

**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**  
**KHOA ĐIỆN**

**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**  
**CAPSTONE PROJECT**

**NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HOÁ**

**ĐỀ TÀI:**  
**NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI**  
**DC – DC CHUYỂN MẠCH MỀM**

Giảng viên hướng dẫn: **TS. TRẦN THÁI ANH ÂU**

Sinh viên thực hiện:

- 1. Phạm Ngọc Linh – MSSV:105200500 – LỚP: 20TDHCLC4**
- 2. Nguyễn Anh Quốc – MSSV: 105200509 – LỚP: 20TDHCLC4**

**Đà Nẵng, 6/2025**



## TÓM TẮT

**Tên đề tài:** “Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC – DC chuyển mạch mềm”.

**Thông tin sinh viên thực hiện:**

1. Phạm Ngọc Linh Mã số sinh viên: 105200500 Lớp: 20TDHCLC4

2. Nguyễn Anh Quốc Mã số sinh viên: 105200509 Lớp: 20TDHCLC4

Bộ chuyển đổi DC – DC hiệu suất cao đóng vai trò quan trọng trong các ứng dụng năng lượng tái tạo, ô tô điện và thiết bị y tế, nhưng kỹ thuật chuyển mạch cứng gây tổn hao năng lượng và nhiễu điện từ (EMI). Đồ án “Bộ chuyển đổi DC – DC chuyển mạch mềm” thiết kế một bộ chuyển đổi nâng áp tích hợp kỹ thuật chuyển mạch không điện áp (ZVS) để cải thiện hiệu suất và độ tin cậy. Mục tiêu là đạt hiệu suất trên 95% với công suất 300W, điện áp đầu vào 36V, đầu ra 400V, đồng thời tối ưu số linh kiện.

Đề tài đề xuất cấu trúc mới kết hợp cuộn cảm ghép, mạch kẹp điện áp và cell nhân áp, phân tích lý thuyết, mô phỏng trên SIMetrix/SIMPLIS, và thực nghiệm trên mẫu thử nghiệm. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất đạt 99% ở tải định mức, với trạng thái ZVS được duy trì cho cả hai MOSFET, giảm tổn hao chuyển mạch và EMI. Thực nghiệm xác nhận khả năng đạt ZVS và hiệu suất cao. So với các cấu trúc tham khảo [24] – [29], thiết kế đề xuất giảm 20% – 50% số linh kiện, tăng hệ số khuếch đại và giảm ứng suất linh kiện.

Đồ án đóng góp giải pháp nguồn điện hiệu quả, phù hợp cho năng lượng xanh, đồng thời đề xuất định hướng nghiên cứu như tích hợp SiC/GaN, điều khiển thông minh, và thu nhỏ hệ thống. Công trình được thực hiện dưới sự hướng dẫn của TS. Trần Thái Anh Âu tại Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng.

Nội dung của đồ án bao gồm:

- Chương 1: Tổng quan.
- Chương 2: Nhu cầu và ứng dụng.
- Chương 3: Cấu trúc tăng áp và chuyển mạch mềm.
- Chương 4: Đề xuất bộ chuyển đổi mới.
- Chương 5: Mô phỏng và thực nghiệm.
- Chương 6: Kết luận và hướng phát triển.

### NHIỆM VỤ ĐỘ ÁN TỐT NGHIỆP

| TT | Họ và tên sinh viên | Mã số thẻ sinh viên | Lớp sinh hoạt | Ngành                              |
|----|---------------------|---------------------|---------------|------------------------------------|
| 1  | Phạm Ngọc Linh      | 105200500           | 20TDHCLC4     | Kỹ Thuật Điều Khiển và Tự Động Hoá |
| 2  | Nguyễn Anh Quốc     | 105200509           | 20TDHCLC4     | Kỹ Thuật Điều Khiển và Tự Động Hoá |

1. Tên đề tài:

Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC – DC chuyển mạch mềm

2. Đề tài thuộc diện:  Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện.

3. Các số liệu và dữ liệu ban đầu:

4. Nội dung chính của đồ án:

a. Phần chung:

| TT | Họ và tên sinh viên | Nội dung                     |
|----|---------------------|------------------------------|
| 1  | Phạm Ngọc Linh      | Tổng quan                    |
|    | Nguyễn Anh Quốc     |                              |
| 2  | Phạm Ngọc Linh      | Nhu cầu và ứng dụng          |
|    | Nguyễn Anh Quốc     |                              |
| 3  | Phạm Ngọc Linh      | Kết luận và hướng phát triển |
|    | Nguyễn Anh Quốc     |                              |

b. Phần riêng:

| TT | Họ và tên sinh viên | Nội dung                            |
|----|---------------------|-------------------------------------|
| 1  | Nguyễn Anh Quốc     | Cấu trúc tăng áp và chuyển mạch mềm |

|   |                |                                       |
|---|----------------|---------------------------------------|
| 2 |                | Nguyên lý hoạt động                   |
| 3 | Phạm Ngọc Linh | Sơ đồ nguyên lý bộ chuyển đổi đề xuất |
| 4 |                | Phân tích mạch ở trạng thái xác lập   |
| 5 |                | Mô phỏng và thực nghiệm bộ chuyển đổi |

5. Các sản phẩm dự kiến:

Mô hình: “Bộ chuyển đổi DC – DC chuyển mạch mềm” thực tế.

6. Người hướng dẫn: TS. Trần Thái Anh Âu

7. Ngày giao đồ án: 06/03/2025

8. Ngày nộp đồ án: 17/06/2025

Đà Nẵng, ngày 16 tháng 06 năm 2025

**Trưởng Bộ môn Tự Động Hoá**

**Giảng viên hướng dẫn**

**TS. Giáp Quang huy**

**TS. Trần Thái Anh Âu**

## PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

Thông tin sinh viên thực hiện:

1. Phạm Ngọc Linh Mã số sinh viên: 105200500 Lớp: 20TDHCLC4

2. Nguyễn Anh Quốc Mã số sinh viên: 105200509 Lớp: 20TDHCLC4

Tên đề tài Đồ án Tốt Nghiệp: “Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC – DC chuyên mạch mềm”.

Họ tên người hướng dẫn: TS. Trần Thái Anh Âu. Đơn vị: Trường đại học Bách Khoa – Đại Học Đà Nẵng.

| Tuần | Ngày       | Khối lượng   |  | GVHD<br>ký tên |
|------|------------|--|--|----------------|
|      |            | Đã thực hiện (%)   | Tiếp tục thực hiện (%)                               |                |
| 1    | 03/03/2025 | Nhận đề tài  | Nghiên cứu lý thuyết liên quan đến điện tử công suất |                |
| 2    | 10/03/2025 | Nghiên cứu về lý thuyết điện tử công suất  | Nghiên cứu về vai trò bộ chuyển đổi DC – DC          |                |
| 3    | 17/03/2025 | Xác định vấn đề hiện tại gặp phải của các bộ chuyển đổi DC – DC hiện nay   | Viết báo cáo chương 1                                |                |
| 4    | 24/03/2025 | Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng hoàn thành 25%:<br>Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> . Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/> |  |                |
| 5    | 03/04/2025 | Nghiên cứu về phương pháp xử lý dòng năng lượng rò của cuộn cảm ghép   | Nghiên cứu về tỷ lệ chuyển đổi điện áp               |                |

|    |            |   |   |  |
|----|------------|---|---|--|
| 6  | 10/04/2025 | Hoàn thành thuyết minh chương 1<br>Tiếp tục nghiên cứu về tỷ lệ chuyển đổi điện áp  | Nghiên cứu về cách đạt được tỷ lệ chuyển đổi điện áp cao                                  |  |
| 7  | 17/04/2025 | Nghiên cứu về phương pháp giảm điện áp ngược trên mosfet  | Tiếp tục nghiên cứu về phương pháp giảm điện áp ngược trên mosfet , viết báo cáo Chương 2 |  |
| 8  | 24/04/2025 | Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng hoàn thành 60 %:<br>Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> . Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/> |   |  |
| 9  | 03/05/2025 | Hoàn thành báo cáo chương 2   | Phân tích cấu trúc, nguyên lý hoạt động của mạch  |  |
| 10 | 10/05/2025 | Tính toán điện áp ngược trên các thành phần của mạch, diode, tụ điện, mosfet.   | Tính toán giá trị cuộn cảm, viết báo cáo Chương 3   |  |
| 11 | 17/05/2025 | Viết báo cáo Chương 3   | Mô phỏng trạng thái hoạt động của mạch trên phần mềm SIMetrix – SIMPLIS                   |  |
| 12 | 24/05/2025 | Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng hoàn thành 85 %:<br>Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> . Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/> |   |  |
| 13 | 01/06/2025 | Tính toán thiết kế mạch cứng trên phần mềm Sprint Layout 6.0  | Hoàn thiện mạch thực, thiết kế driver điều khiển mosfet                                   |  |
| 14 | 08/06/2025 | Hoàn thiện driver điều khiển mosfet   | Đo lấy các thông số thiết kế, hoàn thiện báo cáo Chương 3                                 |  |
| 15 | 15/06/2025 | Phân tích tổn thất công suất trên mạch  | Hoàn thiện nội dung báo cáo   |  |

## LỜI MỞ ĐẦU VÀ CẢM ƠN

Trong bối cảnh công nghiệp hóa và hiện đại hóa, nhu cầu về các nguồn điện một chiều hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn và độ tin cậy vượt trội ngày càng gia tăng. Các bộ chuyển đổi DC–DC đóng vai trò thiết yếu trong việc điều chỉnh điện áp, đáp ứng yêu cầu của nhiều ứng dụng như năng lượng tái tạo, ô tô điện, thiết bị y tế và viễn thông. Tuy nhiên, các bộ chuyển đổi sử dụng kỹ thuật chuyển mạch cứng thường gặp hạn chế về tổn hao năng lượng ở tần số cao, ảnh hưởng đến hiệu suất và độ bền linh kiện.

Đề án “Bộ chuyển đổi DC–DC chuyển mạch mềm” tập trung thiết kế, phân tích, mô phỏng và thực nghiệm một bộ chuyển đổi nâng áp tích hợp kỹ thuật chuyển mạch mềm (ZVS), nhằm đạt hiệu suất cao, hệ số khuếch đại lớn và tối ưu số lượng linh kiện. Công trình không chỉ mang ý nghĩa học thuật mà còn góp phần phát triển các giải pháp nguồn điện hiệu quả, bền vững cho các hệ thống hiện đại.

Chúng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến TS. Trần Thái Anh Âu, giảng viên Bộ môn Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, người đã tận tình hướng dẫn, cung cấp kiến thức chuyên môn và định hướng nghiên cứu, giúp chúng em hoàn thành đề án. Chúng em cũng gửi lời cảm ơn đến Ban Giám hiệu nhà trường, Khoa Điện, các thầy cô trong Bộ môn, cùng bạn bè, đồng nghiệp và gia đình, đã hỗ trợ về cơ sở vật chất, tài liệu và động viên tinh thần trong suốt quá trình thực hiện.

Mặc dù đã nỗ lực tối đa, đề án không tránh khỏi những thiếu sót. Chúng em rất mong nhận được ý kiến đóng góp từ các thầy cô và bạn đọc để hoàn thiện công trình này.

## **LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT**

Chúng em, Phạm Ngọc Linh – MSSV: 105200500 và Nguyễn Anh Quốc – MSSV: 105200509, sinh viên lớp 20TDHCLC4, Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, xin cam đoan rằng đồ án tốt nghiệp với đề tài “Bộ chuyển đổi DC–DC chuyển mạch mềm” là công trình nghiên cứu do chính chúng em thực hiện dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Trần Thái Anh Âu.

Toàn bộ nội dung, bao gồm các phân tích lý thuyết, mô phỏng, thực nghiệm, và kết quả trình bày trong đồ án, được thực hiện một cách trung thực, tuân thủ các quy định về liêm chính học thuật của Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng. Các tài liệu tham khảo, dữ liệu, và kết quả từ các nguồn khác được trích dẫn đầy đủ, rõ ràng theo đúng quy chuẩn học thuật. Chúng em chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính trung thực và chính xác của nội dung đồ án.

Chúng em xin cam kết rằng đồ án này không sao chép từ bất kỳ nguồn nào mà không được trích dẫn hợp lệ, không sử dụng các phương pháp gian lận học thuật, và không vi phạm các quy định về bản quyền hoặc đạo đức nghiên cứu.

**Sinh viên thực hiện**

*(Chữ ký, họ tên sinh viên)*

**Nguyễn Anh Quốc**

**Phạm Ngọc Linh**

# MỤC LỤC

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Tóm tắt .....</b>   | <b>i</b>    |
| <b>Nhiệm vụ đồ án tốt nghiệp.....</b>                                    | <b>ii</b>   |
| <b>Lời mở đầu và cảm ơn .....</b>  | <b>vi</b>   |
| <b>Lời cam đoan liêm chính học thuật .....</b>                           | <b>vii</b>  |
| <b>Mục lục .....</b>   | <b>viii</b> |
| <b>Danh mục bảng, hình ảnh.....</b>                                      | <b>xi</b>   |
| <b>Danh mục các ký hiệu, chữ viết tắt.....</b>                           | <b>xiii</b> |
| <b>Mở đầu.....</b>   | <b>1</b>    |
| <b>Chương 1. Tổng quan .....</b>   | <b>2</b>    |
| <b>1.1 Lý do chọn đề tài .....</b>                                       | <b>2</b>    |
| <b>1.2 Mục tiêu nghiên cứu.....</b>                                      | <b>4</b>    |
| <b>1.3 Đối tượng, phạm vi nghiên cứu.....</b>                            | <b>5</b>    |
| 1.3.1 Đối tượng nghiên cứu.....  | 5           |
| 1.3.2 Phạm vi nghiên cứu .....   | 6           |
| <b>1.4 Phương pháp nghiên cứu và công cụ sử dụng .....</b>               | <b>6</b>    |
| 1.4.1 Phân tích lý thuyết .....  | 6           |
| 1.4.2 Phương pháp mô phỏng (Simulation) .....                            | 6           |
| 1.4.3 Phương pháp thực nghiệm (Experimental Prototyping & Testing) ..... | 7           |
| 1.4.4 Phương pháp so sánh và đánh giá (Comparison & Evaluation).....     | 7           |
| <b>1.5 Cấu trúc đồ án .....</b>  | <b>7</b>    |
| <b>Chương 2. Nhu cầu và ứng dụng .....</b>                               | <b>9</b>    |
| <b>2.1 Ứng dụng của bộ chuyển đổi DC-DC .....</b>                        | <b>9</b>    |
| <b>2.2 Tổng quan các cấu trúc DC-DC tăng áp truyền thống.....</b>        | <b>12</b>   |
| 2.2.1 Bộ Boost truyền thống.....   | 12          |

|                  |   |           |
|------------------|---|-----------|
| 2.2.2            | Mạch khuếch đại hai tầng nối tiếp.....  | 13        |
| 2.2.3            | Mạch Flyback .....  | 13        |
| <b>2.3</b>       | <b>Các bộ chuyển đổi DC-DC có hệ số khuếch đại cao.....</b>   | <b>14</b> |
| 2.3.1            | Mạch Boost sử dụng cuộn cảm ghép – Coupled Inductor.....  | 14        |
| 2.3.2            | Cell nhân áp – Voltage Multiplier Cell (VMC).....   | 15        |
| 2.3.3            | Cấu trúc nhiều tầng – Multi Stage Converter .....   | 16        |
| 2.3.4            | Tụ điện chuyển mạch – Switched Capacitor (SC).....  | 17        |
| <b>2.4</b>       | <b>Ưu, nhược điểm của các cấu trúc.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2.5</b>       | <b>Vấn đề tổn hao chuyển mạch cứng (hard switching) và nhu cầu chuyển mạch mềm</b>                    | <b>19</b> |
| 2.5.1            | Phân tích vấn đề.....   | 19        |
| 2.5.2            | Giải pháp và hướng nghiên cứu.....  | 19        |
| 2.5.3            | Kết luận.....   | 20        |
| <b>Chương 3.</b> | <b>Cấu trúc tăng áp và chuyển mạch mềm.....</b>   | <b>21</b> |
| <b>3.1</b>       | <b>Khái niệm chuyển mạch mềm – Soft Switching .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>3.2</b>       | <b>Các kỹ thuật chuyển mạch mềm phổ biến .....</b>  | <b>22</b> |
| 3.2.1            | Mạch kẹp chủ động và thụ động – Active/Passive Clamping .....   | 22        |
| 3.2.2            | Switch phụ – Auxiliary Switch.....  | 23        |
| <b>3.3</b>       | <b>Ảnh hưởng của chuyển mạch mềm đến hiệu suất và tuổi thọ thiết bị .....</b>                         | <b>23</b> |
| <b>3.4</b>       | <b>Tổng kết nhu cầu thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC có hệ số khuếch đại cao và chuyển mạch mềm .....</b> | <b>24</b> |
| <b>Chương 4.</b> | <b>Đề xuất bộ chuyển đổi mới .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>4.1</b>       | <b>Sơ đồ nguyên lý bộ chuyển đổi đề xuất .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>4.2</b>       | <b>Nguyên lý hoạt động.....</b>   | <b>26</b> |
| 4.2.1            | Nhịp I ( $t_0 \sim t_1$ ) .....   | 29        |
| 4.2.2            | Nhịp II ( $t_1 \sim t_2$ ) .....  | 29        |
| 4.2.3            | Nhịp III ( $t_2 \sim t_3$ ).....  | 30        |
| 4.2.4            | Nhịp IV ( $t_3 \sim t_4$ ) .....  | 31        |

|                  |   |           |
|------------------|---|-----------|
| 4.2.5            | Nhip V ( $t_4 \sim t_5$ ).....                    | 32        |
| 4.2.6            | Nhip VI ( $t_5 \sim t_6$ ) .....                  | 32        |
| 4.2.7            | Nhip VII( $t_6 \sim t_7$ ).....                   | 33        |
| <b>4.3</b>       | <b>Phân tích mạch ở trạng thái xác lập.....</b>   | <b>34</b> |
| 4.3.1            | Hệ số khuếch đại điện áp.....                     | 34        |
| 4.3.2            | Điện áp ngược trên thiết bị công suất.....        | 35        |
| 4.3.3            | Tính toán cuộn cảm ghép .....                     | 36        |
| 4.3.4            | Lựa chọn tụ điện .....                            | 36        |
| <b>Chương 5.</b> | <b>Mô phỏng và thực nghiệm bộ chuyển đổi.....</b> | <b>38</b> |
| <b>5.1</b>       | <b>Thông số của thiết bị.....</b>                 | <b>38</b> |
| 5.1.1            | Tính toán thông số thiết bị.....                  | 38        |
| 5.1.2            | Lựa chọn linh kiện.....                           | 40        |
| <b>5.2</b>       | <b>Kiểm nghiệm bộ chuyển đổi.....</b>             | <b>41</b> |
| 5.2.1            | Mô phỏng.....                                     | 41        |
| 5.2.2            | Phân tích hiệu suất và tổn hao .....              | 46        |
| 5.2.3            | Thực nghiệm.....                                  | 48        |
| <b>5.3</b>       | <b>So sánh với các bộ chuyển đổi khác.....</b>    | <b>52</b> |
| <b>Chương 6.</b> | <b>Kết luận và hướng phát triển.....</b>          | <b>56</b> |
| <b>6.1</b>       | <b>Kết luận .....</b>                             | <b>56</b> |
| <b>6.2</b>       | <b>Đóng góp của đề án .....</b>                   | <b>56</b> |
| <b>6.3</b>       | <b>Định hướng nghiên cứu tiếp theo .....</b>      | <b>57</b> |
|                  | <b>Tài liệu tham khảo.....</b>                    | <b>58</b> |

## DANH MỤC BẢNG, HÌNH ẢNH

|   |    |
|---|----|
| Bảng 2.1 So sánh các cấu trúc .....   | 18 |
| Bảng 3.1 Bảng so sánh hai loại mạch kẹp .....                                   | 23 |
| Bảng 5.1 Thông số kỹ thuật mong muốn của bộ chuyển đổi .....                    | 38 |
| Bảng 5.2 Thông số thiết kế linh kiện của bộ chuyển đổi .....                    | 39 |
| Bảng 5.3 So sánh bộ chuyển đổi được đề xuất với một số bộ chuyển đổi khác ..... | 53 |
|   |    |
| Hình 2.1 Hệ thống tích hợp PV và Micro Grid .....                               | 9  |
| Hình 2.2 Hệ thống dẫn động của xe điện .....                                    | 10 |
| Hình 2.3 Mạch đèn công suất cao .....   | 10 |
| Hình 2.4 Thiết bị y tế sử dụng bộ DC-DC .....                                   | 11 |
| Hình 2.5 Mạch Boost cơ bản .....  | 12 |
| Hình 2.6 Đường đặc tính của mạch Boost.....                                     | 12 |
| Hình 2.7 Mạch khuếch đại hai tầng nối tiếp.....                                 | 13 |
| Hình 2.8 Mạch Flyback .....   | 14 |
| Hình 2.9 Mạch tăng áp cơ bản sử dụng cuộn cảm ghép.....                         | 15 |
| Hình 2.10 Voltage Multiplier Cell.....  | 16 |
| Hình 2.11 Multi Stage Converter .....   | 16 |
| Hình 2.12 Switched Capacitor.....   | 17 |
| Hình 3.1 Chồng chất điện áp và dòng điện tại thời điểm chuyển mạch.....         | 21 |
| Hình 3.2 Mạch kẹp chủ động/thụ động .....                                       | 22 |
| Hình 4.1 Sơ đồ nguyên lý của bộ chuyển đổi đề xuất.....                         | 26 |
| Hình 4.2 Quy ước chiều dòng điện trong cấu trúc bộ biến đổi .....               | 27 |
| Hình 4.3 Biểu đồ dạng sóng của cấu trúc tăng áp đề xuất .....                   | 28 |
| Hình 4.4 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp I.....                 | 29 |
| Hình 4.5 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp II.....                | 30 |
| Hình 4.6 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp III .....              | 31 |
| Hình 4.7 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp IV .....               | 31 |
| Hình 4.8 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp V .....                | 32 |
| Hình 4.9 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp VI .....               | 33 |
| Hình 4.10 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp VII.....              | 33 |
| Hình 5.1 Mối liên hệ giữa hệ số khuếch đại điện áp với độ rộng xung .....       | 39 |
| Hình 5. MOSFET HY3215.....  | 40 |
| Hình 5. DIODE RHRG30120.....  | 41 |
| Hình 5. Sơ đồ mô phỏng cấu trúc bộ chuyển đổi trên SIMetrix/SIMPLIS .....       | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Hình 5. Dạng sóng điện áp vào ra của bộ chuyển đổi.....                                 | 43 |
| Hình 5. Dạng sóng tính hiệu dòng áp đi qua các linh kiện .....                          | 44 |
| Hình 5. Trạng thái ZVS của MOSFET2 .....  | 45 |
| Hình 5. Trạng thái ZVS của MOSFET1 .....  | 45 |
| Hình 5. Thông tin công suất mô phỏng tại 100% tải.....                                  | 46 |
| Hình 5. Tỷ lệ thành phần tổn hao công suất.....   | 47 |
| Hình 5. Mô phỏng tại các mức tải khác nhau .....  | 48 |
| Hình 5. Mô hình bộ chuyển đổi thực .....  | 48 |
| Hình 5. Sơ đồ PCB bố trí linh kiện trên mạch .....                                      | 48 |
| Hình 5.14 Dạng sóng thực nghiệm điện áp vào ra .....                                    | 49 |
| Hình 5.15 Dạng sóng thực nghiệm dòng điện đầu vào $I_{in}$ .....                        | 50 |
| Hình 5.16 Dạng sóng thực nghiệm dòng điện rò qua cuộn $L_k$ .....                       | 50 |
| Hình 5.17 Dạng sóng thực nghiệm điện áp đặt trên Diode 1 và 2 .....                     | 50 |
| Hình 5.18 Dạng sóng thực nghiệm điện áp đặt trên Diode 2 và 3 .....                     | 51 |
| Hình 5.19 Dạng sóng thực nghiệm trên MOSFET 1 ở trạng thái Zero Voltage Switching ..... | 52 |
| Hình 5.20 Dạng sóng thực nghiệm trên MOSFET 2 ở trạng thái Zero Voltage Switching ..... | 52 |
| Hình 5.21 Đồ thị khảo sát và so sánh hệ số khuếch đại điện áp .....                     | 54 |
| Hình 5.22 Hệ số điện áp ngược đặt lên MOSFET .....                                      | 54 |

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

### KÝ HIỆU

$V_{in}$  – Điện áp đầu vào

$V_o$  – Điện áp đầu ra

$I_{in}$  – Dòng điện đầu vào

$D$  – Độ rộng xung (Duty cycle)

$n$  – Tỷ số vòng dây của cuộn cảm ghép

$f_s$  – Tần số chuyển mạch

$L_m$  – Điện cảm từ hóa của cuộn cảm ghép

$L_k$  – Điện cảm rò của cuộn cảm ghép

$C_1, C_2, C_3, C_4$  – Các tụ điện trong mạch

$D_1, D_2, D_3$  – Các diode trong mạch

$S_1, S_2$  – Các MOSFET chuyển mạch

$P$  – Công suất đầu ra

$V_{DS}$  – Điện áp giữa cực Drain và Source của MOSFET

### CHỮ VIẾT TẮT

DC – DC – Direct Current to Direct Current

ZVS – Zero Voltage Switching

EMI – Electromagnetic Interference

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

SiC – Silicon Carbide

GaN – Gallium Nitride

MPPT – Maximum Power Point Tracking

PCB – Printed Circuit Board

DSP – Digital Signal Processor

FPGA – Field-Programmable Gate Array

SoC – System-on-Chip

SiP – System-in-Package

IEC – International Electrotechnical Commission

MIL – STD – Military Standard

EMC – Electromagnetic Compatibility

## MỞ ĐẦU

Nhu cầu về các nguồn điện một chiều hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn ngày càng tăng trong các ứng dụng như năng lượng tái tạo, ô tô điện, và thiết bị y tế. Tuy nhiên, các bộ chuyển đổi DC–DC truyền thống sử dụng chuyển mạch cứng gây tổn hao năng lượng, nhiễu điện từ (EMI), và giảm tuổi thọ linh kiện ở tần số cao. Đề tài “Bộ chuyển đổi DC–DC chuyển mạch mềm” nhằm thiết kế một bộ chuyển đổi nâng áp tích hợp kỹ thuật chuyển mạch không điện áp (ZVS), góp phần phát triển giải pháp nguồn điện hiệu quả, bền vững.

