

风力发电与储能系统协同运行的控制策略研究

侯飞龙 张世涛 黄虎鹏 后鹏宗 胡强强
华能(甘肃)新能源有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 随着全球对清洁能源需求的不断增长,风力发电作为一种重要的可再生能源发电方式,得到了广泛关注和快速发展。然而,风力发电具有间歇性、波动性和随机性等特点,给电力系统的稳定运行带来了挑战。储能系统具有快速充放电和能量时空转移的能力,将其与风力发电系统协同运行,可有效平滑风电功率输出,提高风电消纳能力和电力系统稳定性。本文深入探讨了风力发电与储能系统协同运行的控制策略,分析了不同控制策略的原理、特点及应用场景,旨在为提高风力发电与储能系统协同运行效率和可靠性提供理论支持和实践参考。

关键词: 风力发电; 储能系统; 协同运行; 控制策略

1 引言

在传统化石能源日益枯竭和环境污染问题日益严峻的背景下,可再生能源的开发与利用成为全球能源发展的必然趋势。风力发电凭借其资源丰富、分布广泛、清洁环保等优势,在全球范围内得到了大规模开发和利用。近年来,我国风力发电装机容量持续增长,已成为全球风电装机规模最大的国家。然而,风力发电的功率输出受风速、风向等自然因素影响显著,具有明显的间歇性、波动性和随机性,这导致风电并网后会对电力系统的频率、电压稳定性以及电能质量产生不利影响,限制了风电的大规模消纳。储能系统作为一种能够存储和释放电能的装置,可以有效弥补风力发电的不足。因此,研究风力发电与储能系统协同运行的控制策略具有重要的现实意义,对于推动我国风电产业的健康可持续发展,促进能源结构调整和实现“双碳”目标具有积极作用。

2 风力发电与储能系统协同运行模式

2.1 风力发电与储能系统协同运行主要有以下几种模式:

2.1.1 平滑风电功率输出模式

该模式的主要目的是减小风电功率的波动,提高风电功率输出的稳定性。通过实时监测风电功率输出,当风电功率出现波动时,储能系统进行充放电操作,吸收或释放功率,使风电并网功率保持相对平稳^[1]。这种模式适用于风电功率波动较大,对电网稳定性影响较为明显的场景。

2.1.2 跟踪计划出力模式

在此模式下,根据电网调度部门下达的风电发电计划,储能系统与风力发电系统协同工作,使风电场的实际输出功率尽可能跟踪计划出力曲线。当风电功率高于计划出力时,储能系统充电储存多余电能;当风电功率

低于计划出力时,储能系统放电补充功率不足。这种模式有助于提高风电场的计划执行能力,增强风电在电力系统中的可控性。

2.1.3 参与电网调频模式

储能系统具有快速响应能力,可以与风力发电系统共同参与电网的频率调节。当电网频率发生变化时,储能系统根据频率偏差信号迅速调整充放电功率,为电网提供频率支撑,维持电网频率稳定。这种模式对于提高电力系统的频率调节能力和稳定性具有重要意义。

2.1.4 提高风电消纳能力模式

在风电资源丰富但电网消纳能力有限的地区,储能系统可以在风电功率过剩时储存电能,在用电高峰或风电功率不足时将储存的电能释放出来,从而扩大风电的消纳范围,减少弃风现象的发生,提高风电资源的利用效率。

3 风力发电与储能系统协同运行控制策略设计原则

3.1 可靠性原则

控制策略必须确保风力发电与储能系统协同运行的安全性和可靠性。在各种运行工况下,能够准确、稳定地控制储能系统的充放电过程,避免因控制失误导致储能系统或风力发电系统出现故障,保障电力系统的稳定运行。

3.2 经济性原则

在满足系统运行要求的前提下,控制策略应充分考虑储能系统的投资成本、运行维护成本以及风电场的经济效益。通过优化控制策略,合理分配储能系统的充放电功率,降低储能系统的损耗,提高系统的整体经济性。

3.3 是适应性原则

由于风力发电的随机性和波动性,以及电网运行工况的复杂性,控制策略应具备良好的适应性。能够根据

不同的风速变化、风电功率输出特性以及电网调度需求,实时调整控制参数和策略,确保风力发电与储能系统协同运行的效果。

3.4 协调性原则

控制策略应实现风力发电系统与储能系统之间的协调运行。在能量管理方面,合理分配风力发电功率和储能系统充放电功率,充分发挥两者的优势,实现能量的高效利用;在控制指令执行方面,确保风力发电系统和储能系统能够准确、及时地响应控制指令,实现协同工作。

