

CÂN BẰNG ÁP THỤ ĐỘNG VÀ CÂN BẰNG ÁP TÍCH CỰC CHO SIÊU TỤ ĐIỆN KHI ĐƯỢC SẠC VỚI BỘ DC - DC BUCK ĐỒNG BỘ GIỚI HẠN DÒNG

ACTIVE AND PASSIVE VOLTAGE BALANCE OF SUPERCAPACITORS CHARGED BY CURRENT LIMITING SYNCHRONOUS BUCK DC - DC CONVERTER

Đoàn Thanh Tùng, Vũ Quốc Thái,
Lê Trọng Lự, Ngô Thanh Dung

TÓM TẮT

Siêu tụ điện hay còn gọi là tụ điện hai lớp đang được quan tâm chú ý nghiên cứu. Nó có khả năng thay thế hoặc hỗ trợ cho hệ thống dự trữ năng lượng truyền thống trong một số ứng dụng như tua bin gió, xe điện, UPS, ... nhờ có mật độ công suất và tuổi thọ cao. Tuy nhiên, siêu tụ điện cần phải được ghép nối với nhau để đạt được điện áp mong muốn. Chính vì thế một module siêu tụ điện cần phải có hệ thống cân bằng điện áp. Trong bài báo này, bộ pin sạc dự phòng sử dụng 2 siêu tụ điện 2,7V 3000F mắc nối tiếp sẽ được cân bằng áp. Một bộ biến đổi Buck đồng bộ được thiết kế để sạc cho bộ pin siêu tụ ở chế độ điều khiển giới hạn dòng điện. Kết quả thực nghiệm sẽ cho ta thấy ưu nhược điểm của hai phương pháp cân bằng áp tích cực và thụ động.

Từ khóa: Bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ, chế độ điều khiển dòng điện đỉnh, cân bằng điện áp tích cực/thụ động, siêu tụ điện.

ABSTRACT

Supercapacitors (SCs) also call ultracapacitor or electric double-layer capacitors are considered to research. They have ability to replace or support traditional energy store systems in many applications including wind turbines, electric vehicles, UPS, ... by having the high power density and long lifetime. However, the supercapacitors must be connected together to have desired voltage. Thereby, the supercapacitor module need to have voltage balance circuit. In this paper, a portable power bank consists of two supercapacitor 2.7V 3000F are connected serial with voltage balance circuit. And a Synchronous Buck DC - DC converter is designed to charge the supercapacitor bank with current limitation. The experiment results expose the advantage and disadvantage of both active and passive voltage balance method

Keywords: Synchronous Buck DC - DC converter, peak-current mode control, active/passive voltage balance, supercapacitor/ultracapacitor.

Đoàn Thanh Tùng, Vũ Quốc Thái, Lê Trọng Lự, Ngô Thanh Dung

Viện Kỹ thuật nhiệt đới, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Email: dtungnt167@gmail.com

Ngày nhận bài: 30/11/2016

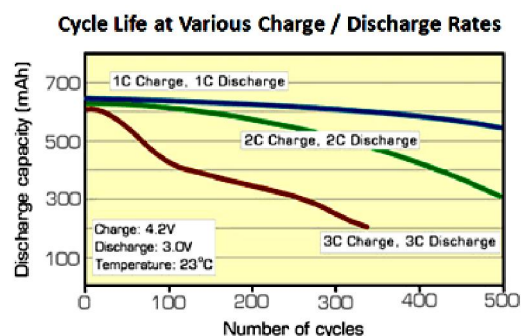
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/03/2017

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2017

1. MỞ ĐẦU

Siêu tụ điện với mật độ công suất, tuổi thọ cao và thời gian sạc điện ngắn đang là thiết bị dự trữ năng lượng được quan tâm nghiên cứu cho nhiều ứng dụng khác nhau, đặc biệt là những ứng dụng cần cung cấp năng lượng nhanh trong một khoảng thời gian ngắn [1]. Siêu tụ có dung lượng lớn cỡ hàng trăm thậm chí hàng nghìn Fara [2] nên có thể dự trữ khá nhiều năng lượng. Tuy nhiên mật độ năng lượng so với các loại pin ắc quy hiện nay vẫn còn nhỏ hơn khá nhiều. Do vậy để một kho dự trữ năng lượng sử dụng siêu tụ điện có thể cung cấp đủ công suất cũng như điện áp thích hợp thì ta cần ghép nối song song hoặc nối tiếp nhiều siêu tụ điện lại với nhau.

