

高压大功率储能 PCS 的拓扑结构分析及控制模式研究

郭傅傲 李润源 齐洪恩

(上海勘测设计研究院有限公司 上海市 200335)

摘要: 本文旨在深入探究高压大功率储能 PCS (Power Conversion System) 的复杂结构和有效控制机制, 对其拓扑结构和控制模式进行详尽研究。该复合热管理系统采用相变蓄热材料, 具备出色的热稳定性和快速响应能力。为了应对这一挑战, 本文研究了一套大功率储能电源转换系统 (PCS), 以应对这一难题。该设备在实际应用中取得良好效果, 证明了此方法的有效性。

关键词: 大功率储能; PCS; 拓扑结构; 控制模式

Topological structure analysis and control mode study of PCS for high voltage and high power energy storage

Guo Fuao, Li Runyuan, Qi Hongen

Shanghai Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200335

Abstract: This paper aims to deeply explore the complex structure and effective control mechanism of high-voltage and high-power energy storage PCS (Power Conversion System), and to conduct a detailed study on its topological structure and control mode. The composite heat management system uses phase change heat storage material, with excellent thermal stability and rapid response ability. To meet this challenge, this paper studies a high-power energy storage power conversion system (PCS) to address this problem. The device achieves good results in practical application, which proves the effectiveness of this method.

Key words: high-power energy storage; PCS; topology; control mode

一、引言

随着可再生能源的快速发展和电力系统的深度智能化, 高压大功率储能系统作为一种重要的能量存储和调节设备, 正在逐渐受到广泛关注。高压大功率储能 PCS 作为储能系统的核心组成部分, 起着将电能转换为储能介质能量和将储能介质能量转换为电能的重要作用。因此, 对高压大功率储能 PCS 的拓扑结构和控制模式进行深入研究, 对于提高储能系统的效率、稳定性和可靠性具有重要意义。目前, 关于高压大功率储能 PCS 的拓扑结构和控制模式的研究还相对较少。传统的拓扑结构如多电平拓扑和多模块拓扑在高压大功率储能系统中存在一些问题, 如体积庞大、成本高昂等。因此, 需要针对高压大功率储能系统的特点, 设计出更加适合的拓扑结构, 以提高系统的性能和经济性。

二、高压大功率储能 PCS 的拓扑结构分析

(一) 拓扑结构定义

高压大功率储能 PCS 的拓扑结构指的是其内部电力电子元件的连接方式和配置, 以实现高效、可靠的能量储存和传输。针对储能装置在电网中运行时存在的问题, 提出了一种新的拓扑结构设计及控制策略, 并将其应用到实际储能系统当中。根据目前的研究和实际应用情况, 常见的电路拓扑结构涵盖了全桥、半桥、多电平以及混合拓扑等多种类型。由于不同拓扑结构在各自的应用领域中表现出了独特的优势和特点, 所以它们被广泛应用于各种场合^[1]。

全桥拓扑是一种由四个开关器件构成的最基本的拓扑结构。在实际中常用的是半桥主电路。尽管其构造简单、逆变特性良好, 然而其缺陷在于开关损耗较大, 控制难度较高。多电平拓扑能够克服以上不足, 但是需要增加额外的电容来降低开关损耗。

半桥拓扑结构由两个开关器件构成, 相较于全桥拓扑, 其开关损耗更小, 控制更为简便, 但其逆变特性表现欠佳。通过在直流输入端串联多个电平模块, 多电平拓扑将储能 PCS 的输出电压分段逼近目标电压, 从而有效提升了输出电压波形的品质。由于采用了模块化设计方法, 因此可以方便地对拓扑结构进行优化设计。采用多电平拓扑结构, 可有效降低输出电压中的谐波成分, 从而提高其稳定性。目前, 常用的多电平拓扑有单管桥式, 二极管钳位式, 电容阵列式以及混合式等几种类型。混合拓扑是一种将多种不同的拓扑结构相互融合, 以最大程度地发挥它们的长处, 同时弥补它们各自的不足之处的方法。文中分析了混合拓扑的工作原理, 建立了仿真模型并对其输出特性进行了研究。通过采用混合拓扑结构, 可以进一步提升储能 PCS 的性能和效率, 从而实现更高效的能源储存。在挑选适用于高压大功率储能 PCS 的拓扑结构时, 必须综合考虑系统所需的功率、电压波形的品质、控制的复杂度以及成本等多

