

引用格式:朱靖恺,崔勇,杜洋,等.采用改进量子粒子群优化算法的虚拟电厂参与二次调频两阶段优化[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):112-120.

Citation: ZHU Jingkai, CUI Yong, DU Yang, et al. Two-stage optimization of virtual power plant participating in secondary frequency regulation using improved quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 112-120.

采用改进量子粒子群优化算法的虚拟电厂参与 二次调频两阶段优化

朱靖恺¹, 崔勇¹, 杜洋¹, 见伟^{2,3}, 刘炳⁴, 孙昭宇^{2,3}

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102208; 3. 北京中泰华电科技有限公司, 北京 102208;
4. 上海电巴新能源科技有限公司, 上海, 210000)

摘要: 虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 作为一种新型区域能源管理系统, 可通过“源一荷一储”的协调优化调度, 高效参与电网二次调频辅助服务。介绍虚拟电厂内部结构, 建模分析新能源机组及可控负荷特性; 搭建虚拟电厂参与二次调频两阶段调度模型, 该模型能够兼顾二次调频净利润及调频效果; 研究一种自适应权重的改进量子粒子群优化 (quantum particle swarm optimization, QPSO) 算法, 通过引入自适应权重机制, 在量子粒子更新过程中动态调整权重参数以提高算法的搜索能力和收敛速度; 并将改进算法应用于两阶段优化过程中, 使虚拟电厂获得更高的二次调频净利润及更好的调频效果; 仿真结果表明, 所提改进算法的收敛速度更快且全局寻优能力更强。

关键词: 虚拟电厂; 改进量子粒子群优化算法; 两阶段优化; 二次调频; 优化调度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.013 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)04-0112-09

Two-stage optimization of virtual power plant participating in secondary frequency regulation using improved quantum particle swarm optimization algorithm

ZHU Jingkai¹, CUI Yong¹, DU Yang¹, JIAN Wei^{2,3}, LIU Bing⁴, SUN Zhaoyu^{2,3}

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102208, China; 3. Beijing Zhongtaihuadian Technology Co., Ltd., Beijing 102208, China;
4. Shanghai Dianba New Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 210000, China)

Abstract: As a new type of regional energy management system, the virtual power plant (VPP) can efficiently participate in the secondary frequency regulation auxiliary services of the power grid through the coordinated optimal scheduling of "source-load-storage". This paper introduces the internal structure of the VPP, and models and analyzes the characteristics of new energy units and controllable loads. A two-stage scheduling model for the VPP participating in secondary frequency regulation is established, which can balance the net profit and frequency regulation effect of secondary frequency regulation. An improved quantum particle swarm optimization (QPSO) algorithm with adaptive weights is studied. By introducing an adaptive weighting mechanism, the weight parameters are dynamically adjusted during the quantum particle update process to improve the search ability and convergence speed of the algorithm. The improved algorithm is applied to the two-stage optimization process, enabling the VPP to achieve higher net profits from secondary frequency regulation and better frequency regulation effects. Simulation results demonstrate that the proposed improved algorithm has a faster convergence speed and stronger global optimization ability.

Key words: virtual power plant; improved quantum particle swarm optimization algorithm; two-stage optimization; secondary frequency modulation; optimal scheduling

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52207102); 国网上海市电力公司科技项目 (52094022004Q)

通信作者: 朱靖恺 (1975—), 男, 高级工程师, 主要从事配电网优化运行方面等研究; E-mail: 2263604536@qq.com

近年来,为实现“碳中和,碳达峰”的伟大目标,中国已大幅提升新能源发电的装机容量,而以风电、光伏为主的新能源大规模并网,使得新型电力系统呈现出明显的“双高”、“双随机”特征^[1],系统频率稳定问题凸显^[2]。而二次调频作为维持频率稳定的关键环节,仅依靠传统的水电和火电机组参与二次调频的成本较高,调节精度也难以保证^[3],如何充分调度电力系统内其他可调节资源来提升二次调频的经济性和调频效果是当前亟待解决的问题。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为一种区域性源荷协调的能量管理系统,具有实现分布式资源的有效聚合和协调控制的能力^[4-5],能够提高可再生能源的消纳量,减少碳排放^[6]并高效参与电网辅助调频服务^[7-8]。目前,已有学者研究不同资源类型 VPP 参与调频的方法,并探讨了其在调频市场取得的效果。在提高调频经济性方面,文献[9]利用 VPP 联合风电场参与二次调频;文献[10]讨论了 VPP 如何利用火电、电池储能以及工业负荷来提供调频服务,但均未计及居民可控负荷的参与;文献[11-12]建立含智能楼宇负荷、电动汽车等可调度负荷的 VPP 二次调频模型,证明了考虑居民负荷的需求响应能够提高 VPP 收益,弥补了前述文献的不足。在提高调频效果方面,文献[13-14]考虑了 VPP 参与二次调频的性能,在保证净收益期望最高的同时取得了较好的调频效果。然而现有文献对 VPP 日前调频经济性与日内调频效果的研究还相对较少,亟须研究并综合考虑不同时间尺度下调频经济性与调频效果的 VPP 优化调度方法。