Mục tiêu của đề án là thiết kế bộ chuyển đổi đạt hiệu suất trên 95% với công suất 300W, điện áp đầu vào 36V, đầu ra 400V, tích hợp ZVS để giảm tổn hao, nhiễu EMI, và ứng suất nhiệt. Đề án cũng tối ưu số lượng linh kiện, giảm chi phí, đảm bảo khả năng ứng dụng trong năng lượng tái tạo và giao thông xanh.

Đối tượng nghiên cứu là bộ chuyển đổi DC – DC nâng áp sử dụng ZVS, kết hợp cuộn cảm ghép, mạch kẹp điện áp, và cell nhân áp. Phạm vi nghiên cứu gồm phân tích lý thuyết, mô phỏng trên SIMetrix/SIMPLIS, chế tạo mẫu thử nghiệm, và so sánh với các thiết kế trong tài liệu tham khảo [24] – [29], về hiệu suất, số lượng linh kiện.

Phương pháp nghiên cứu gồm phân tích lý thuyết dựa trên tài liệu, mô phỏng số để đánh giá hiệu suất, thực nghiệm chế tạo và đo đạc mẫu thử nghiệm, cùng so sánh kết quả với các cấu trúc tham khảo. Đề án gồm sáu chương:

- Chương 1: Tổng quan.
- Chương 2: Nhu cầu và ứng dụng.
- Chương 3: Cấu trúc tăng áp và chuyển mạch mềm.
- Chương 4: Đề xuất bộ chuyển đổi mới.
- Chương 5: Mô phỏng và thực nghiệm.
- Chương 6: Kết luận và hướng phát triển.

Đề án được thực hiện dưới sự hướng dẫn của TS. Trần Thái Anh Âu, với sự hỗ trợ từ Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, nhằm đóng góp vào công nghệ điện tử công suất.

## CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

### 1.1 Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh công nghiệp hóa, hiện đại hóa và sự phát triển bùng nổ của các thiết bị điện tử công suất, nhu cầu về các nguồn cung cấp năng lượng một chiều (DC) hiệu suất cao, độ tin cậy cao, kích thước nhỏ gọn và thân thiện với môi trường ngày càng trở nên cấp thiết [1]. Các bộ chuyển đổi DC – DC đóng vai trò trung tâm trong việc điều chỉnh, ổn định và chuyển đổi mức điện áp DC từ nguồn (như pin, tấm pin mặt trời, nguồn cấp một chiều) sang tải đòi hỏi mức điện áp khác nhau [2]. Chúng hiện diện rộng rãi trong vô số ứng dụng, từ các thiết bị di động, trung tâm dữ liệu, hệ thống viễn thông đến xe điện (EV), hệ thống năng lượng tái tạo (điện mặt trời, điện gió), và các hệ thống công nghiệp tự động hóa [3].

Tuy nhiên, một thách thức lớn luôn tồn tại đối với các bộ chuyển đổi DC-DC truyền thống (sử dụng chuyển mạch cứng - Hard Switching) là tổn hao năng lượng đáng kể trong quá trình đóng/cắt các linh kiện bán dẫn công suất (như MOSFET, IGBT). Các tổn hao này chủ yếu đến từ:

- **Tổn hao đóng/cắt (Switching Losses):** Phát sinh do sự chồng chéo giữa điện áp và dòng điện qua linh kiện trong các quá trình quá độ khi đóng và cắt mạch, đặc biệt nghiêm trọng ở tần số chuyển mạch cao.
- **Tổn hao dẫn (Conduction Losses):** Phụ thuộc vào điện trở ON-state ( $R_{ds\_ON}$  của MOSFET,  $V_{ce\_sat}$  của IGBT) và dòng điện tải.
- **Hiện tượng phục hồi ngược (Reverse Recovery) của diode:** Gây ra dòng đỉnh lớn và tổn hao đáng kể, đặc biệt trong các cấu hình sử dụng diode.

Việc gia tăng tần số chuyển mạch (Switching Frequency) là một giải pháp hấp dẫn để giảm kích thước của các thành phần thụ động (cuộn cảm, tụ điện), từ đó giảm kích thước tổng thể và tăng mật độ công suất của bộ chuyển đổi. Tuy nhiên, điều này lại làm trầm trọng thêm vấn đề tổn hao đóng/cắt và tổn hao do phục hồi ngược trong các bộ chuyển đổi chuyển mạch cứng, dẫn đến giảm hiệu suất tổng thể, tăng nhiệt độ làm việc, giảm độ tin cậy và đòi hỏi hệ thống tản nhiệt lớn, cồng kềnh.

Kỹ thuật chuyển mạch mềm (Soft – Switching Technique) ra đời như một giải pháp then chốt để khắc phục những hạn chế này. Nguyên lý cơ bản của chuyển mạch mềm là tạo điều kiện để linh kiện bán dẫn đóng hoặc cắt mạch khi điện áp trên nó bằng

không (ZVS – Zero Voltage Switching) hoặc dòng điện qua nó bằng không (ZCS – Zero Current Switching). Điều này loại bỏ hoặc giảm thiểu đáng kể sự chòng chéo điện áp-dòng điện, từ đó triệt tiêu phần lớn tổn hao đóng/cắt và giảm tổn hao do phục hồi ngược của diode. Kết quả là:

- Hiệu suất chuyển đổi được nâng cao đáng kể, ngay cả ở tần số chuyển mạch cao.
- Cho phép vận hành ở tần số chuyển mạch cao hơn mà không sợ tổn hao quá lớn, dẫn đến giảm kích thước và khối lượng của các thành phần thụ động ( $L$ ,  $C$ ), tăng mật độ công suất.
- Giảm nhiệt độ làm việc của linh kiện, tăng tuổi thọ và độ tin cậy của hệ thống.
- Giảm nhiễu điện từ (EMI) do giảm tốc độ thay đổi dòng điện/điện áp ( $di/dt$ ,  $dv/dt$ ) trong quá trình chuyển mạch.

Mặc dù có nhiều ưu điểm vượt trội, việc tích hợp kỹ thuật chuyển mạch mềm vào các bộ chuyển đổi DC-DC thường đi kèm với sự phức tạp hóa về cấu trúc mạch. Các mạch cộng hưởng phụ (như mạch cộng hưởng LC, các cuộn cảm và tụ điện bổ sung) và các linh kiện công suất phụ (thường là các switch phụ) được thêm vào để tạo điều kiện ZVS. Điều này làm tăng chi phí, kích thước tổng thể và độ phức tạp trong thiết kế, điều khiển so với bộ chuyển đổi chuyển mạch cứng tương ứng.

Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu về các bộ chuyển đổi DC – DC tích hợp chuyển mạch mềm đang là hướng đi được quan tâm đặc biệt. Mục tiêu của "tích hợp" ở đây là:

- Tối ưu hóa cấu trúc mạch: Thiết kế các cấu trúc mới hoặc cải tiến các cấu trúc hiện có sao cho các thành phần phục vụ cho chuyển mạch mềm (mạch cộng hưởng, switch phụ) được "tích hợp" một cách hiệu quả nhất, tối thiểu hóa số lượng linh kiện bổ sung, tận dụng tối đa chức năng của các thành phần sẵn có trong mạch lực chính.
- Duy trì hoặc nâng cao hiệu suất: Đảm bảo kỹ thuật chuyển mạch mềm được thực hiện hiệu quả trên các linh kiện chính, đạt được ZVS trong dải tải rộng.
- Giảm thiểu chi phí và kích thước: Từ việc giảm số linh kiện, đồng thời vẫn tận dụng được lợi thế kích thước nhỏ gọn nhờ tần số cao.

Do đó, đề tài "Nghiên cứu bộ chuyển đổi DC – DC tích hợp chuyển mạch mềm" được lựa chọn nhằm:

- Đáp ứng nhu cầu thực tiễn: Góp phần phát triển các nguồn DC hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn, độ tin cậy cao cho các ứng dụng hiện đại, đặc biệt là nơi yêu cầu khắt khe về hiệu suất và kích thước.

- Giải quyết bài toán kỹ thuật: Khắc phục nhược điểm về tổn hao và kích thước của bộ chuyển đổi chuyển mạch cứng, đồng thời giảm thiểu sự phức tạp và chi phí gia tăng thường thấy ở các bộ chuyển đổi chuyển mạch mềm truyền thống thông qua giải pháp tích hợp.
- Mang tính học thuật và đổi mới: Đi sâu nghiên cứu nguyên lý hoạt động, phương pháp thiết kế và tối ưu hóa cho một cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC mới hoặc cải tiến có tích hợp hiệu quả kỹ thuật chuyển mạch mềm, góp phần vào sự phát triển của lĩnh vực điện tử công suất.

## 1.2 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là thiết kế, phân tích, mô phỏng và thực nghiệm đánh giá một bộ chuyển đổi DC – DC mới hoặc cải tiến có tích hợp hiệu quả kỹ thuật chuyển mạch mềm (ZVS), hướng tới nâng cao hiệu suất, tăng mật độ công suất và giảm thiểu số lượng linh kiện bổ sung so với các giải pháp chuyển mạch mềm thông thường.

Các mục tiêu cụ thể bao gồm:

1. Nghiên cứu tổng quan: Hệ thống hóa cơ sở lý thuyết về các bộ chuyển đổi DC-DC cơ bản (Buck, Boost, Buck-Boost, Flyback, Forward, v.v.), các cơ chế tổn hao chuyển mạch, nguyên lý và các kỹ thuật chuyển mạch mềm (ZVS, ) phổ biến, cũng như các xu hướng tích hợp chuyển mạch mềm trong các bộ chuyển đổi DC-DC hiện nay.
2. Đề xuất cấu trúc mạch: Lựa chọn hoặc đề xuất một cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC cụ thể (ví dụ: Buck, Boost, Buck-Boost, Half-Bridge, Full-Bridge, v.v.) được cải tiến để tích hợp kỹ thuật chuyển mạch mềm một cách hiệu quả. Cấu trúc này cần thể hiện rõ sự "tích hợp" nhằm giảm thiểu linh kiện bổ sung.
3. Phân tích nguyên lý hoạt động: Mô tả chi tiết và phân tích nguyên lý hoạt động của bộ chuyển đổi đề xuất trong tất cả các trạng thái làm việc (các nhịp chuyển mạch), đặc biệt tập trung vào cơ chế đạt được ZVS cho các linh kiện công suất chính.
4. Phân tích toán học và thiết kế tham số: Xây dựng mô hình toán học cho các nhịp hoạt động chính. Từ đó, thiết lập các phương trình cơ bản, đặc tính vào-ra, và quan trọng nhất là các điều kiện thiết kế để đảm bảo đạt được chuyển mạch mềm (ZVS) trong một dải tải và điện áp đầu vào rộng. Thiết kế giá trị cho các thành phần chính (linh kiện công suất, cuộn cảm, tụ điện, tụ cộng hưởng) dựa trên các thông số đầu vào/ra mong muốn và các điều kiện chuyển mạch mềm.

5. Mô phỏng kiểm chứng: Sử dụng phần mềm mô phỏng mạch điện tử công suất (như PSIM, LTspice, PLECS, Simulink) để xây dựng mô hình và mô phỏng hoạt động của bộ chuyển đổi đề xuất. Phân tích kết quả mô phỏng để:
  - Kiểm chứng nguyên lý hoạt động và cơ chế đạt ZVS.
  - Đánh giá hiệu suất chuyển đổi, dạng sóng điện áp/dòng điện tại các điểm quan trọng.
  - So sánh hiệu năng (hiệu suất, độ gợn sóng điện áp/dòng điện) với bộ chuyển đổi chuyển mạch cứng tương ứng và/hoặc các cấu trúc chuyển mạch mềm khác.
  - Khảo sát hoạt động của bộ chuyển đổi trong các điều kiện làm việc khác nhau (thay đổi điện áp đầu vào, thay đổi tải, thay đổi tần số chuyển mạch).
6. Chế tạo mẫu và thực nghiệm: Thiết kế mạch in (PCB), lựa chọn linh kiện phù hợp và chế tạo mẫu thử nghiệm bộ chuyển đổi DC-DC tích hợp chuyển mạch mềm dựa trên kết quả phân tích và mô phỏng.
7. Đo đạc và đánh giá kết quả thực nghiệm: Tiến hành các phép đo trên mẫu thử nghiệm để:
  - Xác nhận lại kết quả mô phỏng về dạng sóng và cơ chế ZVS (sử dụng oscilloscope).
  - Đo hiệu suất thực tế ở các mức tải và điện áp đầu vào khác nhau (sử dụng nguồn DC, tải điện tử, wattmeter).
  - Đánh giá độ ổn định điện áp đầu ra, độ gợn sóng.
  - So sánh kết quả thực nghiệm với mục tiêu thiết kế và kết quả mô phỏng.
  - Đánh giá khách quan những ưu điểm và nhược điểm của giải pháp đề xuất.
8. Kết luận và đề xuất hướng phát triển: Tổng kết các kết quả đạt được, khẳng định tính khả thi và hiệu quả của bộ chuyển đổi tích hợp chuyển mạch mềm đã nghiên cứu. Đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo để tối ưu hóa và mở rộng ứng dụng.

### **1.3 Đối tượng, phạm vi nghiên cứu**

#### **1.3.1 Đối tượng nghiên cứu**

Đối tượng của đề tài là bộ DC – DC Boost converter không cách ly sử dụng cuộn cảm ghép và mạch cộng hưởng nhằm đạt được khả năng chuyển mạch mềm (soft switching) và hệ số khuếch đại điện áp cao (high gain).

- Cấu trúc mạch lực (Power Stage Topology).
- Nguyên lý hoạt động và cơ chế đạt ZVS.

- Phương pháp phân tích, mô hình hóa và thiết kế các thông số mạch.
- Phương pháp điều khiển (thường là PWM thông dụng, có thể điều chỉnh tần số hoặc độ rộng xung).
  - Hiệu suất năng lượng, đặc tính đầu vào/ra, độ gợn sóng, độ ổn định.

### **1.3.2 Phạm vi nghiên cứu**

- Nguồn đầu vào: DC 24V – 48V (ứng dụng từ pin mặt trời, pin lithium-ion, ắc quy).
- Điện áp đầu ra: DC 200V – 400V (phù hợp cho inverter, tải DC hoặc lưu trữ).
- Công suất hoạt động: từ 200W – 300W (ứng dụng trong hộ gia đình, vi lưới).
- Tần số chuyển mạch: 50kHz – 200kHz.
- Không xét đến các bộ chuyển đổi có cách ly bằng biến áp cao tần.
- Không đi sâu vào chiến lược điều khiển MPPT (maximum power point tracking).
- Các linh kiện chính: MOSFET, diode, tụ điện, cuộn cảm ghép, mạch cộng hưởng LC.

## **1.4 Phương pháp nghiên cứu và công cụ sử dụng**

Đề tài sử dụng tổng hợp các phương pháp lý thuyết, mô phỏng số và thực nghiệm để đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Cụ thể:

### **1.4.1 Phân tích lý thuyết**

- Áp dụng phương pháp phân tích trạng thái (state-space averaging), định luật Kirchoff, định luật bảo toàn năng lượng để xác định đặc tính điện áp, dòng điện.
- Xác định điều kiện chuyển mạch mềm (ZVS) bằng phân tích dạng sóng lý tưởng.
- Tính toán, thiết kế giá trị lý thuyết cho các thông số mạch ( $L$ ,  $C$ , tần số chuyển mạch, duty cycle, giá trị linh kiện công suất).
- Công cụ: Phần mềm tính toán và vẽ đồ thị (MATLAB, Mathcad,...).

### **1.4.2 Phương pháp mô phỏng (Simulation)**

- Sử dụng phần mềm mô phỏng mạch điện tử công suất chuyên dụng để kiểm chứng lý thuyết, đánh giá hoạt động và hiệu năng của bộ chuyển đổi đề xuất trước khi chế tạo.
- Phân tích dạng sóng điện áp, dòng điện, công suất tại các điểm quan trọng để xác nhận cơ chế ZVS và tính toán hiệu suất.

- Khảo sát hoạt động trong các điều kiện khác nhau (thay đổi tải, thay đổi điện áp đầu vào).
- Công cụ chính: SIMetrix-SIMPLIS (ưu tiên chuyên sâu cho điện tử công suất, sát với thực tế)

#### **1.4.3 Phương pháp thực nghiệm (Experimental Prototyping & Testing)**

- Thiết kế mạch nguyên lý (Schematic) và mạch in (PCB) cho bộ chuyển đổi.
- Lựa chọn linh kiện công suất (MOSFET/Diode), linh kiện thụ động (cuộn cảm, tụ điện, tụ gốm/X2Y) phù hợp với thông số thiết kế và tần số làm việc cao.
- Đo kiểm, hiệu chỉnh mạch.
- Công cụ: Phần mềm thiết kế mạch in (Altium Designer, KiCad, Eagle), máy hàn, thiết bị đo lường (Oscilloscope số - DSO, Nguồn DC, Tải điện tử DC - Electronic Load, Đồng hồ vạn năng số - DMM, Wattmeter/ Power Analyzer để đo hiệu suất chính xác).

#### **1.4.4 Phương pháp so sánh và đánh giá (Comparison & Evaluation)**

- So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm với nhau.
- So sánh hiệu suất, dạng sóng, kích thước của bộ chuyển đổi đề xuất với:
  - Bộ chuyển đổi chuyển mạch cứng cơ bản cùng cấu hình.
  - Các cấu trúc chuyển mạch mềm tương tự trong tài liệu (nếu có).
- Đánh giá định lượng (hiệu suất, độ gợn sóng) và định tính (độ phức tạp, số lượng linh kiện, khả năng đạt ZVS) dựa trên kết quả thu được.
- Công cụ: Dữ liệu đo đạc, kết quả mô phỏng, bảng biểu, đồ thị.

### **1.5 Cấu trúc đề án**

Đề án được trình bày theo bố cục gồm 6 chương như sau:

- Chương 1: Tổng quan – Trình bày bối cảnh, lý do chọn đề tài, mục tiêu, phạm vi, phương pháp và cấu trúc nghiên cứu.
- Chương 2: Nhu cầu và ứng dụng – Giới thiệu về bộ chuyển đổi và tính cấp thiết kỹ thuật nâng điện áp.
- Chương 3: Cấu trúc tăng áp và chuyển mạch mềm

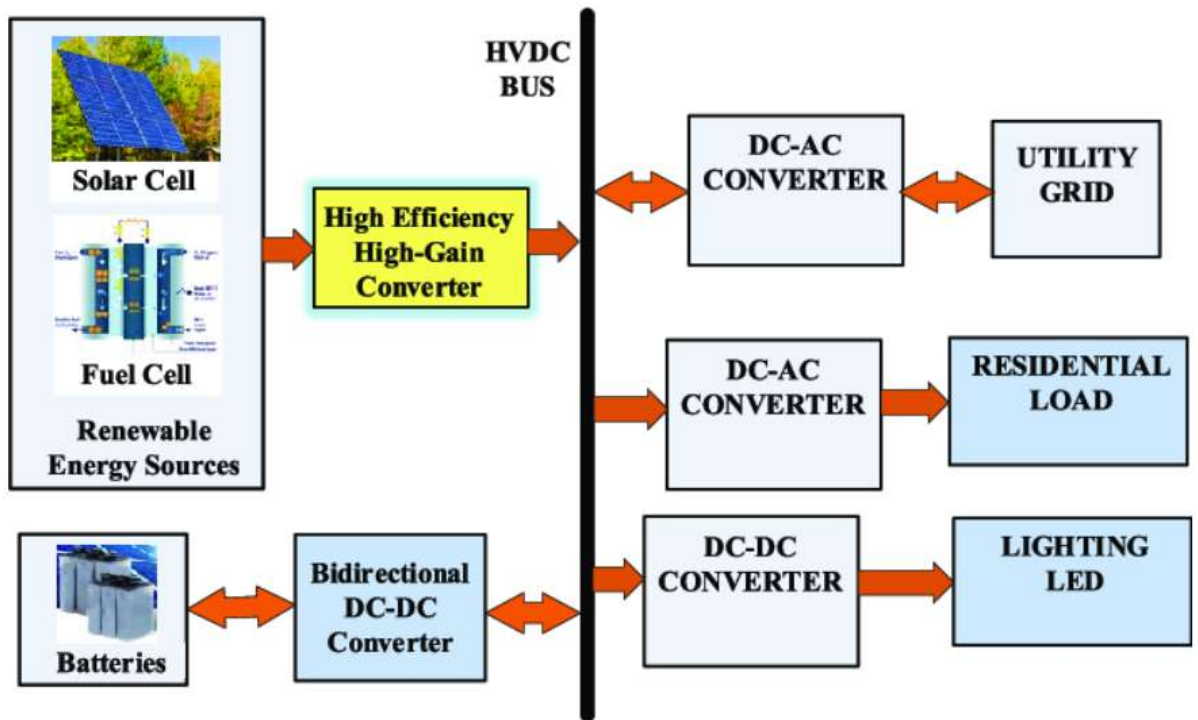
- Chương 4: Đề xuất bộ chuyển đổi mới – Nguyên lý hoạt động, phân tích trạng thái, điều kiện soft switching, tính toán thông số và so sánh với các bộ chuyển đổi có sẵn.
- Chương 5: Mô phỏng và thực nghiệm – Phân tích, nhận xét kết quả đặc tuyến điện áp, dòng điện, hiệu suất và điều kiện ZVS.
- Chương 6: Kết luận và hướng phát triển – Tổng kết các kết quả đạt được, định hướng nghiên cứu tương lai.

## CHƯƠNG 2. NHU CẦU VÀ ỨNG DỤNG

### 2.1 Ứng dụng của bộ chuyển đổi DC-DC

Hệ thống năng lượng mặt trời (PV): Các module PV thông thường ( $100W - 500W$ , nghiên cứu  $50W - 2kW$ ) có điện áp đầu ra thấp ( $24V - 36V$ ). Bộ tăng áp DC – DC (Boost Converter) là cần thiết để nâng điện áp này lên mức  $200V - 400V$ , phục vụ cho hệ thống lưu trữ hoặc hòa lưới điện.

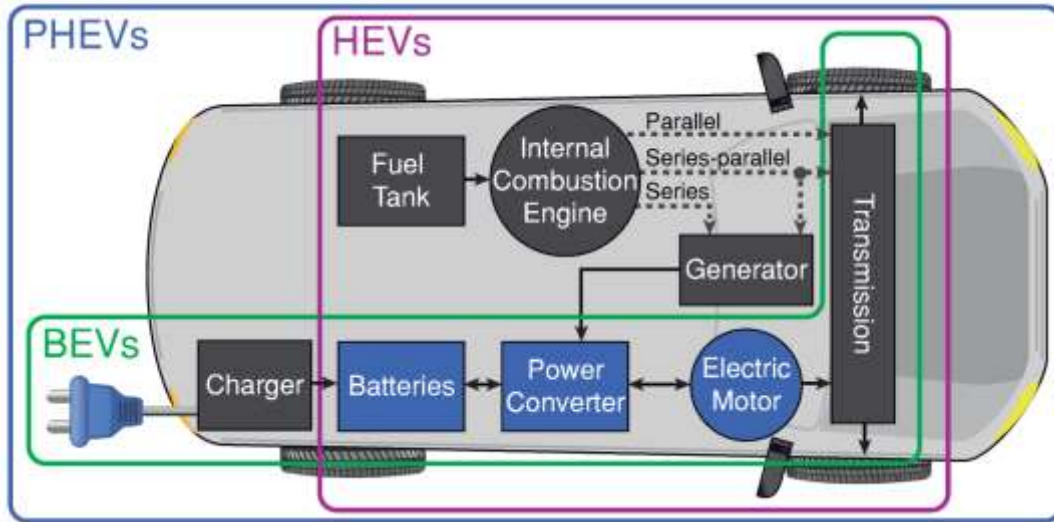
Hệ thống Microgrid (DC Bus): Các hệ vi lưới (Microgrid) độc lập (công suất nghiên cứu  $500W - 20kW$ ) thường tích hợp nhiều nguồn điện phân tán có điện áp thấp [4][5]. Để phù hợp với bus DC chung, các bộ chuyển đổi DC – DC hệ số khuếch đại cao (High – Gain DC – DC Converter) được sử dụng để thực hiện nâng điện áp lên mức cần thiết (thường rất cao) [6][7].



Hình 2.1 Hệ thống tích hợp PV và Micro Grid

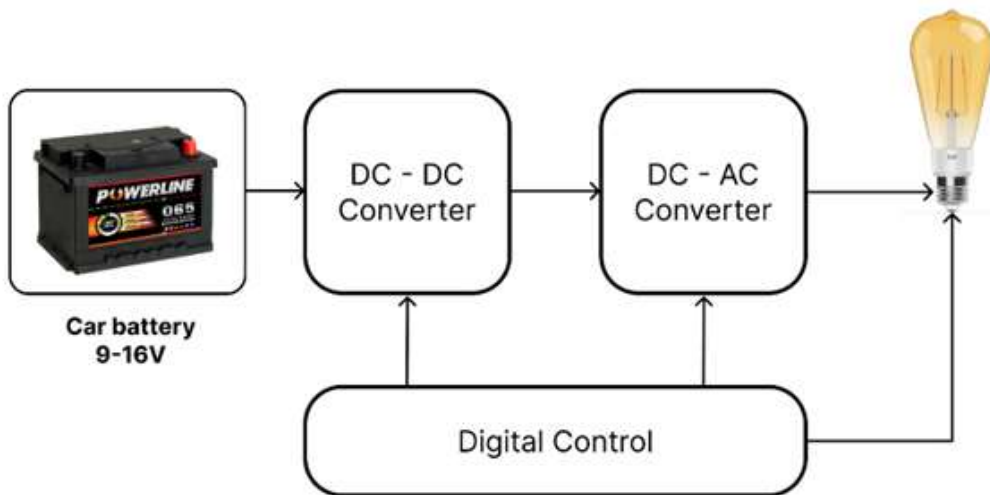
Hệ thống nạp xả cho pin xe điện: Bộ chuyển đổi DC – DC hai chiều (Bidirectional DC-DC Converter) đóng vai trò quan trọng trong hệ thống sạc/xả pin xe điện [7][8]. Khi xả pin (thường  $\sim 48V$ ) để cấp nguồn cho động cơ, bộ chuyển đổi hoạt động ở chế độ tăng áp, nâng điện áp lên  $200V - 400V$ . Ngược lại, khi sạc pin từ lưới hoặc nguồn DC

cao áp, bộ chuyển đổi hoạt động ở chế độ hạ áp (Buck) để giảm điện áp xuống mức phù hợp cho pin [9]. Công suất ứng dụng thực tế 500 W - 3 kW (nghiên cứu 300 W - 5 kW).



