

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 HÓA

ĐỀ TÀI:
NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI
DC-DC SỬ DỤNG CUỘN CẢM GHÉP 3 CUỘN
DÂY

Người hướng dẫn: TS. TRẦN THÁI ANH ÂU

Sinh viên thực hiện: NGUYỄN VÕ NHẬT QUÂN

MSSV: 105200508 – LỚP: 20TDHCLC4

Đà Nẵng, 6/2025

TÓM TẮT

Tên đề tài: NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC SỬ DỤNG CUỘN CẢM GHEP 3 CUỘN DÂY.

Sinh viên thực hiện: Nguyễn Võ Nhật Quân

Số thẻ SV: 105200508 Lớp: 20TDHCLC4

Đồ án “Bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép 3 cuộn dây” được thực hiện nhằm nghiên cứu và thiết kế một cấu trúc mạch tăng áp hiệu suất cao, phù hợp với các ứng dụng trong lĩnh vực điện tử công suất và năng lượng tái tạo. Mạch đề xuất sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây kết hợp với hai khóa MOSFET, các diode và tụ điện, cho phép tăng điện áp đầu ra vượt trội mà không cần chu kỳ nhiệm vụ cao. Đồng thời, cấu trúc mạch được thiết kế để đạt điều kiện chuyển mạch mềm (Zero Voltage Switching), giúp giảm tổn thất năng lượng và nâng cao hiệu suất hoạt động. Báo cáo trình bày quá trình phân tích nguyên lý hoạt động của mạch, tính toán thông số linh kiện và mô phỏng hoạt động trên phần mềm Simetrix/SimPLIS. Kết quả mô phỏng cho thấy mạch hoạt động ổn định, điện áp đầu ra cao, độ gọn nhỏ và hiệu suất chuyển đổi dao động từ 91% đến 96%. Đồ án chứng minh tính khả thi của cấu trúc đề xuất và đặt nền tảng cho các nghiên cứu triển khai phần cứng và tích hợp ứng dụng trong các hệ thống thực tế như nguồn năng lượng mặt trời, bộ sạc và nguồn điện công nghiệp.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ tên sinh viên: Nguyễn Võ Nhật Quân

Số thẻ sinh viên: 105200508

Lớp: 20TDHCLC4 Khoa: Điện

Ngành: Kỹ thuật Điều khiển & Tự động hóa

*1. Tên đề tài đồ án:***NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC SỬ DỤNG CUỘN CẢM GHEP 3 CUỘN DÂY.***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 các sản phẩm thuyết minh và tính toán:*

- Trình bày nguyên lý hoạt động chi tiết của bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, phân tích từng chế độ làm việc theo chu kỳ.
- Thiết kế, tính toán thông số các linh kiện chính như cuộn cảm (L_1, L_m, L_k), tụ điện ($C_1, C_2, C_3, C_{o1}, C_{o2}$), và MOSFET công suất.
- Tính toán dòng điện, điện áp cực đại trên các linh kiện, lựa chọn thông số phù hợp theo yêu cầu tải.
- Phân tích kỹ thuật điều khiển PWM đối pha, điều kiện đạt chuyển mạch mềm (ZVS).
- So sánh định lượng với các cấu trúc chuyển đổi DC-DC tương tự như Boost, Flyback về hiệu suất, dạng sóng và mức độ phức tạp điều khiển.

5. Các bản vẽ, đồ thị:

- Sơ đồ nguyên lý bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây.
- Đường đi dòng điện trong từng chế độ hoạt động (Mode 1 đến Mode 7).
- Lưu đồ thuật toán điều khiển PID điều chỉnh chu kỳ nhiệm vụ theo điện áp đầu ra.
- Đồ thị mô phỏng điện áp đầu ra, dòng cuộn cảm, dạng sóng xung PWM và hiệu suất theo tải (từ phần mềm PSIM hoặc tương đương).
- Bảng so sánh định lượng giữa mạch đề xuất và các cấu trúc chuyển đổi khác.

6. Họ tên người hướng dẫn: TS. Trần Thái Anh Âu*7. Ngày giao nhiệm vụ đồ án:* 03 / 03 /2025*8. Ngày hoàn thành đồ án:* 02 / 06 /2025

Đà Nẵng, ngày 17 tháng 06 năm 2025

Trưởng Bộ môn Tự động hóa**Người hướng dẫn**

TS. Giáp Quang Huy

PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

Họ tên sinh viên: Nguyễn Võ Nhật Quân

Số thẻ SV: 105200508

Tên đề tài ĐATN: NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC SỬ DỤNG CUỘN CẢM GHEP 3 CUỘN DÂY.

Họ tên người HD: Trần Thái Anh Âu

Đơn vị: Khoa Điện

Tuần	Ngày	Khối lượng		GVHD ký tên
		đã thực hiện (%)	tiếp tục thực hiện (%)	
1	4/3	5%	10%	
2	12/3	10%	15%	
3	19/3	15%	20%	
4	24/3	Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng hoàn thành __30__ % : Được tiếp tục làm ĐATN ☐ Không tiếp tục thực hiện ĐATN ☐		
5	31/3	35%	45%	
6	7/4	45%	55%	
7	14/4	55%	60%	
8	21/4	Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng hoàn thành __65__ % : Được tiếp tục làm ĐATN ☐ Không tiếp tục thực hiện ĐATN ☐		
9	28/4	70%	75%	

10	5/5	75%	85%	
11	12/5	85%	90%	
12	19/5	Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng hoàn thành __95__ % : Được tiếp tục làm ĐATN ☐ Không tiếp tục thực hiện ĐATN ☐		
13	26/5	90%	95%	
14	2/6	100%	100%	

LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN

Bộ chuyển đổi DC-DC là một thành phần quan trọng trong các hệ thống điện tử công suất hiện đại, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu tăng áp như nguồn năng lượng tái tạo, bộ sạc, xe điện hoặc các thiết bị lưu trữ năng lượng. Trong bối cảnh ngày càng đòi hỏi hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn và độ tin cậy lớn, các cấu trúc bộ chuyển đổi truyền thống dần bộc lộ nhiều hạn chế. Từ đó, các nghiên cứu ứng dụng cuộn cảm ghép và kỹ thuật chuyển mạch mềm trở thành một hướng phát triển đầy tiềm năng trong thiết kế bộ nguồn công suất.

Với định hướng tiếp cận một giải pháp chuyển đổi năng lượng hiệu quả hơn, em đã lựa chọn thực hiện đề tài: “Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép 3 cuộn dây”. Đề tài tập trung vào việc xây dựng mô hình lý thuyết, phân tích nguyên lý hoạt động theo các chế độ chuyển mạch, tính toán thông số linh kiện và mô phỏng hoạt động của mạch bằng phần mềm Simetrix/SimPLIS. Qua đó, đề tài đánh giá khả năng tăng áp, hiệu suất chuyển đổi và độ ổn định của mạch trong các điều kiện hoạt động giả lập.

Trong quá trình thực hiện, em đã nhận được sự hướng dẫn tận tình và sâu sát từ Thầy Trần Thái Anh Âu, người đã hỗ trợ em xây dựng nền tảng lý thuyết, định hướng rõ ràng các nội dung trọng tâm của đề tài, đồng thời góp ý chi tiết trong từng giai đoạn phân tích và trình bày kết quả.

Bên cạnh đó, em xin gửi lời cảm ơn đến quý thầy cô khoa Điện – Điện tử đã tận tâm giảng dạy và cung cấp cho em nền tảng kiến thức vững chắc trong suốt thời gian học tập. Đồng thời, em cảm ơn gia đình và bạn bè đã luôn ủng hộ, động viên và tạo điều kiện thuận lợi để em tập trung hoàn thành tốt nhiệm vụ.

Dù đã cố gắng nỗ lực trong quá trình thực hiện, đồ án chắc chắn vẫn còn tồn tại những thiếu sót nhất định do hạn chế về thời gian và kinh nghiệm thực tiễn. Em rất mong nhận được những ý kiến đóng góp quý báu từ quý thầy cô để hoàn thiện hơn trong các nghiên cứu và công việc sau này.

Trân trọng

Nguyễn Võ Nhật Quân

17/6/2025

LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Tôi xin cam đoan rằng toàn bộ nội dung trong báo cáo đồ án tốt nghiệp với đề tài: **“Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép 3 cuộn dây”** là kết quả làm việc nghiêm túc của cá nhân tôi dưới sự hướng dẫn của **Thầy Trần Thái Anh Âu**.

Các số liệu, kết quả, bản vẽ và nội dung trình bày trong đồ án được thực hiện trung thực, không sao chép hoặc sử dụng trái phép từ bất kỳ nguồn nào mà không trích dẫn rõ ràng. Những tài liệu tham khảo đã sử dụng trong quá trình thực hiện được liệt kê đầy đủ trong phần Tài liệu tham khảo.

Tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm về tính trung thực và nội dung của đồ án này trước Hội đồng chấm đồ án và các quy định của nhà trường.

Sinh viên thực hiện

Nguyễn Võ Nhật Quân

MỤC LỤC:

TÓM TẮT	ii
NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	iii
PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	iv
LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN	vi
LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT	vii
MỤC LỤC:	xii
DANH SÁCH CÁC BẢNG, HÌNH VẼ	xv
Chương 1: MỞ ĐẦU	1
1.1. Lý do chọn đề tài.....	1
1.2. Mục tiêu của đề tài	1
1.3. Phạm vi và giới hạn đề tài.....	1
1.4. Phương pháp thực hiện	2
1.5. Cấu trúc báo cáo	2
Chương 2: TỔNG QUAN VỀ BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC TĂNG ÁP	3
2.1. Vai trò của bộ chuyển đổi DC-DC trong hệ thống điện hiện đại:.....	3
2.2. Các cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp cơ bản:	7
2.2.1. Bộ chuyển đổi Boost truyền thống	7
2.2.2. Bộ chuyển đổi Flyback và Forward.....	8
2.3. Kết luận chương 2.....	9
Chương 3: THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC SỬ DỤNG CUỘN CẢM GHÉP 3 CUỘN DÂY	11
3.1. Giới thiệu cấu trúc mạch đề xuất.....	11
3.2. Nguyên lý hoạt động:.....	11
3.3. Phân tích các chế độ hoạt động trong một chu kỳ.....	12
3.3.1. Giả định:	12

3.3.2. Các chế độ hoạt động:	12
3.4. Tính toán thông số mạch:	20
3.4.1. Tính toán hệ số khuếch đại điện áp:	20
3.4.2. Tính toán L_1 , L_m :	22
3.4.3. Tính toán các tụ:	23
3.5. Ưu điểm của cấu trúc mạch đề xuất	24
3.6. Kết luận chương 3.....	24
Chương 4: PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN VÀ ỔN ĐỊNH HỆ THỐNG.....	25
4.1. Tổng quan vai trò của hệ thống điều khiển trong bộ chuyển đổi DC-DC	25
4.2. Phương pháp điều khiển PWM.....	25
4.2.1. Lý thuyết về điều chế độ rộng xung (PWM) và các dạng sóng	25
4.2.2. Nguyên lý tạo PWM bằng phương pháp so sánh tín hiệu	26
4.2.3. Các dạng PWM phổ biến.....	26
4.2.4. Cấu trúc xung PWM đối pha	27
4.2.5. Phương pháp tạo PWM bằng vi điều khiển STM32	28
4.2.6. Ảnh hưởng của thông số PWM đến hoạt động mạch.....	31
4.2.7. Kết luận.....	31
4.3. Nguyên lý chuyển mạch mềm (Soft Switching)	31
4.3.1. Khái niệm chuyển mạch mềm	31
4.3.2. Lý thuyết chuyển mạch ZVS và ZCS.....	32
4.3.3. So sánh ZVS và ZCS	33
4.3.4. Ứng dụng chuyển mạch mềm trong mạch đề xuất	33
4.3.5. Ưu điểm khi áp dụng chuyển mạch mềm:.....	33
4.3.6. Hạn chế và lưu ý khi áp dụng chuyển mạch mềm.....	34
4.3.7. Kết luận.....	34
4.4. Tổng quan và so sánh các bộ chuyển đổi DC-DC liên quan.....	34
4.4.1. Bộ chuyển đổi Boost (nâng áp)	35
4.4.2. Bộ chuyển đổi Flyback	35
4.4.3. So sánh định lượng với mạch đề xuất	36

4.4.4. Kết luận.....	36
4.5. Kết luận chương 4.....	37
Chương 5: PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT	
.....	38
5.1. Mục đích mô phỏng	38
5.2. Giới thiệu về phần mềm mô phỏng Simetrix/SimPLIS:	38
5.3. Bảng lựa chọn thiết bị:	39
5.4. Mô phỏng và kết quả:.....	40
5.4.1. Sơ đồ mô phỏng hệ thống trên phần mềm Simetrix/SimPLIS:	40
5.4.2. Kết quả mô phỏng:	40
5.5. Nhận xét tổng quát	47
5.6. Kết luận chương 5.....	48
Chương 6: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	49
6.1. Kết luận tổng quan về đề tài và đánh giá kết quả	49
6.2. Hạn chế và giả định	49
6.3. Hướng phát triển của đề tài.....	50
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	51
PHỤ LỤC 1	54
PHỤ LỤC 2	55
PHỤ LỤC 3	57

DANH SÁCH CÁC BẢNG, HÌNH VẼ

Bảng 4.1: Ảnh hưởng của các thông số PWM đến hoạt động mạch.....	31
Bảng 4.2: So sánh hai phương pháp chuyển mạch mềm.....	33
Bảng 5.1. Bảng thông số đầu vào	39
Bảng 5.2. Bảng thông số thực nghiệm để tiến hành mô phỏng.....	40
Bảng 5.3: Bảng so sánh các chỉ số linh kiện và các chỉ số quan trọng của các mạch tăng áp.....	46
Hình 2.1. Hệ thống nghịch lưu nhỏ nối lưới một pha (Micro-inverter)	4
Hình 2.2. Mạch đèn chấn lưu cường độ cao (HID)	5
Hình 2.3. Hệ dẫn động của xe chạy bằng tế bào quang điện.....	6
Hình 2.4. Mạch nguồn không gián đoạn (UPS)	7
Hình 2.5. Mạch Boost thông dụng.....	8
Hình 2.6. Mạch khuếch hai tầng nối tiếp.....	8
Hình 2.7. Mạch Flyback	9
Hình 2.8. Mạch tăng áp cơ bản sử dụng cuộn cảm ghép.....	9
Hình 3.1: Biểu đồ dạng sóng của bộ chuyển đổi.....	12
Hình 3.2: Hình ảnh sơ đồ nguyên lý mạch tương đương của bộ chuyển đổi.....	13
Hình 3.3: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 1.	14
Hình 3.4: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 2.	15
Hình 3.5: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 3.	16
Hình 3.6: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 4.	17
Hình 3.7: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 5.	18
Hình 3.8: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 6.	19
Hình 3.9: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 7.	20
Hình 4.1: Phương pháp điều chế độ rộng xung.....	26

Hình 4.2: Sơ đồ trình xung PWM.....	27
Hình 4.3: Lưu đồ thuật toán điều khiển PWM cho bộ biến đổi DC-DC sử dụng STM32	30
Hình 5.1: Hình ảnh phần mềm Simetrix/SimPLIS.....	39
Hình 5.2: Hình ảnh mô phỏng sơ đồ nguyên lí của bộ chuyển đổi.	40
Hình 4.3: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng V_{gs1} , V_{ds1} , V_{gs2} , V_{ds2}	41
Hình 5.5: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{Lm} và i_{Lk}	42
Hình 5.6: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của V_{c01} , V_{c02}	43
Hình 5.7: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của V_{out}	44
Hình 5.8: Hình ảnh kết quả hiệu suất đạt được (đầy tải) của bộ chuyển đổi.	45
Hình 5.9: Hình ảnh kết quả hiệu suất đạt được (hiệu suất cao nhất) của bộ chuyển đổi.	45
Hình PL3.1: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{s1}	57
Hình PL3.2: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{s2}	57
Hình PL3.3: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{c2}	57

Chương 1: MỞ ĐẦU

1.1. Lý do chọn đề tài

Sự phát triển mạnh mẽ của các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời, năng lượng gió, và các hệ thống lưu trữ điện đã kéo theo nhu cầu sử dụng các bộ chuyển đổi điện năng hiệu suất cao, đặc biệt là các bộ chuyển đổi DC-DC. Trong các ứng dụng này, việc nâng điện áp từ nguồn đầu vào thấp lên mức điện áp cao để cấp cho tải hoặc hệ thống lưu trữ là yêu cầu phổ biến.

Các cấu trúc chuyển đổi DC-DC truyền thống như Boost, Flyback, hoặc các mạch liên tầng thường gặp giới hạn về hiệu suất và độ lợi điện áp. Để đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về hiệu quả năng lượng, kích thước gọn nhẹ và khả năng tăng áp lớn, việc ứng dụng cuộn cảm ghép nhiều cuộn dây đã trở thành một giải pháp tiềm năng.

Trong đó, cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây giúp tăng độ linh hoạt trong điều khiển, nâng cao hiệu suất chuyển đổi, đồng thời giảm thiểu tổn thất và kích thước linh kiện. Chính vì vậy, em chọn thực hiện đề tài: “Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép 3 cuộn dây” với mục tiêu nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng một giải pháp mạch chuyển đổi phù hợp với các yêu cầu thực tiễn trong ngành điện – điện tử.

1.2. Mục tiêu của đề tài

Mục tiêu của đề tài là nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng một bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, nhằm đạt được khả năng khuếch đại điện áp cao, hiệu suất chuyển đổi lớn và độ ổn định tốt trong quá trình hoạt động. Thông qua việc phân tích nguyên lý làm việc và chế độ hoạt động của mạch, đề tài hướng đến xây dựng một cấu trúc có thể thực hiện chuyển mạch mềm, giảm tổn thất năng lượng và ứng suất điện áp lên các linh kiện bán dẫn. Đồng thời, đề tài thực hiện các bước tính toán thông số thiết kế phù hợp, lựa chọn linh kiện tối ưu và tiến hành mô phỏng trên phần mềm chuyên dụng Simetrix/SimPLIS để kiểm tra hiệu quả hoạt động của mạch. Cuối cùng, thông qua việc đánh giá kết quả mô phỏng và so sánh với các cấu trúc mạch tăng áp truyền thống, đề tài nhằm khẳng định tính khả thi và ưu điểm nổi bật của giải pháp đề xuất, từ đó mở ra hướng ứng dụng thực tế trong các hệ thống điện năng lượng tái tạo và thiết bị điện tử công suất.

1.3. Phạm vi và giới hạn đề tài

Đề tài tập trung vào việc thiết kế lý thuyết, phân tích nguyên lý hoạt động và mô phỏng một bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây. Trong khuôn khổ của đồ án tốt nghiệp, quá trình thực hiện không bao gồm việc chế tạo phần cứng, tuy nhiên đề tài có tiềm năng mở rộng sang giai đoạn thực nghiệm trong tương lai để kiểm chứng kết quả mô phỏng. Các linh kiện trong mạch được giả định là lý tưởng nhằm đơn giản

hóa quá trình tính toán và mô phỏng, từ đó giúp tập trung vào việc phân tích nguyên lý hoạt động và hiệu suất chuyển đổi. Toàn bộ quá trình nghiên cứu và đánh giá được thực hiện dựa trên các nguồn tài liệu học thuật, các bài báo khoa học uy tín (đặc biệt là từ

IEEE), và sử dụng phần mềm Simetrix/SimPLIS làm công cụ chính cho việc mô phỏng mạch và phân tích kết quả.

1.4. Phương pháp thực hiện

Đề tài được thực hiện dựa trên quá trình nghiên cứu tổng quan các tài liệu chuyên ngành, giáo trình và các bài báo khoa học liên quan đến bộ chuyển đổi DC-DC và cuộn cảm ghép ba cuộn dây nhằm xây dựng nền tảng lý thuyết vững chắc. Trên cơ sở đó, sơ đồ nguyên lý của mạch được thiết kế với cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, đồng thời tiến hành phân tích chi tiết các chế độ hoạt động trong một chu kỳ chuyển mạch. Các thông số quan trọng như hệ số khuếch đại điện áp, dòng điện qua các linh kiện, và điện áp đặt trên các khóa chuyển mạch được tính toán để đảm bảo mạch hoạt động ổn định và hiệu quả. Sau khi hoàn tất thiết kế, mạch được mô phỏng bằng phần mềm chuyên dụng Simetrix/SimPLIS nhằm kiểm chứng đặc điểm hoạt động và hiệu suất chuyển đổi. Cuối cùng, kết quả mô phỏng được phân tích để đánh giá hiệu suất tổng thể, độ gọn điện áp đầu ra, cũng như khả năng đáp ứng các yêu cầu ứng dụng thực tế của bộ chuyển đổi.

1.5. Cấu trúc báo cáo

Nội dung của báo cáo được chia thành 6 chương như sau:

- **Chương 1 – Mở đầu:** Trình bày lý do chọn đề tài, mục tiêu, phạm vi thực hiện, phương pháp nghiên cứu và cấu trúc tổng thể của báo cáo.
- **Chương 2 – Tổng quan về bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp:** Giới thiệu vai trò của bộ chuyển đổi DC-DC trong các hệ thống điện hiện đại, phân tích các cấu trúc tăng áp truyền thống, nêu rõ các hạn chế kỹ thuật và động lực nghiên cứu cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây.
- **Chương 3 – Thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép 3 cuộn dây:** Trình bày chi tiết cấu trúc mạch đề xuất, nguyên lý hoạt động, phân tích các chế độ chuyển mạch trong một chu kỳ, tính toán thông số thiết kế và đánh giá ưu điểm của mạch.
- **Chương 4 – Phương pháp điều khiển và ổn định hệ thống:** Trình bày nguyên lý điều chế PWM đối pha có thời gian chết, đảm bảo tránh trùng dẫn. Giới thiệu phương pháp điều khiển PID để ổn định điện áp đầu ra theo tải thay đổi.
- **Chương 5 – Phân tích kết quả mô phỏng và đánh giá hiệu suất:** Thực hiện mô phỏng mạch bằng phần mềm Simetrix/SimPLIS, quan sát các dạng sóng đặc trưng, phân tích hiệu suất chuyển đổi và so sánh với các cấu trúc mạch khác.
- **Chương 6 – Kết luận và hướng phát triển:** Tổng kết nội dung nghiên cứu, đánh giá kết quả đạt được, chỉ ra các hạn chế còn tồn tại và đề xuất hướng phát triển trong tương lai.

Chương 2: TỔNG QUAN VỀ BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC TĂNG ÁP

2.1. Vai trò của bộ chuyển đổi DC-DC trong hệ thống điện hiện đại:

Trong những năm gần đây, vấn đề biến đổi khí hậu và ô nhiễm môi trường do khí thải từ nhiên liệu hóa thạch đã thu hút sự quan tâm mạnh mẽ từ cộng đồng quốc tế. Trước thực trạng đó, năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời và năng lượng gió đang ngày càng khẳng định vai trò là giải pháp bền vững, an toàn và thân thiện với môi trường. Các hệ thống khai thác năng lượng tái tạo không những góp phần giảm phát thải khí CO₂ mà còn giúp phân tán nguồn cung điện năng, giảm áp lực lên lưới điện truyền thống.

Tuy nhiên, một đặc điểm nổi bật của các nguồn năng lượng tái tạo là đầu ra thường ở dạng điện một chiều (DC) và có giá trị điện áp thấp, dao động trong khoảng 10–50 VDC. Để điện năng này có thể sử dụng được cho các tải tiêu thụ công suất lớn hoặc hòa vào lưới điện thông qua bộ nghịch lưu AC, cần có một khâu trung gian có khả năng nâng điện áp DC lên mức cao hơn một cách hiệu quả, ổn định và đáp ứng nhanh với thay đổi công suất. Chính vì vậy, các bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp (step-up DC-DC converter) đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong cấu trúc của hệ thống điện sử dụng năng lượng tái tạo.

