

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ BỘ SẠC PIN NHANH CHO XE Ô TÔ ĐIỆN

DESIGN OF FAST CHARGERS FOR ELECTRIC VEHICLES

Nguyễn Hữu Hiếu, Trịnh Trung Hiếu

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; nhieu@dut.udn.vn, tthieu@dut.udn.vn

Tóm tắt - Mạch chỉnh lưu cầu 3 pha bằng diode kết hợp với bộ chuyển đổi DC/DC có cấu trúc toàn cầu đôi chủ động (Dual Active Bridge - DAB) được nghiên cứu, đề xuất để dùng làm bộ sạc pin nhanh cho ô tô điện. Bộ sạc pin này có khả năng truyền tải công suất lớn để cung cấp năng lượng cho ô tô điện trong khoảng thời gian ngắn. Các phần tử được tính toán thiết kế đảm bảo hiệu suất hoạt động cao, cách ly an toàn giữa lưới và pin của xe ô tô thông qua máy biến áp cao tần, hạn chế sử dụng các phần tử thụ động để giảm kích thước. Quá trình tính toán, lựa chọn phần tử và mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm Matcad và Matlab-Simulink cho thấy hiệu suất của bộ sạc xung quanh giá trị 90% với thời gian sạc đầy 80% dung lượng của pin trong vòng 25 phút, cấu trúc điều khiển phù hợp với đặc tính sạc của pin.

Từ khóa - ô tô điện; bộ sạc pin nhanh; mạch toàn cầu đôi chủ động DAB; cách ly an toàn; AC/DC

1. Đặt vấn đề

Nguồn nhiên liệu hóa thạch đang ngày càng bị cạn kiệt, các phương tiện giao thông sử dụng động cơ đốt trong đang từng ngày gây sức ép về vấn đề nhiên liệu cũng như là tác động tiêu cực đến môi trường không khí. Mặt khác, xu thế phát triển và sử dụng nguồn năng lượng mới, năng lượng sạch đang ngày càng được phổ biến, nhất là trong quá trình sản xuất điện năng. Với những ưu điểm nổi bật của mình, xe ô tô điện sẽ chiếm lĩnh và thay thế xe sử dụng động cơ đốt trong trong một tương lai không xa. Do đó, việc chuẩn bị cơ sở hạ tầng phục vụ cho sự phát triển xe điện, trong đó các trạm sạc điện là vấn đề rất cấp thiết.

Hiện nay, có nhiều nghiên cứu và các hãng cũng đã sản xuất ra nhiều loại sạc pin khác nhau. Bộ sạc pin thường được phân thành 3 cấp dựa trên công suất sạc [1], [2]. Bộ sạc pin cấp 1, cấp 2 có công suất cực đại lần lượt 3,3 kW và 14,4 kW. Với công suất này, có thể thiết kế bộ sạc pin nhỏ, gọn và khối lượng vừa phải, không gây tổn nhiều nhiên liệu khi xe chạy. Tuy nhiên, đối với hai loại sạc pin này, công suất không đủ cung cấp cho các xe điện có dung lượng pin lớn và di chuyển trong một đoạn đường dài.

Bộ sạc pin cấp 3 là bộ sạc nhanh, có công suất lớn, thường dao động từ 50 kW đến 100 kW [3], công suất cực đại có thể lên đến 240 kW. Do đó, kích thước và khối lượng của bộ sạc này lớn gây ảnh hưởng đến sự hoạt động của xe điện. Bộ này thường nằm bên ngoài xe, cung cấp trực tiếp điện áp một chiều cho khối pin bên trong. Tuy nhiên, bộ sạc pin không có cách ly an toàn giữa đầu vào và đầu ra, nên hệ thống pin dễ bị hư hỏng khi có sự cố từ lưới điện hoặc sự cố từ bộ sạc pin.

