

风电并网下抽水蓄能电站优化控制策略

赵闻达

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.12238/hwr.v8i9.5722

[摘要] 随着全球能源转型的加速推进,风电作为清洁能源的重要组成部分,并网规模不断扩大,但是风电的间歇性和波动性给电网的安全稳定运行带来了巨大挑战。因此,文章对风电并网环境下抽水蓄能电站的优化控制策略进行了探讨分析,提出通过调峰优化调度、频率调节改进等方法,实现风电、火电与抽水蓄能电站的协同运行,提高电网对风电的消纳能力,确保电网供电的稳定性。

[关键词] 风电并网; 抽水蓄能电站; 优化控制

中图分类号: TV743 **文献标识码:** A

Optimal control strategy of pumped storage power station with wind power grid connection

Wenda Zhao

China 11th Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd

[Abstract] With the acceleration of global energy transformation, wind power, as an important part of clean and renewable energy, is increasingly connected to the grid. However, the intermittence and fluctuation of wind power bring great challenges to the safe and stable operation of the power grid. Therefore, this paper discusses and analyzes the optimal control strategy of pumped storage power station in the wind power grid-connected environment, and puts forward some methods such as peak-shaving optimal scheduling and frequency adjustment improvement to realize the coordinated operation of wind power, thermal power and pumped storage power station, improve the power grid's ability to absorb wind power and ensure the stability of power supply.

[Key words] wind power grid connection; Pumped storage power station; optimal control

1 研究背景

巴里坤县位于新疆九大风区之一,风电场以西(W)方向的风向和风能频率最高。110m高度风速主要集中在3.0m/s-9.0m/s,风能主要集中在10.0m/s-16.0m/s,风速春夏季风大,秋冬季风小,基本无破坏性风速。110m高度代表年平均风速为7.70m/s,平均风功率密度为501.3W/m²,采用WASP11.0软件拟合得到110m高度年平均风速为7.74m/s,年平均风功率密度为569W/m²,威布尔参数A=8.9, k=1.99。根据相关规范判定该风电场风功率密度等级为4级,风能资源丰富,具有一定的开发前景。中电建新能源新疆60万千瓦风储项目计划安装96台6.25MW风电机组,总装机容量600MW。但风电场风速和风电出力具有明显的波动性和不确定性,春夏季风大,秋冬季风小,这给电网的稳定运行带来挑战,可能导致电网频率波动、电压不稳定等问题,影响电能质量和电网的可靠性。而新疆电网和哈密电网需要确保稳定的电力供应,以满足地区的经济发展和居民生活需求。此外,哈密电网在某些时段存在风电弃风的情况,如2021年风电弃风比为8.2%。但是通过兼容抽水蓄能电站,并采取相应的优化控制策略,可以更好地

储存和释放风电能量,减少弃风现象,提高风电的消纳能力,充分利用当地丰富的风能资源,同时实现风电、火电和抽水蓄能电站的协同运行,降低系统的运行成本,推动风电等可再生能源的发展,加快新型电力系统建设。

2 风电与抽水蓄能的协同效应分析

风电和抽水蓄能之间的协同作用在可再生能源领域越来越受到重视,尤其是在电力系统的稳定性和可靠性方面。随着风能的快速发展,风电的间歇性和不稳定性成为当下的主要挑战。抽水蓄能电站(PSHPs)作为一种成熟的储能技术,能够有效地平衡这些波动,从而实现风电和抽水蓄能的良性互动。

风电和抽水蓄能之间的协同作用主要体现在以下几个方面:

(1) 精准平衡电力供需。抽水蓄能电站能够高效利用风电发电过剩的电能进行抽水蓄能作业,切实避免了风电资源的无效浪费。与此同时,风电的储能站应明确显示其运行状态,将风电的剩余电量妥善存储其中。这不仅为风电的稳定输出提供了有力保障,更是大幅提升了风电的整体利用效率。

(2)全面优化风电接入。在风电高发时段,抽水蓄能电站可迅速吸收过剩电量,显著降低风电对电网的冲击强度。尤其在夜间,抽水蓄能电站仅使用风电的富裕电量,提升了风电的接入能力,为风电的持续发展开辟了更为广阔的空间,有力推动了风电产业在技术创新与规模扩张方面的双重进步。