Bộ chuyển đổi DC-DC không chỉ đảm nhiệm chức năng biến đổi mức điện áp, mà còn đóng vai trò chủ chốt trong việc tối ưu hóa hiệu suất toàn hệ thống. Điển hình là trong các hệ thống có tích hợp thuật toán MPPT (Maximum Power Point Tracking), bộ chuyển đổi giúp điều chỉnh điểm làm việc của nguồn năng lượng (ví dụ tấm pin mặt trời) để thu được công suất đầu ra tối đa trong mọi điều kiện chiếu sáng. Nhờ đó, hiệu suất thu hồi năng lượng được cải thiện rõ rệt.

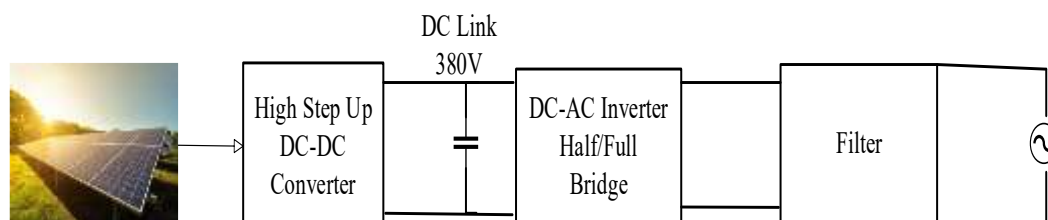
Hiện nay, các bộ chuyển đổi DC-DC đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Một số ví dụ tiêu biểu có thể kể đến như:

- Nguồn cung cấp cho đèn pha HID trong ô tô, yêu cầu điện áp cao và ổn định;
- Hệ thống tế bào nhiên liệu (fuel cell) trong các xe điện, nơi cần nâng điện áp đầu ra của fuel cell để phù hợp với tải;
- Bộ lưu điện UPS, nơi DC-DC converter đóng vai trò duy trì điện áp ổn định khi mất nguồn;
- Các mạch nghịch lưu một pha độc lập trong hệ thống điện mặt trời, trong đó mỗi tấm pin PV thường được tích hợp với một bộ DC-DC riêng để thực hiện điều khiển độc lập, nâng điện áp và phối hợp với bộ nghịch lưu tổng.

Trong các hệ thống như vậy, chức năng chính của bộ chuyển đổi DC-DC là nâng điện áp đầu vào thấp (10–50 VDC) lên mức điện áp cao hơn (khoảng 380–400 VDC). Đây

là mức điện áp phù hợp để cấp cho các bộ nghịch lưu chuyển đổi sang điện xoay chiều (AC), từ đó cung cấp điện cho tải hoặc hòa lưới.

Với yêu cầu ngày càng cao về hiệu suất, độ nhỏ gọn, và độ tin cậy, việc nghiên cứu và phát triển các cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC mới có khả năng tăng áp lớn, tổn hao thấp và điều khiển linh hoạt đang trở thành xu hướng tất yếu trong thiết kế hệ thống năng lượng hiện đại.



Hình 2.1. Hệ thống nghịch lưu nhỏ nối lưới một pha (Micro-inverter)

Ngoài các ứng dụng phổ biến trong hệ thống năng lượng tái tạo, bộ chuyển đổi DC-DC còn giữ vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực khác, đặc biệt là trong các mạch cung cấp năng lượng cho đèn chấn lưu cường độ cao (High-Intensity Discharge – HID). Đây là loại đèn được sử dụng rộng rãi trong chiếu sáng ô tô, chiếu sáng công nghiệp và các hệ thống cần hiệu suất phát quang cao.

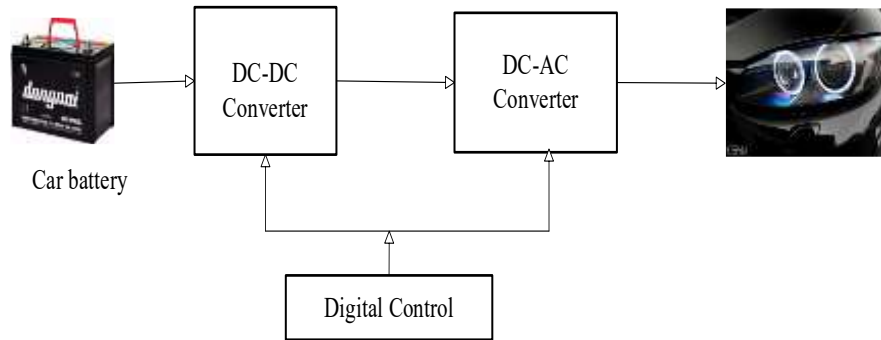
Trong các hệ thống như vậy, nguồn cấp điện ban đầu thường đến từ ắc quy 12VDC – mức điện áp thấp hơn rất nhiều so với điện áp yêu cầu để khởi động và duy trì hoạt động ổn định của bộ phát sáng HID. Đặc điểm của đèn HID là cần một xung điện áp rất cao trong giai đoạn đánh lửa ban đầu (có thể lên đến hàng trăm vôn), sau đó giảm xuống và duy trì ở mức điện áp thấp hơn nhưng vẫn ổn định để duy trì hồ quang điện bên trong ống đèn.

Để đáp ứng các yêu cầu điện áp biến thiên như vậy, một bộ chuyển đổi DC-DC được tích hợp nhằm thực hiện hai chức năng chính. Đầu tiên, trong giai đoạn khởi động, mạch DC-DC đảm nhiệm việc nâng điện áp từ 12VDC lên mức cao (khoảng 380–400VDC), tạo ra đủ năng lượng để kích thích hồ quang trong đèn HID. Tiếp theo, sau khi hồ quang đã được hình thành và duy trì, hệ thống sẽ tự động chuyển sang giai đoạn ổn định, trong đó điện áp được duy trì ở mức thấp hơn, thường trong khoảng 60–135VDC, để đảm bảo độ sáng ổn định và kéo dài tuổi thọ của đèn.

Việc thực hiện chuyển đổi điện áp theo hai mức – khởi động và ổn định – đòi hỏi bộ DC-DC phải có khả năng điều khiển linh hoạt, chuyển đổi nhanh giữa các chế độ, đồng thời vẫn duy trì được hiệu suất cao và hạn chế tổn thất năng lượng. Đây là một trong những lý do quan trọng khiến các cấu trúc bộ chuyển đổi có khả năng tăng áp lớn, điều khiển PWM chính xác và hiệu suất cao – như cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép nhiều cuộn dây – trở nên đặc biệt phù hợp cho ứng dụng này.

Như vậy, có thể thấy rằng bộ chuyển đổi DC-DC không chỉ đóng vai trò thiết yếu trong các hệ thống lớn như năng lượng tái tạo hay xe điện, mà còn được ứng dụng sâu rộng

trong các thiết bị chiếu sáng chuyên dụng, nơi đòi hỏi khả năng biến đổi điện áp nhanh, ổn định và chính xác trong những điều kiện làm việc đặc biệt.



Hình 2.2. Mạch đèn chấn lưu cường độ cao (HID)

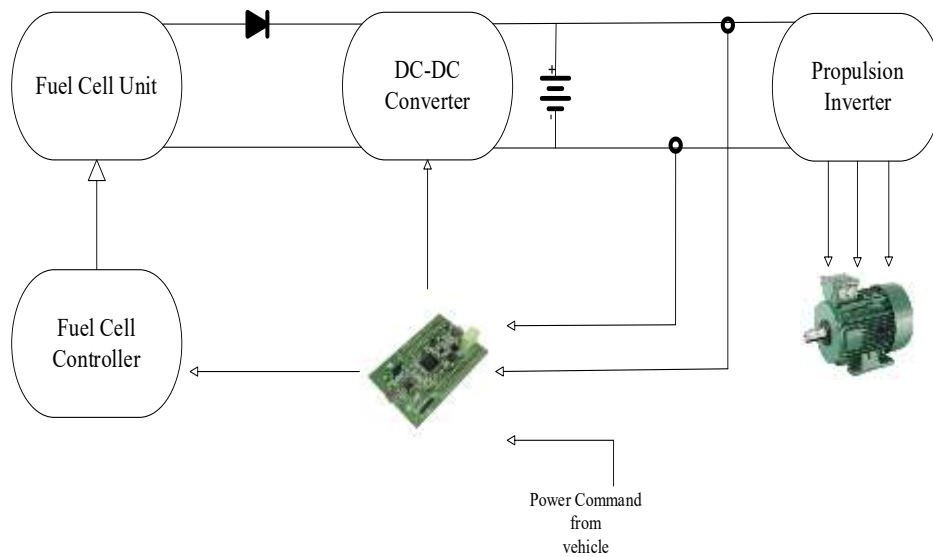
Trong các hệ thống sử dụng tế bào nhiên liệu (Fuel Cell) làm nguồn cung cấp năng lượng, điện áp đầu ra thường có giá trị thấp, dao động trong khoảng từ 30 đến 60VDC, phụ thuộc vào cấu trúc và công suất của từng loại pin. Mức điện áp này không đủ để trực tiếp cấp cho các thiết bị tải công suất lớn hoặc điều khiển các hệ thống động cơ điện. Do đó, cần có một giai đoạn trung gian để thực hiện chức năng nâng điện áp lên mức cao hơn, đồng thời đảm bảo sự ổn định và đáp ứng công suất tức thời trong suốt quá trình vận hành.

Trong bối cảnh đó, bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp (boost-type converter) được tích hợp nhằm nâng điện áp một chiều từ tế bào nhiên liệu lên mức điện áp chuẩn hóa, thường là khoảng 400VDC. Mức điện áp này được gọi là điện áp liên kết DC (DC link voltage) – đây là chuẩn điện áp thông dụng trong các hệ thống điện công suất trung bình đến cao, dùng để cấp nguồn cho bộ nghịch lưu (inverter) điều khiển động cơ, máy nén, hoặc các thiết bị điện hoạt động với tải xoay chiều.

Cụ thể, bộ chuyển đổi DC-DC không chỉ đơn thuần tăng điện áp, mà còn cần đảm bảo:

- Dòng điện đầu ra ổn định để duy trì điện áp liên kết DC không dao động mạnh.
- Khả năng phản hồi nhanh trước các thay đổi tải hoặc công suất tế bào nhiên liệu.
- Hiệu suất cao để tối đa hóa năng lượng chuyển đổi, hạn chế tổn thất.
- Tương thích với các thuật toán điều khiển công suất như điều khiển công suất không đổi hoặc dòng không đổi trong hệ thống tế bào nhiên liệu.

Nhờ có bộ DC-DC tăng áp hoạt động hiệu quả, toàn bộ hệ thống năng lượng dựa trên fuel cell có thể vận hành ổn định, tin cậy và hiệu quả, đặc biệt trong các ứng dụng di động như xe điện chạy bằng pin nhiên liệu, thiết bị robot di động, hoặc các hệ thống cung cấp điện khẩn cấp không phát thải.



Hình 2.3. Hệ dẫn động của xe chạy bằng tế bào quang điện

Trong các hệ thống nguồn điện liên tục (Uninterruptible Power Supply – UPS), bộ chuyển đổi DC-DC đóng vai trò trung gian cực kỳ quan trọng, đảm bảo việc truyền tải và duy trì điện năng ổn định giữa nguồn cấp, bộ lưu trữ năng lượng và tải tiêu thụ. Đây là thành phần không thể thiếu trong thiết kế của UPS hiện đại, nơi đòi hỏi khả năng hoạt động linh hoạt và phản ứng nhanh trước các tình huống sự cố lưới điện.

Khi hệ thống vận hành trong điều kiện bình thường, tải được cấp điện trực tiếp từ lưới hoặc từ bộ nghịch lưu có nguồn đầu vào ổn định. Tuy nhiên, khi xảy ra sự cố mất điện hoặc sụt áp bất ngờ, hệ thống UPS sẽ ngay lập tức chuyển sang chế độ dự phòng. Trong chế độ này, năng lượng được lấy từ bộ pin dự phòng, thường là tổ hợp các ắc quy hoặc pin lithium-ion có điện áp danh định khoảng 48VDC.

Do điện áp của pin dự phòng thấp hơn nhiều so với điện áp DC cần thiết để cấp cho bộ nghịch lưu (thường từ 300VDC đến 400VDC đối với UPS loại trung bình hoặc lớn), hệ thống cần có một giai đoạn khuếch đại điện áp để nâng giá trị điện áp đầu ra của pin lên mức điện áp bus DC phù hợp. Nhiệm vụ này được thực hiện bởi bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp, được thiết kế chuyên biệt để hoạt động trong chế độ dự phòng.

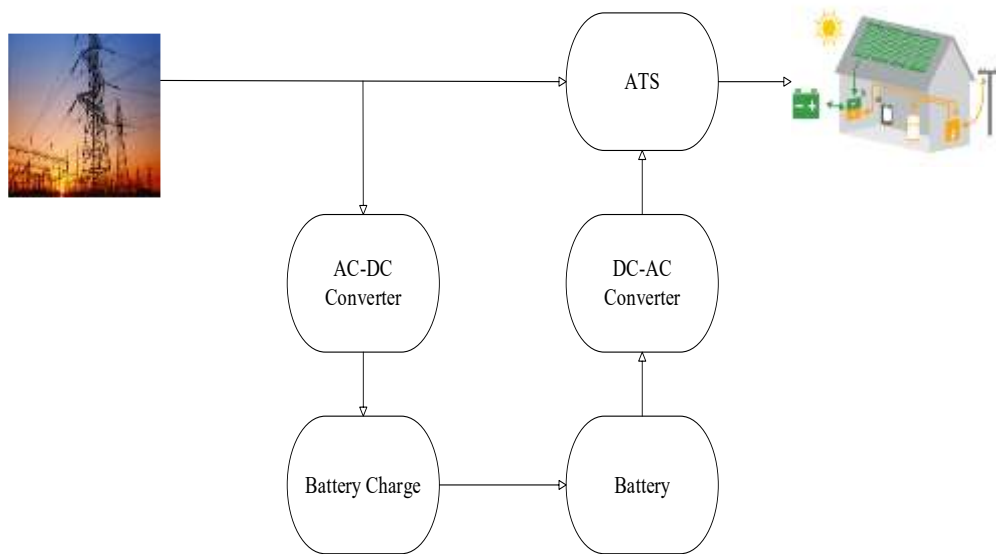
Bộ chuyển đổi DC-DC trong ứng dụng UPS cần đảm bảo các đặc tính kỹ thuật sau:

- Khả năng tăng áp nhanh và ổn định từ 48V lên ~400VDC trong thời gian rất ngắn (<10 ms),
- Duy trì dòng điện và điện áp ổn định trong suốt thời gian tải tiêu thụ điện từ nguồn pin,
- Hiệu suất cao để giảm tổn thất năng lượng và nhiệt khi làm việc kéo dài,
- Có khả năng tự động đồng bộ hóa với các tầng điều khiển và nghịch lưu sau đó,

- Tương thích với cơ chế nạp/xả của pin nhằm kéo dài tuổi thọ hệ thống lưu trữ.

Cấu trúc của bộ chuyển đổi DC-DC trong UPS thường là mạch tăng áp liên tục (non-isolated boost) đối với các hệ công suất vừa, hoặc mạch cách ly (isolated push-pull, full-bridge) đối với các hệ công suất lớn, nhằm đáp ứng các yêu cầu về an toàn và chống nhiễu điện từ.

Như vậy, bộ chuyển đổi DC-DC không chỉ đảm nhận vai trò biến đổi điện áp, mà còn là mắt xích quan trọng bảo vệ hoạt động liên tục của hệ thống điện, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp, góp phần đảm bảo tính sẵn sàng và độ tin cậy cao trong các ứng dụng như trung tâm dữ liệu, bệnh viện, viễn thông, và các hệ thống công nghiệp quan trọng



Hình 2.4. Mạch nguồn không gián đoạn (UPS)

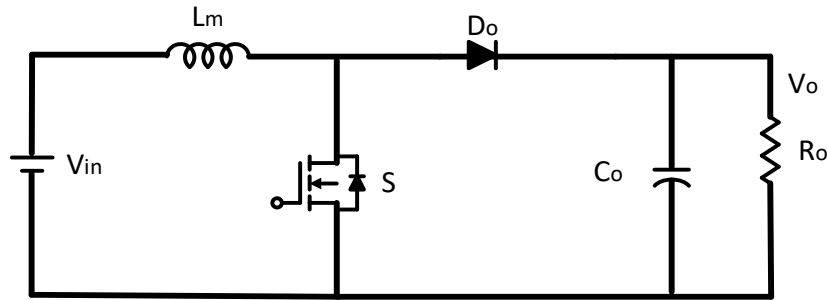
2.2. Các cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp cơ bản:

2.2.1. Bộ chuyển đổi Boost truyền thống

Để tăng điện áp, cấu trúc cơ bản nhất được áp dụng là bộ chuyển đổi Boost. Như minh họa trong hình 2.5, tỷ lệ khuếch đại điện áp của mạch Boost được xác định theo công thức:

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

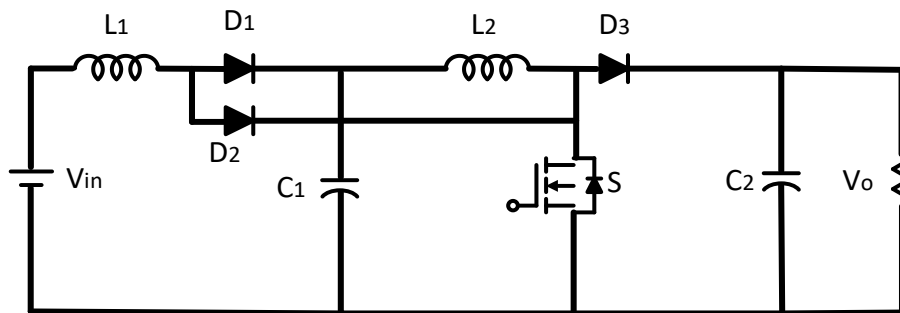
trong đó D là chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle) của bộ chuyển đổi



Hình 2.5. Mạch Boost thông dụng

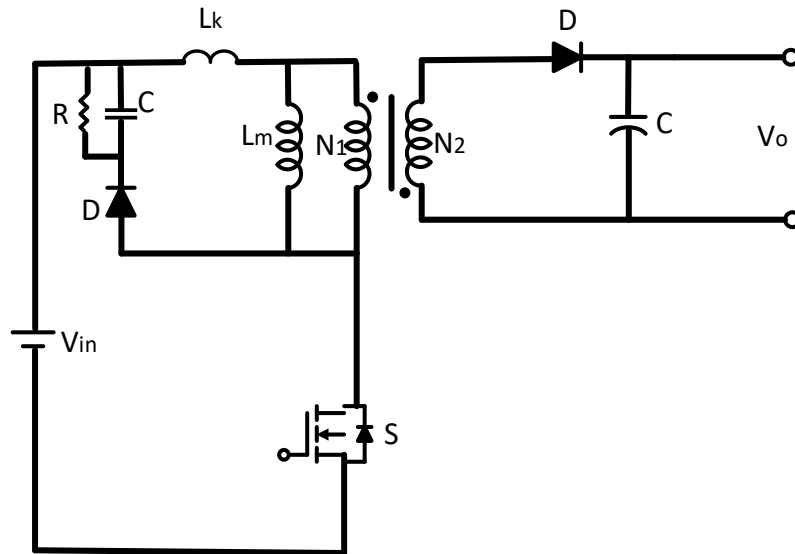
Dựa trên công thức trên, về lý thuyết, khi chu kỳ nhiệm vụ D tiến gần đến 1, độ khuếch đại điện áp sẽ tăng vô hạn. Tuy nhiên, trong thực tế, do sự tồn tại của các thành phần điện trở ký sinh trong mạch, việc tăng độ rộng xung D sẽ gây ra tổn thất năng lượng lớn, làm giảm hiệu suất của bộ chuyển đổi. Một giải pháp đơn giản để tránh bộ chuyển đổi DC-DC hoạt động với chu kỳ nhiệm vụ lớn là áp dụng cấu trúc xếp tầng. Trong cấu trúc này, cả hai tầng khuếch đại đều tham gia vào quá trình tăng áp. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu sử dụng nhiều linh kiện hơn, và hiệu suất của mạch có thể giảm do năng lượng phải đi qua nhiều tầng chuyển đổi.

2.2.2. Bộ chuyển đổi Flyback và Forward



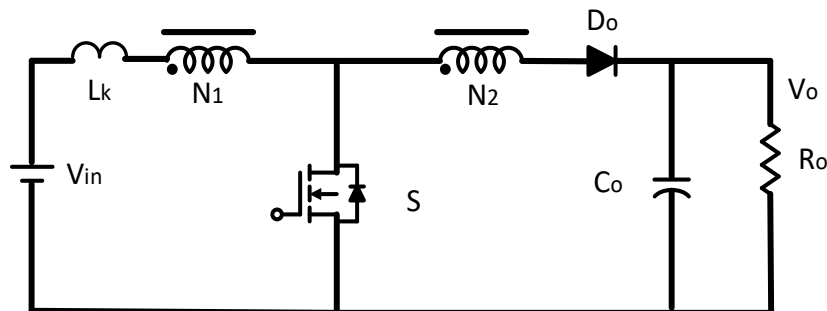
Hình 2.6. Mạch khuếch hai tầng nối tiếp

Các bộ chuyển đổi sử dụng máy biến áp, như flyback và forward, có thể đạt được độ khuếch đại cao mà không cần phải vận hành với chu kỳ nhiệm vụ lớn, thông qua việc điều chỉnh tỷ lệ số vòng dây của biến áp. Tuy nhiên, sự hiện diện của năng lượng điện cảm rò có thể tạo ra điện áp cực cao trên các thiết bị bán dẫn, đồng thời làm giảm hiệu suất của bộ chuyển đổi. Mặc dù các mạch snubber có thể giảm bớt điện áp cao này trên các thiết bị bán dẫn, nhưng vấn đề hiệu suất vẫn chưa được giải quyết vì năng lượng điện cảm rò vẫn bị tiêu tán trong các linh kiện của mạch snubber. Thêm vào đó, kích thước lớn của bộ biến đổi do sự hiện diện của máy biến áp cũng là một yếu tố cần cân nhắc.



Hình 2.7. Mạch Flyback

Để khắc phục những vấn đề đã nêu, việc sử dụng cuộn cảm ghép (coupled inductor) là một giải pháp hiệu quả. Cuộn cảm ghép không chỉ lưu trữ và truyền năng lượng giữa các cuộn dây mà còn cung cấp độ khuếch đại điện áp cao, đồng thời giúp nâng cao hiệu suất và giảm kích thước của bộ chuyển đổi.



Hình 2.8. Mạch tăng áp cơ bản sử dụng cuộn cảm ghép

Cho đến nay, nhiều bộ tăng áp DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép đã được đề xuất. Tuy nhiên, việc sử dụng nhiều thiết bị công suất và tụ không chỉ làm giảm hiệu suất mà còn làm tăng kích thước của các bộ biến đổi, trong khi vẫn chưa đạt được độ khuếch đại điện áp đủ lớn. Do đó, nghiên cứu và thiết kế một bộ tăng áp DC-DC mới sử dụng cuộn cảm kép với độ khuếch đại điện áp cao, hiệu suất lớn, và kích thước giảm là mục tiêu của nghiên cứu này.

2.3. Kết luận chương 2

Chương này đã trình bày tổng quan vai trò, cấu trúc và xu hướng phát triển của các bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp. Từ việc phân tích những hạn chế của các cấu trúc truyền thống đến việc giới thiệu giải pháp dùng cuộn cảm ghép ba cuộn dây và chuyển mạch mềm, chương 2 đã làm rõ cơ sở lý luận và động lực nghiên cứu cấu trúc mạch mới.

