

基于抽水蓄能的电网频率调控方法研究

王黎明, 孙德志, 王祖飞

(河南天池抽水蓄能有限公司, 河南 南阳 474664)

摘要 本文对基于抽水蓄能电网频率调节方法进行研究, 首先阐述抽水蓄能电站结构和工作原理以及对电网的影响; 其次对抽水蓄能电站频率调控机理及具体方法进行探讨, 主要包括抽水蓄能机组运行特点及频率调节机制, 电网频率偏差检测与频率调控算法应用, 控制系统设计与实时监测优化等。通过对这几种方法进行分析, 以期对电网频率稳定调控提供新思路与技术支持。

关键词 抽水蓄能; 电网频率调控; 频率偏差检测

中图分类号: TV7

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0115-03

随着电力系统可再生能源占比不断提高, 电网频率稳定性受到了极大的挑战。抽水蓄能电站是储能的重要技术之一, 由于具有快速响应能力、大规模储能等特点, 已成为电网频率调控的重要途径。文章将以抽水蓄能电站结构及工作原理为基础, 探究其对电网的影响, 并对抽水蓄能电站频率调控机理及具体方法进行详细的分析, 希望能够对电网频率稳定运行起到一定的借鉴与参考作用。

1 基于抽水蓄能的电网频率调控原理

1.1 抽水蓄能电站结构及工作原理

抽水蓄能电站作为储能系统的基本构成, 包括上水库、下水库、引水道、发电机组及辅助设备。上水库与下水库之间由引水道相连通, 发电机组设置于引水道中部, 一般由水泵与水轮机组成。电站工作原理以“储能一释能等”工艺为主。当电力需求处于低谷, 利用电网多余电能带动水泵将下水库水抽到上水库存储。这个过程其实就是把电能变成势能, 存储到上水库的过程。上水库用水在用电需求高峰期经引水道流回到下水库带动水轮机产生电能, 把存储的势能再转换成电能输送到电网中。抽水蓄能电站运行模式灵活, 调节能力强。它具有能在较短的时间内完成由抽水向发电过渡、响应速度快、对电网需求变化适应性强等特点^[1]。另外, 抽水蓄能电站能量转换效率高, 能在较长时间的运行过程中保持能量存储与释放的高效能。通过以上工作原理可以看出抽水蓄能电站对电力系统的电力供需平衡起着调节作用, 尤其对于处理峰谷间不同的电力需求具有重要意义、吸收可再生能源中波动性强的电力, 增强电网稳定性, 优势明显。

1.2 抽水蓄能电站在电网中的作用

抽水蓄能电站对电网起到至关重要的调节与稳定作用, 主要作用有平衡电力供需, 改善电网稳定性, 提高电力系统灵活性与应急响应能力等。从平衡电力供需的角度来看, 抽水蓄能电站利用电力需求低谷时蓄电、需求高峰时放电来平滑电力供需差异、有效延缓电网紧张。这样既可以优化电力资源配置, 又可以提升电力系统运行效率。从改善电网稳定性的角度来看, 抽水蓄能电站能够对电力系统频率波动做出迅速反应。抽水蓄能电站在电网频率发生偏差时能快速启停, 并通过调整电力输出保持电网频率稳定。特别是当突发事件或者设备故障等原因造成电力供应中断后, 抽水蓄能电站能够充当紧急备用电源及时供电, 避免电网瘫痪。

1.3 抽水蓄能电站频率调控机理

抽水蓄能电站频率调控机制主要取决于快速响应特性与灵活运行方式。对电网进行频率调控, 其核心是维持电力系统发电与负荷动态平衡, 也就是实时匹配发电功率和负荷功率。电力系统负荷变化时电网频率会产生波动。抽水蓄能电站通过迅速调节自身发电功率以响应该频率波动以达到对电网频率进行平稳控制的目的。具体运行时电网频率降低就意味着负荷的增加或者发电的减少, 这时抽水蓄能电站可通过提高发电功率以弥补电力缺口和促进电网频率的提高; 反之, 电网频率升高, 则说明负荷下降或者发电过剩, 这时抽水蓄能电站可采用降低发电功率的方式, 甚至开始抽水模式, 把多余电能转换成势能进行存储, 减少电网频率。这样抽水蓄能电站就可以有效地调整电

网频率和保持电力系统动态平衡。抽水蓄能电站能否有效地进行频率调控,还要取决于它所采用的先进控制系统及实时监测技术^[2]。现代抽水蓄能电站一般都安装有自动化控制系统,能够对电网频率的变化进行实时监控,按照预设调控策略对发电或者抽水方式进行自动调节。

