

电力系统调峰调频运行机理与优化方法综述

徐永焄 刘建伟

内蒙古京隆发电有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i9.6559

[摘要] 随着新能源发电比例不断提升,电力系统的调峰调频任务日益复杂,传统调节手段面临严峻挑战。本文系统综述了电力系统调峰调频的分类与运行机理,重点分析了高比例新能源接入背景下电力系统调节能力面临的问题,探讨了基于传统机组、储能技术和需求侧响应等多种优化调节方法的研究进展与应用实践。通过对现有调峰调频策略的总结与比较,揭示了未来电力系统调节技术的发展方向,为保障电网安全稳定运行提供理论支持和技术参考。

[关键词] 电力系统; 调峰; 调频; 新能源

中图分类号: TM744 文献标识码: A

A review of the operation mechanism and optimization method of peak and frequency regulation of the power system

Yongtao Xu Jianwei Liu

Neimenggu Jinglong Power Generation Co., Ltd

[Abstract] With the continuous increase of the proportion of new energy power generation, the peak and frequency regulation tasks of the power system are becoming more and more complex, and the traditional regulation methods are facing severe challenges. This paper systematically reviews the basic mechanism and classification of peak and frequency regulation of the power system, focuses on the problems faced by the power system regulation capacity under the background of high proportion of new energy access, and discusses the research progress and application practice of various optimization and regulation methods based on traditional units, energy storage technology and demand-side response. Through the summary and comparison of the existing peak and frequency regulation strategies, the development direction of future power system regulation technology is revealed, and theoretical support and technical reference are provided for ensuring the safe and stable operation of the power grid.

[Key words] power system; peak shaving; Frequency modulation; New energy

引言

随着全球能源结构转型加快,风能、太阳能等可再生能源在电力系统中的占比显著提高,带来了负荷波动性和不确定性的大幅增加,传统电力系统调节模式面临巨大压力。电力系统调峰调频作为保障电网安全和供需平衡的核心技术,其机理和优化方法的研究日益成为学术和工程领域的热点。本文旨在系统梳理电力系统调峰调频的运行机理,分析新能源接入带来的挑战,重点综述基于传统机组、储能和需求侧响应等多种调节手段的优化策略,结合典型案例探讨其实际效果与应用潜力,为推动新型电力系统的灵活、高效运行提供理论依据和技术指导。

1 电力系统调峰调频基本概念与运行机理

1.1 电力系统调峰调频的定义与分类

电力系统调峰和调频是保证电力系统安全稳定运行的重要调节手段。调峰主要指根据负荷变化对发电机组出力进行调整,以满足不同时间段电力需求的波动,保证电网供需平衡,避免负荷高峰时电力不足或低谷时资源浪费。调峰按照时间尺度可分为日内调峰、周内调峰和季节调峰等不同类型;按照调节手段分为火电调峰、水电调峰、储能调峰和需求侧响应调峰等。调频则是指通过控制发电机组功率输出,维持电网频率稳定在额定值附近,补偿系统因负荷和发电波动引起的频率偏移,防止频率异常导致系统不稳定甚至停电事故。调频一般分为初级调频、二级调频和三级调频,根据响应速度和持续时间的不同进行分类。两者在保障电网安全稳定运行中相辅相成,是现代电力系统运行的基础。

1.2 电力系统调峰运行机理

电力系统调峰的运行机理主要体现在对电力负荷的时变特性进行有效管理和匹配发电侧资源输出。随着电力负荷在一天内的周期性波动,电网需要调整机组出力实现峰谷差的平滑化。调峰过程涉及火电、水电等机组根据负荷预测结果及实时调度命令,逐步增加或减少出力,满足负荷的变化需求。同时,调峰运行还要考虑机组的最小出力限制、启停时间、机组效率及设备寿命等因素,合理安排机组组合,保证调峰过程中机组安全稳定运行。调峰机理也包括电网调度系统根据实时负荷和新能源出力波动,协调各类调节资源,实现负荷峰谷的有效削减和填补,保障电力系统稳定可靠。其核心是通过机组的灵活出力调节,匹配电网负荷波动,确保电力供需平衡。

