

基于双重自适应PSO算法的储能电池 一次调频容量配置方法

尹翔,武超群,刘岩,程石,翟亮,李星

(国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:风电等波动性新能源并网对电网的安全稳定运行带来了严峻挑战。储能技术参与风电并网可有效减缓风电出力波动性,增强电网频率安全性。提出了一种基于双重自适应粒子群(PSO)算法的储能电池一次调频容量配置方法。阐释了储能电池功率和容量的设计方法;结合储能电池参与一次调频的经济模型和充放电策略,以调频效果与年化净收益最优为目标,建立了一种储能电池容量优化配置模型;采用自适应惯性权重和自适应速度位置更新策略改进PSO算法,增强其收敛速度和寻优精度。实验结果表明,所提策略可有效增强电网频率支撑能力,提高储能年化净收益。

关键词:一次调频;储能电池;容量配置;自适应策略;年化净收益

中图分类号:TN919-34 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26202

Primary Frequency Regulation Capacity Allocation Method for Energy Storage Batteries Based on Dual Adaptive PSO Algorithm

YIN Xiang, WU Chaoqun, LIU Yan, CHENG Shi, ZHAI Liang, LI Xing

(State Grid Xinjiang Power Corporation, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Wind power and other fluctuating renewable energy sources pose serious challenges to the safe and stable operation of the power grid. Integrating energy storage technology with wind power can effectively mitigate the volatility of wind power output and enhance grid frequency security. A dual adaptive particle swarm (PSO) algorithm was proposed as a primary frequency modulation (FM) capacity allocation method for energy storage batteries. The design method for battery power and capacity was explained. Combined with the economic model and charging/discharging strategy of the storage batteries participating in primary frequency modulation, an optimization allocation model was established for battery capacity to maximize the FM effect and the annualized net return. The PSO algorithm was improved by adopting an adaptive inertia weight and adaptive speed and position updating strategy to enhance convergence speed and optimization search accuracy. Experimental results show that the proposed approach can effectively enhance grid frequency support capability and improve the annualized net return of energy storage.

Key words: primary frequency modulation; battery energy storage (BES); capacity configuration; adaptive strategies; net annualized return

在双碳目标指引下,新能源发电技术得到了迅猛发展^[1]。风力发电因其清洁、无污染等特性得到大力发展,2022年风电新增装机容量3 763万kW,同比增长11.2%。然而随着风电渗透率的增加,风能的强随机性和波动性给电力系统的安全性和频率支撑带来了严峻挑战^[2-3]。

储能系统具有能量转移、快速响应以及灵活

布置等特点,具备辅助参与电网一次调频的能力,能提高风电的可调度性^[4]。因此,如何合理配置储能系统以获得最大效益,已成为当前的研究热点^[5]。

文献[6]以风储系统日净收益最大为优化目标,综合考虑风电出力的不确定性,采用PSO算法求解了储能系统的最优容量配置;文献[7]基于

风电场历史弃风功率数据,以风储联合系统的年净收益最大化为目标,通过PSO算法确定了储能系统的最优容量配置方案;文献[8]则构建了以系统利润最大化为目标的优化模型,利用PSO算法分析了风光储系统的电力平稳性与经济性。现有研究主要集中在储能配置对风电功率平抑或经济收益的影响,而针对电网调频需求与经济收益的双目标优化研究相对较少。此外,在储能系统容量优化配置中,PSO算法被广泛应用于最佳容量的求解,但其在收敛速度和寻优精度方面仍存在局限性,需要进一步改进与优化。

本文提出了一种基于双重自适应PSO算法的储能电池(battery energy storage, BES)一次调频容量配置方法。阐述了BES功率和容量的设计方法;结合BES参与一次调频的经济模型和充放电策略,以调频效果与年化净收益最优为目标,使用双重自适应PSO算法进行求解,得到BES功率和容量的最优配置方案,以降低电网频率越限和失稳风险。

1 BES功率和容量的设计方法

1.1 BES额定功率

本文假定BES的额定功率为 P_r ,在调频过程中将充电功率视为正值,放电功率视为负值。在调频时段 T 内,起始时刻为 t_0 ,每一时刻 g 的储能功率指令被定义为 P_g ,该值决定了BES在不同时刻的能量输出或输入。

在配置 P_r 时,需考虑BES在 T 时段内吸收或补充出现的最大过剩或缺额功率,以确保BES可有效应对电网在调频过程中的功率波动,具体如下所示:

$$P_r = \max \left\{ \max |P_g^+(t)| \times \eta_{ch} \eta_{con}, \frac{\max |P_g^-(t)|}{\eta_{dis} \eta_{con}} \right\} \quad (1)$$

式中: $P_g^+(t)$, $P_g^-(t)$ 分别为 t 时刻储能设备的充、放电功率; η_{con} , η_{ch} , η_{dis} 分别为储能设备和变换器的充、放电效率。

1.2 BES额定容量

根据BES的实际充放电情况,计算 t_0 到 t 时刻储能系统需吸收或补偿的容量 $\Delta E(t)$ 。若 $\Delta E(t)$ 为正,BES充电;若 $\Delta E(t)$ 为负,BES放电,具体表达式如下:

$$\Delta E(t) = \int_0^t \left[P_g^+(t) \times \eta_{ch} \eta_{con} + \frac{P_g^-(t)}{\eta_{dis} \eta_{con}} \right] dt \quad (2)$$

