

Nghiên cứu thiết kế bộ tăng áp DC-DC ứng dụng cho hệ thống pin năng lượng mặt trời

Design of DC/DC Boost Converter for Photovoltaic Systems Applications

Lê Thị Minh Châu¹, Trần Anh Tuấn², Trịnh Tuấn Anh³,
Lê Đức Tùng¹, Dương Minh Quân^{2*}

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

³Cao đẳng Công nghiệp Hưng Yên, Hưng Yên, Việt Nam

*Email: dmquan@dut.udn.vn

Tóm tắt

Hiện nay, các hệ thống pin năng lượng mặt trời đang ngày càng phổ biến do những ưu điểm của nó so với các nguồn năng lượng hoá thạch truyền thống. Tuy nhiên, nguồn năng lượng này bị ảnh hưởng bởi sự biến đổi ngẫu nhiên của bức xạ, các thông số và nhiệt độ môi trường, v.v. Vì vậy, việc nâng cao hiệu suất của hệ thống này luôn là một vấn đề được các nhà khoa học quan tâm và đầu tư nghiên cứu. Trong bài báo này, các tác giả tập trung nghiên cứu, thiết kế bộ tăng áp DC/DC có tích hợp thuật toán tìm điểm công suất cực đại MPPT sử dụng phương pháp lai. Phương pháp tìm điểm công suất cực đại được phát triển dựa trên nhiều thuật toán hiện đại. Thiết bị thiết kế được phân tích, đánh giá và cho kết quả khả quan với hiệu suất cao.

Từ khóa: Hệ thống pin năng lượng mặt trời, bộ tăng áp DC/DC, thuật toán MPPT.

Abstract

Renewable energy sources are growing rapidly and becoming an essential part of the national electricity system. The photovoltaic (PV) system is considered an appropriate option due to its advantages over traditional fossil energy sources. However, this energy source is affected by the stochastic variation of irradiance parameters and environment temperature, etc. Therefore, improving the efficiency of this PV system is always an interesting topic to scientists and many researches. This paper focuses on studying and designing DC/DC boost converter with integrated the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm using a hybrid method. The method of finding the maximum power point is developed based on many modern algorithms. Design equipment is analyzed, evaluated and gave positive results with high performance.

Keywords: Photovoltaic System, boost Converter, MPPT.

1. Tổng quan

Ngày nay, năng lượng tái tạo đang dần trở thành giải pháp thiết thực nhất để đáp ứng vấn nạn về môi trường cũng như sự cạn kiệt của nguồn nhiên liệu hóa thạch. Trong đó, năng lượng gió và năng lượng mặt trời là các loại hình được chú trọng nghiên cứu nhiều nhất trong thời gian qua và ngày càng được áp dụng rộng rãi. Các loại hình năng lượng này vừa đáp ứng được các nhu cầu về điện năng, vừa giảm thiểu được các tác động tiêu cực đến môi trường. Tuy nhiên, những ảnh hưởng của các yếu tố tự nhiên: vận tốc gió, hiện tượng che khuất mặt trời... gây ra nhiều tác động xấu đến nguồn năng lượng tái tạo và đặc biệt là với nguồn năng lượng mặt trời [1-2]. Sự thay đổi bất thường của nhiệt độ và bức xạ nhiệt trong ngày làm cho năng lượng đầu ra của pin quang điện luôn biến động.

Các bộ chuyển đổi DC/DC kết hợp các phương pháp điều khiển đang được phát triển nghiên cứu để có thể đáp ứng được các yêu cầu ở đầu ra của hệ thống

pin quang điện khi có sự thay đổi đột ngột các giá trị đầu vào [3]. Để nâng cao hiệu suất làm việc của tấm pin cũng như năng lượng đầu ra, các thuật toán xác định điểm công suất cực đại MPPT (Maximum Power Point Tracker) cũng nghiên cứu và phát triển.