Trong bài báo này, tác giả đề xuất phương án thiết kế cũng như tính toán các tham số của bộ sạc pin nhanh cho ô tô điện được sử dụng đặt tại các trạm sạc pin. Bộ sạc này có công suất lớn (50 kW), thời gian sạc nhanh, thời gian sạc đầy 80% dung lượng của pin chỉ khoảng 25-30 phút, có

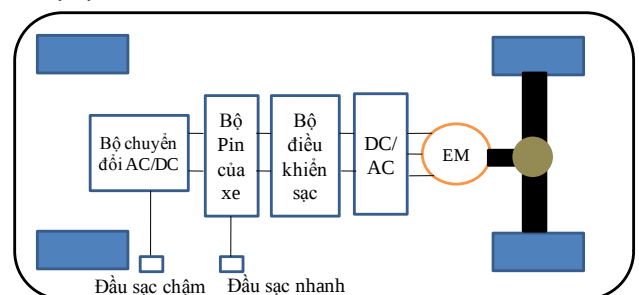
Abstract - Three-phase diode rectifier and Dual Active Bridge converter are selected to design model of the fast charger for electric vehicles. The advantage of model is high efficiency, galvanic isolation, and low volume. It is capable of providing high power for electric vehicles in short time. Fast charger components are designed to ensure high performance. After determining the value of basic elements of circuit like IGBT, leakage inductance, we simulate the model based on Matlab-Simulink. The results show that the efficiency is about 90% with output voltage from 240 VDC to 400 VDC. The time to obtain 80% of battery State of Charge is about 25 minutes.

Key words - electric vehicle; fast charger; Dual Active Bridge; galvanic isolation; AC/DC

cách ly an toàn giữa lưới và pin, hiệu suất làm việc cao, cấu trúc nhỏ gọn do có ít phần tử thụ động trong cấu trúc.

2. Lựa chọn tham số cho bộ sạc pin

Để thiết kế bộ sạc pin có thể tương thích với nhiều loại xe điện đang có mặt trên thị trường, nhóm tác giả khảo sát thông số, cấu trúc pin của các mẫu xe và pin trên xe phổ biến trên thị trường, từ đó đưa ra thông số chung để thiết kế bộ sạc.



Hình 1. Cấu trúc chung của xe điện

Hình 1 miêu tả cấu trúc chung của phần lớn xe ô tô điện hiện nay [4]. Cấu trúc của xe điện bao gồm một hệ thống pin đóng vai trò chính trong việc cung cấp năng lượng cho xe điện, hệ thống pin này lấy năng lượng từ lưới điện thông qua bộ sạc pin chậm gắn ở trên xe, hoặc bộ sạc pin nhanh ở các trạm sạc. Năng lượng từ hệ thống pin được đưa qua bộ điều khiển sạc DC/DC và bộ nghịch lưu DC/AC nhằm điều chỉnh dòng công suất và cung cấp điện áp xoay chiều cho động cơ điện (EM) để truyền động đến bánh xe.

Hệ thống pin của xe điện được các hãng thiết kế sao cho có vòng đời dài, dung lượng lớn, nhỏ, nhẹ để không làm tổn nhiên liệu. Công nghệ pin Li-ion thường được sử dụng cho hệ thống pin của xe điện. Bảng 1 trình bày thông số của hệ thống pin trên một số loại xe phổ biến trên thị trường.

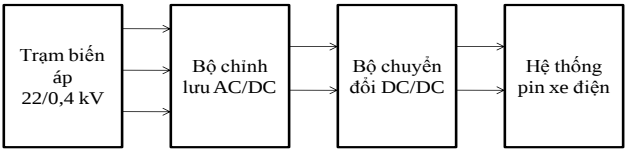
Bảng 1. Thông số hệ thống pin của xe điện

Tên xe	Dung lượng pin (kWh)	Quãng đường đi được (dặm)	Công nghệ pin
BMW i3	22	81	Li-ion
Chervolet Spark EV	19	82	Li-ion
Fiat 500E	24	84	Li-ion
Ford Focus Electric	23	76	Li-ion
Kia Soul EV	27	93	Li-ion-polymer
Mercedes B-class	28	85	Li-ion
Nissan LEAF	30	107	Li-ion
Tesla Model S	85	265	Li-ion
Volkswagen E-Golf	24	83	Li-ion

Theo thông số của hệ thống pin trong các xe điện khác nhau ở Bảng 1, có thể thấy dung lượng pin trung bình của các loại xe dao động từ 20 - 30 kWh, riêng xe của hãng Tesla có công suất của hệ thống pin cao hơn, 85 kWh. Quãng đường đi được của phần lớn các loại xe dao động từ 80 đến 100 dặm. Điện áp lúc thấp nhất đạt 240 VDC, lúc đầy pin là 400 VDC, dòng điện sạc cực đại dao động từ 130 A đến 160 A, tùy loại xe.