在 $0 \sim t$ 时间内,取 $\Delta E(t)$ 绝对值的最大值作

为BES系统的额定容量 E_r ,表达式如下:

$$E_r = \max \left\{ |\Delta E(0)|, \dots, |\Delta E(t)| \right\} \quad (3)$$

电池荷电状态(state of charge, SOC)是指电池中已存储的电能与其额定容量之比,可表征BES的电能存储和释放能力,故引入储能荷电状态 Q_{soc} ,第 m 时刻储能的荷电状态 $Q_{soc,m}$ 如下:

$$\begin{cases} Q_{soc,m} = Q_{soc,ref} + \frac{\int_0^{m\Delta t} P_g dt}{E_r} \\ Q_{soc,min} \leq \max(Q_{soc,m}) \leq Q_{soc,max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_{soc,max}$, $Q_{soc,min}$ 分别为荷电状态的上、下限; $Q_{soc,ref}$ 为初始状态。

结合式(1)~式(4)可得额定容量 E_r 应满足:

$$E_r \geq \max \left\{ \frac{\max(\int_0^{m\Delta t} P_g dt)}{Q_{soc,max} - Q_{soc,ref}}, \frac{\min(\int_0^{m\Delta t} P_g dt)}{Q_{soc,min} - Q_{soc,ref}} \right\} \quad (5)$$

由式(5)可得满足要求的BES最小额定容量。

2 BES频率响应特性

2.1 BES系统并网结构

本文聚焦于集中式BES部署模式,选用磷酸铁锂电池(lithium iron phosphate battery, LIPB)作为储能电池^[9]。集中式BES可实现大规模电能存储和管理,为电网提供稳定可靠的支持。该系统主要由电池组、电压源换流器、滤波器及控制单元组成,能够快速调节电流和电压以适应电网需求变化。集中式BES系统在电网频率调节中起着关键作用,通过精密控制设备调节输出功率,减少频率波动。

本文将电池视为具有内阻和一阶RC串联电路的电压源,包括开路电压 U_{oc} 、端口电压 U_p 和电流 I_p 、内阻 R_0 、极板极化电阻 R_T 和电容 C_T ,集中式BES系统的频率调节控制结构如图1所示。

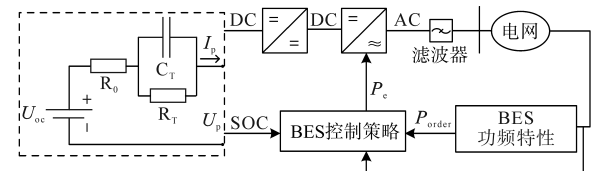


图1 BES参与电网一次调频的控制结构

Fig.1 The control structure of BES participating in primary frequency regulation of power grid

在BES接入电网的过程中,电池通过交直流双向变换器、并网逆变器和滤波器与电网连接。通过调节这些设备,控制BES的输出功率,实现电网频率的调节,即根据电网频率和功率—频率

特性曲线确定所需输出功率,考虑电池SOC、频率、所需功率及控制策略,计算实际交换功率。

2.2 BES参与一次调频原理

BES通过模拟常规机组的下垂控制特性参与电网的一次频率调节,称为虚拟下垂控制模式^[10]。BES在调频过程中的关键控制参数主要有四个: $\Delta f_{db,u}$ 和 $\Delta f_{db,d}$ 分别为BES系统调频死区的上、下限; Δf_u 和 Δf_d 分别为BES在一次调频中提供的线性出力的上、下限。

BES系统通过持续监测电网频率,能自主选择其充电或放电行为。在电网负荷 $L(\Delta f)$ 增加,导致频率下降时,BES系统根据其储能特性曲线 $S(\Delta f)$ 和单位调节功率 K_e 来确定其输出功率 ΔP_s 。当电力系统出现供需不平衡且频率偏差超出设定的调频死区时,即如图2中系统状态由 a 转换为 b 时,储能设备将介入进行充放电操作。为符合一次调频的频率偏差允许范围,本文将调频死区阈值设定为 50 ± 0.033 Hz。

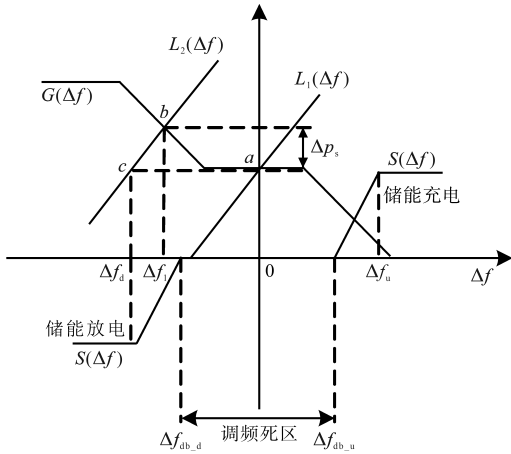


图2 BES的一次调频调整

Fig.2 Primary frequency regulation of BES

针对BES的功频特性,本文定义了BES功率 P_s 的两种状态: $P_s < 0$ 为电池充电状态,而 $P_s > 0$ 则是放电状态。此外, P_r 为额定功率, K_e 为单位调节功率,具体如下式所示:

$$P_s = \begin{cases} P_r & f > \Delta f_u, f < \Delta f_d \\ K_e(50.033 - f) & 50.033 < f < \Delta f_u \\ 0 & 49.967 < f < 50.033 \\ K_e(f - 49.967) & \Delta f_d < f < 49.967 \end{cases} \quad (6)$$

