

基于分布式计算技术的火电厂辅助调频 储能系统容量及功率规划方法

吴金城¹, 董树锋¹, 张舒鹏¹, 韩荣杰², 寿挺², 李建斌²

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州市 310027;

2. 国网浙江杭州市萧山区供电有限公司 杭州市 311200)

摘要: 随着大量新能源并网,传统火电机组调频响应时间长、爬坡速率慢等缺点带来的反向效果越来越明显。储能系统可以用来缓解调频压力,大量研究证明储能系统可以应用于发电厂中火电机组的辅助调频。文章提出了一种基于分布式计算技术的火电厂辅助调频储能系统容量和功率规划方法。首先基于电网的“2个细则”建立电厂的收益模型。其次基于全寿命周期理论,建立储能系统成本模型,最后以电厂在全寿命周期内的综合收益最大化为目标函数,基于大量历史运行数据,采用基于分布式计算技术的粒子群优化算法进行仿真寻优,得到准确性较高的储能系统最优配置容量和功率。最后通过算例说明了储能系统辅助调频的效果以及分布式计算技术应用的必要性。

关键词: 储能系统; 分布式计算; 调频; 优化配置

Capacity and Power Planning Method Based on Distributed Computing for Energy Storage Assisted Frequency Modulation in Thermal Power Plants

WU Jincheng¹, DONG Shufeng¹, ZHANG Shupeng¹,

HAN Rongjie², SHOU Ting², LI Jianbin²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Hangzhou Xiaoshan Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

ABSTRACT: With the interconnection of a large number of new energy sources, the impact caused by the shortcomings of long response time and low climbing speed of thermal power units in the frequency regulation control of traditional power systems are becoming more and more obvious. The increasing development of energy storage system can be used to alleviate the pressure of frequency modulation. A large number of studies have proved that energy storage system can be applied to auxiliary frequency modulation of thermal power units in power plants. In this paper, a capacity and power planning method for auxiliary frequency modulation energy storage system of thermal power plant on the basis of distributed computing technology is proposed. Firstly, the profit model of power plant is established on the basis of the two rules of power grid. Secondly, the cost model of energy storage system is established on the basis of the life cycle theory. Finally, the optimal capacity and power allocation of energy storage system is obtained by using the particle swarm optimization algorithm based on distributed computing technology and taking the maximum comprehensive profit of power plant as the objective function. An example is given to illustrate the effect of auxiliary frequency modulation of energy storage system and the necessity of application of distributed computing technology.

This work is supported by National Key Research and Development of China(No. 2016YFB0901300) .

KEYWORDS: energy storage system; distributed computing; frequency regulation; optimal allocation

中图分类号: TM 621

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2019)06-0057-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2019.06.007

0 引言

自动发电控制(automatic generation control,

AGC)是互联电力系统运行中一个基本的和重要的实时计算机控制功能,其目的是使全系统的发电出力与负荷功率相匹配,保持系统频率为额定值,实现各区域内有功功率平衡^[1]。但是传统的火电机组响应

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)

时间长、爬坡速率慢,这不利于保障电力系统的电能质量,特别是这些年大规模新能源并网,其本身的间歇性和不确定性给电网的电能质量带来非常大的影响,传统调频方式已经无法应对这种调频需求^[2-5]。储能技术的进步为缓解这种压力带来了曙光,储能系统具有较快的功率调节速度,能够对指令需求做出快速响应,非常适合参与调频工作。但是由于目前储能装置造价昂贵、运行寿命有限,无法大面积推广,在调频过程中应当以辅助性的手段参与^[6]。

国内外很多学者对储能技术以及储能技术在调频领域的应用做了很多研究。文献[7]提出了一种同时计及系统经济运行和电池寿命的微电网储能系统容量优化模型,并通过算例证明所提出的储能系统容量优化配置方法具有更好的整体经济效益。文献[8]通过对国内外MW级储能系统调频项目应用现状进行调研分析,从政策制定者、市场参与者、调度机构这3个角度出发对如何促进中国储能系统调频商业化提出建议。文献[9]设计了一种考虑机组爬坡率限制的初始功率指令分配方法,并通过仿真实验证明其有效性。文献[10]采用离散傅里叶变化分析高频和低频调频需求,并对实际系统的全天和每小时内的高频分量的占比进行定量分析,提出了基于区域调节需求所处的区间灵活分配资源承担的调节量和将调频需求的高频分量指派给储能资源承担2种策略。上述文献所做研究大多需要对现有电厂的机组出力计划进行较大的改动,且较少结合现有的调频政策并从电厂的角度来看建设储能系统带来的效益。文献[11]在对《华东区域发电厂并网运行管理实施细则(试行)》和《华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》这2个细则解读的基础上,针对电网的考核指标提出多个储能系统充放电控制策略,考虑频繁动作对储能系统寿命的影响,建立了有关储能系统经济性的目标函数,并通过算例证明储能系统提升AGC性能的同时,也给电厂带来了收益。该方法具有较强的实际指导意义,但是其规划方法仅以储能电池的寿命为基础进行计算,没有考虑储能系统的全寿命周期,且仿真数据仅以日为单位,这就使得计算结果有失准确性。

