

考虑风电场无功功率潜力的风电集群接入电网双层无功功率优化

马喜平, 甄文喜, 梁琛, 董晓阳, 李亚昕

(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070)

摘要: 随着大规模风电集群接入电力系统, 风电场更多地参与电网无功功率调节, 基于此首先建立了以电力系统有功功率网损和电压偏差最小为目标函数的上层优化模型。继而对该模型进行求解, 以减少系统网损, 实现电网的安全、节能运行。其次, 建立下层模型对风电集群进行精细化分析, 估算出风电集群的无功功率潜力, 以风电场的无功功率潜力为目标函数, 各风电机组单元的无功功率出力为待优化量, 协调风电集群内部的无功功率输出, 采用一种改进鲸鱼算法求解此双层优化模型。最后, 通过算例验证了所提的优化策略和算法能在风电无功功率潜力利用最大化时能有效减小电力系统的网损和电压偏差。

关键词: 多目标无功功率优化; 双层优化; 无功功率潜力分析; 改进鲸鱼算法

Bi-Level Reactive Power Optimization for Wind Cluster Integrating the Power Grid Considering the Reactive Power Potential of Wind Farm

MA Xiping, ZHEN Wenxi, LIANG Chen, DONG Xiaoyang, LI Yaxin

(Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the integration of large-scale wind power clusters into the power system, wind farms are increasingly involved in reactive power regulation of the power grid. Based on this, an upper level optimization model is first established to minimize the active power loss and voltage deviation in the power system. Subsequently, the model is solved to reduce system network loss and achieve safe and energy-saving operation of the power grid. Additionally, a detailed analysis of the wind power cluster is conducted at a lower level, estimating its reactive power potential. Taking the reactive power potential of the wind farm as the objective function and the reactive power output of each wind turbine unit as the optimization variable, this study coordinates the reactive power output within the wind farm cluster and employs an improved whale optimization algorithm to solve this bi-level optimization model. Finally, the proposed optimization strategy and algorithm are verified through case studies to effectively reduce network losses and voltage deviation in the power system while maximizing utilization of wind power's reactive power potential.

Key words: multi-objective reactive power optimization; bi-level optimization; reactive power potential analysis; improved whale algorithm

0 引言

随着能源危机的逐步升级和日益严峻的环境问题, 可持续发展已成为未来电网建设的首要目

标^[1]。能源低碳转型是全球能源发展的必然趋势^[2], 而新能源是引领电力系统绿色低碳发展及转型的重要前提^[3]。随着可再生能源和分布式能源的大规模接入, 由于其固有的波动性和不可预测性, 给电网的运行和监管带来了巨大的挑战^[4-5]。

无功功率优化对电力系统的规划、设计和运行有重要意义, 优化无功功率的分布可以有效地调节系统的电压水平, 减少输电线路和变压器的功率损耗, 提高系统的整体效率。文献[6]考虑电力系统

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62063015); 国家电网甘肃电力公司科技项目(52272223004A)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62063015); the Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company (52272223004A)。

中静态无功功率设备和风电场处动态无功功率设备的协调调度,提出了利用无迹变换和自适应聚焦粒子群算法的求解方法协调调度多种无功功率设备,得到不同运行状态下风电的调度方案。文献[7]考虑了新能源集群接入直流孤立电网建立多目标无功功率优化模型,以有功功率网损和无功功率裕度为目标函数,求解时通过加权法将多目标问题转化为单目标问题。文献[8]提出了一种改进麻雀搜索算法,引入了变异、贪婪策略,并且加入非支配排序和轮盘赌法将其改进为多目标算法,求解双层无功功率优化模型。文献[9]提出了一种新的基于多参数规划的分布式算法来求解协调最优潮流模型,该算法可以显著加快主问题与子问题之间的迭代速度。

现有的关于风电场无功功率潜力分析的文献主要集中于风电场在各种控制策略下的性能评价。文献[10-11]提出了一种确定双馈感应发电机无功功率极限的方法,将定子和网侧变流器的联合无功功率极限定义为风力机的总无功功率极限。此外,它还提供了一种分析双馈风电场无功功率极限的方法。然而,这种方法没有考虑除风电机组以外的其他无功功率设备的补偿能力,也没有考虑风电场内运行条件的变化。文献[12]采用组合赋值法对风电场无功功率调节能力进行评价,该评估包括建立风电场模型,收集现场站并网电压、无功功率补偿装置容量、风电机组无功功率裕度等指标。文献[13]提出了一种考虑风电机组有功功率波动对风电场无功功率极限影响的变下垂控制策略,该策略保证了风电机组输出的无功功率与无功功率裕度一致,从而可以对不同控制策略下的无功功率调节能力和并网点电压进行评估。

为提高实际电力系统中无功功率调节精度,需要协调电力系统及风电集群,实现双层优化。文献[14]实现了含高比例新能源配电网的多时间尺度无功电压协调控制。文献[15]提出一种考虑需求侧响应和微网间功率交互的双层优化模型,下层考虑到多微网间的功率交互,协调各微网调度资源的出力,上层根据微网层的调度结果,对配网层的有功功率和无功功率资源进行优化。文献[16]提出了一种协调有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)和无功功率补偿设备的电压控制策略,确保接入点电压符合安全运行范围,同时降低机组成