Như vậy, các thông số của bộ sạc được tính toán phải tương thích với phần lớn loại xe điện đang có trên thị trường. Công suất cực đại của bộ sạc được chọn thiết kế là 50 kW, có thể sạc đầy pin trong vòng 30 phút đối với công suất này. Điện áp đầu vào 380 VAC ba pha lấy từ lưới điện của điện lực. Điện áp đầu ra của bộ sạc dao động từ 240 đến 400 VDC, phù hợp với điện áp của pin.

3. Lựa chọn cấu trúc, tính toán và lựa chọn các phần tử chính của bộ sạc pin

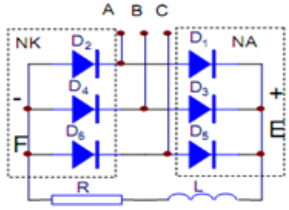


Hình 2. Cấu trúc của bộ sạc pin nhanh

Tương tự với phần lớn các bộ sạc pin nhanh đang được nghiên cứu và triển khai trên thị trường, cấu trúc của bộ sạc pin nhanh trình bày như Hình 2. Bộ sạc này lấy điện từ nguồn 3 pha có điện áp 380 VAC, sau đó được chỉnh lưu thành dòng xoay chiều thông qua bộ chỉnh lưu AC/DC, tiếp theo dòng điện sạc phía đầu ra của bộ chỉnh lưu sẽ được điều chỉnh sao cho phù hợp với đặc tính sạc của pin thông qua bộ chuyển đổi DC/DC.

3.1. Bộ chỉnh lưu AC/DC

Cấu trúc được chọn là cấu trúc chỉnh lưu cầu ba pha diode, cấu trúc này có ưu điểm là điện áp đầu ra có giá trị lớn, cấu trúc đơn giản (do diode là phần tử không điều khiển), độ sụt áp trên diode nhỏ.



Hình 3. Cấu trúc bộ chỉnh lưu cầu 3 pha diode

Ứng với các thông số chung của bộ sạc, dựa trên tài liệu [5], ta chọn được loại diode là RURG80100 của hãng Fairchild có dòng điện thuận trung bình $I_{F(AV)}=80$ A, điện áp rơi lớn nhất đạt 1,9 V.

3.2. Mạch biến đổi DC/DC

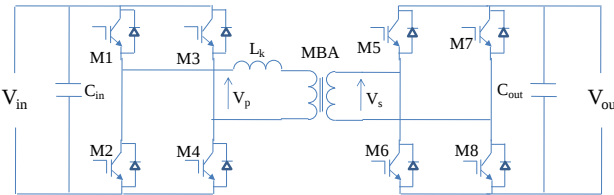
3.2.1. Lựa chọn cấu trúc mạch

Bảng 2. So sánh đặc điểm của các cấu trúc DC/DC có cách ly

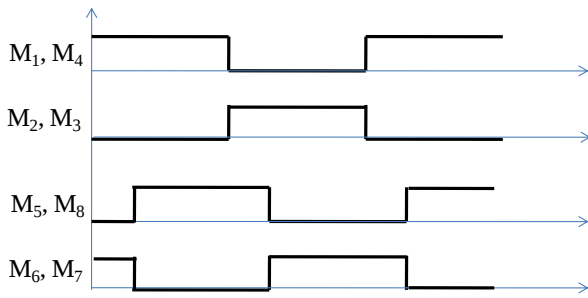
Tiêu chí	Flyback	Forward	HB	DAB
Điện áp giáng lên khóa	Cao	Cao	Thấp	Thấp
Dòng điện giáng lên khóa	Thấp	Thấp	Cao	Thấp
Số lượng khóa	Ít	Ít	Trung bình	Nhiều
Chuyển mạch	Cứng	Cứng	Mềm	Mềm
Tổn thất chuyển mạch	Lớn	Lớn	Nhỏ	Nhỏ
Mạch đập RC	Cần thiết	Cần thiết	Không	Không
Điều khiển	Đơn giản	Đơn giản	Phức tạp	Phức tạp

