

[可再生能源]

基于配电网时序电压灵敏度分析的风光消纳能力优化策略

文/陈丽君¹ 张木子¹ 刘宗² 刘成刚¹ 梁新斌¹ 吕少华¹

1. 国网十堰供电公司; 2. 湖北工业大学

大规模可再生能源接入电力系统使得系统内电源出力的不确定性大大超过负荷需求侧的不确定性。提出一种基于配电网时序电压灵敏度分析的风光消纳能力优化策略,对全天风光接入进行实时的电压灵敏度分析,根据风光出力对电网的影响在确保稳定性的前提下制定最优消纳策略,减少风光波动对电网消纳能力的影响。

随着我国碳中和、碳达峰目标的提出,风电、光伏和潮汐能等新型可再生能源所占发电比重不断上升,成为低碳经济发展的主流趋势。但是由于风光出力的不确定性以及波动性会对电力系统稳定运行造成明显的影响,例如系统电压降低、线路损耗增加和消纳容量减小等。如何降低风光出力造成的负面影响已成为当前研究焦点,电力系统引入风光电站后,其拓扑结构就由单一电源结构转变为多电源结构,分析其影响的主要手段就是对改变结构后的电力系统进行潮流分析。其中基于雅可比矩阵的灵敏度分析因数据需求小、计算过程简单广为应用。

为提高风光消纳能力以及电网稳定性,本文提出基于配电网时序电压灵敏度分析的风光消纳能力优化策略,创建时序电压灵敏度对风光接入后的电网状态进行全天分析评估,并基于分析结果做出弃风弃光率最小和风光出力占系统负荷需求的比率最大的风光消纳策略。首先考虑风光出力的随机特性,建立与时间相关的风光出力模型;随后采用拉丁超立方抽样法模拟各场景下风光出力,记录不同场景下系统潮流的数据变化;结合数据,对各场景下的电压灵敏度矩阵进行改进,采用时序电压灵敏度矩阵实时反映不同时间段下的风光消纳边界;最

后以风光出力占系统负荷需求的比率以及弃风、弃光率最小为目标得到最优风光消纳策略。

含新能源的电力系统的随机特性

风光出力是新能源电力系统中主要出力,但是光伏、风力发电机由于地理位置、天气状态的随机性而产生不同的波动特性。本文根据风光出力特性构建具有随机特性的风光出力模型。

1. 风光出力模型

(1) 光伏出力模型

光伏出力主要由于光照强度以及光照地点的不同而出现波动性差异,则其出力模型为

$$P_V(t) = \begin{cases} P_V^w \left(\frac{A(t)^2}{A_w A_c} \right) & 0 \leq A(t) \leq A_c \\ P_V^w \frac{A(t)}{A_w} & A_c \leq A(t) \leq A_w \\ P_V^w & A_w \leq A(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_V(t)$ 为 t 时刻光伏出力; P_V^w 为光伏额定出力; $A(t)$ 为 t 时刻光照辐值; A_w 为标准条件下光照辐值; A_c 为某辐射点光照辐值。

(2) 风电出力模型

风电出力受风力机切入、切出风速影响,其风电出力模型为

$$P_W(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq S(t) \leq S_{in} \\ (\frac{S(t) - S_{in}}{S_W - S_{in}}) P_W^W & S_{in} \leq S(t) \leq S_W \\ P_W^W & S_{in} \leq S(t) \leq S_{out} \\ 0 & S(t) \geq S_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $S(t)$ 为 t 时刻风速; P_W^W 为风力额定出力; S_W 为额定风速; S_{in} 和 S_{out} 为风光的切入、切出风速。

2. 基于拉丁超立方抽样消纳能力随机模拟

电力系统中除了风光出力具有随机性外, 还存在许多其他的不确定元素, 如用户侧负荷需求、火力发电机组的起停检修等。为了充分考虑这些因素对电力系统状态以及风光消纳的影响, 采用拉丁超立方抽样方法模拟各类场景。拉丁超立方抽样是利用分层抽样, 样本数量尽可能覆盖整个抽样空间, 忽略样本中小概率事件, 确保抽样结果的准确性以及真实性。

