

THIẾT KẾ MÔ PHÒNG VÀ THỰC NGHIỆM BỘ KHÔI PHỤC ĐIỆN ÁP ĐỘNG (DVR) CHO BÙ LỖM ĐIỆN ÁP TRÊN LƯỚI ĐIỆN CÔNG NGHIỆP

MITIGATION OF VOLTAGE SAG ON INDUSTRIAL GRIDS BY USING DYNAMIC VOLTAGE RESTORER

Trần Duy Trinh¹, Nguyễn Văn Liên¹, Trần Trọng Minh¹, Nguyễn Hoàng Mai²

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; Email: duytrinhktv@gmail.com, lien.nguyenvan@hust.edu.vn, minh.trantrung@hust.edu.vn

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: nghmaidu@gmail.com

Tóm tắt - Sự thay đổi điện áp trong một thời gian ngắn của lổm điện áp có thể gây nên những hậu quả nghiêm trọng như dừng máy ở một số phụ tải quan trọng, ảnh hưởng đến hoạt động bình thường của toàn nhà máy. Bộ khôi phục điện áp động (DVR) được xây dựng trên cơ sở bộ biến đổi điện tử công suất với chức năng giảm thiểu các ảnh hưởng của lổm điện áp trên lưới điện để bảo vệ các phụ tải nhạy cảm quan trọng đó. Bài viết này trình bày các thủ tục thiết kế chi tiết về cấu hình công suất và vị trí lắp đặt cho một DVR. Mô hình mô phỏng trên Matlab-Simulink. Xây dựng mô hình thực nghiệm DVR với công suất 5kVA trong phòng thí nghiệm. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm khẳng định thiết kế DVR chính xác, làm cơ sở để áp dụng DVR trong thực tế.

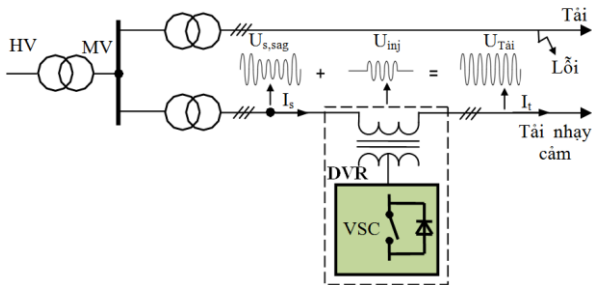
Từ khóa - Giảm thiểu lổm điện áp; lổm điện áp; DVR; Bộ khôi phục điện áp động; điều khiển lổm điện áp.

Abstract - The voltage change in a short period of concave voltage can cause serious consequences including ceasing some important loads, which affects the normal operation of the entire plant. The Dynamic Voltage Recovery (DVR) is devised based on the modified power electronics with features to mitigate voltage changes on the concave grid in order to protect the sensitive loads mentioned above. This paper presents the design procedure that details the configuration and capacity of the installation location for a DVR, the simulation models on Matlab-Simulink, and the empirical models with a capacity of 5 kVA DVR in the laboratory. The simulation and experiment results verified the DVR design, forming the basis for practical applications of DVR.

Key words - Mitigation of voltage sag; voltage sag; DVR; Dynamic voltage Restorer; Control voltage sag.

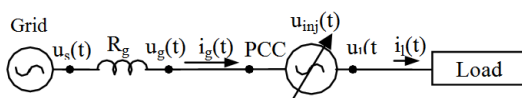
1. Bộ khôi phục điện áp động (DVR)

DVR là thiết bị được tạo ra với vai trò chủ yếu để bù lổm/dâng điện áp, thực hiện dựa trên ý tưởng là chèn vào một điện áp $u_{inj}(t)$ có biên độ, tần số và góc pha mong muốn vào giữa điểm kết nối chung PCC và tải trong khi xuất hiện lổm điện áp [1,5].



Hình 1. Mô tả nguyên tắc hoạt động của DVR

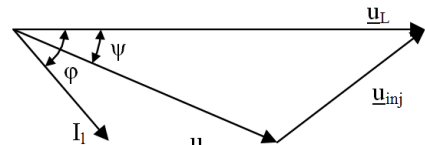
Nguyên lý làm việc của DVR ở hình 2 cho thấy DVR là một nguồn áp với độ lớn, góc pha và tần số điều chỉnh được, u_g là điện áp lưới, u_{inj} là điện áp chèn vào, và u_L là điện áp tải [5].



Hình 2. Sơ đồ mô tả nguyên lý hoạt động của DVR

Đồ thị vector trên hình 3 thể hiện nguyên lý chèn điện áp của DVR để bù lại sự thiếu hụt điện áp trên lưới do lổm điện áp, I_L là dòng điện tải, ϕ là góc lệch pha giữa điện áp tải và dòng điện tải. Giả sử, một lổm điện áp xảy ra với độ lớn và một góc nhảy pha được xác định, biểu thị bằng vector $\underline{u}_{g,sag}$. Khi đó, để duy trì độ lớn của điện áp tải và ngăn chặn nhảy pha, DVR sẽ tính toán tạo ra một

vector điện áp $\underline{u}_{inj}$ với độ lớn, góc pha được xác định và thêm vào lưới. Theo đồ thị vector, điện áp trên tải khi đó sẽ là: $\underline{u}_L = \underline{u}_{g,sag} + \underline{u}_{inj}$ [5].



Hình 3. Nguyên lý bù lổm của DVR

Để có thể khôi phục cả độ lớn và góc pha của điện áp tải như điều kiện trước lổm, ở đây, DVR phải huy động cả công suất tác dụng và công suất phản kháng. Giả sử điện áp và dòng điện tải trong điều kiện trước khi lổm cả hai bằng 1pu, công suất được huy động bởi thiết bị trong khi giảm thiểu lổm điện áp bằng [1,5].

$$\begin{aligned} S_{inj} &= U_{inj} I_L^* = (U_L - U_{g,sag}) I_L^* = (1 - U_{g,sag} e^{j\psi}) \\ &= \cos \phi + j \sin \phi - (U_{g,sag} \cos(\phi + \psi) + j U_{g,sag} \sin(\phi + \psi)) \end{aligned} \quad (1)$$

Công suất hấp thụ bởi tải cho bởi:

$$S_{load} = P_{load} + jQ_{load} = U_L I_L^* = e^{j\phi} = \cos \phi + j \sin \phi \quad (2)$$

