

Bộ điều chỉnh kiểu cộng hưởng cho bộ biến đổi phía tải trong hệ điều áp tích cực

PR controllers for series converter in active voltage conditioner

Vũ Hoàng Phương, Nguyễn Đình Ngọc, Trần Trọng Minh, Nguyễn Quang Dịch

ĐH Bách khoa Hà Nội

Email: phuong.vuhoang@hust.edu.vn

Abstract

Temporary voltage swells and sags appear with high frequency in electric power systems, and they significantly affect sensitive loads such as industrial manufacturing or communication devices. The paper presents a control strategy with proportional-resonant controllers for three full-bridge Voltage Source Converters with a common DC-link to create a dynamic voltage restorer. The control strategy permits the system to overcome the temporary voltage swells and sags in certain circumstances: single-phase or double-phase voltage sags up to 55%, three-phase voltage sags up to 70%, and voltage swells up to 110% in a duration less than one grid-voltage cycle. The simulation results are carried out in MATLAB/Simulink and experimental results are deployed in Typhoon HIL 402 device to demonstrate the ability of the proposed control method.

Keywords

Active voltage conditioner, proportional resonant controller, hardware in the loop

Tóm tắt¹

Biến động lồi, lõm điện áp ngắn hạn xuất hiện với tần suất cao trong hệ thống cung cấp điện, và sự cố này ảnh hưởng nghiêm trọng đến những tải nhạy cảm trong hoạt động sản xuất công nghiệp hoặc thiết bị thông tin liên lạc. Bài báo này đưa ra chiến lược điều khiển cho bộ biến đổi sử dụng ba mạch cầu H ghép chung DC trong hệ điều áp liên tục bằng cách sử dụng các bộ điều chỉnh kiểu cộng hưởng, chiến lược điều khiển cho phép khắc phục sự cố lồi/lõm điện áp ngắn hạn trong các trường hợp: lõm điện áp một pha hoặc hai pha tới 55%, lõm điện áp ba pha tới 70%, lồi điện áp ba pha 110%, thời gian tác động nhỏ hơn 1 lần chu kỳ điện áp lưới. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab, kết quả thực nghiệm trên thiết bị HIL 402 của hãng Typhoon đã minh chứng khả năng của phương pháp điều khiển được đề xuất.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$G_{PR}^c(s)$		Hàm truyền bộ điều chỉnh PR trên miền liên tục
$G_{PR}^d(s)$		Hàm truyền bộ điều chỉnh PR trên miền gián đoạn

Chữ viết tắt

UPS	Uninterruptible Power Supplier
APF	Active Power Filter
AVC	Active Voltage Conditioner

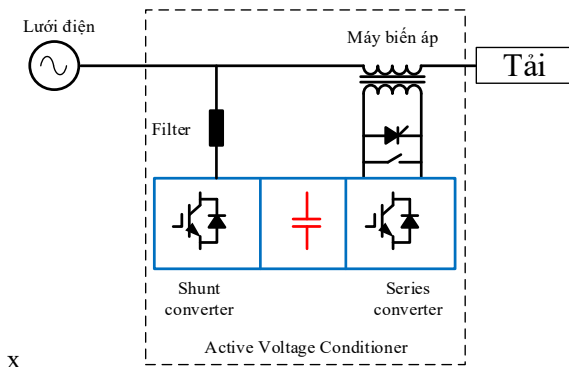
PR	Proportional Resonant
PLL	Phase Locked Loop
HIL	Hardware in the Loop

1. Phần mở đầu

Theo kết quả khảo sát hãng ABB, lõm do một pha chạm đất chiếm tới 68%, lõm do hai pha chạm đất chiếm 19% và lõm cả ba pha cân bằng chiếm 13% [1]. Các biến động điện áp ngắn hạn này (thời gian dưới 60s) thường gây hư hỏng, tạm dừng làm việc đối với một số thiết bị điện và điện tử, trong trường hợp thiết bị này đóng vai trò quan trọng có thể phải dừng toàn bộ dây chuyền sản xuất. Ngoài ra nếu phụ tải là hệ thống xử lý số liệu có thể dẫn tới gián đoạn hoặc mất thông tin, điều này cũng dẫn đến những hậu quả nghiêm trọng.

Hệ thống điều áp tích cực AVC là giải pháp phù hợp nhất để khắc phục sự cố lồi lõm điện áp. Hệ thống AVC bao gồm bộ biến đổi phía lưới và bộ biến đổi phía tải kết nối với nhau qua mạch DC trung gian, và máy biến áp mắc nối tiếp giữa tải, nguồn, sơ đồ mạch lực AVC được chỉ ra trên H. 1 [1]. Đối với bộ biến đổi phía tải cần phải điều khiển cả thành phần điện áp, dòng điện thứ tự thuận và thứ tự nghịch để có thể bù được điện áp lồi lõm từng pha, điều này dẫn đến hệ thống điều khiển rất phức tạp và giảm độ tin cậy [2][3]. Để giải quyết triệt để vấn đề bù lõm cho từng pha, một vài cấu trúc mạch lực được đưa ra phân tích: nghịch lưu có điểm trung tính do tụ DC tạo ra, nghịch lưu 3 pha 4 dây, bộ biến đổi sử dụng 3 cầu H chung Bus DC[4]-[6], trong đó bộ biến đổi sử dụng 3 cầu H chung Bus có ưu điểm hơn cả do phương pháp điều chế độ rộng xung đơn giản.

