

SO SÁNH, ĐÁNH GIÁ, MÔ PHỎNG HOẠT ĐỘNG CỦA MỘT SỐ BỘ PFC (POWER FACTOR CORRECTION) CÔNG SUẤT BA MỨC ĐIỆN ÁP VÀ MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM BỘ DOUBLE - BOOST BA MỨC MỘT PHA ĐƠN CHIỀU

COMPARATIVE EVALUATION, SIMULATION OF THREE VOLTAGE LEVEL AC/DC
POWER FACTOR CORRECTION CONVERTERS AND EXPERIMENTATION
OF UNIDIRECTIONAL SINGLE PHASE THREE-LEVEL DOUBLE BOOST

Phạm Thị Thùy Linh

Trường Đại học Điện lực

Tóm tắt:

Bài báo phân tích, xây dựng cấu trúc các bộ biến đổi PFC ba mức chỉnh lưu điện áp xoay chiều 220 V hiệu dụng sang điện áp một chiều 800 V dạng so lệch. Nguyên lý điều khiển PWM (Pulse Width Modulation) được áp dụng trong tính toán và mô phỏng hoạt động của các sơ đồ AC/DC ba mức này. Từ các kết quả mô phỏng và tính toán so sánh tổn thất của các sơ đồ ba mức ta thấy rằng sơ đồ AC/DC PFC Double Boost (DB) ba mức có ưu điểm vượt trội nhất về tổng thể và đặc biệt trong các ứng dụng công suất trung bình đó là điện áp van nhỏ, khả năng mở rộng vận hành sang mạch ba pha dễ dàng, khả năng mở rộng sang nhiều mức điện áp hơn, tổn thất nhỏ, mật độ tổn thất trên van có điều khiển thấp. Mô hình thực nghiệm sơ đồ PFC Double Boost ba mức đã được thực hiện và đã kiểm chứng tốt kết quả tính toán và mô phỏng.

Từ khóa:

Hiệu chỉnh hệ số công suất, bộ biến đổi tĩnh, điều chế độ rộng xung, bộ biến đổi đa mức.

Abstract:

The paper analyzes the structures of non- differential three-level PFC converters that convert 220 V AC voltages to 800V DC voltages. The Pulse Width Modulation (PWM) control method is applied in the calculation and simulation of these three-level AC/DC diagrams. From simulation results and comparative loss calculations of three-level diagrams that the three-level PFC Double Boost (DB) structure has the greatest overall advantages, in particular, for the medium power applications: low-voltage switching-cells, easy to expand to three-phase circuit, easy to expand to more voltage levels (multilevel converters), low total loss, a low densitification loss of transistors. A three-level PFC Double Boost prototype was built to validate studies.

Keywords:

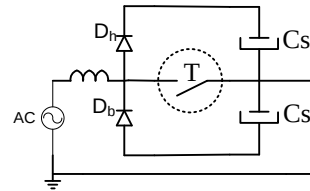
Power factor correction, static converter, pulse width modulation, multilevel converter.

Ngày nhận bài: 21/8/2017, ngày chấp nhận đăng: 3/10/2017, phản biện: TS. Nguyễn Phúc Huy.