Hiện nay, hai phương pháp MPPT sử dụng phổ biến là thuật toán nhiễu loạn và quan sát P&O (Perturb and Observe) và thuật toán điện dẫn gia tăng INC (Incremental Conductance). Tuy nhiên hai phương pháp này vẫn còn tồn tại nhiều nhược điểm: khả năng đáp ứng chậm, gây thất thoát một phần năng lượng [4-7].

Trong nội dung bài báo, đầu tiên các tác giả nghiên cứu và đề xuất quy trình thiết kế bộ biến đổi điện áp DC/DC boost converter có tích hợp thuật toán lai MPPT. Thiết bị này cho phép nâng cao hiệu suất của hệ thống pin quang điện, khắc phục được một số nhược điểm còn tồn tại của các thuật toán trước đây. Phần 2 của bài báo giới thiệu về bộ DC/DC boost converter và thuật toán lai MPPT. Nguyên lý thiết kế

mạch DC/DC boost converter sẽ được trình bày trong phần 3. Phần 4 sẽ trình bày một thiết kế thiết bị thực tế và đánh giá hiệu quả hoạt động.

2. Bộ tăng áp DC/DC sử dụng thuật toán bắt điểm công suất cực đại MPPT sử dụng phương pháp lai

Hình 1 trình bày sơ đồ khối mô tả một bộ chuyển đổi tăng áp DC/DC Boost converter tích hợp thuật toán MPPT, trong đó:

- Khối PV: Các tấm pin năng lượng mặt trời
- Khối DC/DC: Bộ chuyển đổi điện áp một chiều DC/DC
- Khối DC Load: Tải dùng điện áp một chiều.
- Khối MosFet Driver: là mạch đệm công suất để đóng cắt MosFet
- Khối Micro Controller STM32F103: là bộ vi điều khiển STM32F103 chứa chương trình điều khiển và thuật toán MPPT. Có nhiệm vụ thu thập các giá trị điện áp và dòng điện của tấm pin V_{pv} , I_{pv} ; điện áp và dòng điện ngõ ra của bộ biến đổi V_{out} , I_{out} . STM32F103 được lập trình với thuật toán MPPT và sử dụng chức năng điều chế độ rộng xung (PWM) gửi đến khối MosFet Driver để điều khiển đóng cắt mosfet.

2.1. Bộ tăng áp DC-DC Boost Converter

Mạch tăng áp được sử dụng phổ biến với khả năng điều chỉnh điện áp đầu ra lớn hơn điện áp đầu vào ($V_o > V_{in}$). Nguồn áp một chiều được mắc nối tiếp với một cuộn cảm có vai trò như một nguồn dòng. Một khóa chuyển mạch mắc song song được đóng mở theo chu kỳ và tụ điện dùng để lọc điện áp đầu ra như Hình 2.

Mạch tăng áp làm việc luân phiên ở 2 trạng thái khóa S đóng và khóa S mở.

Dựa vào nguyên lý hoạt động và dạng sóng của điện áp và dòng điện ta có thể thiết lập được mối liên hệ giữa điện áp đầu vào và điện áp đầu ra như sau:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (1)$$

trong đó:

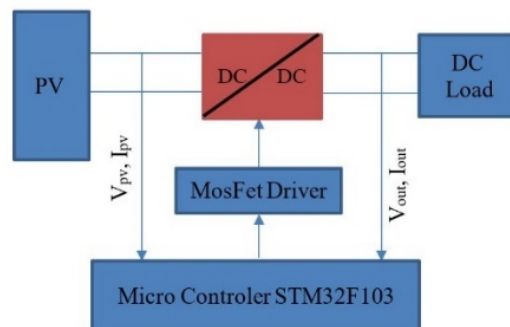
- V_{out} là điện áp đầu ra, (V)
- V_{in} là điện áp đầu vào, (V)
- D là độ rộng xung điều khiển.