3 BES容量优化配置模型

3.1 BES参与一次调频的经济模型

基于全寿命周期成本理论和储能效益分析^[11],构建BES参与一次调频市场的经济评估模型。

3.1.1 BES全生命周期成本 C_{LCC}

BES在其整个生命周期中所涉及的成本主要包括初始投资成本 C_{inv} 、运营维护成本 C_{ope} 、设备更换成本 C_{rep} 、废弃处理成本 C_{dis} 、弃风惩罚成本 C_{aw} 及缺额惩罚成本 C_{sho} ,表达式如下:

$$C_{LCC} = C_{inv} + C_{ope} + C_{rep} + C_{dis} + C_{aw} + C_{sho} \quad (7)$$

其中

$$C_{inv} = C_{ee}E_r + C_{pe}P_r \quad (8)$$

$$C_{ope} = \sum_{y=1}^Y C_{eo}E_r(1+u)^{-y} + C_{po}P_r \quad (9)$$

$$C_{rep} = C_{inv} \sum_{j=1}^J (1+u)^{-\left(\frac{jY}{J+1}\right)} \quad (10)$$

$$C_{dis} = \sum_{j=1}^J C_{edis}E_r(1+u)^{-\left(\frac{jY}{J+1}\right)} + C_{pdis}P_r \quad (11)$$

$$C_{aw} = \sum_{y=1}^Y C_{eaw} \left[\sum E_{aw}(1+u)^{-y} \right] \quad (12)$$

$$C_{sho} = \sum_{y=1}^Y C_{esho} \left[\sum E_{sho}(1+u)^{-y} \right] \quad (13)$$

式中: C_{ee} 、 C_{pe} 分别为LIPB初始采购及建设投资的单位容量成本和单位功率成本; C_{eo} 、 C_{po} 分别为LIPB单位容量和单位功率的运维成本; Y 为风储系统的全生命周期年数,本文取20; u 为折现率; J 为LIPB在全生命周期内的更换次数; C_{edis} 、 C_{pdis} 分别为LIPB单位容量和单位功率的废弃处理成本; C_{eaw} 为弃风惩罚系数; E_{aw} 为第 y 年的弃风电量; C_{esho} 为缺额惩罚系数; E_{sho} 为第 y 年的缺额电量。

C_{aw} 指因BES容量限制而无法完全利用风电而进行的惩罚。 C_{sho} 指BES处于最低荷电状态无法提供足够的电量而进行的惩罚。

3.1.2 BES运行收益 R_{es}

BES运行收益 R_{es} 包括售电收益 R_{sell} 、调频收益 R_{tp} 和碳交易收益 R_{cs} 。其中,售电收益 R_{sell} 是利用BES储存的电能在电力市场上进行售电得到的收益,计算如下:

$$R_{sell} = \sum_{y=1}^Y r_{sell} \left[\sum E(y)(1+u)^{-y} \right] \quad (14)$$

式中: r_{sell} 为风电场售电单价; E 为第 y 年的售电量。调频收益 R_{tp} 的表达式如下:

$$R_{tp} = \sum_{y=1}^Y r_{tp} \left[\sum E_{tp}(y)(1+u)^{-y} \right] \quad (15)$$

式中: E_{tp} 为第 y 年的参与一次调频的电量; r_{tp} 为一次调频收益系数。

碳交易收益 R_{cs} 是由BES在减少碳排放方面的贡献转化的经济收益,即

$$R_{cs} = \varphi_{cs} \sum_{y=1}^Y r_{cs} [\sum E(y) (1+u)^{-y}] \quad (16)$$

式中: r_{cs} 为碳交易单位价格; φ_{cs} 为单位电量运行的碳排放额度。

3.2 BES参与一次调频的充放电策略

为确保 BES 满足调频标准并最小化容量配置,在电网频率偏差处于调频死区时,BES需执行额外的充放电操作。为避免 BES 过充或过放,引入 $Q_{soc,l}$ 和 $Q_{soc,h}$,分别是储能系统荷电状态的最低和最高限制值。当 $Q_{soc,r}$ 低于 $Q_{soc,min}$ 时,BES 进入过放区;若 $Q_{soc,r}$ 落在 $[Q_{soc,min}, Q_{soc,l}]$ 范围内,BES 处于放电警戒区;在 $[Q_{soc,l}, Q_{soc,h}]$ 范围内,BES 进入储能指令区;若在 $[Q_{soc,h}, Q_{soc,max}]$ 之间,BES 为充电警戒区;超过 $Q_{soc,max}$ 时,BES 进入过充区。

此外,当电网频率偏差 Δf_i 处于调频死区内时,若 $Q_{soc,r}$ 处于充电警戒区,则进行放电操作(即向电网售电,售电功率 P_{sell} 受 $\mu_s P_r$ 限制, μ_s 为售电功率系数,取值范围在 $[0, 1]$);若 $Q_{soc,r}$ 到达放电警戒区,则进行充电操作(即从电网购电,购电功率 P_{buy} 受 $\mu_b P_r$ 的限制, μ_b 为购电功率系数,取值范围在 $[0, 1]$);若 $Q_{soc,r}$ 位于储能指令区,则储能系统不需执行任何操作。

当 Δf_i 超过上限 $\Delta f_{db,u}$ 且其 $Q_{soc,r}$ 达到最大值 $Q_{soc,max}$ 时,储能系统需通过耗能电阻来消耗多余的能量。这反映了在储能系统荷电状态管理不当时可能引发的额外成本。当 Δf_i 低于下限 $\Delta f_{db,d}$ 且 $Q_{soc,r}$ 等于最低值 $Q_{soc,min}$ 时,储能系统将不参与一次调频。这两种情况均需要引入经济惩罚机制,以激励 BES 在特定情况下采取更合理的操作决策。

3.3 技术评价指标

考虑到区域电网接入风电机组的瞬时不稳定性,需考虑在调频时间段内总体频率偏差的平均变化率,据此评估一次调频效果,如下式所示:

$$O_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} \quad (17)$$

式中: n 为采样点数。

O_1 的数值越小,表示电网频率波动越小,调频效果越佳。同理,BES 荷电状态的波动水平评估指标如下:

$$Q_{soc,r} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{soc,i} - Q_{soc,ref})^2} \quad (18)$$