¹ Ngày nhận bài: 04/12/2017; Ngày nhận bản sửa: 04/02/2018; Ngày chấp nhận: 06/02/2018; Phân biện: Thân Ngọc Hoàn, Đoàn Quang Vinh, Nguyễn Phùng Quang



H. 1 Sơ đồ khối bộ điều áp tích cực để khắc phục sự cố lỗi/lỗi điện áp ngắn hạn

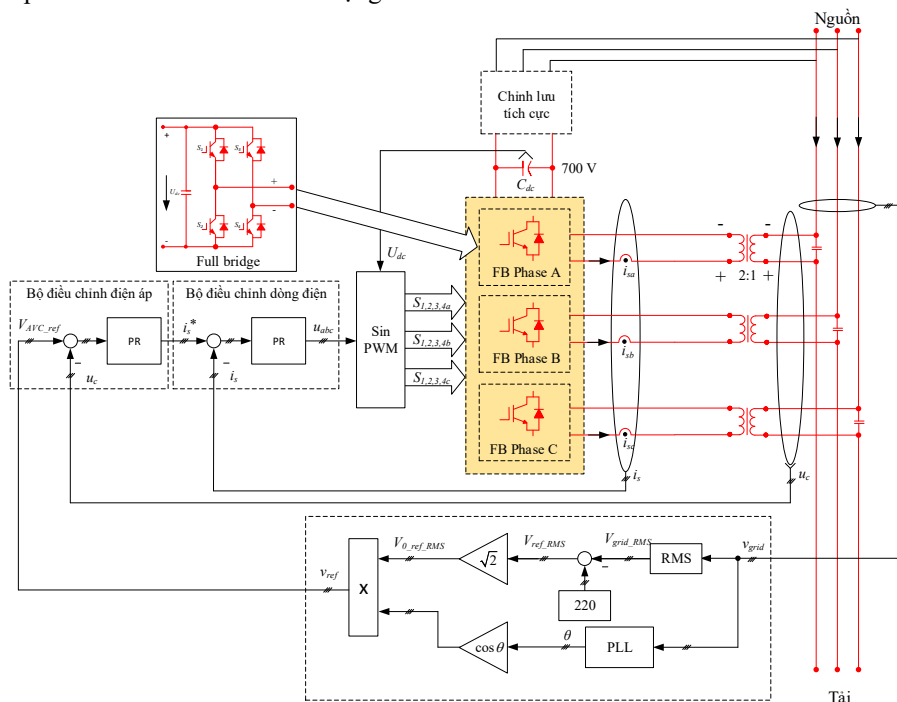
Đã có một vài cấu trúc điều khiển áp dụng cho bộ biến đổi sử dụng 3 cầu H chung Bus DC:

- Điều khiển phản hồi đầu ra (feedback) kết hợp với khâu bù xuôi (feed-forward) trên hệ tọa độ quay [7]. Cấu trúc điều khiển này không có mạch vòng dòng điện nghịch lưu, nên không bù được sụt áp rơi trên mạch lọc đầu ra nghịch lưu và tổn thất máy biến áp, dẫn đến khả năng đáp ứng điện áp bù đưa lên lưới chậm.
- Cấu trúc điều khiển khác sử dụng phương pháp phản hồi trạng thái (state feedback) kết hợp khâu bù xuôi (feed-forward) dòng tải, cấu trúc này có nhược điểm phải đo chính xác các biến trạng thái

và có giá trị chính xác phân tử mạch thụ động [8].

- Một cấu trúc điều khiển khác, mạch vòng điện áp sử dụng bộ điều chỉnh kiểu cộng hưởng PR hoặc H_{inf} kết hợp với bộ điều chỉnh dòng điện kiểu tỷ lệ và thực hiện trên hệ tọa độ tĩnh $\alpha\beta$, cấu trúc không phát huy hiệu quả khi lồi điện áp không cân bằng bằng cách điều khiển 2 thành phần điện áp theo trục $\alpha\beta$ [9].
- Một cấu trúc điều khiển khác đều sử dụng bộ điều chỉnh kiểu P cho mạch vòng điện áp và dòng điện và được điều khiển riêng rẽ cho từng pha [10], cấu trúc này có ưu điểm thời gian bù điện áp nhanh và nhược điểm không triệt tiêu sai lệch tĩnh do đại lượng điều khiển có dạng xoay chiều.

Để nâng cao đáp ứng động học và triệt tiêu sai lệch tĩnh, bài báo này đề xuất ra một cấu trúc điều khiển nối cấp áp dụng cho hệ DVR, cấu trúc điều khiển này sử dụng bộ điều chỉnh cộng hưởng cho cả 2 mạch vòng dòng điện và điện áp. Cấu trúc điều khiển đề xuất có khả năng bù lồi điện áp một pha, hai pha còn 55% giá trị, lồi điện áp ba pha còn 70% giá trị, lồi điện áp lên tới 110%, thời gian tác động nhỏ hơn 2 chu kỳ lưới. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên thiết bị Typhoon HIL 402 đã chứng minh hiệu quả phương pháp điều khiển được đề xuất.



