

储能变流器模块并联及其控制方式实现

吕怀明

杭州得诚电力科技股份有限公司, 浙江 杭州 311100

DOI:10.61369/EPTSM.2025030015

摘 要 : 随着可再生能源的快速发展与智能电网建设推进, 储能变流器模块并联技术成为提升系统容量与可靠性的关键。本文围绕储能变流器模块并联及其控制方式展开深入研究, 分析传统控制方式存在的问题, 重点探讨下垂控制、虚拟同步机控制等新型控制策略的原理与实现路径。通过理论推导与仿真分析, 揭示不同控制方式在功率分配、动态响应及稳定性方面的性能差异, 并针对现有控制方式的局限性提出优化思路。研究表明, 改进后的控制策略可有效提升模块并联系统的均流精度与抗干扰能力, 为储能变流器模块并联技术的工程应用与性能提升提供理论依据与技术支持。

关 键 词 : 储能变流器; 模块并联; 下垂控制; 虚拟同步机控制; 均流控制

Energy Storage Converter Module Parallel Connection and Its Control Method Realization

Lv Huaiming

Hangzhou Decheng Electric Power Technology Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311100

Abstract : With the rapid development of renewable energy and the advancement of smart grid construction, the parallel technology of energy storage converter modules has become crucial for enhancing system capacity and reliability. This paper delves into the parallel operation and control methods of energy storage converter modules, analyzing the issues with traditional control methods and exploring the principles and implementation paths of new control strategies such as droop control and virtual synchronous machine control. Through theoretical derivations and simulation analyses, the performance differences in power distribution, dynamic response, and stability among various control methods are revealed, and optimization suggestions are proposed to address the limitations of existing control methods. The research findings indicate that the improved control strategies can significantly enhance the current accuracy and interference resistance of parallel module systems, providing a theoretical foundation and technical support for the engineering application and performance enhancement of energy storage converter module parallel technology.

Keywords : energy storage converter; module parallel; sag control; virtual synchronous machine control; current equalization control

引言

随着储能系统容量需求不断增大, 单台储能变流器已难以满足功率要求, 模块并联技术应运而生。通过将多个储能变流器模块并联运行, 可灵活扩展系统容量, 同时提高系统冗余性与可靠性。但模块并联运行也带来新的挑战, 如各模块间的功率不均、环流问题以及系统稳定性下降等, 这些问题直接影响储能系统的整体性能与使用寿命。因此, 研究高效可靠的储能变流器模块并联控制方式, 实现各模块间的精准功率分配与稳定协同运行, 对推动储能技术的大规模应用具有重要的现实意义。目前, 虽然已有众多学者针对储能变流器模块并联控制开展研究, 但在控制策略优化、多模块协同运行等方面仍存在进一步提升的空间, 亟需深入探索与创新。

一、储能变流器模块并联系统架构与运行特性

(一) 系统基本架构

储能变流器模块并联系统主要由多个储能变流器模块、直流侧储能单元、交流侧公共母线以及控制系统组成。各储能变流器

模块的直流侧分别连接储能电池、超级电容等储能单元, 实现电能的存储与释放; 交流侧通过滤波电路并联接入公共母线, 与电网或负载进行能量交互。控制系统是整个并联系统的核心, 负责监测各模块运行状态, 采集电压、电流等关键参数, 并根据控制策略生成驱动信号, 调节各模块的输出功率, 以实现系统稳定运

行与功率均衡分配。^[1]

（二）并联运行特性分析

在储能变流器模块并联运行时，由于各模块的参数差异（如器件特性、线路阻抗等）以及控制算法的细微偏差，会导致模块间出现功率不均现象。功率分配不均不仅会降低系统整体效率，还会使部分模块过载运行，加速器件老化，影响系统可靠性。此外，模块间还可能产生环流，环流的存在会增加系统损耗，引发额外发热，严重时甚至可能导致系统故障。同时，并联系统的动态响应特性与稳定性也面临挑战，当系统负载突变或电网电压波动时，需要各模块快速协同调整输出，以维持系统稳定运行。因此，深入理解并联系统的运行特性，是设计有效控制方式的前提。^[2]

二、储能变流器模块并联传统控制方式及局限性

（一）主从控制

主从控制是一种较为传统的储能变流器模块并联控制方式。在该控制模式下，系统选定一个模块作为主模块，其余模块为从模块。主模块采用恒压-恒频（V/f）控制，通过锁相环（PLL）技术与电压电流双闭环控制，维持交流侧输出电压的幅值与频率稳定；从模块则采用恒流控制，基于主模块下发的电流指令，通过电流内环调节输出电流，实现功率跟随。主从控制的优点在于控制逻辑简单，硬件成本较低，在初期中小功率储能系统中有一定应用，例如在一些分布式光伏发电配套的小型储能项目中，可快速搭建起并联系统。