国内各区域电网针对发电厂的调频政策有所不同,内蒙古电网根据调节速率、调节精度、调节响应时间这3个指标对AGC机组进行考核,并根据综合调节性能指标来对机组进行补偿;广东电网同样也通过上述3个指标进行考核,但是考核电费是根据各个指标的合格率的加权和进行考核的,补偿电费也多了AGC容量补偿的部分;华东电网的政策是仅根据调

节速率和调节精度这2个指标进行考核,补偿电费包括基本补偿和调用补偿2个部分,基本补偿是根据调节容量和服务时间进行补偿的,调用补偿是按AGC容量被调用时增发或少发的电量进行补偿的。上述区域电网针对AGC机组的考核、补偿计算方式虽然存在差异,但都是通过考核、补偿的方式激励机组满足调度指令,可以以同样的思路对AGC机组建立考核、补偿模型,再通过加入储能系统后考核费用的减少和补偿费用的增加来建立收益模型,最后结合储能系统的成本模型来规划储能系统的最优容量。

本文以内蒙古电网《内蒙古电网并网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》和《内蒙古电网发电厂并网运行管理实施细则(试行)》(以下简称“2个细则”)为例进行规划计算,如上所述,本文规划思路和方法也同样适用于其他区域电网的“细则”。本文首先根据内蒙古电网“2个细则”中的补偿、考核机制构建电厂收益模型,进而基于全寿命周期理论^[12],结合储能系统投资和运行维护成本模型建立储能系统的综合效益模型,最后基于大量历史运行数据,采用基于分布式计算技术^[13-15]的粒子群优化算法^[16]求解储能系统的最优配置容量和功率,分布式计算技术与常规计算技术区别在于其可以开启多个并行计算单元进行计算,加快运算速度,因此在同样的运算时间内可以支持数据量更大的仿真计算,提高规划结果的准确性。最后通过算例说明储能系统辅助调频的效果以及分布式计算技术应用的必要性。

1 储能系统收益模型

1.1 储能系统收益

储能系统参与辅助电厂火电机组调频所带来的收益有电厂被电网考核费用的减少以及电网对电厂AGC服务贡献的补偿费用的增加。

根据《内蒙古电网并网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》和《内蒙古电网发电厂并网运行管理实施细则(试行)》及其修订条款,发电机组提供AGC服务时,按AGC服务贡献补偿,日补偿电费计算如式(1)所示。实测机组月度调节性能指标为 K_1 、 K_2 、 K_3 。利用 K_1 、 K_2 、 K_3 进行分项考核,若参数大于设定值1,考核电量为0;若参数小于1,按照参数大小进行考核。月考核电费计算方式如式(2)、(3)所示。

$$R_d = DK_{pd}Y_{AGC} \quad (1)$$

式中: D 为日有效调节深度; K_{pd} 为日调节性能指标; Y_{AGC} 为AGC调节性能补偿系数,火电机组取5.5元/MW。月补偿电费为当月该机组每日补偿电费之和。

$$R_K = \sum_{i=1}^3 R_{Ki} \quad (2)$$

$$R_{Ki} = \begin{cases} \alpha_i (1 - K_i) 275 P_N & K_i < 1 \\ 0 & K_i \geq 1 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: α_i 为 AGC 性能考核系数, 数值为 2; P_N 为机组额定运行功率; K_1 为调节速率指标; K_2 为调节精度指标; K_3 为响应时间指标。