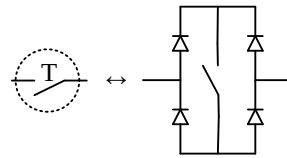
1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, phần lớn các hệ thống năng lượng điện sử dụng các bộ biến đổi đa mức để có được điện năng hiệu suất cao. Các hệ thống này cũng phải làm việc tin cậy, an toàn, liên tục trong suốt thời gian làm việc. Yêu cầu về độ tin cậy này có được một mặt là nhờ công nghệ van bán dẫn, một mặt nhờ thiết kế các cấu trúc sơ đồ mới đáp ứng được yêu cầu như trên. Ta biết rằng các sơ đồ chỉnh lưu được sử dụng như là giao diện giữa lưới xoay chiều AC và tải một chiều DC. Không giống như các sơ đồ chỉnh lưu truyền thống (sơ đồ chỉnh lưu cầu, tia...) sử dụng điôt hay thyristo làm méo dạng tín hiệu nguồn và có lượng sóng hài rất cao. Chính vì vậy có rất nhiều nghiên cứu để cải thiện chất lượng điện năng của các bộ chỉnh lưu AC/DC [1-3]. Trong bài báo này, các sơ đồ đa mức được trình bày cho phép cải thiện thành phần sóng hài của dòng điện xoay chiều để có được hệ số công suất gần 1, và tăng mức điện áp DC ở giá trị lớn hơn điện áp AC. Tác giả sẽ nghiên cứu hoạt động của các sơ đồ, đề xuất phương pháp điều khiển chung cho các sơ đồ trên cơ sở đó thực hiện so sánh tính toán và mô phỏng hoạt động của các sơ đồ với cùng điều kiện nguồn và tải. Bài toán so sánh tổn thất cũng được đề xuất thực hiện để dựa vào đó lựa chọn được sơ đồ Double-Boost tối ưu đưa sang thiết kế mô hình thực nghiệm. Trong nghiên cứu này, phần điều khiển bao gồm một mạch điều khiển dòng điện đầu vào và ba mạch điều khiển điện áp đầu ra. Mạch điều khiển dòng điện cho phép giảm méo dòng điện và nâng cao hệ số công suất của bộ

biến đổi. Kết quả thực nghiệm đã cho thấy hiệu quả của phương pháp điều khiển.



Hình 1. Sơ đồ boost AC/DC



Hình 2. Sơ đồ Boost AC/DC một transisto

2. PHÂN TÍCH CÁC BỘ BIẾN ĐỔI AC/DC BA MỨC ĐƠN CHIỀU

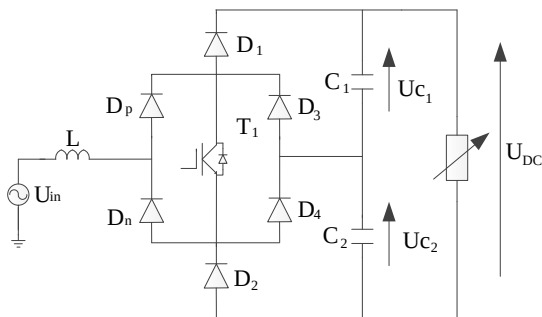
Sơ đồ tổng quát không so lệch của các bộ AC/DC PFC tăng áp có dạng như ở hình 1, vấn đề ở đây là ta cần phải thiết kế được van bán dẫn trung tâm T có hai chiều dòng điện, và hai chiều điện áp, tức là van làm việc ở cả 4 góc phần tư.

Van bán dẫn T này có thể tương đương với sơ đồ cầu 4 điôt và 1 van bán dẫn chỉ cần dẫn dòng và áp 1 chiều (hình 2), ghép vào sơ đồ hình 1 ta được sơ đồ hình 3, bộ biến đổi không so lệch này có ba mức điện áp đầu vào có tên là VIENNA [4] (hình 3). Trên hình 1, ta thấy các điôt D_h , D_b phải được chọn theo điện áp tổng phía bus DC, ngược lại với sơ đồ hình 3, các điôt D_h , D_b giờ đây chỉ cần được chọn theo một nửa điện áp bus DC, làm cho tổn thất trên van sẽ nhỏ đi. Tuy nhiên, trong trường hợp này thì tổn thất tổng của mạch cần bổ sung thêm phần tổn thất phía chỉnh lưu đầu vào D_p , D_n .

Van T cũng có thể được thực hiện bằng cách kết hợp hai van bán dẫn ba góc phần tư, hoặc là mắc nối tiếp ngược nhau, hoặc là mắc song song ngược nhau. Với cách mắc nối này ta sẽ có được họ các sơ đồ BNPC (Bidirectionnal Neutral Point Clamped) [5] (hình 4). Họ các sơ đồ này cho phép giảm thiểu số lượng các phần tử mắc nối tiếp và sụt áp khi dẫn dòng của nhánh trung tâm. Tuy nhiên, điện áp khi khóa của các diốt D_h và D_b lại là toàn điện áp bus DC.