2.2. Thuật toán MPPT sử dụng phương pháp lai

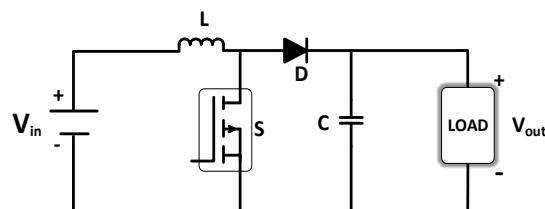
Thuật toán bắt điểm công suất cực đại MPPT là phương pháp dò tìm họ điểm làm việc tối ưu của các hệ thống PV theo các điều kiện môi trường khác nhau. Ngày nay, để nâng cao công suất thu được từ PV hay tăng hiệu suất chuyển đổi năng lượng, phương pháp MPPT áp dụng thuật toán nhiễu loạn và quan sát P&O

(Perturb and Observe), thuật toán Hill Climbing đang được sử dụng thịnh hành [4-6].

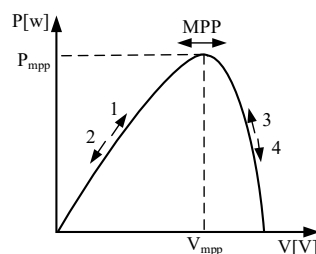
Phương pháp P&O dựa trên việc theo dõi sự biến thiên điện áp theo chu kỳ để tìm được điểm làm việc có công suất lớn nhất. Hình 3 mô tả nguyên lý hoạt động của thuật toán P&O.



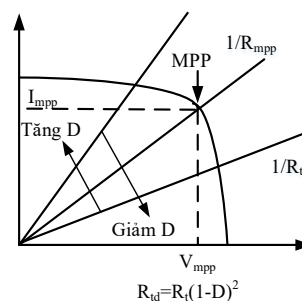
Hình 1. Sơ đồ khối bộ chuyển đổi DC/DC tích hợp thuật toán MPPT



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý của mạch DC/DC tăng áp Boost



a. Đặc tính P-V



b. Đặc tính I-V

Hình 3. Nguyên lý tìm điểm làm việc công suất lớn nhất P&O

- Nếu điểm hoạt động của hệ thống đang di chuyển theo hướng 1 ($\Delta V > 0$ và $\Delta P > 0$) hoặc theo hướng 2 ($\Delta V < 0$ và $\Delta P < 0$) thì cần tăng điện áp hoạt động lên để di chuyển điểm hoạt động tới điểm MPP.

- Nếu điểm hoạt động của hệ thống đang di chuyển theo hướng 3 ($\Delta V < 0$ và $\Delta P > 0$) hoặc hướng 4 ($\Delta V > 0$ và $\Delta P < 0$) thì cần giảm điện áp hoạt động để di chuyển điểm hoạt động tới điểm MPP.

Phương pháp Hill Climbing là một kỹ thuật tối ưu toán học để tìm kiếm các giá trị cực đại hoặc cực tiểu trong một vùng lân cận đang xét. Ta nhận xét họ đường đặc tính công suất của tấm pin khi bức xạ hoặc nhiệt độ thay đổi thì chỉ có một giá trị cực đại ứng với một miền nên ta có thể áp dụng giải thuật này để dò tìm điểm công suất cực đại. Bộ điều khiển sử dụng hai thông số là công suất ΔP , độ rộng xung ΔD để kiểm tra:

- Nếu công suất tăng ($\Delta P > 0$) khi độ rộng xung điều khiển tăng ($\Delta D > 0$) thì tiếp tục tăng D .

- Nếu công suất tăng ($\Delta P > 0$) khi độ rộng xung điều khiển giảm ($\Delta D < 0$) thì giảm D .

- Nếu công suất giảm ($\Delta P < 0$) khi độ rộng xung điều khiển tăng ($\Delta D > 0$) thì giảm D .

- Nếu công suất giảm ($\Delta P < 0$) khi độ rộng xung điều khiển giảm ($\Delta D < 0$) thì tăng D .