式中: $Q_{soc,i}$ 为第 i 个荷电状态采样值; $Q_{soc,ref}$ 为荷电状态运行参考值,设为 0.5。

$Q_{soc,r}$ 值越小,BES 荷电状态保持效果越好。

考虑 BES 全生命周期的经济成本及运营收益,使年化净效益最大,其计算方法如下:

$$F = \frac{1}{Y} [\sum_{v=1}^3 R(v) - \sum_{w=1}^6 C(w)] \quad (19)$$

式中: $R(v)$ 为第 v 项的运营收益; $C(w)$ 为第 w 项投资成本。

基于评价指标 O_1 和 F 建立用于优化算法求解的目标函数,如下式所示:

$$Fit = \alpha O_1 + \beta (1 - \gamma F) \quad (20)$$

式中: γ 为归一化系数,确保 F 处于 $[0, 1]$ 之间,以避免大小数差异影响适应度 Fit 的收敛; α, β 为重要性系数, $\alpha = \beta = 1$ 。

将 O_1 和 F 折算至同样数量级; Fit 越小则表明算法优化效果越好。

3.4 PSO算法的改进

3.4.1 PSO算法

PSO 是一种种群优化算法,通过模拟自然界生物群体的协作机制寻找最优解^[12-13]。它将每个优化问题都视作一个粒子,并用速度、位置和适应度来表示粒子特性,通过迭代的方式,不断评估每个粒子的适应度值,以逐步逼近最优解。

假设在 D 维空间中,有 N 个粒子。在第 k 次迭代中,第 i 个粒子的位置和速度分别为 $X_i(k) = \{x_{i,1}(k), x_{i,2}(k), \dots, x_{i,D}(k)\}$ 和 $V_i(k) = \{v_{i,1}(k), v_{i,2}(k), \dots, v_{i,D}(k)\}$,其在第 d 维的速度和位置的更新方法如下式所示:

$$v_{i,d}(k+1) = w(k)v_{i,d}(k) + c_1 r_1 [P_{i,d}^{best}(k) - x_{i,d}(k)] + c_2 r_2 [G_{i,d}^{best} - x_{i,d}(k)] \quad (21)$$

$$x_{i,d}(k+1) = x_{i,d}(k) + v_{i,d}(k+1) \quad (22)$$

其中

$$w(k) = w_{max} - \frac{k(w_{max} - w_{min})}{k_{max}} \quad (23)$$

式中: c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为 0 到 1 之间的随机数; $w(k)$ 为惯性权重,随 k 的增加而线性递减; w_{max}, w_{min} 分别为惯性权重的最大值和最小值; $P_{i,d}^{best}(k), G_{i,d}^{best}(k)$ 分别为第 d 维空间中粒子 i 在第 k 次迭代的个体最优位置和全局最优位置。

3.4.2 双重自适应 PSO 算法

1) 自适应惯性权重。由式(21)可知,惯性权重 w 会影响粒子的移动速度,并决定了粒子后续的移动方向。 w 取值越大,算法的全局寻优能力越强,但容易导致粒子错过最优解。反之, w 取值

越小,局部寻优能力越强,但容易陷入局部最优。因此,为了使得算法在初期有较好的全局收敛能力,在后期具备较高的局部收敛能力,需动态调整 w 来平衡全局搜索和局部搜索能力。 w 的取值函数如下式所示:

$$w(k) = \begin{cases} (w_{\max} - w_{\min}) \cdot e^{\frac{(k/k_{\max})^2}{k/k_{\max}}} & k/k_{\max} \leq \eta \\ w_{\min} + 0.1 \cdot r_s & k/k_{\max} > \eta \end{cases} \quad (24)$$

其中 $w_{\max}=0.9$ $w_{\min}=0.4$

式中: r_s 为介于0和1之间随机数; η 为切换阈值,取值范围为(0,1)。

2) 自适应速度位置更新策略。传统PSO算法通过个体最优 P^{best} 和全局最优 G^{best} 指导粒子更新速度和位置,虽简单高效,但在迭代后期种群内大部分粒子都趋近于最优粒子,种群多样性逐渐减少,易陷入局部最优^[14]。

在式(21)中,第二项包含了上一代个体最优位置信息,其过于聚焦个体自身信息而缺乏与周围粒子的信息交流,因此引入随机学习思想,比较随机相邻的两粒子 P_a^{best} 和 P_b^{best} ,得到候选个体最优粒子 C^{best} ,以增强粒子之前的交流。将 C^{best} 与当前的个体最优粒子 P^{best} 进行比较求得新的个体最优粒子 S^{best} ,如下式所示:

$$C^{\text{best}}(k) = \operatorname{argmin} \{ \operatorname{Fit} [P_a^{\text{best}}(k)], \operatorname{Fit} [P_b^{\text{best}}(k)] \} \quad (25)$$

$$a \neq b \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$S_i^{\text{best}}(k) = \begin{cases} C^{\text{best}}(k) & \operatorname{Fit}(C^{\text{best}}) < \operatorname{Fit}(P_i^{\text{best}}) \\ P_i^{\text{best}}(k) & \operatorname{Fit}(C^{\text{best}}) \geq \operatorname{Fit}(P_i^{\text{best}}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\operatorname{Fit}()$ 为对应粒子的适应度值。

进一步地,基于主流学习思想,模拟个体受主流观念影响的社会行为,使用所有粒子个体最优位置的平均值 M^{best} 作为学习参照,对式(21)的第三项进行改进,以增强种群的多样性,其定义见下式:

$$M^{\text{best}}(k) = \operatorname{mean}(P_1^{\text{best}}, P_2^{\text{best}}, \dots, P_N^{\text{best}}) \quad (27)$$

新的速度更新方程如下式所示:

$$v_{i,d}(k+1) = w(k)v_{i,d}(k) + c_1 r_1 [S_i^{\text{best}}(k) - x_{i,d}(k)] + c_2 r_2 [M^{\text{best}}(k) - x_{i,d}(k)] \quad (28)$$