Bằng cách đưa hai diốt được khoanh trong vùng nét đứt về phía trước, ta được sơ đồ DB (Double Boost) ba mức. Tương tự như sơ đồ VIENNA, các diốt D_h , D_b chỉ mang một nửa điện áp bus DC. Như vậy, sơ đồ này lấy được các ưu điểm của sơ đồ BNPC và VIENNA (hình 5).

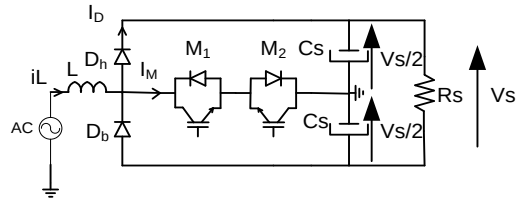
Cuối cùng, bằng việc hoán đổi vị trí của D_p và M_b , D_n và M_h của sơ đồ DB ba mức, ta có được sơ đồ NPC (Neutral Point Clamped) ba mức (hình 6). Sơ đồ này có các tính chất tương tự sơ đồ DB nhưng với số lượng các phần tử chuyển mạch nối tiếp lớn hơn.



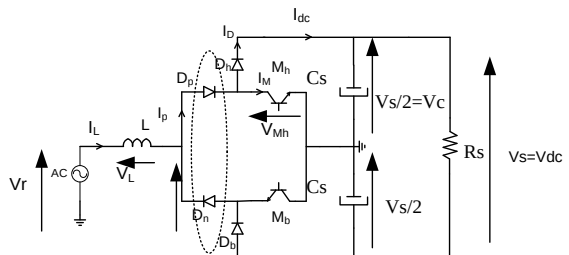
Hình 3. Sơ đồ cấu trúc mạch PFC VIENNA

Hiện nay thì sơ đồ NPC được nghiên cứu và ứng dụng nhiều nhất trong công nghiệp

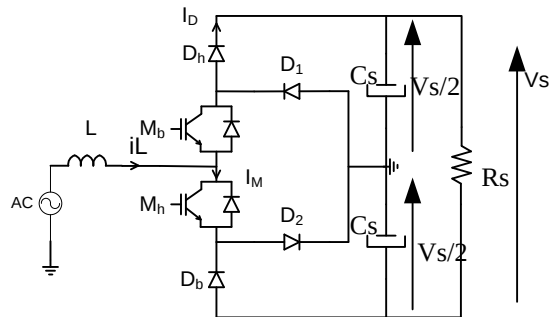
nhưng ở mạch nghịch lưu DC/AC [6]. Trong phần tiếp theo tác giả sẽ nghiên cứu phương pháp điều khiển cho các sơ đồ AC/DC ba mức này.



Hình 4. Cấu trúc của sơ đồ BNPC ba mức



Hình 5. Sơ đồ PFC DB ba mức



Hình 6. Sơ đồ PFC NPC ba mức

3. GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN CỦA CÁC SƠ ĐỒ CHỈNH LƯU BA MỨC

Phương pháp phổ biến và hiệu quả thường được dùng để điều khiển sơ đồ chỉnh lưu ba mức là phương pháp điều chế độ rộng xung PWM [7]. Chính vì vậy trong bài báo này tác giả sẽ áp dụng nguyên lý điều chế PWM áp dụng cho các sơ đồ chỉnh

lưu ba mức DB. Sau khi phân tích tác giả thấy rằng các sơ đồ được giới thiệu ở trên có thể được áp dụng cùng một nguyên lý điều khiển chung, sơ đồ cấu trúc điều khiển được thể hiện ở hình 7.