Từ mô hình hoạt động của bộ biến đổi DC/DC tăng áp Boost, ta thấy để tăng điện áp của đầu ra của tấm pin như trong thuật toán nêu trên có nghĩa là tăng điện áp đầu vào của V_{in} và theo công thức (1) ta thấy là cần phải giảm D và ngược lại thì tăng D .

Thuật toán MPPT lai được đề xuất trong bài báo là thuật toán kết hợp giữa thuật toán P&O và thuật toán leo đồi Hill Climbing. Để áp dụng thuật toán Hill Climbing vào kết hợp với thuật toán P&O truyền thống, ta xét thêm một tham số trong thuật toán điều khiển là độ gia tăng của độ rộng xung điều khiển dD/dt . Khi $dD/dt > 0$ (trường hợp độ rộng của xung điều khiển D tăng lên) và $dP/dt > 0$ (công suất thu được từ hệ thống PV tăng lên) thì ta tiếp tục tăng độ rộng của xung điều khiển để giảm điện áp trên tấm pin quang điện. Ta áp dụng trường hợp này khi bức xạ tăng hoặc nhiệt độ của tấm pin giảm. Các trường hợp làm việc ở bức xạ và nhiệt độ ít thay đổi vẫn do thuật toán P&O đảm nhiệm.

3. Nguyên lý thiết kế mạch tăng áp DC/DC Boost Converter

Cuộn cảm L của bộ Boost Converter được xác định theo công thức sau [8]:

$$L = \frac{V_{in} * (V_{out} - V_{in})}{V_{out} * \Delta I_L * f} \quad (2)$$

trong đó:

- L : Giá trị điện cảm của cuộn cảm, H
- V_{in} : Điện áp vào của mạch Boost Converter, V

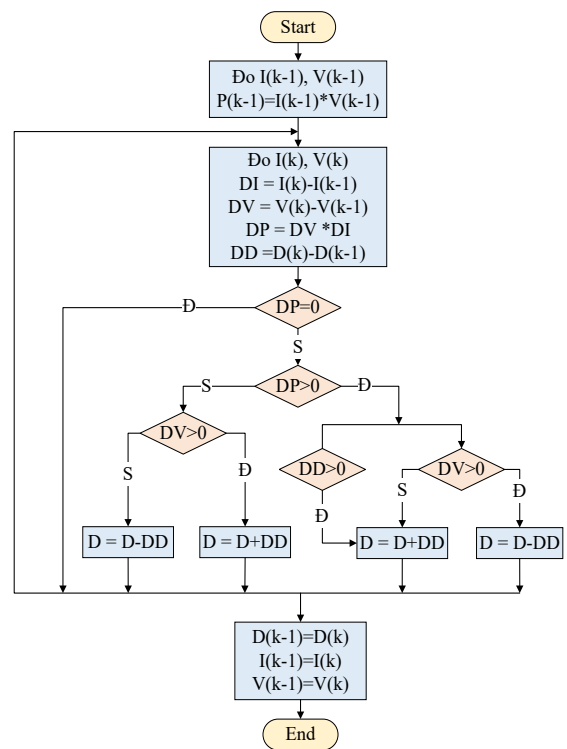
- V_{out} : Điện áp ra của mạch Boost Converter, V

- f : tần số đóng cắt Mosfet, Hz.

- ΔI_L : Độ nhấp nhô dòng điện qua cuộn cảm, A

Nếu ta chọn ΔI_L có giá trị bé thì giá trị của L sẽ lớn. Lúc này việc chế tạo cuộn cảm trong thực tế sẽ tốn kém do giá trị của L lớn. Nếu ta chọn ΔI_L có giá trị lớn thì giá trị của L sẽ nhỏ. Lúc này việc chế tạo cuộn cảm trong thực tế sẽ ít tốn kém do giá trị của L nhỏ. Nhưng ngược lại khi ΔI_L lớn sẽ làm cho dòng điện hiệu dụng qua thiết bị đóng cắt cũng như dòng điện qua cuộn cảm lớn. Vì vậy, trong thực tế để tối ưu giá trị điện cảm L , khi tính toán thiết kế ta thường chọn:

$$\Delta I_L = (20 - 40) \% \frac{I_{out} * V_{out}}{V_{in}} \quad (3)$$



Hình 4. Sơ đồ thuật toán MPPT lai

Trong thiết kế cuộn cảm, ta phải chọn tiết diện mạch từ sao cho điểm làm việc ở công suất cực đại không làm mạch từ bão hòa. Với tần số làm việc trong phạm vi 10 kHz đến 200 kHz, vật liệu làm mạch từ được chọn thông thường là dùng vật liệu Ferrite. Tổn thất cực đại trong lõi Ferrite thường phải nhỏ hơn 0,1 W/cm³ để đảm bảo nhiệt độ làm việc của mạch từ luôn duy trì dưới 60 °C.

Việc tính chọn tụ C ở ngõ ra của bộ Boost phụ thuộc vào thời gian lưu giữ năng lượng $\Delta t = I/f$ và được xác định theo công thức sau [8]:

$$C > \frac{D * I_{out}}{f * \Delta V_o} \quad (4)$$

ΔV_o : Độ gợn (độ nhấp nhô) điện áp ngõ ra, thường được lấy $\Delta V_o = 0,5\% \cdot V_{out}$; D là độ rộng xung (duty cycle) của Mosfet.

4. Ví dụ áp dụng thực tế

Chúng ta xem xét thiết kế một bộ chuyển đổi DC/DC Boost Converter trong thực tế. Giả thiết hệ thống được thiết kế với công suất 1600W. Các thông số của bộ DC/DC như sau: Điện áp vào $V_{in} = 200 V_{DC}$; dòng điện vào $I_{in} = 8 A$; điện áp ra $V_{out} = 400 V_{DC}$; dòng điện ra $I_{out} = 4 A$; công suất ra cực đại $P_{max} = 1600 W$; tần số đóng cắt $f = 40 kHz$.

4.1. Xác định các giá trị L, C và thiết kế mạch từ

Dựa trên công thức (3), (4), chúng ta có thể xác định các giá trị như bảng sau:

ΔI_L	L	I_L
1,6 A	1,56 mH	8,8 A

Từ giá trị L và dòng điện qua cuộn cảm I_L , ta thiết kế được cuộn cảm. Đầu tiên, tiết diện dây quấn của cuộn cảm được xác định bởi công thức:

$$F_u = \frac{I_L}{j_{kt}} = \frac{8,8}{3,5} = 2,5(\text{mm}^2) \tag{5}$$

trong đó: j_{kt} (A/mm²) là mật độ dòng điện kinh tế của dây quấn vật liệu đồng. Chúng ta có thể chọn kiểu dây quấn kép, mỗi sợi có đường kính 1,4mm² có lớp emay cách điện. Kiểm tra tiết diện dây quấn sau khi chọn cho thấy thỏa mãn yêu cầu:

$$F_{dq} = n \frac{\pi d^2}{4} = 3,07(\text{mm}^2) > F_{tt} \tag{6}$$

Với tần số làm việc 40kHz, tổn thất trong lõi Ferrite là 0,1 W/cm³, thì giá trị từ cảm cực đại trong mạch từ là $B_m = 190$ (mT). Chúng ta sẽ chọn lõi ferrite EE55 (gồm 2 lõi chữ E ghép lại), có thể tích $V_e = 43,7$ cm³ và tiết diện lõi $A_e = 3,54$ cm².

Hệ số điện cảm của mạch từ khi quấn trên lõi một vòng dây: $A_L = 1100\text{nH/N}^2$. Số vòng dây của cuộn cảm được xác định như sau:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{1,56 \times 10^{-4}}{1100 \times 10^{-9}}} = 37,7 \tag{7}$$

Ta sẽ chọn số vòng dây quấn là 38 vòng. Vậy, cuộn cảm sử dụng lõi Ferrite EE55, dây quấn kép, mỗi sợi có đường kính 1,4mm, vật liệu dây quấn bằng đồng có phủ cách điện emay. Số vòng dây quấn 38 vòng.