Bên cạnh những ứng dụng công suất lớn của siêu tụ điện đã nêu ở trên, ứng dụng bộ sạc dự phòng cho điện thoại di động sử dụng pin siêu tụ điện cũng đang được quan tâm nghiên cứu. Pin dự phòng là kho dự trữ năng lượng bổ sung cho các thiết bị di động nói chung, hiện nay nó đang khá phổ biến. Mặc dù vậy, thời gian để sạc đầy một bộ pin dự phòng là khá lâu, đặc biệt với các pin có dung lượng lớn, đồng thời tuổi thọ của chúng sẽ giảm nếu như ta tăng dòng điện sạc (hình 1) [3]. Chính vì thế, siêu tụ điện được sử dụng để rút ngắn thời gian sạc đầy cho bộ pin sạc dự phòng.

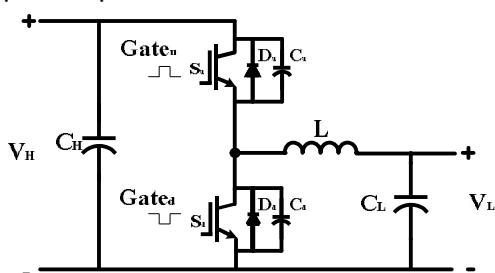


Hình 1. Biểu đồ tuổi thọ của pin Li-ion phụ thuộc vào dòng phóng/ nạp [3]

Trong nghiên cứu này, một bộ pin sạc dự phòng sử dụng hai siêu tụ 2,7V 3000F ghép nối tiếp sẽ được cân bằng áp theo hai phương pháp tích cực và thụ động. Đồng thời bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ (Synchronous Buck Converter) được thiết kế để sạc điện cho bộ pin sạc dự phòng với chế độ điều khiển giới hạn dòng điện đỉnh (peak-current mode control). Thực nghiệm được tiến hành với hai dòng sạc giới hạn là 5A và 10A. Kết quả đặc tính điện áp của siêu tụ sẽ đánh giá ưu nhược điểm của hai phương pháp cân bằng áp.

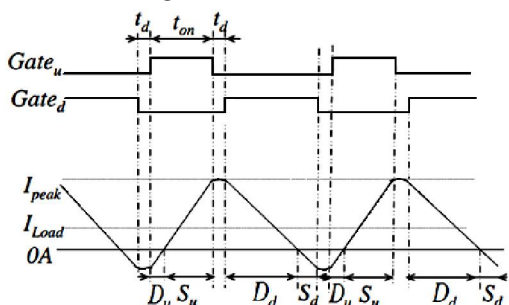
2. BỘ BIẾN ĐỔI DC - DC BUCK ĐỒNG BỘ

Bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ là bộ biến đổi DC - DC không cách ly, không sử dụng biến áp xung, có khả năng truyền tải năng lượng theo hai chiều, có thể có một pha hoặc nhiều pha [4, 6]. Cấu hình tổng quát bộ biến đổi 1 pha được thể hiện ở hình 2.

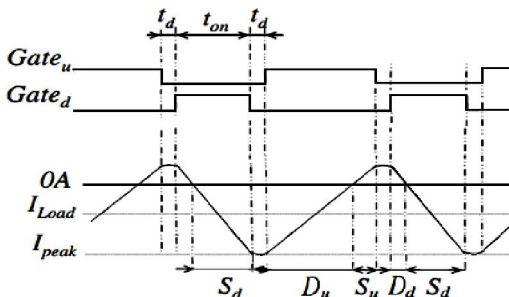


Hình 2. Cấu hình của bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ (Synchronous Buck)

Hình 3 và 4 thể hiện luật phát xung và dòng điện trên cuộn cảm i_L , tương ứng với chế độ phát xung khác nhau ta có thể đảo chiều dòng điện.



Hình 3. Xung điều khiển và dòng điện trên cuộn cảm tương ứng ở chế độ buck



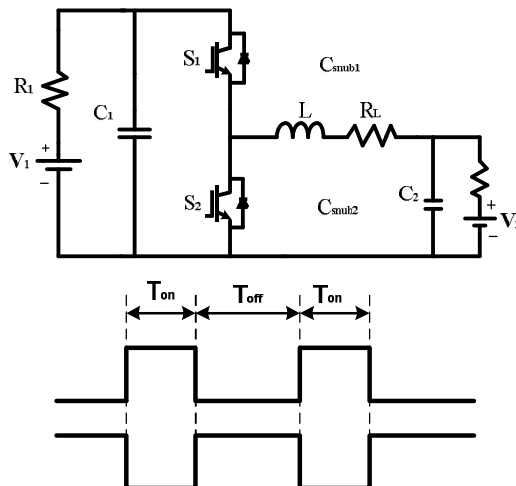
Hình 4. Xung điều khiển và dòng điện trên cuộn cảm tương ứng ở chế độ đảo chiều

Trong bài báo này, bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ chỉ làm việc ở chế độ giảm áp, đồng thời điều khiển ổn định điện áp và điều khiển giới hạn dòng điện đỉnh để thực hiện sạc cho bộ pin dự phòng siêu tụ điện.