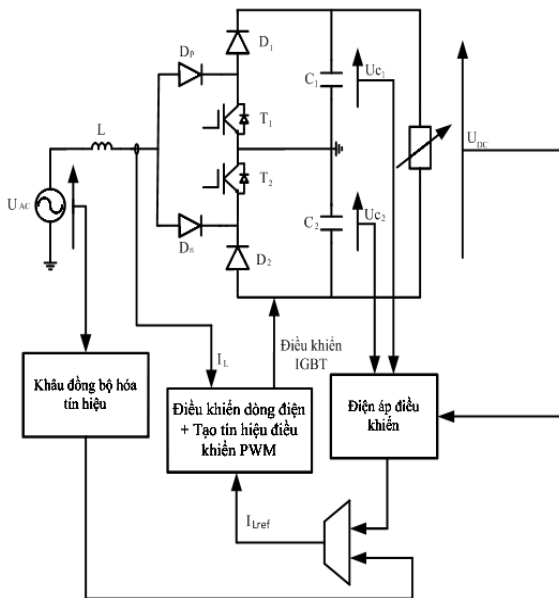
Cách điều khiển ở đây là ta điều khiển dòng điện nguồn cùng pha với điện áp nguồn. Transisto M_h chỉ được điều khiển trong nửa chu kỳ dương của điện áp lưới trong khi transisto M_b chỉ được điều khiển trong nửa chu kỳ còn lại. Trong một chu kỳ chuyển mạch T_{sw} ta có điện áp trung bình của tín hiệu vào bộ biến đổi (1):

$$V_{in} = m(t) \frac{V_s}{2} \quad (1)$$

với tín hiệu đặt $m(t) = M_{max} \cdot \sin(\theta - \varphi)$;

φ : góc lệch pha giữa dòng điện và điện áp nguồn ;

V_s : điện áp bus DC.



Hình 7. Sơ đồ cấu trúc điều khiển của các bộ chỉnh lưu ba mức

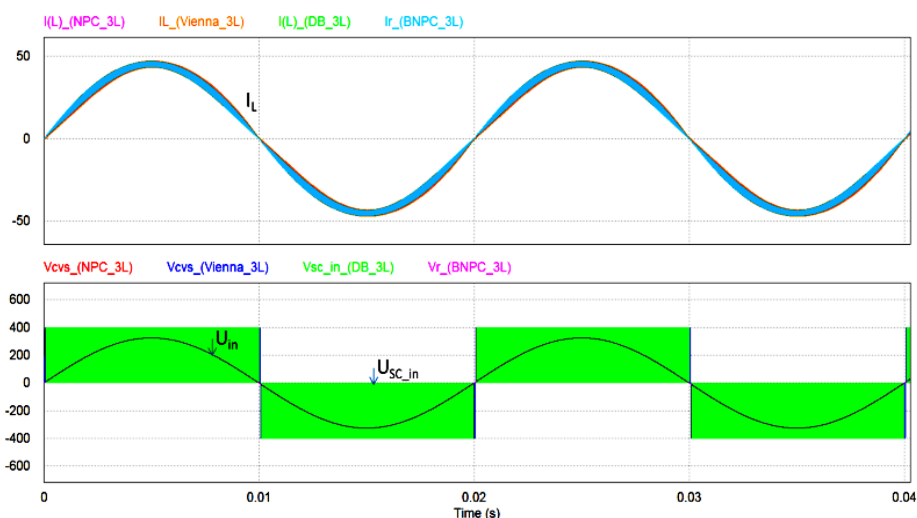
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Đối với các sơ đồ DB, BNPC, và NPC việc điều chế thực hiện đối với hai nhóm chuyển mạch xếp chồng, mỗi nhóm có một transisto. Bởi vì mỗi nhóm chuyển mạch chỉ hoạt động trong một nửa chu kỳ, cho nên ta sẽ chọn hai tín hiệu răng cưa xếp chồng. Tín hiệu tựa chuyển từ so sánh với sóng răng cưa này sang sóng răng cưa khác được thực hiện bằng cách phát hiện sự thay đổi dấu của nguồn. Tuy nhiên, đối với sơ đồ VIENNA, việc điều chế được thực hiện bằng giá trị tuyệt đối của tín hiệu tựa.