针对 VPP 参与二次调频模型求解方法,传统智能优化算法如遗传算法(genetic algorithm, GA)^[15]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[16]等仍无法满足多资源虚拟电厂二次调频的实时优化调度^[17]。量子粒子群优化(quantum particle swarm optimization, QPSO)算法^[18]相对于传统智能优化算法,摆脱了传统速度—位置约束的限制,增加了粒子位置的随机性,提高了算法的计算效率和收敛速度,可用于 VPP 参与二次调频的功率精准计算和优化调度。但其在面临变量复杂、粒子范围广以及不同时间尺度的模型求解问题时的效果仍不理想,具有一定的局限性。

为了解决 PSO 算法的局限性问题,本文设计改进的 QPSO 算法,并提出基于改进 QPSO 算法的 VPP 参与二次调频两阶段优化方法。首先,介绍

VPP 内部结构,建立新能源机组及可控负荷模型;其次,建立二次调频两阶段调度模型,以 VPP 参与二次调频的经济性最优为日前优化调度阶段的目标函数,以 VPP 参与二次调频效果最佳为日内滚动优化阶段的目标函数;然后,提出一种改进 QPSO 算法,通过自适应改变粒子权重,加快种群搜索速度,缩短迭代周期,提高算法的求解速度与全局寻优能力;最后,为验证本文所提方法的有效性和优越性,将其与其他方法进行仿真对比分析。结果表明:本文所提方法可以提高 VPP 参与二次调频的调频效果及经济性。

1 VPP 模型

1.1 VPP 内部结构

VPP 由传统发电机组、新能源发电机组、储能电站以及可控负荷共同组成,其中,燃气轮机(gas turbine, GT)和水电机组(water turbine,)组成了传统机组,风电(wind turbine, WT)机组和光伏(photovoltaic, PV)机组组成了新能源机组;锂电池储能组成了储能电站,可削减负荷形式组成了可控负荷,具体内部逻辑结构如图 1 所示。

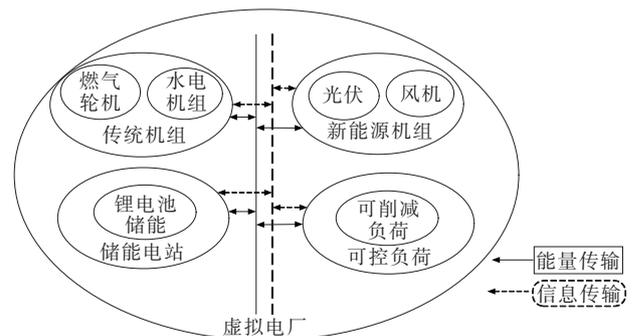


图 1 虚拟电厂内部结构

Figure 1 Internal structure of virtual power plant

1.2 新能源机组及可控负荷模型

由于新能源机组与可控负荷的功率环境相关性较强,因此,其出力与时间、环境等因素相关^[19-20]。

1) 风电机组。

风电机组的输出功率 P_{WT} 取决于额定风速 v_r 、实际风速 v 、启动风速 v_{ci} 和截止风速 v_{co} , 具体表达式如下:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \\ P_r (v^3 - v_{ci}^3) / (v_r^3 - v_{ci}^3), & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{co} \\ 0, & v > v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_r 为机组额定最大功率。

2) 光伏机组。

光伏机组的输出功率取决于环境的光强、温度因素, 表达式如下:

$$P_{PV} = P_{STC} f(G_{AC}/G_{STC}) [1 + \alpha_p (T_C - T_{STC})] \quad (2)$$

式中, P_{PV} 为机组输出功率; P_{STC} 为额定容量; f 为降额因子, 表示电池衰减和灰尘对光伏板的影响系数, 通常为 0.90~0.95; G_{STC} 为标准条件下的光强, 取 1 kW/m^2 ; G_{AC} 为实际光强, kW/m^2 ; α_p 为功率温度系数, 其值为 $-0.47 \text{ \%}/\text{K}$; T_C 为光伏板实际温度; T_{STC} 为标准条件下光伏温度, 取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3) 可控负荷

可控负荷采用的可削减负荷模型根据能源供应的重要程度按一定比例削减负荷, 最终通过控制温度实现需求侧响应, 如冰箱、公用制冷、供暖空调等^[21], 其调度成本可表示为

$$F_L = F_L^{\text{cut}} \sum_{t=1}^T \tau(t) (P_1^{\text{cut}}(t) - P_2^{\text{cut}}(t)) \quad (3)$$

式中, F_L 为可削减负荷的调度成本; F_L^{cut} 为单位负荷响应削减的补偿价格; $\tau(t)$ 为 t 时段下负荷是否参与削减的状态量, $\tau(t)$ 为 0 代表不参与负荷削减响应, $\tau(t)$ 为 1 代表参与负荷削减; P_1^{cut} 为负荷在削减前的日前预测功率; P_2^{cut} 为负荷削减后的功率。

同时, 为保障用户正常生产生活的舒适度, 需要对削减负荷功率和次数进行约束, 即

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \tau(t) \leq N_{\max} \\ P_{\min}^{\text{cut}} \leq P_2^{\text{cut}} \leq P_1^{\text{cut}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, N_{\max} 为最大削减次数; P_{\min}^{cut} 为可削减负荷功率的下限。