Như đã giới thiệu ở Phần 1, bộ sạc thiết kế phải được cách ly an toàn giữa đầu vào và đầu ra để đảm bảo xe không bị hư hỏng khi có sự cố từ lưới điện hoặc sự cố từ bộ sạc pin. Vì vậy, bộ chuyển đổi DC/DC phải có cách ly. Bảng phương pháp so sánh đặc điểm của một số cấu trúc mạch DC/DC có cách ly, nhóm tác giả đã đề xuất bảng so sánh các thông số của một số mạch tiêu biểu như Forward [5], Flyback [5], nửa cầu (Half Bridge-HB) [5], toàn cầu đôi chủ động (Dual Active Bridge – DAB) [6], [7] với cùng một thông số điện áp và dòng điện (Bảng 2). Dựa vào bảng so sánh kết hợp với mục tiêu hướng đến của bộ sạc là có khả năng cách ly an toàn, hiệu suất cao, thì cấu trúc DAB đã được lựa chọn cho cấu trúc mạch DC/DC.

Hình 4, 5 thể hiện cấu trúc và giản đồ xung điều khiển các khoá chuyển mạch của DAB [8].



Hình 4. Cấu trúc mạch DAB



Hình 5. Giản đồ xung điều khiển các khóa

Công suất truyền qua mạch DAB được xác định theo công thức [7]:

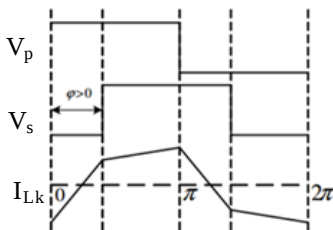
$$P = \frac{n \cdot V_{in} \cdot V_{out} \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\pi}\right)}{2\pi f L_K} \quad (1)$$

Với φ là góc lệch pha giữa điện áp xoay chiều phía sơ cấp và phía thứ cấp máy biến áp, n là tỉ số biến áp, V_{in} là điện áp phía sơ cấp, V_{out} là điện áp phía thứ cấp máy biến áp, L_K là giá trị điện cảm rò máy biến áp.

Giá trị góc lệch φ không chỉ ảnh hưởng tới độ lớn của công suất mà còn ảnh hưởng đến hướng của công suất truyền qua mạch, nếu $-\pi < \varphi < 0$ thì công suất sẽ truyền từ phía thứ cấp sang phía sơ cấp, ngược lại $0 < \varphi < \pi$ thì công suất sẽ truyền từ phía sơ cấp sang phía thứ cấp.

Dòng điện qua điện cảm rò được xác định dựa trên biểu thức sau:

$$L \frac{di_L(\varphi)}{d\varphi} = \frac{V_P(\varphi) - V_S(\varphi)}{2\pi} \quad (2)$$



Hình 6. Điện áp sơ cấp, thứ cấp và dòng điện qua điện cảm rò máy biến áp

3.2.2. Tính chọn các phần tử của mạch DAB

Tần số của bộ chuyển đổi được chọn đủ lớn để có thể làm giảm kích thước của các phần tử thụ động trong mạch, nhưng không quá cao để có thể làm tăng tổn hao do chuyển mạch gây ra. Vì vậy, trong nghiên cứu này, tần số bộ chuyển đổi được chọn là 50 kHz.

Mạch DAB được cấu tạo từ các phần tử IGBT [9], điện áp đầu ra dao động từ 240 VDC (pin hết) đến 400 VDC (pin đầy) và điện áp đầu vào bằng 535 VDC. Dựa vào công suất mạch thiết kế, ta lựa chọn được IGBT loại IXMK200N60C3 [10] của hãng IXYS có thông số như sau:

- Điện áp đầu vào cực đại $V_{cemax} = 600V$.
- Dòng điện cực đại tại 25°C $I_{C25} = 160A$.

Theo công thức (1), giá trị điện cảm rò của máy biến áp ảnh hưởng đến hiệu suất của mạch DAB. Mặt khác, dòng điện sạc đi vào hệ thống pin được điều khiển bởi sự thay