3. THIẾT KẾ BỘ BIẾN ĐỔI DC - DC

3.1. Hàm truyền cho cấu hình tổng quát

Áp dụng phương pháp trung bình không gian trạng thái đã trình bày trong [2, 4] cho mạch DC - DC Buck đồng bộ. Hình 5 là sơ đồ tổng quát và luật phát xung lý tưởng của bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ một pha.



Hình 5. Cấu hình tổng quát và luật phát xung

Trên miền ảnh Laplace, các hàm truyền tổng quát của bộ biến đổi như sau:

$$G_{V_1 d}(s) = \frac{\hat{v}_1}{\hat{d}} = \frac{-\frac{D}{C_H} \cdot \frac{\hat{i}_L}{d} - \frac{1}{C_H} J_L}{s + \frac{1}{C_H \cdot R_1}} \quad (1)$$

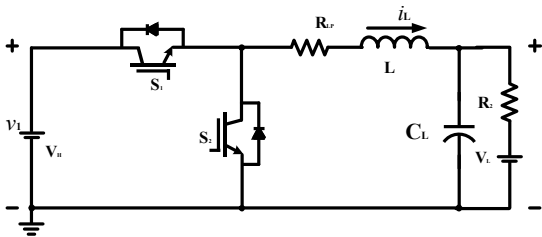
$$G_{V_2 d}(s) = \frac{\hat{v}_2}{\hat{d}} = \frac{\frac{1}{C_L} \cdot \frac{\hat{i}_L}{d}}{s + \frac{1}{C_L \cdot R_2}} \quad (2)$$

$$G_{i_d}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{(s + \frac{1}{C_H \cdot R_1}) \cdot (s + \frac{1}{C_L \cdot R_2}) \cdot \frac{V_1}{L} - \frac{D \cdot J_L}{C_H \cdot L} \cdot (s + \frac{1}{C_L \cdot R_2})}{(s + \frac{R_p}{L}) \cdot (s + \frac{1}{C_H \cdot R_1}) \cdot (s + \frac{1}{C_L \cdot R_2}) + \frac{D^2 \cdot (s + \frac{1}{C_L \cdot R_2})}{L \cdot C_H} + \frac{(s + \frac{1}{C_H \cdot R_1})}{L \cdot C_L}} \quad (3)$$

Với R_p là tổng trở phụ của mạch gồm điện trở trong của cuộn cảm và điện trở dẫn của các van bán dẫn.

3.2. Hàm truyền bộ biến đổi DC - DC hai chiều một pha ở chế độ sạc pin

Mục đích chính của bài báo là thiết kế bộ sạc cho module pin dự phòng siêu tụ. Do đó, ta cần có mô hình toán học của đối tượng này ở chế độ sạc pin (thường gọi là battery mode). Hình 6 là sơ đồ mạch ở chế độ boost tải trở.



Hình 6. Sơ đồ mạch buck đồng bộ ở chế độ sạc pin

Trong chế độ này, ta bỏ đi R_1 và C_H là những phần tử không sử dụng. Khi đó, hàm truyền đối tượng dòng điện có được là:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{V_H}{L \cdot s + R_p + R_2} \quad (4)$$

Thế (4) vào (2) ta tìm được hàm truyền điện áp:

$$G_{v2d}(s) = \frac{\hat{V}_2}{\hat{d}} = \frac{R_2 \cdot V_H}{C_L \cdot R_2 \cdot L \cdot s^2 + [L + (R_p + R_2) \cdot C_L \cdot R_2] \cdot s + R_p + R_2} \quad (5)$$

$$I_L = \frac{D \cdot V_H - V_L}{R_2 + R_p} \quad (6)$$

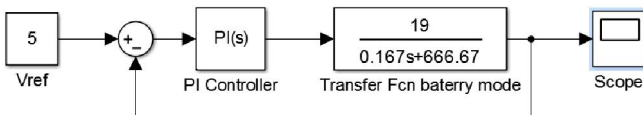
$$V_1 = V_H \quad (7)$$

3.3. Mô phỏng hàm truyền hệ thống

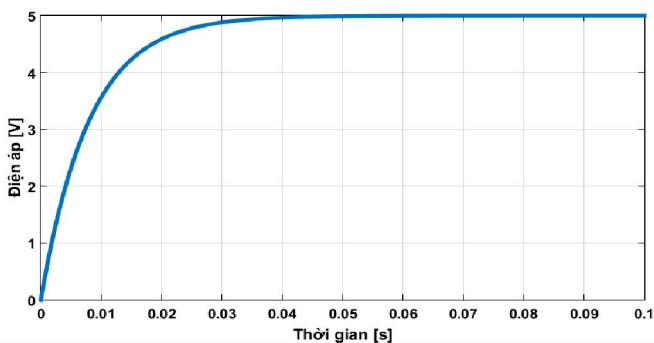
Bảng 1 là các tham số của bộ biến đổi Buck đồng bộ. Dựa vào những tham số đó, thiết kế được bộ điều khiển PI truyền thống cho mạch vòng điện áp. Hình 7 và 8 là sơ đồ và kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink.