2 VPP参与二次调频两阶段调度模型

2.1 VPP两阶段优化调度流程

VPP参与二次调频采用两阶段优化调度框架, 具体分为日前和日内2个阶段, 如图2所示。

1) 日前优化调度阶段。基于日前预测的相关信息, 采用改进QPSO算法对VPP参与二次调频的经济性进行优化, 协调调度VPP中的可调节资源的有功输出功率, 得到日前最优运行方案, 将日前调度周期划分为24个时段, 则日前优化时间尺度取1h。

2) 日内滚动优化阶段。依据日前优化调度计划进行优化, 优化目标为VPP参与二次调频的响应

效果最佳。日内滚动优化依据新能源机组的短期预测曲线以及短期负荷曲线形成短时间尺度下的功率波动曲线上报至上级电网, 上级电网则根据功率波动曲线向VPP下达实时二次调频控制指令, VPP则对各资源进行短时间尺度的优化, 得到日内滚动优化运行方案, 将日前的每个1h时段划分为4个15min的短时段, 则日内滚动调度的优化时间尺度为15min。

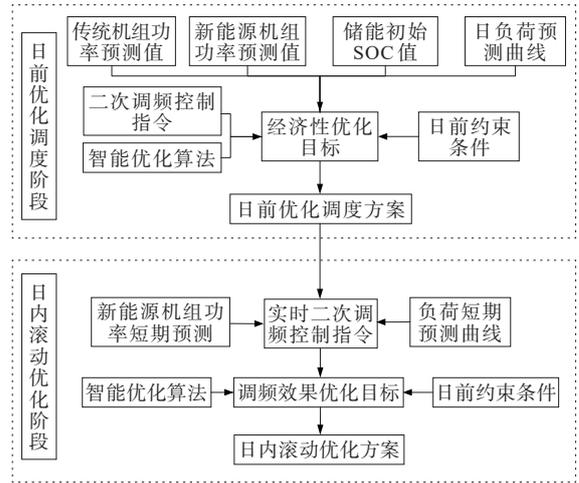


图2 VPP两阶段优化流程

Figure 2 Two-stage optimization process of VPP

2.2 日前优化调度模型

2.2.1 优化目标

以VPP参与二次调频的净利润最大为优化目标, 表达式为

$$\max F_z = F_{\text{in}} - F_{\text{cost}} \quad (5)$$

式中, F_z 为VPP参与二次调频的净利润; F_{in} 为电网补偿VPP参与调频总收益; F_{cost} 为VPP参与调频总支出。

1) 电网补偿VPP参与调频总收益 F_{in} 。

$$\begin{cases} F_{\text{in}} = F_{\text{in1}} + F_{\text{in2}} \\ F_{\text{in1}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M (G_m(t) \cdot S_m(t) \cdot k_m(t)) \\ F_{\text{in2}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M (C_m(t) \cdot T_m \cdot s_m(t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中, F_{in1} 为总调频功率补偿收益; F_{in2} 为总调频容量补偿收益; M 为参与二次调频机组的总数; $G_m(t)$ 、 $S_m(t)$ 分别为各机组参与调频的功率、单位功率结算费用; $k_m(t)$ 为二次调频性能指标; $C_m(t)$ 为各机组的调频容量, 设定为其总容量的5%; T_m 为调频时间; $s_m(t)$ 为各机组的单位容量补偿费用^[22]。

2) VPP参与二次调频的总费用 F_{cost} 。具体表

达式如下:

$$\begin{cases} F_{\text{cost}} = F_T + F_N + F_E + F_L \\ F_T = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^2 [a_m (P_{T,m}(t))^2 + b_m (P_{T,m}(t)) + c_m] \\ F_N = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^2 [c_{\text{op}} \cdot P_{N,m}(t) + c_q (P_{Np,m}(t) - P_{N,m}(t))] \\ F_E = \sum_{t=1}^{24} (c_{\text{com}} \cdot P_E(t)) \\ F_L = \sum_{t=1}^{24} [F_L^{\text{cut}} \tau(t) (P_{L1}^{\text{cut}}(t) - P_{L2}^{\text{cut}}(t))] \end{cases} \quad (7)$$

式中, F_T 为传统机组参与二次调频的费用; F_N 为新能源机组参与二次调频的费用; F_E 为储能电站参与二次调频的费用; F_L 为可控负荷参与二次调频的费用; $P_{T,m}$ 为燃气轮机、水电机组的功率值; a_m 、 b_m 、 c_m 分别为传统机组发电经济成本的各次项系数; $P_{Np,m}$ 为光伏和风机的实际输出功率; $P_{N,m}$ 为光伏和风机的计划输出功率; c_{op} 、 c_q 分别为运行维护成本系数、弃风/弃光惩罚系数; c_{com} 为储能电站运维成本系数; P_E 为储能功率值。

2.2.2 约束条件

1) 调节范围约束。

$$\begin{cases} P_{GT\min} \leq P_{GT} \leq P_{GT\max} \\ P_{HG\min} \leq P_{HG} \leq P_{HG\max} \\ P_{WT\min} \leq P_{WT} \leq P_{WT\max} \\ P_{PV\min} \leq P_{PV} \leq P_{PV\max} \\ P_{E\min} \leq P_E \leq P_{E\max} \\ P_{L\min} \leq P_L \leq P_{L\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{GT\max}$ 和 $P_{GT\min}$ 、 $P_{HG\max}$ 和 $P_{HG\min}$ 、 $P_{WT\max}$ 和 $P_{WT\min}$ 、 $P_{PV\max}$ 和 $P_{PV\min}$ 、 $P_{E\max}$ 和 $P_{E\min}$ 、 $P_{L\max}$ 和 $P_{L\min}$ 分别为燃气轮机、水机组、风机机组、光伏机组、储能以及可控负荷参与二次调频功率的上限和下限。