方面因素^[2]。

同时还要注意拓扑结构对电池充放电特性以及温度变化的适应性。在这些方面, 不同的拓扑结构呈现出各自独特的长处和短处。同时, 由于储能装置本身特性以及运行环境的复杂性, 使得各种拓扑结构之间也存在一定差异。因此, 在考虑储能 PCS 性能提升的过程中, 必须根据具体的应用需求, 精选最为适宜的拓扑结构^[3]。

(二) 适用于高压大功率储能 PCS 的拓扑结构选择原则

在高压大功率储能 PCS 的拓扑结构选择方面, 需要考虑以下原则: 1. 功率密度高: 拓扑结构应具有较高的功率密度, 即在相同体积或重量条件下能够输出更大的功率。这可以通过增加开关频率、优化电路布局和选用高性能组件等方式实现。

2. 效率高: 拓扑结构应具有较高的转化效率, 即能够最大程度地将输入电能转化为输出电能而减少能量损耗。常见的拓扑结构如全桥、半桥和多电平在一定程度上具有较高的效率。

3. 电压应变能力: 考虑到高压储能 PCS 的应用需求, 拓扑结构应具有较高的电压应变能力, 能够在较高的电压范围内正常工作。

4. 控制复杂度低: 拓扑结构的控制复杂度应尽可能低, 以降低对控制系统的要求, 从而提高系统的可靠性和稳定性, 减少故障的发生概率。

5. 成本低: 拓扑结构的选取应尽可能降低成本, 包括组件的选取、制造成本和维护成本等。这需要在满足性能要求的前提下, 考虑采用成熟的组件和工艺, 并进行经济性评估。

在综合考虑以上原则并结合具体应用需求的基础上, 可以选择最适合高压大功率储能 PCS 的拓扑结构, 以达到最佳效果。在选择拓扑结构时, 需要充分考虑其各自的长处和短处, 以达到最佳的权衡效果。在进行拓扑结构的选择后, 必须进一步进行优化设计和参数调整, 以实现更卓越的性能和更广泛的适应性。

三、高压大功率储能 PCS 的拓扑结构

如图 1 所示, PCS 主电路的拓扑结构由 TMS320F28335DSP 芯片和 EPM240T100C5CPLD 芯片组成。CPLD 不仅协助 DSP 芯片逻辑控制数字信号的输入/输出, 还将其虚拟为外设 RAM, 以扩展控制系统的存储空间。