在具有 N 个节点的电力系统中, 拉丁超立方抽样过程为:

1) N 个节点中随机选取 M 个负荷节点, 对于每个负荷节点, 随机赋予给定负荷变化范围内的 M 个负荷值。

2) 将系统中风光总出力区间 $[0, P_R]$ 以 $1/f$ 为间距分成 f 个互不相交的子区间, 每个子区间为 F_q , $q=1, 2, \dots, f$, 每一段区间内随机抽取一个总风光出力 $P_{z,j}$, 再随机分配给电力系统中全部风光节点。

$$P_R = \sum_{t=1}^T P_V(t) + \sum_{t=1}^T P_W(t) \quad (3)$$

$$P_{z,j} = \frac{\text{random}[0,1] + (j-1)P_R}{f} \quad (4)$$

$$P_{z,f} = \sum_{r=1}^f P_r \quad 0 < P_r < P_r^W \quad (5)$$

式中, P_R 为系统风光总出力; $\text{random}[0,1]$ 为区间 $[0,1]$ 内的随机数; R 为风光电站接入点; $r=1, 2, \dots, i$; P_r 为第 r 个风光接入节点的出力; P_r^W 为风光额定出力。

3) 计算模拟场景下电力系统潮流, 并记录系统各项数据。

3. 接入风光出力后时序电压灵敏度构造方法

(1) 电力系统传统电压灵敏度

在电力系统中电压灵敏度矩阵的计算公式为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1(N-1)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{(N-1)1} & \lambda_{(N-1)2} & \cdots & \lambda_{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{N-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, ΔU 为节点电压变化量; ΔP 为节点注入功率; λ_{ij} 为节点 i 对节点 j 的电压灵敏度。

从式(6)可以看出, 在系统中各节点注入功率的改变都会对单一节点电压产生影响, 同时单一节点功率变化也导致其他节点电压发生波动。

引入综合灵敏度表示系统中单一节点 i 注入功率改变对电力系统整体电压的影响

$$w_{si} = \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_{ii} \quad (7)$$

式中, w_{si} 为节点 i 的综合灵敏度。

在传统电力系统中由于火电机组的稳定性与单一性, 各节点电压降低方向与传输线方向一致, 电压波动规律, 对于越限节点的电压调整需求较小, 所以可以通过灵敏度矩阵参数求和表示单一节点注入功率对系统电压的影响。但是风光新能源的接入改变了电力系统内电压分布, 同时由于风光出力随时间变化的波动性以及出力大小的不确定性, 导致系统内在不同时间、不同节点电压出现电压偏差的情况, 且各节点调压需求不同, 此时综合灵敏度就不再适用。

(2) 时序电压灵敏度

对于传统的电压灵敏度分析与新型电力系统中的不适配, 本文提出时序电压灵敏度分析方法。时序电压灵敏度分析主要考虑到新型电力系统中风光出力的时间波动特性。首先分析在单一时间段下各节点电压越限程度, 进行节点静态综合灵敏度计算; 然后同一场景不同时段节点时序电压灵敏度; 最后根据拉丁超立方抽样模拟计算不同场景整合所有模拟场景下的时序电压灵敏度。

1) 节点静态综合灵敏度分析主要分为节点与节点之间以及节点对整个电力系统的综合灵敏度。在计算节点间综合灵敏度时, 将电压越限程度纳入计算公式。节点 i 在 t 时刻功率变化对节点 j 电压综合灵敏度为

$$\begin{cases} w_{ij,t} = \lambda_{ij,t} \times \alpha_{j,t} \\ \alpha_{j,t} = (U_{j,t} - U_{rj,t})^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\lambda_{ij,t}$ 为节点 i 在 t 时刻对节点 j 的传统电压灵敏度; $\alpha_{j,t}$ 为节点电压越限权重; $U_{j,t}$ 为节点 j 在 t 时刻电压; $U_{rj,t}$ 为节点 j 规定正常电压。

