

抽水蓄能电站优化调度技术研究综述

程 芳¹, 高龙华², 陈守伦³

(1. 广州市水利局 广东 广州 510640; 2. 徐州师范大学工学院 江苏 徐州 221011;

3. 河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 总结了国内外抽水蓄能电站优化调度技术的研究成果, 从抽水蓄能电站优化调度模型、求解策略、求解技术等方面对抽水蓄能电站优化调度技术进行了综述, 并探讨了存在的问题及今后的研究方向。

关键词 抽水蓄能电站; 优化调度; 辅助服务

中图分类号 :TV743

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2004)05-0064-03

当前, 随着以“厂网分家, 竞价上网”为前奏的电力市场化改革的深入^[1], 一方面为抽水蓄能电站 (pumped-storage plant, 以下简称 PS 电站) 的生存与发展带来了挑战; 另一方面, 又为解决 PS 电站辅助服务效益补偿问题带来了机遇。为此, 必须要进行 PS 电站辅助服务定价研究, 使之能够合理地回收成本并合理获利, 以提高 PS 电站在未来电力市场中的竞争力。从经济学定价方法的角度而言, 要进行这一定价研究, 首先要建立考虑这些辅助服务功能的 PS 电站优化调度模型, 其次是求解算法的研究, 最后才能进行定价。本文对国内外 PS 电站优化调度技术研究进展情况进行综述, 并对这一研究中存在的问题以及未来研究方向作一简要评述。

1 PS 电站优化调度模型概述

PS 电站优化调度是指在满足系统运行的各种约束以及各电源自身的技术约束条件下, 对系统内机组的出力及相应的流量进行决策, 使整个计划期内的电力系统费用最小。由这一定义可见, 模型的目标函数通常采用经济指标, 约束条件从范围来看可以大致分为两类: 一类系统范围约束, 如系统的负荷容量需求、旋转备用容量需求等; 另一类是各组成电源自身的技术、经济等方面的约束。如果在模型中考虑 PS 电站的辅助服务功能(现有文献中主要是旋转备用, 对其他的辅助服务涉及较少, 本文考虑的辅助服务功能主要是指旋转备用功能), 则实质上就是要解决如下问题: 在一个调度周期, PS 电站的容量应该如何安排, 即分别以多少容量承担调峰填谷和旋转备用任务, 才能使系统运行最优。

与常规水电站的优化调度计算相比, PS 电站优化调度模型的计算更为复杂, 其复杂性主要体现在以下几个方面: ①PS 电站优化调度问题实质上是一个水电、火电协调优化问题, 协调的本质要求各个子系统必须将自身效益与系统整体效益经过迭代、协调最终达到一致, 从而使这一问题具有大规模、高维数、非线性、计算复杂等特点; ②对于调度周期内每 1 h 的抽水、发电决策都伴随着水库水位的约束和动态变化; ③由于 PS 电站在运行过程中存在着多种运行工况, 电站实际上是在不连续的区间中调度运行的, 考虑这些工况的转换给调度模型的求解带来了困难; ④PS 电站在电力系统中的功能发挥是以辅助服务功能的发挥为主旨的^[2], 这在世界各国 PS 电站的实践中都得到了证实。电力市场条件下对辅助服务及其定价研究的重视, 迫切需要研究优化调度中辅助服务的建模问题, 考虑这些功能更加增加了模型的复杂性。

2 PS 电站优化调度问题求解策略研究

由于 PS 电站优化调度问题的求解非常复杂, 通常难以用某一种优化方法来解决, 因此, 如何合理地解构优化调度模型, 以及有针对性地采用合适的优化技术对于准确、快速地寻求问题的解是一个关键, 这就涉及到优化调度模型的求解策略, 它在结构上保证了算法的实现。

在查阅大量相关文献^[3~12]的基础上, 根据处理 PS 电站和火电站(为了方便起见, 本文讨论的电力系统是以火电为主的电力系统——火主电力系统, 忽略对水电站的讨论)的时间顺序不同, 可将现有模

型的求解策略归纳为两类,一类可以称为“并行”求解策略,另一类可以称为“串行”求解策略。具体来说,基于“并行”求解策略时,在同一求解层次,火电站和 PS 电站可以视为彼此无关的部分,二者相互独立同时进行,通过各自反馈的信息在上一级的协调层进行信息的沟通。这一求解策略中,需要经过协调级的反复协调,才能找到原问题的最优解,计算速度比较慢。如果协调级算法效率较低时,会进行多次无益的计算,从而大大降低计算效率。在考虑旋转备用功能时,由于必须引入相应的协调因子,更增加了协调的困难和计算时间。