Hình 2.2 Hệ thống dẫn động của xe điện

Hệ thống LED chiếu sáng công nghiệp công suất cao: Các hệ thống LED công nghiệp (công suất 20W – 100W, nghiên cứu 10W – 200W) thường sử dụng điện áp đầu vào thấp (ví dụ: 12V). Để đáp ứng yêu cầu điện áp hoạt động cao hơn (48V – 100V) của dải LED công suất lớn, bộ tăng áp DC – DC (Boost Converter) được ứng dụng để nâng điện áp nguồn lên mức phù hợp.



Hình 2.3 Mạch đèn công suất cao

Hệ thống thiết bị y tế: Các thiết bị y tế công suất cao (X – ray, laser, plasma – thực tế 500W – 5kW, nghiên cứu 300W – 10kW) yêu cầu nguồn cấp cực kỳ ổn định, độ gợn sóng (ripple) thấp và cách ly an toàn. Bộ chuyển đổi DC – DC cách ly (Isolated DC – DC Converter) thường được sử dụng để cung cấp mức điện áp đầu ra cao, ổn định (từ

nguồn DC trung áp như 24V/48V), đồng thời đảm bảo cách ly điện áp cần thiết cho người sử dụng.



Hình 2.4 Thiết bị y tế sử dụng bộ DC-DC

Trong bối cảnh điện khí hóa và năng lượng tái tạo ngày càng đóng vai trò then chốt trong hệ sinh thái năng lượng hiện đại, các bộ chuyển đổi công suất giữ vị trí trung tâm trong việc kết nối, điều tiết và tối ưu hóa dòng năng lượng giữa các nguồn và tải. Trong số các loại bộ chuyển đổi đã được đề cập, bộ chuyển đổi DC – DC, đặc biệt là bộ nâng điện áp, nổi bật nhờ tính linh hoạt cao, hiệu suất chuyển đổi tốt và khả năng tích hợp dễ dàng với các hệ thống sử dụng pin năng lượng mặt trời hoặc ắc quy.

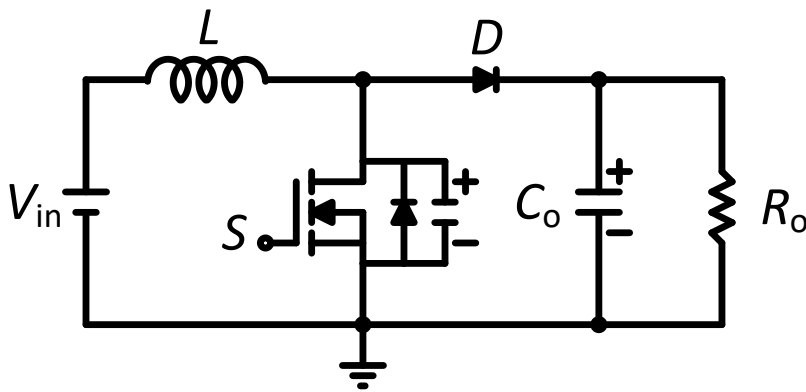
Nhằm đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về hiệu suất và tính kinh tế của các hệ thống nguồn điện một chiều, nhóm nghiên cứu lựa chọn bộ nâng điện áp một chiều làm đối tượng chính để phân tích và cải tiến. Mục tiêu của nghiên cứu là đề xuất các cấu trúc tối ưu không chỉ về hiệu suất hoạt động, mà còn về kích thước và số lượng linh kiện, qua đó giảm thiểu chi phí sản xuất, nâng cao độ tin cậy và tính phổ biến của thiết bị [10]. Đồng thời, nghiên cứu này cũng góp phần thúc đẩy quá trình chuyển đổi và sử dụng năng lượng một cách hiệu quả, bền vững trong kỷ nguyên công nghệ xanh.

## 2.2 Tổng quan các cấu trúc DC-DC tăng áp truyền thống

### 2.2.1 Bộ Boost truyền thống

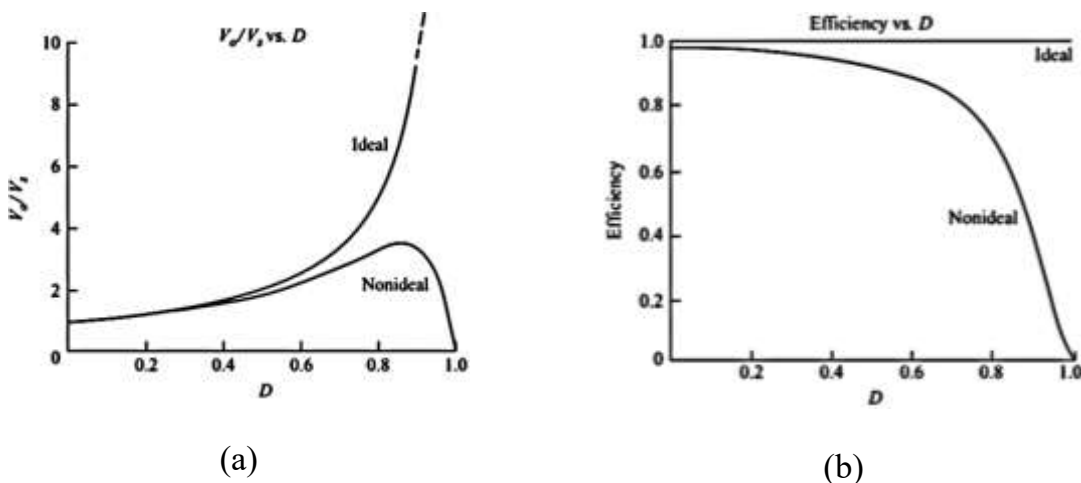
Trong số các cấu trúc bộ chuyển đổi DC – DC, bộ chuyển đổi Boost là mô hình cơ bản và phổ biến nhất để khuếch đại điện áp. Cấu trúc mạch của bộ chuyển đổi Boost được minh họa chi tiết trong. Hệ số khuếch đại điện áp của mạch được biểu diễn bởi công thức:  $\frac{V_O}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$

Trong đó  $D$  là độ rộng xung (duty cycle).



Hình 2.5 Mạch Boost cơ bản

Về mặt lý thuyết, khi độ rộng xung  $D$  tiến dần đến 1 thì hệ số khuếch đại điện áp sẽ tiến đến vô hạn [11]. Tuy nhiên, trong thực tế, khi tăng  $D$  lên cao, các điện trở kí sinh trong mạch điện sẽ gây ra tổn thất năng lượng lớn, khiến cho hiệu suất của bộ chuyển đổi sẽ giảm rất sút đáng kể được thể hiện tại Hình 2.6 [12][13]:



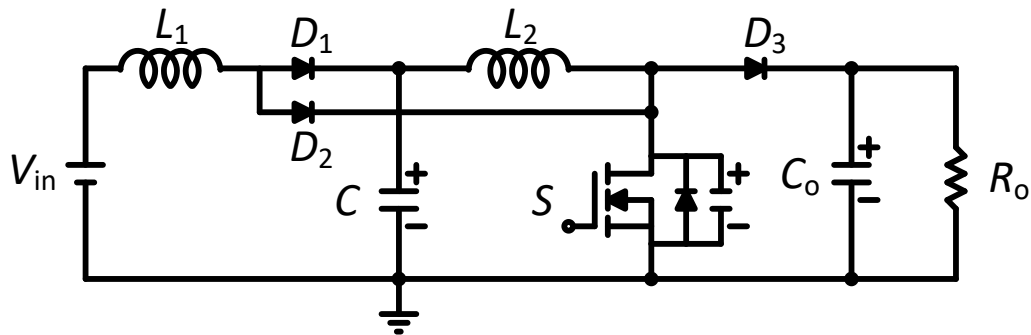
Hình 2.6 Đường đặc tính của mạch Boost

(a) Hệ số khuếch đại của mạch; (b) Hiệu suất của mạch

Do đó, bộ chuyển đổi Boost cơ bản phù hợp cho các ứng dụng có yêu cầu khuếch đại điện áp vừa phải, nhưng không hiệu quả trong các hệ thống cần hệ số khuếch đại cao như năng lượng tái tạo hoặc ô tô điện [14].

### 2.2.2 Mạch khuếch đại hai tầng nối tiếp

Một trong những hướng tiếp cận nhằm tránh phải vận hành bộ chuyển đổi DC – DC ở chu kỳ công tác lớn là sử dụng cấu trúc khuếch đại hai tầng nối tiếp (còn gọi là cấu trúc xếp chồng – cascaded structure). Trong mô hình này, điện áp đầu vào sẽ được tăng dần qua từng tầng chuyển đổi, giúp đạt được hệ số khuếch đại điện áp cao mà không cần yêu cầu từng tầng hoạt động ở chu kỳ công tác cực đại. Đây là ưu điểm lớn giúp cải thiện độ tin cậy và giới hạn áp đặt lên các linh kiện bán dẫn.

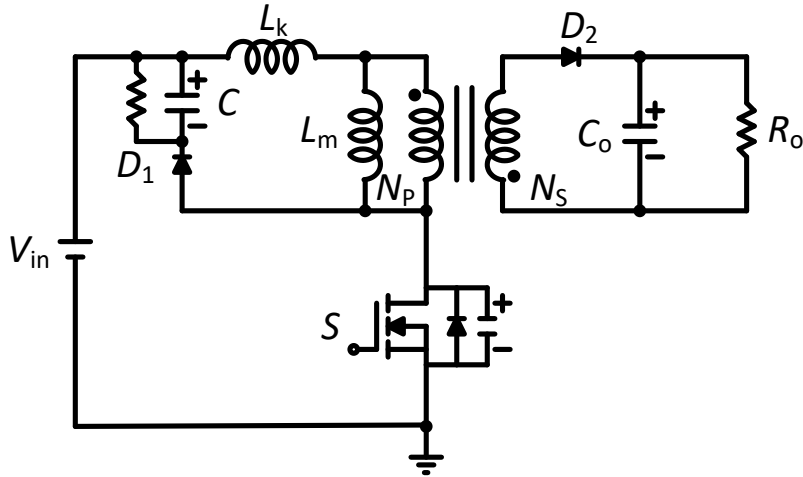


Hình 2.7 Mạch khuếch đại hai tầng nối tiếp

Tuy nhiên, cấu trúc hai tầng nối tiếp cũng tồn tại nhiều hạn chế. Việc sử dụng nhiều tầng chuyển đổi làm tăng số lượng linh kiện và độ phức tạp của khối điều khiển, dẫn đến chi phí cao hơn. Ngoài ra, quá trình chuyển đổi năng lượng qua nhiều tầng gây ra tổn thất ở mỗi nhịp, làm giảm hiệu suất tổng thể. Việc thiết kế điều khiển đồng bộ giữa các tầng cũng đòi hỏi kỹ thuật cao, khó tối ưu trong các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao và kích thước nhỏ gọn.

### 2.2.3 Mạch Flyback

Cấu trúc mạch Flyback (hoặc Forward) có khả năng tạo ra hệ số khuếch đại điện áp cao mà không cần phải hoạt động ở chu kỳ công tác lớn. Điều này đạt được thông qua việc sử dụng tỷ số vòng dây của biến áp, giúp tăng áp hiệu quả hơn so với các cấu trúc không cách ly như mạch Boost.



Hình 2.8 Mạch Flyback

Tuy nhiên, nhược điểm lớn của cấu trúc này là các linh kiện bán dẫn phải chịu điện áp đỉnh rất cao, nguyên nhân chủ yếu do năng lượng tích lũy trong điện cảm rò (leakage inductance) của biến áp. Khi công tắc tắt, năng lượng rò không được truyền đến tải mà phản xạ lại và gây ra xung điện áp lớn trên công tắc, làm giảm tuổi thọ và độ tin cậy của linh kiện, đồng thời gây tổn thất năng lượng, làm giảm hiệu suất chuyển đổi.

Để khắc phục vấn đề này, các mạch snubber phụ trợ thường được bổ sung nhằm hấp thụ hoặc kẹp các xung điện áp đỉnh. Tuy nhiên, năng lượng rò vẫn bị tiêu tán dưới dạng nhiệt trong các linh kiện snubber, dẫn đến hiệu suất tổng thể không được cải thiện đáng kể.

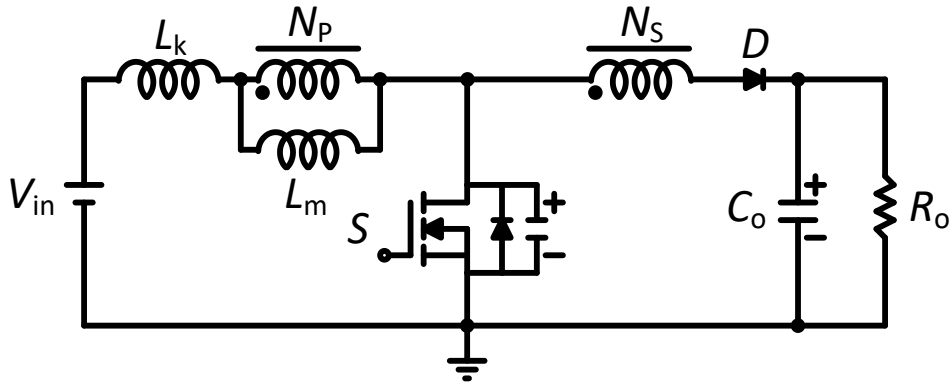
Ngoài ra, việc sử dụng biến áp cũng làm cho kích thước mạch tăng lên, đồng thời khó tối ưu thiết kế khi yêu cầu mạch nhỏ gọn, hiệu suất cao trong các ứng dụng công suất vừa và nhỏ.

### 2.3 Các bộ chuyển đổi DC-DC có hệ số khuếch đại cao

Để đáp ứng yêu cầu điện áp đầu ra cao với hiệu suất tốt, nhiều kỹ thuật cấu trúc được đề xuất, trong đó nổi bật là:

#### 2.3.1 Mạch Boost sử dụng cuộn cảm ghép – Coupled Inductor

Việc sử dụng cuộn cảm ghép trong bộ chuyển đổi Boost là một giải pháp hiệu quả để tăng hệ số khuếch đại điện áp mà không cần đẩy chu kỳ công tác lên quá cao [18]. Nhờ khả năng lưu trữ và truyền năng lượng giữa cuộn dây sơ cấp và thứ cấp, cuộn cảm ghép giúp đạt điện áp đầu ra cao hơn, cải thiện hiệu suất, và giảm kích thước tổng thể của bộ chuyển đổi nhờ tích hợp nhiều chức năng vào một linh kiện từ, như được minh họa trong Hình 2.9. Cấu trúc này đã được áp dụng thành công trong nhiều hệ thống, bao gồm năng lượng tái tạo, viễn thông, chiếu sáng công nghiệp, và ô tô điện.

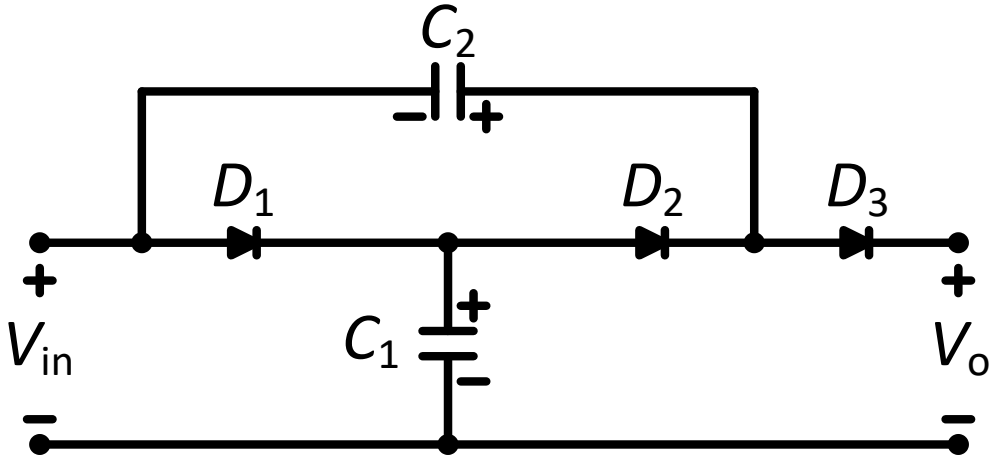


Hình 2.9 Mạch tăng áp cơ bản sử dụng cuộn cảm ghép

Tuy nhiên, cuộn cảm ghép cũng tồn tại nhược điểm đáng kể. Điện cảm rò trong cuộn cảm ghép gây ra ứng suất điện áp và dòng điện cao lên các linh kiện bán dẫn, đặc biệt là công tắc, làm giảm tuổi thọ và đòi hỏi lựa chọn linh kiện có thông số kỹ thuật cao. Ngoài ra, việc sử dụng nhiều linh kiện công suất và tụ điện phụ trợ để đảm bảo hoạt động ổn định làm tăng độ phức tạp của mạch, gia tăng kích thước, và giảm hiệu suất chuyển đổi. Trong một số trường hợp, hệ số khuếch đại điện áp vẫn chưa đạt mức mong muốn. Do đó, nghiên cứu và thiết kế một bộ chuyển đổi DC – DC mới sử dụng cuộn cảm ghép với hệ số khuếch đại cao, hiệu suất lớn, và kích thước nhỏ gọn là mục tiêu chính của nghiên cứu này.

### 2.3.2 Cell nhân áp – Voltage Multiplier Cell (VMC)

Cell nhân áp (VMC – Voltage Multiplier Cell) là giải pháp hiệu quả để đạt hệ số khuếch đại điện áp cao trong các bộ biến đổi DC – DC. Bằng cách kết hợp nhiều tầng tụ điện và diode với bộ chuyển đổi Boost cơ bản hoặc cấu trúc cuộn cảm ghép, VMC khắc phục hạn chế về chu kỳ công tác (duty cycle) của bộ tăng áp thông thường. Ưu điểm nổi bật bao gồm: (1) Cơ chế tự cân bằng điện áp nội tại giữa các tầng, giảm rủi ro quá áp; (2) Khả năng sử dụng linh kiện bán dẫn và tụ điện được đánh giá điện áp thấp để tạo ra điện áp đầu ra rất cao, giúp tiết kiệm chi phí linh kiện; (3) Hiệu suất chuyển đổi cao (đạt 90% – 94%) trong các ứng dụng điện hình ở dải tần số chuyển mạch trung bình (50kHz – 100kHz).

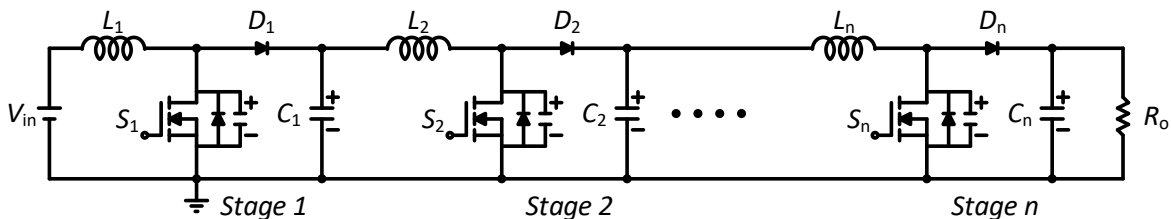


Hình 2.10 Voltage Multiplier Cell

Tuy nhiên, phương pháp này có những nhược điểm đáng kể: Số lượng tụ điện và DIODE tăng tỷ lệ thuận với số tầng nhân áp, khiến mạch điện phức tạp hơn, tốn kém hơn về chi phí và không gian lắp đặt. Yêu cầu đồng bộ hóa tín hiệu điều khiển chính xác giữa các tầng đòi hỏi thiết kế điều khiển tinh vi. Tổn thất chuyển mạch (đặc biệt trên DIODE) tăng đáng kể ở tần số cao hơn, làm giảm hiệu suất tổng. Những hạn chế này khiến VMC kém phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi mật độ công suất cực cao (kích thước siêu nhỏ gọn) hoặc hiệu suất chuyển đổi tối ưu tuyệt đối.

### 2.3.3 Cấu trúc nhiều tầng – Multi Stage Converter

Cấu trúc đa tầng (interleaved hoặc cascaded) sử dụng nhiều nhánh Boost hoặc cấu trúc tương tự ghép song song/nối tầng để đạt điện áp đầu ra cao và giảm dòng điện đầu vào, như minh họa trong Hình 2.6. Ưu điểm vượt trội bao gồm: Phân bố dòng điện đồng đều giữa các nhánh, giảm đáng kể độ gợn sóng (ripple) dòng/tải; Khả năng mở rộng linh hoạt bằng cách tăng số tầng để nâng hệ số khuếch đại hoặc công suất; Cải thiện độ tin cậy nhờ dự phòng nhiều nhánh; Hiệu suất cao (92% – 96%) khi chuyển đổi điện áp thấp (12V – 48V) lên mức trung/cao áp (100V – 400V), nhờ giảm tổn thất dẫn và tản nhiệt hiệu quả. Cấu trúc này đặc biệt phù hợp cho ứng dụng công suất lớn như hệ thống ô tô điện hoặc lưới điện vi mô (microgrid).

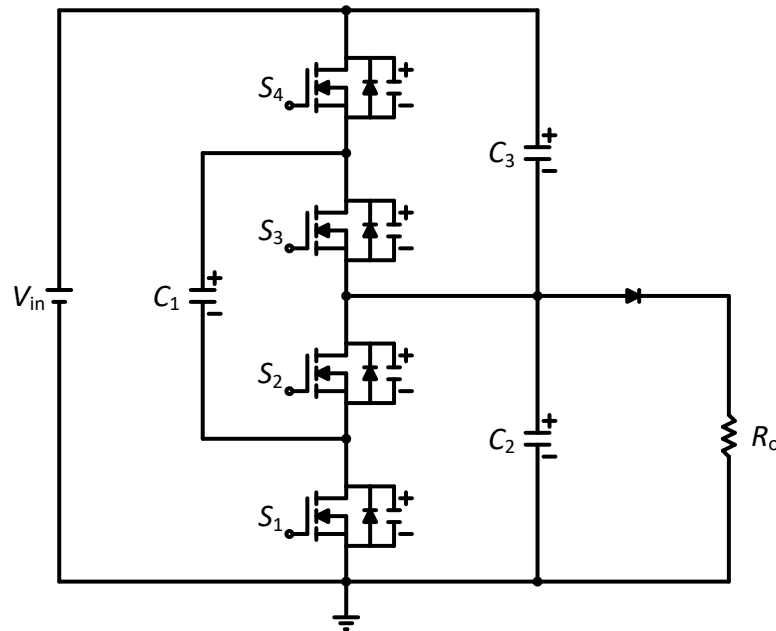


Hình 2.11 Multi Stage Converter

Tuy nhiên, nhược điểm chính là số lượng linh kiện (MOSFET, cuộn cảm, tụ) tăng theo cấp số nhân cùng số tầng, dẫn đến mạch điều khiển phức tạp, chi phí sản xuất cao, và yêu cầu đồng bộ hóa chính xác giữa các pha. Tổn thất chuyển mạch cứng (hard switching) ở tần số cao và nhu cầu thiết kế thuật toán điều khiển tiên tiến (như PID hay MPC) cũng là thách thức đáng kể để đảm bảo ổn định và tối ưu hiệu suất.

### 2.3.4 Tụ điện chuyển mạch – Switched Capacitor (SC)

Cấu trúc tụ tích năng lượng, hay Switched Capacitor (SC), dựa trên việc định tuyến sạc-xả xen kẽ của các tụ điện để tạo điện áp đầu ra cao mà không cần cuộn cảm, như minh họa trong Hình 2.12 [15]. Cấu trúc này sử dụng các công tắc và tụ điện để nhân điện áp, mang lại kích thước nhỏ gọn và dễ tích hợp trong vi mạch, phù hợp cho các ứng dụng công suất thấp như thiết bị di động hoặc cảm biến IoT [16]. Theo nghiên cứu, SC converter có thể đạt hiệu suất 85–90% với hệ số khuếch đại từ 2 – 10 lần điện áp đầu vào (ví dụ, từ 3.3V lên 12V – 33V) ở tần số chuyển mạch 100kHz – 500kHz. Ưu điểm chính là thiết kế đơn giản, không cần linh kiện từ tính, và khả năng tích hợp cao [17]. Tuy nhiên, hiệu suất giảm đáng kể khi dòng tải lớn do tổn hao điện trở trong tụ và công tắc, hạn chế ứng dụng trong các hệ thống công suất cao như năng lượng tái tạo hoặc ô tô điện. Ngoài ra, việc kiểm soát điện áp đầu ra đòi hỏi điều khiển phức tạp để tránh mất cân bằng điện áp giữa các tụ.



Hình 2.12 Switched Capacitor

## 2.4 Ưu, nhược điểm của các cấu trúc

Mỗi cấu trúc DC – DC tăng áp đều có những ưu và nhược điểm riêng, phù hợp với các ứng dụng khác nhau. Bộ chuyển đổi Boost truyền thống nổi bật với thiết kế đơn giản và dễ điều khiển, nhưng khả năng khuếch đại điện áp bị hạn chế và tổn hao lớn khi chu kỳ công tác cao, khiến nó kém hiệu quả trong các hệ thống yêu cầu hệ số khuếch đại lớn. Cấu trúc Quadratic Boost cải thiện khả năng tăng áp so với Boost truyền thống, nhưng mạch phức tạp hơn và tổn thất tăng ở tần số cao, gây khó khăn trong các ứng dụng công suất lớn. Cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép đạt hệ số khuếch đại cao và hiệu quả tốt, nhưng thiết kế cuộn cảm phức tạp và cần kiểm soát dòng rò để tránh bão hòa lõi từ.

Cell nhân áp mang lại hiệu suất cao và khả năng tăng áp mạnh, phù hợp cho các hệ thống cần điện áp đầu ra lớn, nhưng yêu cầu đồng bộ hóa chính xác và sử dụng nhiều linh kiện, làm tăng độ phức tạp. Cấu trúc nhiều tầng, như các bộ chuyển đổi ghép tầng hoặc interleaved, giúp phân bố tải đều và giảm ripple, nhưng số lượng linh kiện lớn và điều khiển phức tạp, đòi hỏi kỹ thuật cao. Cuối cùng, cấu trúc tụ tích năng lượng (Switched Capacitor) nổi bật với kích thước nhỏ gọn và dễ tích hợp trong vi mạch, nhưng hiệu suất giảm khi dòng tải lớn do tổn hao điện trở, hạn chế ứng dụng trong các hệ thống công suất cao.