在传统PSO算法中,原本式(22)的位置更新策略较为单一,在处理多模态和非凸问题时,其全局搜索能力有限。因此,采用自适应位置更新策略,使粒子能根据当前环境和性能动态选择最合适的位置更新模式,如下式所示:

$$p_i = \frac{\exp \{ \operatorname{Fit} [x_{i,d}(k)] \}}{\exp \{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{Fit} [x_{i,d}(k)] \}} \quad (29)$$

$$x_{i,d}(k+1) = \begin{cases} w(k)x_{i,d}(k) + [1-w(k)]V_i(k+1) + G^{\text{best}}(k) & p_i > \operatorname{rand} \\ x_{i,d}(k) + V_i(k+1) & p_i \leq \operatorname{rand} \end{cases} \quad (30)$$

其中, p_i 为粒子当前适应度与种群平均适应度的比值, p_i 越小,则说明当前粒子的表现优于种群平均水平,即采用“ $X=X+V$ ”策略以增强全局探索能力;否则就使用“ $X=\omega X+(1-\omega)V$ ”策略以强化局部搜索能力。

3.5 基于双重自适应PSO的容量配置流程图

基于双重自适应PSO的容量配置流程图如图3所示,首先加载风电场的实际功率数据和频率数据,初始化种群的基本参数及进化代数;设置粒子位置及速度,包括 $Q_{\text{soc},h}$ 、 $Q_{\text{soc},l}$ 、 P_b 、 P_s 和 P_r 五个关键变量;通过BES参与一次调频的充放电策略、经济评估模型计算目标适应度值 Fit ,迭代求解以寻得关键变量的最优组合解;若 Fit 未增加,则按照二重自适应策略更新惯性权重、粒子位置和速度,继续迭代计算以更新粒子的个体最优值和全局最优值;直至当前迭代次数满足最大迭代次数要求,输出最优组合解,并计算储能电池的最优额定容量 E_r 。

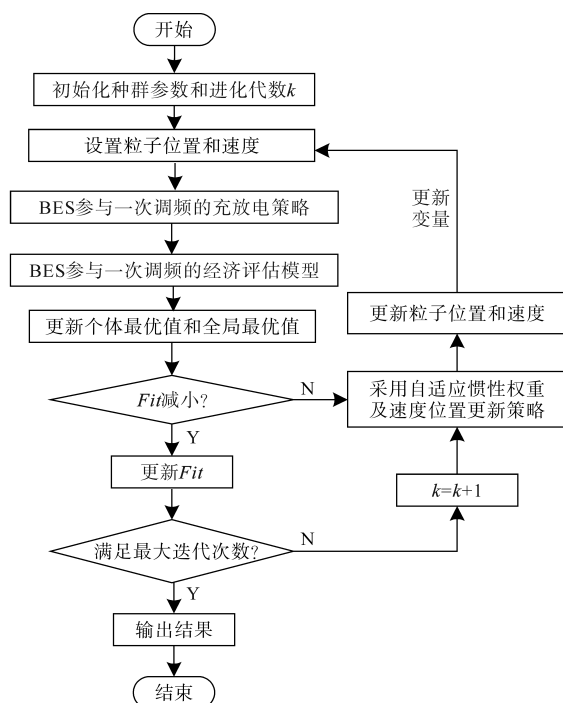


图3 基于双重自适应PSO的容量配置流程

Fig.3 Capacity allocation via dual adaptive PSO

4 算例验证

4.1 算例条件及参数设置

以新疆某区域电网中的风力发电系统为例,含 BES 的区域电网仿真参数如下:风电容量 50 MW;电网额定容量 $S_{base}=250$ MW;上调容量 0.1 (标么值);下调容量 0.1 (标么值);负荷功率 $P_{load}=0.12\sim 0.26$ (标么值);单位调节功率 $K_g=23.3$ (标么值);虚拟单位调节功率 $K_E=10$ (标么值); $\Delta f_{db,u}=0.033$ Hz; $\Delta f_{db,d}=-0.033$ Hz; $u=6\%$; $C_{ee}=385\times 10^3$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{pe}=230\times 10^3$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{eo}=10\times 10^3$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{po}=10\times 10^3$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{edis}=1\times 10^3$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{pdis}=1\times 10^3$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{eaw}=42$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $C_{esho}=17$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; $r_{sell}=75$ $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

其包括区域电网的基本参数以及 BES 和传统电源的经济参数^[15]。设定调频时段 T 为 15 min,采样周期为 1 s。风电实际出力 P_{wind} 和负荷功率 P_{load} 的变化曲线分别如图 4、图 5 所示。

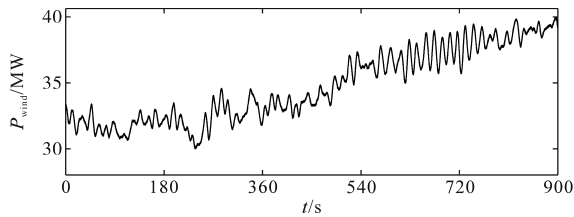


图 4 风电出力曲线

Fig.4 The wind power output curve

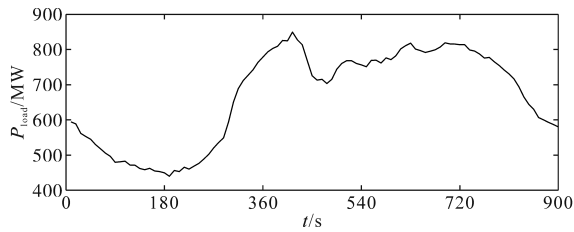


图 5 负荷功率曲线

Fig.5 The load power curve

4.2 实验结果分析

4.2.1 不同算法的优化结果

根据建立的充放电策略和经济评估模型,分别采用 PSO、自适应权重 PSO (adaptive inertia weighting PSO, PSO_AIW)、自适应速度位置 PSO (adaptive velocity position PSO, PSO_AVP) 和双重自适应 PSO (dual adaptive PSO, PSO_AIW_AVP) 四种算法对 BES 参与一次调频的容量配置进行优化,以验证本文所提算法的有效性。设置种群数量为 30,最大迭代次数为 100 次,四种算法迭代寻优结果分别如图 6 和表 1 所示。