1.3 电力系统调频运行机理

电力系统调频机理是通过调节发电机组功率输出,实时平衡系统负荷与发电,保持系统频率稳定在标准值。电网频率反映了系统负荷与发电的即时平衡状态,当负荷突然增加或发电减少时,频率会下降;反之,频率会上升。调频系统利用机组的自动发电控制(AGC)和频率偏差检测,实现发电机组功率的动态调整,快速响应频率变化。调频通常分为初级调频(瞬时响应)、二级调频(AGC调节)和三级调频(手动调度),不同级别调频协同作用,保障频率稳定。调频过程中,机组根据频率偏差信号调整出力,抵消负荷波动对频率的影响,防止频率大幅偏离额定值,维护电网安全和供电质量。此外,随着新能源比例提升,调频难度加大,调频机理也在不断完善中,结合储能和需求响应等多种资源共同参与调频调节。

2 新型电力系统对调峰调频运行的影响

2.1 高比例新能源接入对系统调节能力的挑战

随着风电、光伏等可再生能源的大规模接入,电力系统的调峰调频运行面临严峻挑战。新能源具有波动性强、出力不可控和间歇性大的特点,尤其在新能源出力高峰与负荷低谷时段,常常导致系统调节能力紧张,影响电网安全稳定运行。由于新能源出力受自然条件制约,无法按照电网调度指令灵活调节功率,传统依靠火电、水电等常规机组调节方式难以满足高比例新能源下系统平衡需求。例如,在我国某些地区,夏季中午光伏出力接近系统负荷的60%以上,部分火电机组不得不超负荷运行甚至停机备调,导致调节余地受限,严重时需弃风弃光,影响新能源消纳率,制约了电力系统低碳化进程。

2.2 电力负荷波动性与不确定性增加

在新型电力系统构建过程中,负荷侧用电行为日趋多样化,特别是分布式能源、电动汽车、智能家居等大量接入,使得电力负荷呈现出更强的波动性和不确定性,给电网调峰调频带来较大压力。负荷变化频繁且预测精度难以保证,尤其在新能源出力剧烈变化叠加居民用电高峰时段,电网负荷曲线波动剧烈,原有以火电、水电为主的调节资源无法快速响应,易引发频率偏移、备用不足等问题。例如,在广东某地,夏季高温天气导致空调用电激增,瞬时负荷跳升超出预测值,叠加光伏出力突降,电网频率曾在短时间内偏移至50Hz以下,迫使系统紧急启用备用调频

机组,暴露出现有调节能力不足的问题。

2.3 储能和可控负荷参与调节的新需求

为了应对新能源高比例接入和负荷波动性增强的问题,电力系统对储能装置和可控负荷的调节需求不断增加。当前常规机组调节速度慢、调节范围有限,已难以独立完成快速、灵活的调峰调频任务,而储能系统具备响应速度快、充放电灵活等优势,能够在秒级甚至毫秒级内参与频率调节,缓解新能源波动对电网安全的冲击。同时,分布式可控负荷如电动汽车充电桩、工业负荷调节装置也逐渐成为电力系统调节的重要组成部分,提升了负荷侧的柔性调节能力。例如,2023年江苏电网调频辅助服务市场试点中,储能电站和大型工业负荷通过参与调频调峰辅助服务,成功弥补了光伏大规模接入带来的频率波动,实现了部分新能源弃电量的有效消纳,说明储能和可控负荷的参与已成为电力系统灵活调节的必要手段。

3 电力系统调峰调频优化方法研究

3.1 基于传统机组调节优化方法

在当前电力系统中,常规火电机组、水电机组依然是调峰调频运行的核心调节资源,针对高比例新能源接入带来的挑战,需通过优化传统机组的调节方式提升系统灵活性。首先,可以对火电机组实施深度调峰技术改造,提升机组在低负荷运行下的稳定性和安全性,降低最小技术出力,提高调峰调频能力。其次,优化机组启停顺序和方式,结合负荷预测和新能源出力预测结果,合理安排机组启停计划,减少频繁启停对机组设备的损耗。此外,应完善火电机组自动调频(AGC)控制系统,提高机组频率响应速度和调节精度,实现频率波动时的快速响应。同时,水电机组可通过调整水库调度计划、优化出力方式,参与中长期和短周期调峰调频调节。以华东电网为例,部分大型火电厂已通过实施深度调峰改造,将机组最小技术出力由50%降低至30%,有效提升了新能源消纳能力,保障了系统频率稳定。