结合式(8), 对系统内节点进行静态灵敏度分类, 加权求和后可得到单一节点功率变化对整个电力系统的综合灵敏度

$$w_{Sj,t} = \left| \sum_{i \in \Phi_H} \lambda_{ij,t} \times w_{i,t} - \sum_{e \in \Phi_L} \lambda_{ej,t} \times w_{e,t} \right| \quad (9)$$

式中, $w_{Sj,t}$ 为节点 j 功率变化对整个电力系统的综合灵敏度; Φ_H 为电力系统中高电压节点集合; Φ_L 为电力系统中低电压节点集合。

2) 由于风光出力随时间的波动特性, 在不同时间段系统的灵敏度也各不相同, 因此式 (9) 加入时间权重提出全天节点时序电压灵敏度为

$$\begin{cases} w_{c,j} = \sum_{t=1}^{24} w_{Sj,t} \times \tau_t \\ \tau_t = (N_{c,t} + 1) \times \max(U_{j,t} - U_{rj,t})^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $w_{c,j}$ 为第 c 场景下节点 j 的时序电压灵敏度; τ_t 为 t 时刻时间权重; $N_{c,t}$ 为 t 时刻系统电压偏离正常的节点个数; $\max(U_{j,t} - U_{rj,t})$ 为 t 时刻节点 j 的最大偏差值。

3) 拉丁超立方抽样形成多个场景, 不同场景也会对电压灵敏度产生影响, 因此提出基于场景模拟的时序电压灵敏度

$$\begin{cases} w_j = \sum_{c=1}^f w_{c,j} \times \theta_c \\ \theta_c = \frac{P_{z,f}}{P_R} \end{cases} \quad (11)$$

式中, w_j 为节点 j 的时序电压灵敏度; θ_c 为场景权重。

基于配电网时序电压灵敏度的风光消纳能力优化策略

电力系统对风光消纳能力主要体现在风光资源用于负荷需求的占比, 以及为保证系统电压频率稳定弃风率、弃光率的大小, 但是由于风光出力的波动性, 大部分研究基于预测数据计算, 存在一定偏差。

时序电压灵敏度可以准确反映任意时刻风光出力对电力系统的影响, 因此本文提出基于配电网时序电压灵敏度的风光消纳能力策略, 利用时序电压灵敏度对电力系统状态接入风光后进行计算分析, 建立风光消纳能力最优为目标函数, 对目标函数求解得出最优消纳策略。

1. 风光消纳能力优化策略模型

(1) 目标函数

风光消纳能力分为对风光出力占系统负荷需求的比率以及弃风率、弃光率, 构建函数 F 对两种能力建立模型

$$\min F = f_1 + f_2 \quad (12)$$

1) 风光出力占系统负荷需求的比率

$$f_1 = \left[\frac{P_L(t) - P_W^{\text{use}}(t) - P_V^{\text{use}}(t)}{P_L(t)} \right] \quad (13)$$

式中, $P_L(t)$ 为 t 时刻系统负荷; $P_W^{\text{use}}(t)$ 为 t 时刻风电实际利用出力; $P_V^{\text{use}}(t)$ 为 t 时刻光伏实际利用出力。

2) 弃风、弃光率 f_2 计算公式为

$$f_2 = \left[\frac{P_W(t) - P_W^{\text{use}}(t) + P_V(t) - P_V^{\text{use}}(t)}{P_W(t) + P_V(t)} \right] \quad (14)$$

(2) 约束条件

约束条件包括系统约束以及机组约束。

(1) 系统约束

功率平衡约束

$$P_F(t) + P_W^{\text{use}}(t) + P_V^{\text{use}}(t) = P_L(t) \quad (15)$$

式中, $P_F(t)$ 为 t 时刻火电机组出力。

潮流约束

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (X_{ij} \cos \varphi_t + Y_{ij} \sin \varphi_t) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (X_{ij} \sin \varphi_t - Y_{ij} \cos \varphi_t) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 注入的有功功率和无功功率; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 和节点 j 的电压幅值; φ_t 为 t 时刻节点 i 和节点 j 的相位角; X_{ij} 、 Y_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电抗、电纳。

