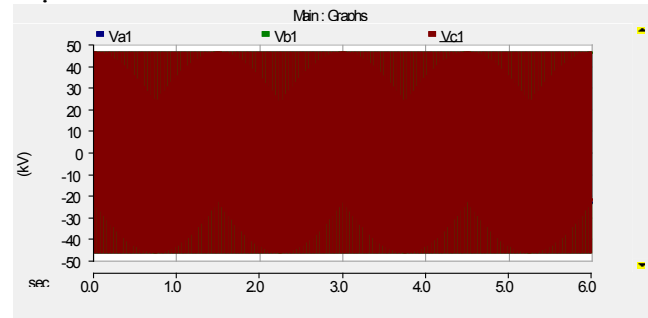
Hình 2.5. Sơ đồ khối bộ điều khiển công suất phản kháng phía chỉnh lưu

Tổng hợp từ bộ điều khiển dòng điện, bộ điều khiển điện áp DC, bộ điều khiển công suất, ta được sơ đồ tổng thể bộ điều khiển phía chỉnh lưu như Hình 2.6.

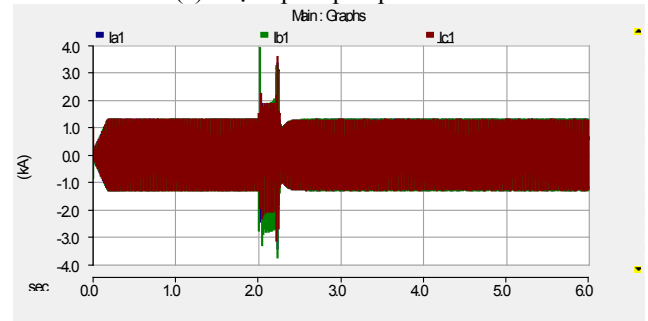


Hình 2.6. Sơ đồ tổng thể bộ điều khiển phía chỉnh lưu

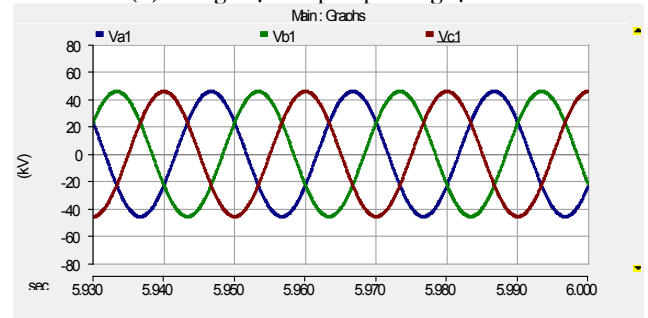
2.3. Kết quả mô phỏng hệ thống vận hành dưới sự cố ngắn mạch pha với bộ điều khiển PI
Kết quả mô phỏng ở phía chỉnh lưu được thể hiện ở Hình 3.1.