Vị trí của hai tín hiệu xung răng cưa xếp chồng và không lệch pha này cho phép thực hiện việc điều chế tuần tự. Trong các pha không điều chế, các transisto được điều khiển ở trạng thái dẫn dòng liên tục điều này cho phép kiểm soát sự phân bố điện áp trên các van bán dẫn bị khóa mắc nối tiếp với chúng (Ví dụ M_h dẫn làm cho D_h chịu điện áp ngược $V_s/2$ và D_p chịu điện áp $V_s/2$) (hình 5).

Kết quả mô phỏng đạt được ở hình 8 cho thấy hiệu quả trong điều khiển đồng pha dòng điện và điện áp, đạt được điện áp ra ba mức và dòng điện hình sin (hình 8). Như vậy với phương pháp điều khiển PWM có phản hồi được áp dụng và cấu trúc hoạt động của mạch, các bộ chỉnh lưu ba mức kể trên không cần thiết một bộ lọc đầu vào.

Từ việc biết nguyên lý điều chế và dạng sóng của các tín hiệu dòng điện trên các van tín hiệu điện áp ở đầu vào của bộ biến đổi U_{in} cho phép ta tính toán tổn thất trong các van, cũng như của toàn bộ bộ biến đổi. Từ đó ra sẽ thực hiện việc so sánh và rút ra được sơ đồ tốt nhất.



Hình 8. Dạng sóng dòng điện và điện áp của các bộ chỉnh lưu ba mức (220 VAC, 50 Hz-800VDC, điều khiển PWM, $F_{sw}=40$ kHz)

5. SO SÁNH TỶ SỐ TỶ SỐ KHI DẪN DÒNG

Chúng ta thấy dòng điện và điện áp khi chuyển mạch trong một chu kỳ điều chế là như nhau đối với các sơ đồ VIENNA, BNPC, DB và NPC. Như vậy tổn thất khi chuyển mạch là giống nhau. Như vậy việc so sánh tổn thất tổng chuyển về so sánh tổn thất khi dẫn dòng. Để thực hiện việc tính toán so sánh, việc lựa chọn các van bán dẫn 600 V do điện áp bus DC là 800V và dòng điện nguồn có giá trị hiệu dụng 15A và 35A (bảng 1).

Các tổn thất khi dẫn (ΔP) trong các van bán dẫn được ước tính theo phương trình (2) [8] sau:

$$\Delta P = 2 \cdot [V_{do} \cdot I_D + R_d \cdot I_{DRMS}^2] \quad (2)$$

I_D và I_{DRMS} là các dòng điện trung bình và hiệu dụng đi qua van được tính theo các phân tích toán học đối với mỗi cấu trúc trong một chu kỳ chuyển mạch $1/F_{sw}$ (F_{sw} : tần số chuyển mạch). Còn V_{do} (sự

áp khi dẫn của điôt) và R_d (điện trở động, tương tự như đối với điôt, R_{DSON} đối với transistor) được tính từ những thông số cho bởi nhà sản xuất ở $T_j=125^\circ\text{C}$.

Bảng 2 tóm tắt các kết quả có được trong tính toán các giá trị của dòng điện trung bình và hiệu dụng qua các van.

Bảng 1. Các thông số chính của van

Tên Van bán dẫn	R_{DSON} [mΩ] 125°C	V_{do} [mV] 125°C	R_d [mΩ] 125°C
IGBT FGB20N60SFD	57	625	170
Điôt SiC Schottky 600V GP2DO20A060B		800	41
Điôt chỉnh lưu 600V APT30DS60B		1000	35,7
Điôt SiC Schottky 1200V GP2DO20A120B		800	62,5

Bảng 2. Các giá trị trung bình và hiệu dụng của dòng điện qua các van bán dẫn

Van bán dẫn	Giá trị trung bình của dòng điện	Giá trị hiệu dụng của dòng điện
Trans	$I_{Mh} = \frac{I_M}{\pi} - \frac{I_M V_M}{2V_S}$	$I_{MhRMS}^2 = \frac{I_M^2}{4} - \frac{4I_M^2 \cdot V_M}{3\pi V_S}$
Điôt HF	$I_{Dh} = \frac{I_M V_M}{2V_S}$	$I_{DhRMS}^2 = \frac{4I_M^2 \cdot V_M}{3\pi V_S}$