(2) 机组约束

火电机组功率约束

$$P_{F,\min} \leq P_F(t) \leq P_{F,\max} \quad (17)$$

式中, $P_{F,\min}$ 、 $P_{F,\max}$ 分别为火电机组出力的最小值与最大值。

火电机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_F(t) - P_F(t-1) \leq \Delta t v_{F,\max} \\ P_F(t) - P_F(t-1) \geq \Delta t v_{F,\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $v_{F,\min}$ 、 $v_{F,\max}$ 分别为火电机组的最小、最大爬坡速率。

火电机最小起停时间约束

$$\begin{cases} (\beta_t - \beta_{t-1})(T_t^{\text{off}} - T_{t,\min}^{\text{off}}) \geq 0 \\ (\beta_t - \beta_{t-1})(T_t^{\text{on}} - T_{t,\min}^{\text{on}}) \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中, β_t 为 t 时刻火电机组的起停状态, $\beta=1$ 表示机组处于运行状态, $\beta=0$ 表示机组处于停机状态; T_t^{off} 、 T_t^{on} 分别为 t 时刻停机、运行时间; $T_{t,\min}^{\text{off}}$ 和 $T_{t,\min}^{\text{on}}$ 分别为机组最短停机、最短运行时间。

风光出力约束

$$\begin{cases} P_{V,\min} \leq P_V^{\text{use}}(t) \leq P_V(t) \leq P_{V,\max} \\ P_{W,\min} \leq P_W^{\text{use}}(t) \leq P_W(t) \leq P_{W,\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $P_{W,\min}$ 、 $P_{V,\min}$ 分别为风、光最小出力;
 $P_{W,\max}$ 、 $P_{V,\max}$ 分别为风、光最大出力。

2. 求解方法

(1) 求解流程

综上所述, 本文基于配电网时序电压灵敏度分析的风光消纳能力优化策略求解方法。

1) 根据风光出力波动性, 进行拉丁超立方抽样模拟场景, 进行潮流计算, 收集不同场景下各节点电压以及注入功率变化。

2) 结合所得到电压、功率数据, 构建配电网时序电压灵敏度矩阵, 进一步反映风光接入后对配电网的影响, 为制定优化策略确定风光消纳边界条件。

3) 构造以风光出力占系统负荷需求的比例以及弃风率、弃光率最小的最优风光消纳目标函数的数学模型, 对模型进行求解得到最优风光消纳策略。具体求解流程如图1所示。

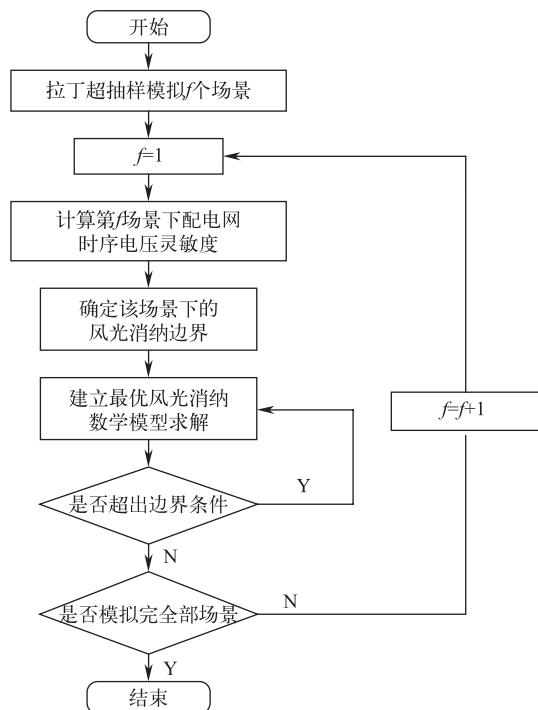


图1 求解流程

(2) 求解算法

本文所建立的最优风光消纳数学模型, 调节参数较少, 但是计算量以及收敛准确度较高, 因此选

取鲸鱼优化算法。相比于其他算法鲸鱼优化算法结构简单, 且有着很强的全局寻优能力, 可以在较短计算时间内得到最优结构。通过包围猎物、螺旋狩猎; 搜索食物进行建模求解。