Những nội dung này sẽ là nền tảng để bước sang chương 3, nơi tập trung vào thiết kế chi tiết, mô phỏng và phân tích hiệu suất của bộ chuyển đổi được đề xuất.

Chương 3: THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC SỬ DỤNG CUỘN CẢM GHEP 3 CUỘN DÂY

3.1. Giới thiệu cấu trúc mạch đề xuất

Cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC được đề xuất trong đề tài sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây kết hợp với hai khóa chuyển mạch (MOSFET), năm diode và năm tụ điện nhằm đạt được khả năng tăng áp cao, giảm tổn thất chuyển mạch và nâng cao hiệu suất tổng thể. Cuộn cảm ghép bao gồm một cuộn chính và hai cuộn phụ, được quấn trên cùng một lõi từ và có tỷ số vòng dây xác định trước, đóng vai trò là phần tử tích trữ và phân phối năng lượng. Hai MOSFET được điều khiển luân phiên để tạo ra các chu kỳ đóng ngắt có kiểm soát, cho phép dòng điện chạy qua các nhánh mạch khác nhau tùy vào thời điểm. Các diode được bố trí để định hướng dòng điện, bảo vệ linh kiện và hỗ trợ quá trình tích trữ năng lượng trong tụ. Các tụ điện trong mạch có vai trò ổn định điện áp, giảm độ gợn và đảm bảo quá trình truyền năng lượng được liên tục. Đặc điểm nổi bật của cấu trúc này là khả năng đạt điều kiện chuyển mạch mềm (Zero Voltage Switching – ZVS) nhờ khai thác dòng điện rò và điện áp sụt trên cuộn cảm ghép, giúp các MOSFET ngắt ở điện áp gần bằng 0, từ đó giảm tổn thất đóng cắt và tăng độ bền linh kiện. Đồng thời, nhờ vào cơ chế ghép từ và phân phối dòng qua nhiều nhánh, mạch đạt được hệ số khuếch đại điện áp lớn mà không cần duty cycle cao như mạch Boost truyền thống. Thiết kế này vừa đơn giản, sử dụng ít linh kiện, vừa đảm bảo hiệu quả tăng áp, độ ổn định điện áp đầu ra và dòng đầu vào liên tục, đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật trong các hệ thống như điện mặt trời, nguồn cấp dự phòng, thiết bị công nghiệp và các ứng dụng cần bộ chuyển đổi hiệu suất cao.

3.2. Nguyên lý hoạt động:

Bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây hoạt động dựa trên quá trình lưu trữ và chuyển giao năng lượng giữa các cuộn dây thông qua việc điều khiển đóng ngắt luân phiên hai khóa MOSFET. Trong mỗi chu kỳ chuyển mạch, mạch trải qua nhiều trạng thái hoạt động tương ứng với các giai đoạn khác nhau của dòng điện và điện áp trong mạch, qua đó hoàn thành quá trình tăng áp. Khi một trong hai khóa dẫn, dòng điện từ nguồn sẽ đi qua cuộn dây chính và tích trữ năng lượng từ thông trong lõi từ của cuộn cảm ghép. Đồng thời, năng lượng đã tích trữ từ chu kỳ trước trong các cuộn phụ sẽ được giải phóng qua các diode đến tải và tụ đầu ra. Khi khóa ngắt, năng lượng từ cuộn cảm chính và năng lượng cảm ứng từ các cuộn phụ sẽ tiếp tục truyền qua các nhánh chính lưu đến tải, kết hợp với điện áp từ nguồn và tụ điện trung gian để tạo nên điện áp đầu ra lớn hơn đáng kể so với điện áp đầu vào. Quá trình đóng ngắt được điều khiển sao cho các khóa MOSFET ngắt tại thời điểm điện áp gần bằng 0, điều kiện này được hỗ trợ bởi dòng điện rò và điện áp tự cảm trên cuộn cảm ghép, từ đó đạt được chuyển mạch mềm (ZVS), giúp giảm tổn hao và nhiệt phát sinh trong quá trình hoạt động. Sự phối hợp chính xác giữa các thành phần trong mạch như MOSFET, diode, tụ điện và cuộn cảm ghép đảm bảo rằng năng lượng được truyền hiệu quả qua các nhánh mà không gây ra

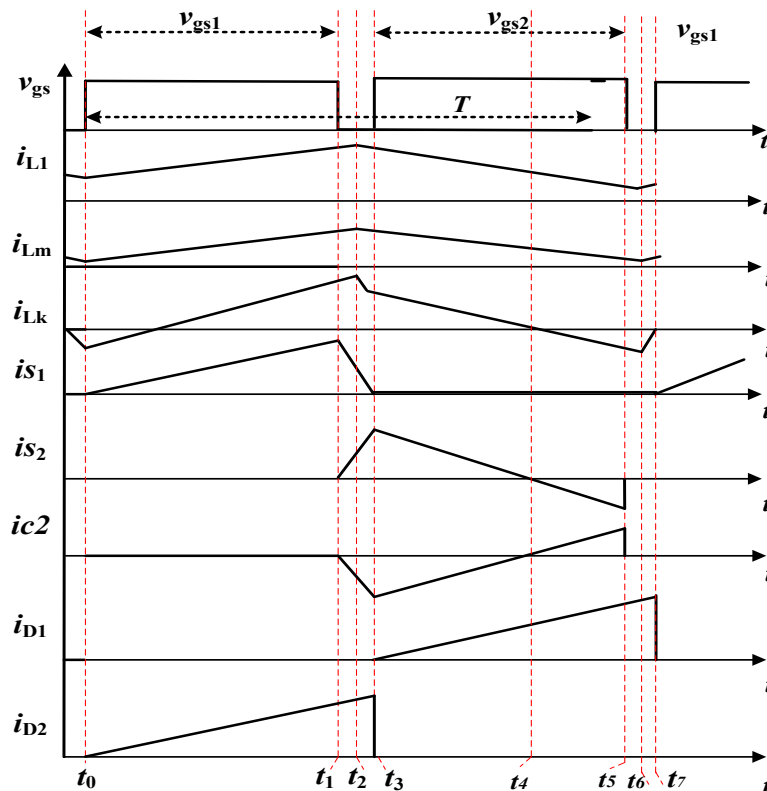
dòng ngược hoặc xung áp lớn lên linh kiện, đồng thời đảm bảo điện áp đầu ra được duy trì ổn định, có độ gợn thấp. Nhờ vào thiết kế đồng bộ và cơ chế hoạt động liên tục, mạch có thể duy trì dòng đầu vào gần như liên tục, hạn chế nhiễu điện từ và tăng độ ổn định khi tích hợp vào các hệ thống thực tế.

3.3. Phân tích các chế độ hoạt động trong một chu kỳ

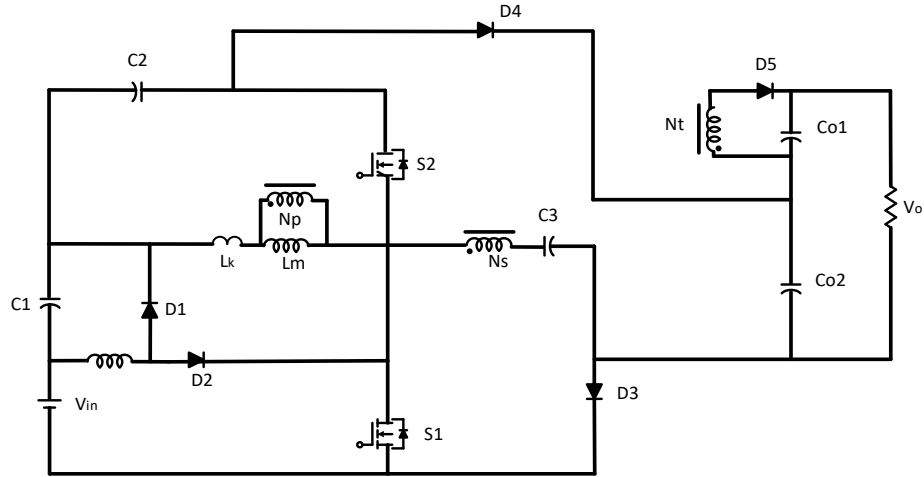
3.3.1. Giả định:

- Tất cả các thiết bị công suất đều lý tưởng, và điện trở khi bật (ON-resistance) và điện áp dẫn hướng (forward conduction voltage) được bỏ qua.
- Tất cả các tụ điện đủ lớn, do đó, điện áp của chúng có thể được coi là không đổi trong một chu kỳ chuyển mạch.
- Tỷ số vòng dây của cuộn cảm ghép 1: $ns: nt$ được định nghĩa là $N_p: N_s: N_t$ và hệ số ghép k được tính bằng công thức $k = L_m / (L_m + L_k)$.

3.3.2. Các chế độ hoạt động:



Hình 3.1: Biểu đồ dạng sóng của bộ chuyển đổi.



Hình 3.2: Hình ảnh sơ đồ nguyên lý mạch tương đương của bộ chuyển đổi.

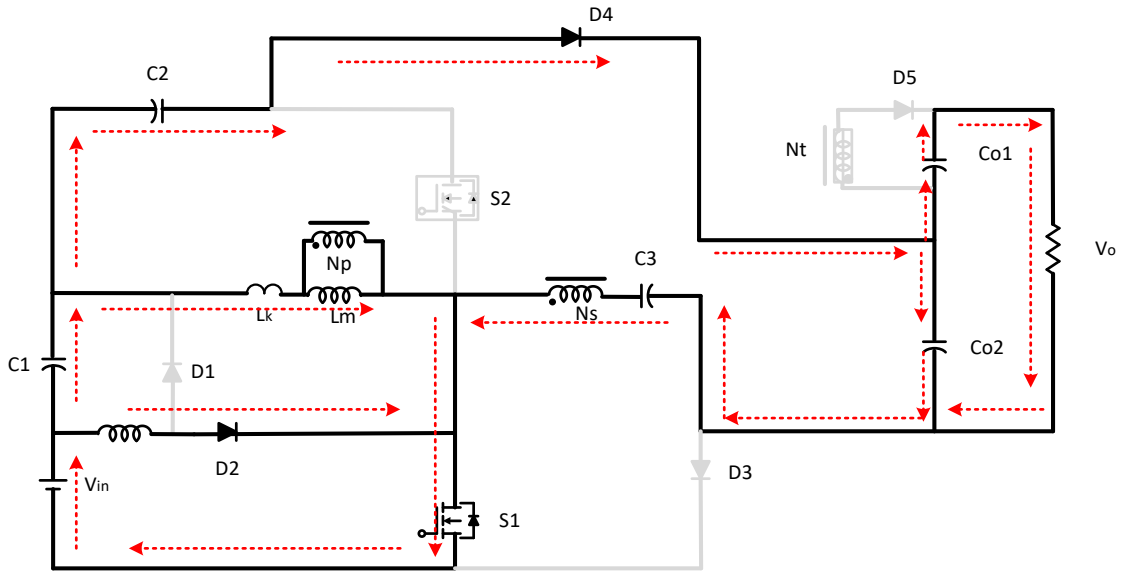
3.3.2.1. Mode 1 ($t_0 - t_1$):

Trong giai đoạn này, công tắc S_1 được bật (ON), trong khi công tắc S_2 ở trạng thái tắt (OFF). Các diode D_2 và D_4 dẫn dòng, trong khi D_1 , D_3 và D_5 đều không dẫn. Đường đi của dòng điện trong mode này được thể hiện trong hình 3.3.

Tại thời điểm này, nguồn điện vào V_{in} cùng với tụ điện C_1 cung cấp năng lượng để sạc cho cuộn cảm chính L_1 , cuộn cảm từ hóa L_m và cuộn cảm rò L_k . Do đó, các dòng điện i_{L1} , i_{Lm} và i_{Lk} đều tăng một cách tuyến tính trong suốt khoảng thời gian này, biểu thị quá trình tích trữ năng lượng từ trường trong các phần tử cảm.

Đồng thời, năng lượng từ V_{in} , C_1 , C_2 và cuộn dây thứ cấp nối tiếp cũng được truyền đến để sạc cho tụ điện đầu ra C_{02} thông qua các diode dẫn dòng. Trong khi đó, tụ điện đầu ra C_{01} hoạt động như một nguồn cung cấp năng lượng liên tục cho tải, đảm bảo duy trì điện áp tải ổn định trong suốt chu kỳ hoạt động.

Giai đoạn Mode 1 kết thúc tại thời điểm $t = t_1$, khi tín hiệu điều khiển V_{gs1} chuyển về mức thấp, khiến MOSFET S_1 ngắt.



Hình 3.3: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 1.

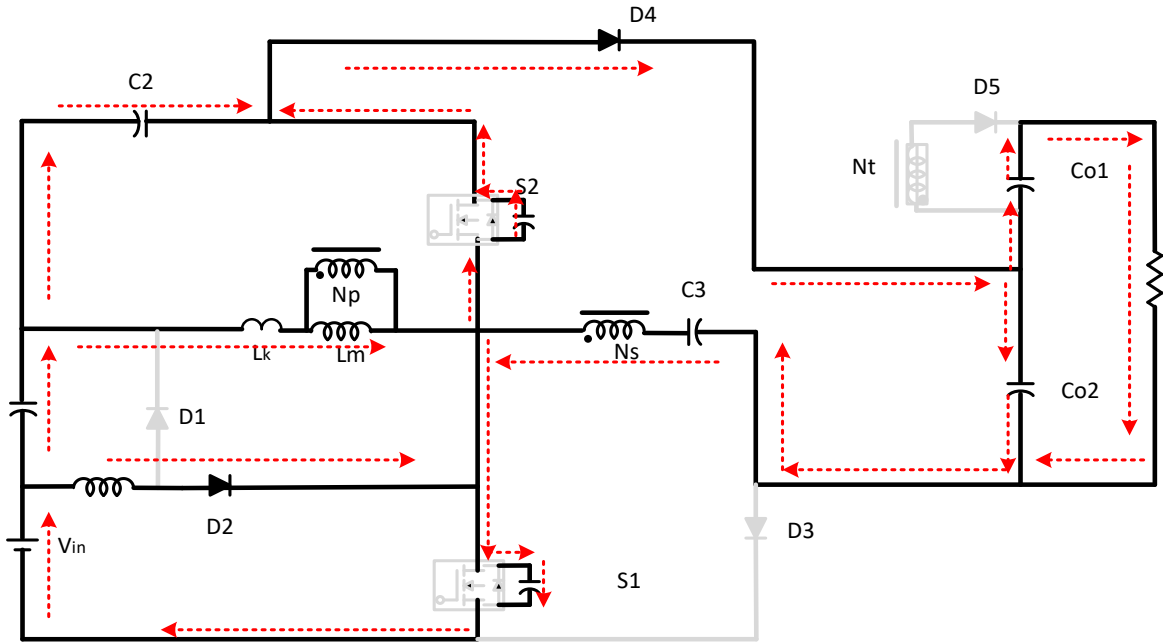
3.3.2.2. Mode 2 ($t_1 - t_2$):

Giai đoạn này bắt đầu tại thời điểm $t = t_1$, khi công tắc S_1 vừa được ngắt. Ngay sau khi S_1 tắt, dòng điện trong cuộn cảm rò do tính chất cảm ứng, không thể giảm đột ngột mà tiếp tục duy trì bằng cách chuyển hướng dòng để sạc và xả các tụ ký sinh của hai khóa bán dẫn.

Cụ thể, cuộn cảm rò bắt đầu sạc tụ ký sinh của S_1 và đồng thời xả tụ ký sinh của S_2 . Kết quả là điện áp V_{ds1} của S_1 (tức điện áp giữa drain và source) tăng dần từ 0 lên đến mức tổng $V_{in} + V_{C1} + V_{C2}$. Trong khi đó, điện áp V_{ds2} của S_2 giảm tuyến tính từ $V_{in} + V_{C1} + V_{C2}$ về gần 0.

Quá trình này diễn ra nhanh chóng và mang tính cộng hưởng giữa tụ ký sinh và cuộn cảm rò, đóng vai trò tạo điều kiện cho chuyển mạch mềm. Trong suốt thời gian này, tụ điện đầu ra C_{o1} tiếp tục cung cấp năng lượng cho tải mà không bị gián đoạn.

Mode 2 kết thúc tại thời điểm $t = t_2$, khi điện áp V_{ds1} đạt giá trị cực đại $V_{in} + V_{C1} + V_{C2}$, đồng thời V_{ds2} giảm về gần 0, khiến diode ký sinh tích hợp trong S_2 dẫn dòng – tạo điều kiện để bước vào mode tiếp theo với S_2 chuẩn bị được bật dẫn.



Hình 3.4: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 2.

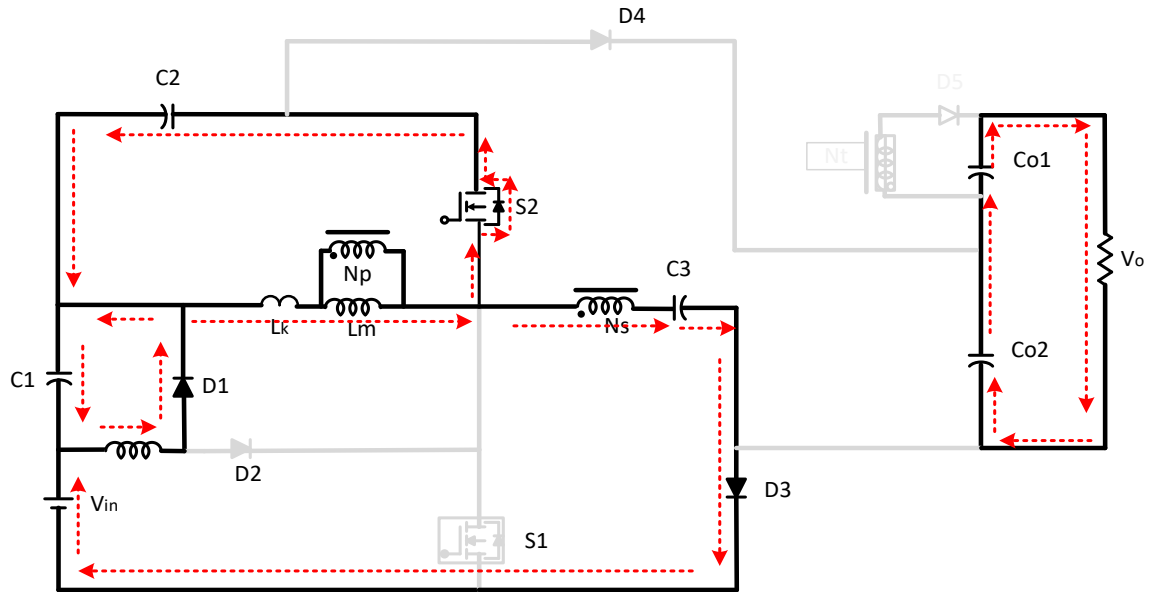
3.3.2.3. Mode 3 ($t_2 - t_3$):

Mode 3 bắt đầu tại thời điểm $t = t_2$, ngay sau khi diode D_4 ngừng dẫn và điện áp V_{ds1} của công tắc S_1 đạt giá trị cực đại bằng $V_{in} + V_{C1} + V_{C2}$, trong khi điện áp V_{ds2} của S_2 đã giảm về gần 0. Tại thời điểm này, dòng điện rò từ cuộn cảm L_k phát sinh do đặc tính không lý tưởng của cuộn dây gây ra áp suất điện áp lên S_1 . Tuy nhiên, năng lượng dư này được hấp thụ một phần bởi tụ C_2 , góp phần làm giảm ứng suất điện áp trên S_1 , đồng thời hạn chế dao động điện áp đầu cực.

Trong giai đoạn này:

- Tụ C_1 tiếp tục được sạc bởi dòng điện từ cuộn cảm L_1 .
- Tụ C_3 cũng được nạp năng lượng thông qua dòng từ cuộn cảm từ hóa L_m , cuộn cảm rò L_k , và cuộn dây thứ cấp N_s .
- Diode thân (body diode) tích hợp trong MOSFET S_2 bắt đầu dẫn dòng, tạo điều kiện cho quá trình chuyển mạch mềm (ZVS) ở S_2 trong giai đoạn tiếp theo.

Giai đoạn này kết thúc tại thời điểm $t = t_3$, khi tín hiệu điều khiển V_{gs2} được kích hoạt, bật MOSFET S_2 vào trạng thái dẫn chủ động.



Hình 3.5: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 3.

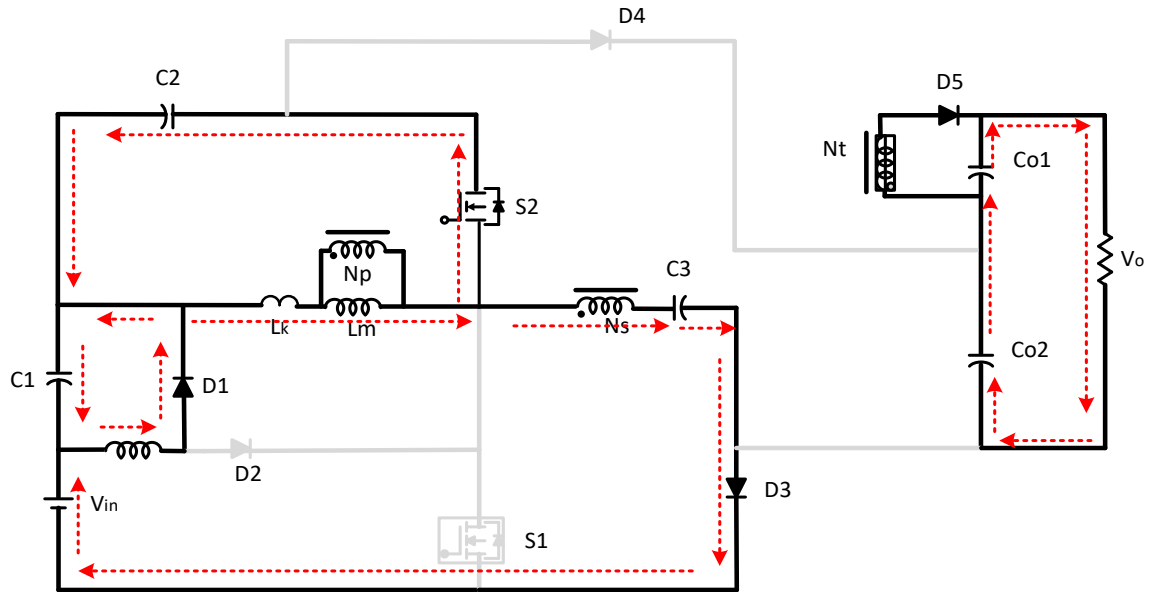
3.3.2.4. Mode 4 ($t_3 - t_4$):

Giai đoạn này bắt đầu tại thời điểm $t = t_3$, khi tín hiệu điều khiển V_{gs2} được đưa lên mức cao, kích hoạt công tắc S_2 dẫn trở lại. Trước thời điểm này, diode thân (body diode) của S_2 đã dẫn dòng, do đó việc bật S_2 diễn ra trong điều kiện chuyển mạch không điện áp (Zero Voltage Switching – ZVS). Đây là một điều kiện lý tưởng giúp giảm thiểu tổn hao đóng mạch và cải thiện hiệu suất tổng thể.

Trong suốt giai đoạn này:

- Tụ C_1 tiếp tục được sạc bởi dòng điện từ cuộn cảm L_1 .
- Tụ C_3 được nạp thông qua dòng từ cuộn cảm từ hóa L_m , cuộn cảm rò L_k , và cuộn thứ cấp N_s .
- Diode D_5 dẫn dòng, cho phép năng lượng từ cuộn thứ cấp N_t truyền đến và sạc cho tụ điện đầu ra C_{o1} .
- Đồng thời, hai tụ đầu ra C_{o1} và C_{o2} cùng tham gia cung cấp năng lượng cho tải, đảm bảo điện áp đầu ra ổn định trong suốt chu kỳ hoạt động.