本。文献[17]综合考虑发电和负荷预测,提出了一种可有效降低 OLTC 动作次数的无功功率、电压控制方法。文献[18]建立了多目标无功优化控制模型,在改善风电场电压水平的同时,降低集电线路有功损耗。文献[19]考虑发电机运行的极限输出范围,对 OLTC 和并联电容器组联动次数加以限制,建立了完整的非线性混合整数动态无功功率优化模型。

虽然上述文献探讨了风力发电的无功功率支撑潜力,但多数研究认为其本质上为每个单独机组无功功率极限的简单总和。然而,在工程实践中,更多的是强调整体配置,而没有考虑现场的无功功率分区,在风电场中出现的无功功率流动导致输电线路路上额外的压差和损耗^[20-22]。基于此,本文建立了考虑风电场无功功率潜力的风电集群接入电网双层无功功率优化策略。首先,建立了以系统运行有功功率网损和电压偏差最小的上层优化模型,求解后根据优化结果制定无功功率补偿装置的投切功率,以达到增强系统电压稳定性、有效降低系统中的损耗。其次,对风电集群进行精细化分析,估算出风电集群的无功功率潜力,以风电场的无功功率裕度利用率为目标函数,以各风电机组单元的无功功率出力为待优化量,协调风电集群内部的无功功率输出。最后采用改进的鲸鱼优化算法,提升了寻优能力,通过算例验证了提出的优化策略能在风电无功功率潜力利用最大化时有效减小电力系统的网损和电压偏差。

1 风电场拓扑无功功率分析

各风电场内部通常包括着多条线路,每条线路连接着多台风电机组,各机组间距离可达数百米不等,故设置风电集群内部典型拓扑结构如图 1 所示,共有 m 条线路连接到风电场低压汇集母线,每条线路上存在 n 台风电机组,各线路经汇集升压变和汇集送出线路接入电力系统。

在风电场的运行过程中风电机组输出的功率通过输电线路和各个变压器传输,因此,在对风电场内部进行精细化分析时必须考虑输电线路和变压器的无功功率损耗。

其中,输电线路的 π 形等值电路如图 2 所示。

为专注于有功功率与无功功率损耗的关系,假设系统处于正常运行状态,各节点电压大致维持在

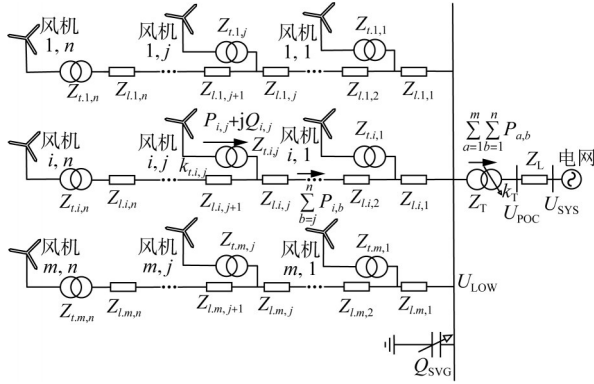


图1 风电集群拓扑结构图

Fig. 1 Topological diagram of wind power cluster

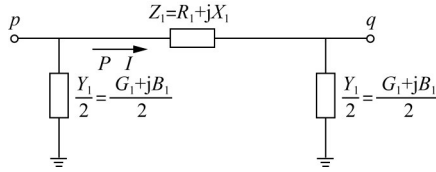


图2 输电线路结构图

Fig. 2 Transmission line structure diagram

标么值1左右, 同时假定串联支路端口功率因数约为1, 得到数学关系如下。

$$\begin{cases} \Delta Q_{Z_l} = I^2 X_l \\ P = U_p I \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta Q_{Z_l} \approx P^2 X_l \quad (2)$$

式中: X_l 为线路中的电抗; ΔQ_{Z_l} 为线路阻抗消耗的无功功率; P 为线路中有功功率; U_p 为输电线路始端电压; I 为线路流过的电流; φ 为功率因数角。

输电线路中分布电容发出的无功功率 Q_c 为:

$$Q_c = \frac{B_l}{2} U_p^2 + \frac{B_l}{2} U_q^2 \approx B_l \quad (3)$$

式中: U_q 为输电线路末端电压; B_l 为输电线路的并联电纳。

综合上式, 可得线路的无功功率损耗为:

$$Q_l = \Delta Q_{Z_l} - Q_c \approx P^2 X_l - B_l \quad (4)$$

分析变压器无功功率损耗采用变压器的 π 形等值电路, 如图3所示。

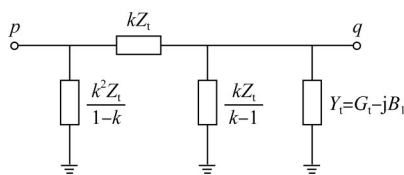


图3 变压器等效结构图

Fig. 3 Transformer equivalent structure diagram

Z_l 为与理想变压器串联的铜耗等值电阻与漏抗, k 为采用标么值下变压器的非标准变比, Y_l 为其对地支路励磁导纳。

图3中线路阻抗元件的无功功率损耗为:

$$\Delta Q_{Z_l} = I^2 (kX_l) \approx P^2 (kX_l) \quad (5)$$

式中 X_l 为变压器串联支路等值电抗。

对地支路吸收无功功率之和 Q 为:

$$Q \approx \frac{1-k}{k^2 X_l} U_p^2 + \frac{k-1}{k X_l} U_q^2 = \frac{1-k}{k X_l} \left(\frac{U_p^2}{k} - U_q^2 \right) \approx \frac{(1-k)^2}{k^2 X_l} \quad (6)$$