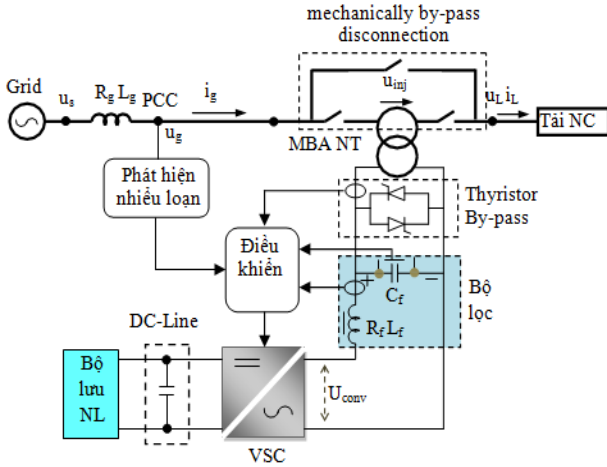
Công suất tác dụng và công suất phản kháng được bơm vào tính theo đơn vị p.u [1,5].

$$P_{inj} = \left[1 - \frac{U_{g,sag} \cos(\phi + \psi)}{\cos \phi} \right] P_{load} \quad (3)$$

$$Q_{inj} = \left[1 - \frac{U_{g,sag} \sin(\phi + \psi)}{\sin \phi} \right] Q_{load} \quad (4)$$

2. Cấu trúc các thành phần của DVR

Cấu trúc của DVR được cấu thành từ các thành phần chính như được trình bày ở hình 4, gồm có [8]:



Hình 4: Sơ đồ cấu trúc gồm các thành phần chính của DVR

+ Máy biến áp nối tiếp (MBA_NT), cách ly về điện giữa DVR và lưới, phối hợp mức điện áp.

+ Bộ lọc tần số chuyển mạch (\$L_f, C_f\$), giảm hưởng của quá trình đóng cắt van do điều chế PWM, cải thiện dạng sóng điện áp thêm vào của DVR.

+ Bộ biến đổi (VSC): là bộ nghịch lưu nguồn áp ba pha dùng IGBT điều chế PWM.

+ DC-link và bộ lưu trữ năng lượng: Có khả năng lưu trữ năng lượng và kết nối với VSC để có thể tạo ra điện áp xoay chiều cần thiết bù cho một biến cố lỗi điện áp khi nó xảy ra.

+ Thiết bị by-pass: Bảo vệ cho các lỗi quá tải của DVR, thường dùng thyristor.

+ Thiết bị ngắt kết nối: Đóng cắt cơ khí để cách ly hoàn toàn DVR nhưng vẫn cấp điện cho tải hoặc khi có các trường hợp khẩn cấp cần phải ngắt mạch để đảm bảo an toàn cho hệ thống DVR.

• Các chế độ hoạt động của DVR:

+ Chế độ Bypass: DVR được nối tắt bằng khoá cơ khí hoặc điện tử, khi có dòng tải cao hoặc dòng ngắn mạch phía tải. Trong chế độ này DVR phải cách ly khỏi lưới.

+ Chế độ chờ (Standby mode): Nguồn điện áp cung cấp ở mức định mức và DVR đã sẵn sàng để bù cho một lỗi điện áp.

+ Chế độ hoạt động tích cực: Khi lỗi điện áp được phát hiện DVR ngay lập tức thực hiện chèn vào điện áp thiếu. Đây là chế độ hoạt động chính [8].

3. Thiết kế DVR

Thủ tục thiết kế DVR sẽ được bắt đầu từ việc xác định vị trí kết nối của DVR trên lưới và các số liệu ban đầu.

• Vị trí của DVR

Vị trí của DVR liên quan đến trở kháng, tổn thất trong DVR và giá thành của nó. Thông thường vị trí của DVR được xác định ở một trong hai cấp, cấp phân phối MV hoặc cấp điện áp thấp LV [7].

$$X_{DVR} = \frac{U_{DVR}^2}{S_{DVR}} \cdot u_{DVR,X} : R_{DVR} = \frac{U_{DVR}^2}{S_{DVR}} \cdot u_{DVR,R}; \quad (5)$$

$$Z_{DVR} = \frac{U_{DVR}^2}{S_{DVR}} \cdot u_{DVR,Z} : u_{DVR,Z} = u_{DVR,R} + j u_{DVR,X}$$

• Các số liệu ban đầu

Bao gồm: Cấu trúc và tham số nguồn cung cấp; Tham số và các tính chất, đặc điểm của tải nhạy cảm cần được bảo vệ.

• Lựa chọn cấu hình DVR

Trong tài liệu [4] đã chỉ ra một số cấu hình của DVR, việc lựa chọn cấu hình phần lực cần phải được cân nhắc các điều kiện cơ bản sau đây:

- Vị trí của DVR trong hệ thống điện.
- Khả năng DVR cần thiết để bù cho các thành phần điện áp nào (thành phần thứ tự thuận, nghịch và thứ tự không).
- Đặc tính của tải.
- Đặc điểm của lỗi điện áp tại vị trí cần đặt DVR để bảo vệ (khảo sát lỗi điện áp tại vị trí tải được bảo vệ).

• Công suất của DVR

Xác định công suất của DVR thông qua hệ số suy giảm điện áp [5].

$$\varsigma = \frac{U_{rated} - U_T}{U_{rated}} \quad (6)$$

Từ (5) công suất của DVR được xác định [5]:

$$S_{DVR} = S_{VSC} = U_{inj} \cdot I_{inj} = \varsigma S_{Load} \quad (7)$$

Các thông số thiết kế chính cho DVR là *khả năng chèn điện áp, khả năng điều chỉnh dòng và kích cỡ của bộ lưu trữ năng lượng*.

+ Khả năng chèn điện áp được của DVR [5]:

$$U_{DVR,\%} = \frac{U_{DVR}}{U_{sup ply, dm}} \cdot 100\% \quad (8)$$

+ Khả năng chèn điện áp nên được lựa chọn thấp hơn mức cần thiết để giảm tổn thất, trong đó các tổn thất trong DVR gồm tổn thất trong biến áp, bộ lọc và bộ biến đổi.

+ Khả năng điều chỉnh dòng điện của DVR:

$$i_{DVR,\%} = \frac{I_{DVR}}{I_{load, dm}} \cdot 100\% \quad (9)$$

+ Tiêu hao năng lượng cho một lỗi điện áp đối xứng trong trường hợp tải đối xứng [5]:

$$E_{DVR,\%} = \sqrt{3} |U_{sup ply, Pre} - U_{sag}| |I_{load}| \cos(\varphi_{load}) t_{sag} \quad (10)$$

trong đó, \$t_{sag}\$ là thời gian tồn tại lỗi, \$U_{sag}\$ là điện áp nguồn trong khi lỗi, \$U_{supply, Pre}\$ là điện áp nguồn trước khi lỗi, \$I_{DVR}\$ là dòng điện DVR.