1.2 K_1 、 K_2 、 K_3 的计算及储能参与系统与调频的原理

根据电网“2 个细则”, 一次典型的 AGC 机组设点控制过程如图 1 所示。

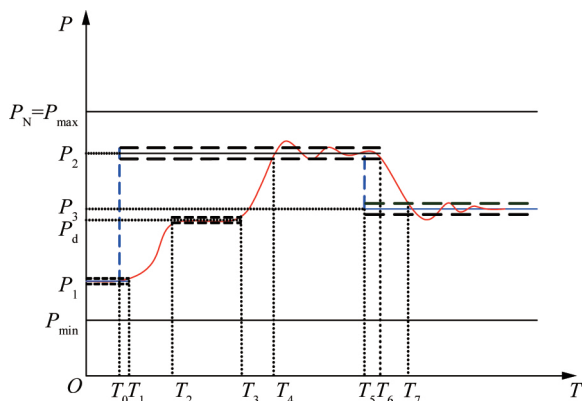


图 1 AGC 机组设点控制过程
Fig. 1 Point-setting control process of AGC unit

T_0 时刻, AGC 控制程序对该机组下发功率为 P_2 的设点命令, 机组开始涨出力, 到 T_1 时刻可靠跨出 P_1 的调节死区, 然后到 T_2 时刻进入启磨区间, 一直到 T_3 时刻, 启磨过程结束, 机组继续涨出力, 至 T_4 时刻第 1 次进入调节死区范围, 然后在 P_2 附近小幅振荡, 并稳定运行于 P_2 附近, 图中 P_1 为 T_0 时刻的机组出力, P_2 为 T_0 时刻调度机构下发的指令值, P_3 为调度机构下发的下一个指令值。

K_1 为调节速率指标, 调节速率是指机组响应设点指令的速率。

$$K_1 = \begin{cases} \frac{P_E - P_S}{(T_E - T_S) V_N}, & P_d \notin (P_E, P_S) \\ \frac{P_E - P_S}{[(T_E - T_S) - T_d] V_N}, & P_d \in (P_E, P_S) \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_N 为标准调节速率, MW/min; P_E 为终点时刻功率; P_S 为起点时刻功率; T_E 为终点时刻; T_S 为起点时刻; T_d 为启磨时间; P_d 为启磨功率。

K_2 为调节精度指标, 调节精度是指机组响应稳定以后, 实际出力和设点出力之间的差值。

$$K_2 = 2 - \frac{\Delta P}{\Delta P'} \quad (5)$$

$$\Delta P = \frac{\int_{T_S}^{T_E} |P(t) - P| dt}{T_E - T_S} \quad (6)$$

式中: ΔP 为偏差量, MW; $P(t)$ 为实际出力; P 为指令值; $\Delta P'$ 为允许的偏差量。

K_3 为响应时间指标, 响应时间是能量管理系统 (energy management system, EMS) 发出指令之后, 机组出力在原出力点的基础上, 可靠地跨出与调节方向一致的调节死区所用的时间。

$$\begin{cases} t_{up} = T_1 - T_0 \\ t_{down} = T_6 - T_5 \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_0 为指令开始下发的时刻; T_1 为跨出调节死区的时刻; T_5 为下一个指令开始下发的时刻; T_6 为响应下一个指令跨出调节死区的时刻。

$$K_3 = 2 - \frac{t}{t'} \quad (8)$$

式中: t 为响应时间; t' 为标准响应时间。

每次 AGC 动作时按式 (9) 计算 AGC 调节性能指标:

$$K_p = K_1 K_2 K_3 \quad (9)$$

调节性能指标日平均值:

$$K_{pd} = \frac{\sum_{j=1}^n K_{pj}}{n} \quad (10)$$

式中: K_{pd} 为机组 1 天内 n 次调节过程中的性能指标平均值; K_{pj} 为第 j 次调节性能指标。

调节性能指标月度平均值:

$$K_{pm} = \frac{\sum_{j=1}^N K_{pj}}{N} \quad (11)$$

式中: K_{pm} 为机组 1 个月内 N 次调节过程中的性能指标平均值。

传统火电机组响应时间长、爬坡速率慢, 这就给 K_1 、 K_2 、 K_3 的提升留出了空间, 储能系统控制技术的发展使得储能系统从全充电模式至全放电模式的时间可控制在 ms 级^[17], 所以储能系统可以在调频过程中迅速进行功率转换来弥补火电机组出力与指令之间的差距, 功率切换非常迅速, 可以大大减少式 (4) 中 $T_E - T_S$ 的值, 式 (6) 中 ΔP 的值以及式 (8) 中 t 的值, 以此提升 K_1 、 K_2 、 K_3 值, 从而提高调频的整体性能, 增加 AGC 服务补偿费用, 降低 AGC 考核费用。