2) 二次调频控制偏差约束。

$$|P_{AGC}(t) - \bar{P}_{AGC1}(t)| \leq \delta \quad (9)$$

式中, $P_{AGC}(t)$ 为 t 时段 VPP 参与二次调频实际功率; $\bar{P}_{AGC1}(t)$ 为 t 时段上级电网下达到 VPP 的计划功率; δ 为误差上限。

3) 储能功率及荷电状态 (state of charge, SOC) 约束。

$$\begin{cases} P_E(t) = P_{\text{cha}}(t), P_E(t) > 0 \\ P_E(t) = P_{\text{dis}}(t), P_E(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} S_{OC}(t) = (1 - \epsilon) S_{OC}(t-1) + \frac{P_{\text{cha}}(t) |\eta S_{\text{cha}}(t)| - |P_{\text{dis}}(t)|}{\eta E} S_{\text{dis}}(t), 1 < t \leq 24 \\ S_{OC}(t) = 0.5, t = 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T \left(|P_{\text{cha}}(t) |\eta S_{\text{cha}}(t)| - \frac{|P_{\text{dis}}(t)|}{\eta} S_{\text{dis}}(t) \right) = 0 \quad (12)$$

其中,

$$S_{\text{cha}}(t) \cdot S_{\text{dis}}(t) = 0 \quad (13)$$

$$S_{OC}(1) = S_{OC}(24) \quad (14)$$

$$S_{OC,\min} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC,\max} \quad (15)$$

式(10)~(15)中, $P_{\text{cha}}(t)/P_{\text{dis}}(t)$ 分别为充电/放电功率; $S_{OC}(t)$ 为 t 时段荷电状态; ϵ 为自放电率; E 为配置容量; η 为充放电效率; $S_{\text{cha}}(t)/S_{\text{dis}}(t)$ 为充电/放电状态量, 可分别设置为 0 或 1; $S_{OC,\max}/S_{OC,\min}$ 为荷电状态的上限/下限。

2.3 日内滚动优化模型

日内滚动优化模型的目标函数是使 VPP 参与二次调频的综合性能指标达到最大化, 即

$$\max k_z = \frac{\sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^I [0.25(2k_{1m} + k_{2m} + k_{3m}) P_i^t]}{\sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^I P_i^t} \quad (16)$$

式中, k_z 为调频综合性能指标, 取决于 VPP 中各机组的日内调频性能指标及输出功率大小; k_{1m} 、 k_{2m} 、 k_{3m} 分别为不同调频机组在短时间尺度下调频性能指标, 分别为调节速率、响应时间及调节精度, 其权重选择及计算细节详见文献[15]、[23]。

$$\begin{cases} k_{1m}(t) = k_{vm}(t)/k_{av}(t) \\ k_{2m}(t) = 1 - (T_{dm}(t)/T) \\ k_{3m} = 1 - (\mu_m(t)/\mu_{a,m}) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $k_{vm}(t)$ 为各机组实际调节速率, 衡量虚拟电厂参与二次调频时的动态响应能力; $k_{av}(t)$ 为各机组平均调节速率, 衡量各机组调频性能差异; $T_{dm}(t)$ 为各机组响应指令的延迟时间, min, 衡量虚拟电厂参与二次调频的稳定性和效率; $\mu_m(t)$ 、 $\mu_{a,m}$ 分别为各机组调节功率、允许误差, $\mu_m(t)$ 、 $\mu_{a,m}$ 衡量虚拟电厂参与二次调频的调节准确率。

3 改进 QPSO 算法

3.1 改进 QPSO 算法原理

为了有效解决 PSO 算法的局限性和缺点, 本文设计改进的 QPSO 算法, 该算法的粒子位置更新时

并未伴随速度更新,增加了粒子位置的随机性^[24-25],因此能取得较PSO更好的寻优效果。QPSO的粒子进化方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i^{k+1} = B_i^{k+1} + b\alpha |C_i^{k+1} - X_i^k| \ln(u^{-1}) \\ b = \begin{cases} -1, & r \leq 0.5 \\ 1, & r > 0.5 \end{cases} \\ B_i^{k+1} = \varphi D_i^k + (1 - \varphi) G^k \\ C^{k+1} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M D_i^k = \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} D_i^k = \sum_{i=1}^M (\omega_i^k D_i^k) \\ \omega_i^k = f(D_i^k) / \sum_{i=1}^M f(D_i^k) \end{array} \right. \quad (18)$$

式中, C_i^k, D_i^k, G_i^k 分别为第 k 次迭代时最优中心、历史最优位置和全局最优位置; B_i^{k+1} 为局部吸引子, 由个体历史最优位置和全局最优位置共同决定; α 为扩张—收缩因子; M 为种群规模; b 为粒子移动方向; k 为迭代次数; r 为随机数, 且 $r \in (0, 1)$; $\omega_i^k, f(D_i^k)$ 分别为第 i 个粒子的权重和处于最优位置时的适应度。