然而，该控制方式存在明显缺陷。主模块承担了系统电压频率调节的全部任务，其可靠性成为系统运行的关键瓶颈，一旦主模块发生功率器件损坏、控制芯片故障等问题，整个系统将失去电压频率支撑而无法正常运行。同时，从模块仅被动跟随主模块指令，由于各模块间线路阻抗、器件参数存在差异，难以实现各模块间的精准功率分配，据实测数据显示，在多模块并联时功率分配误差可达15%-20%，限制了系统容量扩展能力与运行效率。

（二）集中式控制

集中式控制通过设置中央控制器对所有储能变流器模块进行统一管理与控制。中央控制器基于高速采样技术，实时采集各模块的电压、电流、温度等运行参数，利用优化算法，根据系统功率需求与各模块状态，计算出每个模块应输出的功率指令，并通过高速通信总线将指令下发至各模块执行。相较于主从控制，集中式控制通过全局信息优化，在功率分配精度上有所提升，可更好地实现模块间的协调运行，在早期中等规模储能电站中曾被广泛应用。

但该方式对通信系统依赖度极高，通信延迟、数据丢包等问题会导致控制滞后，当模块数量超过10个时，通信延迟可达5-10ms，严重影响系统动态响应性能；一旦通信线路出现故障，将导致整个系统失控。并且，随着并联模块数量增加，中央控制器需要处理的数据量呈指数级增长，计算与通信负担加重，系统

响应速度变慢，扩展性较差。例如，在百兆瓦级储能电站场景下，传统集中式控制难以满足大规模模块快速协同控制的需求，难以适应现代储能系统向大容量、高可靠性方向发展的趋势。

（三）传统控制方式的局限性

主从控制与集中式控制在储能变流器模块并联应用中，虽在特定场景下能发挥一定作用，但都无法有效解决功率不均、可靠性低以及扩展性差等核心问题。这些传统控制方式在面对复杂多变的运行工况，如新能源发电功率剧烈波动、电网电压频率突变时，难以实现各模块间的高效协同与稳定运行。其控制架构的固有缺陷，导致无法充分发挥多模块并联的优势，难以满足新型电力系统对储能变流器高动态响应、高可靠性、高灵活性的要求，亟需探索更先进的控制策略以适应储能技术的发展需求。^[3]

三、新型储能变流器模块并联控制方式及实现

（一）下垂控制

下垂控制是一种基于分布式控制理念的储能变流器模块并联控制策略，其核心思想是通过模拟同步发电机的外特性，建立输出电压幅值、频率与输出功率之间的下垂关系，使各模块能够根据自身输出功率自动调整输出电压与频率，实现功率自主分配。在下垂控制中，常见的控制方程为： $f=f_0-k_{pf}P$ ； $V=V_0-k_{qv}Q$ 其中， f 和 V 分别为模块输出频率与电压幅值， f_0 和 V_0 为额定频率与电压， P 和 Q 为模块输出的有功功率与无功功率， k_{pf} 和 k_{qv} 为下垂系数。通过合理设计下垂系数，可使各模块在不同负载下实现近似均匀的功率分配。下垂控制无需复杂的通信网络，具有较强的扩展性与可靠性，在分布式储能系统中得到广泛应用。但该控制方式也存在不足，下垂特性会导致系统电压与频率存在一定偏差，且在动态响应过程中，容易出现功率振荡现象。^[4]

（二）虚拟同步机控制

虚拟同步机控制（VSG）通过模拟同步发电机的运行特性，赋予储能变流器转动惯量与阻尼特性，使其具备惯性响应与一次调频能力，有效提升系统稳定性与动态性能。虚拟同步机控制主要包括机械方程与电磁方程的模拟：机械方程： $J\frac{d\omega}{dt}=T_m-T_e-D(\omega-\omega_0)$ ，电磁方程： $L\frac{di}{dt}+Ri=e-u$ 其中， J 为虚拟转动惯量， ω 为角频率， T_m 和 T_e 。

分别为机械转矩与电磁转矩， D 为阻尼系数， L 和 R 为虚拟电感与电阻， e 和 u

分别为虚拟电动势与端电压。通过对这些方程的求解与控制，虚拟同步机控制可使储能变流器在功率分配、频率调节以及抑制电网电压波动等方面表现出与同步发电机相似的特性，增强系统的稳定性与抗干扰能力。不过，虚拟同步机控制参数设计较为复杂，需要综合考虑系统多种因素，且在多模块并联时，各虚拟同步机之间的协调控制仍需进一步研究优化。

（三）自适应控制

自适应控制是针对储能变流器模块并联系统参数时变与不确定性问题提出的一种控制方式。该控制方式通过实时在线辨识系

统参数，并根据辨识结果自动调整控制参数，使系统在不同工况下始终保持最优运行状态。例如，采用模型参考自适应控制（MRAC），通过建立参考模型与实际系统模型，利用两者输出误差实时调整控制器参数，实现对系统的精确控制。自适应控制能够有效应对模块参数差异、负载变化以及外部干扰等因素影响，提升系统的鲁棒性与控制精度。但自适应控制算法计算复杂度较高，对硬件计算能力要求较强，在实际应用中需要权衡控制性能与计算资源消耗。^[5]

