

混合储能参与电网调频的优化控制方法研究

曹苏皓

大唐南京发电厂 江苏 南京 210000

摘要: 混合储能系统集成多种储能技术,在电网调频中优势显著。本文先阐述混合储能系统基础理论,分析电网调频需求,进而探讨参与调频的优化控制方法,涵盖功率分配、荷电状态管理、协调控制及智能优化算法应用。同时,设计优化控制架构,包括系统总体架构、硬件层、软件层及人机交互界面设计。通过多方面研究,为混合储能系统高效参与电网调频提供理论支撑与技术方,助力提升电网稳定性与可靠性。

关键词: 混合储能系统; 电网调频; 优化控制方法; 控制架构设计

引言: 电网频率稳定是电力系统安全运行的关键。负荷变化与发电出力波动使电网频率处于动态变化中,传统调频资源存在响应速度慢、调节灵活性不足等问题。混合储能系统将能量型与功率型储能技术有机结合,兼具高能量密度与高功率密度优势,能快速响应电网功率变化,满足不同调频需求。深入研究混合储能参与电网调频的优化控制方法,对提高电网调频效率、保障电力供应质量具有重要意义,是当前电力系统领域的研究热点。

1 混合储能系统基础理论

1.1 混合储能系统定义与分类

混合储能系统是将两种或两种以上不同特性的储能技术进行有机集成,形成具备综合优势的能量存储与转换体系^[1]。其构成要素涵盖能量型储能单元、功率型储能单元、能量管理系统以及电力电子接口装置。能量型储能单元以锂离子电池、液流电池等为代表,具备高能量密度特性,可实现长时间、大容量的能量存储;功率型储能单元如超级电容、飞轮储能等,拥有高功率密度优势,能在短时间内快速充放电,满足高功率瞬时需求。依据储能技术组合方式与应用场景差异,混合储能系统可划分为多种类型。电化学-电化学混合储能系统,将不同电化特性的电池进行组合,例如锂离子电池与铅酸电池搭配,利用前者高能量密度与后者低成本的特性,实现经济性与性能的平衡。电化学-机械混合储能系统,如锂离子电池与飞轮储能结合,飞轮储能快速响应电网功率波动,锂离子电池提供持续能量支撑,适用于对动态性能要求较高的场景。电磁-电化学混合储能系统,以超级电容与锂离子电池组合为例,超级电容应对高频次、小容量的功率波动,锂离子电池处理低频次、大容量的能量变化,在分布式发电与微电网领域应用广泛。

1.2 混合储能系统工作原理

混合储能系统通过不同储能技术的优势互补与协同

工作,实现能量高效转换与存储。在充电过程中,根据电网实时状态与能量管理策略,电力电子接口装置将多余电能合理分配至能量型与功率型储能单元。能量型储能单元以较低速率存储大量电能,功率型储能单元则快速吸收高频功率成分。放电时,功率型储能单元优先响应电网功率需求,提供瞬时大功率支持,能量型储能单元随后补充能量,维持长时间供电。在电网调频中,混合储能系统发挥关键作用。当电网频率偏离额定值时,功率型储能单元迅速动作,通过快速充放电调节电网功率,抑制频率波动。能量型储能单元根据频率偏差持续时间与幅度,适时调整出力,为电网提供持续能量补偿,确保频率稳定在合理范围内。

1.3 混合储能系统性能指标

衡量混合储能系统性能的关键指标众多。功率密度反映单位质量或体积储能系统输出功率的能力,高功率密度意味着系统能在短时间内提供大功率支持,满足电网快速调频需求。能量密度体现单位质量或体积储能系统存储能量的多少,高能量密度可延长系统持续供电时间,增强能量支撑能力。响应速度是系统从接收指令到达到目标出力的时间,快速响应能力使系统能及时应对电网功率突变,保障电网稳定运行。此外,循环寿命、自放电率、充放电效率等指标,也从不同维度反映系统性能,为系统设计与优化提供重要依据。

2 电网调频需求分析

2.1 电网频率波动特性分析

电网频率并非恒定不变,而是处于动态变化之中,负荷变化与发电出力波动是引发电网频率波动的两大主要因素。在用电侧,工业生产的启停、居民用电的峰谷差异等都会导致负荷在短时间内发生显著变化。当负荷突然增加,电网总需求上升,若发电出力未能及时跟上,系统频率便会下降;反之,负荷骤减时频率则会上升^[2]。在