Mode này kết thúc tại thời điểm $t = t_4$, khi dòng điện trong cuộn cảm rò i_{Lk} giảm về 0, đánh dấu thời điểm bắt đầu quá trình hồi tiếp của dòng điện trong chu kỳ kế tiếp.



Hình 3.6: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 4.

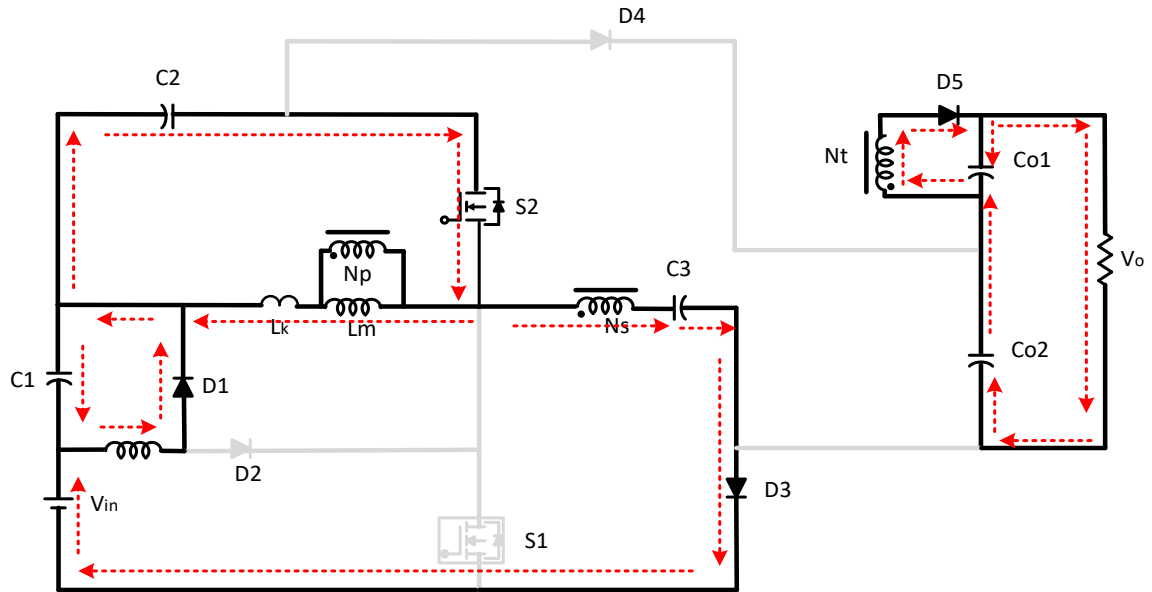
3.3.2.5. Mode 5 ($t_4 - t_5$):

Mode 5 bắt đầu tại thời điểm $t = t_4$, khi dòng điện qua cuộn cảm rò i_{Lk} giảm về 0. Tại thời điểm này, tụ điện C_2 bắt đầu xả năng lượng tích trữ của mình vào cuộn cảm từ hóa L_m và cuộn cảm rò L_k , làm cho dòng rò i_{Lk} đổi chiều – biểu hiện của quá trình hồi tiếp năng lượng trong cấu trúc từ ghép.

Trong suốt chế độ này:

- Tụ C_1 tiếp tục được sạc bởi dòng điện từ cuộn cảm đầu vào L_1 .
- Tụ C_3 vẫn được nạp năng lượng thông qua dòng điện từ cuộn cảm từ hóa L_m , cuộn cảm rò L_k và cuộn thứ cấp N_s .
- Diode D_5 tiếp tục dẫn dòng, cho phép năng lượng từ cuộn thứ cấp N_t sạc cho tụ đầu ra C_{01} .
- Hai tụ C_{01} và C_{02} tiếp tục cùng nhau cung cấp năng lượng cho tải, đảm bảo duy trì điện áp đầu ra ổn định.

Giai đoạn này kết thúc tại thời điểm $t = t_5$, khi tín hiệu điều khiển V_{gs2} giảm về mức thấp, ngắt công tắc S_2 và chuyển sang chế độ hoạt động tiếp theo trong chu kỳ.



Hình 3.7: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 5.

3.3.2.6. Mode 6 ($t_5 - t_6$):

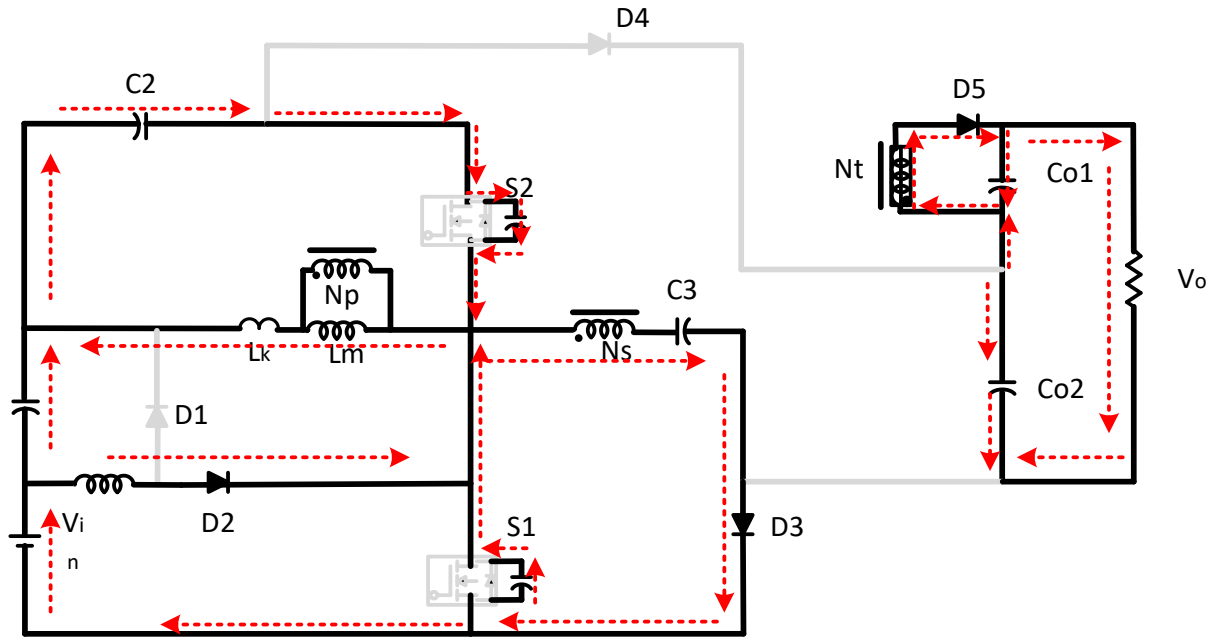
Chế độ này bắt đầu tại thời điểm $t = t_5$, khi công tắc S_2 ngắt (OFF). Do đặc tính cảm ứng, dòng điện trong cuộn cảm rò L_k không thể thay đổi tức thời mà tiếp tục duy trì, đồng thời nạp năng lượng vào tụ ký sinh của S_1 .

Hậu quả là điện áp drain-source của S_1 , V_{ds1} giảm dần từ mức cao $V_{in} + V_{C1} + V_{C2}$ về gần 0. Ngược lại, điện áp V_{ds2} của S_2 tăng lên từ 0 đến cùng mức đó, thể hiện quá trình chuyển tiếp năng lượng giữa hai khóa MOSFET đối pha.

Trong giai đoạn này:

- Tụ C_1 tiếp tục được sạc từ cuộn cảm đầu vào L_1 .
- Tụ C_3 tiếp tục nhận năng lượng từ L_m , L_k và cuộn thứ cấp N_s .
- Diode D_5 vẫn dẫn, cho phép năng lượng từ cuộn N_t tiếp tục sạc tụ C_{01} .
- Hai tụ C_{01} và C_{02} cùng cấp nguồn cho tải, giữ ổn định điện áp đầu ra.

Chế độ kết thúc tại $t = t_6$ khi V_{ds1} giảm về gần 0, cho phép diode thân của S_1 bắt đầu dẫn, chuẩn bị điều kiện bật S_1 ở chế độ chuyển mạch mềm (ZVS) trong chu kỳ tiếp theo.



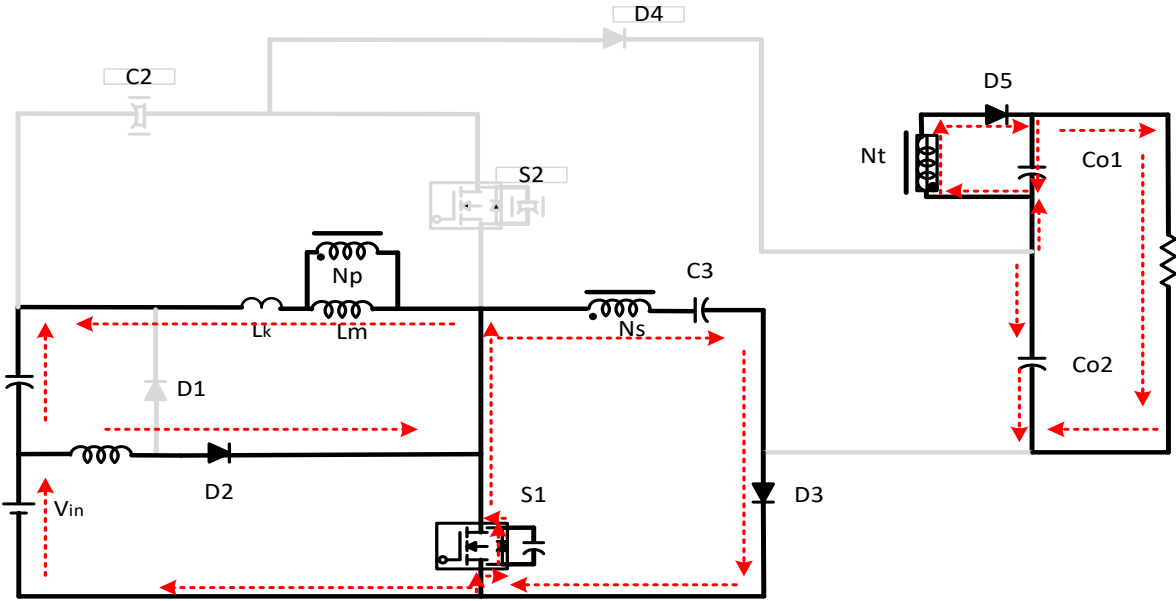
Hình 3.8: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 6.

3.3.2.7. Mode 7 ($t_6 - t_7$):

Chế độ bắt đầu tại thời điểm $t = t_6$, khi điện áp trên tụ ký sinh của công tắc S_1 giảm về 0V. Lúc này, diode thân tích hợp trong MOSFET S_1 bắt đầu dẫn, duy trì dòng điện liên tục qua công tắc mà không gây gián đoạn.

Đây là thời điểm tối ưu để bật S_1 trong điều kiện chuyển mạch mềm (Zero Voltage Switching – ZVS). Để đảm bảo ZVS xảy ra, tín hiệu điều khiển V_{gs1} cần được đưa lên mức cao ngay sau khi V_{ds1} chạm 0 V và trước khi dòng qua diode thân đổi chiều. Việc kích đúng thời điểm sẽ loại bỏ tổn hao đóng mạch, cải thiện hiệu suất và kéo dài tuổi thọ linh kiện.

Chế độ kết thúc khi S_1 được bật dẫn hoàn toàn, đưa mạch trở lại Mode 1 và bắt đầu chu kỳ mới.



Hình 3.9: Sơ đồ nguyên lý của mạch tương đương trong mode 7.

3.4. Tính toán thông số mạch:

3.4.1. Tính toán hệ số khuếch đại điện áp:

Từ hình 3.3 ta có mối liên hệ giữ điện áp trên tụ C_1 , C_2 và C_3 , trên cuộn cảm L_1 và cuộn cảm ghép L_m đối với điện áp vào V_{LV} :

$$V_{in} = V_{L1} \quad (3.1)$$

$$V_{Lm} = V_{in} + V_{C1} \quad (3.2)$$

$$V_{C02} = V_{Ns} + V_{in} + V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} \quad (3.3)$$

$$V_{Ns} = n_s V_{Lm} \quad (3.4)$$

$$V_{Nt} = n_t V_{Lm} \quad (3.5)$$

Tương tự, ta cũng có các công thức điện áp sau:

$$V_{L1} - V_{C1} = 0 \quad (3.6)$$

$$V_{Lm} + V_{C2} = 0 \quad (3.7)$$

$$V_{Ns} = V_{in} + V_{C1} + V_{C2} - V_{C3} \quad (3.8)$$

$$V_{Nt} + V_{C01} = 0 \quad (3.9)$$

Có công thức cân bằng điện áp trên cuộn cảm như sau:

$$\int_0^{DT} V_{Lm} dt + \int_{DT}^T V_{Lm} dt = 0 \quad (3.10)$$

$$\int_0^{DT} V_{Ns} dt + \int_{DT}^T V_{Ns} dt = 0 \quad (3.11)$$

$$\int_0^{DT} V_{Nt} dt + \int_{DT}^T V_{Nt} dt = 0 \quad (3.12)$$

$$\int_0^{DT} V_{L1} dt + \int_{DT}^T V_{L1} dt = 0 \quad (3.13)$$

Cân bằng điện áp trên cuộn L_1 từ công thức (3.1), (3.6) và (3.13), rút được công thức điện áp trên tụ C_1 :

$$V_{C_1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (3.14)$$

Từ công thức (3.2), (3.7) và (3.10), cân bằng điện áp trên cuộn cảm ghép L_m , công thức điện áp trên tụ điện C_2 như sau:

$$V_{C_2} = \frac{D}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.15)$$

Thay kết quả từ các công thức (3.2), (3.4) và (3.8) vào công thức (3.11), tính được điện áp trên tụ C_3 là:

$$V_{C_3} = \frac{1 + Dn_s}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.16)$$

Thay kết quả từ các công thức (3.2), (3.5) và (3.9) vào công thức (3.12), tính được điện áp trên tụ C_{01} là:

$$V_{C_{01}} = \frac{Dn_t}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.17)$$

Thay kết quả từ các công thức (3.3), (3.8) vào công thức (3.11), tính được điện áp trên tụ C_{02} là:

$$V_{C_{02}} = \frac{(2 - n_s)}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.18)$$

Voltage Gain được tính như công thức (3.17) và (3.18) được như sau:

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Dn_t + n_s + 2}{(1-D)^2} \quad (3.19)$$

3.4.2. Tính toán L_1, L_m :

Dòng dao động của cuộn cảm từ được tính như sau:

$$\Delta i_{Lm} = 20\% I_{Lm_{max}} = 20\% \frac{P_{out}}{V_{g_{min}}}$$

$$V_{Lm} = \int_0^{DT} V_g = V_g DT = L_m \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t}$$

$$\Delta i_{Lm} = \frac{V_g DT}{L_m} = \frac{D(1-D)TV_{out}}{L_m(2+n_s+Dn_t)} \Rightarrow L_m = \frac{V_g DT}{\Delta i_{Lm}} = \frac{D(1-D)TV_{out}}{\Delta i_{Lm}(2+n_s+Dn_t)}$$

Trong điều kiện lý tưởng, như được minh họa trong *hình 3.3*, ứng suất điện áp trên S_2 , V_{D3} , and V_{D5} là:

$$V_{S2} = V_{in} + V_{C_1} + V_{C_2} = \frac{1}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.20)$$

$$V_{D3} = V_{C02} - V_{in} - V_{C_1} - V_{C_2} = \frac{(1+n_s)}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.21)$$

$$V_{D5} = V_{C01} = \frac{n_s D}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.22)$$

Trong điều kiện lý tưởng, như được minh họa trong *hình 3.4* và áp dụng phương pháp tương tự, ứng suất điện áp đặt lên công tắc S_1 , V_{D2} và V_{D4} là:

$$V_{S1} = V_{in} + V_{C_1} + V_{C_2} = \frac{1}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.23)$$

$$V_{D4} = V_{C02} - V_{in} - V_{C_1} - V_{C_2} = \frac{(1+n_s)}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.24)$$

$$V_{D2} = 2V_{C_1} + V_{C_2} = \frac{D(3+2D)}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3.25)$$

Bằng cách áp dụng nguyên lý cân bằng (amp-second) cho các tụ điện đầu ra C_{01} , C_{02} và các tụ điện chuyển mạch C_1 , C_2 , C_3 , dòng điện đỉnh của các diode D_1 , D_2 , D_3 , D_4 và D_5 được xác định như sau:

$$I_{D5(peak)} = I_{D3(peak)} = \frac{2}{(1-D)R} V_o \quad (3.26)$$

$$I_{D4(peak)} = \frac{2}{DR} V_o \quad (3.27)$$

$$I_{D2(peak)} = \frac{2V_o^2(1-D) - V_{in}V_on_s}{V_{in}(1-D)^2R} \quad (3.28)$$

$$I_{D1(peak)} = \frac{2n_s}{(1-D)^2 R} V_o \quad (3.29)$$

Dòng điện trung bình qua cuộn cảm I_{L_1} được tính như sau:

$$I_{L_1} = I_{in} \quad (3.30)$$

Dòng điện trung bình qua cuộn cảm I_{L_m} được tính như sau:

$$\begin{aligned} \int_{DT}^T I_{Lm} &= n_t \int_{DT}^T I_{Nt} = n_t \int_{DT}^T I_{D5} = n_t \int_0^T I_{D5} = n_t I_o \\ I_{Lm} &= \frac{n_t I_o}{(1-D)} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Độ gợn dòng của L_1 có thể được tính bởi:

$$\begin{aligned} \Delta I_{L_1} &= \frac{D}{L_1 f} V_{in} \\ L_1 &> \frac{D}{\Delta I_{L_1} f} V_{in} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Độ gợn dòng của L_m có thể được tính bởi:

$$\begin{aligned} \Delta I_{Lm} &= \frac{D}{L_m f} (V_{in} + V_{C1}) \\ L_m &> \frac{D}{\Delta I_{Lm} f} (V_{in} + V_{C1}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$L_m > \frac{D}{\Delta I_{Lm} (1-D) f} V_{in} \quad (3.34)$$

3.4.3. Tính toán các tụ:

Việc lựa chọn tụ điện chuyển mạch được dựa trên độ gợn điện áp (voltage ripple) của tụ và mức công suất đầu ra. Bằng cách áp dụng nguyên lý cân bằng điện tích-thời gian (charge-second balance), giá trị của tụ điện chuyển mạch có thể được xác định như sau:

$$C_1 = \frac{I_o DT}{\Delta V_{C1}} \quad (3.35)$$

$$C_2 = \frac{I_o DT}{\Delta V_{C2}} \quad (3.36)$$

$$C_3 = \frac{I_o DT}{\Delta V_{C3}} \quad (3.37)$$

$$C_{o1} = \frac{I_o}{\Delta V_{C01}} \quad (3.38)$$

$$C_{o2} = \frac{I_o}{\Delta V_{C01}} \quad (3.39)$$

3.5. Ưu điểm của cấu trúc mạch đề xuất

Cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây mang lại nhiều ưu điểm vượt trội so với các cấu trúc tăng áp truyền thống cả về hiệu suất lẫn khả năng ứng dụng thực tế. Nhờ sử dụng cuộn cảm ghép với tỷ số vòng dây được tối ưu, mạch đạt được hệ số khuếch đại điện áp cao mà không cần tăng chu kỳ nhiệm vụ lên gần 1, qua đó giảm tổn thất chuyển mạch và hạn chế ứng suất điện áp lên các linh kiện bán dẫn. Việc sử dụng hai khóa chuyển mạch điều khiển luân phiên cùng với các diode và tụ điện hợp lý giúp dòng điện đầu vào gần như liên tục, làm giảm nhiễu điện từ và phù hợp hơn với tiêu chuẩn EMC trong các hệ thống điện tử công suất hiện đại. Đặc biệt, cấu trúc mạch được thiết kế để đạt điều kiện chuyển mạch mềm (Zero Voltage Switching – ZVS) tự nhiên nhờ vào sự hỗ trợ của dòng điện rò trong cuộn cảm ghép, cho phép các MOSFET đóng/ngắt tại thời điểm điện áp gần bằng không, từ đó giảm đáng kể tổn thất năng lượng trong quá trình đóng cắt, hạn chế sinh nhiệt và tăng tuổi thọ linh kiện. So với các cấu trúc dùng biến áp cách ly như Flyback hoặc Forward, mạch đề xuất không yêu cầu cách ly, giúp đơn giản hóa thiết kế và giảm kích thước tổng thể. Đồng thời, khi so với các mạch tăng áp đa tầng hoặc cấu trúc nhân điện áp, mạch đề xuất có số lượng linh kiện hợp lý hơn, dễ bố trí và điều khiển, từ đó phù hợp với các ứng dụng yêu cầu hiệu quả năng lượng cao, chi phí hợp lý và độ tin cậy cao như trong hệ thống năng lượng tái tạo, bộ sạc xe điện hoặc các thiết bị nguồn điện công nghiệp.

3.6. Kết luận chương 3

Chương 3 đã trình bày chi tiết cấu trúc mạch bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, bao gồm nguyên lý hoạt động, phân tích các chế độ chuyển mạch trong một chu kỳ, cũng như các bước tính toán thông số linh kiện cần thiết cho thiết kế. Mạch được tổ chức hợp lý với hai khóa công suất, cuộn cảm ghép và các thành phần thụ động nhằm đạt được hệ số khuếch đại điện áp cao, đồng thời đảm bảo chuyển mạch mềm để nâng cao hiệu suất. Việc mô hình hóa quá trình hoạt động theo chín chế độ giúp làm rõ quá trình truyền năng lượng và điều kiện vận hành lý tưởng của mạch. Các thông số tính toán đã được xác định dựa trên giả định lý tưởng, làm cơ sở cho mô phỏng và kiểm chứng trong chương tiếp theo. Với cấu trúc đơn giản nhưng hiệu quả, mạch đề xuất không những đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật về tăng áp và hiệu suất mà còn có tiềm năng ứng dụng thực tế cao trong các hệ thống điện tử công suất. Những phân tích và thiết kế trong chương này là nền tảng quan trọng để đánh giá chính xác đặc tính hoạt động và hiệu suất của mạch thông qua mô phỏng trong chương sau.

Chương 4: PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN VÀ ỔN ĐỊNH HỆ THỐNG

4.1. Tổng quan vai trò của hệ thống điều khiển trong bộ chuyển đổi DC-DC

Trong các bộ chuyển đổi DC-DC, mạch điều khiển giữ vai trò then chốt trong việc ổn định điện áp đầu ra, bất chấp biến động từ tải và nguồn vào. Với cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây – vốn có tính phi tuyến và tương tác từ phức tạp – yêu cầu điều khiển trở nên nghiêm ngặt hơn nhằm đảm bảo hoạt động đồng bộ và chính xác của hai khóa MOSFET (S_1 và S_2).

Hệ thống điều khiển cần đạt các mục tiêu sau:

- Duy trì chuyển mạch mềm (ZVS): Giảm tổn hao tại tần số cao, nâng cao hiệu suất.
- Tránh ngắn mạch tức thời (shoot-through): Thông qua thiết lập khoảng thời gian chết hợp lý giữa hai khóa đối pha.
- Ổn định điện áp đầu ra (V_{out}) Duy trì mức điện áp mong muốn, đáp ứng nhanh trước thay đổi tải và nhiễu đầu vào.

Một khối điều khiển được thiết kế tốt không chỉ nâng cao hiệu suất chuyển đổi mà còn giúp giảm nhiễu điện từ (EMI), hạn chế dao động điện áp và dòng, đồng thời kéo dài tuổi thọ linh kiện công suất và tăng độ tin cậy toàn hệ thống.