Bảng 2.1 So sánh các cấu trúc

| Cấu trúc                       | Ưu điểm                         | Nhược điểm                                    |
|--------------------------------|---------------------------------|---|
| <b>Boost truyền thống</b>      | Đơn giản, dễ điều khiển         | Tăng áp hạn chế, tổn hao lớn ở duty cycle cao |
| <b>Quadratic Boost</b>         | Tăng áp tốt hơn Boost           | Mạch phức tạp hơn, tổn thất cao ở tần số lớn  |
| <b>Coupled Inductor</b>        | Hệ số tăng áp cao, hiệu quả tốt | Dòng rò, thiết kế cuộn cảm phức tạp           |
| <b>Voltage Multiplier Cell</b> | Hiệu suất cao, tăng áp mạnh     | Cần nhiều linh kiện, đồng bộ hóa phức tạp     |
| <b>Multi – stage</b>           | Phân bố tải, ripple thấp        | Mạch lớn, điều khiển phức tạp                 |
| <b>Switched Capacitor</b>      | Gọn nhẹ, dễ tích hợp            | Kém hiệu quả ở dòng lớn, tổn hao điện trở     |

## 2.5 Vấn đề tổn hao chuyển mạch cứng (hard switching) và nhu cầu chuyển mạch mềm

### 2.5.1 Phân tích vấn đề

Tuy đạt được hiệu quả trong việc khuếch đại điện áp, các cấu trúc tăng áp cao này lại kéo theo nhiều vấn đề mới về tổn thất chuyển mạch (switching loss) và khả năng điều khiển. Cụ thể:

- Khi điện áp được khuếch đại mạnh, dòng điện qua công tắc chuyển mạch (MOSFET) tăng đáng kể, đồng thời điện áp chuyển mạch (switching voltage) cũng ở mức cao. Hệ quả là tổn thất chuyển mạch tăng nhanh theo lũy thừa, đặc biệt rõ ràng khi công tắc làm việc trong điều kiện hard switching (chuyển mạch cưỡng bức).
- Để giảm kích thước linh kiện thụ động như cuộn cảm và tụ điện, các bộ chuyển đổi DC-DC hiện đại thường được thiết kế hoạt động ở tần số cao (hundreds of kHz đến MHz). Tuy nhiên, hoạt động ở tần số cao trong chế độ hard switching làm gia tăng tổn thất năng lượng dưới dạng nhiệt, gây nhiễu điện từ (EMI), và giảm tuổi thọ linh kiện.

Cụ thể, hard switching sẽ kéo theo các hệ quả tiêu cực sau:

- Tổn thất chuyển mạch tăng cao, ảnh hưởng nghiêm trọng đến hiệu suất tổng thể, nhất là với các ứng dụng yêu cầu công suất liên tục trong thời gian dài như hệ thống PV, trạm sạc EV, hoặc thiết bị y tế.
- Nhiệt độ hoạt động tăng mạnh, buộc hệ thống phải có giải pháp tản nhiệt tốt (tăng chi phí).
- Gia tăng nhiễu điện từ (EMI) do các cạnh chuyển mạch dốc và không kiểm soát, ảnh hưởng đến các mạch điều khiển và thiết bị xung quanh.
- Tuổi thọ linh kiện giảm, gây mất ổn định và làm tăng chi phí bảo trì dài hạn.

### 2.5.2 Giải pháp và hướng nghiên cứu

Trước những thách thức do hard switching gây ra, kỹ thuật chuyển mạch mềm (soft switching) đã được đề xuất như một giải pháp hữu hiệu nhằm giảm tổn thất và nâng cao độ tin cậy hệ thống. Các kỹ thuật chuyển mạch mềm phổ biến hiện nay bao gồm:

- ZVS (Zero Voltage Switching): Công tắc đóng/mở tại thời điểm điện áp gần bằng 0, giúp loại bỏ tổn thất do điện áp.

- ZCS (Zero Current Switching): Công tắc thực hiện đóng/mở tại thời điểm dòng điện qua nó gần bằng 0, giúp loại bỏ tổn thất do dòng.
- Mạch phụ trợ (Auxiliary Resonant Circuit): Thêm vào mạch chính một mạch phụ hỗ trợ chuyển mạch mềm (thường gồm DIODE, cuộn cảm, tụ).
- Cộng hưởng bán song song (Semi-resonant): Cho phép chuyển mạch mềm tại tần số thiết kế cố định, đảm bảo điều khiển dễ dàng hơn.

Khi được kết hợp với các cấu trúc tăng áp cao, kỹ thuật chuyển mạch mềm mang lại nhiều lợi ích quan trọng:

- Giảm đáng kể tổn thất chuyển mạch, đặc biệt ở tần số cao.
- Tối ưu hóa hiệu suất toàn hệ thống, duy trì hiệu suất >90% ngay cả với các cấu trúc khuếch đại điện áp lớn.
- Giảm yêu cầu tản nhiệt, giảm kích thước bộ tản, nâng cao độ tin cậy.
- Giảm kích thước bộ lọc EMI, giảm nhiễu tới mạch điều khiển.
- Tăng tuổi thọ linh kiện, giảm chi phí bảo trì và thay thế.

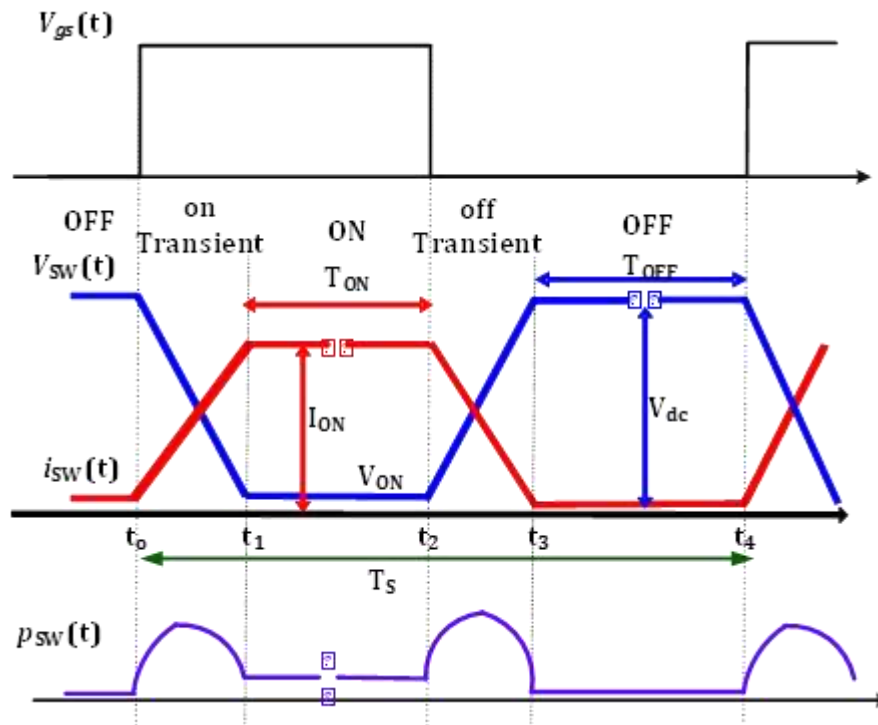
### 2.5.3 Kết luận

Trong bối cảnh nhu cầu nâng điện áp DC ngày càng trở nên cấp thiết, đặc biệt trong các lĩnh vực như năng lượng tái tạo, hệ thống truyền tải DC, và thiết bị điện di động, việc thiết kế các bộ DC – DC converter với hệ số khuếch đại điện áp cao là một yêu cầu không thể thiếu. Tuy nhiên, để đảm bảo hiệu suất vận hành, độ tin cậy lâu dài và khả năng ứng dụng thực tế, những cấu trúc tăng áp này cần được kết hợp chặt chẽ với các kỹ thuật chuyển mạch mềm. Sự phối hợp này không chỉ giúp giảm thiểu tổn thất năng lượng và nhiễu điện từ, mà còn cho phép mạch hoạt động ổn định ở tần số cao với kích thước gọn nhẹ hơn. Do đó, hướng phát triển các bộ chuyển đổi DC-DC tích hợp high voltage gain và soft switching chính là lời giải toàn diện, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật khắt khe của các hệ thống điện tử hiện đại.

## CHƯƠNG 3. CẤU TRÚC TĂNG ÁP VÀ CHUYỂN MẠCH MỀM

### 3.1 Khái niệm chuyển mạch mềm – Soft Switching

Trong các bộ chuyển đổi DC-DC, tổn thất năng lượng chủ yếu đến từ quá trình chuyển mạch của các thiết bị bán dẫn. Nguyên nhân là do sự chùng lún giữa điện áp và dòng điện trên thiết bị tại thời điểm này, dẫn đến tổn hao công suất đáng kể và khiến thiết bị nóng lên.



Hình 3.1 Chùng chắt điện áp và dòng điện tại thời điểm chuyển mạch

Để khắc phục những hạn chế này, kỹ thuật chuyển mạch mềm (Soft Switching) đã được phát triển. Kỹ thuật này hoạt động dựa trên nguyên lý đưa một trong hai thông số (điện áp hoặc dòng điện) về giá trị không trước khi quá trình chuyển mạch diễn ra, từ đó loại bỏ hiện tượng chùng lún. Hai phương pháp chuyển mạch mềm chính là:

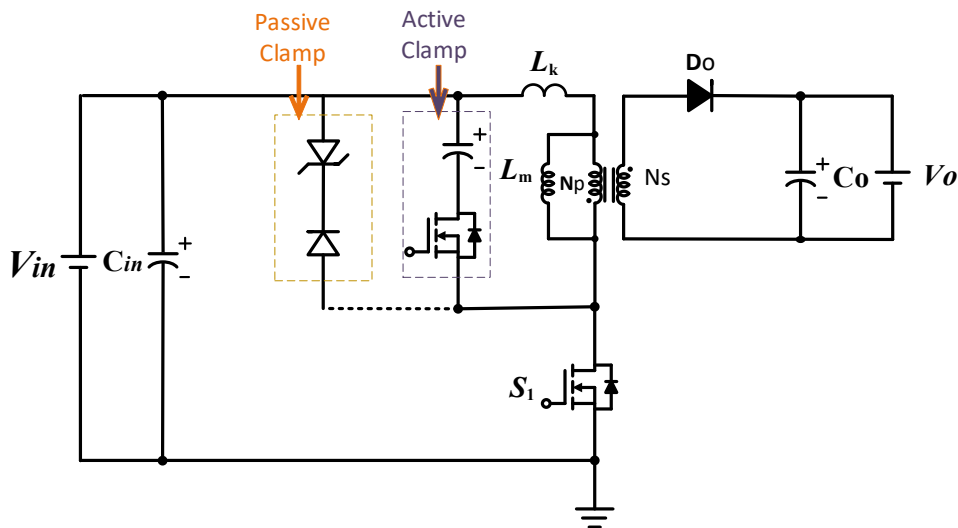
- Chuyển mạch tại điện áp bằng không (Zero Voltage Switching - ZVS): Điện áp trên thiết bị về 0 trước khi dòng điện bắt đầu chảy.
- Chuyển mạch tại dòng điện bằng không (Zero Current Switching - ZCS): Dòng điện qua thiết bị về 0 trước khi điện áp bắt đầu đặt lên.

Chuyển mạch mềm mang lại những lợi ích quan trọng: giảm đáng kể tổn thất năng lượng (nâng cao hiệu suất), giảm nhiệt độ hoạt động của thiết bị, đồng thời cải thiện độ ổn định và độ tin cậy của bộ chuyển đổi. Nhờ đó, kỹ thuật này góp phần tăng tuổi thọ thiết bị và nâng cao hiệu quả hoạt động tổng thể của hệ thống.

### 3.2 Các kỹ thuật chuyển mạch mềm phổ biến

Để đạt được chuyển mạch không tổn hao điện áp (ZVS) hoặc không tổn hao dòng điện (ZCS), các bộ chuyển đổi cần tích hợp các cấu trúc hoặc linh kiện hỗ trợ [19]-[21]. Dưới đây là các kỹ thuật chuyển mạch mềm thường dùng trong thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC.

#### 3.2.1 Mạch kẹp chủ động và thụ động – Active/Passive Clamping



Hình 3.2 Mạch kẹp chủ động/thụ động

##### 1. Mạch Kẹp Thụ động (Passive Clamp)

Mạch kẹp thụ động sử dụng cấu trúc RCD (điện trở - tụ điện - diode) để hạn chế điện áp đỉnh trên thiết bị bán dẫn do năng lượng từ điện cảm rò của biến áp. Khi MOSFET chính tắt, dòng điện từ điện cảm rò nạp vào tụ kẹp thông qua diode, sau đó năng lượng này bị tiêu tán qua điện trở. Ưu điểm chính của phương pháp này là cấu trúc đơn giản, chi phí thấp và không yêu cầu mạch điều khiển phức tạp. Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất là tổn hao năng lượng đáng kể do quá trình tiêu tán nhiệt, dẫn đến hiệu suất hệ thống thấp (thường dưới 85%) và hạn chế khả năng hoạt động ở tần số cao (>100 kHz).

##### 2. Mạch Kẹp Chủ động (Active Clamp)

Mạch kẹp chủ động khắc phục hạn chế của phương pháp thụ động bằng cách sử dụng MOSFET phụ kết hợp tụ điện để tái chế năng lượng từ điện cảm rò. Khi MOSFET chính tắt, năng lượng được tích trữ tạm thời trong tụ kẹp, sau đó được chuyển trở lại nguồn hoặc tải khi MOSFET phụ dẫn. Kỹ thuật này không chỉ giới hạn điện áp đỉnh mà còn tạo điều kiện chuyển mạch không tổn hao (ZVS), cho phép nâng tần số hoạt động lên  $200kHz - 1MHz$  và đạt hiệu suất trên 95% [22]-[23]. Tuy vậy, giải pháp này đòi hỏi mạch điều khiển chính xác, chi phí triển khai cao hơn và tăng độ phức tạp thiết kế do cần đồng bộ hoạt động của hai MOSFET

Bảng 3.1 Bảng so sánh hai loại mạch kẹp

| Tiêu chí                | Mạch Kẹp Thụ động (RCD) | Mạch Kẹp Chủ động         |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Thành phần              | Điện trở, tụ, diode     | MOSFET, tụ, IC điều khiển |
| Hiệu suất               | 80% – 85%               | 92% – 97%                 |
| Tần số hoạt động        | $< 100kHz$              | $200kHz - 1MHz$           |
| Cơ chế xử lý năng lượng | Tiêu tán qua nhiệt      | Tái chế về nguồn/tải      |
| Chi phí                 | Thấp                    | Cao                       |
| Phức tạp thiết kế       | Thấp                    | Cao                       |
| Khả năng hỗ trợ ZVS     | Không                   | Có                        |

### 3.2.2 Switch phụ – Auxiliary Switch

Kỹ thuật switch phụ sử dụng một switch bán dẫn hoạt động đồng bộ hoặc lệch pha với khóa chính để điều khiển dòng điện và điện áp trong mạch phụ trợ, tạo điều kiện ZVS hoặc mà không thay đổi nguyên lý cơ bản của bộ chuyển đổi. Ví dụ, trong các bộ chuyển đổi boost hoặc flyback, khóa phụ kết hợp với tụ hoặc cuộn cảm hồi tiếp giúp giảm tổn hao chuyển mạch. Kỹ thuật này dễ tích hợp và cải thiện hiệu suất, nhưng yêu cầu mạch điều khiển phức tạp hơn và tăng chi phí do cần thêm linh kiện.

### 3.3 Ảnh hưởng của chuyển mạch mềm đến hiệu suất và tuổi thọ thiết bị

Kỹ thuật chuyển mạch mềm mang lại nhiều lợi ích quan trọng trong thiết kế các bộ chuyển đổi công suất. Bằng cách giảm tổn hao chuyển mạch, các bộ chuyển đổi đạt hiệu suất cao, thường từ 90% đến 98%, đặc biệt khi hoạt động ở tần số cao. Điều này không chỉ tối ưu hóa năng lượng mà còn giảm nhiệt độ vận hành, từ đó kéo dài tuổi thọ của các linh kiện bán dẫn như MOSFET, IGBT và các linh kiện thụ động như tụ điện,

cuộn cảm. Nhiệt độ thấp giúp hạn chế hiện tượng lão hóa nhiệt, tăng độ tin cậy cho hệ thống, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu hoạt động liên tục như năng lượng tái tạo.

Hơn nữa, chuyển mạch mềm tạo ra các dạng sóng dòng và áp êm hơn, giúp giảm biên độ và tần số của nhiễu điện từ, từ đó đáp ứng các tiêu chuẩn kiểm soát nhiễu điện từ (EMC) và giảm ảnh hưởng đến các thiết bị lân cận. Kỹ thuật này còn cho phép tăng tần số chuyển mạch mà không làm tăng tổn hao, giúp giảm kích thước của các linh kiện thụ động như cuộn cảm và tụ điện, từ đó tạo ra các bộ chuyển đổi nhỏ gọn, phù hợp cho thiết bị di động và hệ thống mật độ công suất cao.

### **3.4 Tổng kết nhu cầu thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC có hệ số khuếch đại cao và chuyển mạch mềm**

Trong bối cảnh các nguồn điện áp thấp như pin mặt trời, pin nhiên liệu hoặc siêu tụ điện ngày càng phổ biến, việc thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC có hệ số khuếch đại cao trở nên cần thiết. Tuy nhiên, những bộ chuyển đổi này thường gặp thách thức về điện áp và dòng điện lớn trên khóa bán dẫn, dẫn đến tổn hao chuyển mạch cao và hiện tượng quá độ nghiêm trọng, gây nguy cơ hư hỏng linh kiện. Kỹ thuật chuyển mạch mềm giúp giải quyết các vấn đề này bằng cách giảm tổn hao, tăng hiệu suất, và bảo vệ linh kiện khỏi các xung áp hoặc dòng quá độ. Điều này không chỉ kéo dài tuổi thọ của khóa bán dẫn và linh kiện thụ động mà còn cho phép sử dụng tản nhiệt nhỏ hơn, giảm chi phí và khối lượng hệ thống.

Việc kết hợp kỹ thuật khuếch đại điện áp cao, như cấu trúc boost, flyback hoặc SEPIC, với các kỹ thuật chuyển mạch mềm như mạch cộng hưởng, kẹp chủ động hoặc khóa phụ là xu hướng thiết kế tất yếu. Sự kết hợp này mang lại hiệu suất cao, độ bền tốt và kích thước nhỏ gọn, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của các ứng dụng năng lượng tái tạo, thiết bị di động, điện tử công suất cao và hệ thống truyền tải điện một chiều. Chuyển mạch mềm vì thế trở thành yếu tố cốt lõi, không chỉ cải thiện hiệu suất và tuổi thọ thiết bị mà còn thúc đẩy sự phát triển của các công nghệ năng lượng bền vững.

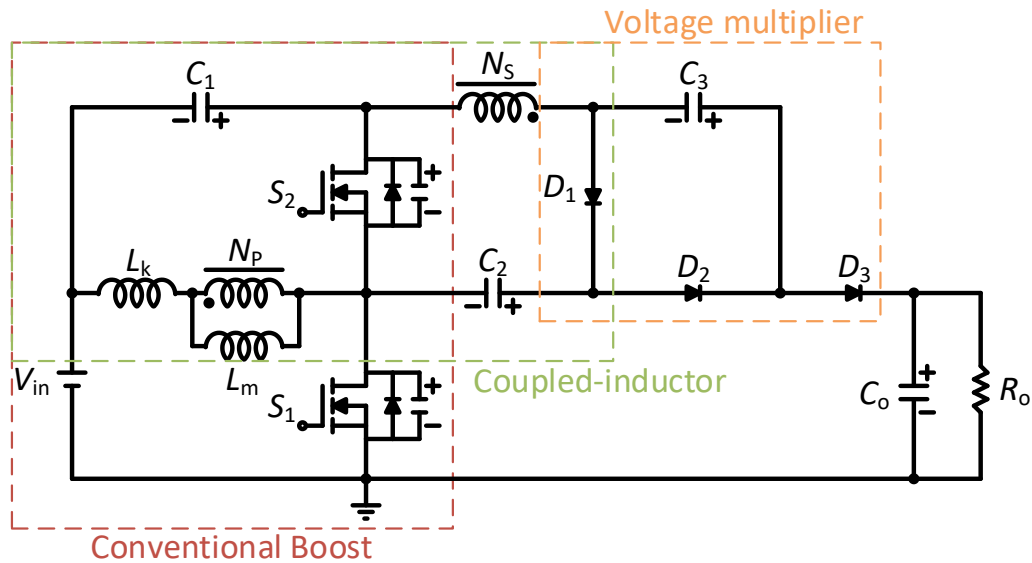
## CHƯƠNG 4. ĐỀ XUẤT BỘ CHUYỂN ĐỔI MỚI

Để đưa ra một cấu trúc tối ưu, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn phương pháp kết hợp các cấu trúc kinh điển và tối ưu hóa cách sắp xếp linh kiện. Cụ thể, bộ chuyển đổi được xây dựng dựa trên nền tảng của bộ Boost truyền thống, đồng thời tích hợp thêm cuộn cảm ghép và cấu trúc nhân điện áp nhằm đạt được hệ số nâng điện áp cao nhất có thể. Việc sắp xếp vị trí các linh kiện, đặc biệt là hai công tắc (switch), được thực hiện một cách hợp lý để tạo ra kỹ thuật chuyên mạch mềm trong mạch. Nhờ đó, cấu trúc đề xuất không chỉ giảm thiểu tổn hao năng lượng mà còn tái sử dụng hiệu quả lượng điện tích trong mạch, từ đó nâng cao đáng kể hiệu suất hoạt động. Cấu trúc này đã được tối ưu hóa về mặt công suất và số lượng linh kiện, đảm bảo sự tối giản tối đa mà vẫn duy trì hiệu quả vận hành.

### 4.1 Sơ đồ nguyên lý bộ chuyển đổi đề xuất

Cấu trúc bộ chuyển đổi gồm 2 MOSFET ( $S_1$  và  $S_2$ ), 3 DIODE ( $D_1$ ,  $D_2$  và  $D_3$ ), 4 tụ điện ( $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  và  $C_3$ ) và cuộn cảm ghép. Cuộn cảm biểu diễn thông qua hai cuộn là sơ cấp  $N_p$  và thứ cấp  $N_s$  với độ tự cảm  $L_m$  và độ tự cảm rò  $L_k$ . Năng lượng đầu vào cấp nguồn thông qua  $V_{in}$ , tải đang xét đến là điện trở  $R_o$ . Phương hướng đề xuất xuất phát từ cấu trúc bộ Boost cơ bản, để nâng cao hệ số khuếch đại điện áp, các kỹ thuật được áp dụng như sau:

- Sử dụng cuộn cảm ghép, nâng cao điện áp qua hệ số truyền.
- Mạch kẹp điện áp làm giảm giới hạn điện áp trên 2 MOSFET, đi kèm theo cấu trúc là kỹ thuật chuyên mạch mềm.
- Góp phần nâng cao điện áp tổng thể bộ chuyển đổi thông qua cấu trúc Voltage Multiplier Cell.



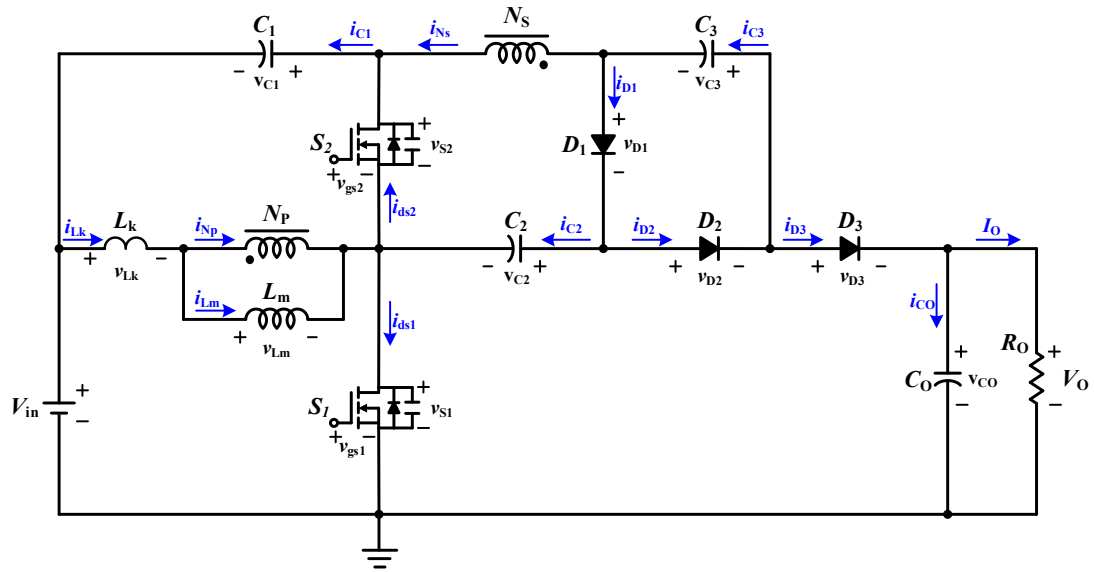
Hình 4.1 Sơ đồ nguyên lý của bộ chuyển đổi đề xuất

## 4.2 Nguyên lý hoạt động

Nhằm đơn giản việc phân tích nguyên lý bộ chuyển đổi, các giả thiết được áp dụng lên các linh kiện:

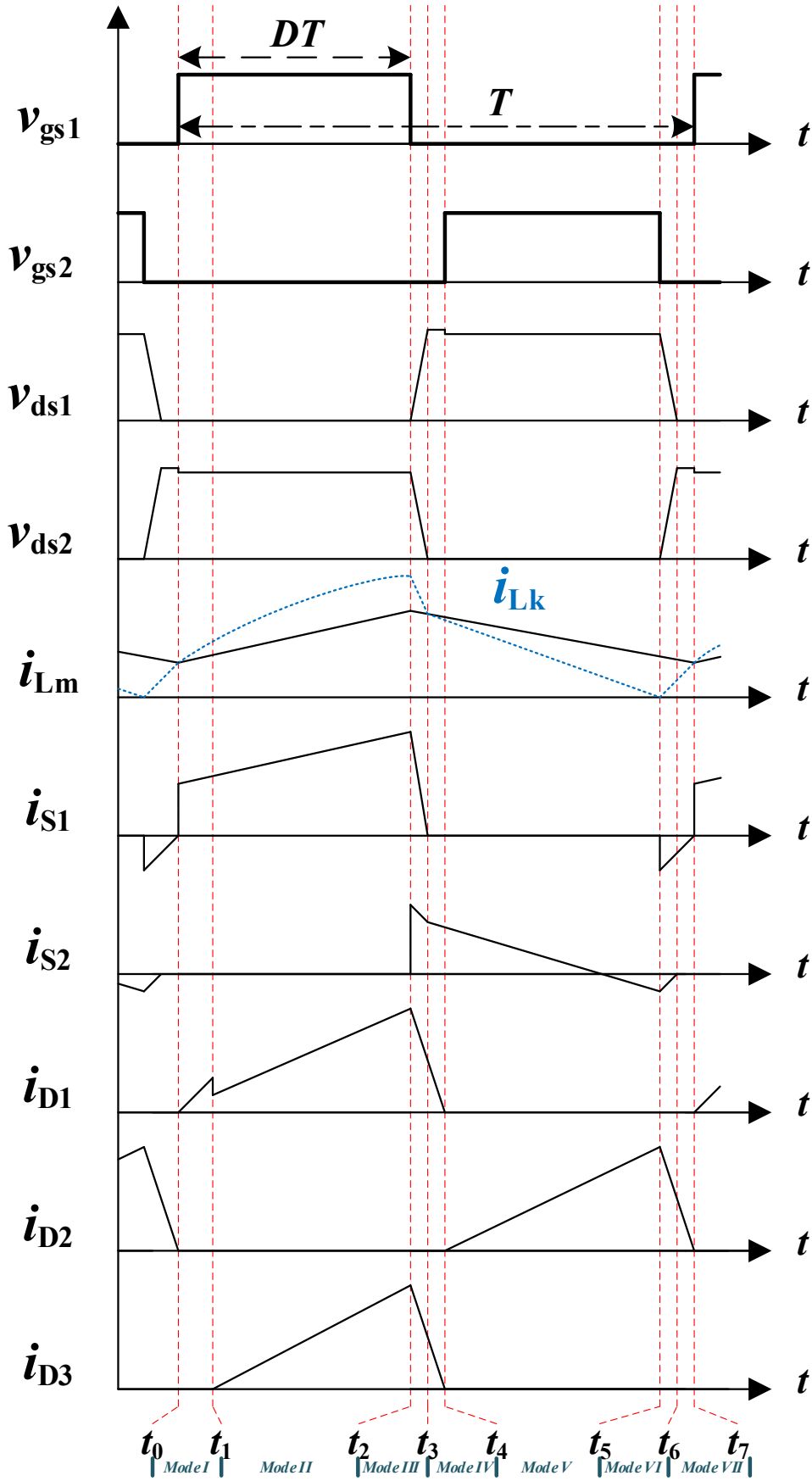
- Điện dung của các tụ điện đủ lớn để điện áp trên tụ không thay đổi trong quá trình chuyển mạch.
- Tất cả thiết bị được xét tại trạng thái lý tưởng với điện trở  $R_{ds\_ON} = 0$ .
- Cuộn cảm ghép coi như là một máy biến áp lý tưởng có tỉ lệ vòng dây  $n = \frac{N_P}{N_S}$  với độ tự cảm rò  $L_k$ .