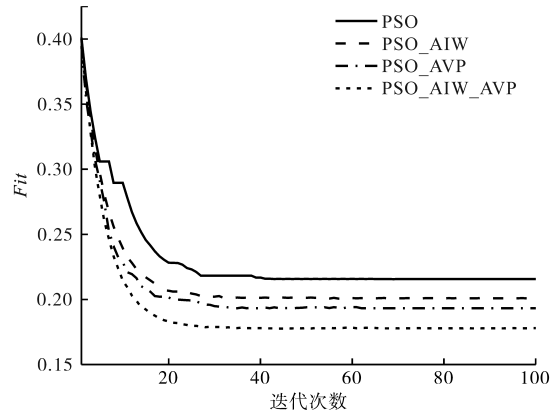


图 6 算法对比

Fig.6 Comparison of algorithms

表 1 四种算法的容量配置结果

Tab.1 Capacity allocation results for the four algorithms

算法	P_r/MW	$E_r/(\text{MW}\cdot\text{h})$	O_1	$Q_{soc,r}$	$F/10^7$ $\$$
PSO	10.23	2.83	0.036	0.190 7	1.394
PSO_AIW	10.12	2.67	0.031	0.189 4	1.412
PSO_AVP	10.08	2.60	0.029	0.188 2	1.426
PSO_AIW_AVP	10.03	2.41	0.026	0.187 1	1.458

由图 6 可知,相对于其他三种算法,PSO_AIW_AVP 算法的收敛速度更快且求解精度更高,可在年净效益最大和调频效果最优之间实现良好的平衡。

在收敛速度方面,当迭代次数达到 26 时,PSO_AIW_AVP 算法的适应度值就逐渐趋于平稳,具有更快的收敛速度;而 PSO, PSO_AIW 和 PSO_AVP 则需要分别迭代到第 44, 34 和 35 次才能趋于平稳。此外,对比前三种算法的曲线收敛情况可知,自适应权重或自适应速度位置更新策略的引入都可以在一定程度上提高算法的收敛速度。

在算法寻优精度方面,PSO_AIW_AVP 可求解得到更小的适应度值,明显优于 PSO, PSO_AIW 和 PSO_AVP 三种算法。PSO 算法在迭代区间[5, 7],[8, 10]和[27, 38]中存在着陷入局部最优的情况,并且在迭代次数达到第 44 次以后,适应度值才逐渐稳定在 0.216; PSO_AIW 和 PSO_AVP 算法在陷入局部最优的情况得到了改善,曲线较为平滑,且适应度值 Fit 分别稳定到了更低的数值,即 0.201 和 0.193;而 PSO_AIW_AVP 的收敛曲线最为平滑,在迭代次数为 26 次时 Fit 就逐渐收敛至 0.177,显著低于前三种算法。

通过自适应惯性权重,PSO_AIW_AVP 能够更有效地在局部最优解和全局最优解之间进行探索和权衡,进而提高了算法收敛速度及全局最

优解的求解概率。同时,在迭代后期,基于自适应速度位置更新策略,PSO_AIW_AVP中粒子的随机性和多样性得到了有效增强,从而在复杂的优化环境下提高了算法的适应能力,因此其收敛曲线整体都趋近于平缓且收敛到了更低的适应度值。

由表1可知,PSO_AIW_AVP算法的应用不仅优化了BES的调频技术指标和荷电状态的稳定性,还提升了年化净收益。具体而言,通过PSO_AIW_AVP算法优化得到的BES配置为额定功率10.03 MW和额定容量2.41 MW·h,该配置不仅能够获得最佳调频效果和最大年化净收益,而且有助于保持BES的荷电状态在一个较为稳定的水平,避免了BES过充或过放的风险,增强了系统的运行可靠性。从PSO到PSO_AIW_AVP的技术指标结果表明,调频技术指标 O_1 和BES荷电状态 $Q_{\text{soc},t}$ 都逐渐减小,最小值相对最大值分别降低了27.78%和1.89%;其次,年化净收益 F 逐渐升高,最大值相比最小值提高了4.59%。

为进一步说明所提方法的优越性,图7对比了不同算法下的 Pareto 解集。结果表明,PSO_AIW_AVP算法的 Pareto 前沿分布更加均匀,具备更强的全局最优解搜索能力,在调频经济性与调频效果之间实现了良好的平衡。此外,随着从 PSO 逐步改进为 PSO_AIW_AVP, Pareto 解集分布均匀性显著提高,局部最优问题得到有效缓解,从而进一步验证了 AIW 和 AVP 的有效性。

