

# 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统

刘如帆

( 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211100 )

**摘要** 随着能源需求的增长和可再生能源的广泛应用, 交直流混合微电网作为一种新型的能源供应模式, 受到了越来越多的关注。在交直流混合微电网中, 有效的控制策略对于保障系统的稳定运行、优化能量分配和提高供电质量至关重要。为此, 本文针对交直流混合微电网, 主要介绍了一种直流分层控制系统, 详细阐述了该系统的架构、工作原理和关键技术, 通过理论分析与案例, 证明其在提高微电网稳定性、优化能量管理和增强供电可靠性方面的显著优势, 以期为促进交直流混合微电网的高效运行提供有益参考。

**关键词** 交直流混合微电网; 直流分层控制; 稳定性; 能量管理

中图分类号: TM3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0013-03

直流分层控制系统作为一种先进的控制方法, 为解决交直流混合微电网中的诸多问题提供了新的思路和途径。然而, 目前对于该控制系统的研究仍存在一些不足, 需要进一步深入探讨和完善。目前, 交流微电网仍然是微电网的主要形式, 尽管交流微电网的研究已经取得了许多成果, 但是还需要进一步解决分布式电源 (distributed generation, DG) 并联接入时带来的谐振、谐波等方面的影响。相比于交流微电网, 直流微电网系统无需考虑各 DG 之间的同步问题, 在环流抑制上更具优势, 且直流微电网只有与主网连接处需要使用逆变器, 系统成本和损耗大大降低。当下, 智能电网的概念深入人心, 其建设理念是以一种环境友好的、可持续的方式为数字社会提供可靠的、高质量的电能。为了改进交直流混合微电网中直流侧的母线电压性能, 本文提出了直流分层控制系统, 以在各接口变换器之间合理分配直流负荷, 同时补偿下垂控制带来的直流母线电压跌落。

## 1 交直流混合微电网概述

### 1.1 交直流混合微电网的结构

交直流混合微电网由交流子网、直流子网以及连接两者的电力电子变换器组成。其结构具有灵活性, 可根据不同的能源分布和负荷需求进行配置。在交流子网中, 常见的电源有同步发电机、异步发电机等, 而直流子网中的电源主要包括光伏电池、储能电池等<sup>[1]</sup>。

### 1.2 现有控制策略及其局限性

当前, 交直流混合微电网的控制策略主要包括主从控制、对等控制和分层控制。主从控制中, 主电源

承担着维持系统稳定的主要责任, 但一旦主电源出现故障, 系统可能会面临较大的冲击。对等控制中, 各电源地位平等, 通过自主协调来维持系统稳定, 但在应对复杂工况时, 协调难度较大。分层控制虽能实现一定程度的优化管理, 但存在层次之间通信延迟、控制复杂等问题。此外, 现有控制策略在应对分布式能源的随机性和波动性方面存在不足, 难以实现精确的能量管理和优化调度。同时, 对于交直流两侧的功率平衡控制也不够完善, 容易导致电能质量下降。

## 2 直流分层控制系统的架构与原理

### 2.1 系统层次划分及功能

直流分层控制系统通常分为三层: 底层控制、中层控制和顶层控制。

底层控制主要负责对各个分布式电源和电力电子变换器的快速实时控制。例如, 对于直流变换器, 底层控制要实现对输出电压或电流的精确跟踪, 确保其稳定运行。对于储能装置, 底层控制要进行充放电管理, 保证其在安全范围内工作。这一层的控制响应速度极快, 通常在微秒到毫秒级别, 以应对系统中的瞬时变化。

中层控制起着承上启下的作用, 其功能包括协调底层设备之间的功率分配、优化运行模式以及进行局部的电压和电流控制。它会根据系统的运行状态和预设的策略, 动态调整各个设备的工作点, 以实现局部的最优运行。比如, 当负荷发生变化时, 中层控制会迅速计算并分配各个分布式电源的输出功率, 确保系统的功率平衡<sup>[2]</sup>。顶层控制则侧重于全局的能量管理和经济调度。它会综合考虑系统内的能源供应和需求、

电价信息、储能状态等因素，制定长期的运行计划，提高能源利用效率。

## 2.2 各层次的控制目标与方法

底层控制的目标是确保各个设备的稳定运行和精确控制。其控制方法通常基于经典的控制理论，如比例—积分—微分（PID）控制、滞环控制等。这些方法能够快速响应系统的变化，保证设备输出的准确性和稳定性。