4 风力发电与储能系统协同运行控制策略分类及分析

4.1 基于规则的控制策略

基于规则的控制策略是一种简单直观的控制方法,它根据预先设定的规则和阈值来控制储能系统的充放电过程。常见的基于规则的控制策略包括功率阈值控制策略、SOC (State of Charge, 荷电状态) 阈值控制策略等。

4.1.1 功率阈值控制策略

该策略设定风电功率的上限和下限阈值。当风电功率超过上限阈值时,储能系统开始充电,吸收多余的电能;当风电功率低于下限阈值时,储能系统开始放电,补充功率不足。功率阈值的设定通常根据电网的承受能力和储能系统的容量来确定。这种控制策略的优点是原理简单、易于实现,能够快速响应风电功率的变化^[2]。然而,其缺点也较为明显,功率阈值的设定较为固定,难以适应复杂多变的风速和风电功率变化情况,可能导致储能系统的充放电效率不高,且无法充分考虑储能系统的SOC状态。

4.1.2 SOC阈值控制策略

此策略主要依据储能系统的SOC值来控制其充放电过程。设定储能系统的SOC上限和下限阈值,当SOC达到上限阈值时,储能系统停止充电;当SOC降至下限阈值时,储能系统停止放电。通过这种方式,可以避免储能系统过充过放,延长储能系统的使用寿命。但该策略仅考虑了储能系统的SOC状态,未充分考虑风电功率的实际波动情况,可能导致在风电功率波动较大时,储能系统无法有效平滑风电功率输出。

基于规则的控制策略虽然简单易行,但由于其控制规则相对固定,缺乏对系统动态特性的实时响应和优化能力,在实际应用中难以达到最佳的协同运行效果。

4.2 基于优化算法的控制策略

基于优化算法的控制策略通过建立数学模型,利用优化算法求解最优的储能系统充放电功率,以实现特定的控制目标。常见的优化算法包括动态规划算法、遗传算法、粒子群优化算法等。

4.2.1 动态规划算法

动态规划算法是一种将多阶段决策问题转化为一系列单阶段决策问题的方法。在风力发电与储能系统协同运行控制中,将整个运行周期划分为多个时段,根据每个时段的风电功率预测值、储能系统的SOC状态以及电网需求等因素,建立状态转移方程和目标函数,通过动态规划算法求解每个时段储能系统的最优充放电功率,使得整个运行周期内的目标函数(如平滑风电功率波动指标、经济效益指标等)达到最优。动态规划算法能够得到全局最优解,但计算量随着问题规模的增大而急剧增加,对于大规模的风力发电与储能系统协同运行问题,计算时间可能较长,难以满足实时控制的要求。

4.2.2 遗传算法

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的优化算法。它通过编码将储能系统的充放电功率控制参数表示为染色体,定义适应度函数来评价染色体的优劣,然后通过选择、交叉、变异等操作对染色体进行进化,逐步搜索最优解。遗传算法具有较强的全局搜索能力,能够在复杂的解空间中找到较好的解,且对目标函数和约束条件的要求较为宽松^[3]。然而,遗传算法存在收敛速度较慢、容易陷入局部最优解等问题,需要合理设置算法参数以提高搜索效率和解的质量。

4.2.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法,它模拟鸟群或鱼群的群体行为,通过个体之间的信息共享和协作来寻找最优解。在风力发电与储能系统协同运行控制中,将每个储能系统的充放电功率控制参数看作一个粒子,粒子在解空间中飞行,根据自身历史最优位置和群体历史最优位置来调整飞行速度和方向,逐步逼近最优解。粒子群优化算法具有参数设置简单、收敛速度快等优点,能够较快地找到较好的解,但在处理复杂的多目标优化问题时,可能需要进一步改进算法以提高求解精度。

基于优化算法的控制策略能够充分考虑系统的各种约束条件和优化目标,实现储能系统的优化控制,但计算复杂度较高,对算法的实时性和收敛性要求较高,在实际应用中需要结合具体问题进行算法改进和优化。