1.3 储能系统约束

储能系统的约束主要来自于其额定功率以及容量的限制。假设储能电池的额定功率为 P_N , $P_c(t)$ 为指令值, $P_g(t)$ 为机组出力值, 储能系统容量为 E , 其上下限值分别为 S_2 和 S_1 , 本文采用荷电状态 (state of charge, SOC) 归位策略来进行仿真^[11], 上下归位值设为 S_4 和 S_3 , 当储能电池电量达到上限 S_2 后, 必须根据放电需求放电到 S_4 后才能恢复正常的充放电机

制,当储能电池电量达到下限 S_1 后,必须根据充电需求充电到 S_3 后才能恢复正常的充放电机制。

当 $P_c(t) > P_g(t)$ 时,储能电池有放电需求,若此时电池达到容量下限却还没有回归到 S_3 ,则此时放电功率为0,否则,放电功率如式(12)所示:

$$P(t) = \min [P_c(t) - P_g(t), P_N] \quad (12)$$

当 $P_c(t) < P_g(t)$ 时,储能电池有充电需求,若此时电池达到容量上限却还没有回归到 S_4 ,则此时充电功率为0,否则,充电功率如式(13)所示:

$$P(t) = \min [P_g(t) - P_c(t), P_N] \quad (13)$$

1.4 储能系统全寿命周期成本

储能系统成本主要包括投资成本与运行维护成本^[12]。

投资成本一般包括初始投资成本和置换投资成本。初始投资成本是在工程初期一次性投入的固定资金,由储能电池的额定功率和额定容量所决定。置换投资成本指在全寿命周期内用以更换电池储能设备而支出的资金。全寿命周期内储能系统投资成本表达式为

$$C_{inv} = C_{pcs} P_{rated} + \sum_{k=0}^n C_{bat} E_{rated} (1+r)^{-kT_{LCC}/(n+1)} \quad (14)$$

式中: P_{rated} 为储能系统的额定功率; E_{rated} 为储能系统的额定容量; C_{pcs} 为单位功率成本; C_{bat} 为单位容量成本; r 为折现率; T_{LCC} 为全寿命周期,文中取10年; n' 为置换次数; $n' = T_{LCC}/T_{life} - 1$, T_{life} 为储能电池的等效循环寿命; k 为置换次数。

运行维护成本 C_{om} 指为保证储能系统在使用年限内正常运行而动态投入的资金,通常包括由PCS决定的固定部分和由储能电池充放电电量决定的可变部分。

$$C_{om} = C_{Pom} P_{rated} \frac{(1+r)^{T_{LCC}-1}}{r(1+r)^{T_{LCC}}} + \sum_{t=1}^{T_{LCC}} C_{Eom} W(t) (1+r)^{-t} \quad (15)$$

式中: C_{Pom} 为单位功率运维成本; C_{Eom} 为单位容量运维成本; r 为贴现率,文中取8%; $W(t)$ 为储能电池第 t 年充放电电量。

1.5 电厂净收益最大化模型

储能系统的加入能有效提升AGC性能,通过增加服务补偿费用和减少考核费用来给电厂带来相对收益,但是储能系统的建立是需要成本的,随着储能系统功率和容量的增加,其带来的收益是呈边际递减的,而储能系统成本大致上是线性增加的,所以储能系统功率和容量并不是越大越好。因此综合考虑收益项和成本项建立如下以净收益最大为目标的成本

收益模型:

$$\max \{ (R_{Tlcc} - R_{before}) + (R_{Kbefore} - R_{KTlcc}) - C_{om} - C_{inv} \} \quad (16)$$

式中: R_{Tlcc} 为全寿命周期内加入储能系统的补偿电费; R_{before} 为全寿命周期内加入储能系统前机组自行调频产生的补偿电费; $R_{Kbefore}$ 为加入储能系统前的考核电费; R_{KTlcc} 为加入储能系统后的考核电费; C_{inv} 为全寿命周期内储能系统的投资成本。