对地励磁导纳无功功率损耗 Q_{Y_l} 为:

$$Q_{Y_l} = B_l U_q^2 \approx B_l \quad (7)$$

可得变压器无功功率损耗 Q_t 为:

$$Q_t \approx P^2 (kX_l) + \frac{(1-k)^2}{k^2 X_l} + B_l \quad (8)$$

根据风电场内部集电线路的潮流特征提出输电线路和变压器的无功功率损耗数学模型, 为下文研究提供理论基础。

2 风电集群无功功率潜力精细化分析

集群风电场内部包含有多台风电机组, 通过集电线路相互连接。各风电机组的无功功率经过长距离输电线路以及风电机组箱式变压器和送出通道变压器传输至电力系统, 会产生无功功率损耗。同时, 风电场中各机组分散分布, 内部电压分布情况复杂, 影响机组的运行安全性和送出通道的输送能力。因此, 需要对场内无功功率进行精细化分析。

2.1 风电机组无功功率损耗分析

定义风电集群中第 i 条馈线中的第 j 台风电机组为风电机组 (i, j) 。以风电机组 (i, j) 为中心的无功功率分区如图4所示, 该分区包括风电机组 (i, j) 、其对应箱式变压器, 以及该风机上游相邻线路段 (i, j) 和下游相邻线路段 $(i, j+1)$ 各一半长度。

上游输电线路中的无功功率损耗 $Q_{l,i,j}$ 为:

$$Q_{l,i,j} \approx \left(\sum_{b=j}^n P_{i,b} \right)^2 X_{l,i,j} - B_{l,i,j} \quad (9)$$

式中: $P_{i,b}$ 为第 i 条馈线上第 b 台风电机组的有功功率; $X_{l,i,j}$ 、 $B_{l,i,j}$ 分别为上游线路 i 、 j 中的电抗和电纳; n 为风电机组数量。

下游输电线路中的无功功率损耗 $Q_{l,i,j+1}$ 为:

$$\min f_2 = P_{\text{loss}} = \sum_{i,j}^N G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (21)$$

式中: f_1 为系统电压偏差目标函数; ΔU 为系统归一化电压偏差; U_i 为系统中节点 i 的电压值; N 为系统节点集合; U_i^* 为节点 i 的参考电压值, 一般为 1.0 p.u.; ΔU_{imax} 为节点 i 安全运行时电压偏差最大值; U_{imax} 和 U_{imin} 分别为节点 i 安全运行时的最大和最小允许电压; f_2 为系统有功功率网损目标函数; P_{loss} 为总有功功率损耗; U_j 为节点 j 的电压; G_{ij} 为节点 i 、 j 间的电导; θ_{ij} 为节点 i 、 j 间电压的相位差。

2) 约束条件

功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_{Gi} 为节点 i 电源的有功功率; P_{Li} 为节点 i 处负荷的有功功率; Q_{Gi} 为节点 i 处电源的无功功率; Q_{Li} 为节点 i 处的负荷的无功功率; Q_{Ci} 为节点 i 处无功功率补偿装置的无功功率出力。

电网安全运行约束:

$$\begin{cases} U_{Gi \min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi \max}, i \in N_g \\ P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}, i \in N_g \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}, i \in N_g \\ Q_{Ci \min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci \max}, i \in N_c \\ T_{K \min} \leq T_K \leq T_{K \max}, i \in N_t \end{cases} \quad (23)$$

$$h_{m \min} \leq G_{ij} U_i^2 - U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \leq h_{m \max} \quad (24)$$

式中: $U_{Gi \max}$ 、 $U_{Gi \min}$ 分别为发电机端电压的最大、最小值; $P_{Gi \max}$ 、 $P_{Gi \min}$ 分别为发电机有功功率出力的最大、最小值; $Q_{Gi \max}$ 、 $Q_{Gi \min}$ 分别为风电机组无功功率出力的最大、最小值; $Q_{Ci \max}$ 、 $Q_{Ci \min}$ 分别为无功功率补偿装置投切容量的最大、最小值; $T_{K \max}$ 、 $T_{K \min}$ 分别为调压变压器变比的最大、最小值; N_g 为发电机集合; N_c 为无功功率补偿装置集合; N_t 为调压变压器集合; $h_{m \min}$ 、 $h_{m \max}$ 分别为支路 m 潮流的最大、最小值。

3.2 下层优化模型

下层优化考虑风电场的无功功率潜力, 若仅把风电集群的总无功功率指令平均下发至各台风电机组, 易造成无功功率潜力较小的风电机组满载、无

功功率潜力较大的风电机组不能充分利用, 故建立以利用风电集群的无功功率潜力为目标函数的风电场集群的 15 min 级滚动优化模型。每隔 15 min 输入一组风电机组的有功功率出力值, 并将上层 24 个时刻的无功功率出力 Q_{set} 作为下层优化的初始参数, 同时用优化后的风电出力值更新 Q_{gimax} 、 Q_{gimin} , 作为上层新一轮优化的边界, 达到交叉迭代的优化效果。

