

# 新型电力系统下抽水蓄能电站容量效益分析

黄 浩

(中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300000)

**摘 要** 随着社会发展的不断推进,化石燃料作为人类长期以来赖以生存的重要能源,已经变得越发短缺。过去数百万年积累下来的化石燃料,可能将在未来消耗殆尽,此外,化石燃料在带来高能源的同时也伴随着高污染。为此,大力发展清洁的可再生能源成为全人类的共识。与其他类型的机组相比,如热电机组,每种机组都有其优点和缺点,问题在于根据各种能源的性能找到合理的比例,使曲线载荷上的各种能量源与工作位置相匹配,为实现安全和经济运行目标,泵电机组的容量百分比应适当,这是电网供电规划的关键问题。本文对新型电力系统下抽水蓄能电站容量效益进行分析,以供相关人员参考。

**关键词** 抽水蓄能;容量效益;生产运行模拟

**中图分类号:**F42; TM62

**文献标识码:**A

**文章编号:**1007-0745(2023)08-0067-03

工业时代加速了电力负荷的增长,发电厂的建设成为潮流,而抽水蓄能电站作为众多发电厂形式之一,其发展空间要大于传统发电厂,抽水蓄能电站是一种特殊的能源转换原理,它在电力网负荷较低的情况下使用较多的电能,将低水位的水从水轮发电机组输送到山顶,然后将这部分电力从水轮发电机组输送到山顶。

## 1 抽水蓄能发展现状

20 世纪 60~70 年代,我国开始进行抽水蓄能电站试点建设,先后建成河北岗南、北京密云等几座小型抽水蓄能电站。随着国内研究学者对大型抽水蓄能电站的研究,在 80~90 年代,建成广蓄及北京十三陵等大型抽水蓄能电站。进入 21 世纪以来,随着社会经济的发展,抽水蓄能电站在电力系统中的地位越发突出,在 2009~2013 年期间,国家能源局规划抽水蓄能电站站点 59 个,总装机容量达 7485 万 kW。“十三五”期间,新增加抽水蓄能电站规划站点 22 个,规划新增总装机容量 2970 万 kW。到 2020 年底,我国抽水蓄能电站的总装机规模已达 3149 万 kW,而在建的抽水蓄能电站装机容量总计达 5243 万 kW,同时又进一步规划电站装机容量 16 亿 kW。2021 年我国抽水蓄能新增装机管理规模达 490 万 kW,新增校准的装机规模容量 1370 万 kW。截至 2021 年底,我国抽水蓄能电站正在建造及已运行的总计 40 座,总装机达 3639 万 kW,在建抽水蓄能项目 48 座,在建总装机约达 6153 万 kW,中长期规划重点实施装机达 4.1 亿 kW,中国抽水蓄能在建和已建规模均位列世界之最。

分析 2.1 抽水蓄能电站建设必要性认识 20 世纪末,我国投产运行了十三陵、天荒坪、广州等一批早期的大型抽水蓄能电站,用以增加电力系统的调峰能力。这一时期,对大型抽水蓄能电站建设必要性的分析主要在利用其调峰能力解决电力系统中调峰填谷等问题。另外,随着“西电东送”“北电南送”等一系列国家战略的实行,国内大规模的核电、风电机组迅速发展,事故风险率变得越来越大,电力系统内急需一定规模的紧急事故备用容量来提升系统的经济性和安全性。从功能上讲,目前抽水蓄能主要承担电网的调峰、填谷、事故备用及其他辅助电网运行的功能。考虑到我们“两碳”目标的未来发展方向和一系列清洁能源战略的实施,清洁能源将迅速增长,并在需要稳定运行、风能和太阳能可调节的新能源、核能和风能方面占有越来越大的份额,这可能会给电力系统的稳定运行带来更大的困难,因此,关于未来加油站建设需要的论据应远优于电力系统的经济和安全方面。<sup>[1]</sup>

## 2 整体思路

世界许多国家的电力发展表明,在与大型火力发电厂、核电站等联合运行时,泵电池可以有效地利用资源,并允许电气系统以最佳状态运行,以获得最佳的电能质量和最大的经济效益。从发达国家的角度来看,泵站通常占电网总装机容量的 10% 至 12%。随着中国泵电站的快速发展,泵电站的合理配比问题已成为决定中国泵电站发展进程的关键问题。由于泵电站具有独特的静态和动态功能,电网迫切需要其进入电网,以确保其安全、稳定和经济运行,因此在一些地区建

设泵站越多越好,盲目地建设一些当地的小型泵站。因此,一些泵站不能发挥应有的作用,保持不活跃,导致一些资源浪费。因此,泵站的合理配比问题已成为泵站建设中必须首先解决的问题。抽水蓄能电站的容量效益是其自身的容量给电力系统安全、环保、经济运行带来的一种静态效益。虽然抽水蓄能电站的投入运行给电力系统带来的容量效益显著,但是容量效益在电力系统的整个生产运行过程中难以直接体现。在新型电力系统背景下,火电机组、风电机组、光伏机组、水电机组和抽水蓄能电站与电力系统协调运行,保障本地负荷和外送功率的稳定供应,维持区域电力系统的电力电量平衡。<sup>[2]</sup>