H. 2 Cấu trúc trúc điều khiển bộ biến đổi phía tải trong hệ thống điều áp liên tục

2. Chiến lược điều khiển

Cấu trúc điều khiển cho bộ biến đổi phía tải sử dụng phương pháp điều khiển vô hướng cho mỗi mạch cầu H, tương ứng với điện áp từng pha như trên H. 2. Trong cấu trúc này, ba pha được điều khiển độc lập với nhau vì thế có lợi thế là không cần tách thành

phần thứ tự thuận và ngược khi làm việc với sự cố lỗi lồi điện áp không cân bằng, tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là phải sử dụng đến 6 bộ điều chỉnh PR. Sử dụng cấu trúc điều khiển nối cấp cho mỗi pha, mạch vòng ngoài là mạch vòng điều chỉnh điện áp với thông tin điện áp đo về ở phía thứ cấp

máy biến áp, mạch vòng trong là mạch vòng điều chỉnh dòng điện đầu ra của mỗi mạch cầu H. Lượng đặt của mạch vòng điều chỉnh dòng điện là mạch vòng điều chỉnh điện áp, lượng đặt của mạch vòng điều chỉnh điện áp được tính toán dựa vào hiệu giữa giá trị điện áp hiệu dụng mong muốn (ví dụ 220Vac) và điện áp hiệu dụng của lưới. Ngoài ra, để đồng bộ với điện áp lưới, bộ PLL một pha cần thiết được sử dụng bằng cách đo điện áp từng pha của nguồn cấp [12].

Mô hình toán học của mỗi mạch cầu H trong bộ biến đổi phía tải có dạng (1), giống như nghịch lưu nguồn áp một pha hoạt động độc lập với đầu ra là mạch lọc LC [11], L là điện cảm tản máy biến áp.

$$\begin{cases} L\dot{i}_s + r_L i_s = v_s - v_L \\ C\dot{v}_o = i_s - i_L \end{cases} \quad (1)$$

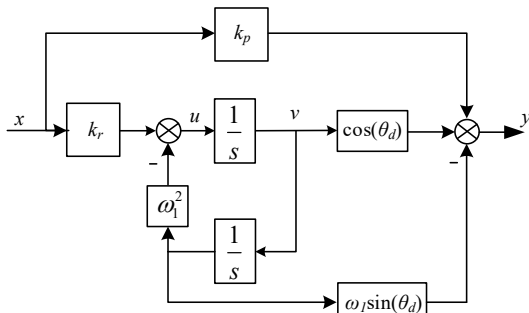
Mô hình (1) cho thấy sử dụng cấu trúc điều khiển hai mạch vòng là phù hợp, để triệt tiêu lệch tĩnh của điện áp và dòng điện trong các mạch vòng nên sử dụng bộ điều chỉnh Bộ điều chỉnh PR có hàm truyền đạt cho ở (2) với ω_l là tần số góc cơ bản của dòng điện và h là bậc sóng hài [12].

$$G_{PR}^c(s) = k_p + \frac{k_r s}{s^2 + (h\omega_l)^2} \quad (2)$$

Để cài đặt vào vi điều khiển, thành phần toán tử Laplace trong (2) cần phải được xấp xỉ sang miền ảnh Z để đưa ra các phương trình sai phân. Bộ điều chỉnh PR cần phải xét đến trễ do vi điều khiển thực thi (ít nhất một chu kỳ trích mẫu), theo [13][14] hàm truyền bộ điều chỉnh PR được viết lại (3).

$$G_{PR}^c(s) = k_p + k_r \frac{\cos(\theta_d)s - h\omega_l \sin(\theta_d)}{s^2 + (h\omega_l)^2} \quad (3)$$

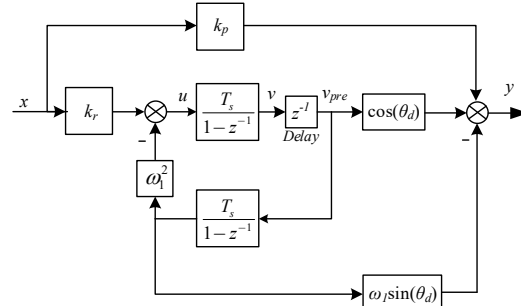
Trong đó, $\theta_d = h\omega_l NT_s$ (N – số nguyên và được chọn bằng 2, T_s – chu kỳ trích mẫu bộ điều chỉnh PR, h – bậc sóng hài). Đối với thành phần sóng hài bậc 1 ($h = 1$), bộ điều chỉnh PR trên miền liên tục có sơ đồ khối như trên H. 3.