Bảng 1. Các tham số của bộ biến đổi Buck đồng bộ

Tham số	Điện trở phụ R_p	Điện trở trong của siêu tụ R_2	Điện áp vào V_H	Cuộn cảm L	Tụ điện C_L
Giá trị	~ 0,2Ω	0,3mΩ	19V	0,05mH	1000μF



Hình 7. Sơ đồ mô phỏng dạng hàm truyền

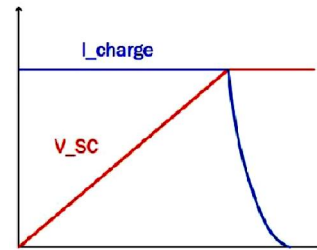


Hình 8. Đáp ứng của hệ thống với bộ điều khiển điện áp

Với đáp ứng không có độ quá điều chỉnh, bám theo lượng đặt, ổn định nhanh, ta sẽ sử dụng bộ điều khiển đã thiết kế cho mạch vòng điện áp bộ biến đổi Buck đồng bộ.

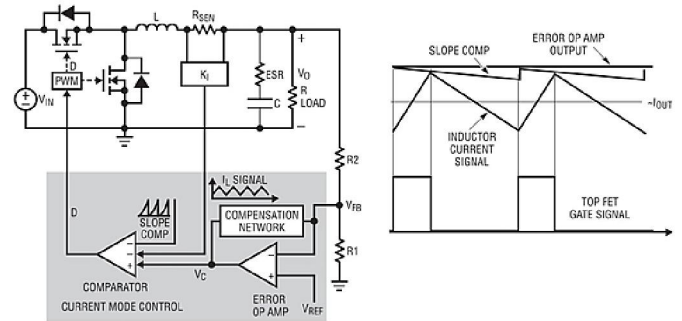
3.4. Mạch thực nghiệm bộ biến đổi Buck đồng bộ

Với nguyên lý sạc pin siêu tụ như hình 9, bên cạnh việc giữ điện áp sạc ổn định ở 5,4V (hoặc 5V) thì cũng cần giữ dòng điện sạc tương đối ổn định trong giai đoạn đầu của quá trình sạc. Tuy nhiên với đặc điểm của một tụ điện, khi đặt một điện áp vào hai đầu tụ, nhanh chóng dòng điện sẽ tăng lên với giá trị lớn nhất có thể, tức là nếu không có gì cản trở thì dòng điện nạp ban đầu cho siêu tụ sẽ rất lớn. Do đó để tránh hỏng các thiết bị, bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ phải có bộ hạn dòng.



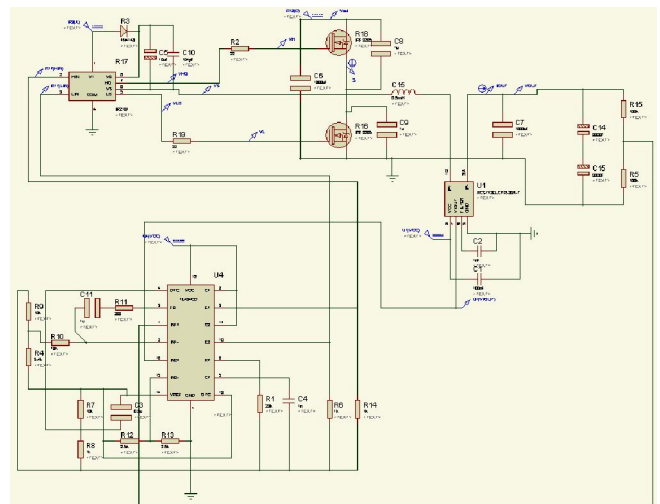
Hình 9. Điều khiển sạc siêu tụ điện

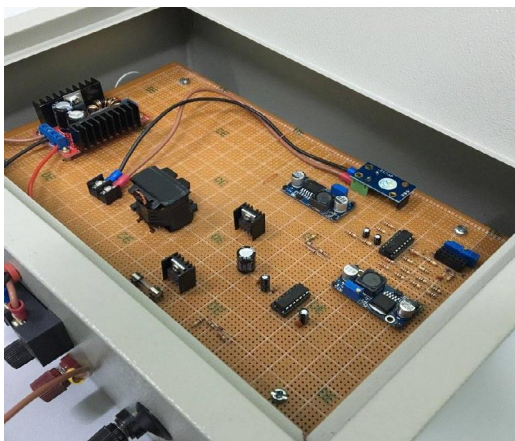
Trong bài báo này, IC TL494 được sử dụng để cung cấp cho ta hai OpAmp: một OA dùng để thực hiện bộ PI tương tự và một OA dùng làm bộ so sánh giới hạn dòng điện. Nguyên lý điều khiển được thể hiện trên hình 10.