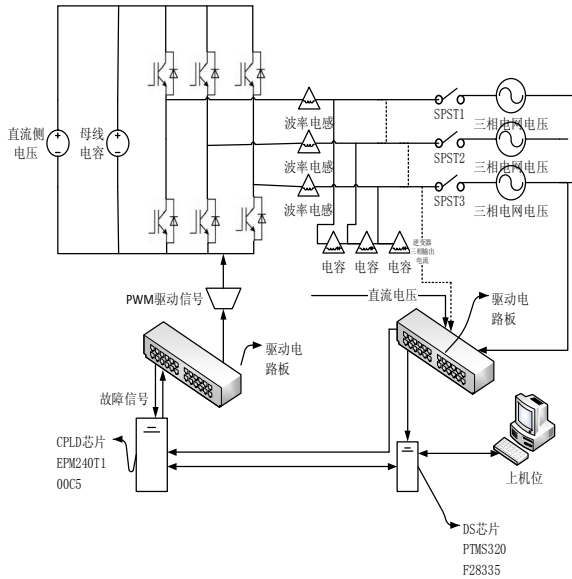


图 1 PCS 主电路拓扑

为了实现高功率输出的目标，逆变桥的驱动模块采用半桥模块 FF1400R12IP4 和两个 FF1400R12IP4 平行构成半桥桥臂和 2QD30A17K-I 驱动核，同时同一桥臂上使用相同信号驱动两个 IGBT 半桥模块，而 IGBT 模块的工作温度则通过 NTC 检测进行监测。此外，还利用一个过压保护电路对输入电压进行限流。该构造呈现出体积小、质量轻盈、可靠性卓越的特质。为了使逆变器工作于高效率区域，对其进行了优化设计。为了确保两个模块在同一散热器中的温度接近，同时根据它们的正温度系数自动实现模块之间的均流，采用了一种高效的方法。由于逆变器控制单元与功率器件隔离且独立工作，因此整个系统可以由一个控制器对其进行统一管理和监控。为了确保控制系统的稳定供电，辅助电源采用了一种双重供电模式，即交流电网和直流电源相互协作，以保证系统的稳定性。此外，还设计了一种基于单片机的智能充放电电路，可以对电池进行有效地管理，保证整个系统运行时处于最佳状态。该构造呈现出体积小、质量轻盈、可靠性卓越的特质。此外，由于辅助电源由直流提供电压，因此可避免蓄电池充电过程对整个供电系统造成较大影响，从而延长其使用寿命。建议优先采用交流电网作为辅助电源，以降低储能系统的度电成本并提高供电电源效率，从而减少蓄电池的使用^[4]。

四、直接功率并网控制

(一) PCS 的数学模型

采用两相静止坐标系中的直接功率并网控制策略，实现对 PCS 有功和无功的瞬时功率直接控制。由于不存在电网电压定向问题，因此可以简化为单相系统模型来实现，并给出了基于该方法的控制系统框图及仿真结果。根据图 1 所示，忽略馈线阻抗的影响，可以建立一个三相静止坐标系 PCS 的数学模型。如式 (1) 所示：

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在式 (1) 中： u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 表示三相桥臂输出电压；

$i_{L123} = i_{o123} + i_{c123}$ ； i_{c123} 为三相滤波电容电流。

通过运用 Clarke 变换，将公式 (1) 映射到两相静止坐标系中，从而获得了相应的表达式如式 (2) 所示：

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{\alpha} \\ e_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在式 (2) 中： $i_{L\alpha\beta} = i_{o\alpha\beta} + i_{C\alpha\beta}$ ； $i_{L\alpha\beta}$ 、 $i_{o\alpha\beta}$ 、 $i_{C\alpha\beta}$ 、 $u_{\alpha\beta}$ 、 $e_{\alpha\beta}$ 分别表示 i_{L123} 、 i_{o123} 、 i_{c123} 、 u_{123n} 、 e_{123} 在两相静止坐标系下的值。

(2) PCS 的瞬时功率为

PCS 的瞬时功率可以由公式 (3) ~ (5) 来表示：

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_C \\ Q_C \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_{\alpha} & e_{\beta} \\ e_{\beta} & -e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_{\alpha} & e_{\beta} \\ e_{\beta} & -e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} P_C \\ Q_C \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_{\alpha} & e_{\beta} \\ e_{\beta} & e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在式 (3) ~ (5) 中：

P' 、 Q' ——三相桥臂输出有功、无功功率；

P 、 Q ——PCS 输出有功、无功功率；

P_C 、 Q_C ——滤波电容 C 的有功、无功功率。

(3) PCS 三相逆变桥臂输出的电压

PCS 三相逆变桥臂输出的电压可以由式 (6) ~ (7) 表示：

$$\begin{cases} u_{\alpha}(k) = 2L[A_{\alpha}(k+1) + B_{\alpha\beta}(k+1)] / \sqrt{3T[e_{\alpha}^2(k+1) + e_{\beta}^2(k+1)]} + E_{\alpha}(k+1) \\ u_{\beta}(k) = 2L[A_{\beta}(k+1) + B_{\alpha\beta}(k+1)] / \sqrt{3T[e_{\alpha}^2(k+1) + e_{\beta}^2(k+1)]} + E_{\beta}(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P(k) \\ \Delta Q(k) \end{bmatrix} = -\frac{3}{2} \begin{bmatrix} \Delta e_{\alpha}(k) i_{o\alpha}(k) + \Delta e_{\beta}(k) i_{o\beta}(k) \\ \Delta e_{\beta}(k) i_{o\alpha}(k) + \Delta e_{\alpha}(k) i_{o\beta}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