所谓“串行”策略就是指顺序地进行 PS 电站和火电站的调度。这一策略基于这样一个事实,即 PS 电站工作在负荷曲线的高峰位置上,其运行改变火电面临的负荷曲线的形状,因而对系统中火电机组的运行方式有着较大的影响。在这一策略下,首先进行 PS 电站的调度,将 PS 电站承担的出力和备用通过协调层传递给火电子系统,协调层只进行信息的传递,即传递火电应承担的旋转备用和出力信息,火电子系统在此基础上进行优化。这种策略下,对应于每一次 PS 电站的优化,火电子系统都会有相应的响应,因而计算效率较高,且容易反映出 PS 电站决策的影响,尤其是在考虑 PS 电站的旋转备用功能时,这一求解策略更显优势。

3 PS 电站优化调度技术研究进展

前已述及,PS 电站的优化调度问题是一个高维数、非凸的、离散的、非线性的优化问题,很难找到理论上的最优解,但是由于它能带来显著的经济效益,许多学者一直都在积极进行研究。从现有文献看,PS 电站优化调度技术的发展趋势与优化算法的发展趋势基本保持一致,每一种新的算法技术都会被尝试引入到这一问题的求解中,试图使问题得到更好的解决。从他们的实践中也可看出,鉴于这一问题的复杂性,单纯采用某一种优化技术难以奏效,因此,采用不同的优化技术在一定的求解策略下形成混合算法来进行问题的求解是一个最为常用的方法,以下的讨论主要以这一技术的发展为线索进行。

3.1 网络流规划

网络流规划(network flow programming,NFP)是针对网络问题的一类特殊算法,其最大优点是一切与水流有关的约束都可以用网络流来表达^[13],同时还具有存储量小、计算速度快等特点。将网络流规划应用于水电站调度始于 20 世纪 70 年代^[14,15],文献[3]对分解后的定水头 PS 电站群子系统,借鉴火电“标准煤”的概念提出并采用了“标准水”的概念,在理论

上研究了“协调方程式法”在 PS 电站群优化调度中的应用,在解法上采用了加虚拟弧的网络流规划法,取得了一定的成果。文献[4]提出了一个可以考虑上、下游水位变化,初、末库容可以不相同,甚至日抽水量可以优化选择的优化方法——最大增益网算法,实践表明这一方法具有适应性好、速度快的优势。

3.2 动态规划方法

动态规划(dynamic programming,DP)技术是一种把多阶段决策问题转化为一列单阶段问题,然后逐个加以解决的方法,尤其适用于求解离散性的问题。由于其方法的有效性,在水、火电的调度实践中得到了大量的应用,并在实践中派生出关于 DP 的多种改进算法。

文献[6]以电力系统运行费用最小为目标,围绕 PS 电站日计划调度及可用容量在承担调峰填谷与旋转备用任务之间的有利划分问题,建立了 PS 电站与火电站配合优化运行的模型,采用 DP 技术求解。这一模型由一个主模型和几个辅助模型组成,考虑了 PS 电站的动态功能——旋转备用功能。文献[7,8]也是基于火电的费用曲线采用 DP 技术对 PS 电站优化方法的研究,其中,文献[8]采用动态规划和遗传算法的混合算法对这一问题进行了求解,但是在处理 PS 电站子问题时,仍采用 DP 技术。

3.3 拉格朗日松弛法

水、火电系统是一个非常典型的大系统,是大系统优化和控制理论应用的一个重要领域。在解决水火电系统协调问题时常用这一理论中的拉格朗日松弛(lagrangian relaxation,LR)算法,使用该法可达到降低维使问题容易解决的目的,在构成混合算法时提供了一个很好的算法框架。这一方法存在的问题是:在计算中过多乘子的引入会使计算结果的收敛速度变慢,同时由于对偶间隙的存在,还必须采取启发式算法来修正结果,使最终的解难以达到最优。

文献[9]采用拉格朗日松弛算法将全系统的约束松弛,从而使原问题得到分解而形成两层优化问题,第一层由火电、常规水电以及抽水蓄能等多个子问题组成,第二层为乘子优化问题。在求解 PS 子问题时,仍再一次采用 LR 方法。文献[5]与文献[9]在建立模型时的思路非常一致,所不同的是前者考虑了 PS 机组的启停、爬坡率等限制,实现了对 PS 电站的确切表达,使得计算的结果较为精确。

3.4 人工智能技术

人工智能(artificial intelligence,AI)技术被广泛地应用于求解优化问题,较之于传统方法有着不可替代的优势。目前,国内外已开发了多种人工智能工具,包括:专家系统、人工神经网络、模糊集、启发式

搜索等。

文献 [10] 提出基于启发式算法的深度优先搜索算法, SLA(straight line approach)和 CDDA(capacity difference dependent approach)法通过构建搜索树来寻找问题的最优解, 二者的区别在于调度策略的不同。这一方法存在的问题是由于采用了树状图进行搜索, 为了满足计算机存储的要求必须采取启发式方法对搜索进行简化, 因而解的质量好坏依赖于所采取的启发规则。