Trước khi phân tích, chiều dòng điện quy ước được thể hiện trong Hình 4.2.



Hình 4.2 Quy ước chiều dòng điện trong cấu trúc bộ biến đổi

Từ các giả thiết đã đặt ra, nguyên lý hoạt động của bộ tăng áp đề xuất sẽ hoạt động trong 7 nhịp, với biểu đồ dạng sóng trên từng thiết bị được thể hiện cụ thể tại Hình 4.3.



Hình 4.3 Biểu đồ dạng sóng của cấu trúc tăng áp đề xuất

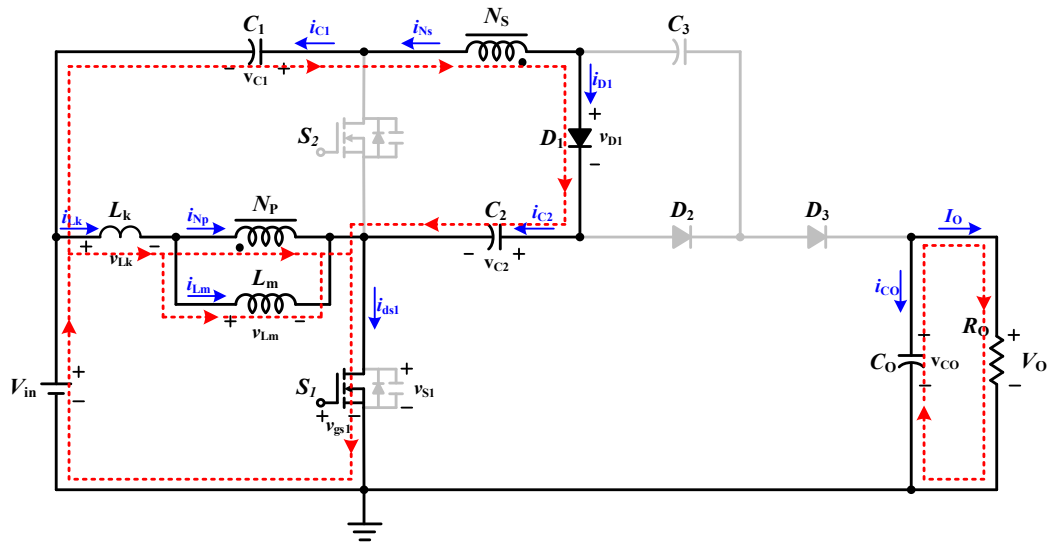
#### 4.2.1 Nhịp I ( $t_0 \sim t_1$ )

Ở nhịp này,  $v_{GS1}$  ở mức cao và  $v_{GS2}$  ở mức thấp.  $S_1$  được bật bởi ZVS và  $S_2$  đã tắt.  $D_1$  phân cực thuận trong khi  $D_2$  và  $D_3$  phân cực ngược.

Dòng điện  $i_{L_k}$  lớn hơn  $i_{L_m}$ , cả  $i_{L_k}$  và  $i_{L_m}$  đều có giá trị dương và tăng dần. Mối quan hệ giữa dòng ra vào của cuộn cảm ghép nối thể hiện qua công thức  $i_{N_p} = i_{L_k} - i_{L_m}$  và  $i_{N_s} = -ni_{N_p}$ , khi  $i_{N_p}$  đang tăng và đi vào điểm quy ước sơ cấp thì  $i_{N_s}$  giảm và đi ra khỏi điểm quy ước của cuộn thứ cấp.

Nguồn đầu vào  $V_{in}$  cung cấp năng lượng cho  $L_m$  và  $L_k$ .  $C_2$  được nạp bởi  $V_{in}$  và  $C_1$ .  $C_0$  xả năng lượng cho tải  $R_o$ .

Nhịp này kết thúc khi  $D_3$  phân cực thuận tại thời điểm  $t = t_1$ .



Hình 4.4 Sơ đồ nguyên lí của mạch tương đương trong Nhịp I

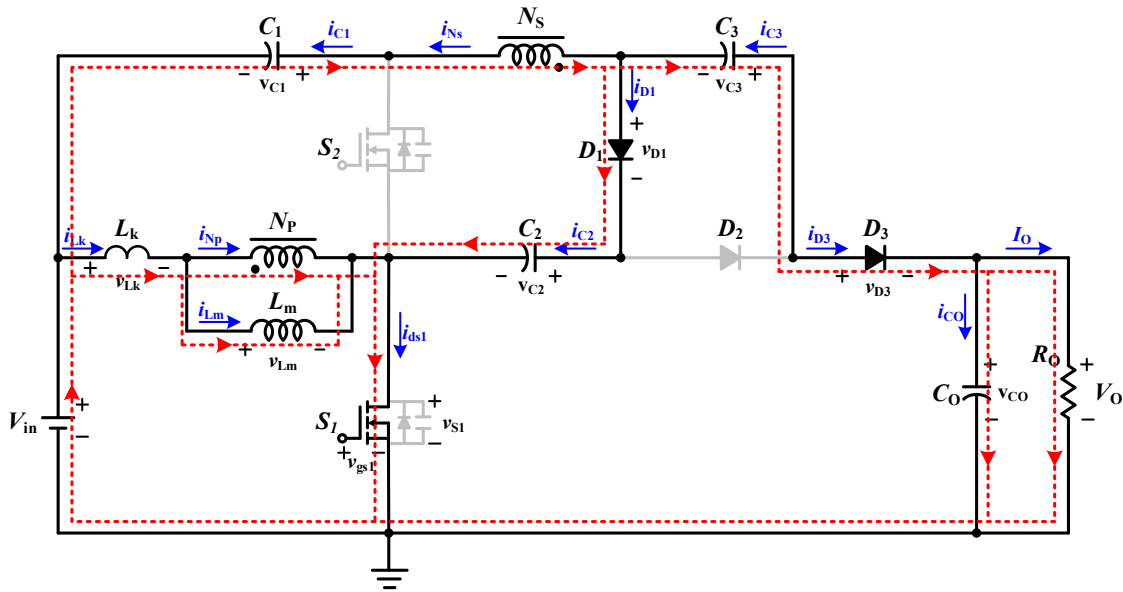
#### 4.2.2 Nhịp II ( $t_1 \sim t_2$ )

Ở nhịp này,  $v_{GS1}$  ở mức cao và  $v_{GS2}$  ở mức thấp.  $S_1$  đang bật và  $S_2$  đã tắt.  $D_1$  và  $D_3$  phân cực thuận trong khi  $D_2$  phân cực ngược.

Dòng điện  $i_{L_k}$  lớn hơn  $i_{L_m}$ , cả  $i_{L_k}$  và  $i_{L_m}$  tiếp tục có giá trị dương và tăng dần. Mối quan hệ giữa dòng ra vào của cuộn cảm ghép nối thể hiện qua công thức  $i_{N_p} = i_{L_k} - i_{L_m}$  và  $i_{N_s} = -ni_{N_p}$ , khi  $i_{N_p}$  đang tăng và đi vào điểm quy ước sơ cấp thì  $i_{N_s}$  giảm và đi ra khỏi điểm quy ước của cuộn thứ cấp.

Nguồn đầu vào  $V_{in}$  cung cấp năng lượng cho  $L_m$  và  $L_k$ .  $C_2$  được nạp bởi  $V_{in}$  và  $C_1$ .  $C_1$  và  $C_3$  xả năng lượng cho  $C_0$  và tải  $R_o$ .

Nhịp này kết thúc khi  $v_{GS1}$  đạt mức thấp tại thời điểm  $t = t_1$ .



Hình 4.5 Sơ đồ nguyên lí của mạch tương đương trong Nhịp II

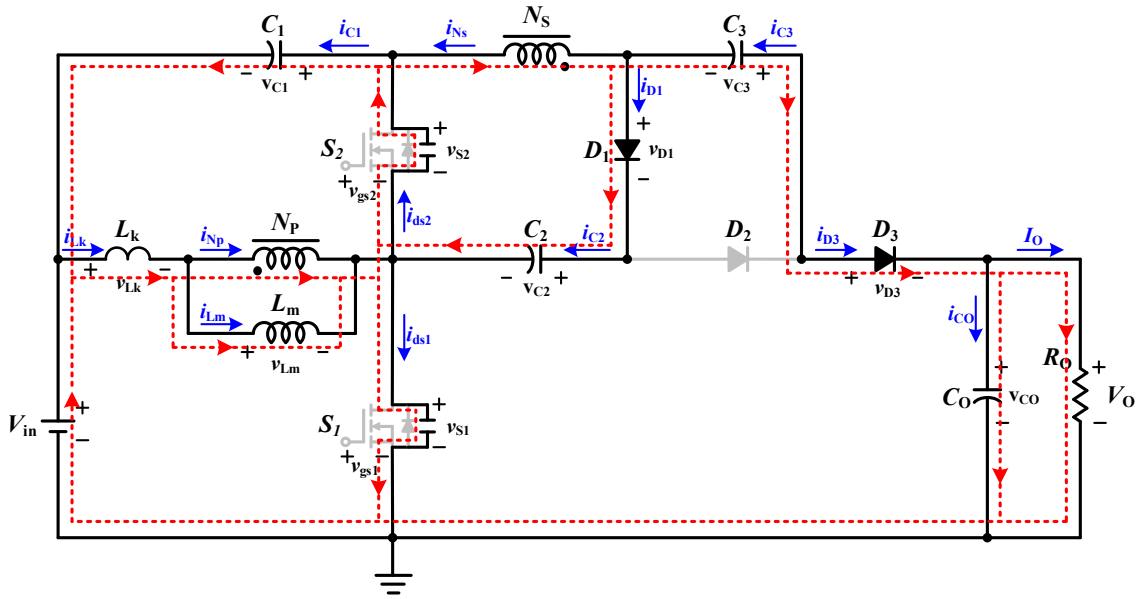
#### 4.2.3 Nhịp III ( $t_2 \sim t_3$ )

Ở tại nhịp III,  $v_{GS1}$  và  $v_{GS2}$  đều ở mức thấp. Tại thời điểm bắt đầu chế độ này,  $S_1$  được tắt và  $S_2$  ở trạng thái tắt.  $D_1$  và  $D_3$  phân cực thuận trong khi  $D_2$  phân cực ngược.

Khi đó năng lượng trên  $L_k$  xả năng lượng cho đầu ra. Các dòng điện trong mạch tương tự như chế độ trước. Bên cạnh đó,  $C_1$  được nạp bởi  $L_m$  và  $L_k$ .

Với  $v_{DS1} + v_{DS2} = V_{C1} + V_{in}$ , khi  $C_{S1}$  đang được nạp năng lượng thì  $C_{S2}$  đang xả năng lượng. Vì  $C_{S1}$  và  $C_{S2}$  rất nhỏ nên thời gian ở chế độ này rất nhỏ. Điện áp  $S_1$  bị giới hạn bởi điện áp  $V_{C1} + V_{in}$ .

Nhịp này kết thúc khi  $v_{DS1} = V_{C1} + V_{in}$  và  $v_{DS2} = 0$ .  $D_{S2}$  được dẫn tại thời điểm  $t = t_3$ .

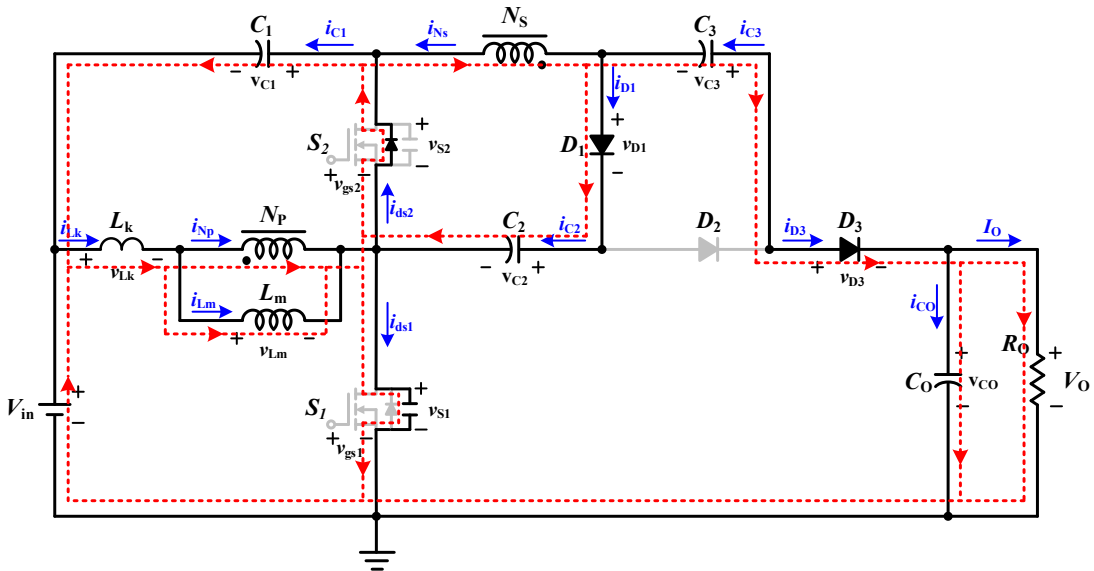


Hình 4.6 Sơ đồ nguyên lí của mạch tương đương trong Nhịp III

#### 4.2.4 Nhịp IV ( $t_3 \sim t_4$ )

Trong nhịp này,  $D_{S_2}$  dẫn và điện áp đặt tới giá trị đỉnh trên  $S_1$ . Tất cả các MOSFET đều tắt.  $D_1$  và  $D_3$  phân cực thuận và  $D_2$  phân cực ngược.

Mọi dòng trong mạch tương tự như nhịp III. Nhịp này kết thúc khi điện áp qua  $S_2$  đạt giá trị 0 do đó switch  $S_2$  được bật dưới ZVS tại thời điểm  $t = t_4$ .



Hình 4.7 Sơ đồ nguyên lí của mạch tương đương trong Nhịp IV

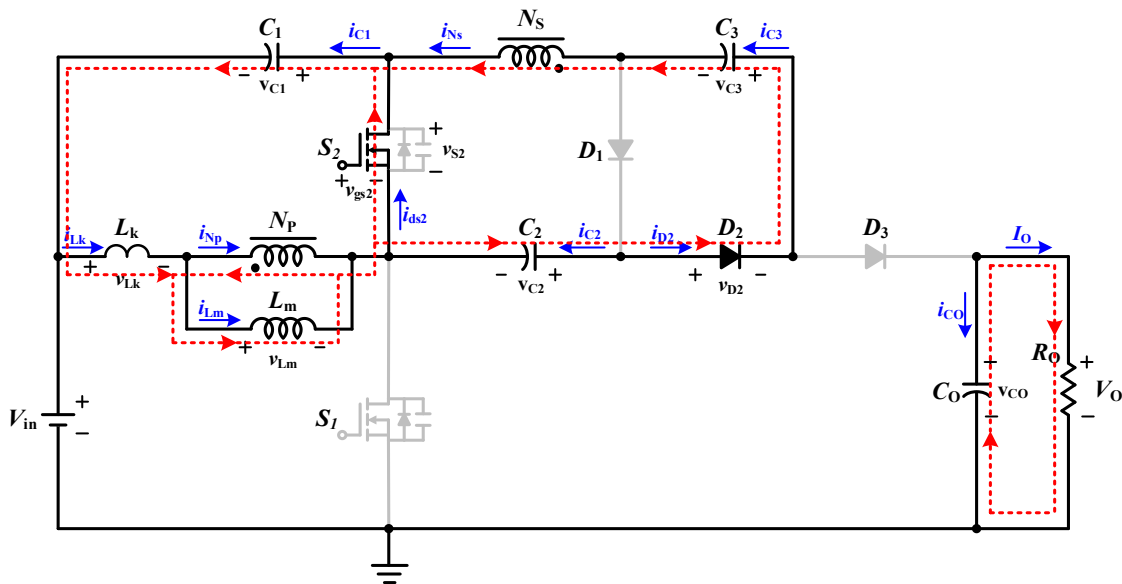
#### 4.2.5 Nhịp V ( $t_4 \sim t_5$ )

Ở nhịp V,  $v_{GS1}$  ở mức thấp và  $v_{GS2}$  ở mức cao.  $S_2$  được bật bởi ZVS và  $S_1$  đã tắt.  $D_2$  phân cực thuận trong khi  $D_1$  và  $D_3$  phân cực ngược.

Dòng điện  $i_{Lk}$  nhỏ hơn  $i_{Lm}$ , cả  $i_{Lk}$  và  $i_{Lm}$  đều có giá trị dương và tăng dần. Dòng điện  $i_{Np} = i_{Lk} - i_{Lm}$  đạt giá trị âm và  $i_{Ns} = -ni_{Np}$  là giá trị dương, khi  $i_{Np}$  đi ra điểm quy ước sơ cấp thì  $i_{Ns}$  đi vào điểm quy ước của cuộn thứ cấp.

Nguồn đầu vào  $V_{in}$  cung cấp năng lượng  $C_1$  và  $C_3$  thông qua cuộn cảm ghép nối.  $C_2$  xả năng lượng cho  $C_1$  và  $C_3$ .  $C_0$  xả năng lượng cho tải  $R_o$ .

Nhịp này kết thúc khi  $v_{GS2}$  xuống mức thấp tại thời điểm  $t = t_5$ .



Hình 4.8 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp V

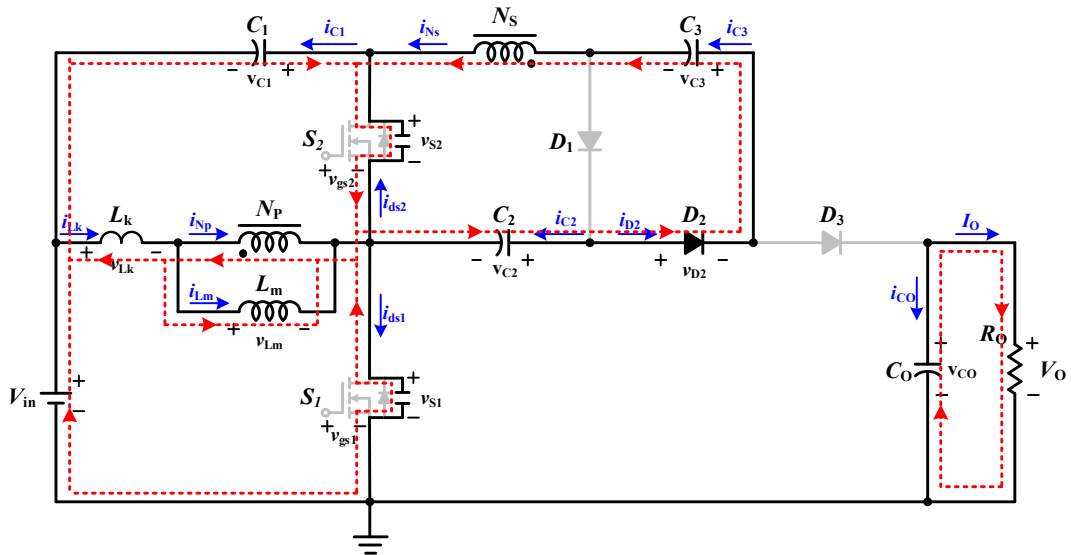
#### 4.2.6 Nhịp VI ( $t_5 \sim t_6$ )

Ở tại nhịp này,  $v_{GS1}$  và  $v_{GS2}$  đều ở mức thấp nên thời điểm bắt đầu  $S_2$  được tắt và  $S_1$  ở trạng thái tắt.  $D_1$  và  $D_3$  phân cực ngược trong khi  $D_2$  phân cực thuận.

Khi đó năng lượng trên  $L_k$  xả năng lượng cho đầu ra.  $C_1$  xả năng lượng. Các dòng điện trong mạch tương tự như chế độ trước.

Với  $v_{DS2} + v_{DS1} = V_{in} + V_{C1}$ , khi  $C_{S1}$  xả nạp năng lượng thì  $C_{S2}$  đang được nạp năng lượng. Vì  $C_{S1}$  và  $C_{S2}$  rất nhỏ nên thời gian ở chế độ này rất nhỏ. Điện áp  $S_2$  bị giới hạn bởi điện áp  $V_{in} + V_{C1}$ .

Nhịp này kết thúc khi  $v_{DS1} = 0$  và  $v_{DS2} = V_{in} + V_{C1}$ .  $D_{S1}$  được dẫn tại thời điểm  $t = t_6$ .

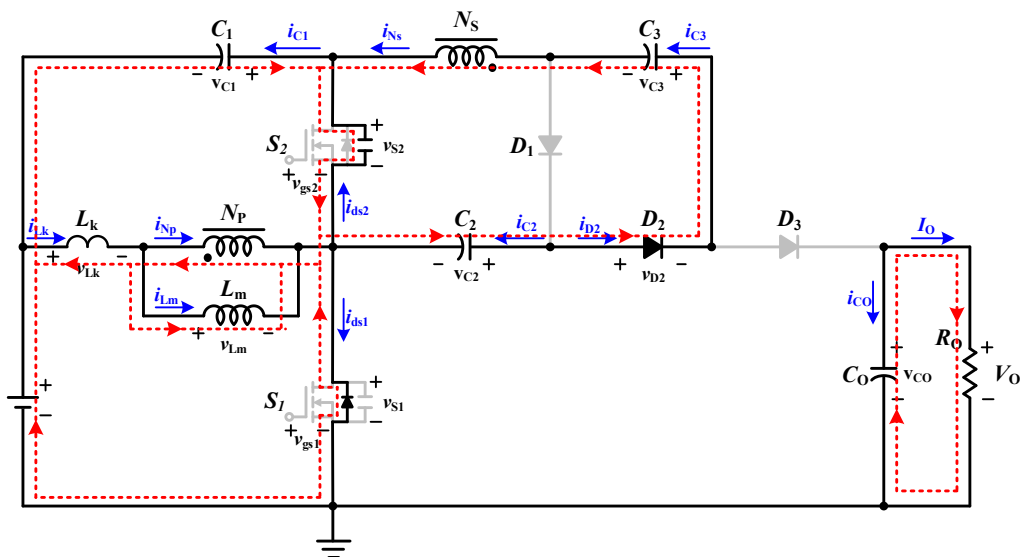


Hình 4.9 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp VI

#### 4.2.7 Nhịp VII ( $t_6 \sim t_7$ )

Trong nhịp này,  $D_{S_1}$  dẫn. Tất cả MOSFET đều tắt.  $D_2$  phân cực thuận,  $D_1$  và  $D_3$  phân cực ngược.

Mọi dòng điện trong mạch tương tự như ở nhịp VI. Nhịp này kết thúc khi điện áp qua  $S_1$  đạt giá trị 0 và  $S_1$  được bật bởi ZVS tại thời điểm  $t = t_7$ .



Hình 4.10 Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong Nhịp VII.

### 4.3 Phân tích mạch ở trạng thái xác lập

#### 4.3.1 Hệ số khuếch đại điện áp

Xác định hệ số khuếch đại thông qua phân tích các vòng hoạt động của mạch trong từng nhịp. Cần chia ra hai phần trạng thái của mạch, thứ nhất là quá trình trữ năng lượng trong cuộn cảm ghép và thứ hai là quá trình xả năng lượng trong cuộn cảm ghép.

Trong quá trình trữ năng lượng, sử dụng hai trạng thái của nhịp I và II được thể hiện thông qua Hình 4.4 và Hình 4.5.