Hình 10. Sơ đồ nguyên lý điều khiển giới hạn dòng điện

Sơ đồ mạch nguyên lý và thực nghiệm như hình 11.





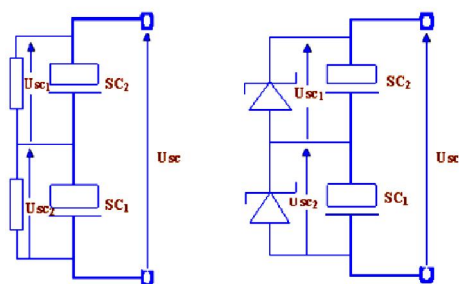
Hình 11. Sơ đồ mạch nguyên lý và thực nghiệm

4. CÂN BẰNG ÁP MODULE SIÊU TỤ ĐIỆN

Mỗi một pin siêu tụ điện được sản xuất ra không thể có các tham số giống nhau hoàn toàn. Với điện trở trong (ESR), dòng rò và điện dung khác nhau sẽ khiến điện áp mỗi cell tụ trong cả module sẽ lệch nhau. Điều này hết sức nguy hiểm đặc biệt khi nạp siêu tụ với dòng điện lớn. Để giảm bớt độ chênh lệch điện áp và bảo vệ các siêu tụ điện cần phải có mạch cân bằng điện áp cho chúng.

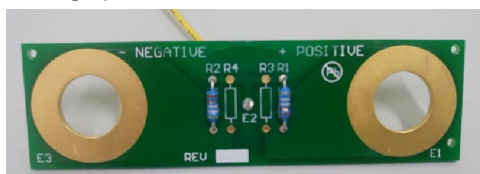
4.1. Cân bằng điện áp thụ động

Cân bằng điện áp thụ động sử dụng các phần tử thụ động như điện trở hoặc diốt để giảm bớt sự chênh lệch giữa các cell tụ như trên hình 12.



Hình 12. Cân bằng điện áp thụ động sử dụng điện trở hoặc diốt

Điện trở được coi là phương pháp đơn giản và ít chi phí nhất. Có thể tính toán điện trở cân bằng áp bằng cách xác định dòng điện rò của siêu tụ, sau đó lấy điện áp danh định của nó chia cho dòng điện rò. Với tham số của siêu tụ điện Maxwell 2,7V 3000F [12], ta có điện áp danh định là 2,7V và dòng rò là 5,2mA nên giá trị điện trở cân bằng áp là 52Ω. Mạch cân bằng áp như hình 13.

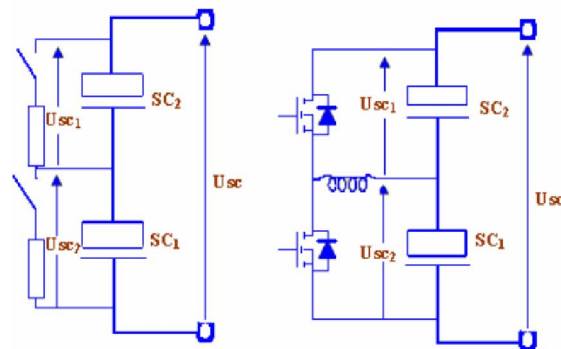


Hình 13. Mạch cân bằng áp bằng điện trở

4.2. Cân bằng điện áp tích cực

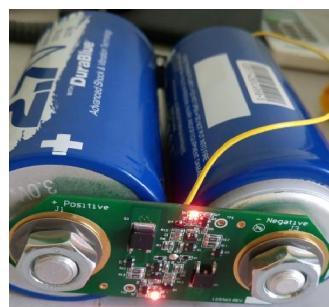
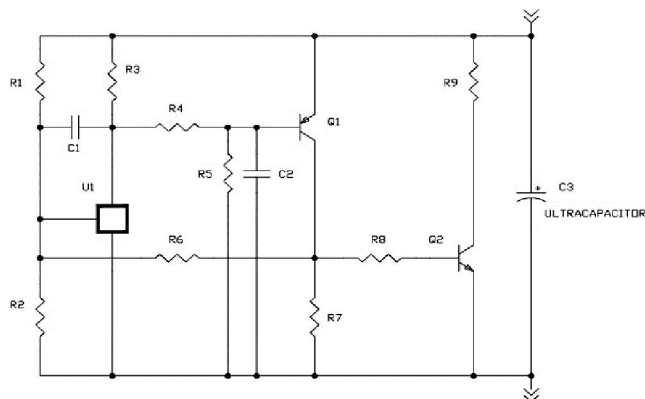
Cân bằng áp tích cực là phương pháp sử dụng những phần tử có khả năng đóng cắt như các van bán dẫn

transistor, mosfet hoặc các mạch khuếch đại thuật toán OpAmp (hình 14). Mạch này chỉ hoạt động khi có sự chênh lệch điện áp. So với mạch thụ động, nó sẽ hạn chế không bị suy giảm điện áp của pin siêu tụ, điều này hết sức có lợi đối với các pin sạc dự phòng sử dụng siêu tụ điện. Tuy nhiên mạch cân bằng áp tích cực nói chung là phức tạp và đắt tiền hơn các mạch cân bằng áp thụ động.



