

基于碳化硅技术的双向 PCS 设计分析

樊聪亮

上海匡盈电气有限公司, 上海 201105

摘要： 进行基于碳化硅技术的双向 PCS 设计分析，通过资料搜集、理论研究，阐述碳化硅技术、双向 PCS 定义，阐述基于碳化硅技术的双向 PCS 设计优势，如耐高温、耐高频、更小的尺寸等，围绕双向 PCS 设计准备、进行 PCS 系统架构、双向 PCS 调制展开了精细化讨论，给出具体的双向 PCS 系统设计流程，发挥碳化硅技术优势。得出如下结论：实现碳化硅技术的灵活应用，搭建了更加灵活、更具适用性的双向 PCS 系统，实现不同环境下的电能转换，提升电能利用效率。

关键词： 碳化硅技术；双向 PCS；设计；优势；策略

Analysis of bidirectional PCS design based on silicon carbide technology

Fan Congliang

Shanghai Kuangying Electric Co., Ltd. Shanghai 201105

Abstract： This paper presents an analysis of bidirectional PCS design based on silicon carbide technology. Through data collection and theoretical research, it elaborates on the definitions of silicon carbide technology and bidirectional PCS, and expounds on the advantages of bidirectional PCS design based on silicon carbide technology, such as high temperature resistance, high frequency resistance, and smaller size. The paper discusses the preparation for bidirectional PCS design, PCS system architecture, and bidirectional PCS modulation in detail, and provides a specific design process for the bidirectional PCS system that leverages the advantages of silicon carbide technology. The following conclusions are drawn: the flexible application of silicon carbide technology enables the construction of a more flexible and applicable bidirectional PCS system, which achieves power conversion in different environments and improves power utilization efficiency.

Keywords： silicon carbide technology; bidirectional PCS; design; advantages; strategy

引言

双向 PCS 作为电能利用领域的重要组成部分，一直备受重视，但在国家提出环保理念、可持续发展政策的大环境下，依托于传统材料、架构的双向 PCS 系统已经逐渐难以满足需求。基于此，为提升双向 PCS 系统，拓展应用空间，保持应用流程稳定性，引入更具优势的碳化硅技术，解决双向 PCS 系统以往应用弊端的同时，丰富双向 PCS 系统功能。

一、主要概念阐释

1. 碳化硅技术

碳化硅是一种适用于高频、高压的半导体材料，对比传统硅基材料，碳化硅更能“耐得住”高温与高压，其中临界击穿电场达到 2MV/cm(4H-SiC)；散热容易，碳化硅的热导率是硅的三倍，能在高温环境下正常工作。

2. 双向 PCS

双向 PCS，即 Power Conversion System，释义为电力转换设备，用于储能系统、电网间的能量转换，突出灵活性强、可靠性高、响应快速、效率高等优势。作用原理如下：控制功率电子元件关断、导通，实现电力双向转换，电网供电时，将多余电能存储到电池中，电网断电时，释放出存储电能。通过 PCS 装置可

接收控制指令，结合指令内容调控变流器对电池的充放电，进行电网灵活调节^[1]。

二、基于碳化硅技术的双向 PCS 设计优势

总结基于碳化硅技术的双向 PCS 设计优势，主要体现在：其一，对比其他材料，碳化硅有着更高的电子漂移速率、临界电场、热导性等，能让双向 PCS 在各种环境下维持稳定的工作状态，提升系统的功率密度、转换效率，如碳化硅 MOSFET 系统能量损失 < 1/4 硅基 IGBT、其二，耐高频特性，基于碳化硅的双向 PCS 系统子啊关断时不会出现电流拖尾问题，可显著加快元件开关速度^[2]。其三，降低双向 PCS 重量、体积，碳化硅器件有着更小的尺寸、更低的阻抗，能减小产品重量、体积，如 5kW 的 LLC

作者简介：樊聪亮(1983.09-)，男，汉族，本科学历，上海市，中级工程师(电气)，研究方向：电气。

DC/DC 转换器，引入碳化硅器件，能将转换器重量从7kg降低到0.9kg，体积也能从8755cc缩减至1350cc。其四，保障 PCS 系统稳定性，减少电磁干扰，保障系统稳定。