❖ Thiết kế các thành phần của DVR

• Thiết kế máy biến áp bù

+ Xác định điện áp danh định phía sơ cấp

Nếu hệ thống DVR được dùng để bù toàn bộ sự giảm,

khi đó, điện áp thêm vào lưới là lớn nhất được xác định dựa trên độ sâu tương đối cực đại của sự giảm được xác định trước thông qua hệ số suy giảm được lựa chọn.

Trong trường hợp áp dụng phương pháp bù "Pre-sag", giá trị danh định cực đại xác định bởi công thức [1,5].

$$U_{dm1} = \sqrt{U_L^2 + (1-D)^2 U_s^2 - 2U_L'(1-D)U_s \cos \phi} \quad (11)$$

$$D = \frac{|U_s|}{|U_{sag}|} \quad (12)$$

trong đó, U_s là điện áp nguồn danh định, U_L' là điện áp mà hệ thống DVR sẽ ổn định trên tải (thông thường là bằng điện áp danh định trên tải), D là độ sâu lồi cực đại, $\cos \phi$ là hệ số công suất tải.

+ *Xác định dòng điện danh định ở phía sơ cấp biến áp nối tiếp*

Dòng điện qua cuộn dây sơ cấp, cung cấp dòng điện toàn bộ của tải. Có nghĩa là dòng danh định phía này của biến áp bằng dòng danh định của tải I_{Ldm} . Trong trường hợp sử dụng bộ lọc tần số chuyển mạch phía lưới, dòng danh định phải tăng thêm các thành phần hài bậc cao dòng điện bộ biến đổi [1].

$$I_{dm1} = \sqrt{I_{Ldm}^2 + \sum_{n=1}^M I_{Lmax,(h)}^2} \quad (13)$$

trong đó, I_{Ldm} là dòng điện tải danh định hài cơ bản, $I_{Lmax,(h)}$ là thành phần cực đại h trong phổ dòng điện tải.

+ *Xác định công suất danh định của biến áp*

$$S_{dm1} = k_{qt} U_{dm1} I_{dm1} \quad (14)$$

trong đó, k_{qt} là hệ số quá tải chấp nhận được.

+ *Hệ số của biến áp*

Tham số này có thể được xác định theo khả năng chèn vào của VSC và mức mong muốn chèn vào hệ thống. Tỷ lệ này có thể được xác định theo:

$$n = \frac{U_{dm1}}{U_{dm2}} = \frac{U_{DVR}}{U_{conv}} \quad (15)$$

+ *Xác định trở kháng ngắn mạch máy biến áp*

Trở kháng MBA có ảnh hưởng trước hết đến sự sụt áp gây ra bởi dòng điện lưới chạy qua máy biến áp. Giá trị này cũng phụ thuộc vào các tham số của bộ lọc tần số chuyển mạch. Giả thiết bộ lọc LC đặt ở phía bộ biến đổi (phía cuộn thứ cấp biến áp) giá trị cực đại giảm điện áp ΔU_d không được vượt quá giá trị mong muốn khi [1,7].

$$\sqrt{R_{nm}^2 + \omega^2 \left(L_{nm} + \frac{L_f}{1 - \omega^2 L_f C_f} \right)^2} < \frac{\Delta U_d}{I_{dm1}} \quad (16)$$

trong đó, R_{nm} , L_{nm} là các tham số ngắn mạch của biến áp. Tổng điện trở và điện cảm cuộn sơ cấp và thứ cấp $R_{nm} = R_{nm1} + R'_{nm2}$, $L_{nm} = L_{nm1} + L'_{nm2}$. Khi sử dụng bộ lọc LC phía lưới (phía sơ cấp biến áp) tụ điện C_f mắc song song với hệ thống nối tiếp và ảnh hưởng của nó tới điện áp nguồn có thể bỏ qua. Điều kiện sự giảm cực đại điện áp được đơn giản như sau [9]:

$$\sqrt{R_{nm}^2 + \omega^2 L_{nm}^2} < \frac{\Delta U_d}{I_{dm1}} \quad (17)$$

• Thiết kế bộ biến đổi

Hình 5 mô tả một pha của VSC với một bộ lọc LC và biến áp bù [6]

+ Điện áp ra của bộ biến đổi xác định tương ứng khi xét với hài bậc một [5,6]:

$$U_{conv}(t) = \frac{4U_{DC}}{\pi} \sin \omega t = U_{1m} \sin \theta \quad (18)$$

$$+ \text{Điện áp RMS tối đa là: } U_{conv} = \frac{4U_{DC}}{\pi\sqrt{2}} \quad (19)$$

+ Các dòng điện đi qua bộ chuyển đổi là tổng của các sóng dòng điện tạo ra bởi các chuyển mạch, dòng từ hóa của máy biến áp và tải dòng điện [5,6].

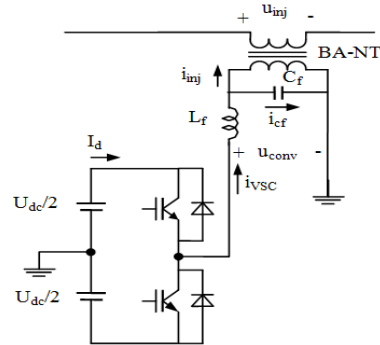
$$i_{VSC} = i_{Cf}(t) + i_{magnetization}(t) + n i_L(t) \quad (20)$$

+ Dòng điện trung bình qua các van:

$$I_{Tr} = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\pi} I_m \sin(\theta - \phi) d\theta = \frac{I_{1m}}{2\pi} (1 + \cos \phi) d\theta \quad (21)$$

$$I_D = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta}^{\theta_1} I_m \sin(\theta - \phi) d\theta = \frac{I_{1m}}{2\pi} (1 - \cos \phi) d\theta \quad (22)$$

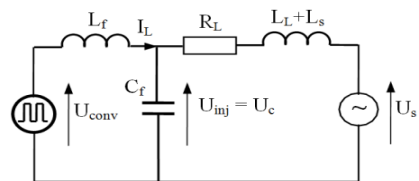
trong đó, ϕ là góc pha tải, U_{1m} , I_{1m} điện áp, dòng điện cực đại của hài bậc 1, U_{DC} -điện áp phía một chiều.



Hình 5. Sơ đồ tương đương một pha của DVR

• Thiết kế bộ lọc LC

Thiết kế bộ lọc LC cho DVR đã được xem xét tại [6]. Giả sử bộ lọc LC ở phía bộ biến đổi, dẫn đến sơ đồ tương đương một pha của hệ thống được sử dụng để tính chọn tham số bộ lọc như ở hình 6 [9].