1) 目标函数

下层优化模型建立目标函数 f_3 表示风电的无功功率潜力, 函数 f_3 的值越小, 风电场的无功功率在系统中的分布越均匀, 故目标函数如下。

$$\min f_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{\text{WFi}}}{Q_{\text{WF}}} - \frac{Q_i}{Q_{\text{set}}} \right) \quad (25)$$

式中: Q_{WFi} 为第 i 台风电机组的无功功率容量; Q_{WF} 为风电场总的无功功率容量; Q_i 为第 i 台风电机组的实际无功功率出力值; Q_{set} 为上层优化传输的风电无功功率出力值。

2) 约束条件

$$\begin{cases} Q_{\text{WTi} \min} \leq Q_{\text{WTi}} \leq Q_{\text{WTi} \max} \\ P_{\text{WTi} \min} \leq P_{\text{WTi}} \leq P_{\text{WTi} \max} \\ U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \end{cases} \quad (26)$$

式中: P_{WTi} 、 Q_{WTi} 分别为第 i 台风力发电机组的有功功率出力和无功功率出力; $Q_{\text{WTi} \max}$ 、 $Q_{\text{WTi} \min}$ 分别为风电机组出力上、下限; $P_{\text{WTi} \max}$ 、 $P_{\text{WTi} \min}$ 分别为风电机组有功功率出力上、下限; $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$ 分别为第 i 组风电机组接入点电压上、下限。

3.3 改进鲸鱼算法

鲸鱼优化算法通过模拟座头鲸群的捕食行为来实现对优化问题的求解, 具有操作简单、寻优能力强等优点, 但也存在收敛精度低、易陷入局部最优的缺陷, 针对这些缺点, 本文采用改进鲸鱼算法。

1) 搜索猎物

搜索空间内的每头鲸鱼的位置为一个解, 并依照最佳捕食位置的鲸鱼来更新位置。

$$\begin{cases} D = |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \\ X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - A \cdot D \end{cases} \quad (27)$$

式中: t 为当前迭代数量; $X(t)$ 为当前鲸鱼位置向量; $X(t+1)$ 为更新后的鲸鱼位置向量; $X_{\text{rand}}(t)$ 为鲸鱼种群随机选择的位置向量; A 、 C 为鲸鱼优化算法中的系数向量; D 为当前位置与随机个体位置

之间的距离向量。

$$\begin{cases} A = 2\beta(t) \cdot r - \beta(t) \\ C = 2r \\ \beta(t) = 2\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) \end{cases} \quad (28)$$

式中: r 为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数; $\beta(t)$ 为收敛因子; $t_{\max}$ 为算法迭代数量的上限。

2) 包围猎物

群体中其他鲸鱼个体均朝最优位置包围来更新自身位置:

$$\begin{cases} D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \\ X(t+1) = X^*(t) - A \cdot D \end{cases} \quad (29)$$

式中 $X^*(t)$ 为全局群体的最佳位置向量。

3) 螺旋气泡攻击

座头鲸会绕螺旋线收缩围捕, 以 0.5 的概率进行包围猎物行为和螺旋更新行为, 数学模型如下。

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - A \cdot D, \rho < 0.5 \\ D' e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t), \rho \geq 0.5 \end{cases} \quad (30)$$

式中: D' 为当前个体位置与最优位置之间的距离向量; b 为常数, 用于限定螺旋的形状; l 为 $[-1, 1]$ 间的随机数; ρ 为 $[0, 1]$ 间的随机数。

在鲸鱼算法中引入粒子群算法, 每次迭代时通过个体极值 p_{best} 和全局极值 g_{best} 更新粒子, 对迭代过程中适应度较差的粒子位置进行优化。改进后的算法既保留了鲸鱼算法中朝最优位置包围来更新自身位置以及绕螺旋线收缩围捕的搜索策略, 又加入了粒子群算法的个体经验和最优粒子的引导, 算法中速度及位置更新的公式如式(31)所示。

$$\begin{cases} v_{i,j}^{t+1} = \omega(X_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + c_1 r_1 (p_{\text{best}_{i,j}} - x_{i,j}^t) + \\ c_2 r_2 (g_{\text{best}_{i,j}} - x_{i,j}^t) \\ x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \end{cases} \quad (31)$$

式中: ω 为惯性因子; $v_{i,j}^{t+1}$ 为粒子 i 的第 j 维在第 $t+1$ 次迭代时的速度; $x_{i,j}^t$ 和 $x_{i,j}^{t+1}$ 分别为粒子 i 的第 j 维在第 t 次和第 $t+1$ 次迭代时的位置; $X_{i,j}^{t+1}$ 为鲸鱼算法得到的第 i 个个体第 j 维位置; $p_{\text{best}_{i,j}}$ 为第 t 次迭代时粒子 i 的个体历史最优位置在第 j 维的分量; $g_{\text{best}_{i,j}}$ 为第 t 次迭代时种群全局最优位置在第 j 维的分量; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为分布在 $[0, 1]$ 的随机数。

3.4 双层优化模型求解流程

在考虑风电场无功功率潜力的风电集群接入电

网双层无功功率优化模型中, 上层模型针对每个优化时间段优化各无功源出力值, 将优化后风电集群无功功率出力值作为已知量传递给下层, 同时下层模型优化各风电机组的无功功率出力, 上层中的无功功率上下限的根据从下层获得的解进行更新, 进行下一次迭代计算。交叉迭代方法通过简单的迭代操作实现, 没有复杂的计算或数据结构, 使其实现相对简单。在每次迭代中可以有效地更新和调整参数, 从而有利于算法更快地收敛。此外, 这种方法在处理大量数据集时表现出良好的性能。参数更新过程直观, 能够清楚地解释算法的操作程序和结果。双层优化具体步骤如下所示。