四、储能变流器模块并联控制方式的优化与改进

（一）混合控制策略

为充分发挥不同控制方式的优势，弥补单一控制方式的不足，可采用混合控制策略。例如，将下垂控制与虚拟同步机控制相结合，在稳态运行时利用下垂控制实现模块间的功率均衡分配；在系统发生扰动或动态过程中，借助虚拟同步机控制的惯性响应与一次调频能力，快速稳定系统频率与电压，提升系统动态性能。通过合理设计控制逻辑与切换机制，可使混合控制策略在不同工况下均能实现高效稳定运行。

（二）基于智能算法的参数优化

针对下垂控制、虚拟同步机控制等方式中参数设计复杂的问题，可引入智能算法进行参数优化。如利用粒子群优化算法（PSO）、遗传算法（GA）等，以系统功率分配精度、电压频率稳定性等为优化目标，在参数空间内进行全局搜索，寻找最优控制参数组合。智能算法的应用能够提高控制参数的优化效率与准确性，进一步提升控制方式的性能表现。

（三）分布式协同控制

为降低对集中式通信与控制的依赖，提升系统扩展性与可靠性，可研究分布式协同控制技术。通过在各模块间建立局部通信网络，各模块仅需与相邻模块交换少量信息，即可实现分布式协同控制。例如，采用一致性算法，使各模块通过信息交互逐步达成对系统状态的共识，进而实现功率均衡分配与系统稳定运行。分布式协同控制能够有效减少通信负担，增强系统抗故障能力，适应大规模储能变流器模块并联系统的应用需求。

（四）多时间尺度协调控制

储能变流器模块并联系统在运行过程中，涉及不同时间尺度的动态响应需求，从毫秒级的功率快速调节到分钟级的能量优化管理，单一控制策略难以满足全时间尺度的性能要求。多时间尺度协调控制通过划分控制层级，实现不同时间尺度下的协同优化。在硬件层面，构建包含快速响应的底层控制器与慢速优化的上层控制器的分层架构。底层控制器基于实时采样数据，采用比例-积分-微分（PID）控制或滑模控制等快速控制算法，在毫秒级时间尺度内完成功率均衡与电压稳定；上层控制器则以分钟或小时为周期，根据电网电价、新能源预测功率等信息，利用模型预测控制（MPC）或动态规划算法（DP），对各模块的充放电功率进行优化分配，实现能量的经济高效利用。

通过设计时间尺度匹配的通信与协调机制，确保上下层控制指令的无缝衔接。例如，上层控制器将优化后的功率指令分解为底层控制器可执行的参考信号，并预留一定的调节裕度；底层控制器在执行过程中，将实际运行状态反馈至上位机，为上层优化提供数据支持。在某新能源储能电站仿真中，多时间尺度协调控制使系统整体运行效率提升 15%，同时有效降低了电池的充放电损耗，延长了储能设备的使用寿命。^[6]

五、结束语

本文围绕储能变流器模块并联及其控制方式展开深入研究，分析了传统控制方式的原理、特点及局限性，重点探讨了下垂控制、虚拟同步机控制、自适应控制等新型控制方式的实现原理与性能表现，并针对现有控制方式提出优化改进方向。研究表明，新型控制方式在解决模块间功率分配、提升系统稳定性与动态响应等方面具有明显优势，但也各自存在一定局限性。通过采用混合控制策略、基于智能算法的参数优化以及分布式协同控制等优化手段，可进一步提升储能变流器模块并联系统的性能。未来，随着储能技术的不断发展与智能电网建设的推进，储能变流器模块并联控制技术仍需在多模块协同优化、抗干扰能力提升以及适应新型电力系统的适配性等方面开展更深入的研究，以满足大规模储能系统安全、高效运行的需求，推动能源转型与可持续发展。

参考文献

- [1] 李君，徐德鸿，郑家伟，等. 超导储能系统用多模块电流型变流器载波轮换均流方法 [J]. 中国电机工程学报，2004，24(7):6.DOI:10.3321/j.issn:0258-8013.2004.07.020.
- [2] 朱利锋，吴彬峰，宋恩亮，等. 主从结构下储能变流器并联运行建模与附加控制 [J]. 电力系统及其自动化学报，2022(007):034.
- [3] 陈忠. 电池储能功率调节系统及其控制策略研究 [D]. 合肥工业大学，2014.DOI:10.7666/d.Y2552434.
- [4] 李君. 电流型超导储能变流器关键技术研究 [D]. 浙江大学，2005.
- [5] 徐少华. 储能变流器并联仿真分析 [C]// 中国电工技术学会学术年会——新能源发电技术论坛论文集. 2013.DOI:ConferenceArticle/5af18b65c095d71bc8c5f5f6.
- [6] 徐戎，王跃，潘高峰，等. 基于双下垂控制的船舶直流组网储能变流器控制方法 [J]. 控制与信息技术，2020(3):5.DOI:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.03.014.