Từ Hình 4.4, đưa ra các phương trình thể hiện mối liên hệ giữa điện áp trên cuộn cảm ghép  $L_m$  trong trạng thái trữ năng lượng – được kí hiệu ON đối với các thành phần điện áp trên tụ điện  $C_1$ ,  $C_2$  và điện áp đầu vào

$$V_{L_m.ON} = V_{in} \quad (1)$$

$$V_{C_2} = nV_{L_m.ON} + V_{C_1} + V_{in} \quad (2)$$

Thông qua Hình 4.5, có thêm mối liên hệ đối với điện áp đầu ra  $V_o$  và điện áp trên tụ điện  $C_3$

$$V_o = V_{C_3} + nV_{L_m.ON} + V_{C_1} + V_{in} \quad (3)$$

Xét đến quá trình xả năng lượng, áp dụng quá trình hoạt động của nhịp V tại Hình 4.8. Mối liên hệ giữa điện áp trên cuộn cảm ghép trong trạng thái xả năng lượng – được kí hiệu OFF đối với điện áp trên các tụ điện  $C_1$ ,  $C_2$  và  $C_3$  được thể hiện

$$V_{L_m.OFF} = -V_{C_1} \quad (4)$$

$$V_{C_3} = V_{C_2} - nV_{L_m.OFF} \quad (5)$$

Cân bằng điện áp trên Coupled – Inductor  $L_m$  trong toàn chu kỳ  $T$

$$\int_0^{DT} V_{L_m.ON} dt + \int_{DT}^T V_{L_m.OFF} dt = 0 \quad (6)$$

Qua phương trình (6) có được trên, điện áp trên cuộn cảm ghép  $L_m$  tại hai trạng thái trữ và xả năng lượng sẽ liên quan với nhau

$$V_{L_m.OFF} = -\frac{D}{1-D} V_{L_m.ON} \quad (7)$$

Sử dụng hai phương trình (1) và (4), điện áp trên tụ điện  $C_1$  được xác định như một bộ chuyển đổi Boost căn bản

$$V_{C_1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (8)$$

Điện áp trên tụ điện  $C_2$  được suy ra bằng cách thay phương trình (1) và (8) vào phương trình (2)

$$V_{C_2} = \frac{1+n-nD}{1-D} V_{in} \quad (9)$$

Xem xét phương trình (5), sử dụng các biến suy được từ phương trình (4), (8) và (9) đưa ra điện áp trên tụ điện  $C_3$

$$V_{C_3} = \frac{1+n}{1-D} V_{in} \quad (10)$$

Tất cả những kết quả đạt được từ tính toán trên đều hướng tới mối qua hệ giữa điện áp đầu ra  $V_o$  và điện áp đầu vào  $V_{in}$  tại phương trình (3). Hệ số khuếch đại điện áp của mạch được xác định bằng cách áp dụng các phương trình (1), (8) và (10) vào phương trình (3)

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2+n(2-D)}{1-D} \quad (11)$$

Phương trình (11) thể hiện hệ số khuếch đại điện áp của mạch đã đề xuất, phụ thuộc vào độ rộng xung  $D$  và tỉ số vòng dây  $n$  trong cuộn cảm ghép.

#### 4.3.2 Điện áp ngược trên thiết bị công suất

Xét trạng thái không hoạt động của MOSFET  $S_1$  tại Hình 4.8, sử dụng phương trình (4) đưa ra phương trình điện áp ngược đặt lên MOSFET  $S_1$

$$V_{S_1} = V_{in} - V_{Lm,OFF} = \frac{1}{1-D} V_{in} = \frac{1}{2+n(2-D)} V_o \quad (12)$$

Tương tự đối với MOSFET  $S_2$ , từ Hình 4.4 và Hình 4.5, điện áp ngược trên MOSFET  $S_2$  được tính qua công thức

$$V_{S_2} = V_{C_1} + V_{Lm,ON} = \frac{1}{1-D} V_{in} = \frac{1}{2+n(2-D)} V_o \quad (13)$$

Ứng suất điện áp trên các DIODE xác định trong trạng thái không làm việc. Áp dụng điện áp đã suy được từ các thiết bị làm cơ sở để suy ra điện áp ngược đặt lên DIODE.

$$V_{D_1} = V_{D_2} = V_{C_3} = \frac{1+n}{1-D} V_{in} \quad (14)$$

$$V_{D_3} = \frac{n}{1-D} V_{in} \quad (15)$$

#### 4.3.3 Tính toán cuộn cảm ghép

Có mối quan hệ giữa điện áp và dòng điện trên cuộn cảm ghép

$$di_{L_m} = \frac{1}{L} \int_0^{DT} v_{L_m} dt \quad (16)$$

Thông số điện cảm được xác định khi công suất chỉ đạt 40% so với công suất định mức, tại đó theo thực nghiệm có được hiệu suất đạt cao nhất. Dòng điện trung bình qua cuộn cảm ghép được xem như là dòng điện đầu vào của bộ chuyển đổi đúng theo cấu trúc đã thiết kế

$$I_{L_m} = I_{in} = \frac{40\%P}{V_{in}} \quad (17)$$

Để đảm bảo hoạt động ở BCM – Boundary Conduction Mode, dòng điện qua cuộn cảm ghép phải đạt giá trị 0 tại cuối mỗi chu kỳ chuyển mạch

$$\frac{\Delta I_{L_m}}{2} \leq I_{L_m} \quad (18)$$

Từ các phương trình (16), (17) và (18), độ tự cảm  $L_m$  phải thỏa mãn phương trình

$$L_m \geq \frac{DV_{in}^2}{80\%Pf} \quad (19)$$

Độ tự cảm rò  $L_k$  được chọn trên thực nghiệm dựa trên phương trình (19)

$$L_k = 3\%L_m \quad (20)$$

#### 4.3.4 Lựa chọn tụ điện

Phương trình tính toán thông số điện dung của tụ điện thông qua mối liên hệ giữa dòng điện và điện áp qua tụ

$$C_o = \frac{\int_0^{DT} i_{C_o} dt}{dv_{C_o}} \quad (21)$$

$$C_1 = \frac{\int_{DT}^T i_{C_1} dt}{dv_{C_1}} \quad (22)$$

$$C_2 = \frac{\int_0^{DT} i_{C_2} dt}{dv_{C_2}} \quad (23)$$

$$C_3 = \frac{\int_{DT}^T i_{C_3} dt}{dv_{C_3}} \quad (24)$$

Nhằm bảo đảm tính ổn định và độ tin cậy của mạch, biên độ dao động điện áp trên các tụ điện phải thỏa mãn

$$\Delta V_{C_0} \leq 0.1\%V_{C_0} \quad (25)$$

$$\Delta V_{C_{1,2,3}} \leq 5\%V_{C_{1,2,3}} \quad (26)$$

Từ phương trình (21) và (25), điện dung tụ điện đầu ra  $C_0$  thỏa mãn công thức

$$C_0 \geq \frac{I_o D}{0.1\%V_{C_0} f} \quad (27)$$

Sử dụng các phương trình (22) đến (24) cùng với (27), xác định phương trình tính toán điện dung các tụ điện  $C_1$ ,  $C_2$ , và  $C_3$

$$C_1 \geq \frac{I_{in}(1-D)}{5\%V_{C_1} f} \quad (28)$$

$$C_2 \geq \frac{\frac{I_{L_m} D}{n}}{5\%V_{C_2} f} \quad (29)$$

$$C_3 \geq \frac{\frac{I_{L_m} (1-D)}{n}}{5\%V_{C_3} f} \quad (30)$$

## CHƯƠNG 5. MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM BỘ CHUYỂN ĐỔI

### 5.1 Thông số của thiết bị

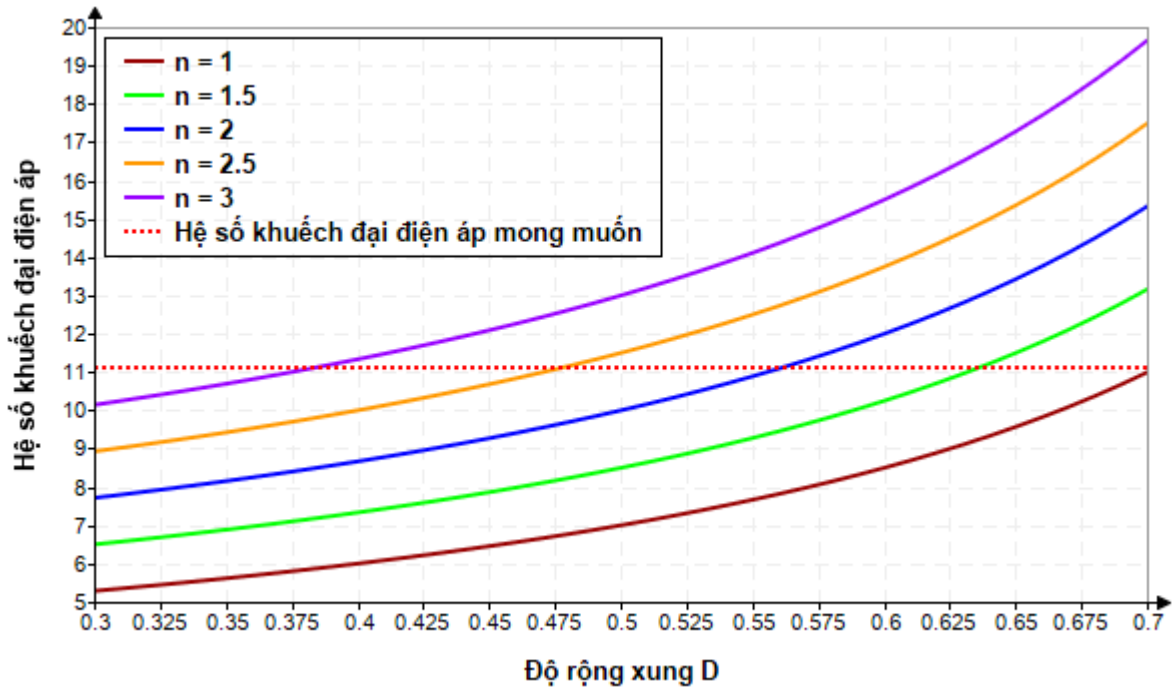
Sau khi tham khảo các ứng dụng thực tế về mức điện áp vào ra và mức công suất của bộ chuyển đổi nâng điện áp DC – DC, thêm vào đó là vật liệu công nghệ của MOSFET hiện tại, các thông số dùng trong thiết kế đồ án này đáp ứng tốt về độ tin cậy, ổn định và cả về hiệu suất. Chi tiết được thể hiện trong Bảng 5.1.

Bảng 5.1 Thông số kỹ thuật mong muốn của bộ chuyển đổi

| Tham số                  | Giá trị      |
|--------------------------|--------------|
| Điện áp đầu vào $V_{in}$ | 36 V         |
| Điện áp đầu ra $V_o$     | 400 V        |
| Công suất định mức $P$   | 300 W        |
| Điện trở tải $R_o$       | 533 $\Omega$ |
| Tần số chuyển mạch $f_s$ | 50 kHz       |

#### 5.1.1 Tính toán thông số thiết bị

Nhằm đảm bảo về độ ổn định, tin cậy, hiệu suất và khả năng điều chỉnh, độ rộng xung được khảo sát trong khoảng từ 30% đến 70%. Mối quan hệ giữa độ rộng xung và hệ số khuếch đại của bộ chuyển đổi được thiết kế thể hiện trong Hình 5.1 dựa vào công thức (11) đã đưa ra trong mục 4.3.1. Tỉ số vòng dây  $n$  của cuộn cảm ghép khảo sát trong khoảng từ 1 đến 3.



Hình 5.1 Mối liên hệ giữa hệ số khuếch đại điện áp với độ rộng xung

Thông qua khảo sát từ Hình 5.1, để tối ưu kích thước của cuộn đảm bảo kích thước toàn mạch, lựa chọn tỉ số vòng dây  $n$  của cuộn cảm ghép là 2. Có được độ rộng xung theo đồ thị là 56%, tuy nhiên vì các công thức đưa ra được tính toán trong điều kiện chuẩn nên độ rộng xung sẽ lớn hơn một chút so với công thức.

Tiếp theo, cần đưa ra các thông số thiết bị cụ thể như điện dung và điện cảm khi mô phỏng. Công thức thiết kế đã tính toán trong mục 4.3.3 và mục 4.3.4, thông số của cuộn cảm ghép được tính toán thông qua công thức (19) và (20), tương tự còn đối với các tụ điện đầu ra  $C_0$  và các tụ  $C_1, C_2, C_3$  sẽ sử dụng các công thức từ (27) đến (30).

Bảng 5.2 Thông số thiết kế linh kiện của bộ chuyển đổi

| Tham số                   | Giá trị     |
|---------------------------|-------------|
| Chu kỳ làm việc $D$       | 56%         |
| Điện cảm cuộn chính $L_m$ | 65 $\mu H$  |
| Điện cảm rò $L_k$         | 2 $\mu H$   |
| Điện dung đầu ra $C_0$    | 33 $\mu F$  |
| Điện dung $C_1$           | 33 $\mu F$  |
| Điện dung $C_2$           | 4.7 $\mu F$ |
| Điện dung $C_3$           | 4.7 $\mu F$ |

### 5.1.2 Lựa chọn linh kiện

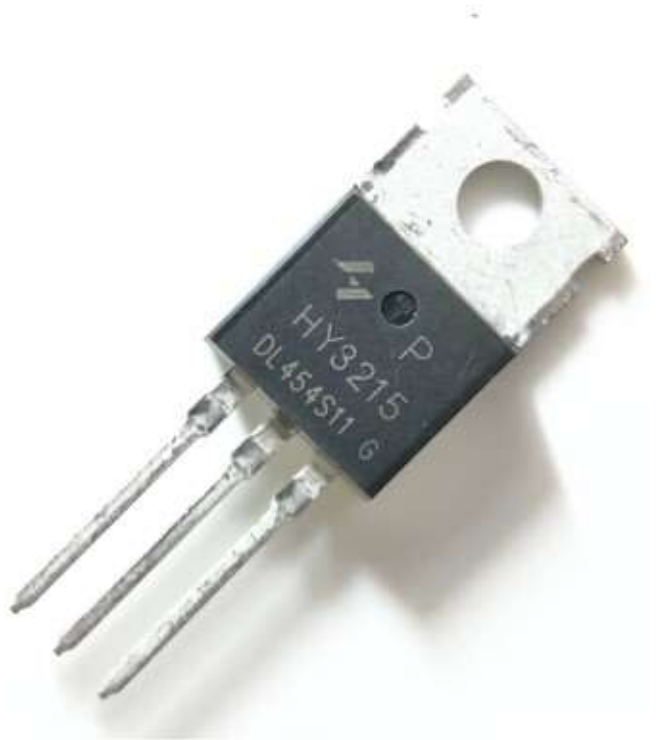
Lựa chọn thiết bị dựa trên Bảng 5.2, điện cảm trên cuộn cảm ghép không quá nhiều so với tính toán, lõi được sử dụng là lõi Ferit. Đối với tụ điện sửa dụng có khác so với thông số tính toán, sử dụng tụ điện NICHICON  $66\mu F/450V$  và một số tụ điện có điện dung lớn. Để giải thích điều này, vì chất lượng tụ trên thị trường khá kém khiến cho  $R_{ds\_ON}$  của tụ cao gây ra tổn hao công suất lên tụ, nên lựa tụ có điện dung cao hoặc một số tụ có chất lượng tốt.

Dựa vào dữ liệu tính toán và mô phỏng về điện áp ngược đặt lên thiết bị để lựa chọn MOSFET và DIODE. Việc thực nghiệm với khả năng hiện tại xét ở công suất nhỏ  $300W$ , giá trị dòng điện chịu được trên thiết bị đủ để hoạt động

Thiết bị ở đây được chọn có giá thành và chất lượng tương đối ổn nhưng không quá tốt. Tuy nhiên, chúng vẫn đạt được tiêu chí để kiểm nghiệm tính khả quan của mạch.

Thiết bị MOSFET được lựa chọn là HY3215.

Thiết bị DIODE lựa chọn là RHRG30120.



Hình 5.2 MOSFET HY3215



Hình 5.3 DIODE RHRG30120

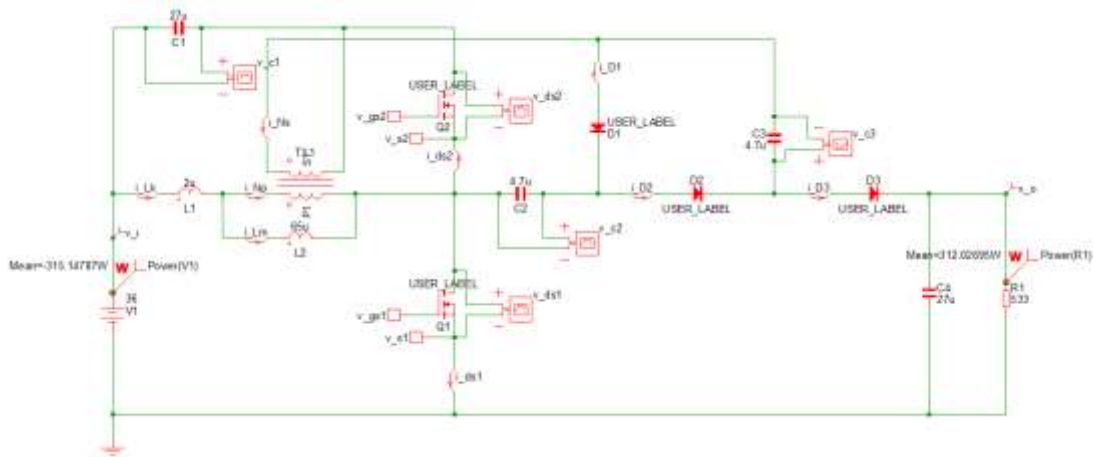
## 5.2 Kiểm nghiệm bộ chuyển đổi

Để xác minh tính khả thi của bộ chuyển đổi tăng áp DC – DC chuyển mạch mềm đề xuất, một mẫu thử nghiệm công suất  $300W$  đã được chế tạo. Các thông số điện bao gồm: điện áp đầu vào  $V_{in} = 36V$ , điện áp đầu ra  $V_o = 400V$ , tần số chuyển mạch  $f_s = 50kHz$  và công suất định mức  $P = 300W$ .

### 5.2.1 Mô phỏng

SIMetrix/SIMPLIS là bộ công cụ mô phỏng mạch điện tử, hỗ trợ mạnh trong việc thiết kế phân tích các bộ nguồn chuyển đổi và đặc biệt mà mạch tương tự. Phần mềm này được sử dụng phổ biến trong các ngành điện tử, là bộ công cụ quen thuộc của các kỹ sư thiết kế về bộ chuyển đổi công suất và bộ điều khiển.

Trong đồ án này sử dụng công cụ SIMPLIS mô phỏng bộ chuyển đổi vì nó được tạo tối ưu cho việc mô phỏng các bộ nguồn chuyển mạch. Các thông số mong muốn của bộ chuyển đổi được sử dụng tại Bảng 5.1, các tham số của thiết bị sử dụng tại Bảng 5.2 đã tính toán.

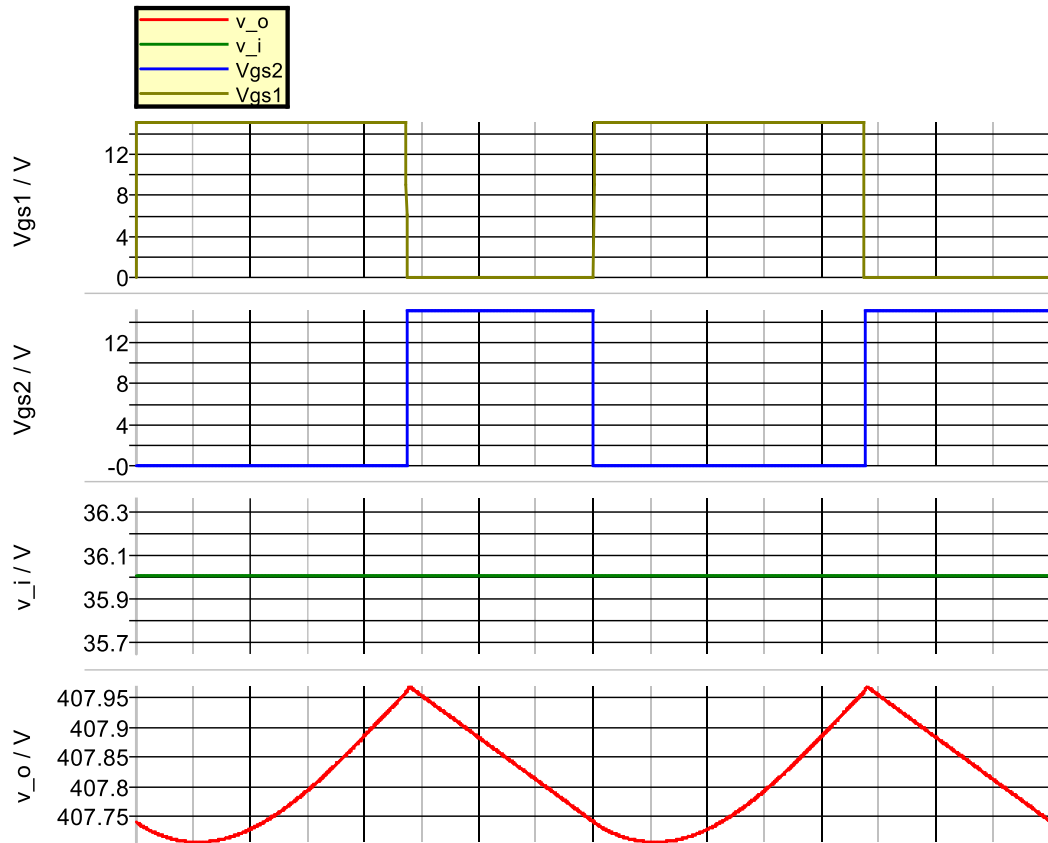


Hình 5.4 Sơ đồ mô phỏng cấu trúc bộ chuyển đổi trên SIMetrix/SIMPLIS

Mô phỏng bộ chuyển đổi tăng áp DC – DC chuyển mạch mềm với cấu trúc được thiết kế. Thông số mô phỏng của mạch được thể hiện chi tiết tại Bảng 5.1 và các thông số thiết kế của thiết bị được sử dụng tại Bảng 5.2.

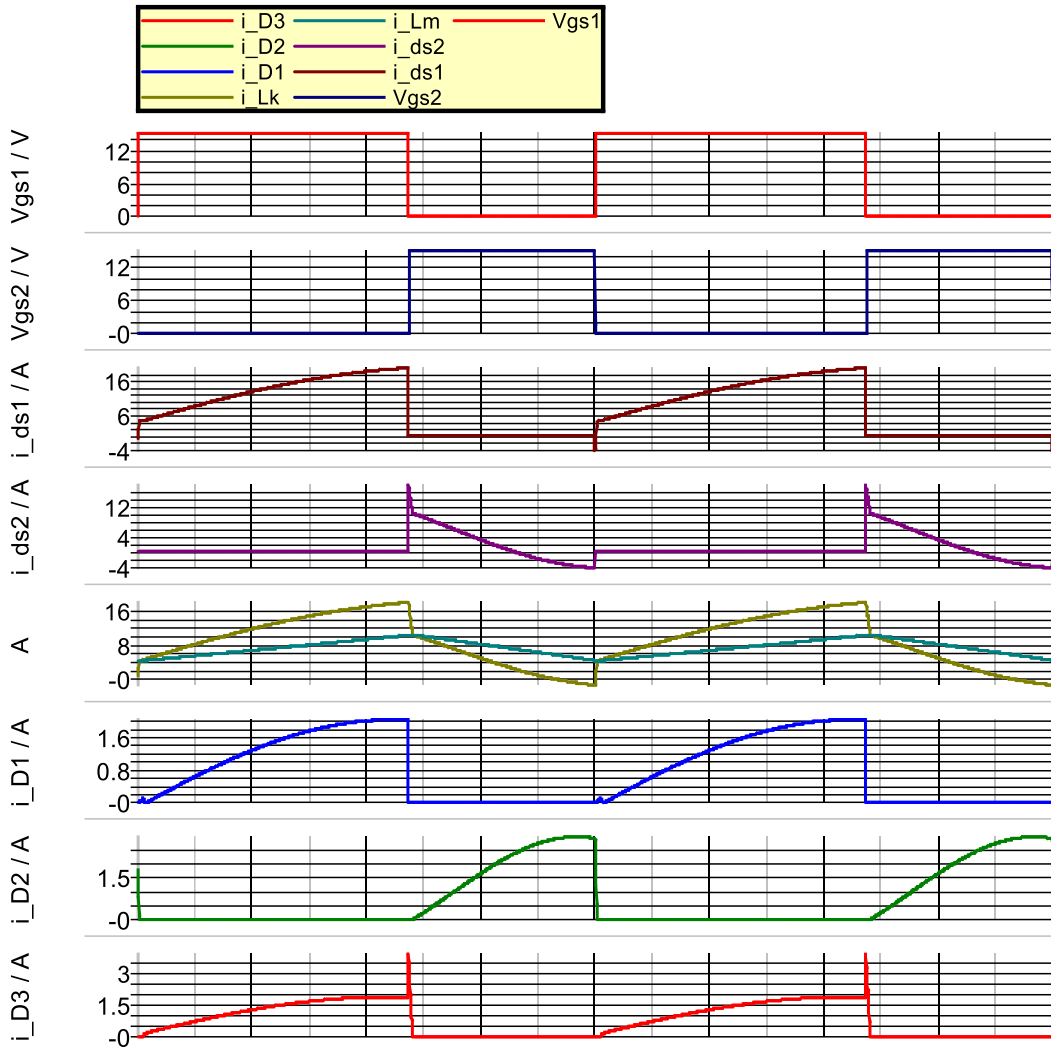
Để đạt chuẩn điện áp đầu ra đã đưa ra  $V_o = 400V$  có sự sai lệch ở độ rộng xung so với tính toán, trên mô phỏng được thực hiện ở độ rộng xung  $D = 59\%$  thay vì thông số đã được tính toán tại mục 5.1. Sau khi xem xét cho thấy sự chênh lệch này do việc tính toán được thực hiện trên toàn bộ điều kiện chuẩn.

Điện áp đầu ra  $V_o$  ổn định có độ gợn thấp quanh  $407V$  với điện áp đầu vào  $V_{in} = 36V$  thích hợp cho các ứng dụng năng lượng tái tạo.