Áp dụng công thức (4), giá trị tụ điện C được xác định như sau:

$$C > \frac{D \times I_{out}}{f \times \Delta V_o} = \frac{0,5 \times 4}{40000 \times 0,005 \times 400} = 25(\mu\text{F})$$

Ta chọn: $C = 47 (\mu\text{F})$

4.2. Thiết kế mạch điện tử công suất và chọn các thiết bị điện tử

Dòng qua khoá S và diode ít nhất bằng với dòng điện cực đại qua cuộn cảm L .

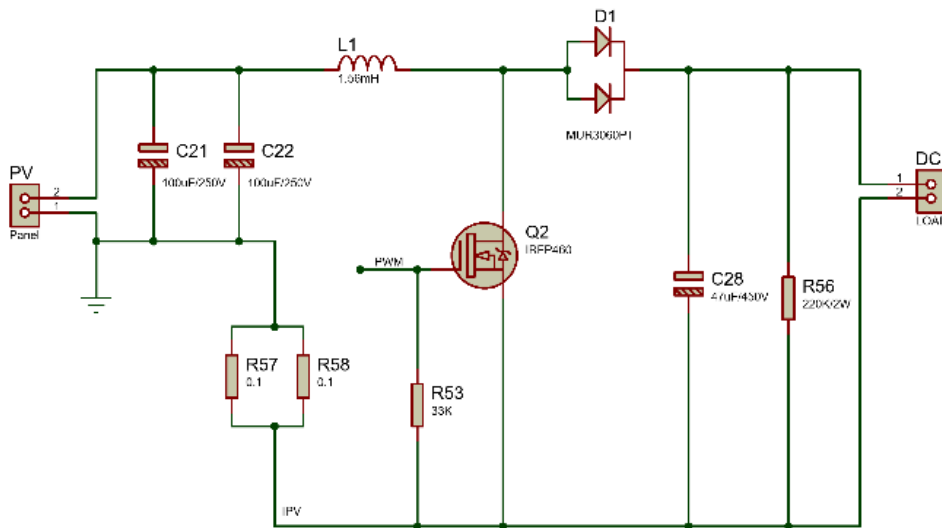
Do đó: $I_S = I_D = I_L = 8,8 (A)$

Điện áp làm việc của MosFet và diode lớn hơn điện áp ra. $U_S = U_D \geq 400V$

Chọn van bán dẫn loại MOSFET IRFP460 loại N có các thông số như bảng 1 và chọn diode loại MUR3060PT với các thông số như bảng 2.

Bảng 1. Các thông số của MOSFET IRFP460.

V_{DS} (V)	$R_{DS(on)}$ (Ω)	$Q_g(\text{max})$	I_{max} (A) (T=100°C)
500	0,27	210nC	13



Hình 5. Sơ đồ thiết kế bộ chuyển đổi DC/DC

Bảng 2. Các thông số của Diode MUR3060PT

V_{RRM} (V)	I_{max} (A)	T_{max} (°C)	V_F (V)
600	30	175	1,2

4.2.1. Thiết kế mô hình mạch chuyển đổi DC/DC

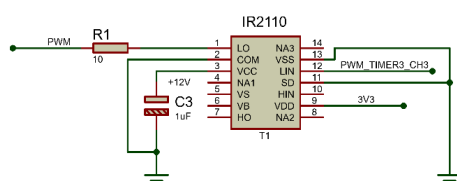
Hai điện trở Shunt R_{S7} và R_{S8} có giá trị 0,1ohm được dùng trong mạch để phân hồi tín hiệu dòng điện (Hình 5). Khi có dòng điện I chạy qua trở shunt sẽ tạo ra một điện áp rơi trên đó. Tín hiệu điện áp này được đưa về để đo lường đại lượng dòng điện trong mạch.