3.2 QPSO算法的改进

QPSO算法虽然取得了一些进展,但仍存在问题,如搜索的随机性不够强等。当每个粒子的权值相同时就很难发挥主导粒子的引导作用,易出现早熟和收敛^[26]。因此,本文对QPSO算法进行改进,让粒子权重随着适应度值进行自适应变化,加快种群搜索速度,提高算法运算效率与全局寻优能力。改进后QPSO算法的权重计算如下:

$$\omega_i^{k'} = \begin{cases} \frac{K_1(f - f_{\min})}{f_{\max} - f_{\min}} \omega_i^k, & f \geq f_{av} \\ K_2 \omega_i^k, & f < f_{av} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\omega_i^{k'}$ 为改进后权重; K_1, K_2 均为比重, 且 $K_1 \in (1, 2), K_2 \in (0, 1)$; $f_{\max}, f_{\min}, f_{av}$ 分别为适应度的最大、最小、平均值。

对改进后权重进行分析,当种群个体适应度较大时(大于等于历史适应度的平均值),权重将随着适应度的增大而增大;而当个体适应度较小时(小于历史适应度的平均值),权重将减小,种群适应度便更快地向适应度大的个体进化,进而削弱个体适应度对种群的影响。

3.3 算法流程

在满足各阶段约束条件下,本文模型实现日前净利润和日内调频效果的最大化。改进的QPSO算法流程如图3所示。

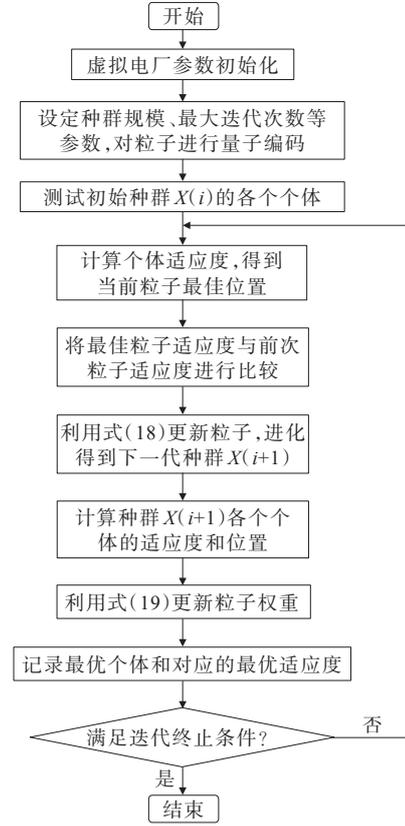


图3 改进的QPSO算法流程

Figure 3 Flowchart of improved QPSO algorithm

4 算例分析

设置分时电价如表1所示;基于文1.1中VPP内部逻辑结构,VPP各机组二次调频参数如表2所示。本文算例采用3种方案对VPP各调频机组进行两阶段优化,3种算法的种群粒子数均为500,迭代次数为200。

方案1 采用PSO算法对VPP参与二次调频进行两阶段优化;

方案2 采用QPSO算法对VPP参与二次调频进行两阶段优化;

方案3 采用改进QPSO算法对VPP参与二次调频进行两阶段优化。

表1 分时电价

时段	分时电价 元/(kW·h)	
	充电	放电
谷(00:00—05:00,22:00—24:00)	0.6	0.4
平(05:00—07:00,12:00—16:00,20:00—22:00)	0.9	0.7
峰(07:00—12:00,16:00—20:00)	1.2	0.9

表 2 VPP 各机组二次调频参数

Table 2 Secondary frequency regulation parameters of each unit in VPP

VPP 各机组二次调频功率/kW					
P_{GTmax}	P_{GTmin}	P_{HGmax}	P_{Emax}	P_{HGmin}	P_{Emin}
20	-20	2	50	-2	-50
储能参数					
$E/(MW \cdot h)$	η	ϵ	$S_{SOC,max}$	$S_{SOC,min}$	
50	0.9	0.005	0.9	0.3	
VPP 各机组参与调频的单位功率结算费用/(元·(MW·h) ⁻¹)					
S_{GT}	S_{HG}	S_{WT}	S_{PV}	S_E	S_L
25	15	5	5	10	20
VPP 各机组参与调频的单位容量补偿费用/(元·kW ⁻¹)					
s_{GT}	s_{HG}	s_{WT}	s_{PV}	s_E	s_L
10	8	9	9	8	15
发电经济成本各次项系数					
$a_{GT}/$ (元·MW ⁻²)	$b_{GT}/$ (元·MW ⁻²)	$c_{GT}/$ 元	$a_{HG}/$ (元·MW ⁻²)	$b_{HG}/$ (元·MW ⁻¹)	$c_{HG}/$ 元
0.03	100	5	0.02	80	7
运行维护成本系数/(元·MW ⁻¹)			弃风/弃光惩罚系数/(元·MW ⁻¹)		
$c_{op,WT}$	$c_{op,PV}$	$c_{q,WT}$	$c_{q,PV}$		
90	80	100	100		