步骤 1: 以最小化有功网损和电压偏差为目标函数建立上层无功功率优化模型。初始输入包括系统参数, 电源、负荷的有功和无功功率及功率因数。

步骤 2: 采用改进的鲸鱼算法对上层模型进行求解, 寻优选择最优折中解, 即优化时间段内各无功功率源出力值, 并将其作为下层优化中的无功功率输入。

步骤 3: 以利用风电集群无功功率潜力为目标函数建立下层无功功率优化模型。初始输入包括风电集群拓扑结构初始参数、风电有功功率出力、上层优化模型求解得到的无功功率出力值。以及根据各风电场有功功率出力及内部拓扑结构计算出的无功功率出力上下限。

步骤 4: 采用改进后的鲸鱼算法求解下层优化模型, 得到风电集群内部的无功功率出力方案。用优化后的结果更新上层风电集群无功功率出力的上下限, 作为新一轮优化的边界, 进行下一次迭代计算。

步骤 5: 判断是否达到程序设置的最大迭代次数, 如符合收敛条件, 结束优化并输出最优值, 否则继续步骤 2 至 4, 直至达到最大迭代次数。

4 算例分析

4.1 算例参数设置

上层优化采用改进后的 IEEE 39 节点系统, 如图 6 所示。系统的基准功率选择 100 MVA。在节点 7、26、20、29 分别接入容量为 45 MW 的风电集群 WT1、WT2、WT3、WT4; OLTC 配置于线路 2-30、11-12、22-35、29-3; 在节点 8、27 分别接入

容量为 20 Mvar 可投切电容器组 (capacitor bank, CB); 在节点 4、12、21 接入静止无功功率补偿装置 (static var compensator, SVC), 容量为 100 Mvar。各变量的最大、最小值如表 1 所示。

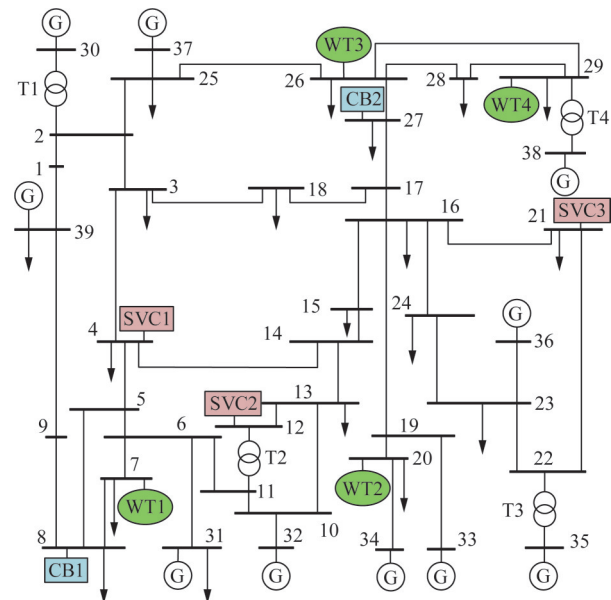


图 6 改进的 IEEE39 节点系统结构图

Fig. 6 Improved IEEE 39-node system architecture

表 1 各变量最大最小值

Tab. 1 Maximum and minimum values of each variable

可控变量	最大值	最小值
$T_k/\text{p. u.}$	1.1	0.9
$Q_{CB}/\text{组}$	5	0
Q_{SVC}/Mvar	100	0
$\alpha/(\circ)$	18	8
$\gamma/(\circ)$	25	15

注: T_k 为有载调压变压器变比; Q_{CB} 为可投切电容器组投入组数; Q_{SVC} 为静止无功功率补偿装置无功出力; α 为整流侧换流器控制角; γ 为逆变侧换流器控制角。

下层优化模型中各风电集群单条线路的拓扑结构如图 7 所示, 风电集群每条馈线包括额定容量为 1.875 MW 的风电机组 10 组, 升压后经高压输电线路并入电网。优化策略采用改进的鲸鱼优化算法, 种群大小为 100, 最大迭代次数为 1 000。

4.2 结果分析

为了凸显改进鲸鱼优化算法的优越性, 比较 3 种不同算法的收敛速度, 图 8 给出了仅考虑网络损耗的改进 IEEE 39 节点系统单目标优化模型的求解收敛过程。由图可知, 粒子群优化算法经过 80 次迭代收敛到 106.8 MW, 而鲸鱼优化算法经过 90 次迭代收敛到 110.3 MW。此外, 本文提出的改进鲸鱼优化算法也仅经过 60 次迭代就达到了 104.2 MW 的收敛速度, 与其他两种算法相比, 无论是收敛速度还是优化能力都有了明显改进。

该图显示了不同算法的求解迭代次数与有功功率网损之间的关系。与单独使用基本粒子群算法和基本鲸鱼算法相比, 本文提出的改进鲸鱼优化算法在优化能力和收敛速度上都有显著提高。

通过优化求解, 图 9—11 展示了双层优化后可调无功功率设备的动作结果。经分析可得, CB、SVC 等无功源均运行于约束范围内, OLTC 的运行挡位也在可调裕度范围内。