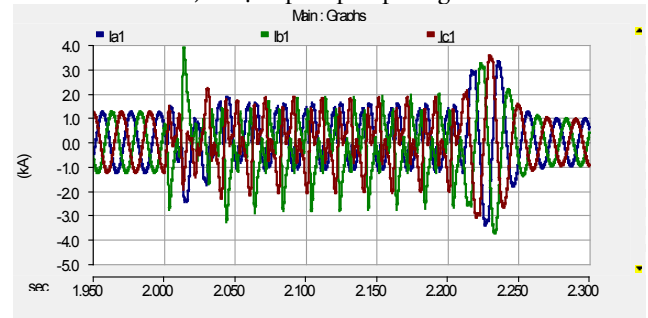
(a) Điện áp ba pha phía chỉnh lưu



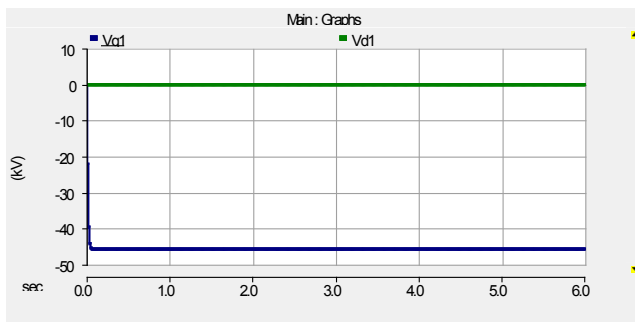
(b) Dòng điện ba pha phía chỉnh lưu



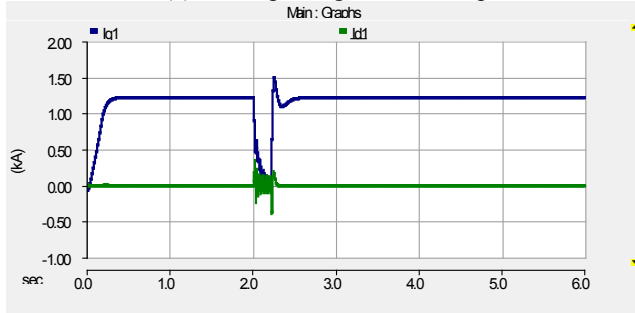
(c) Điện áp ba pha phóng to



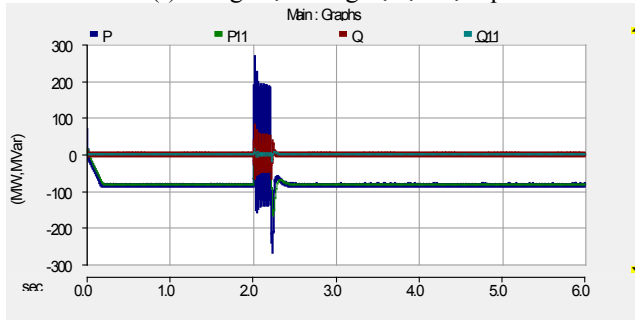
(d) Dòng điện ba pha phóng to



(e) Điện áp trong hệ tọa độ dq



(f) Dòng điện trong hệ tọa độ dq

(g) Công suất tác dụng và công suất phản kháng
Hình 3.1 Đáp ứng phía chỉnh lưu của hệ thống
khi vận hành sự cố với PI

Dựa vào Hình 3.1 ta thấy rằng hệ thống bị mất điều khiển khi có sự cố ngắn mạch xảy ra.

Hình 3.1(a) và 3.1(c) là dạng sóng điện áp ba pha chỉnh lưu. Giá trị biên độ đỉnh mỗi pha là 45,7 kV.

Hình 3.1(b) và Hình 3.1(d) thể hiện dòng điện ba pha phía chỉnh lưu. Dạng sóng dòng điện méo dạng ở các pha tại thời điểm sự cố xảy ra.

Hình 3.1(e) và Hình 3.1(f) là giá trị điện áp và dòng điện trong hệ tọa độ dq.

Hình 3.1(g) thể hiện công suất phản kháng và công suất tác dụng phía chỉnh lưu.

Tương tự như trên, trong thời gian tồn tại sự cố, công suất tác dụng có sự thay đổi và phục hồi trạng thái ổn định sau thời gian 2,2s.

III. KẾT LUẬN

Thông qua việc đã tiến hành nghiên cứu về cấu tạo, nguyên lý hoạt động và ưu nhược điểm của bộ biến đổi nguồn áp VSC, bộ điều khiển PI. Dựa vào phương trình toán học và các thông số cơ bản để tính toán, thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống điện cao áp một chiều trong trạng thái vận hành bình thường và khi có sự cố ngắn mạch. Sử dụng phương pháp điều khiển vòng kín trong quá trình thực hiện. Dựa vào các kết quả đạt được trong mô phỏng, ta dễ dàng nhận thấy rằng vai trò của các bộ điều khiển rất quan trọng.

Khi có sự cố mất cân bằng pha, dòng điện, điện áp và công suất đều bị thay đổi giá trị. Bộ điều khiển PI có khả năng phục hồi trạng thái hoạt động của hệ thống sau khoảng thời gian cài đặt nhằm đảm bảo duy trì tính liên tục cung cấp điện cho hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bùi Tiến Việt, “Nghiên cứu hiệu quả của công nghệ truyền tải điện một chiều cao áp và khả năng áp dụng đối với hệ thống điện Việt Nam”, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2009.
- Hồ Văn Hiến, *Hệ thống điện truyền tải và phân phối*, nhà xuất bản Đại học quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh.
- Chan- Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil- Soo Jang, Seong- Joo Lim, Seok- Jin Lee, *HVDC Transmission Power Conversion Applications in Power systems*, John Wiley and Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore, 2009.
- Nguyễn Minh Anh, “Thiết kế hệ thống truyền tải cao áp một chiều sử dụng bộ chuyển đổi diode kẹp 5 bậc”, Luận văn tốt nghiệp đại học, Khoa công nghệ Trường Đại học Cần Thơ, 2020.
- K. R. Padiyar, *HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions*, New Age International Pvt Ltd, India, 1990.
- Tatjana Kalitjuka, “Control of Voltage Source Converters for Power system Applications”, Norwegian University of Science and Technology, July 2011.
- Đoàn Quang Vinh, “Điều khiển VSC-HVDC- Ứng dụng trong truyền tải điện một chiều Hội An- Đảo Cù Lao Chàm”, Trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng, 2012.
- Hứa Trọng Nghĩa “Điều khiển hệ thống truyền tải cao áp một chiều cho nhà máy điện gió”, Luận văn tốt nghiệp đại học, Khoa Công nghệ Trường Đại học Cần Thơ, Cần Thơ, 2018.
- Hồ Việt Thống “Nghiên cứu ứng dụng của bộ nghịch lưu đa bậc MMC trong hệ thống điện mặt trời nối lưới”, Luận văn tốt nghiệp Thạc sĩ, Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ, 2020.
- Nguyễn Văn Nhờ, *Điện tử công suất 1*, NXB Trường Đại học Bách khoa TP Hồ Chí Minh, 2008.