

计及风电场损耗的风电场无功优化分配策略研究

李泽宽, 张 飞, 任晓颖

(内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014000)

摘要: 针对风电场有功损耗和节点电压易受无功功率影响, 及利用当前信息进行控制而导致风机无功补偿不充分和无功越限的问题, 提出了一种风电场无功优化控制策略。该策略首先进行风电功率预测, 实时求解风电机组无功动态容量评估; 然后, 通过参考电压和实测电压求得风电场无功需求; 最后, 提出一种考虑风电场内有功损耗最小的风电机组无功分配方法, 采用改进粒子群优化算法, 对所构造的无功优化模型进行求解, 实现对各个风机无功出力进行合理分配。通过模型对所提方法进行验证, 结果表明风电场在满足无功需求指令的同时, 能够减小系统的有功损耗, 改善节点电压质量。

关键词: 风电场; 无功优化; 粒子群优化算法; 双馈风机

Study on optimal reactive power distribution strategy of wind farm considering wind farm loss

LI Zekuan, ZHANG Fei, REN Xiaoying

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China)

Abstract: A wind farm reactive power optimization control strategy is proposed to address the problems of wind farm active power loss and nodal voltage being easily affected by reactive power and the use of current information for control resulting in inadequate wind turbine reactive power compensation and reactive power crossing limits. The strategy first makes wind power prediction and solves the reactive power dynamic capacity assessment of wind turbines in real time; then, the reactive power demand of wind farms is obtained by reference voltage and measured voltage; finally, a reactive power allocation method of wind turbines is proposed considering the minimum active power loss in wind farms, and the constructed reactive power optimization model is solved by improved particle swarm optimization algorithm to realize reasonable reactive power output of each wind turbine. The proposed method is validated by the model. The proposed method is validated by the model, and the results show that the wind farm can reduce the active power loss of the system and improve the node voltage quality while meeting the reactive power demand command.

Key words: wind farm; reactive power optimization; particle swarm optimization algorithm; double-fed wind turbine

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 以风能为代表的新能源所占比重和开发越来越多。而风电的快速发展使得风电场容量不断增大, 对并网点电压的扰

动也越来越明显, 对此就需要对其进行无功补偿和无功分配, 保证系统和风电机组的稳定运行^[1]。

目前, 双馈风机在风电场中占有很大的比例^[2-3], 双馈风机可实现有功无功解耦控制, 向

电网提供一定的无功功率，关键在于怎样充分利用双馈风电机组的无功调节能力实现对风电场内部及并网电压的改善，降低风电场内部的损耗。有的在每个机组上配置并联电容补偿器，用于平衡双馈风机的无功发生能力，并采用分级无功分配策略，对风电机组的无功输出进行优化，降低风电场有功损耗^[4]。文献[5-6]提出采用不同控制方式调节机组无功输出，以达到优化节点电压的目的；文献[7]为缓解电网的无功压力，对双馈机组无功能力进行计算，提出就近补偿的方式进行调节；文献[8]采用遗传算法和内点法求解最优无功分配；文献[9]对风电场无功优化采用粒子群优化算法进行求解。

以上所述研究是将风电场看作一个整体或将风电机组分为几个机群，在没有考虑风机内部拓扑结构和电气设备对风电场电压和网损的影响情况下，将无功功率平均分配给每个风机。风电场的有功损耗主要是集电线产生的损耗、风机的机械损耗、能量转换损耗和变压器的损耗^[10]。随着风电场规模的扩大，风电场中潮流引起的网络损耗和节点电压波动进一步扩大。此外，传统控制系统只根据系统当前状态分配无功功率，而不考虑控制时刻系统的变化。在求解电力系统无功优化问题的典型算法中，内点法不能处理离散变量，简化梯度法和牛顿法计算量大，不适用在线优化。而粒子群优化算法易陷入局部最优解，出现早熟收敛的情况导致准确度不高的缺陷。

为解决上述问题，在保证机组无功极限和各节点电压质量的前提下，考虑风电场内部拓扑结构对系统潮流的影响，以降低系统网络损耗为目标，采用改进粒子群优化算法优化分配各机组无功输出指令。