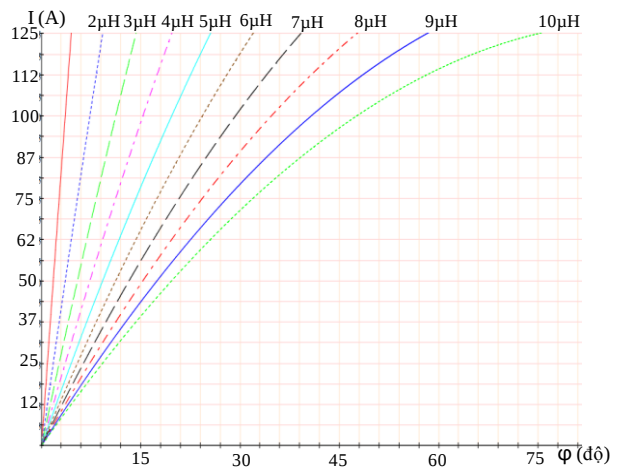
đổi góc lệch φ mà độ lớn của của góc lệch này phụ thuộc vào giá trị của điện cảm rò. Do đó, giá trị điện cảm rò được chọn không được quá nhỏ để dễ dàng điều khiển, cũng không được quá lớn, sẽ ảnh hưởng đến giá trị dòng điện lớn nhất ở đầu ra I_{outmax} , cũng như hiệu suất chung của cả mạch.

Từ (1), giá trị dòng điện đầu ra của mạch DAB được xác định bởi công thức:

$$I_{out} = \frac{n \cdot V_{in} \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\pi}\right)}{2\pi f L_K} \quad (3)$$

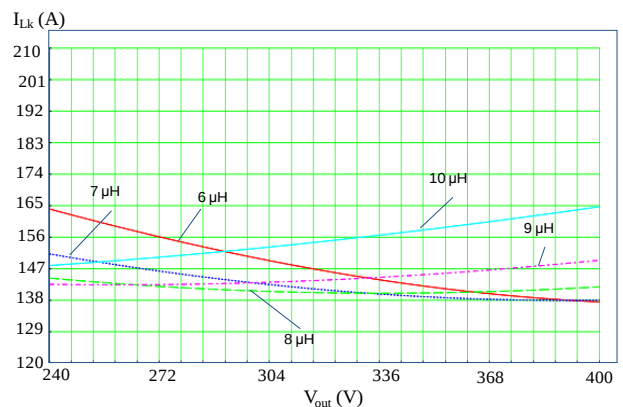
Với tỉ số biến áp $n=1$, để đạt được dòng điện đầu ra lớn nhất $I_{outmax} = 125 A$, giá trị điện cảm rò lớn nhất cho phép là $L_K = 10,28\mu H$ (theo công thức (3)).

Bằng phần mềm tính toán Mathcad, biểu đồ dòng điện đầu ra theo sự thay đổi của góc lệch, ứng với các giá trị $L_K = 1 \div 10 \mu H$, điện áp $V_{in} = 535 V$ (điện áp đầu ra của bộ chỉnh lưu sau khi qua bộ lọc) được biểu diễn như Hình 7.



Hình 7. Dòng điện đầu ra ứng với các giá trị điện cảm rò

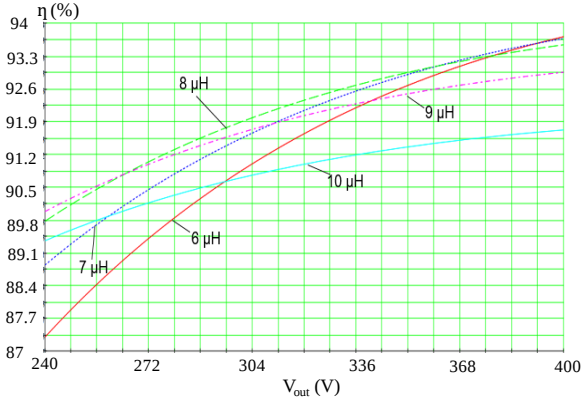
Dựa trên hình, có thể thấy rằng giá trị điện cảm càng nhỏ thì đường đặc tính dòng điện đầu ra càng dốc, do đó, việc điều khiển giá trị góc lệch đòi hỏi phải có độ chính xác rất cao. Vì vậy, giá trị điện cảm rò có thể được lựa chọn từ $6 \div 10 \mu H$.