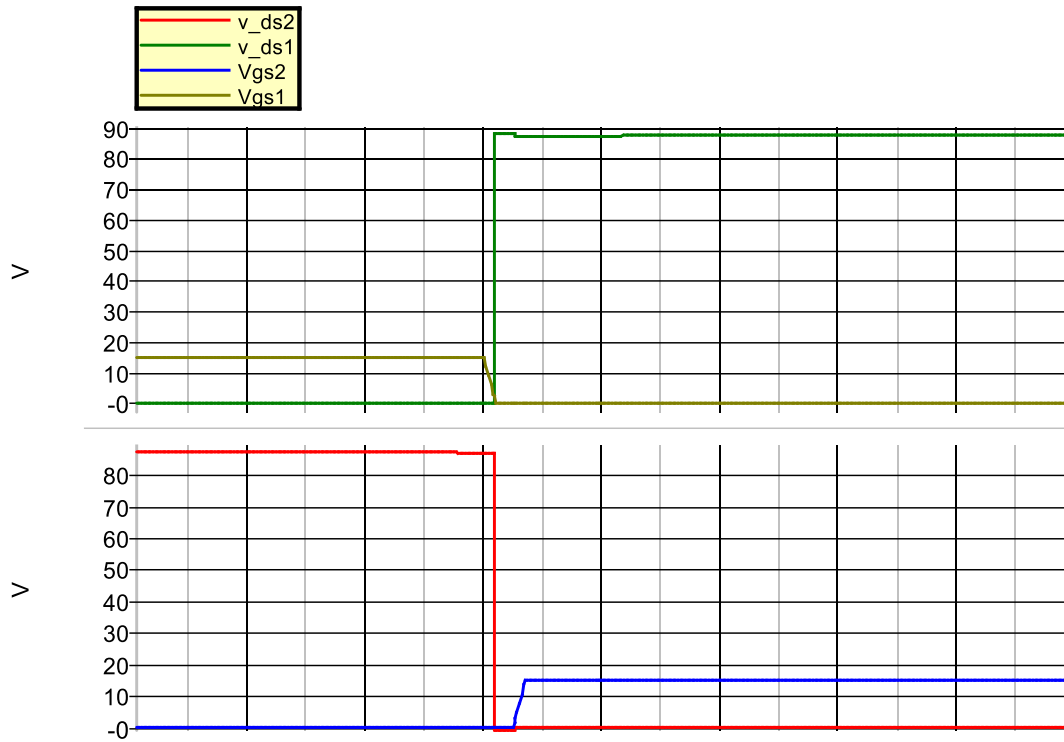
Hình 5.5 Dạng sóng điện áp vào ra của bộ chuyển đổi

Dạng sóng dòng điện qua các các thiết bị như cuộn cảm ghép, MOSFET và Diode được thể hiện trong Hình 5.6. Dòng điện thể hiện tại các chu trình trữ và xả năng lượng hoàn toàn khời với phân tích lý thuyết.



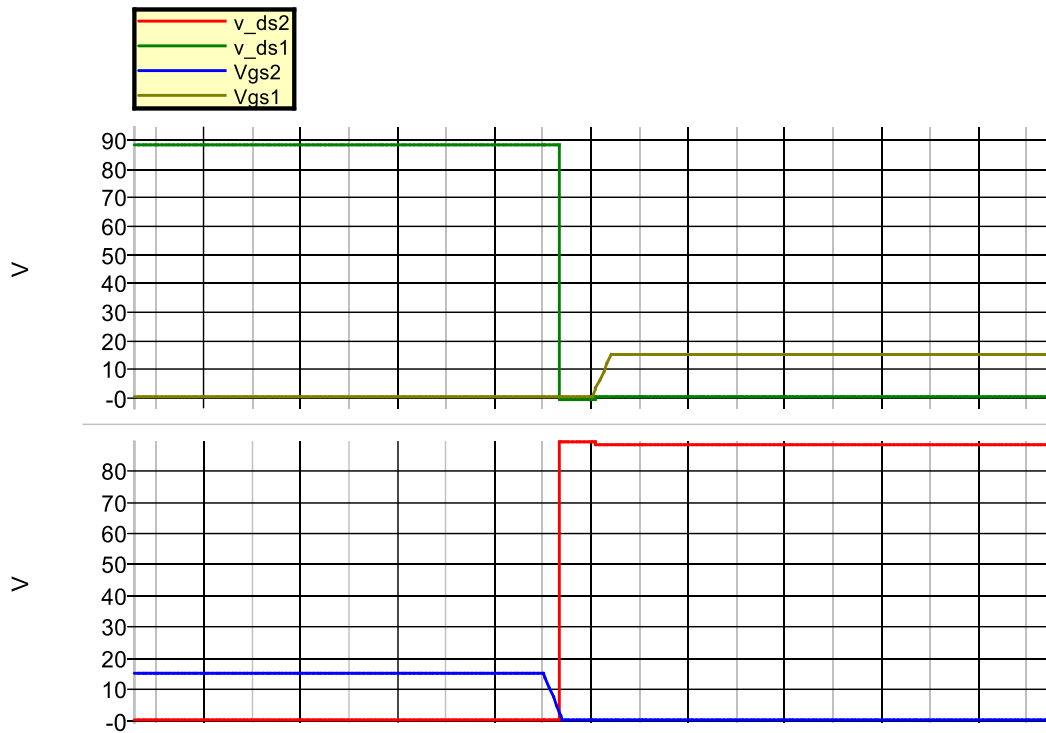
Hình 5.6 Dạng sóng tính hiệu dòng áp đi qua các linh kiện

Kiểm nghiệm trạng hoạt động của hai MOSFET  $S_1$  và  $S_2$ . Theo Hình 5.7 và Hình 5.8, quan sát trạng thái điện áp  $V_{ds_x}$  và  $V_{gs_x}$ , khi  $V_{ds_x}$  giảm xuống 0 thì tiếng hành kích hoạt  $V_{gs_x}$  lên chân Gate của MOSFET. Do vậy, điện áp của MOSFET sẽ xuống 0 trước khi có dòng đi qua MOSFET, nên công suất tiêu thụ trên MOSFET gần như đạt 0 theo điều kiện chuẩn. Tuy nhiên, sẽ có sự tiêu hao công suất trên MOSFET do điện trở  $R_{ds\_ON}$  bên trong DIODE nội.



Hình 5.7 Trạng thái ZVS của MOSFET2

Kết quả mô phỏng xác nhận cả hai MOSFET đều đạt được chế độ chuyển mạch tại điện áp bằng không. Điều này khẳng định khả năng hoạt động chuyển mạch mềm của cấu trúc bộ chuyển đổi đã đề xuất đáp ứng tốt yêu cầu về hiệu suất và độ tin cậy.



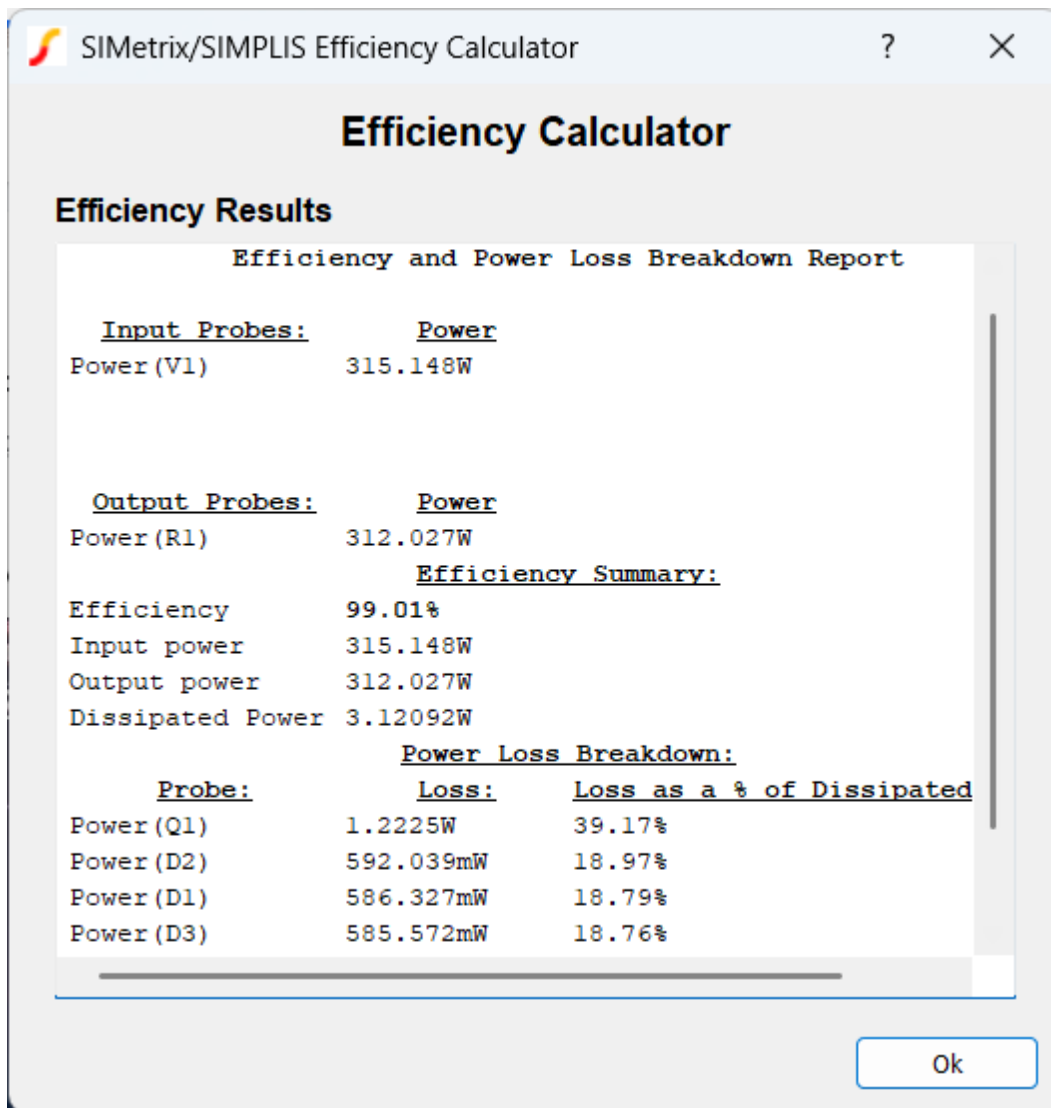
Hình 5.8 Trạng thái ZVS của MOSFET1

### 5.2.2 Phân tích hiệu suất và tổn hao

Mạch được đề xuất được thiết kế ở công suất 300W, các thông số công suất và tổn hao công suất được thể hiện trong Hình 5.9.

Theo mô phỏng với công suất đầu vào là 315W và đạt được công suất đầu ra là 312W, bộ chuyển đổi hoạt động đạt hiệu suất 99% tại 100% tải.

Xét ở các điều kiện chuẩn, công suất tổn hao chủ yếu do các linh kiện bán dẫn là MOSFET và DIODE

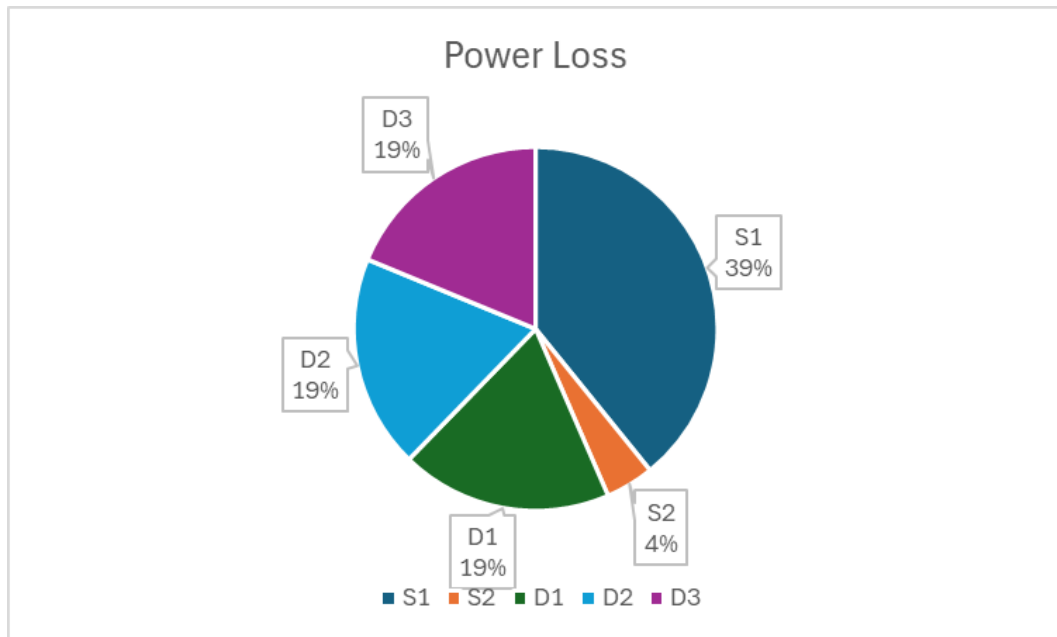


Hình 5.9 Thông tin công suất mô phỏng tại 100% tải

Để đạt được hiệu suất cao như vậy, mạch được thiết kế sao cho DIODE phân bố chủ yếu ở điện áp cao đầu ra, làm cho dòng hoạt động tại đó nhỏ với cùng mức công suất, việc tổn hao năng lượng lên DIODE giảm đáng kể. Ngoài ra, năng lượng còn tổn hao trên MOSFET, thông thường việc tổn hao này lớn do việc chuyển mạch cứng, bằng

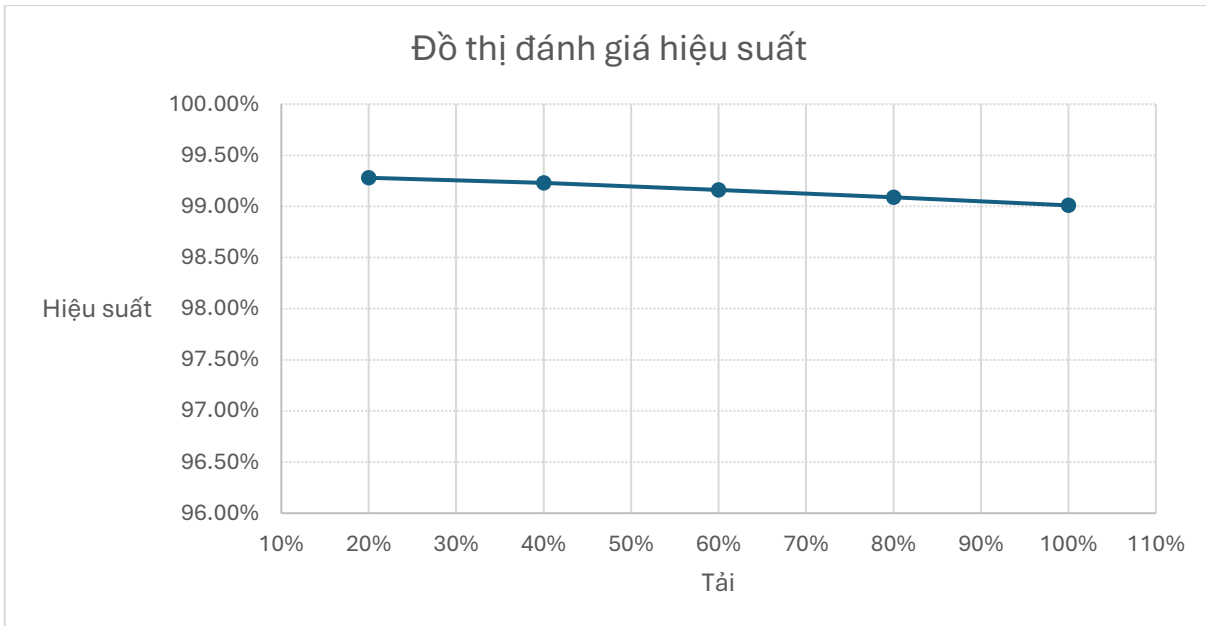
kỹ thuật thiết kế, mạch hoạt động với chuyển mạch mềm nên cho dù MOSFET nằm ở phía điện áp thấp nhưng sự tổn hao này rất nhỏ, điều này cũng góp phần cải thiện hiệu suất.

Hình 5.10 thể hiện phân bố tổn hao của các linh kiện bán dẫn trên mạch, như đã phân tích, bộ ba DIODE cùng nằm phía điện áp cao nên phần trăm tổn hao gần như tương đồng 19%. Mặc dù nằm ở phía điện áp thấp nhưng tổn hao trên MOSFET 2 nhỏ nhất nhờ vào kỹ thuật chuyển mạch mềm.



Hình 5.10 Tỷ lệ thành phần tổn hao công suất

Bộ chuyển đổi đều đạt hiệu suất cao trên 99% trong dãy 100% tải, được thể hiện trong Hình 5.11. Trên lý thuyết, hiệu suất đạt đỉnh tại 40% tải, nhưng do việc lựa chọn thông số của Coupled – Inductor có chú lớn hơn do việc tính toán nên khi mô phỏng hiệu suất vẫn còn cao tại 20% tải.



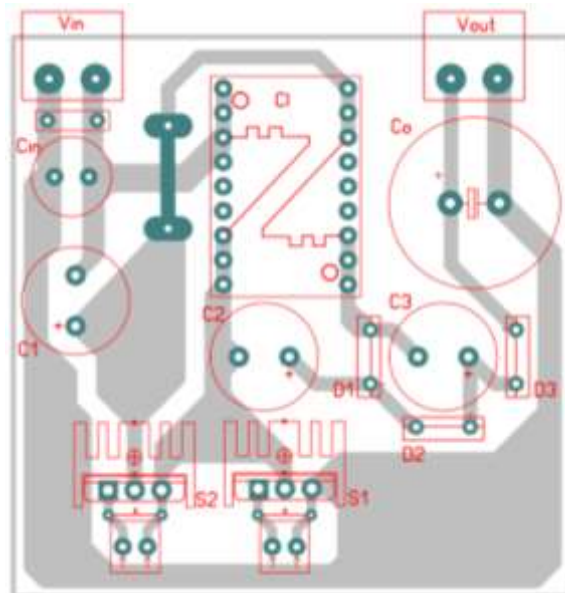
Hình 5.11 Mô phỏng tại các mức tải khác nhau

### 5.2.3 Thực nghiệm

Đánh giá qua mô phỏng, thông số của mạch khớp với phân tích lý thuyết. Việc làm mạch thực là khả quan, mạch được làm ra được thể hiện trong Hình 5.12, thứ tự bố trí thiết bị cụ thể trong Hình 5.13.



Hình 5.12 Mô hình bộ chuyển đổi thực

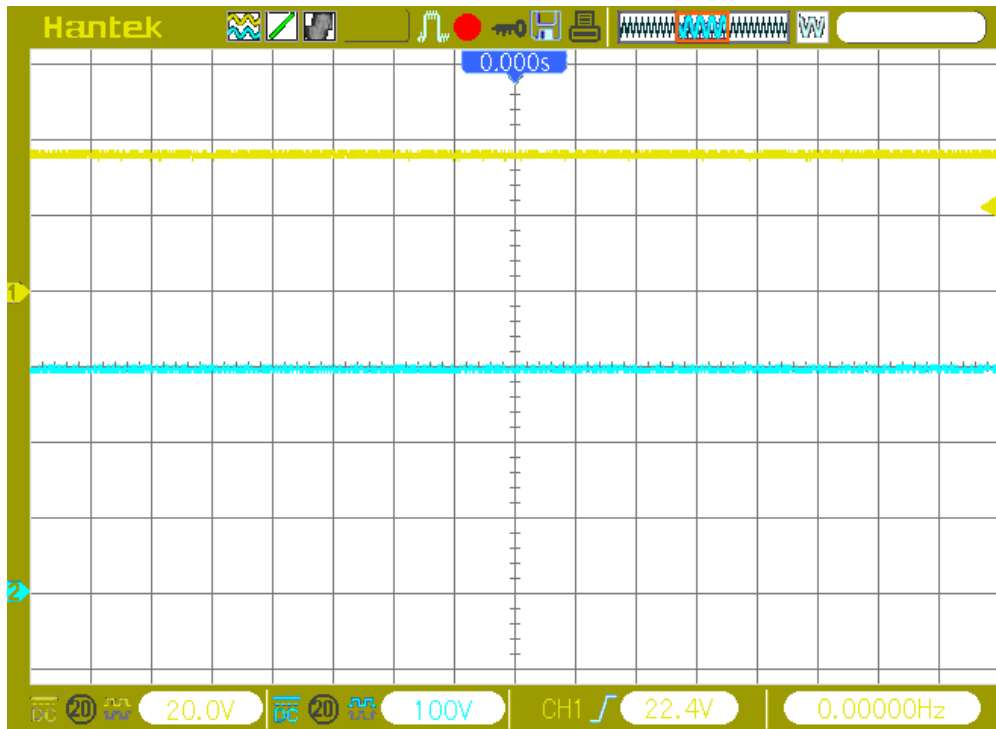


Hình 5.13 Sơ đồ PCB bố trí linh kiện trên mạch

Với hạn chế về mặt dụng cụ đo và nguồn cấp, nhưng vẫn cho ra được những dạng sóng cần thiết để đánh giá.

Dạng sóng điện áp đầu ra tương đối phẳng đo được tại Hình 5.14, đạt mức 400V với đầu vào là 36V, tuy nhiên độ rộng xung cần thiết đạt ở mức 67%. Sau khi thử nghiệm và kiểm tra, sự sai lệch này ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố thông số của mạch như:

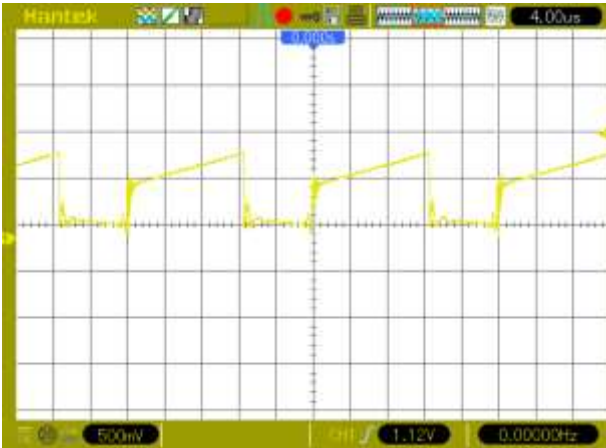
- Tỉ số vòng dây có sai lệch, độ hở của lõi Ferit ảnh hưởng đến thông số  $L_k$  của Coupled – Inductor.
- Các linh kiện như tụ điện, MOSFET và DIODE chưa đạt chuẩn.
- Từ trường của Coupled – Inductor ảnh hưởng đến các Line vẽ PCB.



Hình 5.14 Dạng sóng thực nghiệm điện áp vào ra

(1) Điện áp đầu vào  $V_{in}$ ; (2) Điện áp đầu ra  $V_o$

Trên thiết bị thực chỉ đo được dòng rò qua cuộn cảm ghép, dòng điện đầu vào sẽ gần giống với dòng điện qua cuộn cảm ghép và tương đối khớp so với mô phỏng. Đồ thị dạng sóng dòng điện đầu vào và dòng điện rò qua cuộn cảm ghép được thể hiện lần lượt tại Hình 5.15 và Hình 5.16.

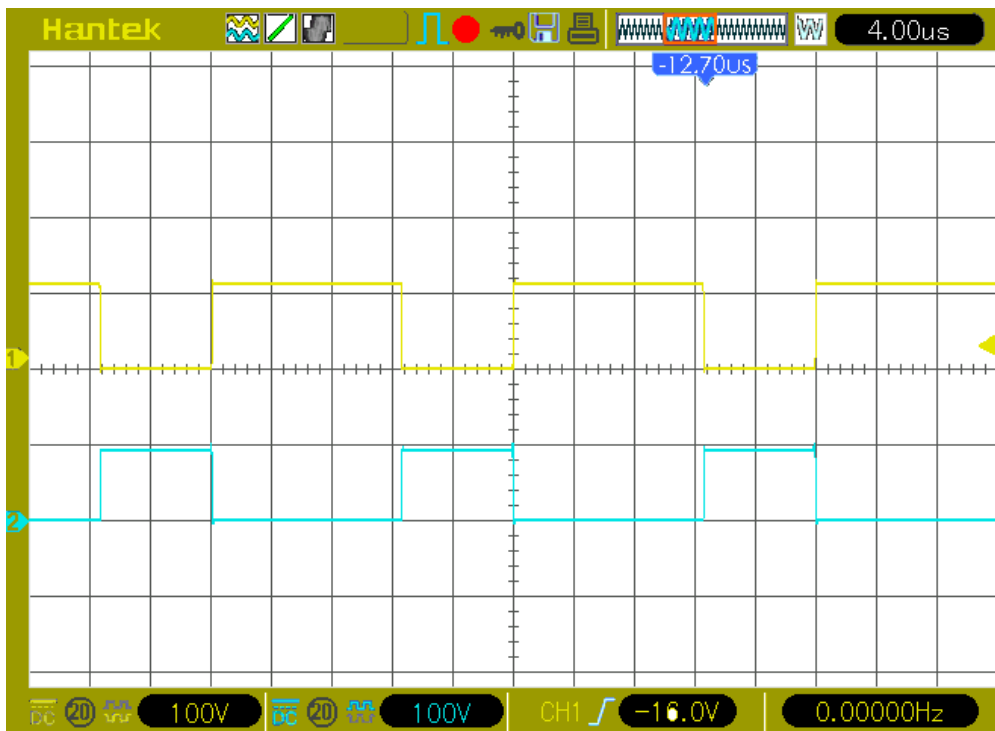


Hình 5.15 Dạng sóng thực nghiệm dòng điện đầu vào  $I_{in}$



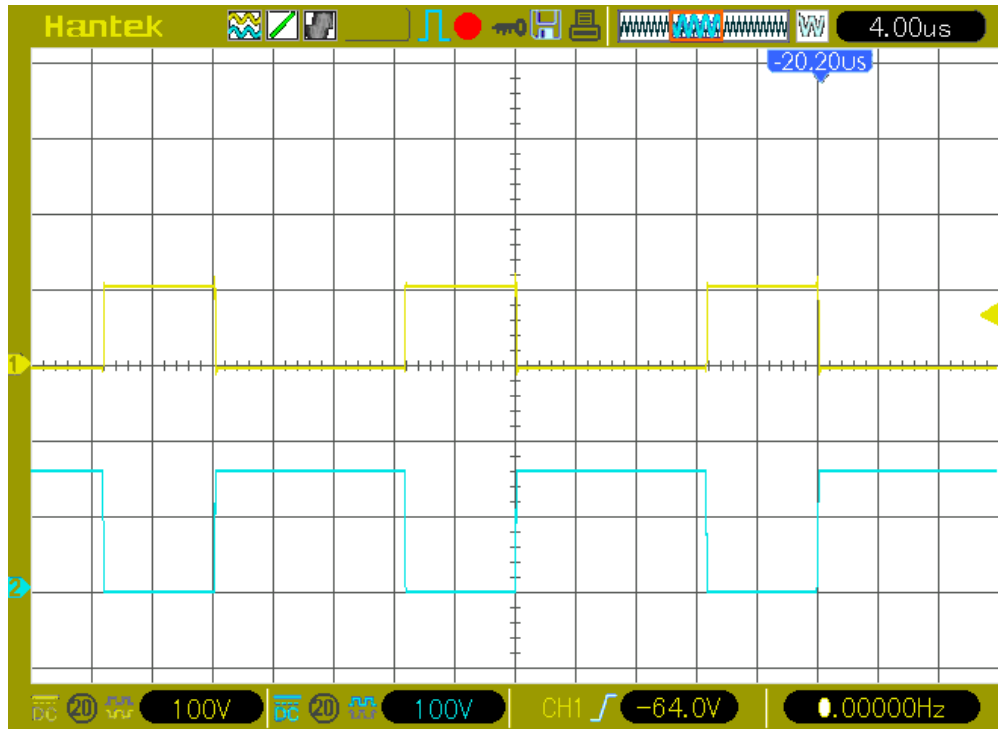
Hình 5.16 Dạng sóng thực nghiệm dòng điện rò qua cuộn  $I_{Lk}$

Hình 5.17 và Hình 5.18 biểu thị điện áp đặt lên các DIODE. Qua đó cho thấy được chu trình hoạt động của chúng, điều này khớp với mô phỏng và lý thuyết.