图 12—13 给出了优化前后的系统网损和系统中某节点每个时刻的电压幅值的对比图。

从图 12 可看出, 相较于优化前, 采用考虑风电场无功功率潜力的双层无功功率优化策略后的系统 24 个时刻的有功功率损耗显著改善。优化前电网 24 h 的平均网损功率为 104.653 8 MW, 平均电压偏差为 11.31 p. u., 通过无功功率优化后系统平均网损功率为 95.894 8 MW, 平均电压偏差为

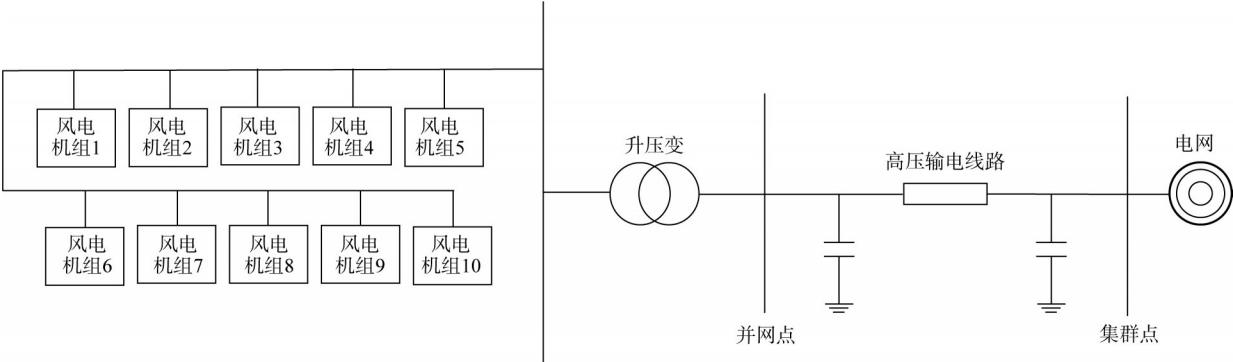


图 7 下层简化结构拓扑图

Fig. 7 Simplified topology diagram of lower layer

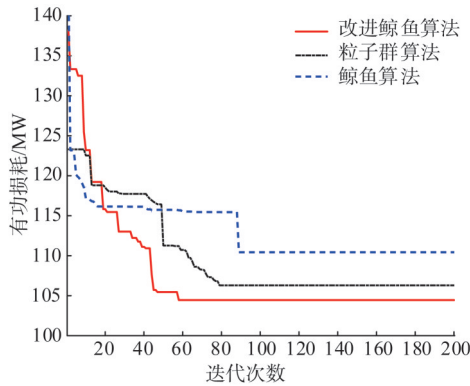


图 8 不同算法的收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves for different algorithms

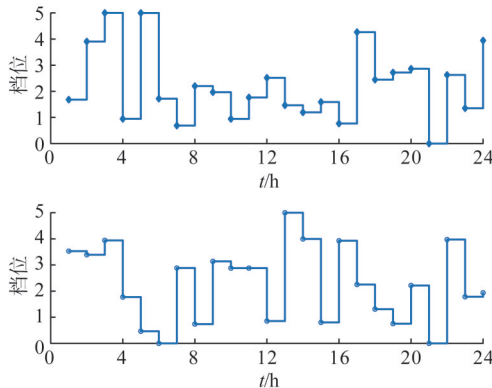


图 9 可投切电容器组动作逻辑

Fig. 9 Operation logic of switchable CB

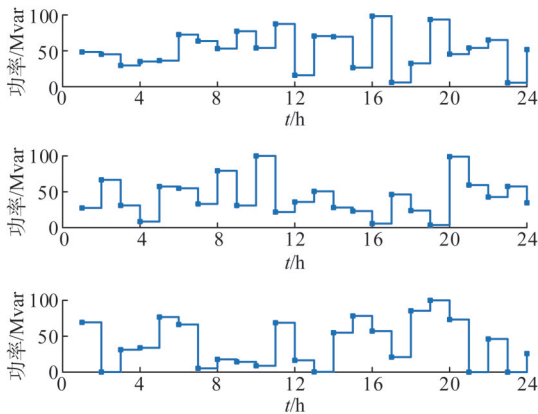


图 10 静止无功功率补偿装置动作逻辑

Fig. 10 Operation logic of SVC

5.49 p. u., 降损率达 8.37 %。

本文所提的优化策略协调系统内各无功功率设备, 同时考虑了风电集群的无功功率潜力, 改变了无功功率潮流分布, 改善电压水平。由图 13 可得, 优化前风电接入点的电压幅值较大, 可能对系统的安全稳定运行造成影响。对比分析后可得, 优化后