Hình 14. Cân bằng áp tích cực

Một điểm khó khăn nữa trong vấn đề cân bằng áp tích cực đó là các van bán dẫn phải đủ điều kiện chênh áp thì mới hoạt động không như mạch cân bằng áp thụ động luôn diễn ra quá trình cân bằng khi có sự chênh lệch. Trong phạm vi nghiên cứu này, mạch cân bằng áp sử dụng các transistor thể hiện như hình 15 được sử dụng để tiến hành thực nghiệm so sánh với mạch cân bằng áp bằng điện trở đã nêu trên.



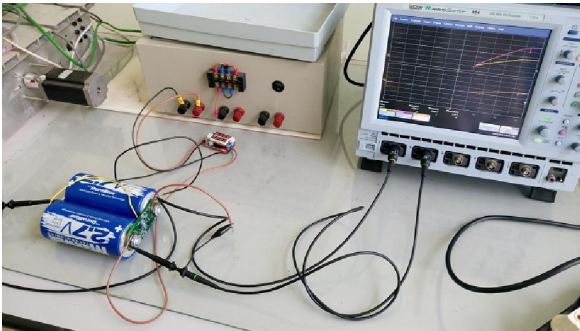
Hình 15. Mạch cân bằng áp tích cực sử dụng các transistor

5. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

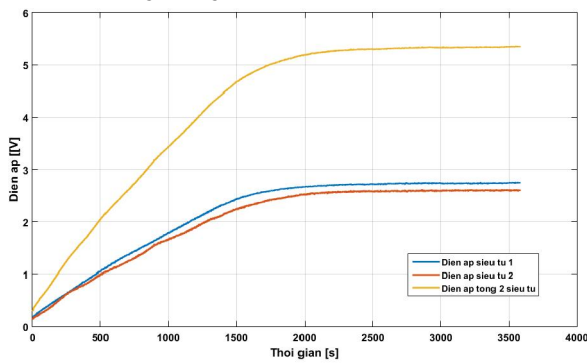
5.1. Sạc module pin siêu tụ với dòng điện giới hạn 5A

Hình 16 thể hiện toàn hệ thống thực nghiệm. Điện áp tổng của hai siêu tụ và điện áp của tụ thứ hai (tụ có một cực

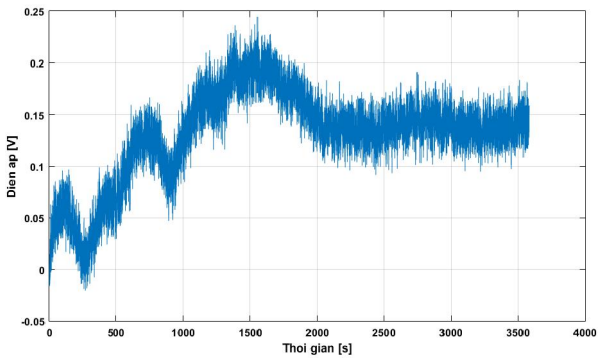
nối đất) sẽ được đo trực tiếp thông qua Oscilloscope, còn điện áp tụ thứ nhất (tụ có cực nối với cực dương 5V) sẽ được tính toán thông qua hai giá trị điện áp trên. Kết quả thực nghiệm được chỉ ra trên hình 17 và 18.



Hình 16. Hệ thống thực nghiệm sạc module siêu tụ

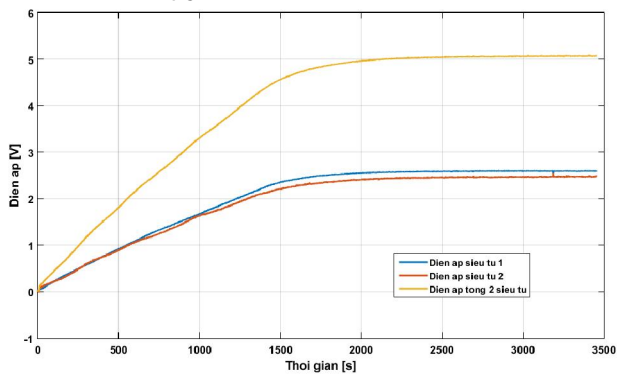


(a)