4.2. Phương pháp điều khiển PWM

4.2.1. Lý thuyết về điều chế độ rộng xung (PWM) và các dạng sóng

PWM (Pulse Width Modulation) là kỹ thuật điều khiển phổ biến trong các hệ thống điện tử công suất, đặc biệt trong bộ chuyển đổi DC-DC. Kỹ thuật này điều chỉnh điện áp hoặc dòng đầu ra bằng cách thay đổi độ rộng xung điều khiển, trong khi giữ nguyên tần số xung.

Nguyên lý hoạt động dựa trên việc thay đổi chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle) – tức tỉ lệ giữa thời gian dẫn (t_{on}) và thời gian ngắt (t_{off}) của khóa công suất (MOSFET). Sự thay đổi duty cycle làm thay đổi giá trị trung bình của điện áp đầu ra, giúp hệ thống điều khiển linh hoạt và hiệu quả.

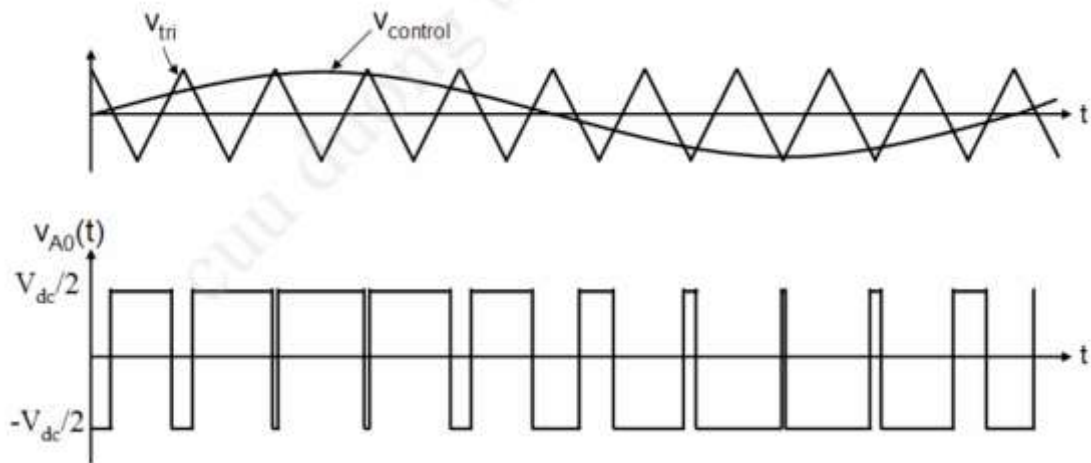
Ưu điểm của PWM:

- Hiệu suất cao nhờ MOSFET hoạt động chủ yếu ở hai trạng thái đóng/ngắt hoàn toàn, giảm tổn hao chuyển mạch.
- Cho phép điều khiển chính xác điện áp đầu ra thông qua điều chỉnh duty cycle.
- Thích hợp cho điều khiển phản hồi, đặc biệt khi kết hợp bộ điều khiển PID nhằm giữ ổn định điện áp dưới điều kiện tải thay đổi.

Trong bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, PWM đóng vai trò điều phối hai khóa MOSFET hoạt động đối pha, nhằm đảm bảo điện áp đầu ra ổn định theo giá trị đặt trước và duy trì điều kiện chuyển mạch mềm.

4.2.2. Nguyên lý tạo PWM bằng phương pháp so sánh tín hiệu

Trong các hệ thống điều khiển sử dụng kỹ thuật điều chế độ rộng xung (PWM), tín hiệu PWM được tạo ra bằng cách so sánh giữa một tín hiệu sóng mang có tần số và biên độ cố định với một điện áp điều khiển $V_{control}$ là đầu ra của bộ điều khiển PID hoặc bộ khuếch đại lỗi (Error Amplifier – EA).



Hình 4.1: Phương pháp điều chế độ rộng xung

Tín hiệu sóng mang thường có dạng răng cưa hoặc tam giác. Quá trình tạo PWM diễn ra như sau:

- Khi $V_{control}$ lớn hơn giá trị tức thời của sóng mang: đầu ra của bộ so sánh ở mức cao, điều này dẫn đến việc kích dẫn khóa bán dẫn (MOSFET).
- Khi $V_{control}$ nhỏ hơn sóng mang: đầu ra ở mức thấp, MOSFET bị ngắt.

Kết quả là một chuỗi xung có độ rộng thay đổi theo tín hiệu điều khiển, trong khi tần số xung được giữ không đổi. Phương pháp này cho phép điều chỉnh chính xác điện áp trung bình đầu ra, nhờ việc kiểm soát chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle) của tín hiệu PWM.

4.2.3. Các dạng PWM phổ biến

Tùy thuộc vào đặc điểm của tín hiệu sóng mang và cách thức so sánh, có hai dạng PWM phổ biến được sử dụng:

- PWM dạng cạnh (Edge-Aligned PWM): Là phương pháp tạo PWM thông qua việc so sánh điện áp điều khiển với sóng răng cưa một chiều. Thời điểm bắt đầu của mỗi xung được cố định tại một biên của chu kỳ (thường là biên trái). Phương pháp này đơn giản, dễ triển khai trên vi điều khiển, tuy nhiên có nhược điểm là gây ra nhiễu cao tần lớn hơn do phổ tín hiệu không đối xứng.
- PWM đối xứng (Center-Aligned PWM): Sử dụng sóng tam giác đối xứng làm sóng mang, với quá trình so sánh diễn ra cả trong pha tăng và pha giảm của sóng. Xung PWM tạo ra có thời điểm bật và tắt đối xứng quanh tâm chu kỳ. Kiểu điều chế này giúp giảm méo tín hiệu, giảm nhiễu điện từ (EMI) và tạo dạng sóng dòng đầu ra mượt hơn, đặc biệt phù hợp với các mạch có hai khóa bán dẫn hoạt động đối pha.

Một số ưu điểm nổi bật của PWM đối xứng gồm:

- Giảm dao động dòng tại đầu ra,
- Phân bố công suất chuyển mạch đều hơn trong chu kỳ,
- Hạn chế nhiễu phổ tần số cao, cải thiện chất lượng tín hiệu.

4.2.4. Cấu trúc xung PWM đối pha

Trong mỗi chu kỳ PWM, hai transistor MOSFET hoạt động theo nguyên lý đối pha, nghĩa là khi một transistor dẫn thì transistor còn lại ngắt và ngược lại. Để tránh hiện tượng trùng dẫn (shoot-through), cần chèn thêm một khoảng thời gian chết (*dead-time*) giữa hai xung điều khiển.



Hình 4.2: Sơ đồ trình tự xung PWM

Trong đó:

- T : chu kỳ xung PWM (ví dụ, $T = 10 \mu s$ tương ứng với $f = 100 \text{ kHz}$),

- D : chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle),
- *Dead-time*: thời gian chết, thông thường trong khoảng 200–400 ns.

4.2.5. Phương pháp tạo PWM bằng vi điều khiển STM32

Vi điều khiển STM32, đặc biệt là các dòng có tích hợp bộ định thời nâng cao (Advanced Control Timer), là lựa chọn phù hợp để tạo tín hiệu PWM đối pha có dead-time chính xác. Bên cạnh đó, khả năng tích hợp bộ chuyển đổi ADC tốc độ cao và bộ xử lý tín hiệu hiệu quả giúp vi điều khiển STM32 thực hiện điều khiển phản hồi như PID một cách linh hoạt và hiệu quả.

Cấu hình tín hiệu PWM đối pha

STM32 cung cấp các bộ định thời nâng cao như TIM1 hoặc TIM8, hỗ trợ chế độ PWM bổ sung (complementary PWM) và cho phép chèn thời gian chết (dead-time) bằng phần cứng thông qua thanh ghi chuyên dụng. Các đặc điểm chính của cấu hình này bao gồm:

- Tín hiệu PWM chính (CH1) điều khiển MOSFET nhánh dưới,
- Tín hiệu PWM bổ sung (CH1N) điều khiển MOSFET nhánh trên,
- Thời gian chết được cấu hình qua thanh ghi BDTR (Break and Dead-Time Register) để tránh hiện tượng trùng dẫn.

Thông số định thời được thiết lập như sau:

- Tần số xung PWM: từ 80 kHz đến 150 kHz, được xác định dựa trên giá trị prescaler (PSC) và ARR (auto-reload register).
- Chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle): điều chỉnh bằng thanh ghi CCR1.
- Thời gian chết (dead-time): cấu hình thông qua BDTR, với giá trị điển hình từ 200–400 ns.

Việc cấu hình các tham số trên có thể thực hiện dễ dàng thông qua công cụ STM32CubeMX hoặc lập trình trực tiếp bằng thư viện HALL.

Đo điện áp đầu ra bằng bộ chuyển đổi ADC

Điện áp đầu ra V_{out} của mạch được đưa vào vi điều khiển thông qua một kênh ADC nội. Để đảm bảo an toàn và tương thích mức điện áp, tín hiệu V_{out} được chia áp trước khi đưa vào chân ADC (ví dụ: PA1 tương ứng với ADC1_IN1). Các bước chính trong quá trình đo bao gồm:

- Khởi tạo ADC ở chế độ lấy mẫu liên tục hoặc theo ngắt định kỳ,
- Thiết lập độ phân giải ADC (12 bit hoặc 16 bit, tùy dòng STM32),

- Chuyển đổi giá trị ADC sang điện áp thực tế dựa trên điện áp tham chiếu và độ phân giải,
- Cập nhật giá trị điện áp để đưa vào bộ điều khiển PID.

Tần số lấy mẫu ADC được lựa chọn sao cho phù hợp với tốc độ đáp ứng của hệ thống, thường trong khoảng 5–10 kHz.

Điều khiển phản hồi bằng bộ điều khiển PID:

Giá trị điện áp đầu ra sau khi đo được sử dụng để tính sai số điều khiển:

$$e(t) = V_{ref} - V_{out}$$

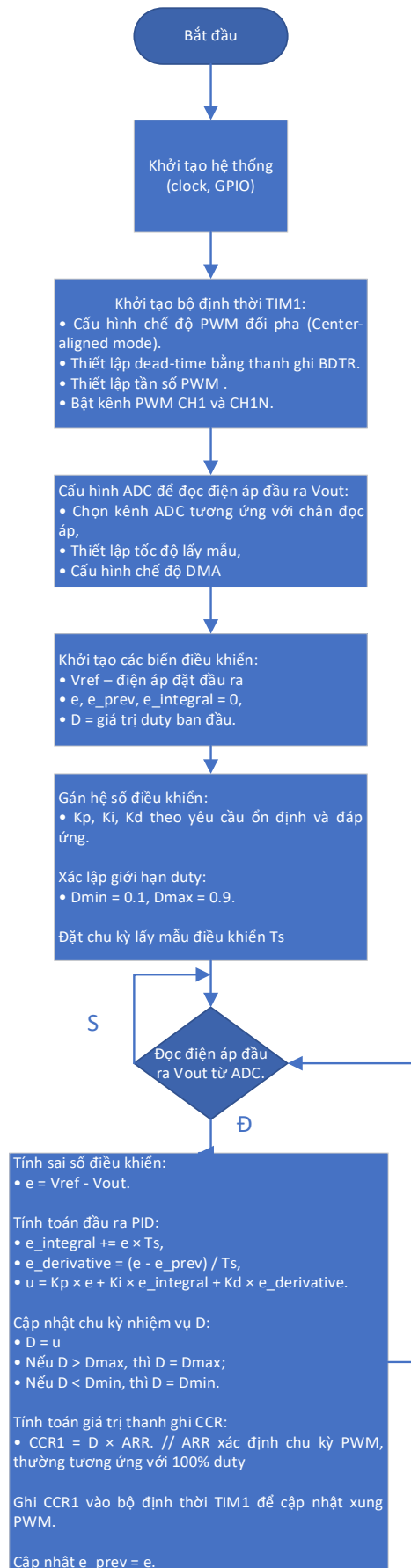
Sai số này được đưa vào bộ điều khiển PID nhằm tính toán giá trị điều khiển $u(t)$, tỷ lệ với chu kỳ nhiệm vụ D . Công thức tổng quát của PID liên tục là:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Trong môi trường vi điều khiển, bộ điều khiển PID thường được triển khai ở dạng rời rạc theo chu kỳ lấy mẫu T_s , với công thức:

$$u[n] = u[n-1] + K_p(e[n] - e[n-1]) + K_i e[n] T_s + K_d \frac{(e[n] - 2e[n-1] + e[n-2]))}{T_s}$$

Giá trị $u[n]$ sau đó được giới hạn trong khoảng $[0,1]$ (tương ứng 0–100%) và dùng để cập nhật thanh ghi $CCR1$, nhằm thay đổi độ rộng xung PWM tương ứng với điều kiện hoạt động tức thời.



Hình 4.3: Lưu đồ thuật toán điều khiển PWM cho bộ biến đổi DC-DC sử dụng STM32

4.2.6. Ảnh hưởng của thông số PWM đến hoạt động mạch

Bảng 4.1: Ảnh hưởng của các thông số PWM đến hoạt động mạch

Thông số	Ảnh hưởng
f (tần số chuyển mạch)	Tăng f giúp giảm kích thước linh kiện nhưng làm tăng tổn hao chuyển mạch và phát nhiệt.
D (chu kỳ nhiệm vụ)	Điều khiển trực tiếp điện áp đầu ra V_{out} .
Dead-time	Nếu quá nhỏ dẫn đến nguy cơ trùng dẫn còn nếu quá lớn lại dẫn đến giảm hiệu suất chuyển đổi.

4.2.7. Kết luận

Phương pháp điều chế độ rộng xung (PWM) đóng vai trò then chốt trong quá trình điều khiển hoạt động của bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép. Việc tạo ra hai tín hiệu PWM đối pha, thiết lập khoảng thời gian chết (dead-time) hợp lý giữa các xung và điều chỉnh chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle) dựa trên điện áp đầu ra V_{out} , là những yếu tố cốt lõi giúp hệ thống đạt được các mục tiêu điều khiển như: ổn định điện áp, giảm tổn hao chuyển mạch, nâng cao hiệu suất tổng thể và cải thiện độ tin cậy khi vận hành.

Trong thực tế triển khai, vi điều khiển STM32 là một giải pháp điều khiển phù hợp nhờ tính linh hoạt cao, tích hợp đầy đủ các ngoại vi phần cứng như bộ định thời (TIM), bộ chuyển đổi tương tự – số (ADC), và khả năng xử lý thuật toán PID trực tiếp trên nền tảng phần mềm. Việc sử dụng STM32 cho phép tạo ra các tín hiệu PWM chính xác với độ phân giải cao, đồng thời dễ dàng cấu hình dead-time bằng thanh ghi chuyên dụng (BDTR), từ đó đảm bảo hoạt động an toàn và hiệu quả cho các cặp khóa bán dẫn làm việc đối pha.

Tổng thể, phương pháp điều khiển PWM sử dụng STM32 mang lại sự cân bằng tối ưu giữa hiệu suất, độ chính xác điều khiển và tính linh hoạt triển khai, đặc biệt thích hợp cho các ứng dụng DC-DC công suất cao có yêu cầu chuyển mạch mềm và tối ưu hóa tổn hao năng lượng.

4.3. Nguyên lý chuyển mạch mềm (Soft Switching)

4.3.1. Khái niệm chuyển mạch mềm

Chuyển mạch mềm (Soft Switching) là một kỹ thuật quan trọng được ứng dụng trong các bộ nguồn xung hiện đại nhằm giảm thiểu tổn hao công suất xảy ra trong quá trình chuyển trạng thái của các khóa bán dẫn. Trong điều kiện chuyển mạch cứng (Hard Switching), các linh kiện như MOSFET hoặc diode phải đóng hoặc ngắt khi vẫn tồn tại đồng thời điện áp và dòng điện đáng kể trên hai cực. Điều này dẫn đến việc tiêu tán năng

lượng tức thời dưới dạng nhiệt, gây suy giảm hiệu suất tổng thể, làm tăng nhiệt độ hoạt động và có thể ảnh hưởng đến độ bền linh kiện.

Ngược lại, trong kỹ thuật chuyển mạch mềm, điều kiện chuyển trạng thái của các linh kiện được điều chỉnh sao cho tại thời điểm đóng hoặc ngắt, điện áp hoặc dòng điện gần bằng không. Nhờ đó, tổn hao chuyển mạch được giảm đáng kể, đặc biệt hữu ích trong các hệ thống hoạt động ở tần số cao hoặc công suất lớn.

Hai kỹ thuật chuyển mạch mềm phổ biến bao gồm:

- Chuyển mạch tại điện áp bằng không (Zero Voltage Switching – ZVS): Khóa bán dẫn thực hiện quá trình đóng tại thời điểm điện áp trên hai cực gần bằng 0, giúp giảm đáng kể tổn hao đóng mạch.
- Chuyển mạch tại dòng điện bằng không (Zero Current Switching – ZCS): Khóa bán dẫn được ngắt khi dòng điện qua linh kiện gần bằng 0, từ đó hạn chế tổn hao ngắt mạch và dao động dòng.

Việc áp dụng kỹ thuật chuyển mạch mềm không chỉ cải thiện hiệu suất năng lượng của bộ chuyển đổi mà còn góp phần giảm nhiễu điện từ (EMI), giảm kích thước tản nhiệt và nâng cao tuổi thọ thiết bị công suất. Đây là yếu tố then chốt trong thiết kế các bộ nguồn DC-DC hiệu suất cao, đặc biệt là với những cấu trúc có tính phức tạp như mạch sử dụng cuộn cảm ghép.

4.3.2. Lý thuyết chuyển mạch ZVS và ZCS

Trong các bộ nguồn xung hiện đại, đặc biệt là các bộ chuyển đổi DC-DC hoạt động ở tần số cao, tổn hao công suất trong quá trình chuyển mạch trở nên đáng kể và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất cũng như độ tin cậy của hệ thống. Để giảm thiểu tổn hao này, các kỹ thuật chuyển mạch mềm (soft switching) được áp dụng, trong đó phổ biến nhất là kỹ thuật chuyển mạch điện áp bằng không (ZVS – Zero Voltage Switching) và chuyển mạch dòng điện bằng không (ZCS – Zero Current Switching).

Kỹ thuật ZVS cho phép thực hiện quá trình đóng của khóa bán dẫn (chẳng hạn như MOSFET) khi điện áp giữa hai cực của khóa V_{ds} đã giảm về gần 0V. Việc này giúp tránh được tổn hao do hiện tượng nạp điện tích trong vùng kênh khi điện áp vẫn còn cao, từ đó làm giảm nhiệt lượng tỏa ra và kéo dài tuổi thọ linh kiện. Để đạt được điều kiện ZVS, hệ thống thường cần có dòng hồi tiếp hoặc mạch cộng hưởng phụ trợ nhằm kéo điện áp của khóa xuống thấp trước thời điểm dẫn.

Ngược lại, trong kỹ thuật ZCS, việc ngắt khóa bán dẫn được thực hiện khi dòng điện qua khóa i_{ds} đã giảm về 0. Điều này giúp loại bỏ tổn hao do năng lượng tích trữ trong các phần tử cảm ứng, đồng thời hạn chế sự hình thành xung điện áp đột biến. Tuy nhiên, trong các mạch DC-DC thông thường, điều kiện ZCS ít khi xảy ra một cách tự nhiên và thường yêu cầu thêm mạch cộng hưởng hoặc cấu trúc chuyên biệt hỗ trợ.

Cả hai kỹ thuật ZVS và ZCS đều nhằm mục tiêu nâng cao hiệu suất chuyển đổi và giảm thiểu tổn hao công suất, nhưng lựa chọn kỹ thuật phù hợp phụ thuộc vào đặc tính của

linh kiện công suất được sử dụng và cấu trúc mạch cụ thể. Trong đồ án này, việc điều khiển phối hợp chính xác giữa hai khóa công suất S_1 và S_2 cùng với đặc điểm cộng hưởng nội tại của cuộn cảm ghép ba cuộn dây tạo điều kiện thuận lợi để đạt được ZVS, từ đó tăng hiệu suất tổng thể của bộ chuyển đổi.

4.3.3. So sánh ZVS và ZCS

Bảng 4.2: So sánh hai phương pháp chuyển mạch mềm.

Đặc điểm	ZVS	ZCS
Điện áp tại thời điểm đóng	≈ 0 V	$\neq 0$
Dòng điện tại thời điểm mở	$\neq 0$	≈ 0
Phù hợp cho	MOSFET	IGBT, diode
Phổ biến trong	Bộ nghịch lưu, DC-DC	Bộ nạp cảm ứng, nguồn cộng hưởng

4.3.4. Ứng dụng chuyển mạch mềm trong mạch đề xuất

Trong bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, quá trình điều khiển hai khóa công suất theo chế độ PWM đối pha đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra điều kiện chuyển mạch mềm (ZVS) một cách tự nhiên. Khi một trong hai MOSFET ngắt, năng lượng từ cuộn cảm vẫn tiếp tục được giải phóng do tính chất cảm ứng, dẫn đến việc dòng điện duy trì chảy qua mạch. Chính dòng điện này tạo ra hiệu ứng kéo điện áp trên cực D-S của khóa MOSFET còn lại giảm về gần 0V.

Tại thời điểm đó, khi tín hiệu điều khiển kích hoạt để bật khóa MOSFET, quá trình đóng diễn ra trong điều kiện điện áp gần bằng không ($V_{ds} \approx 0$), do đó tránh được tổn hao năng lượng vốn thường xảy ra trong các quá trình chuyển mạch cứng. Việc đạt được trạng thái ZVS này không đòi hỏi mạch cộng hưởng phụ trợ như trong các cấu hình phức tạp khác, mà là kết quả của sự tương tác nội tại giữa các cuộn dây thông qua liên kết từ.

Đây là một ưu điểm nổi bật của cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép: khả năng khai thác hiệu ứng cộng hưởng tự nhiên giữa dòng điện và điện áp để hỗ trợ chuyển mạch mềm. Nhờ đó, bộ chuyển đổi không chỉ đạt được hiệu suất cao mà còn giảm đáng kể tổn hao chuyển mạch và bức xạ nhiễu điện từ.

4.3.5. Ưu điểm khi áp dụng chuyển mạch mềm:

Việc áp dụng kỹ thuật chuyển mạch mềm trong các bộ chuyển đổi DC-DC, đặc biệt ở tần số cao, mang lại nhiều lợi ích đáng kể về hiệu suất và độ tin cậy hệ thống:

- Giảm tổn hao chuyển mạch: MOSFET được đóng/ngắt khi điện áp hoặc dòng gần bằng 0, giúp giảm đáng kể tổn hao chuyển mạch – vốn chiếm phần lớn công suất tiêu tán ở tần số cao.
- Giảm nhiễu điện từ (EMI): Quá trình chuyển mạch diễn ra êm hơn làm giảm tốc độ thay đổi dòng và áp (dv/dt , di/dt), từ đó hạn chế phát sinh nhiễu EMI ảnh hưởng đến mạch điều khiển và tải.
- Cho phép tăng tần số làm việc: Tổn hao thấp giúp hệ thống vận hành ổn định ở tần số cao hơn mà không gây quá nhiệt, từ đó giảm kích thước các linh kiện thụ động như cuộn cảm và tụ điện.
- Tăng tuổi thọ linh kiện: Giảm ứng suất nhiệt tại thời điểm đóng/ngắt giúp các linh kiện bán dẫn hoạt động ổn định hơn, kéo dài tuổi thọ và tăng độ tin cậy hệ thống.
- Cải thiện hiệu suất tổng thể: Đặc biệt hiệu quả trong các ứng dụng công suất nhỏ đến trung bình, chuyển mạch mềm giúp nâng cao hiệu suất chuyển đổi và giảm tiêu hao năng lượng.