1.6 规划路径

收益计算流程如图2所示。

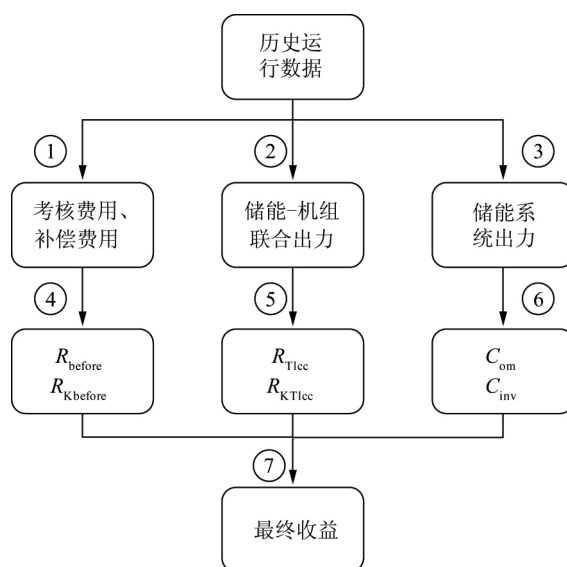


图2 收益计算流程

Fig. 2 Profit calculation process

图2中历史数据包括火电机组的历史出力数据以及电网调度指令数据,其中①、④表示通过1.2节所述原理计算得出未加入储能系统的机组考核费用以及补偿费用和换算成全寿命周期内的机组考核费用和补偿费用。②、③表示在给定储能系统的容量及功率并考虑1.3节所述储能系统约束及控制策略的情况下,仿真计算得出储能系统-机组联合出力及储能系统出力。⑤表示通过1.2节所述原理计算得出加入储能系统之后的考核费用以及补偿费用,并换算成全寿命周期内的考核费用和补偿费用。⑥表示通过储能系统出力以及储能电池的循环寿命次数计算出电池等效寿命,进而通过式(14)、(15)得出储能系统全寿命周期成本。⑦表示通过式(16)计算得出最终收益。

整个流程当中,只有储能系统容量与功率是变量,规划的过程就是通过搜索空间中不断搜索使得最终收益最大化的储能系统配置容量与功率。

2 基于分布式计算技术的粒子群优化算法

为了提高规划的准确性,本文采用的历史运行数据量比较大,传统的算法计算效率低,计算周期长。因此,本文采用了一种基于分布式计算技术的粒子群优化算法。

2.1 分布式计算技术

本文采用了 Matlab 中提供的 Matlab Parallel (Distributed) Computing Toolbox (Matlab 并行计算工具箱)^[13-14]实现分布式计算。在每台参与计算的计算机上启动 Matlab Distributed Computing Engine) 服务,该服务启动参与计算的工作单元的 Matlab 会话和管理各台计算机工作单元的工作管理程序。工作管理程序对所有工作单元进行管理,给工作单元分配计算任务,接收工作单元计算后的结果。工作单元完成任务后,会把结果返回给工作管理程序。当所有工作单元都完成任务后,客户端便可以从工作管理程序里取回结果。基本并行计算配置如图 3 所示,并行计算会话的交互过程如图 4 所示。

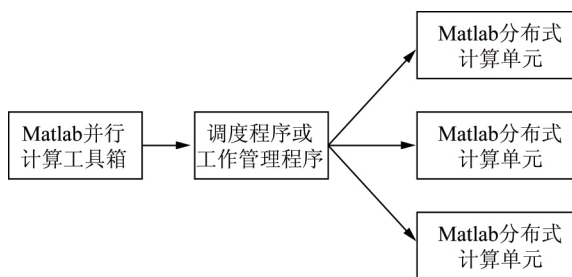


图 3 基本并行计算配置
Fig. 3 Configuration of basic parallel computing

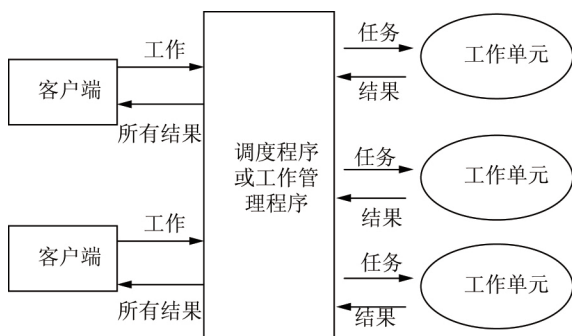


图 4 并行计算会话的交互
Fig. 4 Interaction of parallel computing sessions

2.2 基于分布式计算技术的粒子群优化算法

粒子群优化算法^[16]本质是一种随机搜索算法,适合在动态、多目标优化环境中寻优,与传统优化算

法相比,具有较快的计算速度和更好的全局搜索能力。

在一个 D 维的目标搜索空间中,有 N 个粒子组成一个群体,其中第 i 个粒子表示为 1 个 D 维的向量:

$$X_i = (x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ \cdots \ x_{iD}) \quad i=1 \ 2 \ \cdots \ N \quad (17)$$