Hình 8. Dòng điện hiệu dụng qua điện cảm rò

Mối quan hệ giữa dòng điện hiệu dụng và điện áp đầu ra ứng với các giá trị điện cảm rò khác nhau được thể hiện trên Hình 8. Đường đặc tính hiệu suất của mạch DAB theo

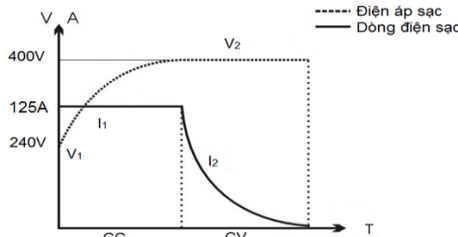
các giá trị điện cảm rò khác nhau được thể hiện trên Hình 9. Dựa theo các Hình 8, Hình 9, ta có thể thấy, ứng với giá trị điện cảm rò $L_k=8\text{ }\mu\text{H}$, khi điện áp đầu ra dao động từ 240 VDC đến 400 VDC, hiệu suất của mạch đạt được cao hơn hẳn các giá trị điện cảm rò còn lại. Vì vậy, $L_k = 8\text{ }\mu\text{H}$ được lựa chọn để tính toán thiết kế.



Hình 9. Hiệu suất của mạch DAB ứng với các giá trị điện cảm rò

Với giá trị $L_k = 8\text{ }\mu\text{H}$, hiệu suất của bộ DAB có giá trị từ 89,8% (khi pin hết) đến 93,6% (khi pin đầy). Kết hợp với loại diốt được lựa chọn ở Mục 3.1, ta tính được tổn thất công suất lớn nhất trên bộ AC/DC bằng 475 W (tương đương 1% công suất định mức). Do đó, hiệu suất chung của bộ sạc có giá trị từ 88,8% đến 92,6%, tùy thuộc vào điện áp đầu ra của pin.

3.3. Mạch điều khiển



Hình 10. Đặc tính sạc của pin Li-ion

Đường đặc tính bao gồm 2 giai đoạn:

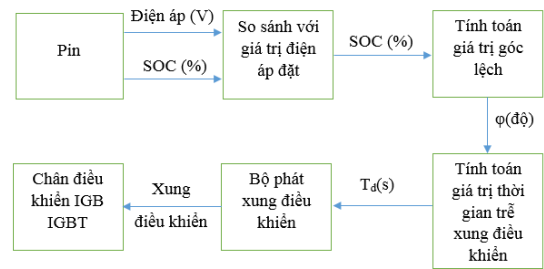
- Giai đoạn 1: duy trì dòng điện sạc cực đại 125 A (CC), đây chính là giai đoạn sạc nhanh của pin, dung lượng pin sẽ tăng nhanh chóng từ 0-80%, điện áp cũng tăng từ 240 VDC đến 400 VDC.
- Giai đoạn 2: duy trì điện áp, khi điện áp pin đạt 400 VDC (dung lượng đạt 80%), ta phải giảm giá trị dòng điện sạc để đảm bảo pin không bị quá nhiệt, dòng điện được nhà sản xuất đề xuất là khoảng 1/40 giá trị dòng điện sạc ở giai đoạn ban đầu (tức là khoảng 3.125 A).

Dựa trên đường đặc tính sạc, giá trị góc lệch của bộ sạc được điều khiển bởi công thức sau:

$$\varphi = (1 - (\text{SOC} - 80) \cdot (X\%)) \cdot \varphi_{bd} \quad (4)$$

Trong đó SOC: mức dung lượng pin, X% là mức giảm góc lệch, φ_{bd} là giá trị góc ứng với dòng điện đầu ra cực đại ở giai đoạn ban đầu.

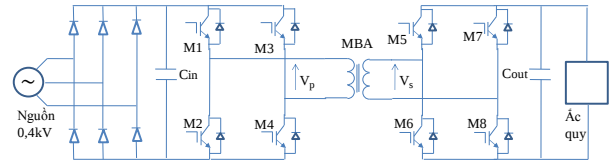
Sơ đồ cấu trúc chung của bộ điều khiển được đề xuất như Hình 11.



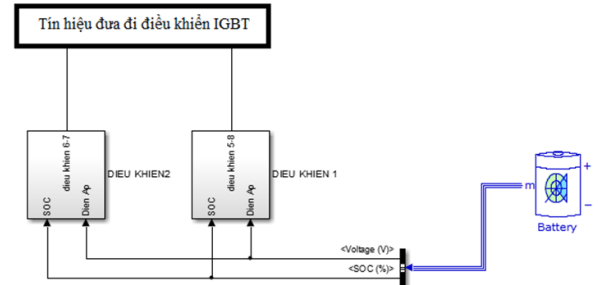
Hình 11. Sơ đồ khối cấu trúc chung của trạm sạc pin nhanh

4. Mô phỏng cấu trúc trên phần mềm Matlab-Simulink

Để kiểm chứng tính đúng đắn của sơ đồ, cấu trúc trạm sạc được mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink. Hình 12 giới thiệu sơ đồ tổng quát của bộ sạc pin, Hình 13 giới thiệu sơ đồ chung của khối điều khiển.