Hình 6. Sơ đồ tương đương để chọn phần tử LC

Điện cảm lưới L_s có thể lưu ý cộng thêm nó với điện cảm tải L_L . Nhiệm vụ của tụ điện là tạo điều kiện thoát đối với các hài cao tần, tức là phải thỏa mãn điều kiện

$$|Z_{0,(n_{\min})}| = K_f |Z_{c,(n_{\min})}| \quad (23)$$

trong đó $Z_{0,(n)}$ là trở kháng của tải đối với thành phần n , còn $Z_{c,(n)}$ là trở kháng tụ điện bằng $-j/(n \omega_{(1)} C_f)$. Hệ số $K_f \gg 1$ tương đương tỷ số trở kháng bộ lọc và hệ thống đối với thành phần $n_{\min}$, trong đó $n_{\min}$ là bậc thành phần hài cực tiểu suy hao bởi bộ lọc. Hệ số này trực tiếp liên quan đến các thông số công suất của bộ biến đổi cùng với ảnh hưởng của tải. Giá trị của nó có thể xác định tùy chọn, trong công trình [6] có đề xuất giá trị của K_f xấp xỉ 300.

Hệ số truyền đạt đối với thành phần hài bậc n được mô tả bởi công thức [9].

$$K_{(n)} = \frac{U_{inj,(n)}}{U_{conv,(n)}} = \frac{1}{\omega_{(n)}^2 L_f C_f - 1} \quad (24)$$

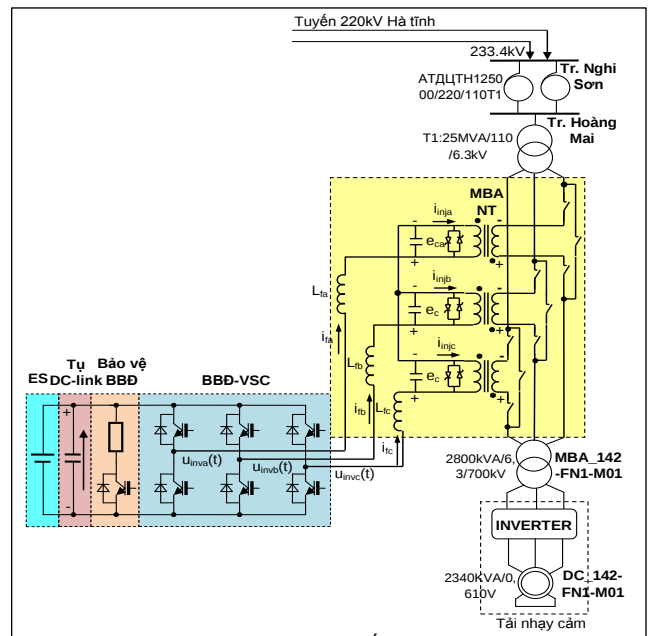
Biết giá trị cho phép cực đại $n_{\max}$, có thể xác định độ suy hao K_N và tiếp đó tính điện cảm L_f từ công thức.

$$L_f = \frac{1 + 1/K_N}{\omega_{(n)} C_f} \quad (25)$$

Áp dụng công thức (23) đến (25) có thể đưa vấn đề chọn các phần tử bộ lọc đến việc xác định hệ số K_f và K_N . Các thông số này có thể chấp nhận tùy chọn nhưng chúng cũng có ảnh hưởng đến các tham số của hệ thống DVR như công suất, sự suy giảm điện áp đối với hài cơ bản và sự ổn định của hệ thống điều khiển. Trong nghiên cứu [6] có đề xuất thủ tục chọn các hệ số K_f và K_N .

4. Ví dụ áp dụng tính toán thiết kế

Thiết kế áp dụng DVR được thực hiện để bảo vệ cho một phụ tải nhạy cảm quan trọng điển hình được khảo sát tại một nhà máy thuộc ngành sản xuất xi măng, đó là tổ hợp Biến tần-Động cơ quạt ID_142, có $P_{dc}=1975\text{kW}$ dùng để tạo áp suất âm trong hệ thống lò nung Linker tại nhà máy xi măng Hoàng Mai, đây là thiết bị thường xuyên chịu tác động của biến cố lỗi điện áp và gây dừng, dẫn đến các công đoạn khác của dây chuyền sản xuất cũng bị ngừng hoạt động.



Hình 7. Vị trí DVR tại 6,3kV và cấu trúc mạch lực của nó

Hình 7 là cấu trúc mạch lực và vị trí kết nối của DVR tại cấp điện áp 6,3 kV. Các ký hiệu trên hình được giải thích như sau: Điện áp và dòng điện 3 pha của bộ biến đổi VSC tương ứng được ký hiệu: $u_{inva}(t)$, $u_{invb}(t)$, $u_{invc}(t)$ và $i_{fa}(t)$, $i_{fb}(t)$, $i_{fc}(t)$. Điện áp trên tụ lọc: $e_{c,a}(t)$, $e_{c,b}(t)$, $e_{c,c}(t)$. Điện áp và dòng điện chèn vào tương ứng là: $u_{inj,a}(t)=e_{c,a}(t)$, $u_{inj,b}(t)=e_{c,b}(t)$, $u_{inj,c}(t)=e_{c,c}(t)$ và $i_{inj,a}(t)$, $i_{inj,b}(t)$, $i_{inj,c}(t)$. Điện áp phía DC-Line: $u_{dc}(t)$.

Việc thiết kế các thành phần sẽ được thực hiện theo các thủ tục ở mục 3, kết quả được tổng hợp ở bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp tham số của DVR và hệ thống

Tham số	Giá trị
Tham số nguồn:	Trạm biến áp T1_110/6,3kV nhà máy xi măng Hoàng Mai
Công suất nguồn cấp:	$S_{dm} = 25\text{MVA}$
Điện áp định mức của lưới	$U_{dm1}/U_{dm2} = 110/6,3 \text{ kV}$
Dòng điện định mức:	$I_{dm1}/I_{dm2} = 131,2/2107,1\text{A}$
Điện trở điện cảm nguồn:	$R_s = 0,05\Omega; L_s = 0,001\text{H}$
Tham số tải nhạy cảm:	Chính là tham số của biến áp T2_6,3/0,705kV, cấp nguồn cho tổ hợp Biến tần - Động cơ quạt công nghệ 142-FN1-M01
• Tham số MBA:	MBA 04-TF.02
Công suất định mức:	$S_{T1} = 2800\text{kVA}$
Điện áp dây định mức:	$U_{T1,cao}/U_{T1,ha} = 6,3/(0,63-0,69)\text{kV}$
Dòng điện định mức:	$I_{T1,cao}/I_{T1,ha} = 257/2570\text{A}$
• Tham số biến tần:	SVTL 2K4 (ITALYA)
Công suất định mức:	$S_{INV142} = 2400\text{kVA}$
Điện áp dây định mức:	$U_{INV142} = 0,690\text{kV}$
Van bán dẫn loại	IGBT-FF600 R16KF4 600A-1600V
• Tham số động cơ:	CT560Y6 (YTALYA)
Công suất định mức:	$P_{dc142} = 1975\text{kW}$
Điện áp dây định mức:	$U_{dc142} = 0,610\text{kV}$
Dòng điện tải:	$I_{dc142} = 2264\text{A}$
Tốc độ định mức:	$n_{dc142} = 1000\text{v/p}; \cos\varphi_{dm} = 0,86$
Tham số DVR	
Công suất danh định:	$S_{DVR} = 1400\text{kVA}$
Điện áp định mức:	$U_{DVR} = 3,15\text{kV}$