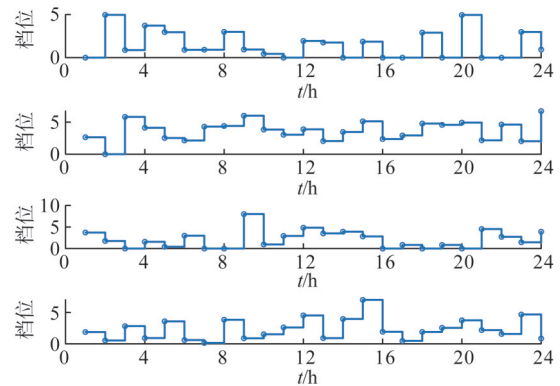


图 11 有载调压变压器动作逻辑

Fig. 11 Operation logic of OLTC

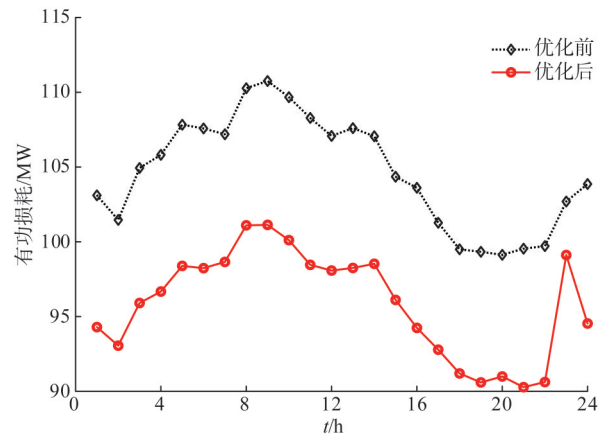


图 12 有功功率损耗对比图

Fig. 12 Active power loss comparison diagram

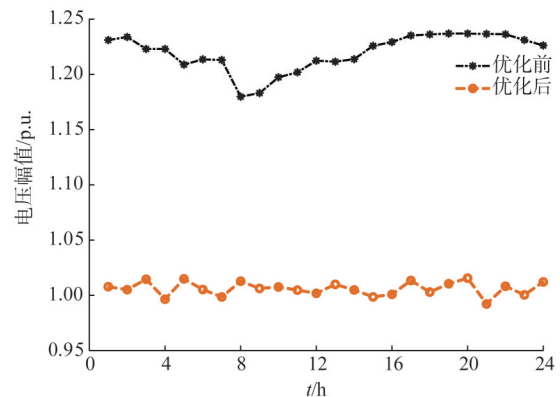


图 13 风电集群接入点电压对比图

Fig. 13 Voltage comparison diagram of access point in wind power cluster

的电压幅值整体上均有所下降, 并且稳定在合理的范围内, 各个时间段的电压水平都得到了改善。

4.3 场景对比分析

为了体现考虑风电场无功功率潜力的风电集群接入电网双层无功功率优化策略的优势与效果, 分

别设置 3 种不同场景进行优化, 并比较其结果。

场景一: 不考虑无功功率补偿及调节变压器变比对系统的影响以及风电集群内部结构和风电场无功功率潜力对有功功率损耗的影响。

场景二: 不考虑无功功率补偿及调节变压器变比对系统的影响, 考虑风电集群内部结构和风电场无功功率潜力对有功功率损耗的影响。

场景三: 考虑无功功率补偿及调节变压器变比对系统的影响和风电集群内部结构和风电场无功功率潜力对有功功率损耗的影响。

3 个场景一个优化周期后的有功功率损耗结果如表 2 所示。

表 2 各场景的优化结果

Tab. 2 Optimization results of each scenario MW

场景	有功功率网损
场景一	107.4
场景二	104.9
场景三	95.4

可得场景三协调优化电力系统的无功功率和风电集群内部各风电机组的无功功率出力, 使得其网损值小于场景一与场景二, 通过对比可以证明本文所提的考虑风电场无功功率潜力的风电集群接入电网双层无功功率优化具有更好的降损效果。

图 14 为 3 种场景优化后系统的有功功率损耗对比图。

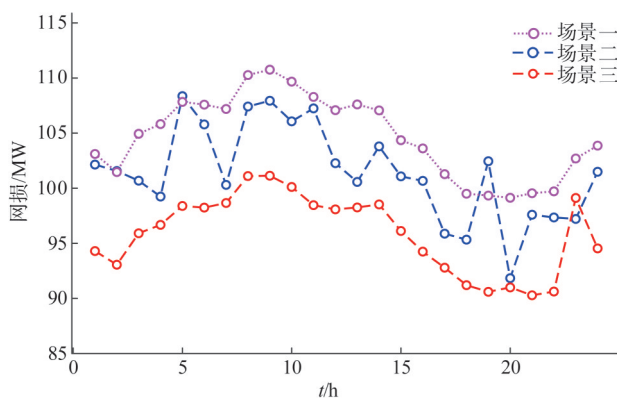


图 14 各场景优化后有功功率损耗对比图

Fig. 14 Comparison diagram of active power losses after optimization of each scenario

从图 14 中可以得到场景一的优化模型降损效果最差。这是由于在大规模风电集群接入时, 该场景下的调节能力较弱, 过剩的功率难以被就地消

纳, 需要将多余的有功功率远距离传输, 在输电线路中产生有功功率损耗, 导致系统网损值较大。场景二仅考虑风电集群层级的优化策略, 只能通过协调风电机组单元的无功功率出力来调节有功功率损耗, 而没有协调电力系统层面的无功功率补偿装置对无功功率进行调节, 导致该场景未能充分利用电压控制能力及无功功率调节能力。相比于以上两种情况, 场景三所采用的方法协调电力系统中多可调资源的无功功率支撑作用, 改善了电网无功功率潮流分布和电压水平, 同时考虑风电集群无功功率潜力, 优化风电集群的无功功率出力, 降损效果优于其他两种优化场景。