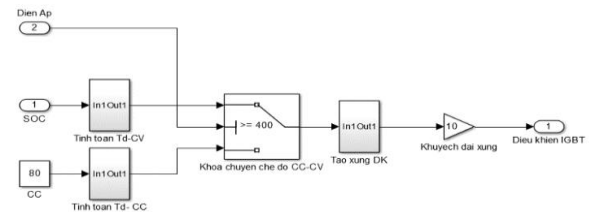


Hình 12. Sơ đồ tổng quát của bộ sạc pin cho ô tô điện

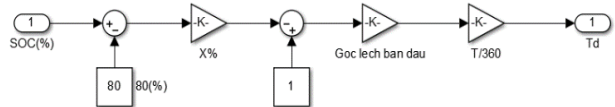


Hình 13. Sơ đồ chung của khối điều khiển

Từ sơ đồ điều khiển, mạch điều khiển được mô phỏng trên phần mềm Mathlab như Hình 14, 15.



Hình 14. Sơ đồ cấu trúc của bộ điều khiển



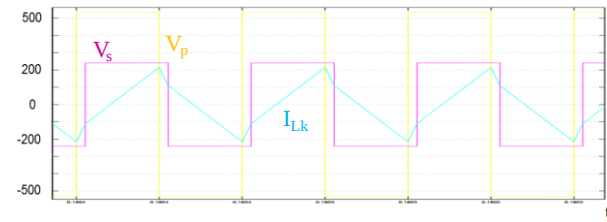
Hình 15. Cấu trúc của bộ tính toán thời gian trễ T_d

Nguyên lý điều khiển dựa trên việc đo giá trị điện áp đầu ra và trạng thái của pin. Để đưa ra góc lệch phù hợp cho mỗi giai đoạn sạc pin như Hình 10.

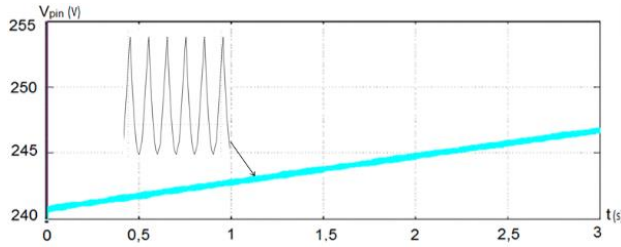
Do dung lượng bộ nhớ của máy tính có hạn, không thể lưu trữ dữ liệu khi mô phỏng toàn bộ quá trình sạc pin nên tác giả chỉ thực hiện mô phỏng các thông số sạc của pin với những mức pin khác nhau.

Kết quả mô phỏng thông số sạc của pin trong khoảng thời gian 3÷5 s được thể hiện như Hình 16, 17, 18. Hình 16

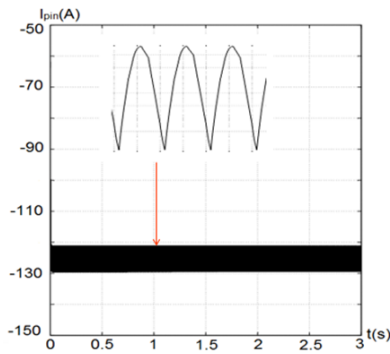
thể hiện dạng sóng của điện áp phía sơ cấp V_p , điện áp phía thứ cấp V_s và dòng điện chạy qua điện cảm rò của máy biến áp I_{Lk} . Hình 17 thể hiện mức tăng của điện áp pin khi bắt đầu sạc. Hình 18 thể hiện giá trị dòng điện của pin khi duy trì ở giai đoạn sạc cực đại.



Hình 16. Dạng sóng điện áp và dòng điện của DAB



Hình 17. Điện áp của pin khi bắt đầu sạc



Hình 18. Dòng điện của pin khi sạc ở giai đoạn duy trì dòng sạc cực đại

Bảng 3 thể hiện sự thay đổi điện áp với các mức pin khác nhau từ 5-80% (giai đoạn sạc nhanh). Thời gian mô phỏng cho từng mức pin tương ứng là 5 s.