1 潮流计算

本文风电场的无功优化效果主要通过分析风电场节点电压和损耗来判断，而计算风电场的网损及电压情况，首先需要对风电场进行潮流计算。潮流计算会影响粒子群优化算法的搜索速

度，而且风电场内部是典型的树形网络。为了求解整个风电场内部各个节点的功率、电压和各支路电流情况，采用前推回代法进行潮流计算。其中双馈风机可以有功、无功解耦控制，而且每台风机无功功率连续可调，因此可将风机节点作为PQ节点，风电场出口电压作为平衡节点进行潮流计算。

已知风机节点的有功功率和无功功率，首先给定非平衡节点的初始电压，前推计算与之相连上层节点的注入电流 I_j ；利用注入电流求得支路电压损耗；然后根据各支路的电压损耗和根节点电压回代得到各节点的电压 U_j 。

在前推注入电流过程中，由已知的风机节点电压 j 的有功功率 P_j 、无功功率 Q_j 和初始电压 U_j^* 计算得到该节点的注入电流为

$$I_j = \frac{P_j - jQ_j}{U_j^*} \quad (1)$$

根据KCL，逐层推出根节点注入电流为

$$I_i = \sum_j I_j \quad (2)$$

电压回代的过程中，结合支路阻抗推出各个节点电压为

$$\Delta U_j = I_j(R_j + jX_j) \quad (3)$$

$$U_j = U_i - \Delta U_j \quad (4)$$

式中， U_i 为根节点电压； ΔU_j 为各支路的电压损耗； I_j 、 R_j 与 X_j 为支路电流、电阻和阻抗。

由此完成一次迭代后，得到所有节点的电压。计算各支路节点的电压幅值修正量和两次迭代过程中各节点的电压差值，并判断是否处在允许误差之内。如果处于误差之内，则结束迭代；否则继续迭代。

因此通过各节点电压得出网络损耗为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij}(U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

式中， G_{ij} 为支路首末节点之间的电导； U_i 为支路首端节点的电压幅值； U_j 为支路末端节点的电压幅值； θ_{ij} 为两节点之间的电压相角差。

风电场潮流计算流程如图1所示。

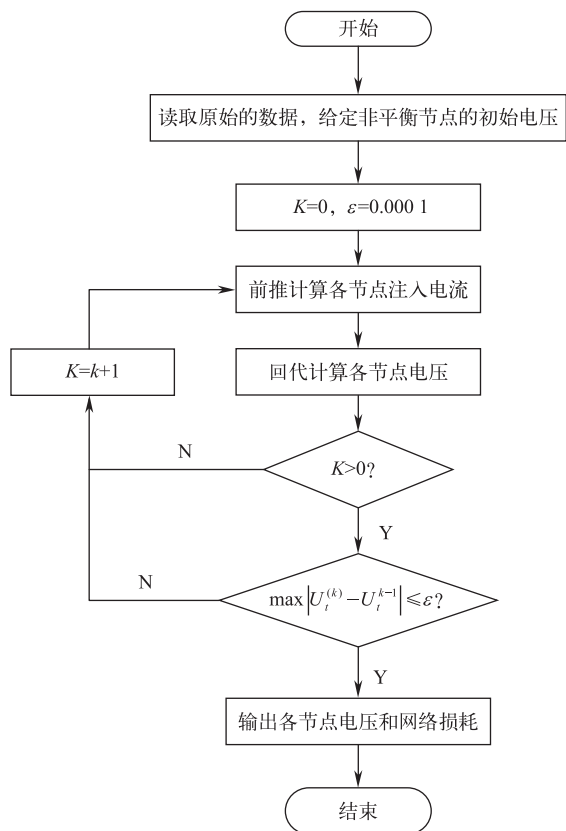


图1 风电场潮流计算流程

Fig. 1 Wind power flow calculation process

2 风电场无功优化

2.1 风电机组无功评估

为了充分发挥风电机组的无功调节能力,风电机组的无功能力评估至关重要。将风机的无功特性和有功预测相结合,求得风电机组无功功率容量评估。避免出现风机无功越限的情况,为后续的无功优化分配提供基础。

双馈风电机组无功输出能力和机组在同一时刻的有功输出紧密相关,因此双馈风机的无功动态评估必须时刻考虑机组有功输出情况。利用秒级有功预测方法^[11],可以精确实现有功输出的秒级分辨率预测,进而得到未来时间窗内的有功变化情况,结合双馈风电机组有功无功特性,实现对风电机组的动态无功评估。