### 3 风电并网下的抽水蓄能鲁棒最优调频控制策略

电力系统中频率稳定由有功平衡决定,当负荷功率发生波动时,采用一次和二次调频使系统频率趋于稳定。随着大量新能源电源的不确定出力接入以及电网中本身存在的随机性负荷波动,会给电力系统引入大量持续的快速功率波动,使得系统的有功功率供需不平衡,恶化系统的频率响应,对电力系统的频率控制提出了更高要求,电网亟须一种更为灵活且有效的调频手段。抽水蓄能电站作为庞大的有功电源之一,其优秀的调频能力能更好地应对电力系统外部短时和快速的扰动,而随着大规模风电并网,系统调频需求不断增加,抽水蓄能机组将在电力系统频率调节中发挥出重要作用。然而目前抽水蓄能机组实现调频主要采用比例-积分-微分(Proportionalintegral-derivative, PID)反馈控制,但由于PID控制本身未考虑扰动源的特性,随着风电在电力系统中的比例上升,有功功率不平衡的加剧,抽水蓄能机组的PID控制频率调节性能会受到限制,不能保证其具有满意的调节性能。鲁棒控制常用于不确定系统的控制,已在电力系统调频领域得到成功应用。鲁棒控制针对被控系统中存在的有界参数不确定性或者有界扰动,有效维持系统稳定。基于负荷频率鲁棒控制模型,运用果蝇算法对其比例和积分参数优化,验证了该方法在风电并网系统中频率控制的有效性;将鲁棒控制应用于微电网的负荷频率控制上,运用智能算法优化范数权重来设计出最优鲁棒控制器,减小了风电功率扰动对系统频率造成的偏差;在含风电并网的电力系统框架下,对抽水蓄能电站运用鲁棒控制方法,降低外部扰动对系统频率产生的影响,仿真结果验证了该鲁棒控制方法对比传统PID控制调节的优越性。但由于该研究仅考虑了在负荷不变的情况下,风电出力波动对系统造成的频率偏差,

并在利用鲁棒控制在解决这类不确定性问题时,其控制系统一般处在系统次优状态,此时整个系统的稳态精度相对较低。因此,基于上述问题,对于该研究可以从控制策略上进一步改进。<sup>[3-4]</sup>

### 4 基于抽水蓄能的新型电力系统惯量优化控制方法

为实现“碳达峰、碳中和”的目标,风电、光伏等可再生能源并网容量将逐步提高,但可再生能源并网容量提高会导致电网惯性水平下降以及稳定性能恶化。在电网负荷处于低谷时,同步机组退出运行会导致电网惯量水平降低;而新能源机组出力增大时,由于其不具备调频能力,亦会导致电网维持频率稳定的安全问题更加突出。在电网的分层控制框架中,辅助控制通常通过集中式方法或分布式方法确定校正项。在集中控制框架中,所有分布式电源的信息都是在控制中心中收集和计算的。由于中心和分布式电源之间的通信网络复杂,难以保证控制效率。分布式控制是从共识算法发展而来的,它提供了一种消除偏差的新方法。分布式控制仅使用邻近信息而不是全局信息,并且比集中控制具有更好的可靠性和对通信故障的较低敏感性。电压和频率的收敛速度是微电网分布式控制的研究重点。研究人员提出了许多固定时间和有限时间控制算法来实现电网中分布式能源的快速收敛。不同于电压、频率等运行状态,惯量是系统的估计值,算法难以直接控制。RoCoF和频率最低点是惯性的两个关键指标。大多数分布式控制方法可以通过快速消除偏差来降低频率的最低点。抑制RoCoF是惯性增强需要解决的剩余问题。变化率的控制分布式控制中很少受到关注,但频率偏差控制在电网系统中得到了广泛的研究。例如,为了避免频率快速跌落,研究了具有频率偏差约束的一致性控制问题。电网作为一个多智能体系统,频率偏差约束方法为电网惯性增强提供了可行的解决方案。<sup>[5]</sup>

## 5 面向电力抽水蓄能行业的智慧物联体系技术

### 5.1 感知层

随着信息技术的发展及企业不断提升精益化管理水平的要求,目前感知层终端存在的主要问题包括终端覆盖范围有限,智能化水平不高、功能受限,大多数终端尚不具备边缘数据交互与处理能力;终端设备应用场景范围广,所涉及的通信技术多样、协议复杂,终端设备数据模型、接口协议不统一,数据跨专业协同共享存在壁垒;终端本地处理能力差,终端之间业务协同能力弱等。(1)测控类智能业务终端。主要包