人工神经网络是模拟生物激励系统, 将一系列输入通过神经网络产生输出来解决一种方法。其中, 应用最广泛的是 BP 网络(back propagation networks), 无疑, 其良好的非线性映射逼近能力和泛化能力以及使用的易实现性是博得人们青睐的主要原因。

文献 [11] 指出, 基于常规优化调度技术的 PS 电站的优化调度通常较为耗时, 难以在实时调度中加以应用, 为此将神经网络技术引用到这一问题中。实际系统的应用表明, 与传统的算法相比, 该方法具有简单、快速的特点, 适用于实时调度。文献 [12] 依据神经网络能够解决含有连续变量的非线性约束问题的特点以及内在的并行性, 提出了含有 PS 电站的水电发电调度的退火神经网络方法, 并指出该模型能以较大的概率(接近 1)达到原问题的全局最优解。

4 结 语

由于 PS 电站的优化调度问题是一个非常复杂的问题, 多年来许多学者就此展开了研究, 取得了许多有益的成果, 但就总体看来, 还有以下问题有待解决:

a. 通过上述的讨论可见, 由于这一问题的复杂性, 以及考虑约束众多, 在求解时必须采用分块方式进行, 即将整个系统按照一定的方法分成几个子系统, 从而能有针对性地采用不同优化技术来求解, 这在某种程度上造成了难以寻求全局最优解的问题, 因此有必要加强求解技术在全局最优性方面的研究。

b. 目前神经网络、遗传算法等计算智能技术是算法研究的热点, 但在 PS 电站优化调度问题中的应用研究还刚刚起步, 如何将算法与所研究的具体问题结合, 还有许多理论问题有待探讨, 值得进行深入的研究。

c. PS 电站的效益不仅来自静态功能, 还来自于辅助服务功能, 但是多数模型对这一功能考虑较少, 很少有文献^[5,8]提及, 现有文献涉及的都是旋转备用功能的建模。在可靠性日益得到重视的今天, 为了满足在电力市场条件下对辅助服务定价研究的需要, 必须在模型中考虑其他辅助服务功能对系统中

其它电源的影响并把这一影响体现在模型中, 这是 PS 电站优化调度模型发展的一个重要方向。

d. 鉴于这一问题的复杂性以及涉及范围的广泛, 加之求解技术各自存在着不足, 因此当前的求解技术在计算速度和精度方面还不能令人满意, 还有必要寻求更为理想的求解策略以及算法混合技术以使问题得到更好地解决。

参考文献:

- [1] 于尔铿, 韩放, 谢开, 等. 电力市场 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 陆佑楣, 潘家铮. 抽水蓄能电站 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 王海忠, 于尔铿. “协调方程式法”用于抽水蓄能电站群优化调度的研究 [J]. 电网技术, 1996, 20(5): 24 ~ 25.
- [4] 陈雪青, 郑彤昕, 石光, 等. 有抽水蓄能电站的联合电力系统优化调度的模型与算法 [J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 274 ~ 288.
- [5] Ferreira L A F M. Short-term scheduling of a pumped storage plan [J]. IEEE Proceedings-C, 1992, 139(6): 521 ~ 528.
- [6] 徐得潜, 韩志刚, 翟国寿, 等. 抽水蓄能电站与火电配合运行优化模型研究 [J]. 水力发电学报, 1996(4): 11 ~ 20.
- [7] Cohen A I, Wan S H. An algorithm for scheduling a large pumped storage plan [J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(8): 2099 ~ 2104.
- [8] Zhao Hongwei, Ren Zhen. Hydro-thermal commitment considering pumped storage stations [A]. IEEE Proceedings of International Conference on Power System Technology (POWERCON '98), Vol. 1, Beijing, China, 1998. 576 ~ 580.
- [9] Guan Xiaohong, Roang Peter. Optimization-based scheduling of hydrothermal power systems with pumped storage [J]. IEEE Trans on PS, 1994, 9(2): 1023 ~ 1031.
- [10] Tsoi E, Wong K P. Artificial intelligence algorithms for short term scheduling of thermal generators and pumped storage unit [J]. IEEE Gener Transm Distr, 1997, 144(2): 193 ~ 200.
- [11] Li Ruomei, Chen Yunping. An application of ANN in scheduling pumped storage [A]. IEEE Proceedings of International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPDPD '95), Vol. 1, 1995. 85 ~ 90.
- [12] Liang Ruey-Hsun. A noise annealing neural networks for hydroelectric generation scheduling with large pumped storage unit [J]. IEEE Trans on PS, 2000, 15(3): 1008 ~ 1013.
- [13] Jensen P A, Barnes J W. Network flow programming [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [14] Rosenthal R E. A nonlinear network flow algorithm for maximization of benefits in a hydroelectric power system [J]. Operation Research, 1993, 29(4): 762 ~ 786.
- [15] 鲁子林. 水库群调度网络分析法 [J]. 华东水利学院学报, 1983, 11(2): 35 ~ 48.

(收稿日期 2003-11-24 编辑 熊水斌)