每只鲸鱼代表算法中独立的一个个体, 猎物位置为目标函数, 不同个体在搜索空间中获取猎物的位置以及路径为不同解, 最优候选解就是最优个体在搜索空间中的最佳捕食坐标, 确定最优解之后, 整个搜索范围内的个体逐步向最优解靠近收敛, 个体环绕猎物的方式由以下数学式表示

$$D = |CX_q(t) - X(t)| \quad (21)$$

$$X(t+1) = X_q(t) - AD \quad (22)$$

式中, X 为当前座头鲸位置向量; X_q 为当前最佳的座头鲸位置向量; t 为当前迭代次数; A 和 C 为系数向量。

鲸鱼通过螺旋形运动式搜索位置更新的公式为

$$X(t+1) = D' e^{bl} \cos(2\pi l) + X_q(t) \quad (23)$$

$$D' = |X_q(t) - X(t)| \quad (24)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} X_q(t) - A D' [p < 0.5] \\ D' e^{bl} \cos(2\pi l) + X_q(t) [p \geq 0.5] \end{cases} \quad (25)$$

式中, b 为常数; l 为均匀分布的随机向量 $[-1, 1]$; p 为鲸鱼出现位置与猎物之间的距离。

为防止陷入局部最优, 加强鲸鱼算法全局寻优能力。当搜索范围超出, 重新在全局范围能跟更新数据系数 D 。鲸鱼个体修改当前搜索方向, 向其他方向重新寻找猎物, 位置更新方式为

$$X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - AD \quad (26)$$

$$D = |CX_{\text{rand}}(t) - X(t)| \quad (27)$$

式中, $X_{\text{rand}}(t)$ 为当前迭代数鲸鱼随机位置。

根据鲸鱼觅食建立数学模型, 规划电力系统最优风光消纳能力策略。

步骤1: 根据某地区负荷数据以及风光出力数据, 以全天24个时刻点得到各类曲线。

步骤2: 考虑不同时间下风光出力波动程度, 建立时序电力灵敏度模型, 在此基础上将含弃光弃风率以及风光出力占负荷比例作为最优消纳能力的目标函数。

步骤3: 根据不同机组特性设置约束条件, 利用鲸鱼优化算法的包围猎物、螺旋狩猎和搜索食物三

个行为阶段，收敛到的个体位置为全局最优解，即为最优风光消纳策略解。

步骤4：判断是否满足最大迭代次数，进而获得最优消纳能力，若不满足，则重新循环一次；检查最优配置是否符合风机、光伏、火电以及抽水蓄能的约束条件，若符合约束条件即为最优解，输出最优策略；若不满足，重新进行循环。

算例仿真

1. 算例概述

本文采用修改后的IEEE33节点系统为算例，设置系统中包含3个风光电站节点接入情况见表1，具体分布如图2所示。采用MATLAB 2017b-Yalmip仿真平台进行仿真，利用CPLEX求解器进行求解。