Dòng điện DVR: $I_{DVR} = 257A$

Bộ Biến Đổi Công Suất

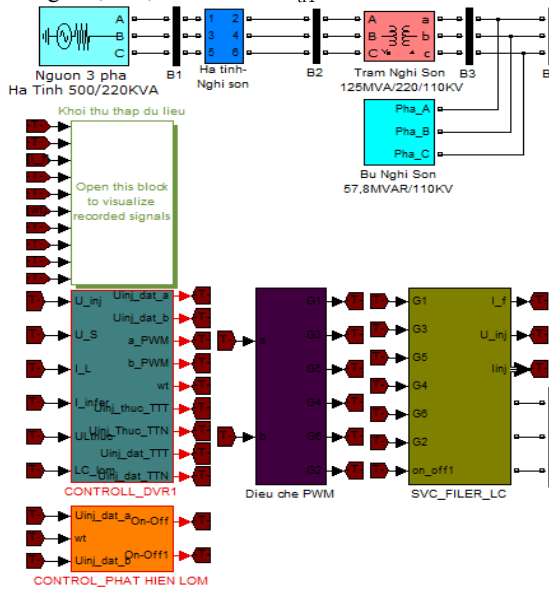
Công suất danh định: $S_{conv}=1400kVA$
 Điện áp dây: $U_{conv}=560V$
 Dòng điện dây: $I_{conv}=2570A$
 Điều chế: Điều chế vector không gian.
 Tần số điều chế: $f_c = 5kHz$
 Tần số chuyển mạch: $f_{sw}=5kHz$
 Tụ điện phía một chiều: $C_{dc} = 26mF$
 Điện áp định mức phía một chiều: $V_{dc} = 700V$

Bộ lọc đầu ra LC

Điện cảm bộ lọc: $L_f = 7,109mH$
 Tụ điện bộ lọc: $C_f = 6,942\mu F$
 Tần số cộng hưởng: $f_{res} = 717,27Hz$

Tham số máy biến áp nối tiếp

Công suất định mức: $S_{tr} = 1400kVA$
 Điện áp dây sơ cấp định mức: $U_1 = 3,15kV$
 mức:
 Dòng điện định mức sơ $I_{tr1} = 257A$



cấp:

Hệ số biến áp: $n = 10$
 Điện áp thứ cấp định mức: $U_2 = 0,63kV$
 Dòng điện định mức thứ $I_2 = 2570A$

cấp:

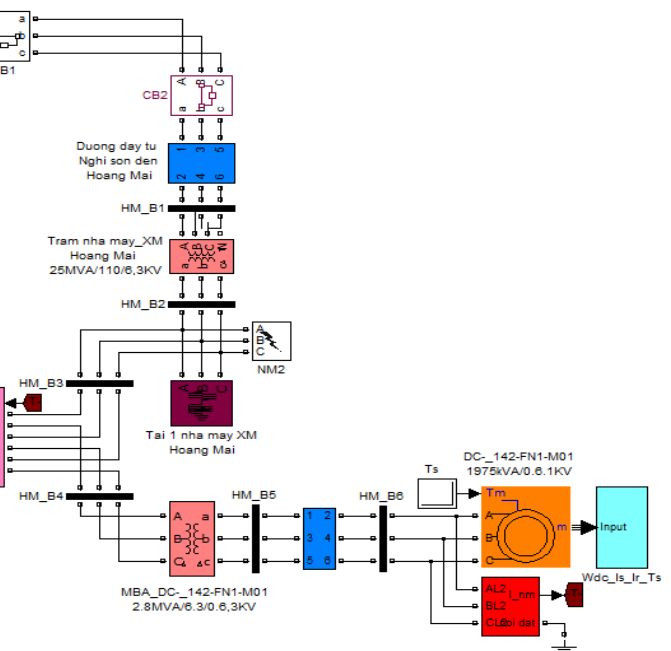
Điện trở, điện cảm mba: $L_{MBA}=0,007058H; R_{MBA}=0,00120\Omega$

5. Mô phỏng

Mô hình mô phỏng được xây dựng cho toàn bộ hệ thống đã tính toán ở mục 3.3. Mục tiêu của mô phỏng là kiểm tra khả năng khôi phục điện áp của DVR để bảo vệ cho phụ tải là hệ truyền động biến tần-động cơ 142 trước các biến cố lỗi điện áp sau đây:

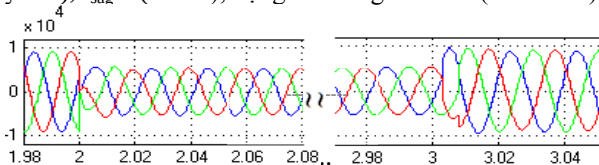
- Lỗi điện áp cân bằng.
- Lỗi điện áp không cân bằng.
- Dao động kết hợp méo dạng điện áp do đóng cắt hệ thống tự bù tại trạm Nghi Sơn, Thanh Hóa.

Mô hình mô phỏng Matlab/Simulink của hệ thống đã được xây dựng như trên hình 8.

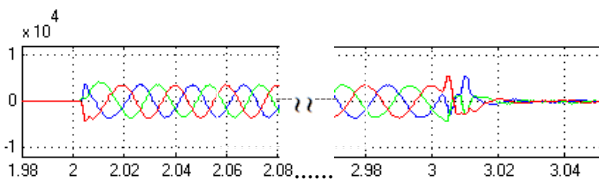


Hình 8. Mô hình hệ thống DVR kết nối lưới

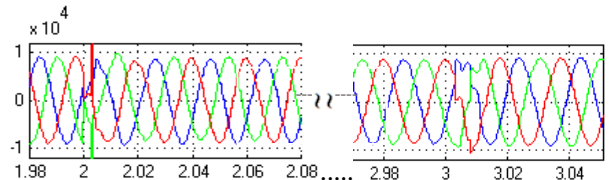
- **Trường hợp 1:** Kiểm tra khả năng bù lỗi điện áp cân bằng của DVR. Điện áp lồi trên cả ba pha = 50% ($\zeta=0.5$), $t_{sar} = (2s \div 3s)$, động cơ mang tải 50% (7000N/m):