H. 3 Mô tả bộ điều khiển PR trên miền liên tục.

Thành phần tích phân trong bộ điều chỉnh cộng hưởng được xấp xỉ $z = e^{sT_s} \approx 1/(1 - sT_s)$ (xấp xỉ theo Backward-Euler). Tuy nhiên trong quá trình gián đoạn, để tránh vòng lặp đại số, người lập trình sẽ sử dụng tín hiệu v_{pre} thay cho v , điều này được thực hiện bằng cách bổ sung khâu tạo trễ 1 chu kỳ điều chế z^{-1}

vào mô tả bộ điều khiển PR trên miền gián đoạn [14]÷[16].



H. 4 Mô tả bộ điều khiển PR trên miền gián đoạn

Từ H. 4, ta có hệ phương trình sai phân để cài đặt bộ điều chỉnh PR cho vi điều khiển như sau:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + k_r [x(k) - x(k-1)] - \omega_l^2 T_s v_{pre}(k) \\ v(k) = v(k-1) + T_s u(k) \\ y(k) = y(k-1) + k_p [x(k) - x(k-1)] \\ + \cos(\theta_d) [v_{pre}(k) - v_{pre}(k-1)] - T_s \omega_l \sin(\theta_d) v_{pre}(k) \\ v_{pre}(k) = v(k-1) \end{cases} \quad (4)$$

2.1 Tổng hợp tham số mạch vòng dòng điện

Phương thức thiết kế bộ điều chỉnh này được thiết kế trên miền tần số, trên cơ sở lựa chọn băng thông (bandwidth) cho hàm truyền hệ thống. Băng thông được lựa chọn trong khoảng 10 lần tần số cơ bản và 1/10 tần số phát xung PWM [17]. Hàm truyền kín mạch vòng dòng điện (xét ở tần số cơ bản: $h=1$):

$$G_{i_kin}(s) = \frac{(k_{pi}s^2 + k_{ri}s + k_{pi}\omega_l^2)}{Ls^3 + k_{pi}s^2 + (k_{ri} + \omega_l^2 L)s + k_{pi}\omega_l^2} \quad (5)$$

Biên độ của $G_{i_kin}(s)$ cho ở (6)

$$\begin{aligned} |G_{i_kin}(j\omega)| &= \frac{\sqrt{(k_{ri}\omega)^2 + k_{pi}^2(\omega_l^2 - \omega^2)^2}}{\sqrt{[k_{ri} + L(\omega_l^2 - \omega^2)]^2 \omega^2 + k_{pi}^2(\omega_l^2 - \omega^2)^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

Tiến hành tổng hợp tham số k_{pi} , k_{ri} qua hai bước sau:

- Bước 1: Cho $k_{ri} = 0$

$$|G_{PR}(j\omega)| = \frac{k_{pi}}{\sqrt{(L\omega)^2 + k_{pi}^2}} \quad (7)$$

Nếu băng thông ω_b được xác định thì hệ số k_{pi} được xác định như sau để có hệ số suy giảm biên độ là -3dB.

$$k_{pi} = L\omega_b \quad (8)$$

- Bước 2: Đưa thành phần tích phân vào biểu thức biên độ

$$k_{rc} = \frac{(\omega_{fi}^2 - \omega_0^2)}{\omega_{fi}} \left[\sqrt{k_{pc}^2 + 2(L\omega_{fi})^2 - 2k_{pc}^2 + L\omega_{fi}} \right] \quad (9)$$

Với: ω_{ii} : băng thông ban đầu và ω_{fi} : băng thông kết thúc của mạch vòng dòng điện (do ảnh hưởng bởi thành phần tích phân thêm vào).

2.2 Tổng hợp tham số mạch vòng điện áp

Tiến hành tổng hợp tham số mạch vòng điện áp tương tự như mạch vòng dòng điện, ta có thông số bộ điều chỉnh PR điện áp như (10), (11).

$$k_{pv} = C\omega_{iv} \quad (10)$$

$$k_{rv} = \frac{(\omega_{fv}^2 - \omega_1^2)}{\omega_{fv}} \left[\sqrt{2(C\omega_{fv})^2 - 2k_{pv}^2 + C\omega_{fv}} \right] \quad (11)$$

Với: ω_{iv} : băng thông ban đầu và ω_{fv} : băng thông kết thúc của mạch vòng điện áp.

3. Kết quả mô phỏng

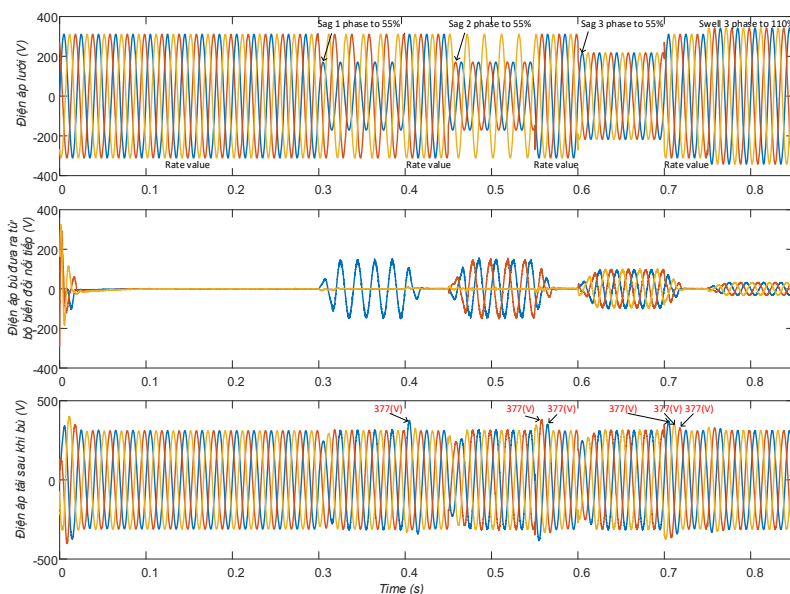
Cấu trúc điều khiển bộ biến đổi phía lưới được mô phỏng bằng phần mềm *Matlab / Simpower Systems / Simulink*, tham số mô phỏng cho trên bảng B. 1.