Bảng 3. Sự thay đổi điện áp ứng với các mức pin khác nhau

Mức pin (%)	Độ thay đổi điện áp $\frac{\Delta U}{\Delta t}$ (V / s)	Độ thay đổi trạng thái sạc $\frac{\Delta SOC}{\Delta t}$ (% / s)
5%	2	0,05
10%	0,6	0,05
20%	0,3	0,05
30%	0,25	0,05
40%	0,25	0,05
50%	0,25	0,05
60%	0,22	0,05
70%	0,215	0,05
80%	0,1	0,02

Từ Bảng 3, ta nhận thấy rằng điện áp tăng nhanh trong những mức pin thấp (5-20%) và sau đó tăng ít (30-70%) và tăng rất ít (>80%). Trạng thái sạc (SOC%) có giá trị tăng đều (0,05 %/s) ứng với các mức pin (<80%) do đó có thể ước lượng thời gian sạc từ mức pin 5% đến 80% là khoảng 25 phút. Giá trị dòng sạc trung bình vẫn giữ ở mức 125 A khi điện áp pin dưới 400 VDC, và giảm dần khi giá trị điện áp của pin đạt 400 VDC.

Từ những kết quả trên cho thấy, cấu trúc của bộ sạc cũng như phương án điều khiển đã đáp ứng được mục tiêu về thời gian sạc, cũng như thỏa mãn đường đặc tính sạc của pin.

5. Kết luận

Bài báo giới thiệu về cách tính toán thiết kế hệ thống sạc pin nhanh cho ô tô điện. Đầu vào của bộ sạc lấy từ lưới có điện áp 380 VAC, đầu ra của bộ sạc có điện áp dao động từ 240 VDC đến 400 VDC tương ứng khi pin hết và đầy. Công suất của bộ sạc được thiết kế là 50 kW. Mạch chỉnh lưu cầu 3 pha bằng diode mắc nối tiếp với bộ chuyển đổi DC/DC có cấu trúc DAB. Cấu trúc DAB được lựa chọn dựa trên tiêu chí có cách ly an toàn giữa đầu vào và đầu ra để đảm bảo xe không bị hư hỏng khi có sự cố từ lưới điện hoặc sự cố từ bộ sạc pin. Cấu trúc này có ít phần tử thụ động, hoạt động ở tần số cao, nên kích thước sẽ nhỏ gọn. Các phần tử của mạch chỉnh lưu và của bộ chuyển đổi DAB được tính toán, lựa chọn để đạt hiệu suất cao, từ 88,8% đến 92,6%, trong dải điện áp làm việc. Bằng cách mô phỏng cấu trúc trên phần mềm Matlab-Simulink, ta thấy rằng thời gian sạc đầy 80% dung lượng pin chỉ trong vòng 25 phút đáp ứng mục tiêu thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cell, module, and pack for EV applications, http://www.eco-aesc-lb.com/en/product/liion_ev/#anc03, 18/5/2017.
- [2] G.Joos, *Design and simulation of a fast charging station for PHEV, EV batteries*, IEEE, 2010.
- [3] C.G. Bianchin, R. Gules, *High frequency isolated three-phase rectifier for electric vehicles fast charging*, Industry Applications (INDUSCON), 2016 12th IEEE International Conference on.
- [4] *Khái quát về xe ô tô điện*, <http://tudienxe.com/kien-thuc-co-ban/khai-quat-ve-xe-oto-dien-part-2.html/2>, 18/5/2017.
- [5] Nguyễn Bình, *Điện tử công suất*, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, 2000.
- [6] Hua Bai, *Comparison and evaluation of different DC/DC topologies for plug-in hybrid electric vehicle charger*, Int. J. Power Electronics, Vol. 4, No.2, 2012.
- [7] Florian Krismer, *Modeling and optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC converter topologies*, ETH, 2010.
- [8] Lyubomir Kerachev; Trung Hieu Trinh; Yves Lembeze; Jean-Christophe Crebier, *Design and Implementation of a Highly Integrated Dual Active Bridge Microconverter*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, Issue8, 2016, p. 5635 – 5643.
- [9] Bjorn Lindgren, *A Power converter for Photovoltaic Application*, thesis, Departement of Electric Power Engineering, Goteborg Sweden, 2016.
- [10] *Thông số kỹ thuật của IGBT*, <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/837746/IXYS/IXXK200N60C3.html>, 18/5/2017.