发电侧,传统火力发电机组受燃料供应、设备状态等因素影响,出力可能出现波动;可再生能源发电,如风力发电受风速变化、光伏发电受光照强度影响,其出力具有间歇性与不确定性,这些都会打破电网的功率平衡,引发频率波动。从统计特性看,电网频率波动服从一定的概率分布,不同时间段、不同季节的波动特征存在差异。在动态特性方面,频率波动具有快速性与随机性,小幅度波动频繁发生,大幅度波动虽较少见但危害更大,且波动传播速度快,若不及时控制可能引发连锁反应,影响整个电网的稳定运行。

2.2 电网调频策略与要求

电网调频旨在维持频率稳定,一次调频与二次调频是常用的调频策略。一次调频基于发电机组的调速器特性,当频率变化时,调速器自动调节机组出力,快速响应频率偏差,实现初步的功率平衡,但一次调频是有差调节,无法将频率完全恢复至额定值。二次调频通过自动发电控制系统,根据频率偏差与区域控制误差,调整发电机组的有功出力设定值,实现无差调节,使频率恢复并稳定在额定值。电网对调频资源提出了明确要求。响应速度方面,调频资源需在频率发生变化的极短时间内做出反应,以抑制频率波动扩散;调节范围上,要具备足够的功率调节能力,既能应对小幅度频繁波动,也能处理大幅度异常波动,确保电网在各种工况下都能保持频率稳定。

2.3 混合储能系统在电网调频中的角色定位

与传统调频资源相比,混合储能系统优势显著。传统调频资源如火电机组响应速度慢、调节灵活性不足,可再生能源发电又存在间歇性问题。而混合储能系统结合了能量型与功率型储能技术的优点,能量型储能可提供长时间、大容量的能量支撑,功率型储能能实现快速充放电,满足高功率瞬时需求。在电网调频中,混合储能系统应用场景广泛。在可再生能源高比例接入的电网中,可平抑可再生能源发电的波动,增强电网对清洁能源的消纳能力;在负荷密集区域,能有效应对负荷的峰谷变化,提高供电可靠性;还可参与电网的紧急调频,在系统出现故障或大扰动时,迅速提供功率支持,防止频率崩溃,保障电网安全稳定运行。

3 混合储能参与电网调频的优化控制方法

3.1 功率分配策略

不同储能单元在功率密度、能量密度、响应速度等特性上存在显著差异,这为功率分配提供了依据。能量型储能单元,如锂离子电池,能量密度高,适合承担长时间、大容量的功率任务;功率型储能单元,像超级电

容,功率密度大,能快速响应高频次的功率波动。基于此特性差异,功率分配应遵循能量型储能处理低频、大功率需求,功率型储能应对高频、小功率波动的原则。为实现精准功率分配,需设计综合考虑多方面因素的算法。功率需求是首要考量,依据电网实时频率偏差计算出的调频功率指令,是分配的基础^[3]。储能单元状态也不容忽视,包括荷电状态、健康状态等。荷电状态反映了储能单元剩余电量,健康状态体现了设备老化程度与性能衰减情况。算法根据这些因素动态调整各储能单元的功率分配比例,在满足电网调频需求的同时,保障储能单元安全稳定运行,延长设备使用寿命。

3.2 荷电状态(SOC)管理策略

荷电状态对混合储能系统性能影响重大。若储能单元荷电状态过高,继续充电可能导致过充,引发安全问题,降低电池寿命;荷电状态过低,过度放电同样会损害设备,影响系统可靠性。因此,有效管理荷电状态至关重要。设计基于荷电状态反馈的充放电控制策略,通过实时监测各储能单元的荷电状态,将其反馈至控制系统。当荷电状态接近上限时,控制系统减少充电功率或停止充电;接近下限时,降低放电功率或停止放电。同时,根据电网调频需求与储能单元状态,在安全范围内合理调整充放电策略,确保储能单元在安全区间运行,维持混合储能系统性能稳定。

3.3 协调控制策略

混合储能系统内部各储能单元需紧密协调。不同储能单元特性不同,若各自为政,难以发挥系统整体优势。通过设计协调控制方法,依据功率分配策略与荷电状态管理策略,实现各储能单元有序工作。例如,当功率型储能单元响应高频波动后荷电状态降低,能量型储能单元可适时为其充电,保持系统整体能量平衡。混合储能系统与电网其他调频资源协同也十分关键。电网调频资源多样,如火电机组、水电机组等。设计协同控制策略,使混合储能系统与其他调频资源优势互补。在频率波动初期,混合储能系统凭借快速响应能力率先动作;随着波动持续,其他调频资源逐步介入,共同完成调频任务,提高电网调频效率与质量。