(3)强力增强系统稳定性。当风电发电不足时,抽水蓄能电站能够及时提供可靠的电力支撑,有效维持电网频率和电压的稳定。众多研究成果表明,风电与抽水蓄能的联合运行能够深度平滑风电的随机波动,从根本上提升了电力系统的稳定性和可靠性。

3 风电并网环境下抽水蓄能电站优化控制策略

3.1 调峰优化调度策略

在风电并网的复杂环境中,风电的间歇性和波动性给电网的稳定运行带来了巨大挑战。该策略的核心目标是,通过优化抽水蓄能电站的出力计划,实现风电与电网负荷的高效匹配。在具体实施过程中,需充分考虑电网的负荷需求特性、风电出力的预测数据以及抽水蓄能电站的运行特性等多方面因素^[1]。假设峰值负荷为1000MW,风电装机容量为500MW,抽水蓄能电站装机容量为200MW。根据历史数据和气象预测,风电出力在不同时段呈现出较大的波动性,如在夜间风电出力可能达到400MW,而白天用电高峰时段风电出力可能降至100MW。

为了实现峰优化调度,建立了如下数学模型:

目标函数: $\min \sum_{t=1}^T P_{abandon}(t)$, 其中 $P_{abandon}(t)$ 表示在时段 t 的风电弃风量

约束条件包括:

(1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N P_{G,i}(t) + P_{wind}(t) - P_{pump}(t) + P_{disc\ arg e}(t) = P_{load}(t), \text{ 其中}$$

$P_{G,i}(t)$ 表示火电机组 i 在时段 t 的出力, $P_{wind}(t)$ 表示风电在时段 t 的出力, $P_{pump}(t)$ 表示抽水蓄能电站在时段的抽水功率, $P_{disc\ arg e}(t)$ 表示抽水蓄能电站在时段的发电功率, $P_{load}(t)$ 表示电网在时段的负荷。

(2) 风电出力约束: $P_{wind,min}(t) \leq P_{wind}(t) \leq P_{wind,max}(t)$, 其中 $P_{wind,min}(t)$ 和 $P_{wind,max}(t)$ 分别表示风电在时段的出力下限和上限。

(3) 抽水蓄能电站运行约束。库容约束: $V_{min} \leq V(t) \leq V_{max}$, 其中 $v(t)$ 表示抽水蓄能电站在本时段 t 的库容, V_{min} 和 V_{max} 分别表示库容的下限和上限。抽水功率约束:

$0 \leq P_{pump}(t) \leq P_{pump,max}$, 其中 $P_{pump,max}$ 表示抽水蓄能电站的最大抽水功率。发电功率约束:

$0 \leq P_{disc\ arg e}(t) \leq P_{disc\ arg e,max}$, 其中 $P_{disc\ arg e,max}$ 表示抽水蓄能电站的最大发电功率。

在模型求解过程中,采用先进的优化算法,如混合整数规划算法或动态规划算法,以确保在满足约束条件的前提下,找到最优的抽水蓄能电站出力计划。通过合理安排抽水蓄能电站的抽水 and 发电时段,能够在风电出力过剩时储存能量,在风电出力不足时释放能量,从而有效减少风电弃风,提高电网对风电的消纳能力。

3.2 频率调节策略优化

在风电并网系统中,PID反馈控制策略是一种常用的控制方法,但它存在一些局限性。PID控制策略主要基于误差的反馈调节,对于风电出力的波动性和不确定性,PID控制策略可能无法及时准确地响应,导致系统频率的稳定性受到影响,并且PID控制策略的参数整定较为复杂,需要根据系统的具体特性进行调整,否则可能无法达到理想的控制效果^[2]。而抽水蓄能机组则受水锤效应的影响,水锤效应是指在抽水蓄能机组的启停和出力调节过程中,由于水流的惯性和管道的弹性,会产生压力波动的现象。水锤效应会对抽水蓄能机组的出力调节产生不利影响,可能导致机组的振动和损坏,同时也会影响系统的频率稳定性。在现有调频控制策略中,往往没有充分考虑水锤效应的影响,导致控制策略的效果不理想。上述因素都会影响风电并网下的电能质量,为了提高电能质量和电网稳定性,需要优化现有的抽水蓄能机组调频控制,引入先进的控制技术,如模型预测控制(MPC)和自适应控制,是改进频率调节策略的关键举措。(1)模型预测控制(MPC)。MPC通过建立精确的电网频率响应模型,能够准确预测未来一段时间内电网频率的变化趋势。基于这一预测,MPC可以提前调整抽水蓄能机组的出力,从而更精准地抵消风电波动对电网频率的影响。例如,根据电网频率响应模型的预测,如果未来某时段风电出力突然减少,将导致电网频率下降,MPC会提前指令抽水蓄能机组增加发电出力,以维持电网频率的稳定。这种提前预测和调整的能力,使得抽水蓄能机组能够更好地应对风电波动,提高电网频率的稳定性。(2)面向自动发电控制管理的风—蓄系统优化控制。自适应控制则能够根据电网频率的实时变化,自动调整控制参数,以适应不同的运行工况^[3]。AGC系统通常由三个部分组成:测量环节、控制环节和执行环节。测量环节负责实时采集系统的频率、功率等信息,并将这些信息传递给控制环节。控制环节根据预设的控制策略和算法,计算出所需的调节量,并将调节指令发送给执行环节。执行环节则负责控制发电机组的出力,使其按照指令进行调整。当系统频率低于额定频率时,AGC系统会增加发电机组的出力;当系统频率高于额定频率时,AGC系统会减少发电机组的出力,同时AGC系统还会根据负荷需求的变化,及时调整发电机组的出力,以保持系统的电力供需平衡。在抽水蓄能电站运行中,根据采集到的信息,AGC系统会运用如模型预测控制、自适应控制等先进控制算法,计算出抽