五、实验验证

为了验证所提出的控制策略的有效性搭建了一个实验系统，其结构如图 2 所示。在实验系统中，使用了 AC/DC 全控整流平台来获得直流源作为 PCS 的直流输入。PCS 和整流平台共用一个电网接口，这样一来，电网只需要满足 PCS 和整流平台的损耗即可，大大降低了实验系统对交流配电容量的要求。

这个实验系统的搭建对于验证控制策略的有效性非常重要。首先，通过 AC/DC 全控整流平台获得的直流源作为 PCS 的直流输入，可以模拟实际应用中的情况。PCS 是一种功率转换设备，可以将电能从交流形式转换为直流形式，或者将电能从直流形式转换为交流形式。而整流平台则是用来将交流电转换为直流电的装置。通过使用这两个设备，可以模拟实际应用中 PCS 对直流电源的需求。

其次，PCS 和整流平台共用一个电网接口，这样可以减少对交流配电容量的要求。在实际应用中，PCS 和整流平台通常需要接入电网来获取电能。然而，电网的供电能力是有限的，如果 PCS 和整流平台都需要大量的电能，就会对电网的供电能力造成很大的压力。因此，通过共用一个电网接口，可以减少对电网供电能力的要求，从而降低了实验系统的复杂度和成本。

通过搭建这个实验系统，可以验证所提出的控制策略在实际应用中的可行性和有效性。可以通过改变 PCS 和整流平台的工作状态，观察系统的响应和性能。通过实验数据的分析和比较，可以评估所提出的控制

(下转第 50 页)

(上接第 23 页)

策略的优劣, 并进行必要的优化和改进。

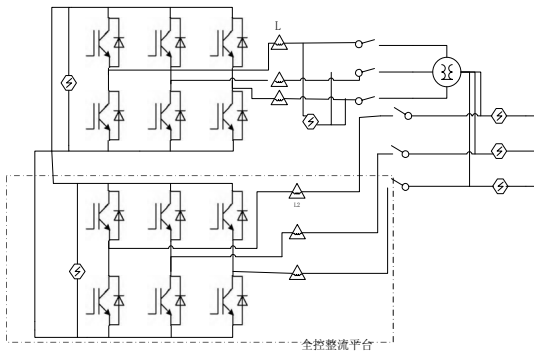


图 2 实验平台系统

结论:

实验表明, 所构建的拓扑结构和控制模式能够显著提升储能 PCS 的性能表现。相较于传统的拓扑结构和控制模式, 该新型设计在效率和稳定性等方面表现出了显著的优越性。同时在此基础上提出一种基于电

压外环与电流内环相结合的控制策略。本文深入探究了高压大功率储能 PCS 的拓扑结构和控制方式, 对其进行了详尽的研究和分析。针对现有技术存在的问题提出了一种新颖且实用的设计方案。经过实验验证, 所提出的方案表现出了卓越的效能。此外, 针对储能系统控制策略展开深入研究, 分析了几种不同策略下的功率输出情况, 得出了相应结论。这些成果为高压大功率储能 PCS 在实际应用中提供了重要的启示, 同时也为相关领域的研究人员提供了宝贵的参考价值。

参考文献:

[1]张新刚,王潇,安昱,张扬,范瑞祥.脉动输出型大功率级联储能变流器的新型拓扑研究[J].江西电力,2022,46(2):11-16.
 [2]上官玉金,谢长君,刘芙蓉,李浩,李维波.锂电池与超级电容混合储能系统拓扑结构优化[J].电源技术,2022,46(1):78-81.
 [3]肖珩,李建林,李雅欣,曾伟,米阳.电化学储能电站 NPC 三电平变流器仿真建模研究[J].太阳能学报,2022,43(5):438-445.
 [4]谷晴,李睿,蔡旭,谢宝昌.面向百兆瓦级应用的电池储能系统拓扑与控制方法[J].发电技术,2022,43(5):698-706.