Lưới điện 380V xuất hiện sự cố lỗi lồi điện áp từ thời điểm thứ 0,1s. Bảng thông ban đầu và bảng thông

kết thúc của mạch vòng dòng điện và điện áp lần lượt có các giá trị sau: $\omega_{ii}=900$ rad/s, $\omega_{fi}=1000$ rad/s, $\omega_{iv}=80$ rad/s và $\omega_{fv}=100$ rad/s, Mô phỏng với bốn trường hợp lỗi lồi điện áp là: TH1. Sụt áp 1 pha còn 55% định mức, TH2. Sụt áp 2 pha còn 55% định mức, TH3. Sụt áp 3 pha còn 70% định mức, TH4. Lồi áp 3 pha 110% định mức. Kết quả mô phỏng cho bốn trường hợp lỗi lồi điện áp cho ở H. 5.

B. 1 Tham số mạch lực và bộ điều khiển

Điện áp một chiều	700	V
Thông số máy biến áp		
Tỷ số máy biến áp	2:1	
Công suất máy biến áp	45	kVA
Điện trở, điện cảm tản	$R_1 = 0,009\Omega$	
phía sơ cấp	$L_{1\sigma} = 0,15mH$	
Điện trở, điện cảm tản	$R_2 = 0,002\Omega$	
phía sơ cấp	$L_{2\sigma} = 0,007mH$	
Tụ lọc	80 μ H	
Thông số bộ điều khiển		
Bộ điều chỉnh điện áp	k_{pv}	6.1875
	k_{rv}	705.5216
Bộ điều chỉnh dòng điện	k_{pi}	6.0811
	k_{ri}	11990



H. 5 Đáp ứng động học của bộ biến đổi phía tải khi điện áp lưới biến động

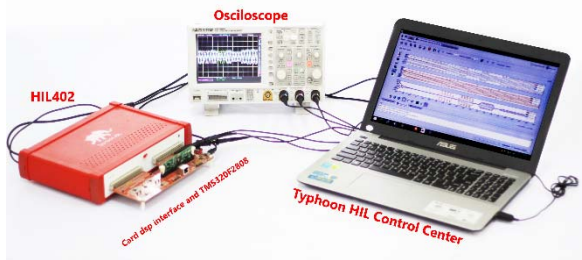
Kết quả mô phỏng cho thấy trong cả 4 trường hợp khảo sát, bộ biến đổi phía tải trong hệ thống AVC giúp cho điện áp khôi phục về giá trị định mức với thời gian tác động nhỏ hơn 20ms (1 chu kỳ điện áp lưới) và không có quá điều chỉnh. Thời gian trễ lớn nhất trong hệ thống điều khiển chính là tính toán giá trị hiệu dụng điện áp lưới.

4. Kết quả mô phỏng thời gian thực

Cấu trúc điều khiển bộ biến đổi phía tải một lần nữa được kiểm chứng trên thiết bị điều khiển thời gian

thực của hãng Typhoon [18]. Thiết bị này bao gồm card HIL402 mô tả lưới điện, tải và ba mạch cầu H ghép chung DC sử dụng van bán dẫn IGBT, bước tính mô hình phân cứng này là 1 μ s. Cấu trúc điều khiển: phương pháp điều chế độ rộng xung có tần số 5kHz, các bộ điều chỉnh điện áp và dòng điện, thuật toán vòng khóa pha...được cài đặt trên DSP TMS320F2808. Thông qua mạch “DSP interface”, Card HIL402 cung cấp tới 16 cổng ra tương tự (AO), các cổng này được thiết lập để gửi các tín hiệu điện áp và dòng điện đến mạch ADC của DSP TMS320F2808. Tín hiệu xung đưa ra từ kênh PWM

của DSP TMS320F2808 sẽ gửi đến cổng DI của Card HIL402 được cấu hình là các tín hiệu điều khiển đóng/cắt van bán dẫn IGBT. Hình ảnh thiết bị thí nghiệm HIL của Typhoon được chỉ ra trên hình H. 6.