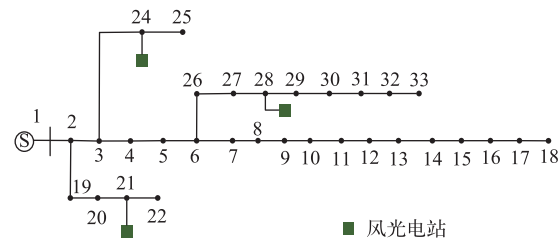


图2 求解流程

表1 风光电站接入节点及额定功率

接入节点	额定功率/kW
21	100
24	260
28	400

算例额定电压为12.66 kV，风光出力与接入容量相关。以风光真实出力以及负荷波动为仿真数据，具体参数如图3所示。

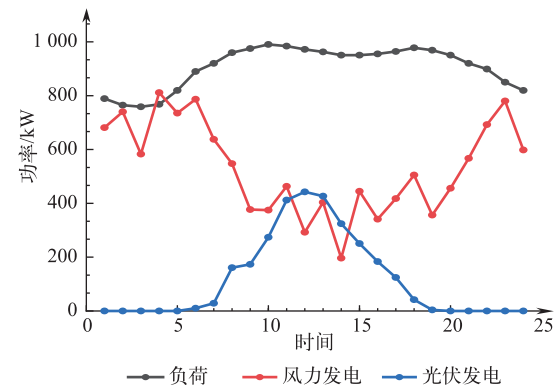


图3 仿真数据

2. 仿真结果分析

(1) 灵敏度计算结果分析

本文时序电压里灵敏度计算是针对传统电压灵敏度计算提出，首先计算静态综合灵敏度将系统内的节点电压越限程度考虑进灵敏度计算内，选取13:00时刻进行不同方式下的静态灵敏度计算，结果如图4所示。

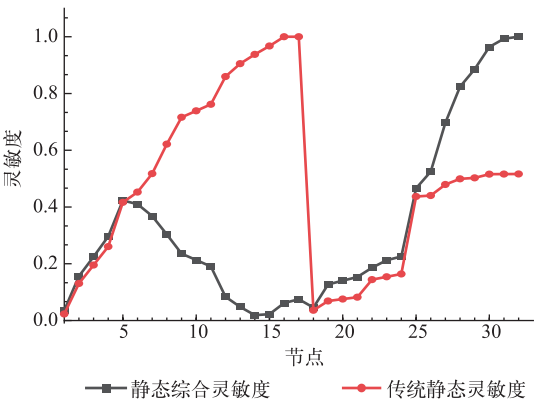


图4 13:00时刻两种灵敏度计算对比

由图4可知传统静态灵敏度与电压波动图形相似，未考虑风光接入后不同节点之间的电压偏移量之间的相互影响以及级联效应。静态综合灵敏度考虑电压越限程度，进行归一化处理得到风光接入后电力系统的整体电压情况。

在静态综合灵敏度的基础上，进行时序模拟对全天24 h计算得到图5电力系统时序灵敏度。通过图5可知节点32的时序灵敏度最大为 0.69×10^{-3} ，节点18的时序电压灵敏度最小为 0.72×10^{-4} ，基于这两个节点时序电压灵敏度可以有效反应风光接入后系统全局节点电压状态确定，电力系统风光消纳边界。