4.1 日前优化调度阶段结果分析

在日前优化调度阶段,方案 1~3(PSO、QPSO、改进 QPSO)下算法的迭代收敛情况如图 4 所示;不同方案下 VPP 各调频机组分配功率如图 5 所示,各时段内方案 1~3 的不同机组输出功率均用堆叠柱表示;各方案下 VPP 参与二次调频收益如表 3 所示。

1) 分析 3 种方案下的迭代收敛情况。

3 种方案下的算法均收敛,其中改进 QPSO 算法的收敛速度最快,在第 86 代便已经收敛到全局最优解,此时虚拟电厂的净利润为 27 463.6 元;QPSO 算法的收敛速度较快,在第 108 代收敛到局部最优解,净利润为 26 728.1 元,表现出较好的收敛性;PSO 算法的寻优效果较差,直到第 135 代才收敛至最优解,为 25 421.8 元。3 种算法的收敛结果表明:与另 2 种算法相比,改进 QPSO 算法的收敛速度更快,寻优效果更佳。

2) 分析 3 种方案下的调频收益。

方案 3 与方案 1、2 相比,调频净利润分别提升了 8.0%、2.7%,这是由于传统机组在单位调频容量下的调频成本低于其他调频机组,虚拟电厂整体在日前优化调度阶段要以传统机组参与二次调频

为主,而方案 1 在 08:00—11:00 时传统机组参与调频功率不及方案 2、3,其调频净收益低于另 2 种方案。方案 2 中储能电站在 18:00—20:00 时电价较高的时段进行充电,使得调频成本增加,相比于方案 3,方案 2 降低了调频收益。因此,3 种方案中采用方案 3 能够大幅度提升 VPP 参与二次调频的调频收益。

3) 分析 3 种方案的新能源消纳情况。

3 种方案下的新能源消纳率分别为 90.5%、92.8%、93.6%,方案 1 中新能源消纳率低于另 2 种方案,这是由于新能源机组在 06:00—08:00 时未最大化利用新能源机组参与调频的原因。当二次调频功率指令为正时,方案 3 相比于方案 2,能够充分调用新能源机组参与二次调频,有效提高了新能源消纳率。

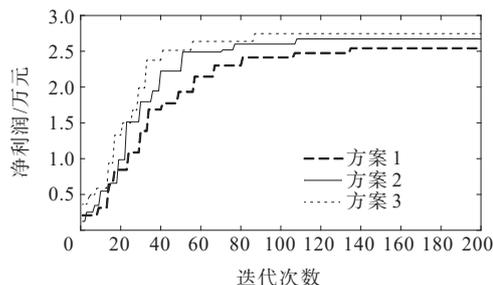


图 4 3 种方案下算法收敛情况对比

Figure 4 Convergence comparison of three schemes

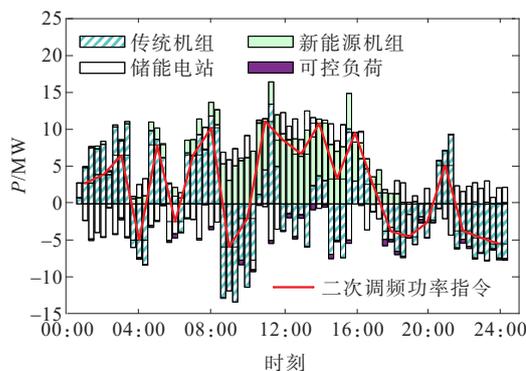


图 5 方案 1~3 各机组输出功率

Figure 5 Output power of each unit under schemes 1-3

表 3 方案 1~3 日前优化阶段调频收益

Table 3 Frequency regulation income of day-ahead optimization stage in scheme 1-3 元

方案	净利润	总调频收益	总成本
1	25 421.8	45 401.2	19 979.4
2	26 728.1	45 166.9	18 438.8
3	27 463.6	46 829.5	19 365.9

4.2 日内滚动优化阶段结果分析

VPP根据实时二次调频控制指令曲线进行日内滚动优化调度,如图6所示;不同方案下储能的SOC值对比如图7所示。在日内滚动优化阶段,3种方案下利用不同算法优化得到的调频综合性能指标分别为0.614、0.728、0.743,方案3与方案1、2相比,调频性能分别提升了21%、2%。