中层控制的目标是实现局部的优化。常用的控制方法包括下垂控制、模型预测控制等。下垂控制通过模拟电源的下垂特性来实现功率的自动分配，具有较好的鲁棒性和适应性。模型预测控制则基于对系统未来状态的预测，制定最优的控制策略。

顶层控制的目标是达到全局的最优运行和能量管理。其控制方法多基于优化算法，如线性规划、遗传算法等。通过建立系统的数学模型，求解最优的运行方案，以实现能源的高效利用。

## 3 直流分层控制系统的关键技术

### 3.1 通信技术在系统中的应用

在直流分层控制系统中，高效、可靠的通信技术是实现各层次之间协调运行和信息交互的关键。通信技术能够实时传递系统中的各种数据，如电源出力、负荷需求、电压电流等状态信息，使各控制层能够及时做出准确的决策。

首先，通信网络的架构选择至关重要。常见的架构包括集中式、分布式和混合式。集中式架构中，所有数据都汇聚到一个中央控制器进行处理和决策，这种架构简单直观，但对中央控制器的性能和可靠性要求极高，一旦中央控制器出现故障，整个系统可能陷入瘫痪。分布式架构则将决策权力下放至各个节点，节点之间通过对等通信进行协调，具有较高的可靠性和容错性，但通信量较大，协调难度也相对较高。混合式架构结合了集中式和分布式的优点，在关键部分采用集中控制，在次要部分采用分布控制，以平衡系统的性能<sup>[3]</sup>。其次，通信协议的选择也会影响系统的性能。常用的通信协议如 Modbus、CAN 总线、以太网等各有优缺点。Modbus 协议简单易用，成本低，但通信速率和数据量有限；CAN 总线具有较高的实时性和可靠性，但网络规模受限；以太网则能够提供高速、大容量的数据传输，但对网络设备和布线要求较高。在实际应用中，需要根据系统的规模、实时性要求和成本等因素选择合适的通信协议。

此外，为了确保通信的可靠性和实时性，还需要采用一系列的技术手段。例如，采用冗余通信链路，当主链路出现故障时能够自动切换到备用链路，保证数据的不间断传输。使用优先级机制，对关键数据赋予高优先级，优先传输，确保重要信息能够及时送达。同时，进行合理的网络规划和优化，减少通信延迟和数据丢包率。通信技术在直流分层控制系统中的应用实例众多。例如，在一个包含多个分布式电源和储能装置的微电网中，通过实时通信，底层的电源和储能装置能够将其工作状态上传至中层控制器，中层控制器根据这些信息进行功率分配和协调控制，并将决策结果上传至顶层控制器，顶层控制器则基于全局信息进行能量管理和优化调度。在这个过程中，通信技术的快速、准确和可靠确保了系统的稳定运行和高效管理。

### 3.2 能量管理策略

第一，能量预测是能量管理策略的基础。准确预测可再生能源的出力（如光伏发电、风力发电）以及负荷的需求对于优化能量管理至关重要。通过采用先进的预测技术，如基于机器学习的方法、物理模型等，结合历史数据和实时监测信息，可以得到较为准确的预测结果。这为后续的能量调度和资源配置提供了重要依据。

第二，在能量分配方面，需要根据不同电源的特性和优先级进行合理安排。例如，优先利用可再生能源发电，当可再生能源出力不足时，再启动储能装置或其他备用电源。同时，要考虑储能装置的充放电策略，避免过度充放电影响其寿命。对于多电源并联运行的情况，采用合适的功率分配算法，如下垂控制、虚拟阻抗法等，确保各电源按照预定比例输出功率，维持系统的功率平衡。

第三，考虑到经济因素，能量管理策略还需要优化运行成本。这包括根据不同时段的电价制定电源的运行计划，合理安排储能装置的充放电时机，以降低电费支出。同时，要综合考虑设备的投资成本、维护成本和运行寿命等，在保证系统性能的前提下，实现经济效益的最大化。此外，系统的稳定性也是能量管理策略需要关注的重点。通过合理设置电压和电流的阈值，避免出现过压、过流等异常情况。在系统出现功率波动时，能够迅速调整电源出力或投入储能装置，维持系统的稳定运行。