Thay bộ thông số nguồn và tải điện áp cực đại của nguồn AC $V_M=230\sqrt{2}V$; điện áp bus DC $V_S=800V$; dòng điện cực đại của nguồn AC $I_M= I_{LRMS} \sqrt{2}A$. Từ đó ta có được :

Bảng 3. Kết quả của các dòng điện trung bình và hiệu dụng của các điôt và transisto tương ứng với dòng điện nguồn 15A và 35A hiệu dụng

	$I_{LRMS}=15A$	$I_{LRMS}=30A$
Dòng điện trung bình ID	4,12A	8,25 A
Dòng điện hiệu dụng ID_{RMS}	8,62 A	17,24A
Dòng điện trung bình IM	2,63A	5,26A
Dòng điện hiệu dụng IM_{RMS}	6,17A	12,36A

Qua bảng kết quả (bảng 3) trên ta thấy rằng dòng điện qua điôt D_h và D_b lớn hơn hẳn dòng điện qua các transisto, cũng chính vì thế mà ta nên chọn các điôt SiC chịu được nhiệt độ tốt.

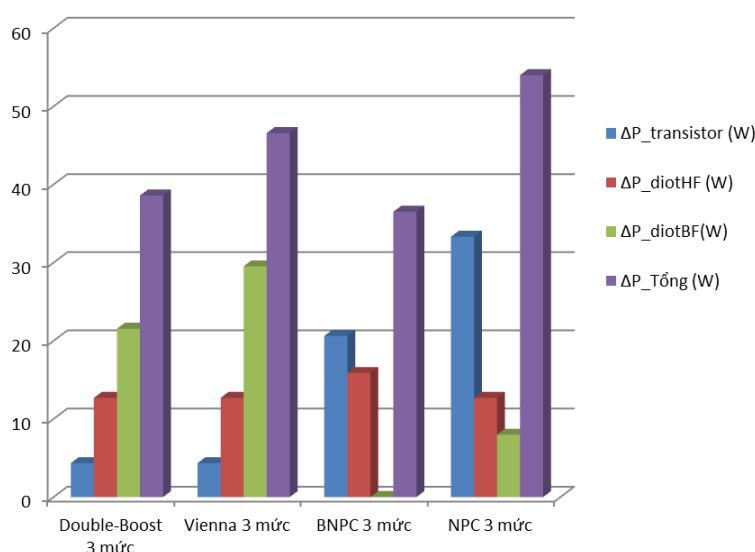
Các kết quả tính toán tổn thất khi dẫn của các sơ đồ ba mức được tổng hợp ở hình 9 ứng với dòng điện 15A hiệu dụng. Tổn

thất tổng của sơ đồ bao gồm tổn thất trên các transisto, tổn thất trên các điôt cao tần, và tổn thất trên các điôt thấp tần. Đối với sơ đồ DB ba mức, các điôt cao tần ở đây là D_h và D_b , còn các điôt thấp tần là D_p và D_n . Trong khi đó đối với sơ đồ Vienna thì khác sơ đồ DB ở chỗ các điôt thấp tần ngoài hai điôt chỉnh lưu thì cần bổ sung thêm các điôt mắc nối tiếp với transisto trong một vòng chuyển mạch, ta có thể chọn SiC600 hoặc Red600. Riêng sơ đồ BNPC, thì không có các điôt thấp tần và phần tổn thất trên các transisto phải tính thêm tổn thất trên các điôt mắc song song ngược với nó (body diode), điểm chú ý là các điôt cao tần phải được chọn theo điện áp V_s , vì vậy với điện áp phía bus DC là 800V ta cần chọn điôt SiC 1200 hoặc hai điôt SiC 600 mắc nối tiếp nhau. Cuối cùng, đối với sơ đồ NPC, tổn thất trên các transisto cũng cần bổ sung thêm tổn thất trên các body diode, phía các điôt cao tần thì tương tự sơ đồ DB, riêng các điôt thấp tần thì không có phần tổn thất trên các điôt chỉnh lưu, tuy nhiên các điôt mắc nối tiếp transisto trong một vòng chuyển mạch có thể chọn điôt SiC 600 hoặc SiC 800 vì chúng được chọn theo $V_s/2$.