括抽蓄电厂监控装置、自动发电控制 / 自动电压控制装置 (AGC/AVC 装置)、调速装置、励磁装置、测速装置、振摆保护装置等, 完成对抽蓄电厂机组、开关站、公用和闸门等监控对象的运行工况信息的测量与控制, 将相应的工况信息发送给计算机监控系统, 并接受监控系统的控制调节指令, 控制相应的执行元件调节水轮机组的运行情况, 保证电站按照调控安全稳定运行。

(2) 监测类智能业务终端。包括智能数据采集装置、一体化无线传感采集终端及低功耗无线采集终端。按专业又可分为发电设备监测终端、水情测报终端、大坝安全监测终端等, 主要用于对抽蓄电站机组设备状态、水情、雨情、气象及大坝安全监测类传感器的自动化采集, 将数据通过有线或无线的方式发送给相应的机组在线监测、水情测报、大坝安全监测等软件业务系统。<sup>[6]</sup>

## 5.2 平台层

通过将物联管理平台 (具备模型管理、连接管理、设备管理、消息处理、能力开放、应用管理) 与一体化管控平台融合, 形成物联数据中心, 使其具备标准的物联接入和业务系统数据接入 2 种能力, 以支撑已有业务系统数据接入和新建 (改造) 业务场景数据接入, 建成电站级数据中心满足数据统一采集、共享共用的建设目标。根据国网公司智慧物联体系的要求, 物联管理平台实现对各型边缘物联代理、采集终端等设备的统一在线管理和远程运维, 应具备 6 大功能: 模型管理、连接管理、设备管理、消息处理、能力开发和应用管理。其中物联管理平台的“应用管理”, 包括应用包及配置文件上传、应用上架发布、应用状态查询及管理、应用升级、容器和 APP 下发安装、应用业务配置等。具体而言, 即对边缘物理代理中 APP 的在线更新和远程运维。<sup>[7]</sup>

## 6 算例分析

### 6.1 参数设置

算例中的各项数据基于某省电力系统的实际装机容量、实际本地负荷和实际省间外送电等数据, 所采用数据的时间间隔为 1h。其中电厂的最小功率为装机容量的一半, 抽水蓄能电站的数据是根据省内抽水蓄能电站的实际设计参数得出的。典型两天的初始功耗值为 300 兆瓦, 此泵站的最大功耗为 2400 兆瓦, 最大功耗为 2400 兆瓦, 最大功耗为 7h。<sup>[8]</sup>

### 6.2 容量效益

作为典型的一天, 将为电气系统选择冬季和夏季负荷谷中的最小日差, 以计算消防系统容量在添加到

电气系统之前和之后的变化: (1) 分析降低热电偶安装容量的好处, 以模拟生产和运行两种情况。当抽水蓄能电站在典型的冬季日连接到电力系统时, 与无抽水蓄能电站相比, 增加泵站可以减少 702MW 的安装单元数量, 并且在大部分时间内可以显著降低燃烧单元的性能, 增加泵站可以减少约 3764mwh 的总用电量, 从而大大减少电力系统在典型的夏季日模拟生产和运行的碳排放量。当抽水蓄能电站连接到电力系统时, 与非抽水蓄能电站相比, 新增抽水蓄能电站可以减少 1544MW 的组合机组数量, 而且大部分时间可以大大降低能耗, 单位总能耗约为 7445mwh, 与典型冬季相比, 新增抽水蓄能电站对降低煤炭和碳排放的影响要大得多。(2) 分析抽水蓄能电站在电力系统运行中的容量和效率, 不仅可以降低消防系统的安装和性能, 还可以显著降低由于本地负载、出站性能以及新能源的波动而导致的能耗, 这些事件更频繁地发生在山谷中。

## 7 结语

针对电网惯性水平下降的问题, 本文基于抽水蓄能机组提出一种新的分布式控制方法补偿低惯性电网的惯性。(1) 分析了抽水蓄能机组调频潜力, 从水力系统出发, 通过变速运行可以调节抽水蓄能机组的流量和扬程, 在此基础上得到了抽水蓄能的有功控制及有功-频率耦合特性。(2) 采用频率变化和电压变化来量化频率和电压惯性, 通过具有约束变化率的分布式算法来增强电网惯性, 提出了一种新的分布式控制方法补偿低惯性电网的惯性。

## 参考文献:

- [1] 顾炜杰, 全心雨, 赵振敏, 等. 含风电系统中抽水蓄能电站的多目标发电调度模型 [C]// 华东六省一市电机工程 (电力) 学会, 2017.
- [2] 叶笑莉. 考虑辅助服务效益补偿的抽水蓄能电站运营模式研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [3] 邹金. 大规模风电并网下的抽水蓄能电站运行及控制研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [4] 张鲲. 风电并网环境下抽水蓄能电站优化控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2015.
- [5] 徐晖. 发改委: 促进抽水蓄能电站持续健康有序发展 [J]. 电器工业, 2015(01):56-57.
- [6] 鲍珣珣. 含抽水蓄能电站的电网负荷频率控制系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [7] 陈建峰. 黑龙江省荒沟抽水蓄能电站开发建设研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [8] 曹昉. 风电及抽水蓄能电站容量规划方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018.