设风电机组未来一段时刻内的有功预测值为 $P_1, P_2, \dots, P_n$,结合双馈机组的有功无功输出之间的函数关系式 $Q_{\max}(P), Q_{\min}(P)$,

可得到未来一段时刻内的无功功率输出能力范围: $[Q_{\max}(P_1), Q_{\min}(P_1)], [Q_{\max}(P_2), Q_{\min}(P_2)], \dots, [Q_{\max}(P_n), Q_{\min}(P_n)]$ 。

在给定有功功率时,风机无功功率的范围为

$$Q_{\max}(P) = Q_{s\max}(P) - Q_{c\min}(P)$$

$$= -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \times \frac{X_m}{X_s} U_s I_{r\max}\right)^2 - P_s^2} + \sqrt{S_{c\max}^2 - (sP_s)^2} \quad (6)$$

$$Q_{\min}(P) = Q_{s\min}(P) - Q_{c\max}(P)$$

$$= -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \times \frac{X_m}{X_s} U_s I_{r\max}\right)^2 - P_s^2} - \sqrt{S_{c\max}^2 - (sP_s)^2} \quad (7)$$

式中, U_s 、 X_m 、 X_s 和 $I_{r\max}$ 分别为定子电压、定子电抗、励磁电抗和转子侧电流最大值。

因此,风电场可以每隔若干秒进行机组有功预测的滚动更新,得到风电机组无功容量评估,最终实现最优无功指令的滚动更新。

2.2 风电场无功需求求解

由GB/T 19963.1—2021《风电场接入电力系统技术规定》^[15]可知:风电场无功补偿时,应优先调用风机的无功调节能力。这就要求进行无功参考值求解,以保证优先利用风电场内各风电机组的无功调节能力。采用比例积分控制器进行无功需求求解可以消除电压的稳态误差。将并网参考电压与并网点当前电压作差,将偏差电压通过PI控制器得到风电场无功参考值。

风电场无功整定模型如图2所示。

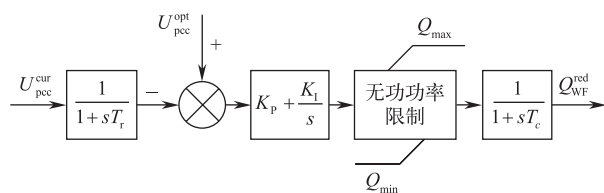


图2 风电场无功整定模型

Fig. 2 Reactive power setting model of wind farm

图2中, T_r 是用于模拟电压采样延时的时间常数; T_c 是用于模拟各个DFIG的通信延迟的时

间常数； K_p 和 K_i 分别是比例积分系数； $Q_{\max}$ 和 $Q_{\min}$ 分别是整个风电场输出无功的上限、下限。如果输出指令越限，则以限制为输出量。即

$$Q_{WF}^{\text{ref}} = K_p (U_{pcc}^{\text{opt}} - U_{pcc}^{\text{our}}) + K_i \int (U_{pcc}^{\text{opt}} - U_{pcc}^{\text{our}}) dt \quad (8)$$

式中， $K_p \approx U_{pcc}^{\text{our}}/X$ ； X 为汇集母线与并网点之间输电线路的电抗值； K_i 依据经验整定。

2.3 无功优化数学模型

2.3.1 目标函数

本文在考虑网损的情况下，以各机组实时无功裕度为基础，提出一种按照风电场内部系统网损最小为目标函数，通过加入惩罚函数，优化调节风电场各节点电压质量。即

$$\min f = P_{\text{lose}} = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) + \mu \sum_{i=1}^{n_{PQ}} f(U_i) + \lambda \sum_{i=1}^{n_{PQ}} g(Q_i) \quad (9)$$

$$f(U_i) = \begin{cases} (U_i - U_{i,\min})^2 & U_i < U_{i,\min} \\ 0 & U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ (U_i - U_{i,\max})^2 & U_{i,\max} < U_i \end{cases} \quad (10)$$

$$g(Q_i) = \begin{cases} (Q_i - Q_{i,\min})^2 & Q_i < Q_{i,\min} \\ 0 & Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \\ (Q_i - Q_{i,\max})^2 & Q_{i,\max} < Q_i \end{cases} \quad (11)$$