3.4 智能优化算法应用

模型预测控制、强化学习等智能优化算法为混合储能调频控制带来新思路。模型预测控制基于系统模型预测未来状态,通过滚动优化与反馈校正,实现对混合储能系统的动态控制。强化学习则通过智能体与环境交互,不断学习最优控制策略,适应电网复杂多变的工况。设计基于智能优化算法的混合储能调频控制框架,将智能

算法融入功率分配、荷电状态管理、协调控制等环节。利用智能算法的强大学习能力与优化能力,根据电网实时数据与历史经验,自动调整控制参数,实现混合储能系统在电网调频中的自适应、智能化控制,提升系统性能与电网稳定性。

4 混合储能参与电网调频的优化控制架构设计

4.1 系统总体架构

混合储能参与电网调频的优化控制系统总体架构需具备高度集成性与协调性。该架构以实现高效、精准的电网调频为核心目标,涵盖数据采集、控制决策、功率执行等多个关键环节。系统主要由数据采集单元、控制单元、功率转换单元以及储能单元组成^[4]。数据采集单元负责实时获取电网频率、电压等关键参数以及储能单元的荷电状态、温度等信息,为控制决策提供数据支撑。控制单元依据采集的数据,运用优化控制算法生成调频指令。功率转换单元将控制单元的指令转化为实际的功率输出,驱动储能单元进行充放电操作。各部分通过标准化的接口进行数据交互与指令传递,确保系统整体运行流畅,实现从数据感知到功率调节的无缝衔接。

4.2 硬件层设计

混合储能系统硬件组成丰富多样,储能单元包含能量型与功率型储能设备,如锂离子电池与超级电容,二者优势互补,满足不同调频需求。功率转换系统则由变流器等设备构成,实现电能形式的转换与功率的灵活调节。硬件层与控制层之间的通信接口设计至关重要。采用高速、可靠的通信协议,如以太网通信,保障数据传输的实时性与准确性。数据交互方式上,控制层定期向硬件层发送控制指令,硬件层实时反馈储能单元的运行状态与功率执行情况,形成双向的数据流通机制,确保控制层能及时掌握硬件层动态,做出精准决策。

4.3 软件层设计

控制层软件架构采用模块化设计理念,包含数据采集与处理模块、控制算法模块、通信模块等。数据采集与处理模块对硬件层上传的数据进行滤波、校准等预处理,提取有效信息。控制算法模块运用先进的优化控制算法,如模型预测控制算法,根据处理后的数据生成最优调频策略。软件层实现依赖多种关键技术,如实时操作系统技术保障软件的实时响应能力,多线程编程技术

实现各模块的并行处理。编程方法上,采用面向对象的编程思想,提高代码的可维护性与可扩展性,便于后续功能升级与优化。

4.4 人机交互界面设计

人机交互界面是运行人员与混合储能系统沟通的桥梁。界面设计注重直观性与易用性,以图形化方式展示电网频率、储能单元状态等关键信息^[5]。在功能布局上,将监控功能与操作功能分区设置,监控区域实时显示系统运行参数,操作区域提供调频模式选择、参数设置等操作入口。为进一步降低操作难度,界面设计确保操作流程简洁明了,运行人员只需通过简单的鼠标点击或键盘输入,即可完成对混合储能系统的监控与操作,从而提高工作效率,确保运行人员能及时、有效地对系统进行管理与控制。

结束语

混合储能参与电网调频的优化控制研究,通过合理设计功率分配、荷电状态管理、协调控制策略,并应用智能优化算法,结合完善的优化控制架构,实现了混合储能系统在电网调频中的高效运行。这一研究成果有助于充分发挥混合储能系统优势,提升电网应对频率波动的能力,保障电力系统的稳定可靠供电,为电力行业的可持续发展提供有力支持,推动电网向智能化、高效化方向迈进。

参考文献

- [1]李秀慧,崔炎.考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J].储能科学与技术,2022,11(11):3594-3602.
- [2]程彩艳,施佳锋,刘佳名,等.规模化电池储能参与电网二次调频优化控制[J].电子设计工程,2025,33(17):105-108,113.
- [3]李兆乾,刘世林,黄世婧,等.分布式储能参与电网调频的站间-站内分层优化方法研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2026,43(1):86-96.
- [4]王杰.考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J].模具制造,2023,23(5):229-231.
- [5]罗耀东,田立军,王焱,等.飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J].电力系统自动化,2022,46(9):71-82.