4.2.2. Thiết kế mạch Mosfet Driver

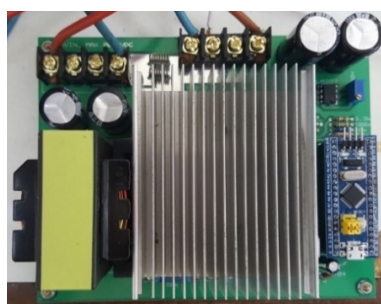
Điện áp làm việc của cực cổng (Gate) của mosfet nằm trong phạm vi 10-20V. Trong khi điện áp ra của vi điều khiển là 3,3V nên ta cần phải có IC đệm để tạo điện áp điều khiển cho chân cực cổng của mosfet phù hợp. Ở đây ta chọn IC IR2110 có các thông số như sau:

- Điện áp ngõ ra điều khiển cực cổng: 10-20V
- Dòng điện đóng/cắt cực đại: 2A/2A
- Thời gian trễ của sườn lên/sườn xuống của xung điều khiển: 120ns/94ns.
- Điện áp ngõ vào logic điều khiển: 3.3V

Mạch cấp nguồn cho vi điều khiển (+5V) và cấp nguồn +12V_{DC} để điều khiển đóng cắt Mosfet. Mạch sử dụng IC ổn áp 7805 và 7812 để cấp nguồn ổn định.



Hình 6. Sơ đồ mạch Mosfet Driver



Hình 7. Mô hình mạch thực tế (Kích thước mạch in 125 mm x 158 mm)

Thiết bị được thiết kế thực tế và mạch cuối cùng được giới thiệu như Hình 7.

4.3. Kiểm tra hiệu suất của mạch được thiết kế

Từ mô hình mạch lắp đặt thực tế, quá trình đo lường và thu thập dữ liệu được tiến hành, các kết quả được thể hiện qua Hình 8.

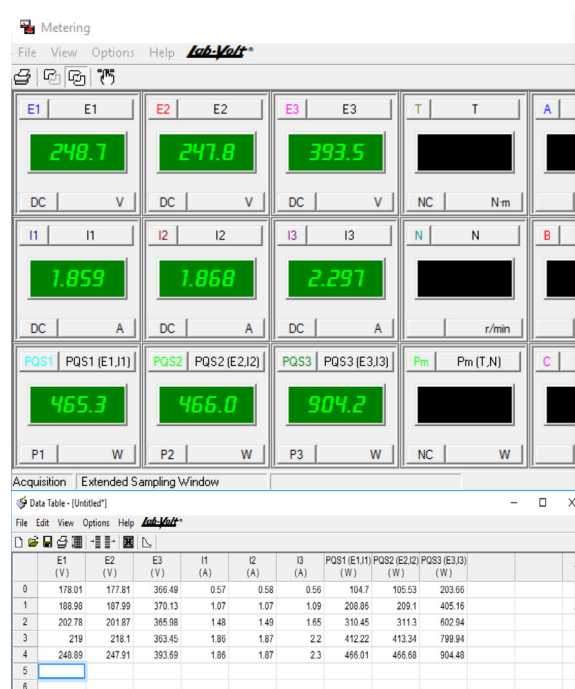
trong đó:

Công suất đầu vào bộ chuyển đổi: $P_{in} = PQS1 + PQS2$ (hay $P_{in} = P1 + P2$)

Công suất đầu ra bộ chuyển đổi: $P_{out} = PQS3$

Hiệu suất bộ chuyển đổi: $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$ (%)

Với mô hình mạch thực lắp đặt, thiết bị đo lường của “LabVolt” có sai số trong phạm vi $\pm 1\%$. Do đó, số liệu thu được trong quá trình đo lường thực tế như Bảng 3 có đủ cơ sở đảm bảo độ tin cậy và chính xác. Mạch DC/DC được thiết kế có hiệu suất cao (gần 97%) và hoạt động tốt.