2 基于抽水蓄能的电网频率调控方法

2.1 抽水蓄能机组的频率调节机制

抽水蓄能机组频率调节机制,是对电网频率调控起关键性作用的核心内容。这种机制是以电力系统功率平衡原理为依据,通过调节发电与负荷的平衡以保持电网频率稳定。具体操作时,首先要进行频率偏差检测来进行调整。电网内的频率传感器对系统频率进行实时监控,一旦发现频率偏差将即时发出讯号。如频率传感器采样频率可达到每秒钟几千次以保证频率变化被瞬间捕获。响应控制在调整过程中至关重要。所述抽水蓄能机组控制系统在频率传感器发现偏差时,按照预设调节策略进行快速反应。比如当电网频率降到49.8 Hz时,说明负荷加大或者发电不充分,这时控制系统就开始发电模式,以提高发电功率的方式促进频率的提高;当电网频率升至50.2 Hz时,说明负荷下降或者发电富余,控制系统开始抽水模式以储存富余电能,频率下降。这些控制策略能在几秒钟内完成,以达到频率迅速恢复的目的。动态调整就是一个不断进行调整的过程。电网频率变化具有动态性,故抽水蓄能机组频率调节需不断进行。当频率回到正常区间时,控制系统将对电网频率持续监控,结合实际情况微调以保证频率长期平稳运行。如通过智能控制系统实现机组对功率输出的实时调节来适应频率的改变。这类系统一般由各种传感器及数据处理模块组成,能以毫秒级速度完成数据分析及控制指令。

2.2 基于抽水蓄能的电网频率调控策略

2.2.1 电网频率偏差检测

电网频率偏差检测作为频率调控工作的第一步,它通过对电网频率实时变化情况进行监控,辨识出系统内存在的频率偏差。现代电力系统频率传感器及监测设备一般安装于电网各关键节点上,可提供精度较高、反应迅速的频率数据。例如,某些高端的频率传感器能够达到每秒4 000次的采样频率,这确保了频率的偏移可以被迅速地识别出来。这些传感器连续收集电网频率信息并传递给中央控制系统。当发现频率偏差后,传感器立即发出报警信号以提示控制系统采

取适当调整措施。以德国电网频率检测系统为研究对象,该系统能在100毫秒的时间范围内完成频率偏差的准确检测和数据传输,从而为电网调控提供实时的数据支持。电网频率偏差的检测也有赖于先进的数据处理与分析技术。在频率检测领域,数字信号处理(DSP)技术得到了广泛的应用。DSP技术可以快速地对大规模数据进行处理、滤除噪声与干扰、提取频率有效部分,使频率检测更加精确可靠。更具体地说,DSP有能力在10毫秒的时间范围内处理频率数据,从而确保调节系统能够迅速作出反应^[3]。

2.2.2 抽水蓄能机组的频率调控算法

抽水蓄能机组频率调控算法为频率调控提供了一种重要技术途径。该算法以实时频率数据为依据,采用复杂数学模型及控制策略对抽水蓄能机组运行状态进行动态调节,以达到对电网频率的精确调控。具体地说,频率调控算法由频率偏差估计,调节策略选择以及运行状态优化等部分组成。频率偏差估计在算法中处于首要位置。该步骤根据实时频率数据由数学模型算出电网实际频率偏离标准频率。例如,利用快速傅里叶变换(FFT)这一技术,我们能够在短短几毫秒内完成频率偏差的精确计算,这种高效率的方法确保了对频率偏差的精确评估。在该算法中,调节策略的选择是其核心环节。该调控算法基于频率偏差估计将按照预设调节策略选择最佳调节措施。常用调节策略有模糊控制、PID控制、最优控制。如在检测频率降低至49.8 Hz后,调控算法选择增大发电功率,并通过增大抽水蓄能机组输出功率以促进频率升高;在检测到频率达到50.2 Hz的情况下,算法将决定降低发电功率或激活抽水模式,目的是通过减少输出功率或储存额外的电能来实现频率的降低。优化运行状态是一个调控算法不断进行的过程。电网频率变化具有动态性,故调控算法需不断对抽水蓄能机组工况进行调节来处理频率波动问题。比如自适应控制技术能够通过控制参数的实时调节以及调节策略的优化来保证频率调控的精确性与有效性。具体而言,自适应控制技术能够在数秒之内完成参数调整与策略优化以提升频率调控响应速度。现代调控算法也是人工智能与机器学习技术相结合的产物。比如对历史频率数据进行分析学习,机器学习算法就能预测出未来频率变化趋势并且提前进行调节策略调整,从而提高频率调控效率与可靠性。在一些电网系统中,基于深度学习已得到应用频率调控算法中,上述算法能够以毫秒量级完成频率预测与策略调整,显著改善频率调控性能。