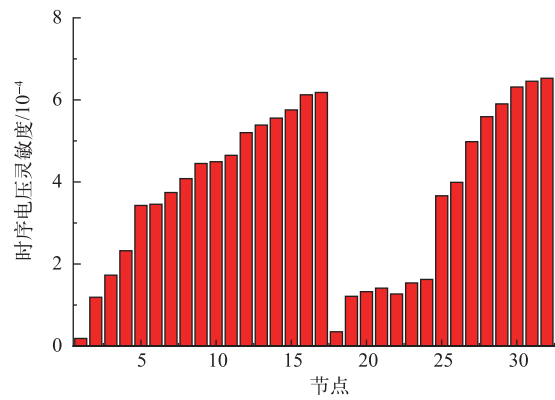


图5 时序灵敏度

(2) 不同策略下风光消纳能力

根据时序电压灵敏度计算结果,确定风光消纳边界,制定以下策略:①不考虑时序电压灵敏度的风光消纳策略;②基于时序电压灵敏度制定风光消纳策略。

两种方案下的风光消纳如图6、图7所示。

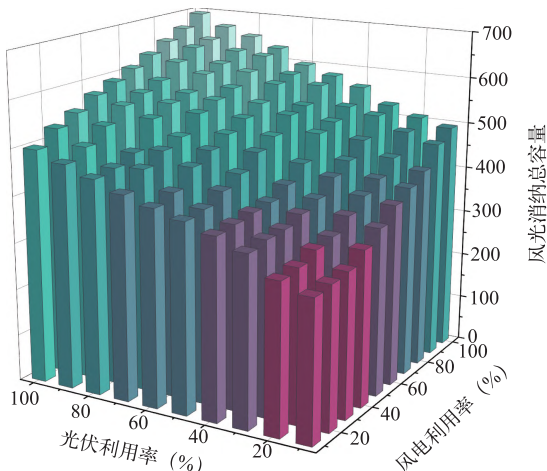


图6 方案1下的风光消纳总容量

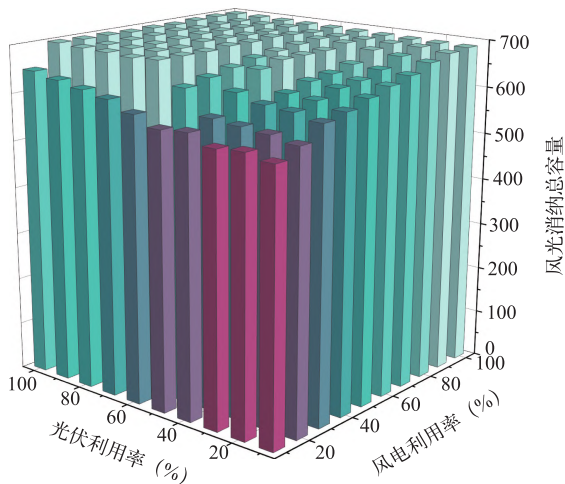


图7 方案2下的风光消纳总容量

对比图6、图7可以发现在方案2下风光消纳能力远超方案1。方案1的最低消纳量为205.6 kW,方案2的最低消纳量为523.5 kW,超过方案1 50%,同时方案1在风电利用率以及光伏利用率低时,所消纳容量波动较大相差494.4 kW。方案2消纳容量随着风、光利用率改变波动为1 765 kW,稳定性较好。

(3) 算法对比

为验证本文所提鲸鱼算法(WOA)搜索准确度和全局搜索能力,选取峰函数和多峰函数作为测试

函数,与常用粒子群算法(PSO)和引力搜索算法(GSA)对比分析,种群数均取30,迭代次数500测试函数公式见表1。收敛曲线如图8、图9所示。

表1 测试函数公式

函数	表达式	范围
F1	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100,100]$
F2	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	$[-10,10]$

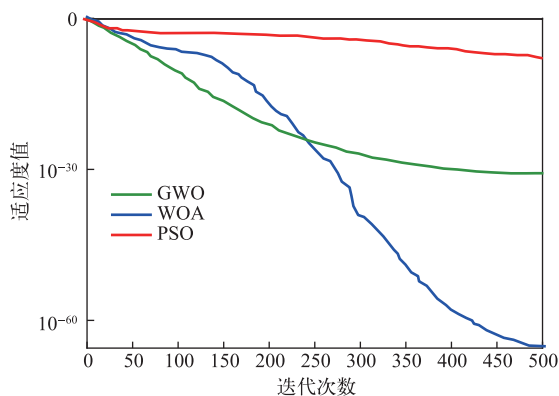


图8 F1收敛曲线

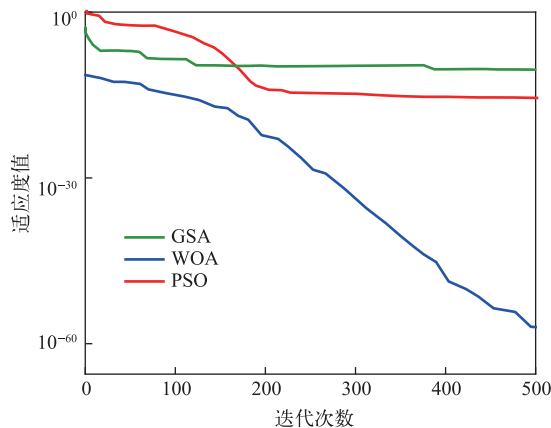


图9 F2收敛曲线

结束语

本文提出一种基于电力系统时序电压灵敏度的风光消纳能力策略。首先,根据风光出力的不确定性建立风光波动模型;基于模拟出的风光出力采用拉丁超立方抽样模拟不同情况下的电力系统接入风光后的系统潮流情况;然后计算时序电压灵敏度矩阵确定电力系统实时消纳边界;最后以风光消纳能力最优为目标确定消纳策略。EA

(收稿日期:2023-08-16)