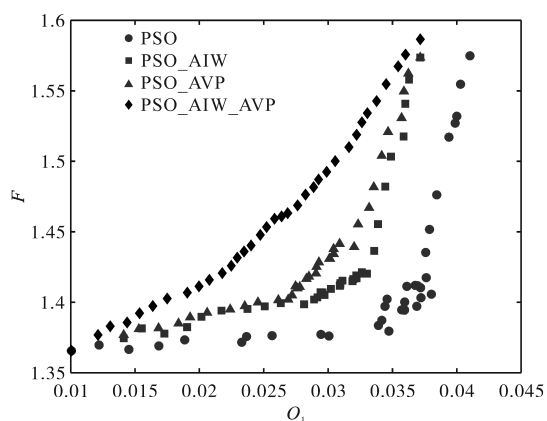


图7 不同算法 Pareto 解的分布情况

Fig.7 Distribution of Pareto solutions for different algorithms

4.2.2 不同算法的一次调频效果展示

基于表1所求的四种算法的BES最优配置方案,当风电出力 and 负荷的波动曲线被引入区域电网调频动态模型,经过BES参与一次调频前后的效果差异图如图8所示。

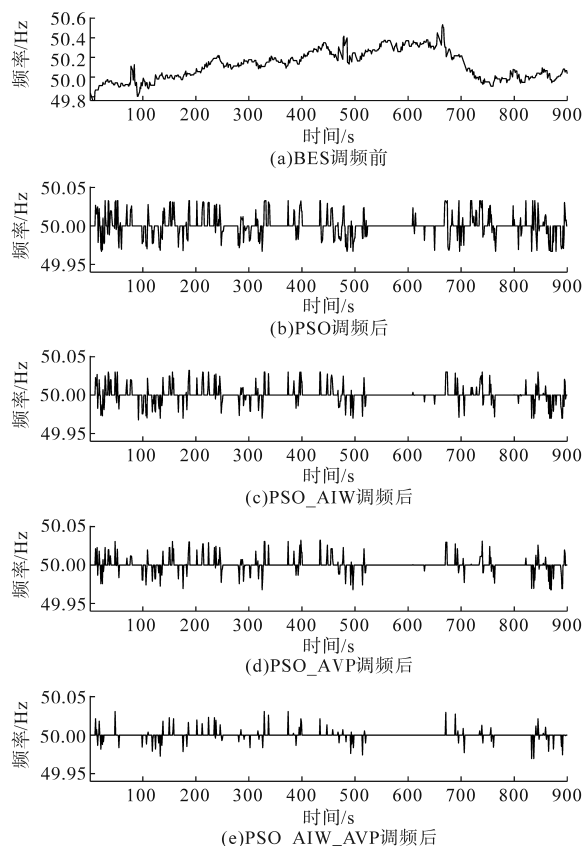


图8 BES调频前后的电网频率偏差

Fig.8 Grid frequency deviation before and after BES frequency modulation

由图8可知,BES调频前频率波动较大,相比于基准50 Hz,频率波动最大可达0.54 Hz;基于BES参与一次调频的充放电策略和运行约束条件,可将电网频率波动控制在调频死区 $[-0.033, 0.033]$ 内,有效降低了系统频率的波动性。相较于前三种算法的频率调节效果,PSO_AIW_AVP算法可显著降低频率波动,频率偏差最大值仅为0.030 5 Hz。

基于PSO_AIW_AVP算法优化下得到的最优控制变量组,可得到BES在调频死区内有/无额外充放电的出力指令曲线,具体如图9所示。

由图8和图9可知,基于PSO_AIW_AVP算法,BES在调频过程中可根据频率偏差调整相应的储能输出功率,其最大出力值为5.51 MW。为确保储能设备正常工作,一般需留出 $15\%P_r$ 和足够的功率裕量,所以BES的最佳输出范围被设定为5.51 MW到11.20 MW之间。

4.2.3 基于PSO_AIW_AVP的风电消纳效果展示

本小节通过PSO_AIW_AVP算法配置BES容量,进一步验证BES参与风电并网对功率的平抑效果。取新疆某典型日的风电功率进行BES平

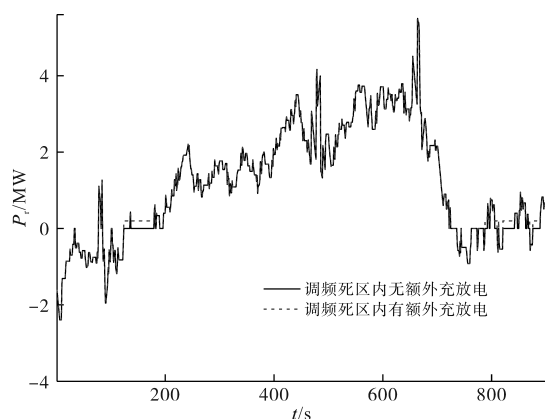


图9 BES出力曲线

Fig.9 BES output curve

抑,功率采样间隔为1 min,共1 440个采样点,平抑效果如图10所示。由图10可知,经过BES平抑之后,原本功率波动较大的风电出力功率变得平滑,高频功率波动显著降低,确保风电场能够安全稳定地接入电网。

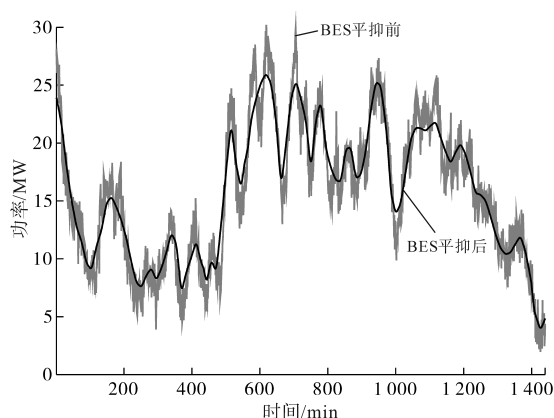


图10 基于BES的风电功率平抑效果

Fig.10 Effect of BES-based wind power leveling

由表2可知,BES的接入不仅有助于风电场过剩电量的消纳,还可以弥补风电缺额。配置BES后弃风量和缺额量分别降低了263.9 MW·h和233.09 MW·h。可见配置BES能有效提升电网风电并网的消纳能力,并减少弃风缺额的成本。