式中， n 为节点总数； n_{PQ} 为PQ风机节点总数； μ 和 λ 为电压和无功越限惩罚因子； $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点的电压上限、下限； $Q_{i,\max}$ 和 $Q_{i,\min}$ 分别为当前节点的无功上限、下限。

2.3.2 约束条件

风电场节点电压功率约束等式条件为

$$\begin{cases} P_i - P_{di} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - Q_{di} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

各变量不等式约束条件为

$$\begin{aligned} U_{i,\min} &\leq U_i \leq U_{i,\max} \\ Q_{Gi,\min}^{(p)} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max}^{(p)} \\ P_{Gi,\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \end{aligned} \quad (13)$$

式中， P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率； P_{di} 和 Q_{di} 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷； G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导和电纳； $P_{Gi,\max}$ 和 $P_{Gi,\min}$ 分别为第 i 台风机发出的有功上限、下限。

2.3.3 模型求解

因为受到风电场电气设备及内部拓扑结构的影响，无功功率在线路和变压器上的流动会产生较大的有功损耗和节点电压波动。双馈风机可以实现有功和无功的解耦控制，具备动态调节无功输出的能力。因此，可以通过优化调节风电机组的无功输出降低风电场内线路和变压器的损耗。

设在不改变调压变压器的分接头和其他补偿设备的情况下，风电场总无功需求由风电机组提供。因此，设风机无功输出 Q 为风电场无功优化问题控制变量，节点电压 U_i 和节点电压相角 Q_i 为系统状态变量。采用粒子群优化算法进行求解，得到每台风机的最优无功出力。其中设各风电机组的无功出力为粒子的位置变量，优化目标函数为算法的适应度。本文整个优化过程就是通过比较各粒子适应度值来比较个体最优解和群体最优解，直至找到全局最优解或达到最大迭代次数为止。

在计算初期，输入风电场的结构和电气参数，初始化粒子群算法。在无功可用范围内随机得到 N 个风机的无功功率，即生成一个含 D 个 N 维行向量的矩阵 $X = [Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{1N}; Q_{21}, Q_{22}, \dots, Q_{2N}; \dots, Q_{D1}, Q_{D2}, \dots, Q_{DN}]$ ，将其作为 D 个粒子初始位置，并生成 D 个粒子初始速度 $V_i (1 \leq i \leq D)$ 。

将生成的无功功率（即粒子的位置信息）代入潮流计算中，由此得到风电场各个节点的潮流信息。然后判断粒子是否处在约束范围内，若处在约束范围内，利用目标函数计算粒子的适应度值；若不处在约束范围内，则令目标函数值为最大值。

在完成适应度计算后，通过比较每个粒子迭代前后两次和各粒子之间的适应度值，得到最新个体最优值 P_{best} 和群体最优值 G_{best} ，判断是否达到迭代次数或满足收敛条件。若满足，则完成整个优化过程；若不满足，则对粒子的位置和速度

以及惯性因子进行更新，并返回重新计算。具体优化流程如图3所示。

$$D = \frac{2}{|2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}|} \quad (14)$$

$$v_{iN}^{(t+1)} = D \left[\omega v_{iN}^t + c_1 r_1 (P_{bestiN}^t - x_{iN}^t) + c_2 r_2 (G_{bestiN}^t - x_{iN}^t) \right] \quad (15)$$

$$\omega^{(t)} = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})t}{t_{\max}} \quad (16)$$

为消除学习因子数值大小对算法性能的影响，粒子的更新方程为式(15)，使得改进算法更方便对学习因子参数进行调试，得到最佳的优化性能。

由于粒子群算法的机制是针对连续空间设置的，在求解连续性较差的问题时性能受限，因此

引入一定的单点变异概率表示为

$$P_M(t) = 1 - w(t) \quad (17)$$

具体的变异策略可以根据求解问题进行设计，本文选择与对比的遗传算法相同的单点变异算子作为变异策略。设某粒子的位置为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。

变异后的粒子表示为

$$X_{Rand1} = LB_{Rand1} + Rand(UB_{Rand1} - LB_{Rand1}) \quad (18)$$

式中， i 为粒子群中的第 i 个粒子； N 为粒子的第 N 维； t 为迭代次数； v_{iN}^t 、 x_{iN}^t 为第 i 个粒子在 t 次迭代时的速度和位置； ω 为惯性权重； c_1 、 c_2 为学习因子，是两个常数值； r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间随机数； P_{bestiN}^t 、 G_{bestiN}^t 为个体最优值和群体最优值。 $Rand1$ 为随机下标； $Rand$ 为 $0 \sim 1$ 随机数； UB 、 LB 为上限向量和下限向量。