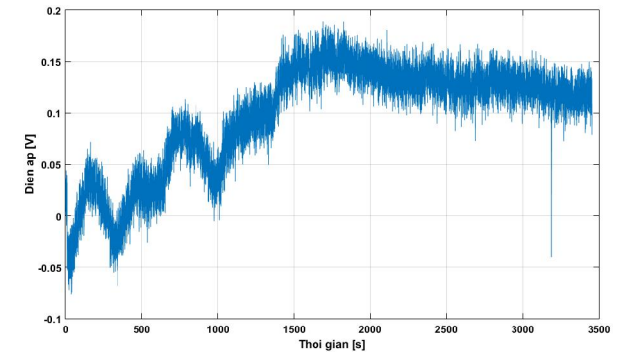


(b)

Hình 17. Kết quả cân bằng áp tích cực với giới hạn dòng 5A: a) Điện áp các siêu tụ điện; b) Chênh lệch giữa hai siêu tụ điện



(a)

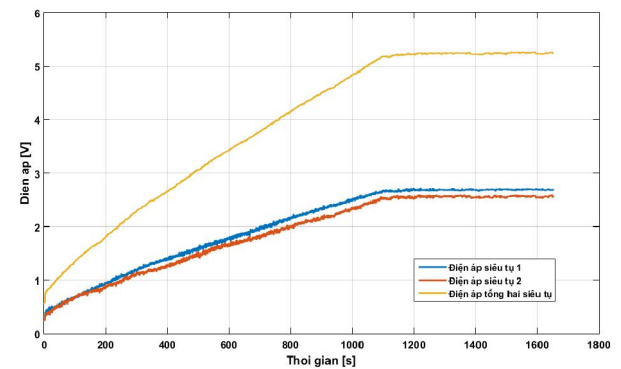


(b)

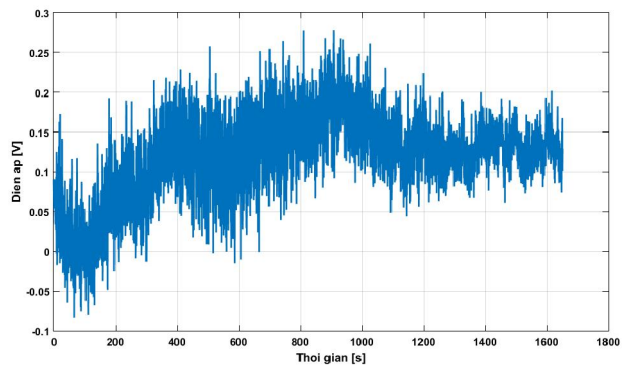
Hình 18. Kết quả cân bằng áp thụ động với giới hạn dòng 5A: a) Điện áp các siêu tụ điện; b) Chênh lệch giữa hai siêu tụ điện

Dựa vào các kết quả nêu trên, có thể thấy với giới hạn dòng sạc 5A thì đáp ứng điện áp sạc trên mỗi siêu tụ điện và chênh lệch trong cả hai phương pháp cân bằng điện áp là phù hợp. Độ chênh lệch điện áp vào khoảng 0,15V, so với điện áp danh định 2,7V thì nó ở dưới 10% giá trị điện áp danh định mức đó. Chất lượng điện áp của bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ là rất tốt, điện áp được giữ ổn định, không bị quá áp và có độ đập mạch nhỏ cỡ 0,05V. Với dòng sạc 5A, thời gian sạc đầy của bộ pin sạc dự phòng này là khoảng 2500 giây (cỡ 40 phút). Sau khi tách module siêu tụ ra khỏi mạch sạc, mạch cân bằng áp vẫn cứ làm việc cho tới khi điện áp 2 siêu tụ xấp xỉ bằng nhau.

5.2. Sạc module pin siêu tụ với dòng điện giới hạn 10A

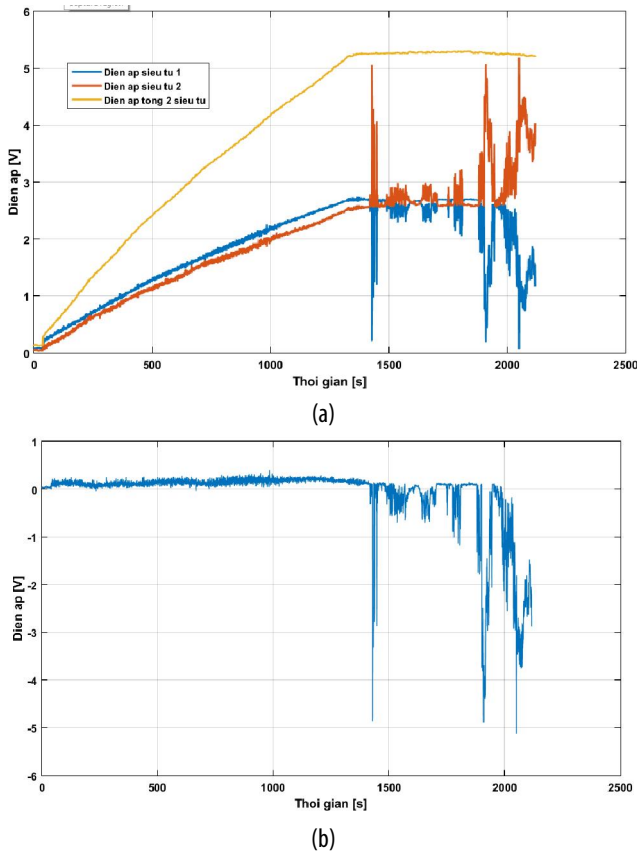


(a)