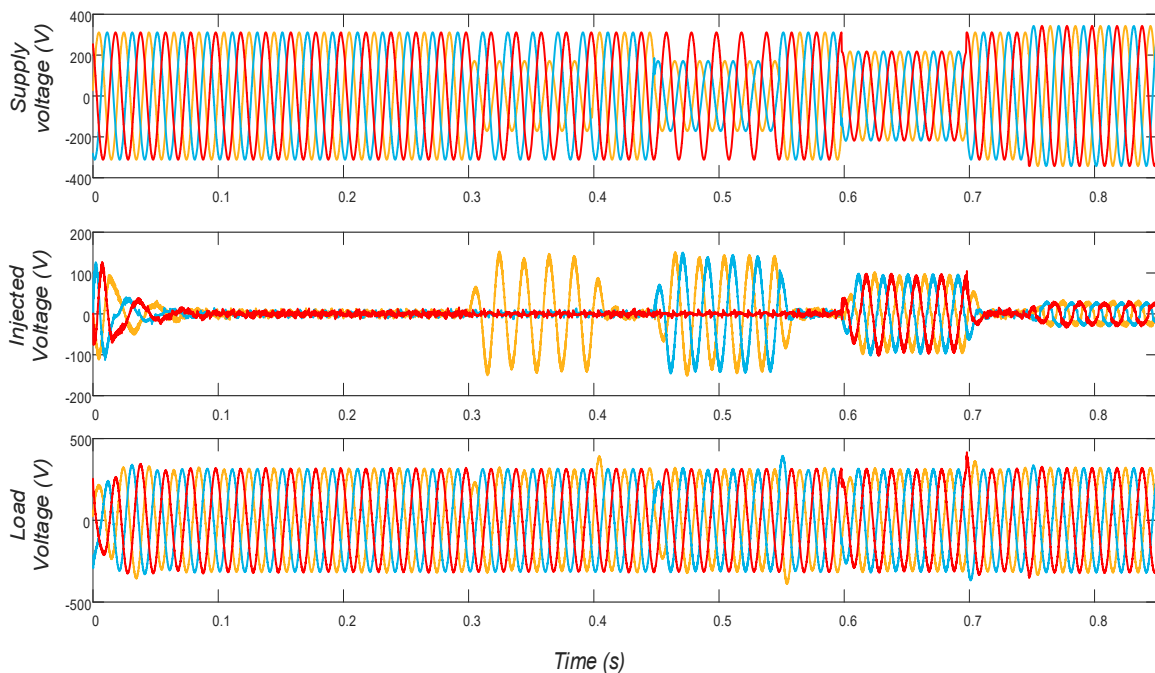


H. 6 Hình ảnh thiết bị điều khiển thời gian thực của hãng Typhoon

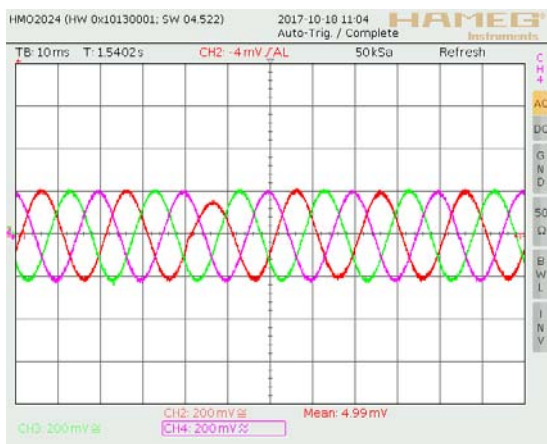
Ngoài ra, sử dụng phần mềm “Typhoon HIL Control Center” cho phép thay đổi người thiết kế có thể thiết lập tham số, lựa chọn các đặc tính hiển thị dưới dạng đồ thị và thay đổi các điều kiện vận hành

theo thời gian thực. Mô tả hệ thống điều khiển thời gian thực của hãng Typhoon được chỉ ra trên H. 6. Kết quả mô phỏng thời gian thực cũng được kiểm chứng với 4 trường hợp như ở mục 3, với các kết quả chỉ trên các hình H. 7 và **Error! Reference source not found.**

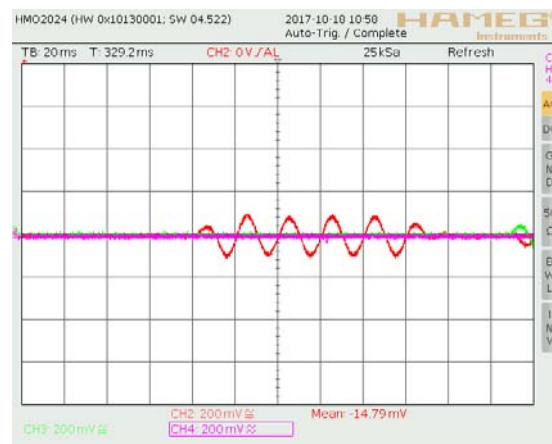
Thông qua giao diện của phần mềm “Typhoon HIL Control Center” sự cố lỗi/lỗi điện áp lưới của hệ thống được tạo ra. Khi đó, vi điều khiển phát hiện sự cố lỗi điện áp và bắt đầu thực hiện các bộ điều chỉnh và phát xung PWM, điện áp trên tải đã được điều chỉnh đến giá trị định mức 220V và cân bằng cho từng pha. Từ các điểm đo trên mạch “DSP interface”, sử dụng Oscilloscope Hameg –200MHz cho phép đo được các đáp ứng điện áp trong quá trình quá độ như trên **Error! Reference source not found.** (Tỷ lệ đo 100mV/div, hệ số khuếch đại của “DSP interface” 1:1500).