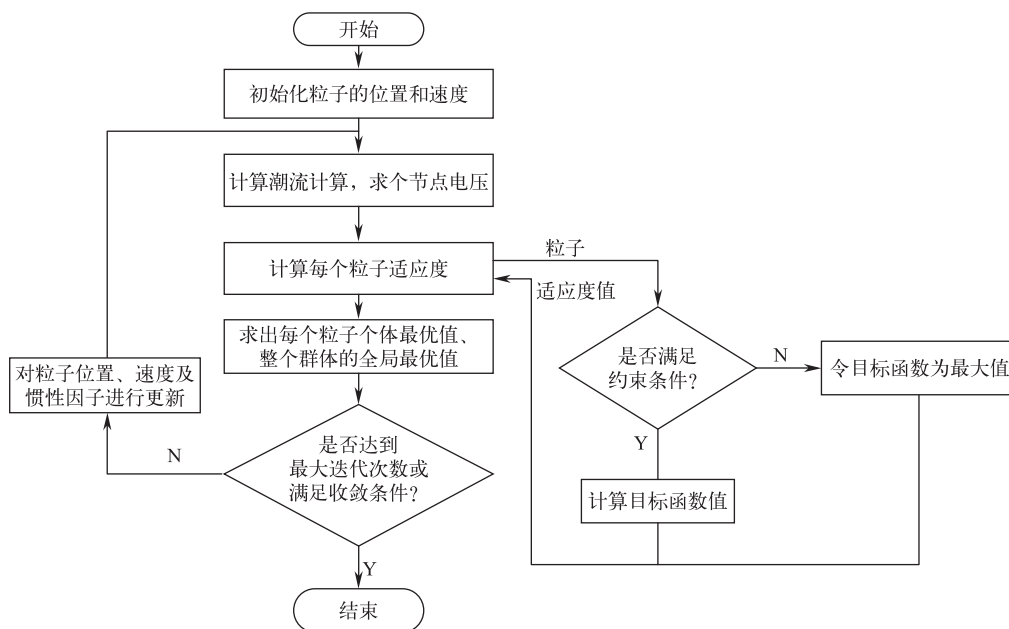


图3 基于粒子群优化算法的风电场无功优化流程

Fig. 3 Reactive power optimization process of wind farm based on particle swarm optimization algorithm

3 算例分析

以一个48 MW的风电场模型为例，有24台双馈风机，接线方式采用一机一变的单元接线。风电场含1~4四条馈线，每条馈线带有6台2 MW的双馈风机。风机出口电压690 V，经箱式变压器，再通过集电线将电能汇入35 kV母线

中，经过主变压器接至110 kV电网。其中风机箱式变压器的空载损耗为4.45 kW，空载电流为0.7%，短路阻抗为6%。算例的简化风电场系统接线如图4所示。

为比较不同分配策略的控制效果，并验证本文所提风电场集群层无功优化分配策略的有效性，采用两种分配方式进行效果对比。

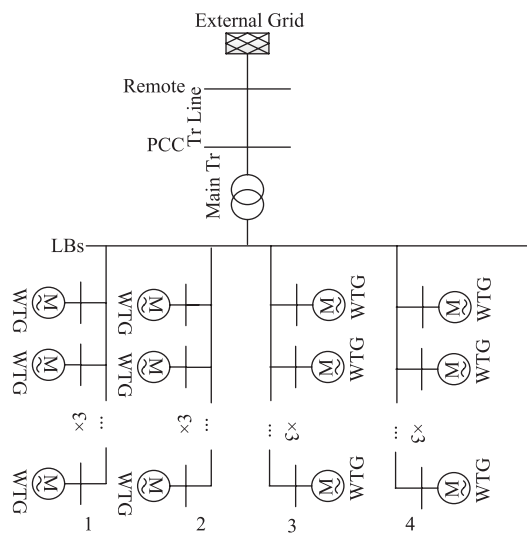


图4 风电场系统接线图
Fig.4 Wind farm system wiring diagram

(1) 比例分配策略

没有考虑线路损耗的情况，依据总的无功需求平均分配给各个风机。

(3) 本文优化控制策略

以风机无功极限为变量约束，利用改进粒子群优化算法求解系统线路有功损耗最小，优化场内电压的最优无功分配方案。

不考虑地理位置和风机尾流的影响，即各风机同一时刻有功输出相同。设有功率为1.5 MW时，考虑风电场内设备无功损耗和风电场接入电网技术规定，风电场总无功需求设为有功功率的10%，即3.6 Mvar进行无功分配验证。