(b)

Hình 19. Kết quả cân bằng áp tích cực với giới hạn dòng 10A: a) Điện áp các siêu tụ điện; b) Chênh lệch giữa hai siêu tụ điện



Hình 20. Kết quả cân bằng áp thụ động với giới hạn dòng 10A: a) Điện áp các siêu tụ điện; b) Chênh áp giữa hai siêu tụ điện

Kết quả sạc module pin siêu tụ với dòng điện giới hạn 10A được chỉ ra trên hình 19 và 20. Với mục tiêu giảm thời gian sạc, dòng điện giới hạn được tăng lên gấp đôi, gây áp lực về thời gian cho mạch cân bằng áp. Có thể thấy, mạch cân bằng áp tích cực vẫn đáp ứng được ở điều kiện này, trong khi đó mạch cân bằng áp thụ động đã xảy ra hiện tượng dồn ứ năng lượng, tăng điện áp vượt mức gây nguy hiểm cho hệ thống siêu tụ. Trong trường hợp này, điện áp đập mạch có cao hơn, nhưng vẫn giữ được độ ổn định. Với dòng sạc giới hạn 10A, bộ pin sạc dự phòng chỉ mất khoảng 1200 giây (cỡ 20 phút) để sạc đầy.

6. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu về vấn đề sạc module pin dự phòng siêu tụ điện gồm 2 siêu tụ điện 2,7V 3000F của hãng Maxwell sản xuất bằng bộ biến đổi DC - DC Buck đồng bộ điều khiển giới hạn dòng điện. Bài báo cũng đưa ra hai phương pháp cân bằng điện áp tích cực và thụ động để ứng dụng cân bằng điện áp cho hai siêu tụ điện nêu trên. Các kết quả thực nghiệm đã cho thấy cân bằng áp thụ động bằng điện trở mặc dù đơn giản, giá thành rẻ nhưng không đủ đáp ứng cho vấn đề cân bằng áp, đặc biệt khi sạc siêu tụ với dòng điện lớn. Cân bằng áp tích cực bằng mạch bán dẫn transistor có cấu trúc phức tạp hơn nhưng có đáp ứng điện áp cân bằng tốt hơn. Đồng thời cân bằng áp tích cực hạn chế được điện áp bị mất đi, còn cân bằng áp sử dụng điện trở, điện áp sẽ tổn thất trên điện trở và bộ pin sạc sẽ hết năng lượng nhanh hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. S. M. Lukic, J. C. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, 2008. *Energy storages systems for automotive applications*. IEEE Trans. Ind.Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267.

[2]. Sandrs Castano, Lucia Gauchia, and Javier Sanz-Feito, 2013. *Effect of packaging on Supercapacitors strings modelling, proposal of functional unit defined around balancing circuit*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology vol, 3, No 8.

[3]. Isidor Buchmann, 2006. *The High-power Lithium-ion*, batteryuniversity.com.

[4]. Junhong Zhang, 2008. *Bidirectional DC - DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control*, PhD. Thesis.

[5]. A.J. Forsyth and S.V.Mollov, 1998. *Modelling and Control of DC - DC Converters*. Power Engineering Journal, vol. 12, issue 5, pp. 229-236.

[6]. Rich Nowakowski, Ning Tang, 2009. *Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converters*, Analog Applications Journal, 4Q.2009.

[7]. M. R. D. Al-Mothafar, 1997. *Average Current-mode Control of a two-Module DC-DC Converter with Mutually Coupled Output Filter Inductors*. International Journal of Electronics, vol. 83, no. 3.

[8]. Farid Gonaraghi, Benjamin C.Kuo, 2009. *Automatic Control Systems*. 9th edition, ISBN-13: 978-0470048962.

[9]. Marian K. Kazimierczuk, 2008. *Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters*. ISBN: 978-0-470-69465-7.

[10]. Okkes Tolga Altinoz, 2009. *Analysis and Control of Synchronous Buck Converter*.

[11]. C. T. Rim, G. B. Joung and G. H. Cho, 1988. *A State-Space Modeling Of Non-Ideal DC-DC Converters*.

[12]. Maxwell technology Co.. *“HC Series Ultracapacitors Datasheet”*, <http://www.maxwell.com>.