三、基于碳化硅技术的双向 PCS 设计策略

1. 双向 PCS 设计准备

（1）主电路设计：按照双极拓扑结构设计主电路，由 PWM 变流器、DC/DC 变换器组成，主电路拓扑是 T 型三电平逆变电路，每相 4 个开关管，调控开关管通断关系、电位状态；系统接入多组碳化硅电池，并控制多组电池组的充电过程；滤波器，双向 PCS 系统主电路选择三相全桥电路，在直流侧布置碳化硅有源滤波器，交流侧布置 LCL 滤波器，减少谐波。

（2）控制算法应用：开发更先进的控制算法，实现对碳化硅有源滤波器的精准控制，采用人工智能算法和自适应控制技术，根据电网的实时运行状态自动调整滤波器的参数，提高电能质量治理效果；合理选择开关频率、采用软开关技术和优化开关时序等方法，可以在保证滤波器性能的前提下，降低开关损耗和电磁干扰，提高系统的效率和稳定性^[3]。

（3）集成化设计：进行 PCS 系统集成化设计，将碳化硅器件与其他电子元件进行高度集成，减少外部连接线路和寄生参数，降低设备的体积和重量，提高功率密度。

2. 进行 PCS 系统架构

进行 PCS 系统架构，凸显碳化硅技术价值，灵活应用碳化硅技术、计算机网络、计算技术等，生成 PCS 框架，进行系统功能模块配置，结合双向 PCS 功能定位、PCS 技术性能特征，进行各项功能模块配置，如表 1 所示。

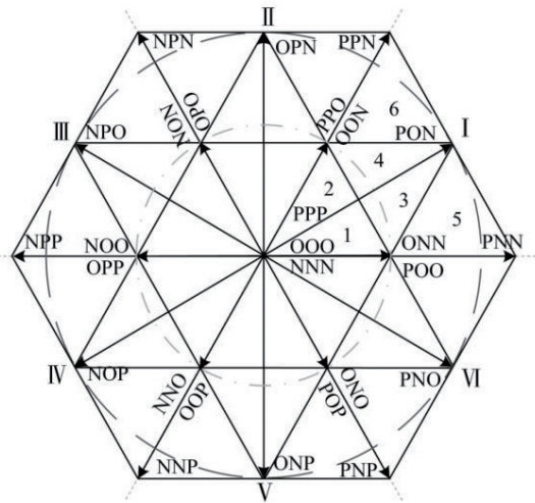
表 1 基于碳化硅技术的双向 PCS 系统功能表

序号	功能模块	特征
1	DSP 主 控单元 模块	（1）指令解码，将输入双向 PCS 系统的指令解码为处理器等设备能直接执行的机器语言。 （2）流水线调度，规范各类指令执行顺序，让处理器能初步处理多项指令。 （3）数据传输，读取、写入相关数据，实现数据在处理器、外部存储器的顺利传输；整体操作，管理 DSP 处理器各类操作，如协调不同功能模块作用进程、维持处理器稳定等。
2	数据采集 与记录 模块	（1）通过双向 PCS 系统监控碳化硅储能系统状态，包括电池温度、电流、电压、充放电参数等，这对 PCS 系统能源管理、优化极其重要。 （2）数据采集，包括三相（A 相、B 相、C 相）线电流、三相相电压、母线电压等。在双向 PCS 系统中配置数据处理 app，记录检测数据，以图表形式呈现。
3	驱动电路	（1）逆变功能，将碳化硅电池输出的直流电转换成交流电，注入电力网络，结合电网运行需求设置调节功率。 （2）交流功能，进行电力网络中交流电→直流电的转换，灵活调控功率半导体器件开关状态，为碳化硅装置等提供直流电，结合实际调控充放电功率。
4	通讯功能	双向 PCS 系统支持以太网、CAN、RS485 等通讯方式，并能接收电池管理系统、系统调度指令，保障系统稳定、高效运行。