4.3 基于模型预测控制(MPC)的控制策略

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是一种基于系统模型的先进控制方法,它通过预测系统在未来一段时间内的动态行为,在线求解优化问题,得到当前时刻的最优控制输入。在风力发电与储能系统协同运行控制中,MPC控制策略的基本原理如下:

4.3.1 建立预测模型

根据风力发电系统和储能系统的动态特性,建立系统的预测模型。该模型能够根据当前时刻的系统状态(如风电功率、储能系统SOC等)和控制输入(如储能系统充放电功率),预测未来一段时间内系统的状态变化。

4.3.2 滚动优化

在每个控制周期内,根据预测模型和给定的优化目标(如平滑风电功率波动、跟踪计划出力等),以及系统的约束条件(如储能系统充放电功率限制、SOC限制等),求解一个有限时域内的优化问题,得到未来一段时间内的最优控制序列。然而,只将该序列的第一个控制量作用于系统,在下一个控制周期,重复上述过程,实现滚动优化。

4.3.3 反馈校正

由于预测模型存在一定的误差,以及实际系统中可能存在各种不确定性因素,在每个控制周期内,通过实时测量系统的实际输出,与预测模型输出的预测值进行比较,对预测模型进行修正,以提高预测精度和控制效果。

MPC控制策略能够充分考虑系统的动态特性和约束条件,实现储能系统的实时优化控制,具有良好的鲁棒性和适应性。但MPC控制策略的计算量较大,对控制器的计算性能要求较高,在实际应用中需要合理选择预测时域和控制时域,以提高算法的实时性。

4.4 基于多智能体系统的控制策略

基于多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)的控制策略将风力发电系统、储能系统以及电网调度中心等看作多个智能体,每个智能体具有一定的自主性、交互性和协作性。通过智能体之间的信息交互和协同工作,实现风力发电与储能系统的协同运行控制^[4]。在基于MAS的控制策略中,风力发电智能体负责实时监测风电功率输出,并将相关信息发送给其他智能体;储能系统智能体根据接收到的信息和自身的SOC状态,自主决策充放电功率;电网调度智能体根据电网的运行需求和整体优化目标,向风力发电智能体和储能系统智能体发送

调度指令。各智能体之间通过通信网络进行信息交互,实现协同控制。基于MAS的控制策略具有分布式控制、灵活性高、适应性强等优点,能够有效应对复杂多变的系统环境和大规模的风力发电与储能系统协同运行问题。然而,该策略的实现较为复杂,需要建立完善的智能体模型和通信机制,同时智能体之间的协同算法设计也是一个关键问题,需要进一步深入研究。

结语

本文围绕风力发电与储能系统协同运行的控制策略展开了深入研究。首先,分析了风力发电系统的特性和储能系统的类型及特性,介绍了风力发电与储能系统协同运行的主要模式。接着,阐述了控制策略设计应遵循的原则和要实现的目标。然后,对基于规则的控制策略、基于优化算法的控制策略、基于模型预测控制的控制策略以及基于多智能体系统的控制策略进行了详细分析和探讨。不同控制策略具有各自的优缺点,在实际应用中应根据具体的系统需求、运行环境和控制目标选择合适的控制策略。基于规则的控制策略简单易行,适用于对控制精度要求不高、实时性要求较高的场合;基于优化算法的控制策略能够实现储能系统的优化控制,但计算复杂度高,实时性较差;基于模型预测控制的控制策略具有良好的鲁棒性和适应性,在多个方面表现出色,但对控制器计算性能要求较高;基于多智能体系统的控制策略具有分布式控制和灵活性高的优点,适用于大规模的风力发电与储能系统协同运行,但实现较为复杂。

参考文献

- [1]郑华,伏睿,张颖,等.构网型储能系统与风力发电的协同控制研究[J].电力信息与通信技术,2023,21(11):48-54.
- [2]钟伟胜,黄承贵,杨南松,等.风力发电系统的储能技术研究[J].电气技术与经济,2025,(03):115-117.
- [3]田子健.新能源风力发电系统中储能技术的应用探索[J].河南科技,2024,51(22):12-15.
- [4]丁吾鹏.储能技术在风力发电系统中的应用研究[J].科技视界,2024,14(29):80-82.