第 i 个粒子的速度也是 1 个 D 维向量,记为

$$V_i = (v_{i1} \ v_{i2} \ v_{i3} \ \cdots \ v_{iD}) \quad i=1 \ 2 \ \cdots \ N \quad (18)$$

第 i 个粒子到目前为止搜索到的最优位置称为个体极值,记为

$$p_{best} = (p_{i1} \ p_{i2} \ p_{i3} \ \cdots \ p_{iD}) \quad i=1 \ 2 \ \cdots \ N \quad (19)$$

整个粒子群到目前为止搜索到的最优位置为全局极值,记为

$$g_{best} = (g_1 \ g_2 \ g_3 \ \cdots \ g_D) \quad (20)$$

在找到这 2 个最优值后,粒子根据式 (21) 和 (22) 来更新自己的速度和位置。

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) \cdot [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) \cdot [g_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (21)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (22)$$

式中: c_1 和 c_2 为学习因子; $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; $v_{ij}(t) \in [-v_{\max} \ v_{\max}]$ 为粒子的速度限值。 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 是介于 0 和 1 之间的随机数,体现粒子变化的随机性。

在计算每个粒子适应度值的时候,每个粒子的计算具有相对独立性,不受其他粒子计算的影响,这就使得每个粒子的适应度计算具有非常好的并行计算特征。在每一代粒子群计算的时候,把各个粒子的适应度计算任务分配给不同的 Matlab 分布式计算单元,这些计算单元可以同时进行运算,由此达到提升运算速度,减少计算时间的目的。

该算法实现流程为:

(1) 建立分布式计算集群。

(2) 初始化粒子群,包括群体规模,每个粒子的位置和速度。

(3) 根据群体规模及计算集群特征分配计算任务,任务的最小单位是每个粒子的适应度值的计算,每个粒子适应度值的计算不会相互影响,所以可以进行并行计算。如果计算单元计算性能一样,就把这些任务平均分配给各个计算单元,如果性能相差比较大,就让性能好的计算单元多分担些计算任务。

(4) 求解每个粒子的适应度值。

(5) 对于每个粒子,比较其适应度值和个体极值。将较大值赋予个体极值。

(6) 对于每个粒子,用它的适应度值和全局极值比较。将较大值赋予全局极值。

(7) 迭代更新粒子的速度和位置。

(8) 进行边界条件处理。

(9) 判断算法终止条件是否满足: 若是, 则结束算法并输出优化结果; 否则返回步骤(3)。

3 算例分析

本文以国内某电厂 300 MW 机组作为储能系统规划对象来进行分析。

为了提高计算结果的准确性, 本文从该机组过去一年每个季度中分别抽取一个典型月的运行数据, 采用上述基于分布式计算技术的粒子群算法进行仿真计算, 并与以仅从每个季度中分别抽取一个典型日的运行数据所计算出来的结果进行对比。本文所用的 4 个典型月的指令数据及 K_p 值统计特征如表 1、2 所示。

表 1 各典型月指令数据统计特征

Table 1 Statistical characteristics of monthly command data

典型月	日平均指令数	日指令数标准差	最大日指令数	最小日指令数
1	174.39	99.72	363	25
2	485.00	446.70	1 359	5
3	735.55	456.63	1 476	55
4	68.73	71.73	381	2

表 2 各典型月 K_p 值统计特征

Table 2 Statistical characteristics of K_p value in months

典型月	日平均 K_p 值	日 K_p 值标准差	最大日 K_p 值	最小日 K_p 值	月 K_p 值
1	0.414 6	0.179 1	1.009 4	0.157 5	0.623 1
2	0.461 2	0.282 3	0.999 4	0.003 4	0.879 6
3	0.529 9	0.176 9	1.140 4	0.190 7	0.613 0
4	0.713 8	0.303 9	1.403 4	0.142 8	1.043 9

指令数为调度机构下发的需要机组进行功率调节的指令数量, 由表 1 可以看出, 每个月的日指令数最大值与最小值相差较大, 其日指令数标准差也较大, 因此, 日指令数离散程度较大。

由表 2 可以看出, 每个月的日 K_p 值最大值与最小值相差较大, 其日 K_p 值标准差也较大, 因此日 K_p 值离散程度较大; 月 K_p 值与日 K_p 平均值差距较大。