Hình 9.a. Điện áp lưới u_g tại thời điểm bắt đầu và kết thúc lồi điện áp

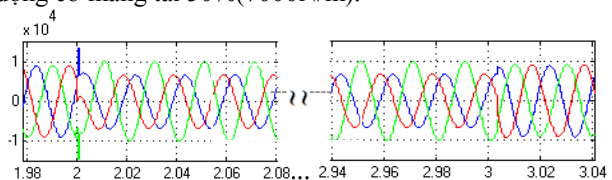


Hình 9.b: Điện áp thêm vào của DVR (u_{inj})

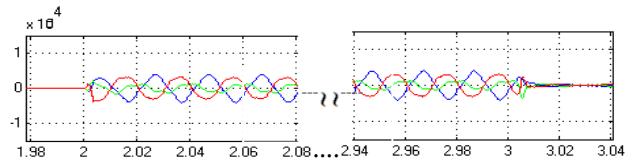


Hình 9.c. Điện áp tải được phục hồi (u'_L)

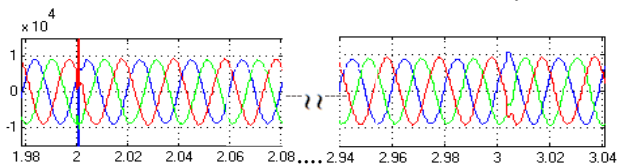
- **Trường hợp 2.** Kiểm khả năng của DVR trước lỗi điện áp không cân bằng. Điện áp trên các pha: pha A lồi=30%, Pha B lồi=30%, Pha C lồi=0%, $t_{sar}=(2s \div 3s)$, động cơ mang tải 50%(7000N/m).



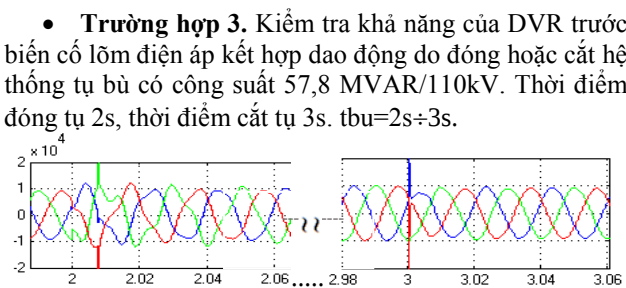
Hình 10.a. Điện áp lưới u_g tại thời điểm bắt đầu và kết thúc lờm điện áp không cân bằng



Hình 10.b. Điện áp thêm vào của DVR (u_{inj})

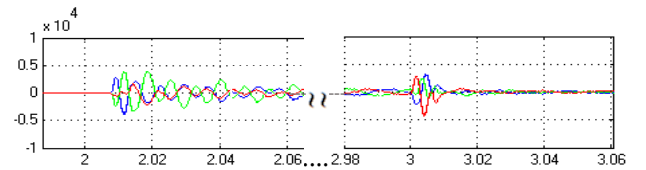


Hình 10.c. Điện áp tải được phục hồi (u'_L)

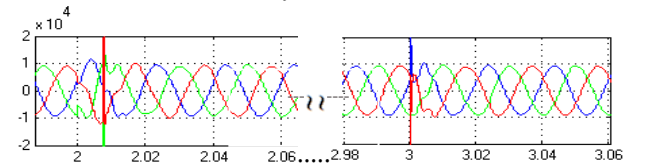


• **Trường hợp 3.** Kiểm tra khả năng của DVR trước biến cố lờm điện áp kết hợp dao động do đóng hoặc cắt hệ thống tụ bù có công suất 57,8 MVAR/110kV. Thời điểm đóng tụ 2s, thời điểm cắt tụ 3s. $t_{bu}=2s \div 3s$.

Hình 11.a. Điện áp nguồn u_g tại PCC khi thời điểm đóng và cắt tụ bù



Hình 11.b. Điện áp thêm vào (u_{inj}) của DVR tại thời điểm đóng và cắt tụ bù

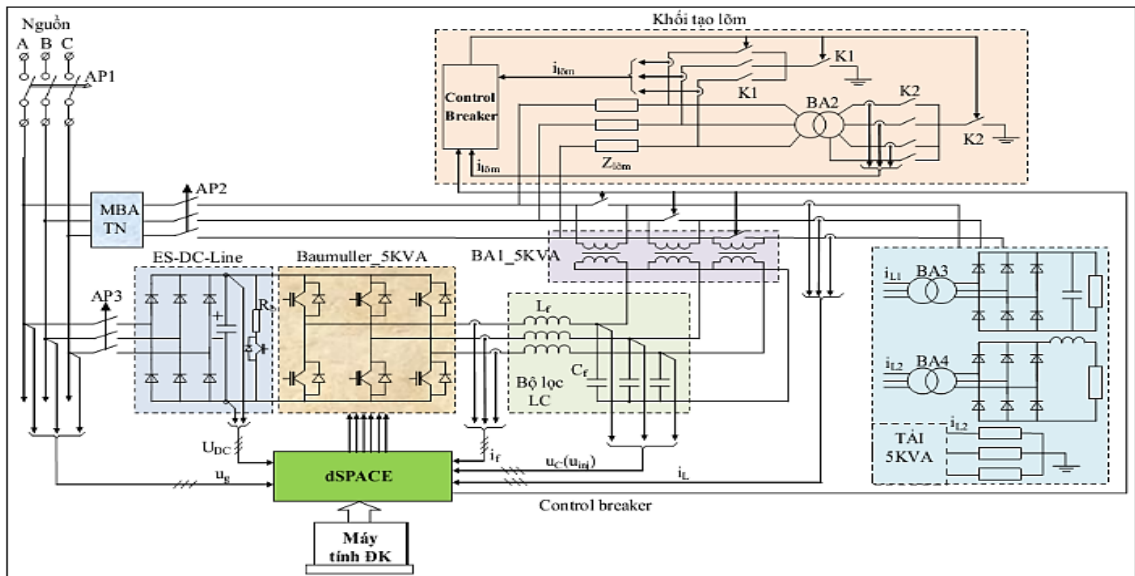


Hình 11.c. Điện áp tải (u'_L) được phục hồi tại thời điểm đóng và cắt tụ bù

6. Thực nghiệm

• **Mô hình thực nghiệm**

Bàn thí nghiệm được thiết kế để bảo vệ tải có công suất là 5kVA điện áp định mức là 220/380V. Sơ đồ nguyên lý bàn thí nghiệm DVR ở hình 12 và mô hình thực nghiệm DVR tại phòng thí nghiệm, hình 13.