Hình 5.17 Dạng sóng thực nghiệm điện áp đặt trên Diode 1 và 2

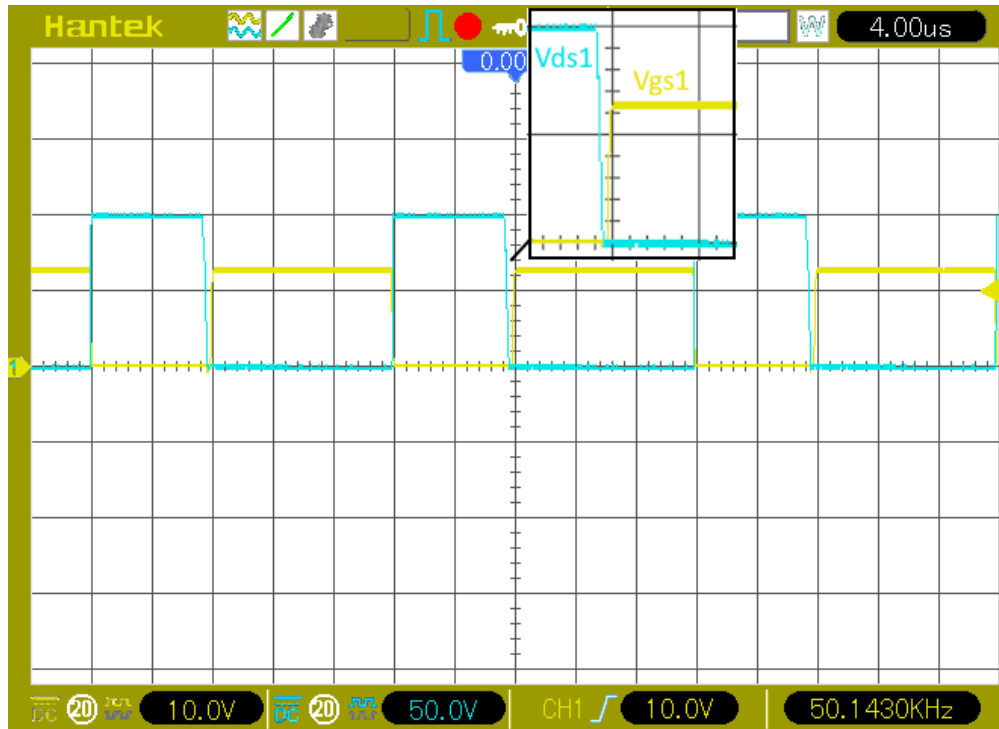
(1) Điện áp đặt trên Diode 1  $V_{D_1}$ ; (2) Điện áp đặt trên Diode 2  $V_{D_2}$



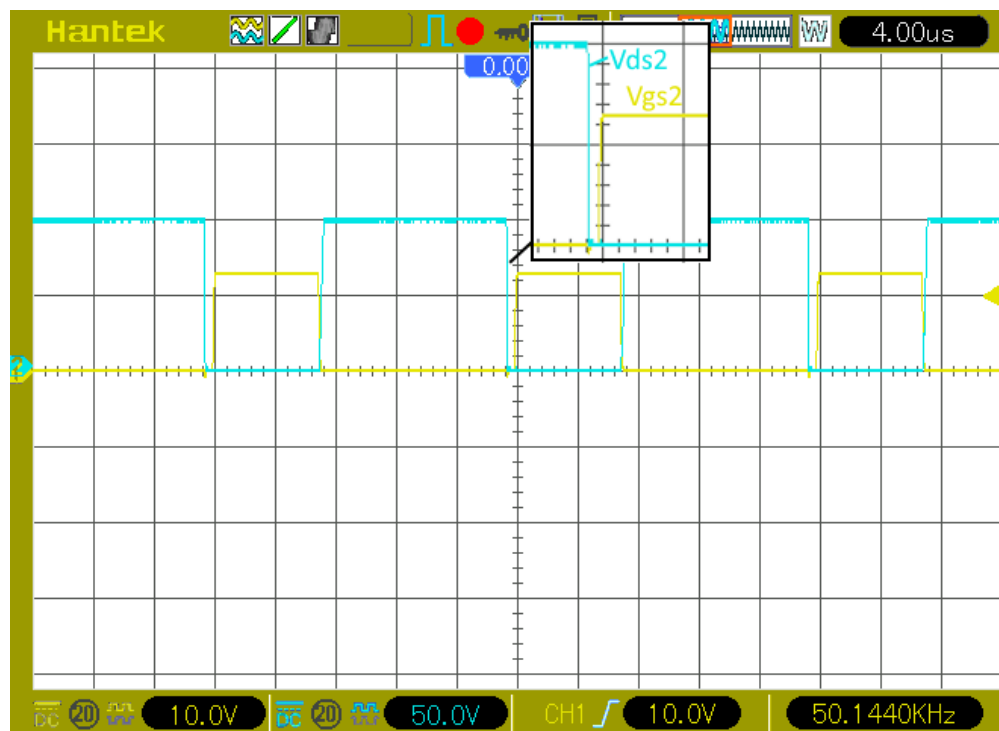
Hình 5.18 Dạng sóng thực nghiệm điện áp đặt trên Diode 2 và 3

(1) Điện áp đặt trên Diode 2  $V_{D_2}$ ; (2) Điện áp đặt trên Diode 3  $V_{D_3}$

Khả năng Zero Voltage Switching của mạch cứng được thể hiện rõ trong Hình 5.19 và Hình 5.20. Điều này góp phần nâng cao hiệu suất của mạch, chứng minh tính khả quan của mạch được thiết kế nhằm phục vụ cho các ứng dụng về năng lượng tái tạo.



Hình 5.19 Dạng sóng thực nghiệm trên MOSFET 1 ở trạng thái Zero Voltage Switching



Hình 5.20 Dạng sóng thực nghiệm trên MOSFET 2 ở trạng thái Zero Voltage Switching

### 5.3 So sánh với các bộ chuyển đổi khác

Bộ chuyển đổi DC – DC nâng áp đề xuất với kỹ thuật chuyển mạch mềm được thiết kế nhằm đạt độ lợi điện áp cao, hiệu suất tối ưu và giảm ứng suất trên linh kiện. So sánh với các bộ chuyển đổi đã được nghiên cứu trong các tài liệu [24]–[29], thiết kế đề

xuất thể hiện nhiều ưu điểm về số lượng linh kiện, hệ số khuếch điện áp và điện áp ngược đặt lên MOSFET, như được trình bày trong Bảng 5.3.

Bảng 5.3 So sánh bộ chuyển đổi được đề xuất với một số bộ chuyển đổi khác

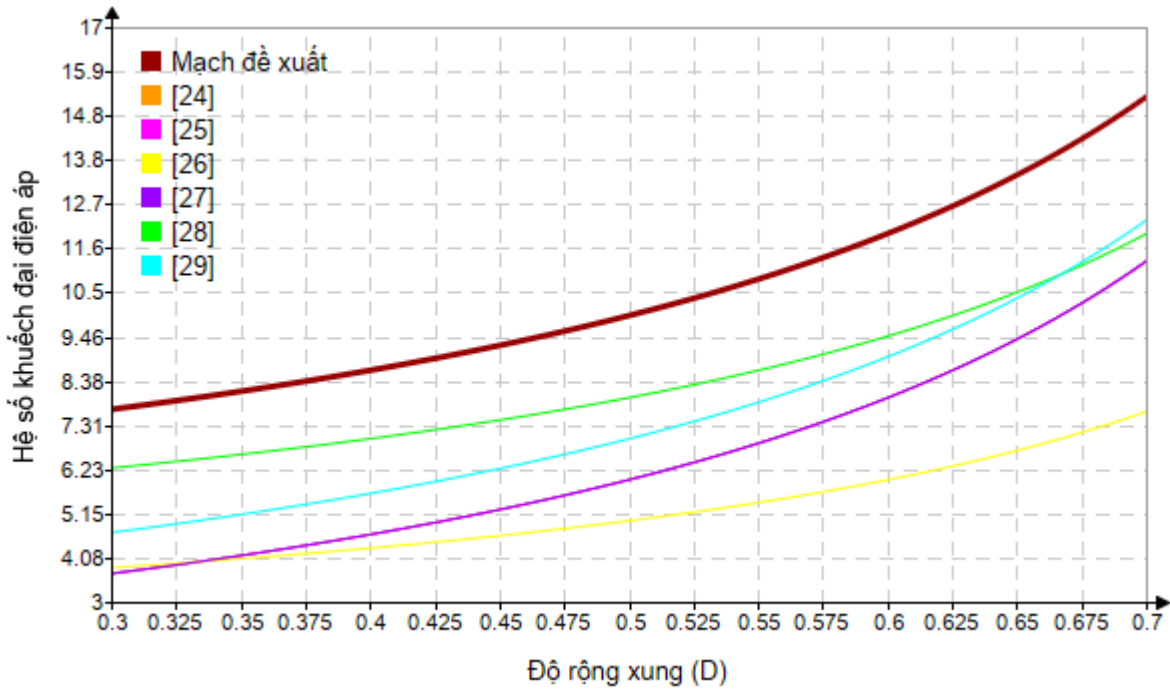
| Bài báo<br>tham khảo    | Số lượng thiết bị |   |   |      | Hệ số<br>khuếch đại    | Điện áp ngược đặt lên<br>MOSFET |
|-------------------------|-------------------|---|---|------|------------------------|---------------------------------|
|                         | S                 | D | C | I/CI |                        |                                 |
| [24]                    | 2                 | 3 | 5 | 1/1  | $\frac{n(1+D)}{1-D}$   | $\frac{V_o}{n(1+D)}$            |
| [25]                    | 2                 | 8 | 5 | 0/1  | $\frac{2+Dn}{1-D}$     | $\frac{V_o}{2+Dn}$              |
| [26]                    | 2                 | 5 | 4 | 3/0  | $\frac{3-D}{1-D}$      | $\frac{V_o}{3-D}$               |
| [27]                    | 2                 | 8 | 5 | 2/1  | $\frac{2+nD}{1-D}$     | $\frac{V_o}{2+nD}$              |
| [28]                    | 2                 | 3 | 4 | 0/1  | $\frac{1+n(2-D)}{1-D}$ | $\frac{V_o}{1+n(2-D)}$          |
| [29]                    | 4                 | 2 | 4 | 0/1  | $\frac{1+n+D}{1-D}$    | $\frac{V_o}{1+n+D}$             |
| <b>Mạch đề<br/>xuất</b> | 2                 | 3 | 4 | 0/1  | $\frac{2+n(2-D)}{1-D}$ | $\frac{V_o}{2+n(2-D)}$          |

Số lượng thiết bị chỉ 2 công tắc, 3 điốt, 4 tụ điện và 1 cuộn cảm ghép, thiết kế giảm 50% số MOSFET so với [29] và 20% – 30% số tụ điện so với [24], [25] và [27], giúp giảm chi phí, kích thước mạch và đơn giản hóa mạch điều khiển.

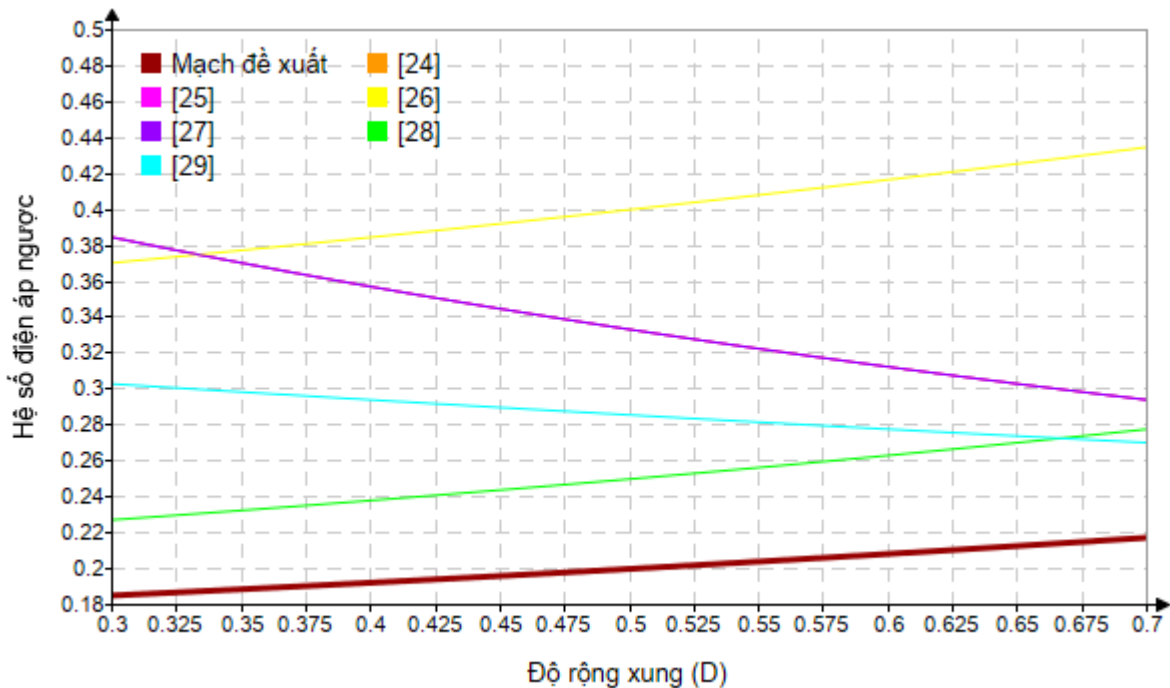
Hệ số khuếch đại cao và ổn định trong dải rộng của  $n$  từ 1 đến 3 và với độ rộng xung  $D$  từ 30% đến 70%, vượt trội hơn so với [24] – [29] được thể hiện cụ thể trong biểu đồ Hình 5.21.

Điện áp ngược đặt lên MOSFET thấp hơn hoặc tương đương so với các bộ chuyển đổi khác, thể hiện trong biểu đồ Hình 5.22. Giúp làm giảm áp lực trên MOSFET, tăng tuổi thọ linh kiện và cải thiện hiệu suất, đặc biệt trong các ứng dụng công suất cao như năng lượng tái tạo.

Kỹ thuật chuyển mạch mềm giúp giảm tổn thất chuyển mạch, kết hợp với số lượng thiết bị tối thiểu, nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống.



Hình 5.21 Đồ thị khảo sát và so sánh hệ số khuếch đại điện áp



Hình 5.22 Hệ số điện áp ngược đặt lên MOSFET

So với các bộ chuyển đổi trong [24] – [29], thiết kế đề xuất đạt được sự cân bằng tối ưu giữa độ lợi điện áp, ứng suất trên công tắc và số lượng linh kiện. Điều này không chỉ mang lại lợi ích về mặt kinh tế mà còn đảm bảo hiệu suất cao và độ tin cậy trong các ứng dụng yêu cầu điện áp đầu ra lớn, như hệ thống năng lượng tái tạo. Các đặc tính này

sẽ được đánh giá chi tiết hơn thông qua mô phỏng và thực nghiệm trong các giai đoạn tiếp theo của nghiên cứu.

## CHƯƠNG 6. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

### 6.1 Kết luận

Đồ án “Bộ chuyển đổi DC–DC chuyển mạch mềm” đã thành công trong việc thiết kế, phân tích, mô phỏng và thực nghiệm một bộ chuyển đổi DC–DC nâng áp tích hợp kỹ thuật chuyển mạch mềm (ZVS). Cấu trúc đề xuất, kết hợp cuộn cảm ghép, mạch kẹp điện áp, và cell nhân áp, đạt được các kết quả chính như sau:

- Hiệu suất cao: Mô phỏng trên SIMetrix/SIMPLIS cho thấy hiệu suất đạt 99% tại công suất định mức 300W, nhờ giảm thiểu tổn hao chuyển mạch và tổn hao trên diode. Kết quả thực nghiệm xác nhận hiệu suất cao, dù có sai lệch nhỏ do linh kiện không lý tưởng.
- Hệ số khuếch đại vượt trội: Bộ chuyển đổi đạt điện áp đầu ra 400V từ nguồn đầu vào 36V, với hệ số khuếch đại phụ thuộc vào độ rộng xung (D) và tỷ số vòng dây (n), vượt trội so với các cấu trúc Boost truyền thống.
- Chuyển mạch mềm ZVS: Cả hai MOSFET đạt trạng thái ZVS, giảm tổn hao chuyển mạch, nhiễu điện từ (EMI), và ứng suất nhiệt, từ đó tăng tuổi thọ linh kiện.
- Tối ưu hóa linh kiện: Cấu trúc sử dụng 2 MOSFET, 3 DIODE, 4 tụ điện, và 1 cuộn cảm ghép, giảm 20% – 50% số linh kiện so với các thiết kế tương tự trong [24] – [29], giúp giảm chi phí và độ phức tạp.
- Ứng dụng thực tiễn: Với công suất 300 W và dải điện áp phù hợp (36 V vào, 400 V ra), bộ chuyển đổi đáp ứng nhu cầu trong năng lượng tái tạo, ô tô điện, và thiết bị y tế.

### 6.2 Đóng góp của đồ án

Đồ án đã mang lại các đóng góp sau:

- Đề xuất cấu trúc bộ chuyển đổi DC–DC mới, tích hợp cuộn cảm ghép và kỹ thuật ZVS, tối ưu hóa hiệu suất và số lượng linh kiện.
- Phân tích chi tiết nguyên lý hoạt động, các nhịp chuyển mạch, và điều kiện ZVS, cung cấp cơ sở lý thuyết cho thiết kế các bộ chuyển đổi tương tự.
- Xây dựng mô hình mô phỏng trên SIMetrix/SIMPLIS, xác nhận hiệu suất 99% và dạng sóng phù hợp với lý thuyết.

- Chế tạo mẫu thử nghiệm, cung cấp dữ liệu thực nghiệm về điện áp, dòng điện, và trạng thái ZVS, khẳng định tính khả thi của thiết kế.
- So sánh với các cấu trúc trong [24] – [29], chứng minh ưu điểm về hệ số khuếch đại, ứng suất linh kiện, và số lượng linh kiện, góp phần vào lĩnh vực điện tử công suất.

### 6.3 Định hướng nghiên cứu tiếp theo

Để nâng cao hiệu quả và mở rộng ứng dụng của bộ chuyển đổi, các hướng nghiên cứu sau được đề xuất:

- Linh kiện bán dẫn tiên tiến: Ứng dụng MOSFET SiC hoặc GaN để giảm tổn hao dẫn, tăng tần số chuyển mạch ( $> 200kHz$ ), và cải thiện khả năng chịu nhiệt.
- Điều khiển thông minh: Phát triển thuật toán điều khiển thích nghi hoặc dựa trên máy học để tối ưu ZVS trong thời gian thực, sử dụng DSP/FPGA để tăng độ chính xác và tốc độ đáp ứng.
- Cấu trúc hybrid và năng lượng tái tạo: Nghiên cứu các cấu trúc đa cấp (Boost, SEPIC, LLC) tích hợp MPPT để tối ưu hóa hiệu suất cho nguồn năng lượng tái tạo.
- Tích hợp cao: Thiết kế System-on-Chip (SoC) hoặc System-in-Package (SiP) với mạch điều khiển và cảm biến tích hợp, ứng dụng công nghệ đóng gói 3D để giảm kích thước.
- Bảo vệ và chẩn đoán: Tích hợp chức năng bảo vệ quá áp, quá dòng, và chẩn đoán lỗi dựa trên phân tích dạng sóng, nâng cao độ tin cậy.
- Quản lý nhiệt: Sử dụng vật liệu tản nhiệt tiên tiến (graphene, micro-channel) để giảm kích thước hệ thống tản nhiệt và tăng độ bền.
- Tiêu chuẩn hóa: Đánh giá theo chuẩn quốc tế (IEC, MIL – STD) về EMI/EMC và an toàn điện, phát triển quy trình kiểm thử tự động và mô hình hóa digital twin để tối ưu hóa sản xuất.

Các định hướng này sẽ giúp khắc phục hạn chế hiện tại, nâng cao hiệu suất, và mở rộng ứng dụng của bộ chuyển đổi trong các hệ thống năng lượng bền vững, viễn thông, và giao thông xanh.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Carrasco, J. M., et al. “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, Aug. 2006, pp. 1002–1016.
- [2] Blaabjerg, F., et al. “Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, Oct. 2006, pp. 1398–1409.
- [3] Liserre, M., et al. “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, Jan. 2013, pp. 3–15.
- [4] Hatziargyriou, N., et al. “Microgrids: Architectures and Control.” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, Mar. 2013, pp. 144–152.
- [5] Li, X., et al. “Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, Apr. 2013, pp. 464–473.
- [6] Foley, R. A. M., et al. “Current Methods and Advances in Forecasting of Wind Power Generation.” *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, Jan. 2012, pp. 1–8.
- [7] Ibrahim, H., et al. “Energy Storage Systems—Characteristics and Comparisons.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, Jun. 2008, pp. 1221–1250.
- [8] Dunn, B., et al. “Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices.” *Science*, vol. 334, no. 6058, Nov. 2011, pp. 928–935.
- [9] Pepermans, G., et al. “Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues.” *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, Apr. 2005, pp. 787–798.
- [10] Lasseter, R. H. “Microgrids and Distributed Generation.” *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 9, Sep. 2002, pp. 39–41.

- [11] Erickson, R. W., and D. Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics*. Springer, 2001.
- [12] Rashid, M. H. *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*. 4th ed., Pearson, 2017.
- [13] Hart, D. W. *Power Electronics*. McGraw-Hill, 2010.
- [14] Mohan, N., T. M. Undeland, and W. P. Robbins. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3rd ed., Wiley, 2003.
- [15] Mak, O. C., and A. Ioinovici. “Switched-Capacitor Inverter with High Power Density and Enhanced Regulation Capability.” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 45, no. 6, Jun. 1998, pp. 656–667.
- [16] Luo, F. L., and H. Ye. “Positive Output Super-Lift Converters.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, Mar. 2004, pp. 415–426.
- [17] Wai, R. J., and R. Y. Duan. “High Step-Up Converter with Coupled-Inductor.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 4, Aug. 2005, pp. 1128–1140.
- [18] Li, W., Zhao, Y., and Han, X. “Performance Comparison between Tapped-Inductor Buck Converter and Ultrahigh Step-Down Converter.” *International Journal of Electronics Letters*, vol. 5, no. 4, 2017, pp. 475–490.
- [19] Zhao, Q., and F. C. Lee. “High-Efficiency, High Step-Up DC–DC Converters.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, Jan. 2003, pp. 65–73, doi: 10.1109/TPEL.2002.807188.
- [20] Li, W., and X. He. “Review of Non-Isolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, Apr. 2011, pp. 1239–1250, doi: 10.1109/TIE.2010.2049715.
- [21] Tseng, K.-C., and T.-J. Liang. “Novel High-Efficiency Step-Up Converter with Coupled-Inductor.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, Jan. 2012, pp. 168–177, doi: 10.1109/TPEL.2011.2158232.

- [22] Wu, T.-F., et al. “Boost Converter with Coupled Inductors and Buck-Boost Type of Active Clamp.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, Jan. 2008, pp. 154–162, doi: 10.1109/TIE.2007.896476.
- [23] Deng, Y., Zhao, R., and W. Li. “A High-Efficiency ZVS PWM Boost Converter for Renewable Energy Applications.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, Sep. 2015, pp. 4879–4890, doi: 10.1109/TPEL.2014.2369812.
- [24] Zaoukousis, K., and E. C. Tatakis. “Isolated ZVS- DC–DC High Step-Up Converter with Low-Ripple Input Current.” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 2, no. 4, Oct. 2021, pp. 464–480, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3063913.
- [25] M. B. Meier, S. A. da Silva, A. A. Badin, E. F. R. Romaneli, and R. Gules, "Soft-switching high static gain DC–DC converter without auxiliary switches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2335–2345, Mar. 2018.
- [26] He, L., and Z. Zheng. “High Step-Up DC–DC Converter with Switched-Capacitor and Its Zero-Voltage Switching Realization.” *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 5, Feb. 2017, pp. 630–636, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0389.
- [27] M. B. Meier, S. Avelino da Silva, A. A. Badin, E. F. R. Romaneli and R. Gules, "Soft-Switching High Static Gain DC–DC Converter Without Auxiliary Switches," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 3, pp. 2335- 2345, March 2018.
- [28] He, L., Z. Zheng, and D. Guo. “High Step-Up DC–DC Converter with Active Soft-Switching and Voltage-Clamping for Renewable Energy Systems.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 11, Nov. 2018, pp. 9496–9505.
- [29] Y. Tang, H. Tong, R. Afzal, and Y. Guo, "High step-up ZVT converter based on active switched coupled inductors," *IEEE Access*, early access, Nov. 27, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041004.