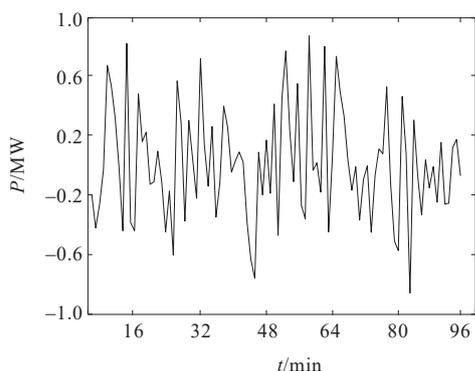


图6 实时二次调频控制指令曲线

Figure 6 Control command curve of real-time secondary frequency regulation

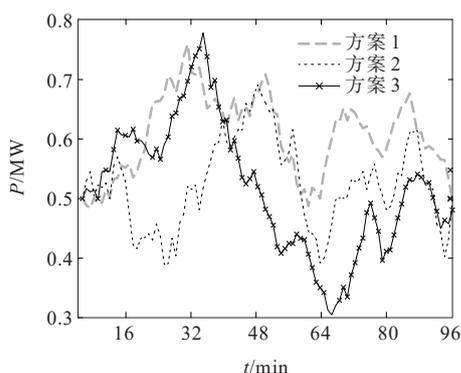


图7 不同方案下储能SOC值对比

Figure 7 SOC comparison of energy storage under different schemes

结合图7中储能电站的SOC值对日内滚动优化结果进行分析,一方面,方案3中VPP对储能的调度最频繁,其SOC值的变化范围也最大(充/放电深度最大),这是因为储能电站在单位调频功率下具有最佳的调频综合性能,因此,方案3中VPP会首先考虑储能电站参与二次调频过程;另一方面,传统机组的调频综合性能指标仅次于储能电站,方案2、3与方案1相比,多调用传统机组参与调频,也使得调频综合性能指标也有所提高。其他参与二次调频的各资源协调互补,最终使得VPP在短时间尺度下的调频功率达到实时二次调频控制指令。

5 结语

为提高VPP参与二次调频的净利润及调频效果,本文提出了一种采用改进QPSO算法的VPP参与二次调频两阶段优化方法,主要结论如下:

1) 搭建了VPP参与二次调频两阶段调度模型,该模型能够兼顾二次调频获得的净利润及调频效果;在日前优化调度阶段,优化目标为获得净利润最大;在日内滚动优化阶段,优化目标为参与调频的综合性能指标最高;

2) 对QPSO算法进行了改进,提出了一种自适应权重的改进QPSO算法,通过引入自适应权重机制,在量子粒子更新过程中动态调整权重参数以提高算法的搜索能力和收敛速度;

3) 通过仿真算例表明,改进后的QPSO算法在第86代便已达到全局收敛,与PSO、QPSO算法相比,收敛速度分别提高了25.6%、57.0%,并且日前调频净利润分别提高了8.0%、2.7%,日内调频效果分别提高了21%、2%;验证了本文所提改进算法的收敛速度更快、寻优效果更佳;

4) 本文中VPP采用锂电池储能参与调频,其充放电深度过大将加快电池的老化速度,为平衡锂电池储能参与调频经济优势和电池寿命,后续研究将引入计及电池SOC值的老化损失成本和电池SOC值变化指标;此外,将锂电池搭配其他不同类型的储能组成混合储能的形式可在保障锂电池使用寿命的情况下取得更好的调频效果,如何在VPP中配置和调度不同类型的混合储能,将是作者下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 王雪. 新型电力系统建设面临的挑战及应对措施[J]. 农村电工, 2022, 30(8): 41.
WANG Xue. Challenges and countermeasures of new power system construction[J]. Rural Electrician, 2022, 30(8): 41.
- [2] 杨海晶, 饶宇飞, 李朝晖, 等. 基于随机模拟和EMD的含风光电力系统AGC调频储能定容[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(5): 58-65+99.
YANG Haijing, RAO Yufei, LI Zhaohui, et al. Based on stochastic simulation and EMD, AGC frequency modulation energy storage constant capacity of wind power system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 58-65+99.

- [3] 罗海荣,张庆平,徐帆,等.用于火电机组二次调频的混合储能系统容量配置优化方法[J].宁夏电力,2022(5):50-57.
LUO Hairong,ZHANG Qingping,XU Fan,et al.Capacity configuration optimization method of hybrid energy storage system for secondary frequency regulation of thermal power unit[J].Ningxia Electric Power,2022(5):50-57.
- [4] 赵昊天,王彬,潘昭光,等.支撑云—群—端协同调度的多能园区虚拟电厂:研发与应用[J].电力系统自动化,2021,45(5):111-121.
ZHAO Haotian,WANG Bin,PAN Zhaoguang,et al.Multi-energy park virtual power plant supporting cloud-group-terminal collaborative dispatching: research and development and application[J].Automation of Electric Power Systems,2021,45(5):111-121.
- [5] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
KANG Chongqing,CHEN Qixin,SU Jian,et al.Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J].Automation of Electric Power Systems,2022,46(18):3-14.
- [6] 贾德香,柳占杰,高骞,等.计及碳—电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):89-97.
JIA Dexiang,LIU Zhanjie,GAO Qian,et al.Bidding strategy of virtual power plant considering carbon-electricity integration trading[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(2):89-97.
- [7] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
LI Jiamei,AI Qian,YIN Shuangrui.The market mechanism and foreign experience of virtual power plants participating in peak regulation and frequency regulation services[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(1):37-56.
- [8] 祖文静,杜易达,李鹏,等.计及不确定性与相关性的虚拟电厂参与主辅市场联合交易优化研究[J].智慧电力,2022,50(10):70-77+86.
ZU Wenjing,DU Yida,LI Peng,et al.Optimization of virtual power plant participating in joint trading in main and auxiliary markets considering uncertainty and correlation[J].Smart Power,2022,50(10):70-77+86.
- [9] CHEN W,QIU J,ZHAO J,et al.Bargaining game-based profit allocation of virtual power plant in frequency regulation market considering battery cycle life[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(4):2913-2928.
- [10] 黎靖邦.虚拟电厂建模及其参与调频市场关键技术研究[D].南京:东南大学,2020.
LI Jingbang.Modeling of virtual power plants and research on key technologies involved in the frequency regulation market[D].Nanjing:Southeast University,2020.
- [11] 湛归,殷爽睿,艾芊,等.智能楼宇型虚拟电厂参与电力系统调频辅助服务策略[J].电力工程技术,2022,41(6):13-20+57.
ZHAN Gui,YIN Shuangrui,AI Qian,et al.The strategy of intelligent building-type virtual power plants participating in power system frequency regulation auxiliary services[J].Electric Power Engineering Technology,2022,41(6):13-20+57.
- [12] LUO K,CHEN H,LAI X,et al.Method development for electric vehicle-based virtual power plant to provide secondary frequency control[C]//IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia),Chengdu,China,2021.
- [13] 李孟阳,李国杰,汪可友,等.考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(3):13-25.
LI Mengyang,LI Guojie,WANG Keyou,et al.A day-ahead bidding strategy for virtual power plants considering demand response and frequency regulation performance changes[J].Power System Protection and Control,2023,51(3):13-25.
- [14] 段康康,王维庆,杨帆.基于TVF-EMD的虚拟电厂参与系统调频容量优化配置[J].现代电子技术,2023,46(5):180-186.
DUAN Kangkang,WANG Weiqing,YANG Fan.Optimal configuration of frequency regulation capacity of virtual power plant participating in the system based on TVF-EMD[J].Modern Electronic Technology,2023,46(5):180-186.
- [15] 袁桂丽,苏伟芳.计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与AGC调频服务研究[J].电网技术,2020,44(7):2538-2548.
YUAN Guili,SU Weifang.Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles[J].Power System Technology,2020,44(7):2538-2548.
- [16] 韩志永,张宇华,李兵.基于多场景技术的冷热电虚拟电厂两阶段优化调度[J].电测与仪表,2022,59(3):174-180.
HAN Zhiyong,ZHANG Yuhua,LI Bing.Two-stage optimal dispatching of CCHP virtual power plant based on multi-scenario technology[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(3):174-180.
- [17] 闫鹏,曾四鸣,李铁成,等.基于改进量子遗传算法的虚拟电厂在多时间尺度下参与AGC优化调度[J].电网与