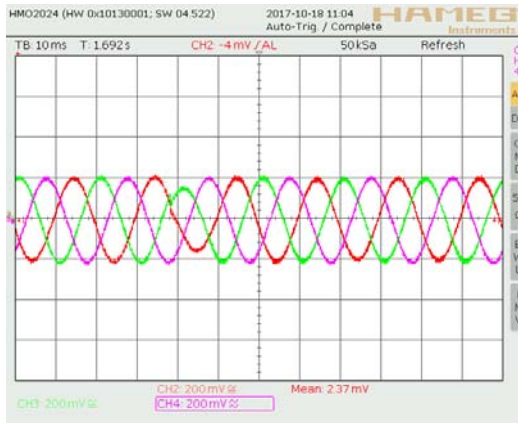
H. 7 Kết quả thí nghiệm thời gian thực đánh giá khả năng bù điện áp cho hệ AVC



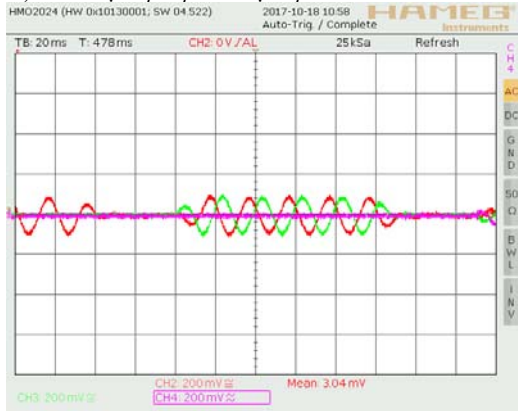
a1) Lỗi điện áp 1 pha: Điện áp tải sau khi AVC tác động



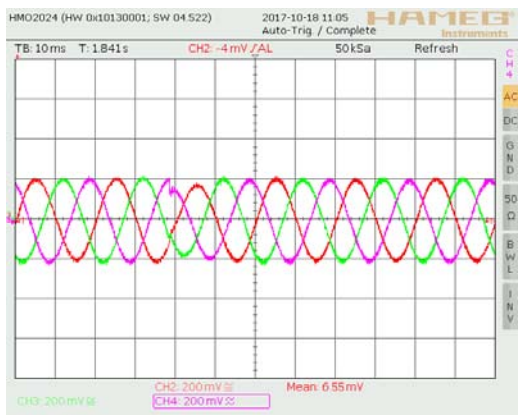
a2) Lỗi điện áp 1 pha: Điện áp bù do AVC đưa ra



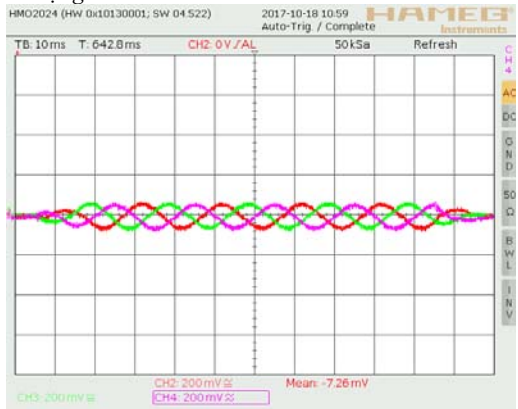
b1) Lỗi điện áp 2 pha: Điện áp tải sau khi AVC tác động