4.3.6. Hạn chế và lưu ý khi áp dụng chuyển mạch mềm

Mặc dù chuyển mạch mềm mang lại nhiều lợi ích về hiệu suất và độ tin cậy, việc triển khai thực tế vẫn gặp một số thách thức đáng lưu ý:

- Phụ thuộc vào dòng tải: ZVS thường chỉ đạt được khi dòng tải đủ lớn để tạo ra dòng hồi thích hợp. Với tải nhẹ, dòng qua cuộn cảm không đủ để hạ điện áp MOSFET xuống gần 0 V, khiến ZVS không xảy ra hoặc kém hiệu quả.
- Yêu cầu điều chỉnh dead-time chính xác: Thời gian chết (dead-time) giữa hai xung PWM đối pha phải được thiết lập hợp lý. Dead-time quá ngắn dễ gây hiện tượng trùng dẫn (shoot-through); quá dài có thể khiến MOSFET đóng khi điện áp chưa giảm đủ, làm mất ZVS.
- Độ chính xác trong thiết kế cuộn cảm ghép: Việc đạt ZVS phụ thuộc vào đặc tính cộng hưởng giữa dòng và áp. Do đó, cuộn cảm ghép ba cuộn dây cần được tính toán và chế tạo chính xác với hệ số ghép từ phù hợp. Sai lệch về tỉ số vòng dây hoặc từ thông liên kết có thể làm giảm hiệu quả chuyển mạch hoặc gây mất cân bằng năng lượng.

4.3.7. Kết luận

Chuyển mạch mềm là một giải pháp kỹ thuật quan trọng nhằm giảm tổn hao công suất, nâng cao hiệu suất và kéo dài tuổi thọ linh kiện trong các bộ chuyển đổi DC-DC hiện đại. Trong cấu trúc sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, điều kiện ZVS có thể đạt được một cách tự nhiên nhờ quá trình cộng hưởng nội tại giữa các thành phần từ – dòng – áp trong mạch. Điều này giúp loại bỏ sự cần thiết của các mạch cộng hưởng phụ trợ, từ đó đơn giản hóa thiết kế, giảm chi phí và nâng cao tính khả thi trong ứng dụng thực tế. Với ưu điểm nổi bật này, cấu trúc đề xuất cho thấy tiềm năng ứng dụng mạnh mẽ trong các hệ thống điện năng chất lượng cao, đặc biệt trong lĩnh vực chuyển đổi và quản lý năng lượng tái tạo.

4.4. Tổng quan và so sánh các bộ chuyển đổi DC-DC liên quan

Trong lĩnh vực điện tử công suất, nhiều cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC đã được nghiên cứu và ứng dụng nhằm đáp ứng các yêu cầu đa dạng trong biến đổi và quản lý năng

lượng. Mỗi cấu trúc đều có những đặc điểm riêng về chức năng, hiệu suất, mức độ phức tạp và khả năng ứng dụng thực tế. Để làm rõ hơn các ưu điểm nổi bật của bộ chuyển đổi sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây trong đề án này, mục này sẽ trình bày tổng quan lý thuyết và so sánh định lượng với ba cấu trúc DC-DC phổ biến: Boost, Flyback và Cuk.

4.4.1. Bộ chuyển đổi Boost (nâng áp)

Boost là một trong những cấu trúc chuyển đổi DC-DC cơ bản nhất, thường được sử dụng trong các hệ thống cần tăng điện áp đầu ra so với đầu vào. Cấu trúc mạch đơn giản, gồm một khóa công suất (MOSFET), một cuộn cảm đầu vào, một diode và một tụ điện lọc đầu ra.

Nguyên lý hoạt động:

- Khi MOSFET dẫn, dòng điện từ nguồn đi qua cuộn cảm và tích lũy năng lượng từ trường.
- Khi MOSFET ngắt, năng lượng tích trữ trong cuộn cảm được giải phóng thông qua diode đến tải, tạo ra điện áp đầu ra lớn hơn điện áp nguồn.

Đặc điểm:

- Tăng áp tuyến tính theo chu kỳ nhiệm vụ (D),
- Không có cách ly điện giữa đầu vào và đầu ra,
- Dòng đầu vào không liên tục, dễ gây nhiễu điện từ (EMI),
- Không thể đạt hệ số tăng áp lớn vì D không thể tiến sát 1 (giới hạn lý thuyết về ổn định và tổn hao).

4.4.2. Bộ chuyển đổi Flyback

Flyback là cấu trúc chuyển đổi DC-DC có cách ly điện đơn giản và được sử dụng rộng rãi trong các bộ nguồn AC-DC công suất thấp. Mạch sử dụng một biến áp có khe hở từ để lưu trữ năng lượng, cùng với một MOSFET, diode chỉnh lưu và tụ lọc.

Nguyên lý hoạt động:

- Khi MOSFET dẫn, năng lượng được tích trong lõi từ thông qua cuộn sơ cấp.
- Khi MOSFET ngắt, năng lượng được truyền sang cuộn thứ cấp và cung cấp cho tải qua diode chỉnh lưu.

Đặc điểm:

- Có cách ly điện áp nhờ sử dụng biến áp,
- Có thể tăng hoặc giảm áp tùy thuộc vào tỉ số vòng dây ($N_p: N_s: N_t$),

- Dòng sơ cấp và thứ cấp không đồng thời, gây khó khăn trong lọc dòng liên tục,
- Tổn hao chuyển mạch cao hơn Boost, nhiều điện từ lớn hơn do hoạt động gián đoạn và dòng xung.

4.4.3. So sánh định lượng với mạch đề xuất

Bảng sau đây trình bày so sánh định lượng giữa các bộ chuyển đổi phổ biến và mạch đề xuất sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây:

Tiêu chí	Boost	Flyback	Mạch đề xuất sử dụng cuộn cảm ghép
Chức năng	Tăng áp	Tăng/Giảm áp	Tăng áp lớn
Cách ly	Không	Có	Không
Dòng đầu vào	Không liên tục	Không liên tục	Liên tục (tự nhiên)
MOSFET cần thiết	1	1	2 (hoạt động đối pha)
Tổn hao chuyển mạch	Cao	Cao	Thấp (nhờ ZVS tự nhiên)
Dạng sóng đầu ra	Gợn cao	Gợn cao	Mượt, ổn định
Hiệu suất thực nghiệm	~85–90%	~80–88%	~90–96%
Phức tạp điều khiển	Thấp	Thấp	Trung bình

Bảng 4.3: So sánh các mạch truyền thống với mạch đề xuất

4.4.4. Kết luận

Từ các phân tích lý thuyết và so sánh định lượng nêu trên, có thể thấy bộ chuyển đổi sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây sở hữu nhiều đặc điểm ưu việt so với các cấu trúc truyền thống. Cụ thể:

- Có khả năng đạt hệ số tăng áp lớn mà không cần chu kỳ nhiệm vụ tiệm cận 1 như Boost,
- Dòng đầu vào liên tục giúp giảm nhiễu điện từ và cải thiện chất lượng nguồn,
- Chuyển mạch mềm (ZVS) đạt được một cách tự nhiên, không cần thêm mạch cộng hưởng phụ trợ,
- Kết cấu cuộn cảm ghép đơn giản hơn so với biến áp của Flyback, dễ chế tạo hơn trong thực tế,

- Điều khiển PWM đối pha bằng vi điều khiển hiện đại như STM32 được thực hiện dễ dàng, không yêu cầu thuật toán điều khiển phức tạp.

Những ưu điểm trên cho thấy cấu trúc mạch đề xuất là lựa chọn phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao, gọn nhẹ và ổn định. Tiêu biểu có thể kể đến như hệ thống điện mặt trời độc lập, bộ sạc pin lithium công suất vừa, nguồn cấp trước cho thiết bị viễn thông hoặc các hệ thống khởi động trong xe điện.

4.5. Kết luận chương 4

Chương 4 đã trình bày các nội dung cốt lõi liên quan đến hệ thống điều khiển của bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây, bao gồm nguyên lý điều chế PWM, kỹ thuật điều khiển bằng vi điều khiển STM32, đặc tính chuyển mạch mềm (ZVS), cũng như đánh giá hiệu quả chuyển mạch và điều khiển qua phân tích so sánh với các cấu trúc DC-DC phổ biến hiện nay.

Kết quả cho thấy việc sử dụng PWM đối pha kết hợp thời gian chết hợp lý không chỉ đảm bảo an toàn đóng/ngắt hai khóa công suất mà còn tạo điều kiện đạt chuyển mạch mềm tự nhiên, một yếu tố then chốt giúp giảm tổn hao và nâng cao hiệu suất. Đồng thời, với đặc điểm liên kết từ của cuộn cảm ghép, mạch đề xuất thể hiện khả năng cộng hưởng dòng-áp nội tại mà không cần mạch cộng hưởng phụ trợ. Điều này giúp tối giản cấu trúc phần cứng, giảm chi phí chế tạo nhưng vẫn đảm bảo hiệu quả cao.

So với các cấu trúc DC-DC truyền thống như Boost, Flyback mạch chuyển đổi đề xuất tỏ ra vượt trội ở nhiều tiêu chí: hiệu suất, dạng sóng đầu ra, khả năng đạt ZVS và tính ổn định dòng vào. Nhờ đó, mạch phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi nguồn ổn định, hiệu suất cao, và có yêu cầu tối ưu về thể tích, chẳng hạn như hệ thống năng lượng tái tạo, thiết bị di động công suất vừa, hoặc hệ thống nguồn phân tán.

Chương 4 đóng vai trò làm rõ tính khả thi và tiềm năng ứng dụng của cấu trúc đề xuất, là cơ sở để rút ra kết luận tổng thể về giá trị kỹ thuật của đề tài trong chương tiếp theo.

Chương 5: PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT

5.1. Mục đích mô phỏng

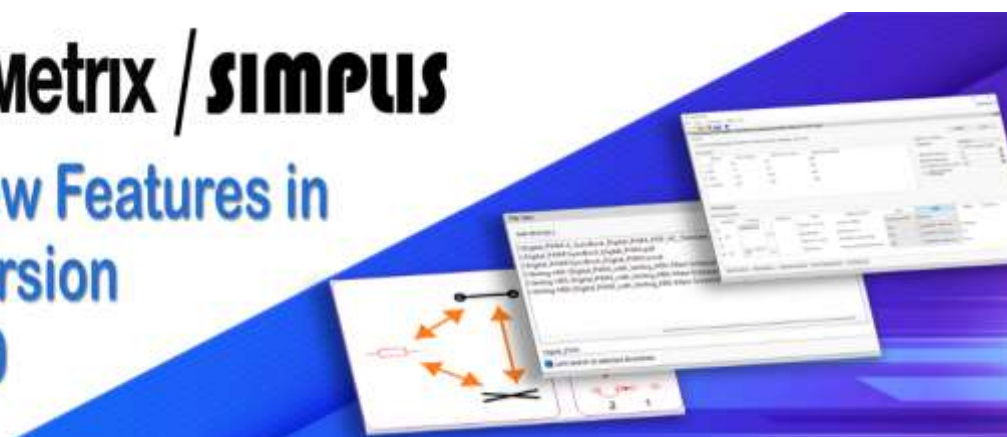
Mô phỏng mạch là bước quan trọng nhằm kiểm chứng lại toàn bộ quá trình thiết kế và phân tích lý thuyết đã trình bày ở các chương trước, đồng thời giúp đánh giá hiệu quả thực tế của bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây trong điều kiện vận hành giả lập. Mục tiêu chính của việc mô phỏng là quan sát trực tiếp các dạng sóng điện áp và dòng điện tại các điểm đặc trưng của mạch như khóa chuyển mạch, cuộn cảm, tụ điện và tải, qua đó xác định khả năng đạt chuyển mạch mềm, mức độ ổn định điện áp đầu ra và hiệu suất chuyển đổi. Ngoài ra, mô phỏng còn giúp đánh giá hiện tượng dao động điện áp, độ gợn dòng và kiểm tra xem các thông số thiết kế như dung lượng tụ, dòng định mức linh kiện, hệ số khuếch đại điện áp có đáp ứng yêu cầu hay không. Kết quả mô phỏng không chỉ là cơ sở để xác nhận tính đúng đắn của mô hình lý thuyết mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc dự đoán hành vi thực tế của mạch khi triển khai phần cứng, từ đó làm cơ sở cho việc lựa chọn linh kiện, điều chỉnh thông số và mở rộng nghiên cứu trong các ứng dụng thực tế.

5.2. Giới thiệu về phần mềm mô phỏng Simetrix/SimPLIS:

Simetrix/SimPLIS là một công cụ mô phỏng mạch điện tử mạnh mẽ, tích hợp hai môi trường mô phỏng chính là Simetrix và SimPLIS, phù hợp cho việc thiết kế và phân tích các hệ thống điện tử tương tự, hỗn hợp, và mạch nguồn chuyển mạch. Simetrix tập trung vào mô phỏng mạch SPICE truyền thống, hỗ trợ phân tích các hệ thống tương tự (analog) và hỗn hợp. Công cụ này cho phép mô phỏng chi tiết các tín hiệu liên tục, thiết kế và phân tích các mạch khuếch đại, mạch lọc, cùng các hệ thống phức tạp, với thư viện linh kiện phong phú từ các nhà sản xuất. Simetrix hỗ trợ các phương pháp phân tích như Transient Analysis, AC Analysis, DC Analysis, cùng các công cụ phân tích tín hiệu nhiễu và đánh giá hiệu suất hệ thống. Trong khi đó, SimPLIS được tối ưu hóa cho mạch nguồn chuyển mạch (SMPS) với phương pháp mô phỏng tuyến tính từng phần (piecewise linear simulation), giúp mô phỏng nhanh các mạch chuyển mạch như Buck, Boost, Flyback, đồng thời hỗ trợ tối ưu hóa tham số thiết kế, đánh giá hiệu suất và độ ổn định của nguồn chuyển mạch. SimPLIS nổi bật với tốc độ mô phỏng nhanh hơn SPICE trong các mạch chuyển mạch lớn, đơn giản hóa việc thiết kế và phân tích vòng điều khiển, cùng khả năng tự động hóa các tính toán phức tạp. Với sự tích hợp hai môi trường mô phỏng trong một giao diện, thư viện linh kiện phong phú, giao diện thân thiện, và khả năng hỗ trợ phân tích nâng cao như phân tích ổn định, vòng điều khiển, nhiễu, và hiệu suất, Simetrix/SimPLIS là một công cụ lý tưởng cho các kỹ sư thiết kế điện tử, đặc biệt trong lĩnh vực nguồn chuyển mạch và mạch tín hiệu tương tự. Công cụ này còn tương thích tốt với các phần mềm thiết kế như MATLAB/Simulink và LTspice, mang lại sự tiện lợi và hiệu quả cao cho người dùng.

SiMetrix / SimPLIS

**New Features in
Version
9.0**



Hình 5.1: Hình ảnh phần mềm Simetrix/SimPLIS.

5.3. Bảng lựa chọn thiết bị:

Bảng 5.1. Bảng thông số đầu vào

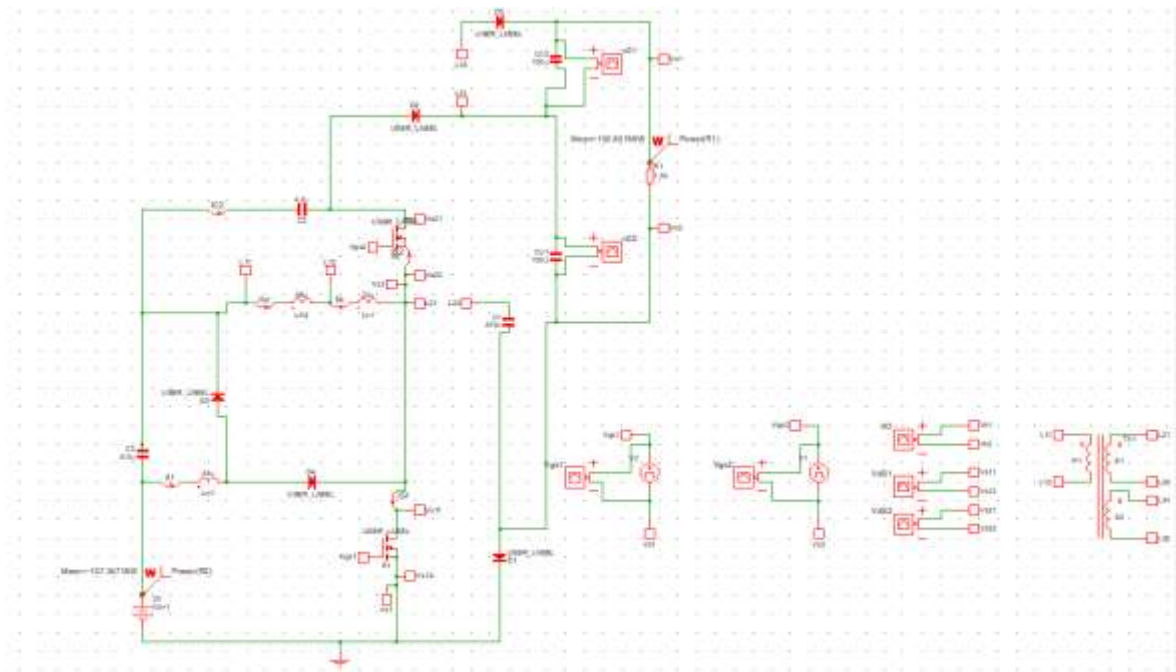
Thành phần	Thông số
P	100 W
V_{in}	25 V
V_o	400 V
f	100 kHz

Bảng 5.2. Bảng thông số thực nghiệm để tiến hành mô phỏng.

Thành phần	Thông số
L_1	$44 \mu H$
L_m	$85 \mu H$
L_k	$23 \mu H$
C_{o1}	$100 \mu F$
C_{o2}	$100 \mu F$
C_1	$6.5 \mu F$
C_2	$4.2 \mu F$
C_3	$0.875 \mu F$

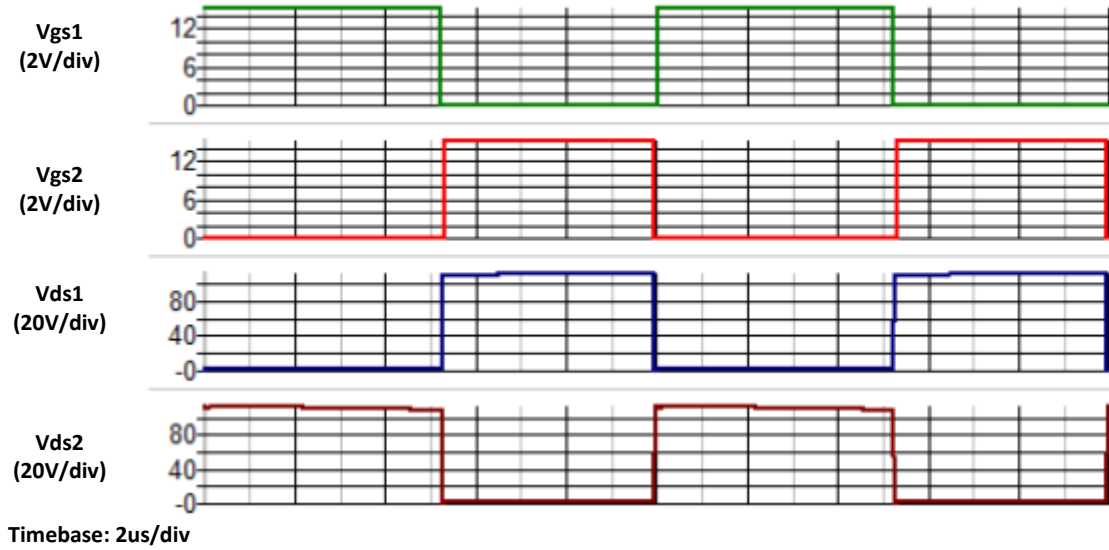
5.4. Mô phỏng và kết quả:

5.4.1. Sơ đồ mô phỏng hệ thống trên phần mềm Simetrix/SimPLIS:

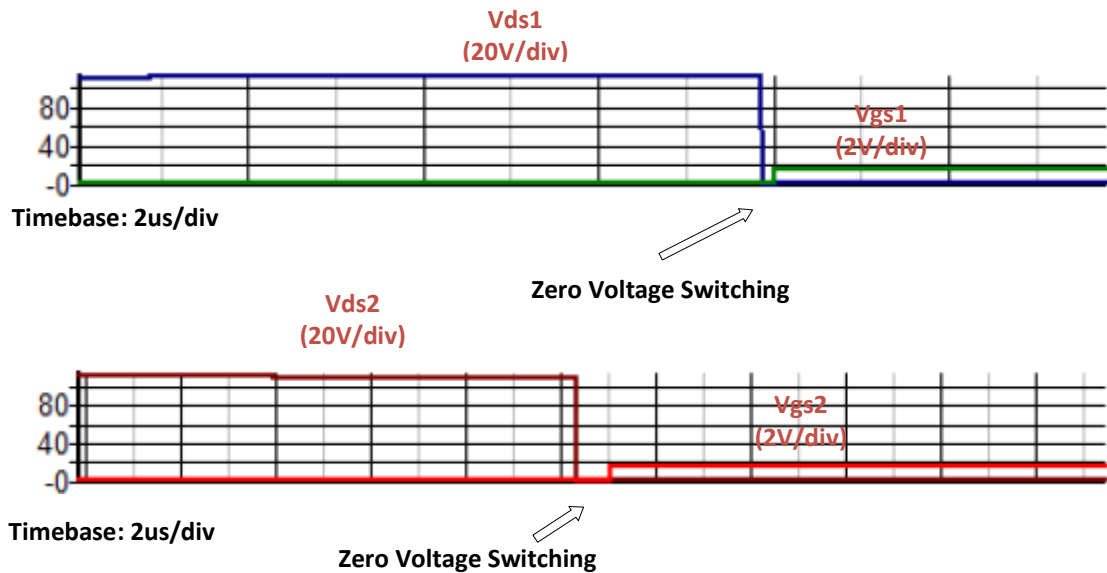


Hình 5.2: Hình ảnh mô phỏng sơ đồ nguyên lý của bộ chuyển đổi.

5.4.2. Kết quả mô phỏng:



Hình 4.3: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng V_{gs1} , V_{ds1} , V_{gs2} , V_{ds2} .



Hình 5.4: Hình ảnh kết quả phóng to mô phỏng dạng sóng V_{gs1} , V_{ds1} , V_{gs2} , V_{ds2} .