- 清洁能源,2023,39(3):23-32.
- YAN Peng, ZENG Siming, LI Tiecheng, et al. Optimal scheduling of virtual power plant participating in AGC based on improved quantum genetic algorithm on multi-time scale[J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(3):23-32.
- [18] 王翔,胡明,闫岩,等. 基于改进量子粒子群算法的综合能源系统优化配置[J]. 综合智慧能源, 2022,44(10): 19-24.
- WANG Xiang, HU Ming, YAN Yan, et al. Optimal configuration of integrated energy system based on improved quantum particle swarm optimization[J]. Integrated Intelligent Energy,2022,44(10):19-24.
- [19] 张大海, 俞韞韵, 王小君, 等. 计及风光不确定性的新能源虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11):529-537.
- ZHANG Dahai, YUN Yunyun, WANG Xiaojun, et al. Multi-time scale of new energy scheduling optimization for virtual power plant considering uncertainty of wind power and photovoltaic power[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2022,43(11):529-537.
- [20] 郭佳兴,王金梅,张海同. 基于虚拟电厂的多能源协同系统调度优化策略[J]. 电力建设,2022,43(12):141-151.
- GUO Jiaying, WANG Jinmei, ZHANG Haitong. Scheduling optimization strategy based on virtual power plant for multi-energy collaborative system[J]. Electric Power Construction, 2022,43(12): 141-151.
- [21] 刘蓉晖,李阳,杨秀,等. 考虑需求响应的社区综合能源系统两阶段优化调度[J]. 太阳能学报,2021,42(9):46-54.
- LIU Ronghui, LI Yang, YANG Xiu, et al. Two-stage optimal scheduling of community integrated energy system considering demand response[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2021,42(9):46-54.
- [22] 苏伟芳. 基于虚拟电厂的电力市场辅助服务研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.
- SU Weifang. Research on power market auxiliary services based on virtual power plant[D]. Beijing:North China Electric Power University,2020.
- [23] 南方能源监管局. 南方区域电力并网运行管理实施细则 [EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220615/1233271.shtml>,2022-06-13.
- Southern Energy Regulatory Authority. Implementation rules for grid-connected operation and management of electric power in the southern region[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220615/1233271.shtml>, 2022-06-13.
- [24] 潘欢,杨丽,胡钢墩. 基于改进量子粒子群算法的配电网络优化重构[J]. 电测与仪表,2018,55(18):31-36+49.
- PAN Huan, YANG Li, HU Gangdun. Distribution network optimal reconfiguration based on improved quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(18):31-36+49.
- [25] 李博通,刘涛,杨昕陆,等. 故障自清除型直流配电网新型双极短路故障元件识别方法[J]. 电工技术学报,2022, 37(17):4423-4434.
- LI Botong, LIU Tao, YANG Xinlu, et al. New fault element identification method of bipolar short-circuit fault in DC distribution network with fault self-clearing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022, 37(17):4423-4434.
- [26] 马喜平,杨燕静,沈渭程,等. 基于改进量子粒子群算法的微能源网优化运行[J]. 电网与清洁能源,2022,38(7): 47-53.
- MA Xiping, YANG Yanjing, SHEN Weicheng, et al. Optimized operation of micro energy grid based on improved quantum particle swarm optimization (IQPSO) algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38 (7):47-53.