表2 BES平抑前后效果评估

Tab.2 Assessment of the effect of BES before and after leveling

配储情况	弃风量/(MW·h)	缺额量/(MW·h)
无BES	267.27	234.62
有BES	3.37	1.53

基于PSO_AIW_AVF算法配置BES容量,并通过实时监测 Q_{soc} 获取BES的工作状态曲线,如图11所示。

由图11可知,BES始终运行在合理的区间内,未出现过充或过放现象,从而保障了储能电

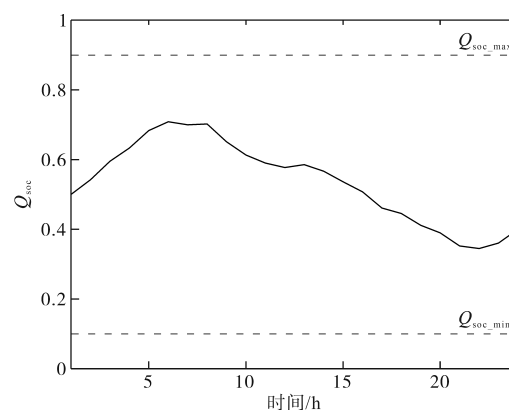


图11 BES配置后的 Q_{soc} 变化趋势

Fig.11 Q_{soc} trends after BES configuration

池的正常运行与使用寿命。

5 结论

本文针对大规模风电并网造成的电网稳定性问题,提出了一种基于双重自适应PSO算法的储能电池一次调频容量配置方法。以调频效果与年化净收益最优为目标,并结合储能电池参与一次调频的经济模型和充放电策略,建立了一种储能电池容量优化配置模型。利用自适应惯性权重及自适应速度位置更新策略,有效解决了PSO收敛性差和容易局部最优的问题。通过新疆某区域电网实例仿真分析,验证了本文所提模型的有效性,频率偏差降低了27.78%,年化净收益提高了4.59%,弃风量和缺额量分别减少了263.9 MW·h和233.09 MW·h。

参考文献

- [1] 李龙云,胡博,谢开贵,等. 基于离散傅里叶变换的孤岛型微电网混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化,2016,40(12): 108-116.
LI Longyun, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in isolated microgrids based on discrete fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 108-116.
- [2] 林恒先,侯凯元,陈磊,等. 高比例风电电力系统考虑频率安全约束的机组组合[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 1-13.
LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 1-13.
- [3] SUN Y, ZHAO Z, YANG M, et al. Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 160-173.
- [4] 洪烽,贾欣怡,梁璐,等. 面向风电场频率支撑的混合储能层次化容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14):

- 5596-5607.
- HONG Feng, JIA Xinyi, LIANG Lu, et al. Hierarchical capacity optimization configuration of hybrid energy storage for wind farm frequency support[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14):5596-5607.
- [5] 葛乐,袁晓冬,王亮,等.面向配电网优化运行的混合储能容量配置[J].电网技术,2017,41(11):3506-3513.
- GE Le, YUAN Xiaodong, WANG Liang, et al. Capacity configuration of hybrid energy storage system for distribution network optimal operation[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3506-3513.
- [6] 陆秋瑜,杨银国,陈俊生,等.考虑风电不确定性的海上风电场混合储能容量优化[J].南方电网技术,2025,19(2):115-123,134.
- LU Qiuyu, YANG Yinguo, CHEN Junsheng, et al. Hybrid energy storage capacity optimization of offshore wind farms considering wind power uncertainty[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2):115-123,134.
- [7] 杨锡运,刘雅欣,邢国通,等.基于风电概率预测的风电场调频容量估计方法[J].太阳能学报,2022,43(7):409-416.
- YANG Xiyun, LIU Yaxin, XING Guotong, et al. Method of estimating frequency regulation capacity of wind farm based on wind power probability prediction[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(7):409-416.
- [8] LIU H, WU B, MALEKI A, et al. An improved particle swarm optimization for optimal configuration of standalone photovoltaic scheme components[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(3):772-789.
- [9] 沈玉明,桂旭,江桂芬,等.计及荷电状态和电池寿命的风储系统容量优化配置[J].电气传动,2025,55(4):18-25.
- SHEN Yuming, GUI Xu, JIANG Guifen, et al. Capacity optimization configuration of wind storage systems considering state of charge and battery life[J]. Electric Drive, 2025, 55(4):18-25.
- [10] 许庆祥,滕伟,武鑫,等.平抑风电功率波动的飞轮储能系统容量配置方法[J].储能科学与技术,2022,11(12):3906-3914.
- XU Qingxiang, TENG Wei, WU Xin, et al. Capacity configuration method of flywheel storage system for suppressing power fluctuation of wind farms[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12):3906-3914.
- [11] 李长霖,贾燕冰,石俊逸,等.考虑风电集群效应的风储系统一次调频容量配置策略[J].中国电机工程学报,2025,45(8):2969-2980.
- LI Changlin, JIA Yanbing, SHI Junyi, et al. Capacity optimization of wind farms-energy storage participation in primary frequency regulation considering wind power cluster effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8):2969-2980.
- [12] 张明洁,廖映华.基于PSO-SA算法涂布机伺服注液系统PID参数优化[J].机械设计与制造,2025,409(3):188-192,198.
- ZHANG Mingjie, LIAO Yinghua. Parameter optimization of PID controller for servo liquid injection system of edge patrol frame glue coater based on PSO-SA algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025, 409(3):188-192,198.
- [13] 王成亮,潘志新,翟学锋,等.基于改进粒子群算法的无线充电系统参数优化[J].电气传动,2023,53(3):64-69.
- WANG Chengliang, PAN Zhixin, ZHAI Xuefeng, et al. Parameter optimization of wireless charging system based on improved PSO algorithm[J]. Electric Drive, 2023, 53(3):64-69.
- [14] LIU H, ZHANG X W, TU L P. A modified particle swarm optimization using adaptive strategy[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 152:113353.
- [15] 黄际元,李欣然,常敏,等.考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J].电工技术学报,2017,32(21):43-52.
- HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21):43-52.

收稿日期:2024-10-02

修改稿日期:2024-12-13