为实现上述目标，通常采用优化算法来制定能量管理策略。常见的优化算法包括线性规划、非线性规划、粒子群优化算法、遗传算法等。这些算法能够在

复杂的约束条件下,找到最优的能量管理方案。比如,在一个包含光伏发电、储能电池和柴油发电机的直流微电网中,根据光伏发电的预测出力 and 负荷需求,能量管理策略在白天阳光充足时优先使用光伏发电,并将多余的电能存储到电池中;当夜晚或阴雨天光伏发电不足时,优先使用电池放电,若电池电量不足,则启动柴油发电机供电。同时,根据实时电价信息,在电价低谷时段对电池进行充电,以降低运行成本。通过这样的能量管理策略,实现了能源的合理利用和成本的有效控制<sup>[4]</sup>。

## 4 实际应用案例分析

### 4.1 具体应用场景介绍

在一个偏远的山区,由于地理位置的限制,当地的电力供应一直存在不稳定和成本高昂的问题。为了解决这一难题,构建了一个交直流混合微电网系统,并采用了直流分层控制系统。而且,该地区拥有丰富的太阳能资源和一定规模的风力发电设施,同时还有一些小型水电站作为补充。此外,为了应对可再生能源的间歇性和不稳定性,配备了一定容量的储能电池。负荷方面,包括居民生活用电、农业灌溉用电以及一些小型工业用电。在这个交直流混合微电网中,直流子网主要连接了太阳能发电设备和储能电池,交流子网则接入了风力发电和小型水电站,同时负责为一些交流负荷供电。通过电力电子变换器实现了交直流子网之间的能量交换和协调控制。在居民生活区,安装了直流充电桩,为电动汽车提供便捷的充电服务。农业灌溉系统也采用了直流驱动的水泵,提高了能源利用效率。小型工业生产线上的一些设备,如直流电机,直接接入直流子网,减少了能量转换环节的损耗。

### 4.2 应用效果与经验总结

通过应用直流分层控制系统,该地区的交直流混合微电网取得了显著的效果,能源利用效率方面,由于直流分层控制系统能够更精确地协调各分布式电源的出力,实现了可再生能源的最大化利用。据统计,可再生能源在总供电量中的占比提高了 20% 以上,大大减少了对传统化石能源的依赖,降低了能源成本。在供电可靠性方面,系统能够快速响应负荷变化和电源故障。当某一分布式电源出现故障时,其他电源能够迅速调整出力,维持系统的稳定运行。储能电池在关键时刻能够及时放电,保障重要负荷的持续供电。停电次数显著减少,居民和企业的用电满意度大幅提高。电能质量方面,直流分层控制系统有效地控制了

交直流子网之间的电压波动和电流谐波,使得输出的电能质量符合国家标准。交流子网的电压稳定在允许的偏差范围内,直流子网的电压纹波也得到了很好的抑制,为各类用电设备提供了优质的电源。

从这个实际应用案例中,我们可以总结出以下经验:首先,合理的系统规划是成功的基础。在构建交直流混合微电网之前,需要对当地的能源资源、负荷需求进行详细的调研和分析,制定科学合理的系统架构和配置方案。其次,先进的控制技术是关键。直流分层控制系统能够实现对微电网的精细化管理和优化控制,确保系统的稳定运行。再者,设备的选型和配置要恰当。选用高效、可靠的电力电子变换器、储能设备和分布式电源,以满足系统的性能要求,完善的监测和维护体系不可或缺。通过实时监测系统的运行状态,及时发现和解决潜在问题,保障系统的长期稳定运行。此外,人员的培训和技术支持也非常重要。确保操作人员熟悉系统的运行原理和控制策略,能够熟练地操作<sup>[5]</sup>。总之,这个实际应用案例展示了直流分层控制系统在交直流混合微电网中的成功应用,为类似项目的实施提供了宝贵的经验和借鉴。随着技术的不断进步和成本的降低,相信该系统在未来会得到更广泛的应用,为能源的可持续发展做出更大的贡献。

## 5 结束语

文章介绍的适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统具有重要的理论意义。通过对该系统的深入分析,为交直流混合微电网的控制策略提供了新的解决方案。然而,仍需不断探索和创新,以应对未来微电网发展中的各种挑战,进一步提高系统的性能,能够推动交直流混合微电网的广泛应用和可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 沈云森.多微源交直流混合微电网控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- [2] 王浩,康博阳,郑征,等.考虑电动汽车灵活储能的交直流混合微电网功率协调控制策略[J].电网技术,2023,47(05):2009-2018.
- [3] 曾妍,陈杰,钟锦邓,等.交直流混合微电网关键技术综述[J].电气开关,2023,61(03):1-4.
- [4] 李松.单子网与集群子网型交直流混合微电网运行控制方法研究[D].天津:天津大学,2022.
- [5] 王浩,聂晶莹,李斌,等.电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):94-103.