b2) Lỗi điện áp 2 pha: Điện áp bù do AVC đưa ra

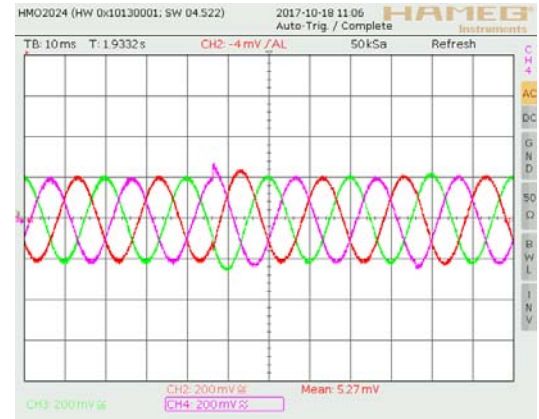


c1) Lỗi điện áp 3 pha cân bằng: Điện áp tải sau khi AVC tác động

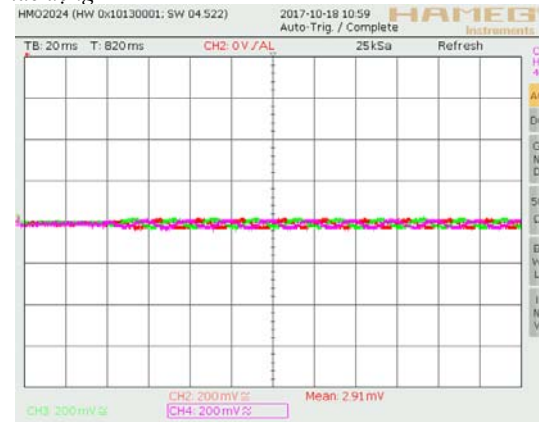


c2) Lỗi điện áp 3 pha cân bằng: Điện áp bù do AVC đưa ra

d1) Lỗi điện áp 3 pha lên tới 10%: Điện áp tải sau khi AVC tác động



d2) Lỗi điện áp 3 pha lên tới 10%: Điện áp bù do AVC đưa ra



H. 8 Kết quả mô phỏng thời gian thực (HIL) khi đo bằng Oscilloscope

5. Kết luận

Bài báo này đưa ra cấu trúc điều khiển cho bộ biến đổi phía tải trong hệ thống điều áp liên tục, cấu trúc điều khiển được thiết kế cho từng mạch nghịch lưu nguồn áp một pha. Các kết quả mô phỏng Matlab và các kết quả thí nghiệm trên thiết bị thời gian thực HIL402 của hãng Typhoon cho thấy khả năng bù lỗi/lỗi điện áp trong cả 4 trường hợp: lỗi điện áp một pha hoặc hai pha xuống tới 55%, lỗi điện áp cân bằng ba pha còn 70% giá trị và lỗi điện áp lên tới 110%. Các kết quả nghiên cứu này là tiền đề quan trọng để triển khai tiếp trên thiết bị phần cứng trong phòng thí nghiệm và trong công nghiệp.

Bài báo này nằm trong chương trình nghiên cứu khoa học cấp Nhà nước mã số KC.05.03/16-20 do Viện Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa chủ trì thực hiện.

Tài liệu tham khảo

[1] ABB, PCS100 AVC-40 - Active Voltage conditioner. Product information
 [2] Gu CJ, Wei HS, Jia K, Bi TS, Liu BH (201) Positive- and negative-sequence control strategy of grid-connected PV systems under balanced

- and unbalanced voltage sags*. 12th IET Intern. Conf. on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), Beijing, pp. 1-6
- [3] Awad H, Svensson J, Bollen M (2004) *Mitigation of unbalanced voltage dips using static series compensator*. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 837-846
- [4] Nielsen JG, Blaabjerg F (2005) *A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1272-1280
- [5] Naidu SR, Fernandes DA (2009) *Dynamic voltage restorer based on a four-leg voltage source converter*. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 3, no. 5, pp. 437-447
- [6] Jeong SY, Nguyen TH, Le QA, Lee DC (2016) *High-Performance Control of Three-Phase Four-Wire DVR Systems using Feedback Linearization*. Journal of Power Electronics, vol. 16, no. 1, pp. 351-361
- [7] Nielsen JG, Newman M, Nielsen H, Blaabjerg F (2004) *Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level*. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 806-813
- [8] Kim H, Sul SK (2005) *Compensation voltage control in dynamic voltage restorers by use of feed forward and state feedback scheme*. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 20, no. 5, pp. 1169-1177
- [9] Li YW, Blaabjerg F, Vilathgamuwa DM, Loh PC (2007) *Design and Comparison of High Performance Stationary-Frame Controllers for DVR Implementation*. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 602-612
- [10] Ajaei FB, Afsharnia S, Kahrobaeian A, Farhangi S (2011) *A Fast and Effective Control Scheme for the Dynamic Voltage Restorer*. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp. 2398-2406
- [11] Bacha S, Munteanu I, Bratcu AI (2014) *Power Electronic Converters Modeling and Control*. Springer-Verlag London
- [12] Teodorescu R, Liserre M, Rodrguez P (2011) *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. John Wiley, Ltd
- [13] Trinh TD, Minh TT (2011) *Thiết kế bộ điều chỉnh công hưởng cho mạch vòng dòng điện của nghịch lưu phía lưới trong điều kiện điện áp không cân bằng*. Hội nghị toàn quốc lần thứ 1 về Điều khiển và Tự động hoá VCCA-2011
- [14] Yepes AG (2011) *Digital resonant current controllers for voltage source converters*. PhD Thesis, University of Vigo
- [15] Teodorescu R, Blaabjerg F, Borup U, Liserre M (2004) *A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation*. Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC'04, 19th Annual IEEE, vol. 1, pp. 580-586
- [16] de Bosio F, Ribeiro LA, Lima MS, Freijedo F, Guerrero JM, Pastorelli M (2015) *Inner current loop analysis and design based on resonant regulators for isolated microgrids*. IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conf. and 1st Southern Power Electronics Conf. (COBEP/SPEC), Fortaleza, pp. 1-6
- [17] Guo XQ, Wu WY (2010) *Improved current regulation of three-phase grid-connected voltage-source inverters for distributed generation systems*. IET Renewable Power Generation, vol. 4, no. 2, pp. 101-115
- [18] Typhoon HIL: *Inverter Testing & Pre-certification with HIL Testing*. Available: <https://www.typhoon-hil.com/applications/converter-testing>.