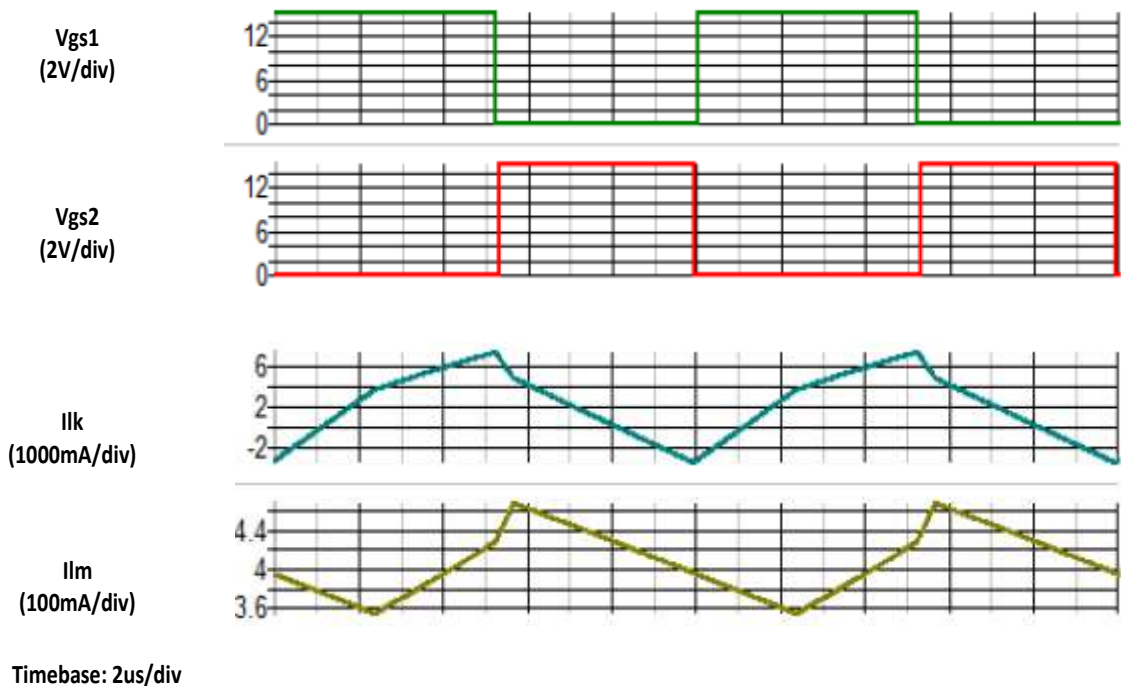
Nhận xét: Dễ dàng nhận thấy rằng điện áp V_{ds1} , V_{ds2} đều giảm về xấp xỉ 0V ngay trước khi các công tắc S_1 , S_2 lần lượt được kích dẫn trở lại. Điều này cho thấy rõ ràng rằng các khóa bán dẫn hoạt động trong điều kiện Zero Voltage Switching (ZVS) – tức là chuyển mạch được thực hiện tại thời điểm điện áp giữa hai cực của MOSFET gần như bằng không. Đây là một điều kiện quan trọng trong thiết kế các bộ chuyển đổi công suất hoạt động ở tần số cao nhằm giảm thiểu tổn hao năng lượng do quá trình đóng/ngắt công tắc.

Việc đạt được ZVS cho cả hai công tắc không chỉ chứng minh rằng mạch đã thực hiện đúng nguyên lý chuyển mạch mềm (soft switching) như mục tiêu thiết kế ban đầu, mà còn mang lại nhiều lợi ích thực tiễn. Trước hết, nó giúp giảm đáng kể tổn hao chuyển mạch, vốn là nguyên nhân chính gây gia tăng nhiệt độ linh kiện, ảnh hưởng đến độ tin cậy và tuổi thọ của MOSFET. Thứ hai, chuyển mạch mềm cũng góp phần giảm thiểu

nhiễu điện từ (EMI) phát sinh trong quá trình chuyển trạng thái, từ đó cải thiện chất lượng tín hiệu và khả năng tương thích điện từ của hệ thống. Cuối cùng, điều kiện ZVS còn cho phép tăng tần số chuyển mạch lên cao hơn mà không làm giảm hiệu suất tổng thể – một yếu tố quan trọng khi thiết kế các bộ nguồn nhỏ gọn, mật độ công suất cao.

Kết quả này cho thấy cấu trúc mạch sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây đã hỗ trợ một cách hiệu quả cho việc tự tạo điều kiện ZVS mà không cần thêm mạch cộng hưởng phụ trợ, qua đó khẳng định ưu điểm vượt trội của giải pháp kỹ thuật được đề xuất trong việc tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi và giảm tổn hao trong các bộ nguồn DC-DC hiện đại.

5.4.2.1. Dạng sóng của i_{Lm} và i_{Lk} .



Hình 5.5: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{Lm} và i_{Lk} .

Nhận xét: Hình mô phỏng thể hiện các dạng sóng quan trọng trong quá trình vận hành của bộ chuyển đổi, bao gồm: tín hiệu điều khiển cổng của hai công tắc MOSFET V_{gs1} , V_{gs2} và dòng điện qua cuộn cảm chính i_{Lk} và dòng từ hóa trong lõi cuộn cảm ghép i_{Lm} . Tín hiệu điều khiển V_{gs1} và V_{gs2} có dạng xung vuông đối pha, điều khiển luân phiên hai công tắc S_1 và S_2 . Khoảng thời gian giữa hai xung thể hiện rõ sự hiện diện của dead-time, đảm bảo hai MOSFET không dẫn đồng thời và tránh hiện tượng ngắn mạch xuyên dẫn. Đây là yếu tố quan trọng giúp mạch đạt điều kiện chuyển mạch mềm (soft switching), hỗ trợ giảm tổn hao đóng cắt và nâng cao hiệu suất chuyển đổi.

Dòng điện i_{Lk} qua cuộn cảm chính có dạng gần tuyến tính, dao động đều theo chu kỳ và không bị gián đoạn, thể hiện rõ chế độ làm việc dẫn liên tục (CCM) của mạch. Trong khoảng thời gian S_1 dẫn, dòng i_{Lk} tăng dần nhờ năng lượng được tích vào cuộn cảm; khi S_2 dẫn, dòng này giảm tuyến tính do năng lượng được truyền ra tải. Dạng sóng dòng này

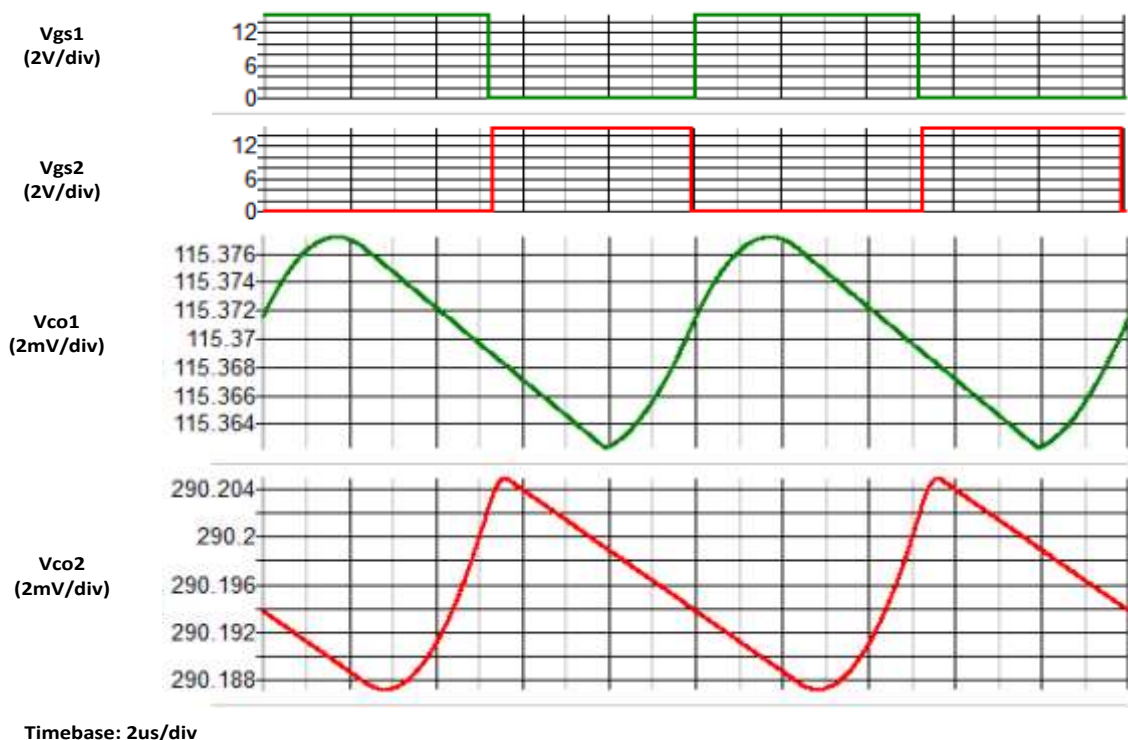
chứng minh quá trình trao đổi năng lượng giữa các chu kỳ diễn ra đều đặn và ổn định, góp phần giữ vững điện áp đầu ra.

Đối với dòng từ hóa i_{Lm} , dạng sóng thu được cho thấy biên độ dao động nhỏ và biến thiên chậm, đối xứng xung quanh một giá trị trung bình ổn định. Điều này phản ánh rằng lõi từ của cuộn cảm ghép đang làm việc trong vùng tuyến tính, không xảy ra bão hòa từ và duy trì được tính tuyến tính của hệ thống. Sự phân bố dòng từ hóa đều đặn này không chỉ giúp duy trì hiệu quả lưu trữ và trao đổi năng lượng giữa các cuộn dây, mà còn là yếu tố hỗ trợ đạt được Zero Voltage Switching (ZVS) tại thời điểm chuyển mạch.

Thực tế, khi quan sát toàn bộ chuỗi tín hiệu điều khiển và dòng điện, dễ dàng nhận thấy điện áp V_{ds1} và V_{ds2} đều giảm về gần 0V trước thời điểm các công tắc được bật trở lại. Điều này khẳng định rằng mạch đạt được chuyển mạch mềm theo đúng mục tiêu thiết kế ban đầu. Nhờ đó, tổn hao chuyển mạch được giảm thiểu đáng kể, giúp MOSFET hoạt động mát hơn, tăng tuổi thọ và cải thiện hiệu suất toàn hệ thống. Đồng thời, quá trình chuyển trạng thái êm hơn cũng làm giảm phát xạ nhiễu điện từ (EMI), cải thiện tính ổn định và độ tin cậy cho toàn bộ mạch nguồn.

Tóm lại, các dạng sóng mô phỏng cho thấy rõ ràng mạch hoạt động ổn định, hiệu quả, đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về điều khiển PWM, dòng dẫn liên tục, và chuyển mạch mềm. Điều này chứng minh tính đúng đắn của mô hình mạch đề xuất sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây và cho thấy tiềm năng ứng dụng thực tế cao trong các hệ thống yêu cầu hiệu suất và độ tin cậy lớn.

5.4.2.2. Dạng sóng của V_{c01} , V_{c02} .



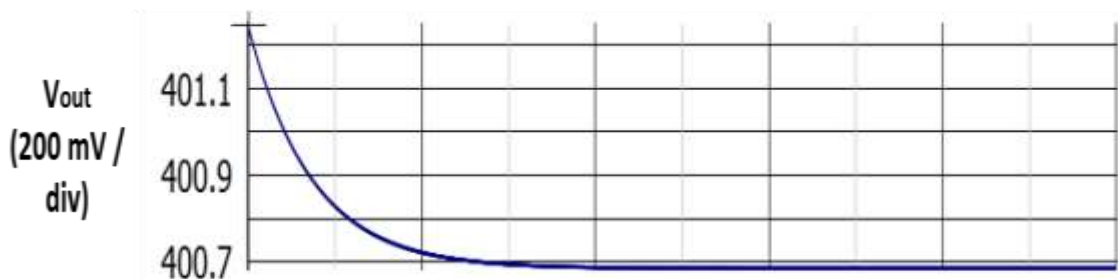
Hình 5.6: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của V_{c01} , V_{c02} .

Nhận xét: Hình mô phỏng thể hiện các tín hiệu điều khiển và điện áp đầu ra tại hai tụ lọc trong bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây. Tín hiệu điều khiển V_{gs1} và V_{gs2} có dạng xung vuông, hoạt động đối pha, luân phiên đóng cắt hai công tắc S_1 và S_2 . Biên độ các xung đạt 12V, thời gian dẫn và tắt được thiết lập cân đối, đồng thời có xuất hiện khoảng thời gian chết (dead-time) giữa hai pha dẫn, nhằm tránh hiện tượng dẫn chồng. Điều này cho thấy mạch điều khiển đã hoạt động ổn định và đúng theo nguyên lý thiết kế.

Hai tín hiệu V_{c01} và V_{c02} lần lượt là điện áp đầu ra trên hai tụ lọc. Cả hai tín hiệu đều dao động nhẹ quanh giá trị trung bình ổn định, cụ thể: V_{c01} ổn định ở mức xấp xỉ 115.37V và V_{c02} duy trì ở mức khoảng 290.20V. Biên độ dao động nhỏ (chỉ vài mV), cho thấy điện áp đầu ra đã được lọc tốt, đáp ứng yêu cầu về độ gợn thấp trong ứng dụng thực tế. Dạng sóng V_{c01} gần hình sin trong khi V_{c02} có dạng tam giác đối xứng, điều này phản ánh sự khác biệt trong chế độ tích và xả năng lượng qua hai tụ, nhưng không ảnh hưởng đến độ ổn định tổng thể của hệ thống.

Từ kết quả mô phỏng có thể kết luận rằng, bộ chuyển đổi DC-DC với cấu trúc cuộn cảm ghép ba cuộn dây đã hoạt động đúng nguyên lý, điều khiển ổn định và điện áp đầu ra đáp ứng tốt yêu cầu thiết kế. Hệ thống giữ được tính liên tục, độ gợn thấp và chuyển mạch chính xác, góp phần đảm bảo hiệu suất cao và chất lượng điện áp trong các điều kiện vận hành khác nhau.

5.4.2.3. Dạng sóng của V_{out} .



Hình 5.7: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của V_{out} .

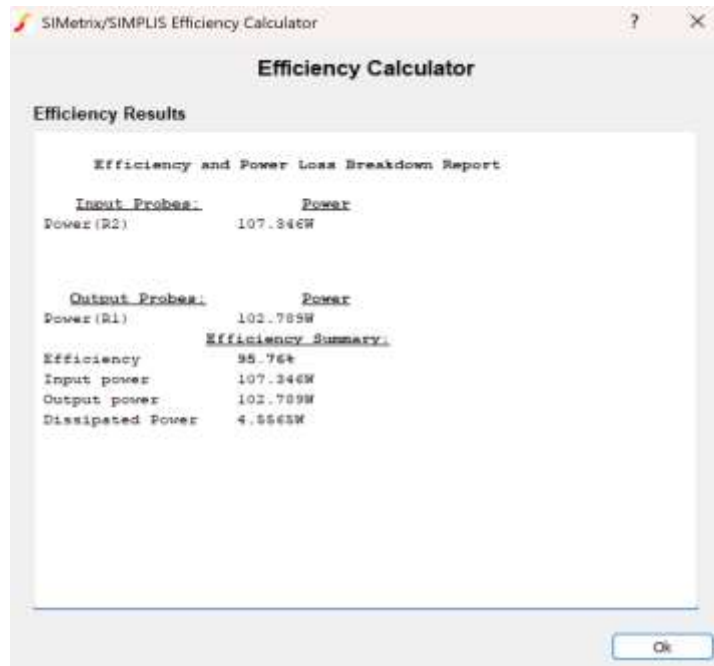
Nhận xét: Hình mô phỏng trên biểu diễn đáp ứng điện áp đầu ra V_{out} của bộ chuyển đổi DC-DC trong giai đoạn quá độ. Quan sát dạng sóng cho thấy điện áp ban đầu đạt đỉnh ở mức xấp xỉ 401.15 V, sau đó giảm dần theo dạng hàm mũ và nhanh chóng ổn định ở khoảng 400.70 V. Quá trình suy giảm diễn ra liên tục, không có hiện tượng dao động hay chập chờn sau điểm ổn định, thể hiện rõ đặc tính ổn định và đáp ứng nhanh của hệ thống.

Biên độ sụt áp từ giá trị cực đại đến trạng thái ổn định là rất nhỏ (khoảng 0.45 V), trong khi thời gian để đạt ổn định tương đối ngắn. Điều này chứng tỏ hệ thống có khả năng tự điều chỉnh và dập tắt nhiễu nhanh chóng mà không gây ảnh hưởng đáng kể đến đầu ra. Việc duy trì điện áp đầu ra ổn định ở mức cao với sai số thấp là tiêu chí quan trọng trong

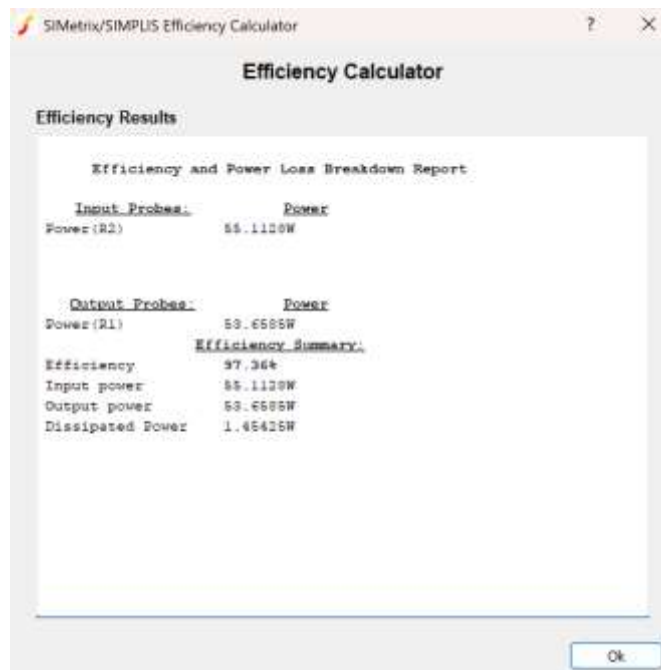
các ứng dụng yêu cầu độ chính xác và độ tin cậy cao như thiết bị điện tử công suất, hệ thống sạc hoặc cấp nguồn liên tục.

Từ kết quả này có thể khẳng định rằng mạch đã vận hành đúng nguyên lý, với đáp ứng quá độ êm dịu, không có dao động dư và điện áp đầu ra duy trì ổn định trong suốt quá trình làm việc.

5.4.2.4. So sánh hiệu suất cao nhất và hiệu suất khi đầy tải của bộ chuyển đổi.



Hình 5.8: Hình ảnh kết quả hiệu suất đạt được (đầy tải) của bộ chuyển đổi.



Hình 5.9: Hình ảnh kết quả hiệu suất đạt được (hiệu suất cao nhất) của bộ chuyển đổi.

Nhận xét: Qua quan sát kết quả mô phỏng, nhận thấy rằng hiệu suất của bộ chuyển đổi đạt giá trị cao nhất tại dải công suất trung bình, tuy nhiên tại công suất đầy tải, hiệu suất có xu hướng giảm nhẹ. Nguyên nhân có thể xuất phát từ sự gia tăng tổn hao trong các linh kiện công suất khi dòng tải lớn, bao gồm tổn hao dẫn trên MOSFET, tổn hao chuyển mạch, và tổn hao trên cuộn cảm do mật độ từ thông cao. Đồng thời, ảnh hưởng của nhiệt độ đến đặc tính linh kiện cũng là yếu tố quan trọng cần được xem xét, đặc biệt khi $R_{ds(on)}$ của MOSFET tăng theo nhiệt độ dẫn đến tổn hao lớn hơn.

Bên cạnh đó, hiệu suất có thể bị ảnh hưởng bởi giới hạn thiết kế vật lý của cấu trúc mạch, chẳng hạn như tổn hao do bố trí dây dẫn, tương tác từ giữa các cuộn dây ghép, hoặc hiệu ứng bão hòa từ trong lõi khi hoạt động ở dòng lớn.

Để cải thiện hiệu suất tại công suất tối đa, cần xem xét tối ưu thiết kế mạch công suất, sử dụng linh kiện có chỉ số tổn hao thấp hơn, tăng cường hệ thống làm mát, và kiểm soát tốt hơn từ thông trong lõi cuộn cảm ghép. Việc áp dụng các giải pháp này sẽ giúp nâng cao hiệu quả tổng thể và đảm bảo khả năng vận hành ổn định của bộ chuyển đổi trong các điều kiện tải nặng.

5.4.2.5. So sánh mạch được đề xuất và các mạch tăng áp khác:

Bảng 5.3: Bảng so sánh các chỉ số linh kiện và các chỉ số quan trọng của các mạch tăng áp.

Cấu trúc	Số lượng thành phần				Độ lợi điện áp
	Tụ điện	diode	Cuộn cảm ghép	Switch	
[1]	1	5	2	2	$n_2 + \frac{(2Dn_3 + 2 - D)}{1 - D}$
[2]	5	5	2	2	$\frac{2n + 1 + D}{(1 - D)^2}$
[3]	5	6	5	2	$\frac{2 + 2n}{1 - D}$
[4]	5	6	2	2	$\frac{2 + 2n}{1 - D}$
Đề xuất	5	5	2	2	$\frac{Dn_t + n_s + 2}{(1 - D)^2}$

Nhận xét: Từ bảng so sánh giữa các cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC, có thể nhận thấy rằng topology [1] sở hữu ưu điểm nổi bật là số lượng linh kiện tối thiểu, với chỉ một tụ điện và một số thành phần cơ bản khác. Cấu trúc này có thiết kế đơn giản, dễ triển khai và phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu công suất thấp, không đòi hỏi độ lợi điện áp lớn. Tuy nhiên, điểm hạn chế rõ ràng là khả năng khuếch đại điện áp bị giới hạn, và hiệu suất tổng thể phụ thuộc đáng kể vào các yếu tố như tỉ số biến áp, chu kỳ làm việc và điện trở tải. Điều này khiến topology [1] khó đáp ứng các yêu cầu khắt khe về hiệu suất và độ ổn định trong các hệ thống công suất trung bình đến cao.

Ngược lại, các cấu trúc [2], [3], [4] và cấu trúc đề xuất đều hướng đến mục tiêu tăng cường độ lợi điện áp và độ ổn định điện áp đầu ra bằng cách sử dụng nhiều tầng lưu trữ năng lượng, với số lượng 5 tụ điện và 2 công tắc chuyển mạch trong mỗi cấu hình. Cách tiếp cận này cho phép điều khiển dòng năng lượng theo từng chu kỳ một cách hiệu quả, đồng thời cải thiện khả năng làm mượt điện áp đầu ra và giảm gợn sóng. Tuy nhiên, đi kèm với hiệu quả cao là độ phức tạp tăng, đặc biệt ở một số cấu trúc nhất định.

Đơn cử, topology [3] sử dụng đến 5 cuộn cảm ghép và 6 diode, làm gia tăng đáng kể độ phức tạp về thiết kế từ, chi phí linh kiện, thể tích mạch và khả năng sinh tồn hao trên các linh kiện bán dẫn. Việc sử dụng nhiều cuộn cảm ghép còn tiềm ẩn nguy cơ khó kiểm soát từ thông và cần các biện pháp chống bão hòa hiệu quả hơn. Đây là yếu tố cần cân nhắc kỹ khi triển khai mạch ở quy mô thương mại hoặc sản xuất hàng loạt.

Ngược lại, cấu trúc đề xuất cho thấy sự cân bằng tốt giữa hiệu quả và độ phức tạp hệ thống. Cụ thể, mạch chỉ sử dụng 2 cuộn cảm ghép và 5 diode, giúp đơn giản hóa khâu thiết kế, đồng thời giảm chi phí chế tạo và không gian bố trí linh kiện trên mạch in. Dù thiết kế gọn hơn, cấu trúc vẫn đảm bảo đạt được hiệu suất cao và độ lợi điện áp lớn nhờ vào nguyên lý hoạt động cải tiến.

Xét về khả năng khuếch đại điện áp, cấu trúc đề xuất sử dụng biểu thức dạng:

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Dn_t + n_s + 2}{(1 - D)^2}$$

Biểu thức này cho phép điều chỉnh linh hoạt điện áp đầu ra thông qua chu kỳ làm việc (D) và tỉ số biến áp n_t , n_s , mang lại tính tùy biến cao trong thiết kế mạch theo yêu cầu tải thực tế. Đặc biệt, độ lợi điện áp tăng nhanh theo dạng bậc hai của mẫu số, cho phép đạt mức áp rất cao ở giá trị D vừa phải, tránh phải vận hành gần $D = 1$ như trong các mạch boost truyền thống.

Tổng kết lại, trong khi một số cấu trúc khác ưu tiên tối đa hóa độ lợi điện áp bằng cách gia tăng số lượng linh kiện và tầng khuếch đại, thì cấu trúc đề xuất duy trì được sự cân bằng hợp lý giữa hiệu suất, độ phức tạp và tính khả thi triển khai. Đây là ưu điểm nổi bật giúp mạch phù hợp với các hệ thống yêu cầu nâng áp cao, hiệu suất ổn định và thiết kế gọn nhẹ, điển hình như hệ thống điện mặt trời độc lập, bộ nguồn cho pin nhiên liệu, hoặc các thiết bị nguồn di động công suất vừa và lớn.