2.3 抽水蓄能机组频率调控的实现技术

2.3.1 抽水蓄能机组的控制系统设计

抽水蓄能机组控制系统设计,是频率调控实施过程中最核心的技术。本控制系统由硬件与软件两部分构成,其中硬件主要包括传感器、控制器、执行器以及通信设备等模块,软件主要包括控制算法、监测程序以及数据处理模块等模块。在硬件设计上,控制系统一般使用高精度传感器及高速率控制器。举例来说,频率传感器的测量精度能够达到 0.01 Hz,并且其采样频率能够达到每秒 4 000 次,这样做是为了确保能够实时捕捉到频率的变化。控制器一般选用 PLC(可编程逻辑控制器)或 DCS(分布式控制系统),这类控制器拥有出色的数据处理速度和稳健的运行表现,能以毫秒量级完成频率数据接收、解析、指令执行等功能。执行器作为控制系统中的关键部件,主要工作就是按照控制指令对机组运行状态进行调节。如执行器能控制水泵及水轮机启停,调节功率输出。当代的抽水蓄能电站普遍使用电液伺服执行器,这类执行器拥有高度的精确性、快速的响应能力和出色的可靠性,能在短短几毫秒内完成控制命令,确保机组的工作状态得到及时的调节。在软件设计中,控制系统软件部分由控制算法、监测程序以及数据处理模块组成。控制算法承担着频率调控这一核心逻辑,在设计时需综合考虑电网实际工况及抽水蓄能机组特点^[4]。常用控制算法有 PID 控制、模糊控制、最优控制。如一些电站应用模糊 PID 控制算法将模糊逻辑与 PID 控制相结合以提高频率调控精度与响应速度。监测程序承担着对电网频率及机组运行状态的实时监控任务,同时向控制中心传输数据。现代监测程序一般为分布式结构,由多个节点协同完成,从而达到对电网整体频率进行综合监控的目的。如部分电站使用基于物联网监测系统,利用无线传感器网络对频率数据进行实时传输与共享,以增加监测覆盖范围与数据传输效率。

2.3.2 抽水蓄能机组的实时监测与优化

对抽水蓄能机组进行实时监控和优化,是频率调控实施过程中至关重要的环节。实时监测系统采用高精度的传感器及先进的数据处理技术来保证全面、实时地了解电网的频率及机组的运行状态;该优化系统采用智能算法与自动化控制技术对机组运行状态进行动态调整与最优控制。实时监测系统以高精度传感器为核心,以数据采集设备为辅助。这类装置一般安装于电网各关键节点及抽水蓄能电站主要元件中,如频

率传感器、水位传感器、流量传感器及功率传感器。这些传感器精度高、响应快,可在毫秒量级完成数据采集工作。例如,某些高端的频率传感器能够达到 0.01 Hz 的精确度,并且其采样频率可以高达每秒 4 000 次,这确保了对频率波动的实时监控。数据处理技术在实时监测系统中处于关键地位。数据处理模块承担着对监测数据的过滤,分析与处理的任务,从而提取出有效的信息并预测频率的变化趋势。举例来说,快速傅里叶变换技术能够在极短的几毫秒时间内完成频率数据的频域分析,有效滤除噪声和干扰,从而显著提升数据的准确度^[5]。

另外,小波变换技术还可实现频率数据的多尺度分析、瞬时变化及长期趋势提取、频率监测精度与可靠性的提升。该实时优化系统采用智能算法与自动化控制技术对机组运行状态进行动态调整与最优控制。智能算法一般有模糊控制、PID 控制、最优控制以及自适应控制。如模糊 PID 控制算法将模糊逻辑与 PID 控制相结合以达到频率调控精确控制、响应快等目的。自适应控制技术通过实时地调节控制参数和优化调节策略,确保了频率调控的效率和稳定性。

3 结束语

通过对以抽水蓄能为主的电网频率调节方法进行研究,发现抽水蓄能电站对于电网频率调节有明显的优势。它的快速响应特性以及大规模储能能力使得它成为处理电网频率波动问题的一种重要方法。展望未来,随着科技的持续发展和广泛应用,抽水蓄能技术在电网频率调节中将扮演更为核心的角色,为电力系统的平稳运作提供坚实的后盾。

参考文献:

- [1] 王晓丽,张鹏.可变速抽水蓄能关键技术[J].中国科技信息,2023(24):57-59.
- [2] 贺忠尉,向勇,李大虎,等.基于多元联合的电网频率紧急协调控制策略[J].湖北工业大学学报,2023,38(04):64-70.
- [3] 罗远翔,关明,刘铖,等.大规模风电并网下抽水蓄能参与电网调频的模型预测控制策略[J].东北电力大学学报,2023,43(04):20-29.
- [4] 赵灏然.双馈变速抽水蓄能机组对电网频率稳定性影响[D].西安:西安理工大学,2023.
- [5] 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].吉林市:东北电力大学,2023.