其他参数如表 3、4 所示。表 4 中 N 为粒子群规模, T 为最大迭代次数, c_1 为学习因子 1, c_2 为学习因子 2, D 为变量维度, W_{\max} 为最大惯性权重, W_{\min} 为最小惯性权重, V_{\max} 为速度最大值, V_{\min} 为速度最小值, X_s 为位置最大值。

本次计算涉及的计算资源配置信息如表 5 所示。

表 3 储能系统成本收益模型计算参数

Table 3 Calculating parameters of cost-benefit model for energy storage system

参数	值	参数	值
$T_{LCC}/\text{年}$	10	S_1	0.1
$C_{\text{Pom}}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	7	S_2	0.9
$C_{\text{Eom}}/[\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	100	S_3	0.2
$C_{\text{pcs}}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	161	S_4	0.8
$C_{\text{bat}}/[\text{万元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	268.8	等效循环次数	3 000

表 4 粒子群优化算法参数

Table 4 Parameters of particle swarm optimization algorithm

参数	值	参数	值
N	100	W_{\max}	0.8
T	100	W_{\min}	0.4
c_1	1.5	V_{\max}	10
c_2	1.5	V_{\min}	-10
D	2.0	X_s	30

表 5 计算资源配置信息

Table 5 Configuration of computing resource

计算机	CPU 型号	运行内存/GB	提供计算单元数量
台式机	i7-7700	16	4
台式机	i5-6400	8	2
台式机	i7-4790	8	2
台式机	i5-4590T	4	2
服务器	E5-2660v4	64	20

表 6 为加入储能系统前后的 K_i 和 K_p 值对比情况。

表 6 加入储能前后的 K_i 和 K_p 值对比

Table 6 Comparison of K_i , K_p values before and after adding energy storage

是否储能系统配置	K_1	K_2	K_3	K_p
否	0.455 7	1.110 1	1.231 7	0.623 1
是	11.457 0	1.793 5	1.423 8	29.254 1

由表 6 可知, 加入储能系统后, K_1 、 K_2 、 K_3 这 3 个指标都变大了, 其中 K_1 上升尤为明显。根据式(9), K_p 值也由原来的 0.623 1 升为 29.254 0。

图 5 为加入储能系统后机组出力和联合出力情况。

由图 5 可以看出, 加入储能系统后联合出力能明显贴近指令值, 再结合表 6 中的计算结果, 可以看出加入储能系统后可以明显提高机组的调频性能。

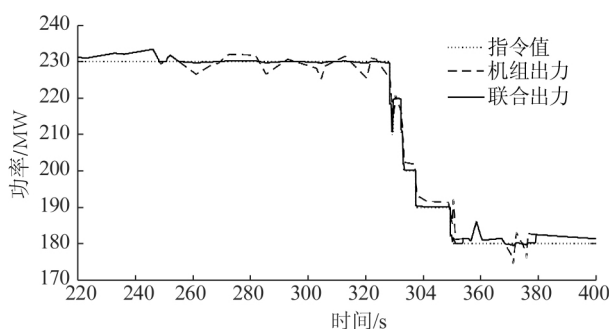


图5 加入储能系统后机组出力和联合出力情况

Fig. 5 Unit output and combined output after energy storage system added

采用基于分布式计算技术的粒子群优化算法,能获得足够的算力,可以基于典型月数据进行计算,最终得出储能系统规划的最优功率值和容量值分别为11.479 4 MW和7.514 5 MW·h,其全寿命周期内的最优收益为 $3.510\ 7 \times 10^8$ 元。而如果采用传统粒子群算法,由于运算速度受限,只能基于典型日数据进行计算,最终得出来储能系统规划的最优功率值和容量值分别为9.637 7 MW和14.015 1 MW·h,其全寿命周期内的最优收益为 $9.560\ 9 \times 10^8$ 元。

根据以上对比结果可以看出数据量的大小对最后的计算结果影响很大,而且由表1、2可以看出运行数据的高离散特征使得日数据无法表征月数据或者更大时间范围的数据,并且根据考核细则,电网本身也是以月为单位对机组进行考核,所以基于典型月数据的计算结果显然更加准确。因此大量运行数据的应用是必要的,其可以明显提升规划结果的准确性。数据量的增加会增加计算次数,但是分布式计算技术所带来的计算效率提升可以抵消掉部分影响,使得规划变得可行。