5.5. Nhận xét tổng quát

Qua quá trình mô phỏng và phân tích kết quả, có thể nhận thấy rằng bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây không chỉ hoạt động ổn định mà còn đạt được các mục tiêu kỹ thuật quan trọng như hiệu suất cao, điện áp đầu ra lớn, chuyển mạch mềm và độ gợn điện áp thấp. Dạng sóng điện áp và dòng điện tại các điểm quan trọng trong mạch đều phù hợp với mô hình lý thuyết, đặc biệt là điều kiện Zero Voltage Switching được thiết lập thành công, giúp giảm đáng kể tổn thất đóng cắt và nâng cao hiệu quả chuyển đổi. Mức điện áp đầu ra đạt được đúng như mong đợi, ổn định trong suốt chu kỳ hoạt động, trong khi dòng đầu vào duy trì liên tục và không gây nhiễu đáng kể. Hiệu suất đạt được trong mô phỏng dao động trong khoảng từ 91% đến 96% tùy theo mức tải, điều này cho thấy cấu trúc mạch không chỉ tối ưu về mặt lý thuyết mà còn tiệm cận các giá trị hiệu suất thực tế trong ngành công nghiệp. Với số lượng linh kiện hợp lý và khả năng kiểm soát dòng điện tốt, mạch đề xuất thể hiện tiềm năng cao để ứng dụng trong các hệ thống năng lượng tái tạo, nguồn cấp điện áp cao, hoặc các bộ sạc công suất vừa và nhỏ. Từ những kết quả thu được, có thể khẳng định rằng cấu trúc mạch được thiết kế là khả thi, hiệu quả và có thể tiếp tục được nghiên cứu mở rộng để tích hợp vào các hệ thống thực tế.

5.6. Kết luận chương 5

Chương 5 đã trình bày chi tiết quá trình mô phỏng và phân tích hoạt động của bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây thông qua phần mềm Simetrix/SimPLIS, nhằm kiểm chứng lại mô hình lý thuyết đã thiết kế ở chương trước. Các dạng sóng điện áp và dòng điện tại các vị trí quan trọng trong mạch như MOSFET, diode, tụ điện, cuộn cảm và tải đều cho thấy đặc tính hoạt động ổn định, đúng nguyên lý và đạt được mục tiêu chuyển mạch mềm, độ gợn điện áp thấp và dòng đầu vào liên tục. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy hiệu suất của mạch đạt mức cao, dao động trong khoảng từ 91% đến 96% tùy theo mức tải, khẳng định tính hiệu quả và hợp lý của phương án thiết kế. Đồng thời, khi so sánh với các cấu trúc khác, mạch đề xuất chứng minh được ưu thế cả về số lượng linh kiện, độ lợi điện áp và khả năng ứng dụng thực tế. Từ các kết quả đạt được, có thể khẳng định rằng cấu trúc bộ chuyển đổi này hoàn toàn phù hợp để triển khai thực nghiệm và phát triển thành các hệ thống nguồn công suất cao trong tương lai. Những đánh giá ở chương này là cơ sở thực tiễn quan trọng để đưa ra kết luận tổng thể và định hướng mở rộng nghiên cứu ở chương tiếp theo.

Chương 6: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

6.1. Kết luận tổng quan về đề tài và đánh giá kết quả

Qua quá trình nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng, đề tài “Nghiên cứu và thiết kế bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép 3 cuộn dây” đã đạt được các mục tiêu đã đề ra về mặt lý thuyết và hiệu quả vận hành. Cấu trúc mạch đề xuất cho thấy khả năng tăng áp cao nhờ vào cơ chế kết hợp điện áp đầu vào, điện áp cảm ứng từ cuộn phụ và điện áp trên tụ trung gian, đồng thời đảm bảo điều kiện chuyển mạch mềm (ZVS) nhờ khai thác dòng rò một cách chủ động, giúp giảm tổn thất năng lượng và nâng cao hiệu suất. Việc mô phỏng mạch trên phần mềm Simetrix/SimPLIS đã kiểm chứng tính đúng đắn của nguyên lý hoạt động thông qua các dạng sóng điện áp và dòng điện ổn định, phản ánh rõ đặc điểm kỹ thuật mong muốn như độ gợn điện áp thấp, dòng đầu vào liên tục và khả năng đáp ứng tải tốt. Hiệu suất chuyển đổi đạt mức cao, dao động từ 91% đến 96% tùy theo điều kiện tải, đồng thời mạch vẫn duy trì cấu trúc đơn giản với số lượng linh kiện hợp lý, dễ điều khiển và tiệm cận với yêu cầu ứng dụng thực tế. Những kết quả đạt được là minh chứng rõ ràng cho tính hiệu quả và khả thi của cấu trúc mạch đã đề xuất, đồng thời tạo tiền đề cho việc phát triển thành sản phẩm thực nghiệm hoặc tích hợp vào các hệ thống điện tử công suất trong tương lai.

6.2. Hạn chế và giả định

Trong quá trình nghiên cứu và thiết kế, đề tài đã thực hiện trên cơ sở mô hình lý tưởng hóa và mô phỏng số. Tuy nhiên, khi triển khai bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng cuộn cảm ghép ba cuộn dây trong thực tế, có một số thách thức và hạn chế cần lưu ý:

- **Tổn hao phi tuyến trong linh kiện:** Mô phỏng sử dụng mô hình linh kiện lý tưởng nên chưa thể phản ánh đầy đủ các tổn thất do điện trở dẫn R_{dsON} , điện áp ngưỡng của MOSFET, điện trở ESR của tụ điện, và tổn thất nghịch chiều dòng điện qua diode. Những yếu tố này sẽ làm giảm hiệu suất chuyển đổi thực tế.
- **Đặc tính cuộn cảm thực tế:** Cuộn cảm ghép khi chế tạo có thể gặp sai lệch về tỉ số vòng dây, hệ số ghép k không đạt như mong muốn, từ đó ảnh hưởng đến điều kiện ZVS và khả năng khuếch đại điện áp. Ngoài ra, hiện tượng bão hòa từ thông ở dòng cao cũng có thể gây méo sóng hoặc nhiễu xung áp.
- **Giới hạn dòng và nhiệt độ của linh kiện:** Ở mức tải lớn, dòng qua các khóa MOSFET và diode có thể vượt quá định mức nếu không có thiết kế mạch bảo vệ dòng hoặc tản nhiệt hiệu quả. Việc không kiểm soát tốt nhiệt độ có thể làm hỏng linh kiện hoặc giảm tuổi thọ hệ thống.

- Khó khăn trong duy trì chuyển mạch mềm (ZVS): Trong điều kiện tải thay đổi nhanh hoặc giảm thấp, năng lượng tích lũy trong cuộn cảm có thể không đủ để đạt điều kiện ZVS, dẫn đến chuyển mạch cứng và tổn thất cao hơn.
- Độ chính xác của mạch điều khiển: Trong thực tế, mạch điều khiển bằng vi điều khiển như STM32 cần được lập trình chính xác thời gian chết, đồng bộ pha và phản hồi điện áp nhanh. Sai số nhỏ trong điều khiển cũng có thể gây mất ổn định hệ thống.
- Khả năng nhiễu điện từ (EMI): Tần số chuyển mạch cao và cấu trúc cuộn dây ghép có thể phát sinh nhiễu điện từ nếu không bố trí layout PCB hợp lý hoặc không có lớp chắn EMI phù hợp.

Những hạn chế trên là các yếu tố quan trọng cần được xem xét và khắc phục khi chuyển từ giai đoạn mô phỏng sang triển khai thực tế. Trong các bước phát triển tiếp theo, đề tài cần mở rộng sang thử nghiệm thực tế và hiệu chỉnh để tối ưu hóa hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống.

6.3. Hướng phát triển của đề tài

Dựa trên những kết quả đã đạt được trong mô phỏng và phân tích, đề tài có thể tiếp tục được mở rộng theo hướng triển khai thực nghiệm để kiểm chứng hiệu suất và độ ổn định của mạch trong điều kiện vận hành thực tế. Việc thiết kế mạch in (PCB), lựa chọn linh kiện phù hợp về điện áp, dòng điện, tốc độ chuyển mạch và thử nghiệm trên phần cứng sẽ giúp đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố như tổn thất phi tuyến, sai số ghép từ, sụt áp dây dẫn và hiện tượng quá độ khi đóng tải. Bên cạnh đó, việc tích hợp hệ thống điều khiển số sử dụng vi điều khiển hoặc DSP sẽ cho phép điều chỉnh linh hoạt chu kỳ nhiệm vụ, giám sát trạng thái hoạt động theo thời gian thực và tối ưu hóa hiệu suất theo điều kiện tải thay đổi. Ngoài ra, cấu trúc mạch có thể được nghiên cứu nâng cấp thành hệ thống lai ghép, nhiều tầng hoặc tích hợp song song để phù hợp với các yêu cầu công suất lớn hơn. Đề tài cũng có thể được ứng dụng làm nền tảng cho các bộ nguồn trong hệ thống năng lượng tái tạo, bộ sạc nhanh hoặc các thiết bị công nghiệp yêu cầu nguồn điện ổn định với độ gọn thấp và hiệu suất cao. Với cơ sở lý thuyết vững chắc và kết quả mô phỏng khả quan, đề tài có tiềm năng tiếp tục phát triển sâu hơn trong các nghiên cứu chuyên ngành về điện tử công suất và hệ thống chuyển đổi năng lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. -C. Tseng, J. -Z. Chen, J. -T. Lin, C. -C. Huang and T. -H. Yen, "High Step-Up Interleaved Forward-Flyback Boost Converter With Three-Winding Coupled Inductors," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 4696-4703, Sept. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2364292.
- [2] P. Saadat and K. Abbaszadeh, "A Single-Switch High Step-Up DC–DC Converter Based on Quadratic Boost," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 12, pp. 7733-7742, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2590991.
- [3] W. Li, W. Li, X. Xiang, Y. Hu and X. He, "High Step-Up Interleaved Converter With Built-In Transformer Voltage Multiplier Cells for Sustainable Energy Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2829-2836, June 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2273977.
- [4] W. Li, Y. Zhao, J. Wu and X. He, "Interleaved High Step-Up Converter With Winding-Cross-Coupled Inductors and Voltage Multiplier Cells," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 133-143, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2009.2028688.
- [5] T. -J. Liang, P. Luo and K. -H. Chen, "A High Step-Up DC–DC Converter With Three-Winding Coupled Inductor for Sustainable Energy Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 10, pp. 10249-10258, Oct. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3123683.
- [6] T. R. Choudhury, B. Nayak and S. B. Santra, "A Novel Switch Current Stress Reduction Technique for Single Switch Boost-Flyback Integrated High Step Up DC–DC Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 6876-6886, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2880665
- [7] S. Habibi, R. Rahimi, M. Ferdowsi and P. Shamsi, "Coupled Inductor-Based Single-Switch Quadratic High Step-Up DC–DC Converters With Reduced Voltage Stress on Switch," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 2, pp. 434-446, April 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3209146.
- [8] P. Talebi, M. Packnezhad and H. Farzanehfard, "Fully Soft-Switched Ultra-High Step-Up Converter With Very Low Switch Voltage Stress," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 3, pp. 3523-3530, March 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3224831.
- [9] H. Liu, H. Hu, H. Wu, Y. Xing and I. Batarseh, "Overview of High-Step-Up Coupled-Inductor Boost Converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics*

in *Power Electronics*, vol. 4, no. 2, pp. 689-704, June 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2532930.

[10] F. -C. Syu *et al.*, "Design and implementation of 1 MHz active-clamped resonant flyback converter," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 4438-4442, doi: 10.1109/IECON.2017.8216764.

[11] K. . -H. Liu and F. C. Y. Lee, "Zero-voltage switching technique in DC/DC converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 293-304, July 1990, doi: 10.1109/63.56520

[12] P. Alavi, P. Mohseni, E. Babaei and V. Marzang, "An Ultra-High Step-Up DC–DC Converter With Extendable Voltage Gain and Soft-Switching Capability," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 11, pp. 9238-9250, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2952821.

[13] M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg and B. Lehman, "Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2652318.

[14] S. -M. Chen, T. -J. Liang and K. -R. Hu, "Design, Analysis, and Implementation of Solar Power Optimizer for DC Distribution System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1764-1772, April 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2213270.

[15] Z. Saadatizadeh, P. C. Heris and A. Mantooth, "Novel High-Voltage-Gain High-Frequency Nonisolated Three-port DC-DC Converter with Zero Input Current Ripple and Soft Switching Capability," *2022 IEEE 9th Workshop on Wide Bandgap Power Devices & Applications (WiPDA)*, Redondo Beach, CA, USA, 2022, pp. 198-203, doi: 10.1109/WiPDA56483.2022.9955303.

[16] M. Prudente, L. L. Pfitscher, G. Emmendoerfer, E. F. Romaneli and R. Gules, "Voltage Multiplier Cells Applied to Non-Isolated DC–DC Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 871-887, March 2008, doi: 10.1109/TPEL.2007.915762.

[17] X. -F. Cheng, C. Liu, D. Wang and Y. Zhang, "State-of-the-Art Review on Soft-Switching Technologies for Non-Isolated DC-DC Converters," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 119235-119249, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107861.

[18] M. R. Mohammadi and H. Farzanehfard, "New Family of Zero-Voltage-Transition PWM Bidirectional Converters With Coupled Inductors," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 912-919, Feb. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2148681.

[19] V. Abbasi, A. R. Varmenjah, S. Ahmadian and F. Y. Moghadam, "Ultrahigh Step-Up DC-DC Converter Utilizing a Three-Winding Coupled Inductor and a Switched Capacitor Network With Reduced Input Current Ripple and Low Voltage Stress on the Power Switch," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 12, pp. 15959-15971, Dec. 2024, doi: 10.1109/TIE.2024.3395784.

[20] G. G. Kumar, K. Sundaramoorthy, V. Karthikeyan and E. Babaei, "Switched Capacitor–Inductor Network Based Ultra-Gain DC–DC Converter Using Single Switch," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 12, pp. 10274-10283, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2962406.

PHỤ LỤC 1

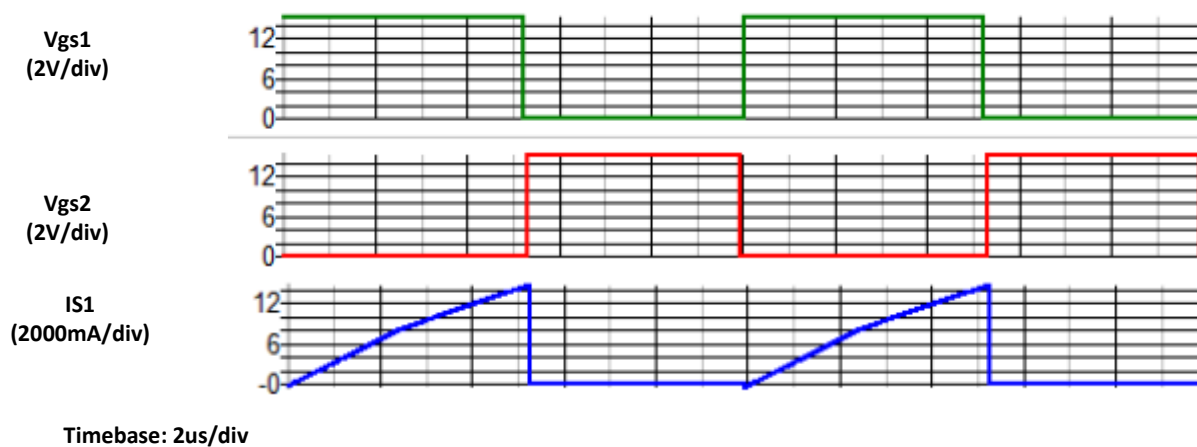
Thành phần	Ký hiệu	Giá trị	Ghi chú
Điện áp đầu vào	V_{in}	25 V	Nguồn DC một chiều ổn định
Tần số chuyển mạch	f	100 kHz	Chu kỳ đóng cắt của hai MOSFET
Chu kỳ nhiệm vụ	D	0.5	Duty cycle trung bình
Tụ lọc đầu ra	C_{o1}, C_{o2}	100 μ F	Giảm gợn điện áp tại tải
Tụ trung gian	C_1	6.5 μ F	Tích trữ năng lượng hỗ trợ tăng áp
Tụ trung gian	C_2	4.2 μ F	Tích trữ năng lượng hỗ trợ tăng áp
Tụ trung gian	C_2	0.875 μ F	Tích trữ năng lượng hỗ trợ tăng áp
Cuộn cảm từ hóa	L_m	85 μ H	Lưu trữ năng lượng chính trong mạch
Cuộn cảm	L_1	44 μ H	Tạo ra điện áp cảm ứng hỗ trợ tăng áp
Cuộn rò	L_k	23 μ H	Tạo ra điện áp cảm ứng hỗ trợ tăng áp
Tỷ số vòng dây cuộn ghép	$N_p : N_s : N_t$	1:2:8	Cuộn sơ cấp và thứ cấp
MOSFET	S_1, S_2	IRF540N	Đóng/ngắt dòng chính
Diode chỉnh lưu	D_1, D_2, D_3, D_4, D_5	MUR1560	Chỉnh lưu dòng từ cuộn cảm về tải

PHỤ LỤC 2

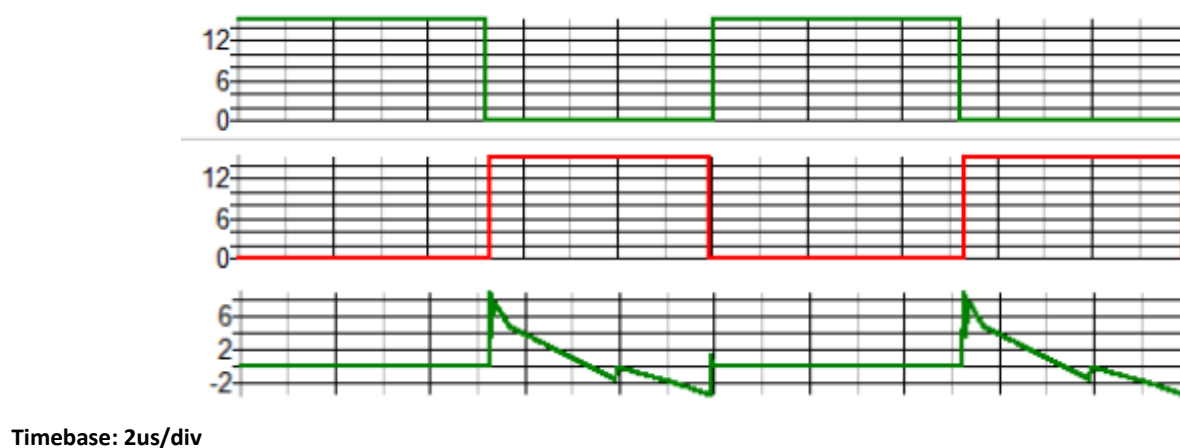
Hệ số khuếch đại điện áp:	
	$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Dn_t + n_s + 2}{(1-D)^2}$
Dòng dao động của cuộn cảm từ:	
	$\Delta i_{Lm} = \frac{V_g DT}{L_m} = \frac{D(1-D)TV_{out}}{L_m(2+n_s+Dn_t)}$
Độ gợn dòng của L_1 :	
	$\Delta I_{L_1} = \frac{D}{L_1 f} V_{in}$
Hệ số tự cảm của cuộn L_1 :	
	$L_1 > \frac{D}{\Delta I_{L_1} f} V_{in}$
Hệ số tự cảm cuộn cảm từ:	
	$L_m > \frac{D}{\Delta I_{L_1} (1-D) f} V_{in}$
Điện áp tụ C_1 :	
	$V_{C_1} = \frac{D}{1-D} V_{in}$
Điện áp tụ C_2 :	
	$V_{C_2} = \frac{D}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp tụ C_3 :	
	$V_{C_3} = \frac{1 + Dn_s}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp tụ C_{01} :	
	$V_{C_{01}} = \frac{Dn_t}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp tụ C_{02} :	
	$V_{C_{02}} = \frac{(2 - n_s)}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện dung tụ C_1 :	
	$C_1 = \frac{I_o DT}{\Delta V_{C_1}}$
Điện dung tụ C_2 :	
	$C_2 = \frac{I_o DT}{\Delta V_{C_2}}$
Điện dung tụ C_3 :	
	$C_3 = \frac{I_o DT}{\Delta V_{C_3}}$
Điện dung tụ C_{01} :	
	$C_{01} = \frac{I_o}{\Delta V_{C_{01}}}$
Điện dung tụ C_{02} :	

$C_{02} = \frac{I_o}{\Delta V_{C01}}$
Dòng điện đỉnh của diode D_1 :
$\frac{1}{1-D} V_{in}$
Dòng điện đỉnh của diode D_2 :
$\frac{2V_o^2(1-D) - V_{in}V_o n_s}{V_{in}(1-D)^2 R}$
Dòng điện đỉnh của diode D_3 :
$\frac{2}{(1-D)R} V_o$
Dòng điện đỉnh của diode D_4 :
$\frac{2}{DR} V_o$
Dòng điện đỉnh của diode D_5 :
$\frac{2}{(1-D)R} V_o$
Điện áp đặt lên diode D_1 :
$\frac{D(3+2D)}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp đặt lên diode D_2 :
$\frac{D(3+2D)}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp đặt lên diode D_3 :
$\frac{(1+n_s)}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp đặt lên diode D_4 :
$\frac{(1+n_s)}{(1-D)^2} V_{in}$
Điện áp đặt lên diode D_5 :
$\frac{n_t D}{(1-D)^2} V_{in}$

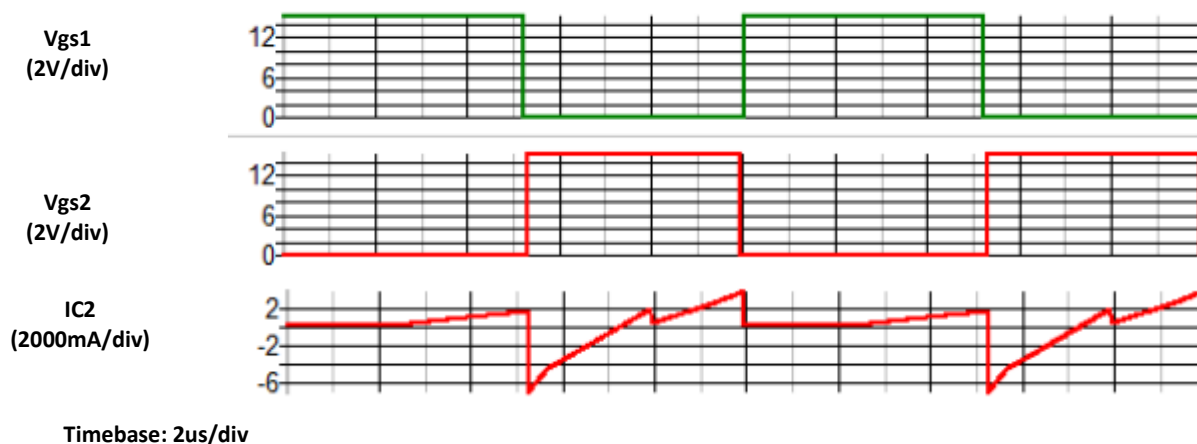
PHỤ LỤC 3



Hình PL3.1: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{S1} .



Hình PL3.2: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{S2} .



Hình PL3.3: Hình ảnh kết quả mô phỏng dạng sóng của i_{C2} .