利用粒子群优化算法将总无功需求分配给风机，如图5所示。网损随迭代次数变化情况如图6所示。采用不同的算法进行求解，粒子参数设置见表1。

由图5中可以看出，距离主变压器较近的馈线所串联的机组发出的总无功功率较多，而对于主变压器较远的馈线所串联的机组发出的总无功功率较少。同一馈线所连机组发出的无功功率也是基本上随着远离并网点逐渐减少，由此可以看出无功功率在风电场内部长输电线路输送增加有功网损。因此，尽量减少无功功率在线路上的传输，即让靠近并网点的风电机组分担更多的无功功率，以减小风电场的有功损耗。图6中GPSO

为改进算法，通过与普通粒子群算法对比，说明改进部分使算法中的群体具有了变异能力，有效地保持了种群多样性，减小了陷入局部最优的概率，使改进的粒子群算法的收敛速度优于普通粒子群算法。

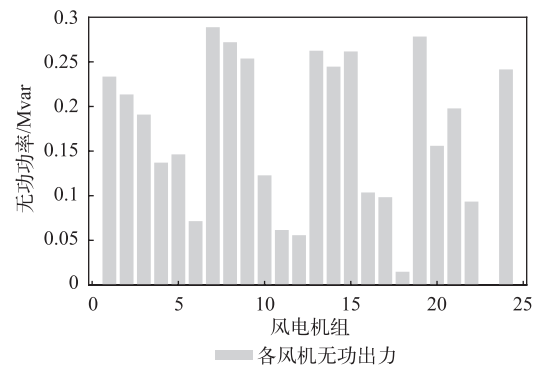


图5 优化得到的风机无功出力
Fig. 5 The optimal reactive power output of the fan is obtained

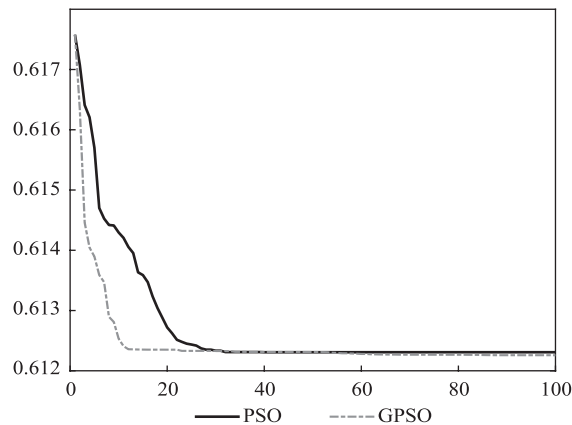


图6 迭代次数

Fig. 6 Iterations

表1 优化参数

Tab. 1 Optimize parameters

参数	数值
节点电压最小幅值 (pu)	0.95
节点电压最大幅值 (pu)	1.05
粒子数	50
惯性因子	0.95~0.4 线性递减
加速常数 c_1 和 c_2	1.5 和 1.5
粒子速度范围	0.25~5
迭代次数	100