3. 双向 PCS 调制

采取空间矢量脉宽调制方法（SVPWM）进行 PCS 系统交流电压控制，提升输出电压效率、质量，在多频电路中输出较高电压调制率。

（1）空间电压矢量。双向 PCS 系统 T 型三电平逆变电路中 A 相、B 相、C 相均有三种电位，三相组合得出 27 种空间电压矢量，矢量图如图 1 所示，结合矢量幅值分类，共计 6 个大矢量、6 个小矢量、6 个中矢量、12 个正负小矢量、3 个零矢量，针对图中的七段式 SVPWM，进行电压矢量调控时，从负小矢量开始，按照“中心对称”的形式开始作用。



> 图 1 双向 PCS 系统空间电压矢量图

（2）锁相环设计：锁相环，是通过相位同步原理形成电压以调谐压控振荡器，自动跟踪相位、信号频率的一种负反馈控制系统，由压控振荡器、环路滤波器、鉴相器等组成^[4]。结合碳化硅技术作用原理灵活选择锁相环技术类型，如双二阶广义积分器锁相环、解耦双同步参考坐标系锁相环、同步坐标系锁相环、乘法锁相器锁相环等，对比分析各类锁相环技术，选择锁相精度更高、稳定性更好的双二阶广义积分器锁相环，通过相电压采样方式控制锁相过程，且针对基于碳化硅技术的双向 PCS，有着更高的开关频率。且本次 PCS 系统设计是三相三线制，整体结构比较简单，可通过线电压直接控制锁相，保持锁相稳定^[5]。三相相电压与两相静止坐标系下 α 轴、 β 轴分量关系式，如公式 1 所示：

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{公式 1})$$

公式 1 中， U_a 、 U_b 、 U_c 指的是 PCS 系统三相相电压； U_α 指的是 α 轴分量， U_β 指的是 β 轴分量。

明确三相电网体系中，线电压、相电压存在的关系，如公式 2 所示：

$$\begin{cases} U_{ab} = U_a - U_b \\ U_{bc} = U_b - U_c \\ U_{ca} = U_c - U_a \end{cases} \quad (\text{公式 2})$$

为明确线电压、两相静止坐标系之间的分量关系，可将公式2代入公式1中，构造可逆矩阵，反变换处理，支持锁相控制进程。

(3) 并网电网正负序分离控制：在双向 PCS 电网电压出现波动时，分析并网电流值、波动趋势，实施正负序分离控制，保持三相电流平衡，为双向 PCS 系统的稳定使用提供良好的环境。要做好该项工作，跟踪、记录并网电流，保持电流正负序分离软件带宽尽量宽，可选择全通滤波器，可直接构造正交信号、同相信号，基于此再进行并网电流正负序分离。此外还需考虑三相交变电流变换等因素带来的影响，完善分离控制机制，避免出现意外状况。

四、结语

综上，文章就基于碳化硅技术的双向 PCS 设计展开讨论，按照双极拓扑结构设计主电路、T 型三电平逆变电路架构展开设计进程，发挥碳化硅技术优势，并在设计进程中注意参考其他相关资料，确保了设计过程的可靠性，提升了双向 PCS 系统稳定性，并留出了优化空间。但研究过程仍有一定不足，主要是本次研究主要集中在理论层面，在引入实际双向 PCS 系统设计时，还需考虑到系统软硬件、设计技术等带来的影响，进一步完善设计方案，以此来提升设计效果。

参考文献

- [1] 张婉婕, 谢晨, 王明杰, 等. 碳化硅陶瓷衍生碳材料制备及其电容性能 [J]. 东北林业大学学报, 2022(8):50.
- [2] 陈义, 邱海鹏, 陈明伟, 等. PCS/VHPCS 复相碳化硅先驱体的制备及性质研究 [J]. 陶瓷学报, 2024(1):150-155.
- [3] 陈旭海, 陈延联, 陈佳桥, 等. 基于电感能量变化率的 PCS 充放电切换控制 [J]. 电力电子技术, 2021,55(01):22-25.
- [4] 王璐. 分布式新能源发电储能变流器 PCS 控制策略研究 [D]. 湖南大学, 2021.
- [5] 刘松, 杨月华. 两台储能变流器 (PCS) 同时接入一台变压器时对预充电回路的影响 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(12):33-37.