本次仿真计算中,如果使用传统粒子群算法,计算1次的时间是2 296.63 min,而使用基于分布式计算技术的粒子群算法,计算1次的时间是112.32 min,如果增加分布式计算单元的话,时间可以更少。

由此可以看出基于分布式计算技术的粒子群算法可以明显提升计算速度,使得基于大量数据的储能系统规划变得可行。

4 结 论

本文针对储能系统参与火电机组调频规划问题做了计算分析,以调频政策为导向,以净收益最大化为目标函数建立了基于全寿命周期的成本收益模型,从工程项目全寿命周期出发去考虑成本收益问题使

得结果更具有实际的意义。

本文采用了一种基于分布式计算技术的粒子群优化算法,使得规划过程中火电机组大量历史运行数据的应用成为了可能,提升了计算结果的准确性,并通过算例证明了其有效性。

5 参考文献

- [1] 韩祯祥. 电力系统分析 [M]. 5版. 杭州: 浙江大学出版社, 2013.
- [2] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助AGC调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.
DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuli, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [3] 牛阳, 张峰, 张辉, 等. 提升火电机组AGC性能的混合储能优化控制与容量规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 38-45, 83.
NIU Yang, ZHANG Feng, ZHANG Hui, et al. Optimal control strategy and capacity planning of hybrid energy storage system for improving AGC performance of thermal power units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 38-45, 83.
- [4] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.
JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368.
- [5] 周婷婷, 李欣然, 姜学校. 储能电源参与电网调频的需求评估方法[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 65-71.
ZHOU Tingting, LI Xinran, JIANG Xuejiao. Demands assessment method of energy storage power sources in grid frequency regulation [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 65-71.
- [6] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system indistribution network [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270.
- [7] 肖浩, 裴玮, 杨艳红, 等. 计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3256-3265.
XIAO Hao, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Energy storage capacity optimization for microgrid considering battery life and economic operation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3256-3265.
- [8] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
SUN Bingying, YANG Shuli, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [9] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 963-972.

- TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation method of secondary frequency modulation for energy storage battery with maximum net benefit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 963-972.
- [10] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.
HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.
- [11] 陈丽娟, 姜宇轩, 汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 52-59.
CHEN Lijuan, JIANG Yuxuan, WANG Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 52-59.
- [12] 黄际元. 储能电池参与电网调频的优化配置及控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
HUANG Jiyuan. Study on optimal allocation and control strategy design of battery energy storage system for power grid frequency regulation [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [13] 姚尚锋, 刘长江, 唐正华, 等. MATLAB 并行计算解决方案[J]. 计算机时代, 2016(9): 73-75.
YAO Shangfeng, LIU Changjiang, TANG Zhenghua, et al. MATLAB parallel computing solution [J]. Computer Era, 2016(9): 73-75.
- [14] 袁舒, 黄学超, 杨烜. Windows 环境下的 Matlab 并行机群计算配置及应用[J]. 计算机与现代化, 2010(5): 189-194.
YUAN Shu, HUANG Xuechao, YANG Xuan. Computing configuration and application of Matlab parallel cluster in windows environment [J]. Computer and Modernization, 2010(5): 189-194.
- [15] Matlab 并行计算工具箱及 MDCE 介绍 [DB/OL]. (2011-05-18) [2018-12-29]. https://wenku.baidu.com/view/481afd77a417866fb84a8e3f.html?rec_flag=default.
- [16] 包子阳, 余继周. 智能优化算法及其 MATLAB 实例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [17] 贾燕冰, 郑晋, 陈浩, 等. 基于集合经验模态分解的火-储联合调度调频储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2930-2937.
JIA Yanbing, ZHENG Jin, CHEN Hao, et al. Optimal allocation of FM energy storage capacity for joint dispatch of fire and storage based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2930-2937.
-
- 收稿日期: 2019-01-23
- 作者简介:
- 吴金城(1991) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为储能系统规划;
- 董树锋(1982) 男, 博士, 副教授, 通信作者, 主要研究方向为输配一体化电网分析、配电网建模和分析;
- 张舒鹏(1996) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为储能系统建模分析;
- 韩荣杰(1980) 男, 工程师, 主要从事自动化、信息、通讯等方面的研究工作;
- 寿挺(1982) 男, 工程师, 主要从事电网规划、设计方面的研究工作;
- 李建斌(1982) 男, 工程师, 主要从事电网规划、可研方面的研究工作。
- (编辑 张小飞)