5 结论

在大规模风电集群接入电网的场景下, 建立了考虑风电场无功功率潜力的风电集群接入电网双层无功功率优化模型, 并采用一种改进鲸鱼算法求解。所建立的模型考虑了电力系统层面和风电集群内部的协调优化, 研究了有功功率网损和电压偏差与各无功功率设备、风电集群无功功率潜力的关系。

本文根据风电集群内部拓扑进行精细化分析, 将其划分为以风电机组为中心和以汇集线路为中心的区域, 根据不同区域的特点建立无功功率损耗计算模型, 估算得到风电集群的无功潜力的准确值, 并基于该方法制定大规模风电集群接入电网的无功功率优化策略。上层优化以最小化电力系统运行有功损耗和电压偏差的为目标, 下层优化以利用风电场的无功功率潜力为目标。通过上下层优化的交叉迭代, 优化了各风电机组单元以及电力系统中各无功功率设备的无功功率出力, 协调风电集群的无功功率输出, 有效减少系统网损和电压偏差, 实现电网的安全、节能运行。

参考文献

- [1] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4318 - 4328. DING Tao, MOU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy internet and its operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4318 - 4328.
- [2] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999 - 5008. ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J].

- Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999 – 5008.
- [3] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036 – 3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036 – 3046.
- [4] TANG Z, DAVID J H, LIU T, et al. Hierarchical voltage control of weak subtransmission networks with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 187 – 197.
- [5] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699 – 3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699 – 3705.
- [6] 尹青, 杨洪耕, 马晓阳. 含大规模风电场的电网概率无功优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 514 – 520.
YIN Qing, YANG Honggeng, MA Xiaoyang. Probabilistic reactive power optimization of power grid with large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 514 – 520.
- [7] YIN S L, WU L, SONG W, et al. Multi-objective reactive power optimisation approach for the isolated grid of new energy clusters connected to VSC-HVDC[J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 1024 – 1028.
- [8] 吴成明, 邢博洋, 李世春. 基于麻雀搜索算法的微电网分层优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 115 – 123.
WU Chengming, XING Boyang, LI Shichun. Hierarchical optimal dispatch of microgrid based on the sparrow search algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 115 – 123.
- [9] YANG M, LIU Y, GUO L, et al. Hierarchical distributed chance-constrained voltage control for HV and MV DN based on nonlinearity-adaptive data-driven method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 806 – 819.
- [10] LOPEZ J, GUBIA E, OLEA E, et al. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4246 – 4254.
- [11] ZOU X, ZHU D, HU J, et al. Mechanism analysis of the required rotor current and voltage for DFIG-based WTs to ride-through severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7300 – 7304.
- [12] SHEN Y, ZU W, LIANG L, et al. Comprehensive evaluation of the reactive power and voltage control capability of a wind farm based on a combined weighting method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 18 – 24.
- [13] LI Y, XU Z, ZHANG J, et al. Variable droop voltage control for wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 491 – 493.
- [14] XU Y, DONG Z, ZHANG R, et al. Multi-timescale coordinated voltage/var control of high renewable-penetrated distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4398 – 4408.
- [15] 李振坤, 汪璇璇, 时珊珊, 等. 考虑微网间功率交互的配电网双层优化调度[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 107 – 118.
LI Zhenkun, WANG Xuanxuan, SHI Shanshan, et al. Bi-level optimal dispatch of distribution network considering power interaction among microgrids[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 107 – 118.
- [16] APPEN J V, STETZ T, BRAUN M, et al. Local voltage control strategies for PV storage systems in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1002 – 1009.
- [17] AGALGAONKAR Y P, PAL B C, JABR R A. Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 182 – 192.
- [18] REN X, WANG H, WANG Z, et al. Reactive voltage control of wind farm based on tabu algorithm[J]. Frontiers in Energy Research, 2022(10): 902623.1 – 902623.10.
- [19] 陆彬, 高山, 李德胜. 基于发电机运行实际的电力系统日前动态无功优化研究[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 122 – 130.
LU Bin, GAO Shan, LI Desheng. Research on day ahead dynamic reactive power optimization based on generator operation[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 122 – 130.
- [20] 虞伟, 黄浩, 金晨星, 等. 基于多头自注意力特征变换和CNN-LSTM的超短期风电功率预测[J]. 南方电网技术, 2026, 20(5): 71 – 80.
YU Wei, HUANG Hao, JIN Chenxing, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on multi-head self-attention feature transformation and CNN-LSTM[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(5): 71 – 80.
- [21] 彭穗, 李峰, 王彦峰, 等. 考虑极热极寒日的高比例风电电力系统备用容量规划[J]. 广东电力, 2025, 38(10): 1 – 13.
PENG Sui, LI Feng, WANG Yanfeng, et al. Reserve capacity planning for high-proportion wind power systems considering extremely hot and cold days[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(10): 1 – 13.
- [22] 张柏林, 李希德, 魏博, 等. 基于改进的场景分类和去粗粒化MCMC的风电出力模拟方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 41 – 49.
ZHANG Bolin, LI Xide, WEI Bo, et al. Wind power output simulation method based on improved scene classification algorithm and coarse-grained MCMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 41 – 49.

收稿日期: 2024-04-18; 网络首发日期: 2024-11-30

作者简介:

马喜平(1987), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为新能源并网与电网降损节能技术, maxpgs@163.com;

甄文喜(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为新能源发电技术;

梁琛(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网降损降碳。