Hình 12. Sơ đồ nguyên lý bàn thí nghiệm DVR



Hình 13. Mô hình thực nghiệm DVR tại phòng TN

Bảng 2. Các tham số thiết kế bàn thực nghiệm DVR

Tham số	Giá trị	Số lượng
Tham số lưới		
Điện áp lưới:	$U_{d,lm} = 400V$	
Tần số lưới định mức:	$f_G = 50Hz$	
Tham số BBD		
Van lực:	IGBT loại SKM400GB128, $V_{CE}=1200V$, $I_C = 400A$	1 bộ
Dòng điện phaBBD:	$I_{p,conv} = 50A$	
Điều chế:	Điều chế vector không gian	
Tần số điều chế:	$f_C = 5kHz$	
Tần số chuyển mạch:	$f_{sw} = 5kHz$	
Tụ điện phía một chiều:	$C_{dc} = 1600\mu F$	
Điện áp định mức phía một chiều:	$V_{dc} = 700V$	
Bộ lọc đầu ra LC	3 bộ	

Điện cảm bộ lọc:	$L_f = 2\text{mH}$	3 cuộn
Tụ điện bộ lọc:	$C_f = 1000\mu\text{F}$	3 cái
Tham số, máy biến áp	3 cái	
Công suất định mức:	$S_{tr} = 2\text{KVA}$	
Điện áp dây sơ cấp định mức:	$U_{pri} = 230\text{V}$	
Dòng điện định mức sơ cấp:	$I_{pri} = 7,217\text{A}$	
Hệ số biến áp:	$n = 1:2$	
Điện áp thứ cấp định mức:	$U_{pri} = 230\text{V}$	
Dòng điện định mức thứ cấp:	$I_{pri} = 7,217\text{A}$	
Điện cảm, điện trở mba:	$L_{pri}=0.007058\text{H}; R_{pri}=0.00120\Omega$	
Tham số của tải	3 bộ	
Điện cảm tải:	$L_t = 0.007058\text{H}$	3 cuộn
Điện trở tải:	$R_t = 0.00120\Omega$	3 cái
Tham số điện trở, điện cảm tạo lôm L_{lom}, R_{lom}		
$R_{lom1}/X_{lom1} = 1; R_{lom1} = 4\Omega; I_{dm} = 115\text{A}$	3 cái	
$R_{lom2}/X_{lom2} = 1; L_{lom2} = 0,01274\text{H}; I_{dm} = 115\text{A}$	3 cuộn	

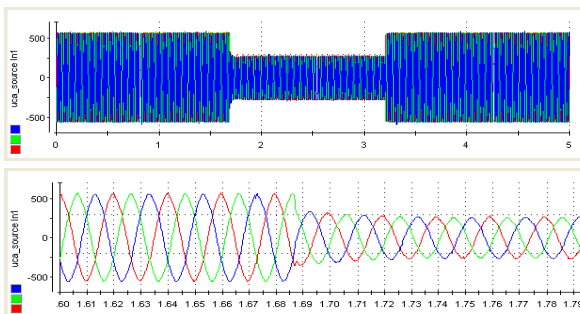
• Tiến hành thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm theo những trình tự đã được chỉ ra để đảm bảo an toàn và cho kết quả chính xác. Bước đầu tiên là kiểm tra khả năng đồng bộ lưới của DVR, điều này thực hiện với cấp điện áp thấp từ $(25 \div 50)\text{V}$. Bước tiếp theo kiểm tra khâu tạo lôm của bản thí nghiệm và lựa chọn độ sâu lôm, bước này được bắt đầu với cấp điện áp $15\%U_{sdm}$ sau đó tăng dần. Bước quan trọng tiếp theo là kiểm tra khả năng bù lôm của DVR. Để thử nghiệm chế độ bù của DVR, khởi động hệ thống đầu tiên bằng việc nạp tụ phía DC-line trong khoảng thời gian 15 phút, sau đó thực hiện tạo lôm điện áp trong khoảng thời gian từ 1,6805s đến 3,208s, khi lôm được phát hiện DVR tự động ngay lập tức thực hiện chế độ bù để khôi phục điện áp trên tải. Quá trình thực nghiệm được tiến hành tương tự cho đến khi đạt chế độ định mức với cấp điện áp 380V, độ sâu của lôm điện áp đạt $50\%U_{sdm}$.

• Kết quả thực nghiệm

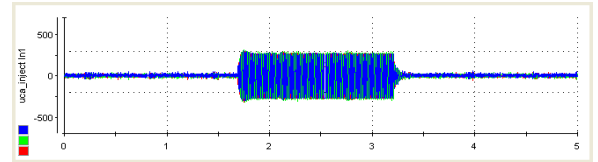
- Kiểm tra khả năng bù lôm của DVR ở chế độ tĩnh

Điều khiển tạo lôm để điện áp lưới sụt giảm còn lại 50% giá trị danh định (từ 380V sụt xuống 190V) từ 1,6805s đến 3,208s. Trong khoảng thời gian lôm DVR phải có khả năng tạo ra điện áp thêm vào lưới kịp thời để đảm bảo điện áp trên tải bằng điện áp tải đặt, tiếp tục duy trì hoạt động cho tải. Kết quả kiểm tra khả năng bù lôm điện áp của DVR ở chế độ tĩnh được thể hiện ở hình 14. Các đặc tính điện áp ở chế độ tĩnh khi DVR bù lôm điện áp với điện áp nguồn bị sụt giảm 50% so với giá trị danh định.

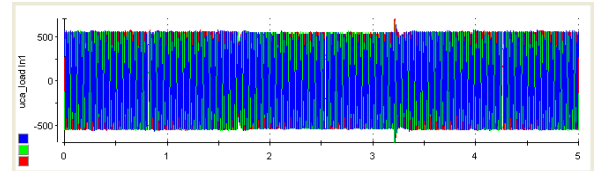


Hình 15a. Điện áp nguồn $u_{s,abc}$ tại điểm đầu và cuối của lôm điện áp

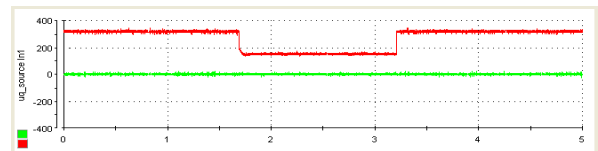
Hình 14a. Điện áp nguồn $u_{s,abc}$ trong khi lôm điện áp



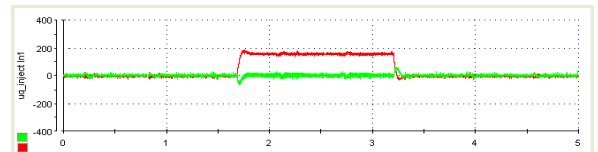
Hình 14b. Điện áp thêm vào của DVR $u_{inj,abc}$ trong khi bù lôm điện áp