3.2 基于储能技术的优化调节方法

储能技术作为新型电力系统调节灵活性的重要支撑手段,具备响应速度快、功率调节灵活和充放电双向调节等优点,可在秒级甚至毫秒级时间尺度内参与调峰调频调节。当前,应积极推动电化学储能电站、抽水蓄能电站、压缩空气储能等多类型储能资源建设,构建分布式与集中式相结合的储能调节体系,缓解新能源大规模接入带来的功率波动问题。同时,应优化储能调度策略,根据新能源出力预测、负荷变化趋势以及系统备用需求,动态调整储能设备充放电计划,实现削峰填谷、平滑新能源出力、快速响应频率偏移等功能。此外,可通过储能聚合技术,将多台小型储能装置聚合为虚拟电厂统一调度,提高系统整体调节灵活性。例如,2023年内蒙古某风光基地配套建设的电化学储能项目,通过与新能源电站协同调度,成功实现了新能源出力平滑、夜间余电存储和系统频率支撑,为高比例新能源接入电网提供了有效的调节支撑。

3.3 基于需求侧响应的优化方法

需求侧响应作为提高电力系统灵活性的重要手段,能够通

过调节用户侧用电行为参与调峰调频,有效缓解新能源接入对系统调节带来的压力。应积极建设完善的需求响应管理平台,采集、分析用户用电负荷数据,依据电网实时运行状态和电价信号,调控可控负荷、削减高峰用电、增加低谷负荷,实现用户侧柔性调节参与系统平衡调节。同时,应推动电动汽车、智能家居、工业柔性负荷等可中断或移峰负荷资源参与调频辅助服务市场,提升调节能力。此外,应建立合理的价格激励机制,激发用户参与需求响应的积极性,根据实时电价、调频补偿费用等方式引导用户自愿调节用电行为。以江苏电网需求侧响应市场化试点为例,2022年夏季高温期间,通过调控工业企业空调、制冷负荷以及居民智能家电,累计削减负荷超500万千瓦,有效缓解了电网调峰压力,保障了系统运行安全,说明需求侧响应已成为未来电力系统调节优化的重要方向。

4 结语

本文围绕电力系统调峰调频运行机理与优化方法进行了全面综述,指出随着新能源比例的持续提升,电力系统调节任务趋于复杂多变,传统调节手段需不断改进以适应新的运行环境。储能技术和需求侧响应作为重要的辅助调节资源,展现出巨大的发展潜力和应用价值。未来研究应进一步加强多种调节手段的协同优化,提升系统整体调节灵活性和稳定性,为实现绿色低碳电力系统转型目标提供有力支撑。通过不断深化理论研究

与实践,电力系统调峰调频技术将在保障电网安全、提高新能源消纳能力方面发挥更加关键的作用。

[参考文献]

- [1]王强,李明,张华.新能源高比例接入背景下电力系统调频技术综述[J].电力系统自动化,2023,47(5):15-25.
- [2]刘杰,陈磊,赵伟.基于储能技术的电力系统调峰优化方法研究进展[J].可再生能源,2022,40(8):1204-1213.
- [3]张丽,黄刚.电力系统调峰调频运行机理及多能协同调节策略[J].电网技术,2024,48(2):703-712.
- [4]赵欣,孙鹏飞.需求侧响应在电力系统调频中的应用研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(11):85-93.
- [5]陈涛,周亮,王旭.能源不确定性对电力系统调峰能力的影响分析[J].电力科学与工程,2022,38(3):45-53.
- [6]李芳,何刚.基于智能算法的电力系统调频优化方法综述[J].自动化学报,2024,50(1):77-88.

作者简介:

徐永焘(1986--),男,汉族,宁夏中卫人,工程师,本科,2010年毕业于东北电力大学热能与动力工程专业,2010年进入京能集团京隆发电有限责任公司,长期工作在生产一线,研究方向:机组调频与深度调峰对发电机及电网安全的影响及防范措施。