Sơ đồ BNPC có tổn thất khi dẫn là nhỏ nhất, tuy nhiên kết quả tổn thất cũng cho thấy tổn thất trên các van đóng mở của sơ đồ này cũng lớn thứ hai và các điôt của sơ đồ phải được chọn với mức điện áp gấp đôi tức là các điôt SiC Schottky 1200 V.

Về mặt tổng thể, sơ đồ DB là sơ đồ tốt nhất, có tổn thất nhỏ với mật độ tổn thất trên các transisto thấp, số lượng các van

bán dẫn trong một vòng chuyển mạch ít nhất cho phép giảm các điện cảm kết nối và quá điện áp khi chuyển mạch. Sơ đồ này có một ưu điểm nữa là khả năng mở rộng dễ dàng đến các sơ đồ có số mức cao hơn. Trong phần tiếp theo tác giả sẽ xây dựng mô hình thực nghiệm sơ đồ DB để kiểm chứng các kết quả tính toán và mô phỏng.



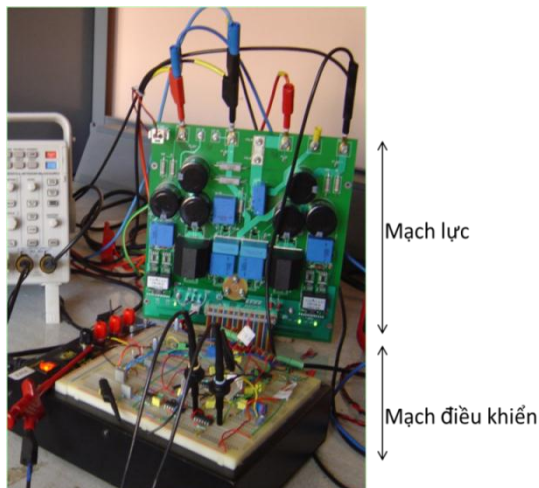
Hình 9. Tổn thất khi dẫn dòng của các bộ chỉnh lưu PFC tăng áp ba mức ứng với dòng điện 15A hiệu dụng

6. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

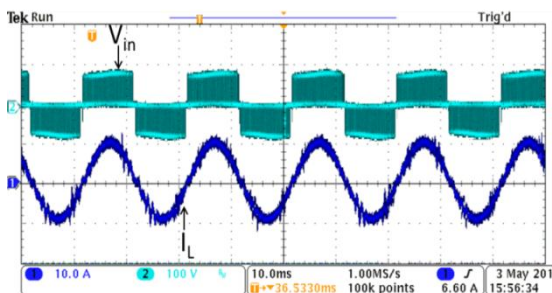
Mô hình thí nghiệm bao gồm hai phần: phần mạch lực là sơ đồ ba mức PFC Double Boost 4 kW; và phần điều khiển được thực hiện bằng điều khiển điều chế độ rộng xung PWM có phản hồi dòng và áp sử dụng mô đun L4981 (hình 10).

Nguồn cấp là một máy phát điện xoay chiều có tần số thay đổi, trong khi tải là một chiều có công suất 4 kW. Các cảm biến dòng điện và điện áp phía xoay chiều được sử dụng lần lượt là LAH 50-P và

LV25-P. Các tụ điện phía một chiều được lựa chọn là $6 \times 220\mu F/450V/EPCOS$ Alu, và cảm biến điện áp tương ứng là LV25-P. Kết quả thực nghiệm 60 VAC/200 VDC (hình 11) bước đầu đã kiểm chứng tốt mạch lực và phương pháp điều khiển. Điện áp đầu vào của mạch có dạng ba mức trong đó dòng điện AC thì gần sin mặc dù trong mô hình thí nghiệm không có bộ lọc đầu vào. So với các bộ chỉnh lưu thông thường thì sơ đồ này có ưu điểm vượt trội về mặt tín hiệu.



