

# 控制电机技术课程平时作业报告

## 报告说明：

本报告汇总了《控制电机技术》课程的三项平时作业内容，旨在深入探讨电力电子与电机控制领域的关键技术。

首先，报告分析了“轻型直流输电”（HVDC Light）的概念内涵，调研了应用于海上风电送出的两电平、模块化多电平（MMC）及二极管整流（DRU）等常见拓扑结构，并对比了其优劣性。

其次，针对功率半导体器件，调研了从分立器件到智能功率模块（IPM）的封装形式，分析了风冷、液冷及双面散热等技术，并探讨了第三代半导体对封装低感化、耐高温化的发展趋势影响。

最后，基于伏秒平衡原理，详细推导了 Buck、Boost 及 Buck-Boost 电路的电压传输比，并结合非理想电路中的寄生参数，深入分析了电压传输比的实际工作范围及工程限制。

姓名：常毅成  
学号：22354010  
日期：2026 年 1 月 3 日

# 控制电机技术平时作业报告

常毅成  
智能科学与技术专业  
中山大学  
changych7@mail2.sysu.edu.cn

**Abstract**—本文档涵盖了控制电机技术课程的三项作业内容。首先阐述了轻型直流输电 (VSC-HVDC) 的技术特点及其在海上风电中的应用拓扑；其次综述了功率器件的封装技术与散热方式的发展趋势；最后通过数学推导分析了基本 DC-DC 变换器在理想与非理想条件下的电压传输特性。

**Index Terms**—轻型直流输电，MMC 拓扑，功率器件封装，散热技术，DC-DC 变换器，伏秒平衡

## I. 作业一：轻型直流输电与海上风电拓扑分析

### A. “轻型” 直流输电的含义

“轻型直流输电” (HVDC Light) 最初是 ABB 公司为其基于电压源换流器 (VSC) 技术的直流输电系统注册的商标，现泛指基于电压源换流器 (VSC-HVDC) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 技术的直流输电系统。

与传统基于晶闸管的 LCC-HVDC 相比，“轻型” 主要体现在：

- **设备紧凑：**无需庞大的交流滤波器和无功补偿装置，占地面积仅为传统的 20%~50%，适合海上平台。
- **黑启动能力：**能向无源网络供电，对海上风电场启动至关重要。
- **控制灵活：**可独立解耦控制有功和无功功率。

### B. 海上风电直流送出常见拓扑

1) 两电平电压源换流器 (*2-Level VSC*): 早期拓扑，由大量 IGBT 串联组成。

- **优势：**结构简单，器件数量少。
- **劣势：**开关频率高导致损耗大；输出谐波含量高，需大滤波器；对绝缘要求高。

2) 模块化多电平换流器 (*MMC*): 目前的主流首选拓扑，由大量子模块 (SM) 级联而成。

- **优势：**输出波形接近正弦，谐波极低；等效开关频率低，效率高 (> 99%)；模块化设计，冗余度高。
- **劣势：**控制策略复杂 (需通过环流抑制和电容电压平衡)；子模块数量多，初始投资高。

3) 二极管整流单元 (*DRU*) 混合拓扑：海上侧采用不可控整流，陆上侧采用 MMC。

- **优势：**海上平台体积小、重量轻、免维护，成本大幅降低。
- **劣势：**海上侧缺乏控制能力，需风机具备构网能力；无法实现反向送电 (黑启动困难)。

## II. 作业二：功率器件封装与散热趋势调研

### A. 常见封装形式

- 1) **分立器件封装 (Discrete)**: 如 TO-247、TO-220。成本低，适合中小功率。
- 2) **功率模块封装 (Power Module)**:

- **焊接式**: 芯片焊在 DBC 板上，铝线键合，如 EconoDUAL。

- **压接式 (Press-Pack)**: 靠机械压力接触，无键合线，具有双面散热和失效短路特性，适合特高压场合。

- 3) **智能功率模块 (IPM)**: 集成驱动和保护电路，主要用于家电和工业变频。

### B. 常见散热方式

- **自然/风冷**: 利用空气对流，成本低但效率有限。

- **液冷 (Liquid Cooling)**:

- 间接液冷：模块安装在水冷板上。
- 直接液冷 (Pin-fin): 模块底部针翅直接浸入冷却液，热阻大幅降低。

- **相变冷却**: 利用热管或两相流技术，导热效率极高。

### C. 封装技术发展趋势

随着第三代半导体 (SiC/GaN) 的应用，封装技术正向以下方向发展：

- 1) **低寄生电感**: 采用无引线键合、叠层母排设计，以适应高频开关。
- 2) **双面散热 (Double-Sided Cooling)**: 去除底板，芯片双面焊接，功率密度提升 30% 以上 (如车规级模块)。
- 3) **耐高温互连**: 采用银烧结 (Silver Sintering) 替代传统焊锡，提升高温可靠性。

## III. 作业三：DC-DC 变换器电压传输比推导

### A. 理想条件下的推导

假设电路工作在连续导通模式 (CCM)，根据**电感伏秒平衡原理**：稳态时电感两端电压在一个周期内的积分面积为零。

- 1) **Buck 电路 (降压)**:

- 导通时 ( $DT$ ):  $V_L = V_{in} - V_{out}$
- 关断时 ( $(1-D)T$ ):  $V_L = -V_{out}$

伏秒平衡方程：

$$(V_{in} - V_{out})D + (-V_{out})(1 - D) = 0 \quad (1)$$

解得传输比：

$$M(D) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (2)$$

2) Boost 电路 (升压):

- 导通时:  $V_L = V_{in}$
- 关断时:  $V_L = V_{in} - V_{out}$

伏秒平衡方程:

$$V_{in}D + (V_{in} - V_{out})(1 - D) = 0 \quad (3)$$

解得传输比:

$$M(D) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

3) Buck-Boost 电路 (升降压):

- 导通时:  $V_L = V_{in}$
- 关断时:  $V_L = -V_{out}$  (反极性)

伏秒平衡方程:

$$V_{in}D + (-V_{out})(1 - D) = 0 \implies \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (5)$$

## B. 非理想电路下的实际工作范围

在实际工程中, 需考虑电感直流电阻  $R_L$ 、开关管导通电阻  $R_{on}$  等寄生参数。以 Boost 电路为例, 考虑电感损耗后的传输比修正为:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R_{load}(1-D)^2}} \quad (6)$$

### 实际工作范围分析:

- 1) **占空比限制:** 理论上  $D \rightarrow 1$  时电压无穷大。但实际上, 随着  $D$  增大, 分母中的损耗项  $\frac{R_L}{(1-D)^2}$  急剧增加。当  $D$  超过一定值 (通常 0.85 左右), 输出电压不升反降, 效率恶化。
- 2) **二极管压降:** 在低压 Buck 电路中, 二极管压降占比较大, 导致实际输出低于理论值。
- 3) **物理限制:** 受限于开关器件的最小导通/关断时间, 实际占空比通常限制在 5% ~ 95% 之间。

## IV. 结论

通过本次作业, 我对控制电机技术中的关键环节有了更深刻的理解。从宏观的直流输电系统拓扑选择, 到微观的功率器件封装散热, 再到基础变换器电路的数学建模, 这些知识构成了现代电力电子与电机控制系统的基石。

### 致谢

感谢老师在《控制电机技术》课程中的悉心指导, 本次作业的调研与推导过程不仅巩固了理论知识, 也让我对工程实际中的非理想特性有了初步的认识。