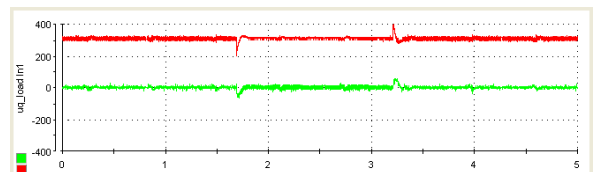
Hình 14c. Điện áp tải $u_{L,abc}$ được duy trì trong khi điện áp nguồn bị sụt xuống còn 50% do lôm



Hình 14d. Thành phần dq của điện áp nguồn u_s^{dq} trong khi lôm điện áp



Hình 14e. Thành phần dq của điện áp thêm vào bởi DVR u_{inj}^{dq} trong khi bù lôm điện áp

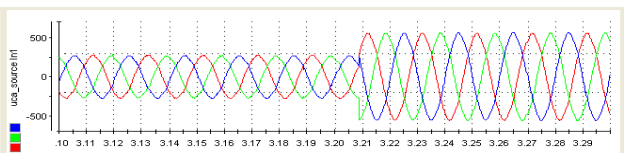


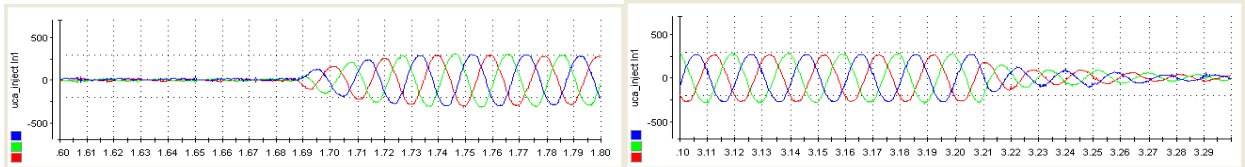
Hình 14f. Thành phần dq của điện áp tải u_L^{dq} được duy trì khi điện áp nguồn bị sụt còn 50% do lôm

- Kiểm tra khả năng bù lôm của DVR ở chế độ động

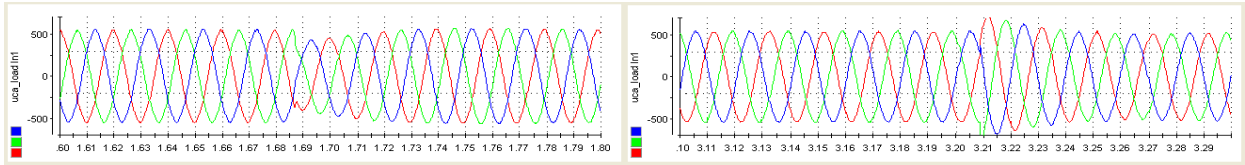
Khả năng làm việc ở chế độ động của DVR rất được quan tâm vì đây là thiết bị chuyên được dùng bù động các biến cố điện áp phức tạp trên lưới điện. Động học của hệ thống phải đảm bảo để tốc độ đáp ứng của DVR nhanh chóng, lượng quá điều chỉnh trước và sau khi kết thúc lôm không được quá lớn, không gây nhảy góc pha, không gây mất đối xứng điện áp và lượng hài trên lưới được hạn chế.

Hình 15a,b,c là các đặc tính của DVR ở chế độ động khi bù lôm điện áp với điện áp lưới bị sụt giảm 50% so với giá trị danh định.





Hình 15b. Điện áp chèn vào $u_{inj,abc}$ của DVR tại thời điểm bắt đầu và cuối bù lôm điện áp



Hình 15c. Điện áp tải $u_{L,abc}$ được bù tại thời điểm đầu và cuối của lôm điện áp

7. Kết luận

Trong bài báo thủ tục thiết kế DVR đã được chỉ ra có tính chất điển hình cho việc áp dụng tương tự DVR trong những trường hợp khác nhau trong thực tế. Kết quả mô phỏng trong ba trường hợp lôm phức tạp và thường gặp nhất đã cho thấy khả năng đáp ứng của DVR trước các biến cố để bảo vệ cho tải nhạy cảm (tải động) là tốt, thời gian phục hồi điện áp là nhanh chóng từ 0.002s đến 0.005s với các lôm điện áp từ 10%-50%. Kết quả thực nghiệm cho thấy DVR có thể khôi phục điện áp tải trong khoảng thời gian một chu kỳ điện áp lưới (0,02s) trong điều kiện độ sâu lôm điện áp 50% U_{sdm} , điện áp tải được khôi phục sau một chu kỳ giống như điện áp trước lôm, không phát hiện thấy có hiện tượng nhảy góc pha và méo dạng điện áp tại thời điểm ban đầu và kết thúc quá trình bù. lượng quá điều chỉnh cũng được giới hạn trong phạm vi cho phép. Như vậy có thể kết luận các tính toán thiết kế của DVR là chính xác, tin cậy, giải pháp áp dụng DVR để bù lôm điện áp bảo vệ tải nhạy cảm quan trọng trong các nhà máy công nghiệp là hoàn toàn phù hợp và có thể thực hiện được trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Angelo Baggi (2008) *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [2] Jovica V. Milanović (2006) *Voltage Sags*. School of Electrical & Electronic Engineering.
- [3] Yan Zhang, B.Sc., M.Sc (2008) *Techno-economic Assessment of Voltage Sag Performance and Mitigation*. Thesis submitted to The University of Manchester for the degree of PhD.
- [4] Marian P. Kazmierkowski; R. Krishnan; Frede Blaabjerg: *Control in Power Electronics*. Copyright 2002, Elsevier Science.
- [5] Ryszard Strzelecki, Grzegorz Benysek, "Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks", British Library Cataloguing in Publication Data, Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [6] Simone Buso; Paolo Mattavelli: *Digital Control in Power Electronics*. Copyright © 2006 by Morgan & Claypool.
- [7] M. Bobrowska-Rafal, K. Rafal, G. Abad, and M. Jasinski: *Control of PWM rectifier under grid voltage dips*. Bull. Pol. Ac. Tech. 2009.
- [8] Trần Duy Trinh, Nguyễn Văn Liễn, Trần Trọng Minh: *Bộ điều khiển vector hai mạch vòng nối tăng cho hệ thống phục hồi điện áp động giảm thiểu lôm điện áp trên lưới điện phân phối*. Số 91, Tạp chí khoa học và công nghệ, Trường ĐHBK Hà Nội, tháng 8 năm 2013.
- [9] A. Ghosh, A. K. Jindal, and A. Joshi, "Design of a capacitor-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and distorted loads," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 19, no. 1, Jan. 2004.

(BBT nhận bài: 01/08/2014, phản biện xong: 06/08/2014)