Hình 10. Mô hình thí nghiệm mạch AC/DC PFC Double-Boost ba mức



Hình 11. Kết quả thí nghiệm mạch ba mức AC/DC PFC Double-Boost ($F_{sw}= 32$ kHz), 60 VAC/ 200 VDC, không lọc tín hiệu đầu vào

7. KẾT LUẬN

Bài báo đã thống kê được các sơ đồ PFC tăng áp có cấu trúc tương tự nhau cùng với các đặc điểm nổi bật của chúng. Phần điều khiển cho các bộ biến đổi được tính toán và mô phỏng bằng phương pháp điều chế độ rộng xung PWM. Bài báo đã chỉ ra rằng, với cùng một điều kiện nguồn và tải thì các bộ biến đổi đa mức, cụ thể là ba mức ở đây có điện áp van nhỏ hơn, mật độ tổn thất nhỏ hơn so với các bộ chỉnh lưu truyền thống, và hơn nữa một tính toán về tổn thất đã cho thấy rằng bộ biến đổi BNPC ba mức có tổn thất nhỏ nhất, tuy nhiên van bán dẫn diode phải chọn với mức điện áp gấp đôi và tổn thất trên transistor rất lớn cho nên bộ biến đổi DB ba mức với tổn thất nhỏ và các đặc điểm hoạt động nổi bật sẽ là bộ biến đổi tối ưu cho các ứng dụng công suất trung bình, tần số lớn. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã được tác giả trình bày. Hướng tiếp theo của tác giả sẽ là mở rộng sơ đồ lên các mức cao hơn và chuyển từ mô phỏng tương tự sang mô phỏng số.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Le Claire J.C, Radouane A., Ginot N., Moreau R., "Simple Topology and Current Control for Fast AC/DC Converter with Unity Power Factor", 11th International Power Electronics and Motion Control Conference, Riga, Latvia, 2-4 September 2004, CDROM ref. ISBN 9984-32-010-3.
- [2] B. Singh, K. Al Haddad, A. Pandey, D. P. Kothari, "A Review of Single-Phase Improved Power Quality AC/DC Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.50, N°5, pp 962-981, October 2003.
- [3] M.L. Heldwein, M. S. Ortmann, S.A. Amusa, "Single-phase PWM Boost-type Unidirectional Rectifier Doubling the Switching Frequency", 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2009, Sept. 8-10, Barcelona, Spain, 2009.

- [4] Johann W.Kolar, Hans Ertl, "*Design and experimental investigation of a three-phase high power density high efficiency unity power factor PWM (VIENNA) rectifier employing a novel integrated power semi-conductor module*", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual, Volume 2, 3-7 March 1996, pp. 514 – 523.
- [5] Keith A.Corzine, James R.Baker, "*Reduced parts count multilevel rectifiers*", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol.49, n°4, August 2002.
- [6] Ning-Yi Dai, Man-Chung Wong and Ying-Duo Han, "*Application of a three-level NPC inverter as a three-phase four-wire power quality compensator by generalized 3DSVM*," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 2, pp. 440-449, March 2006.
- [7] T. Meynard, H. Foch, "*Multilevel choppers for high voltage applications*", European Power Electronics Journal, Vol. 2, n°1, pp. 45-50, Mar. 1992.
- [8] S. Deng, H. Mao, T. Wu, "*Power losses estimation platform for power converters*", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE.

Giới thiệu tác giả:



Pham Thi Thuy Linh received the M2R degree from Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Hydraulique de Toulouse, Toulouse, France in 2008 and Ph.D degree from Institut National Polytechnique de Toulouse, France in 2011. Her work at Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, Toulouse proposed a solution of new converter more reliable and performance for the electrical system in the new version of Airbus. After that, she worked at IT link System company which coporated with Socomeccompany, Strasbourg, France. Here, she is a member of the developement team for the new versions of Uninterruptible Power Supply.

She is actually Lecturer and Researcher at Electric Power University, Hanoi, Vietnam. Her fields of interest: Power electronics, series multicell converters for high power and high performance application, digital control signal and diagnostic of converter.