Hình 8. Kết quả đo lường thực tế

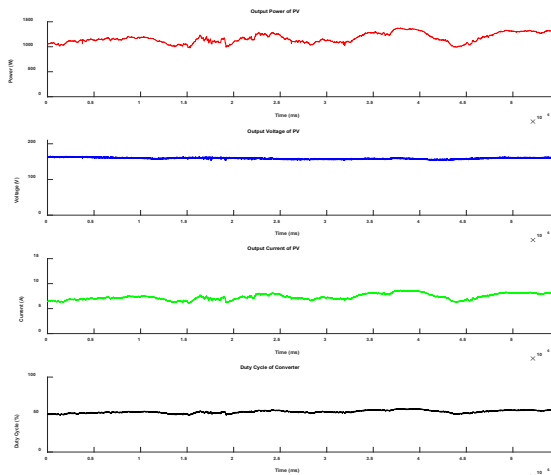
Bảng 3. Kết quả tính toán hiệu suất bộ chuyển đổi

Lần đo	P1(W)	P2(W)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η(%)
1	104,7	105,53	210,23	203,66	96,87
2	208,86	209,01	417,87	405,16	96,96
3	310,45	311,3	621,75	602,94	96,97
4	412,22	413,34	825,56	799,94	96,90
5	466,01	466,68	932,69	904,48	96,98

5. Kết quả chạy mạch thật:

Công suất hệ pin mặt trời: $P_{peak} = 1650W$

Thời gian lấy số liệu: 9:12:47 đến 10:50:05 ngày 10/6/2020.



Hình 9. Các giá trị đo lường thực tế của mô hình

6. Kết luận

Trong nội dung bài báo, phương pháp xác định điểm MPPT dựa trên thuật toán P&O và thuật toán leo đồi Hill Climbing đã được trình bày. Bài báo cũng giới thiệu chi tiết nguyên lý và phương thức thiết kế mạch DC/DC boost converter tích hợp thuật toán MPPT. Từ các kết quả đo đạc thực tế, hiệu suất và khả năng làm việc của mạch thiết kế được kiểm chứng. Các nghiên cứu về tương thích điện từ của mạch DC/DC cũng như thiết kế mạch DC/AC sẽ được tiếp tục triển khai trong thời gian tới.

Lời cảm ơn

Tác giả cảm ơn trường Đại học Bách khoa Hà Nội đã cấp kinh phí cho nghiên cứu này, đề tài T2018-PC-061.

Tài liệu tham khảo

- [1] Jason Svarc, Most Efficient Solar Panels 2020, Clean Energy Reviews, <https://cleanenergyreviews.info>.
- [2] N. T. N. Tran, M.Q. Duong, H. T. Yang, Integrated Transient Stability Analysis with Multi-Large-Scale Solar Photovoltaic in Distribution network, *Journal of Science and Technology*, Vol. 147(C), 2020, pp. 40-45.
- [3] M. Q. Duong, H. Tran, and C. A. Hossain, Influence of elemental parameter in the boost and the buck converter, in *2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference*. IEEE, 2017, pp. 528–531.
- [4] D. P. Hohm, M. E. Ropp, Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed, *Electrical Engineering Department South Dakota State University Brookings, SD 57007-2220*.
- [5] Minh Quan Duong, Gabriela Nicoleta Sava, Mircea Scripcariu, Marco Mussetta, Design and simulation of PI-type control for the Buck Boost converter, in *2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*. IEEE, 2017, pp. 79-82.
- [6] Aleksandar Prodic, Dragan Maksimovic and Robert W. Erickson, Design and Implementation of a Digital PWM Controller for a High-Frequency Switching DC-DC Power Converter, *IECON'01*. IEEE, 2002, pp. 893-898.
- [7] A. S. Ahmed, B. A. Abdullah, and W. G. A. Abdelaal, Mpppt algorithms: Performance and evaluation, in *2016 11th ICCES*. IEEE, 2016, pp. 461–467 <https://doi.org/10.1109/ICCES.2016.7822048>
- [8] Brigitte Hauke, Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage, *Application Report, Texas Instruments, SLVA372C - January 2014*.