水蓄能电站和火电机组的最佳出力调节指令。在生成指令时,充分考虑抽水蓄能电站的快速响应能力和火电机组的调节容量,以实现最优的联合调频效果。如在某一时刻,系统频率下降了0.1赫兹,负荷需求增加了50兆瓦,风电场出力减少了30兆瓦。AGC系统根据这些信息,计算出抽水蓄能电站应增加发电出力40兆瓦,火电机组应增加出力40兆瓦。系统就会生成指令传输给抽水蓄能电站和火电机组,抽水蓄能电站根据指令快速调整出力,火电机组则相应地改变输出功率,共同实现对系统频率的调节。

3.3 兼容风电并网的系统调度策略

为了提升系统的经济性和稳定性,需要建立含抽水蓄能电站的风电和火电机组联合出力优化运行模型^[4]。模型的目标函数通常为最小化系统运行成本,火电机组的燃料成本、启停成本、抽水蓄能电站的运行成本以及风电的弃风成本等。系统在一天内的运行成本可以表示为:

$$C = \sum_{t=1}^T [C_{fuel}(t) + C_{startup}(t) + C_{pump}(t) + C_{abandon}(t)], \text{ 其中}$$

$C_{fuel}(t)$ 表示火电机组在时段 t 的燃料成本, $C_{startup}(t)$ 表示火电机组在时段 t 的启停成本, $C_{pump}(t)$ 表示抽水蓄能电站在时段 t 的运行成本, $C_{abandon}(t)$ 表示风电在时段 t 的弃风成本。约束条件包括功率平衡约束、风电出力约束、火电机组运行约束、抽水蓄能电站运行约束等。通过求解该模型,

可以得到风电、火电机组和抽水蓄能电站的最优出力计划,实现系统的经济运行。在风电出力较高且电价较低的时段,抽水蓄能电站可以储存多余的风电,减少火电机组的出力,降低系统运行成本;在风电出力较低且电价较高的时段,抽水蓄能电站可以释放储存的能量,补充电网供电不足,同时减少火电机组的启停次数,降低启停成本。

4 结语

风电并网是电力系统发展的必然趋势,为了进一步促进电网供电稳定性的提升,需要做好对抽水蓄能电站的合理应用,通过对抽水蓄能电站的优化控制,有效应对风电间歇性和波动性所带来的影响,为风电的大规模开发利用作出贡献。

【参考文献】

- [1]刘连德,何江.含高比例风光发电的电力系统中抽蓄电站的优化控制策略[J].储能科学与技术,2022,11(07):2197-2205.
- [2]关明.变速抽水蓄能机组参与含风电电网的调频控制研究[D].东北电力大学,2023.
- [3]周佩锋,朱冬.抽水蓄能电站成组控制模式下负荷调控策略的优化与研究[J].水电与抽水蓄能,2022,8(03):65-68.
- [4]罗铨众.含高比例风电的风—火—蓄联合运行优化调度控制策略[D].东北电力大学,2023.

作者简介:

赵闻达(1993—),男,汉族,河南省驻马店市西平县人,本科(双学位)工程师,水利水电工程、土木工程。