风电场的电压情况如图7所示。本文所提出的优化方法可以减少风电场内各节点电压波动，

提升电压质量。

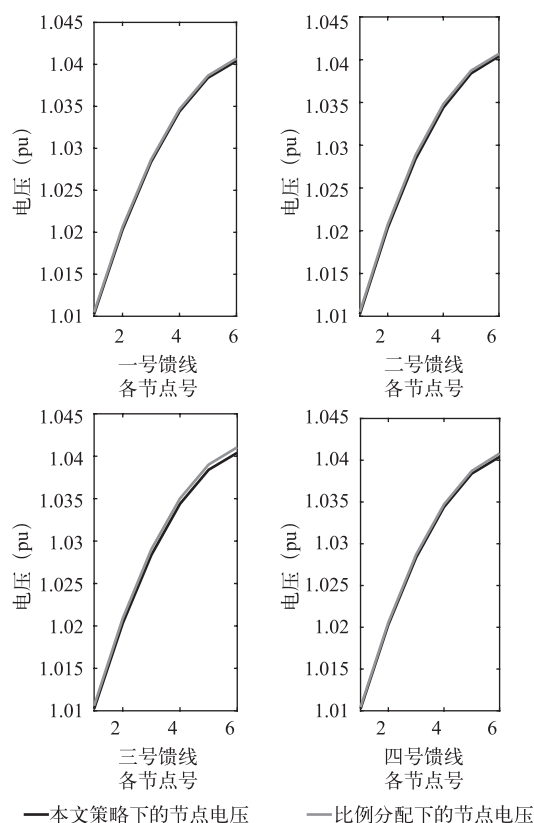


图7 系统节点电压曲线

Fig.7 Voltage curve of system nodes

系统网损方面,在给定无功需求3.6 Mvar时,在无功比例分配情况下的系统网损是0.622 3 MW,采用本文优化方法后的系统网损是0.611 2 MW,网损情况相较比例分配优化了1.7%。为更好体现优化效果,将无功功率需求改为总有功功率的5%和20%,优化效果分别为1.2%和2%。不同无功功率总量的系统网损见表2。

表2 不同无功功率总量的系统网损

Tab. 2 System network loss with different reactive power amounts

无功功率需求总量 /Mvar	优化前线路损 耗 / MW	优化后的线路 损耗 / MW	优化效果 (%)
3.6	0.622 3	0.611 2	1.7
1.8	0.613 3	0.606 2	1.2
7.2	0.656 9	0.643 8	2

以上可以看出机组的无功功率输出变化会影响风电场有功损耗,所以风电场应在不超过风电机组无功发生极限的情况下,合理优化各机组的

无功出力,在减小系统网损的同时,又能提高风电场节点电压质量,从而减少额外无功补偿设备的投入。

4 结束语

本文提出了一种基于风电机组无功评估的风电场无功优化方法,在考虑风电机组无功裕度情况下,采用一种以风电场系统网损最小为目标的改进粒子群优化方法,实现各个机组无功功率合理分配。算例分析表明:采用本文的优化方法,在电压优化方面,通过优化各风机的无功分配,越远离并网点的节点电压优化效果越明显,减少电压波动,提高电压质量;在系统网损方面,使风电场网损减少了1%~2%,提高了风电场运行的安全性和经济性。

参考文献

- [1] 殷桂梁,马会艳,陈学琴.电网电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4):84-88.
- [2] 刘其辉,毛未,高瑜.提升无功调节能力的双馈式风力电机转速变模式控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(9):85-92.
- [3] 刘颖明,刘闯闯,王晓东.基于风电机组无功裕度预测的风电场无功分层控制策略[J].可再生能源,2021,39(3):380-387.
- [4] 张佳琪.考虑双馈风电场无功调节能力的无功电压协调控制研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [5] 殷桂梁,马会艳,陈学琴.电网电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4):84-88.
- [6] 李生虎,章怡帆,蒋以天,等.基于双馈多风电场损耗和无功裕度的优化下垂控制策略[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):64-69.
- [7] 盛四清,陈安.双馈风电场新型无功电压控制策略研究[J].分布式能源,2017,2(2):39-43.
- [8] 魏俊红,张艳军,邢作霞,等.基于自适应遗传

- 算法的分散式风电场多目标无功优化[J]. 东北电力技术, 2016, 37(3): 1-6.
- [9] 李丽霞, 姚兴佳, 王晓东, 等. 双馈风电场新型无功优化分配策略研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1397-1404.
- [10] 程晓磊. 基于风机无功支持能力的风电场无功控制策略研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [11] ZHANG F , LI P C , GAO L , et al. Application of autoregressive dynamic adaptive (ARDA) model in real-time wind power forecasting[J]. Renewable Energy, 2021, 169(11): 129-143.
- [12] 蔡游明, 李征, 蔡旭. 以并网点电压和机端电压平稳性为目标的风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 166-173.
- [13] 符杨, 潘翔龙, 黄玲玲. 考虑双馈机组无功调节能力的海上风电场无功优化[J]. 电网技术, 2014, 38 (8): 2168-2173.
- [14] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4761-4769.
- [15] 风电场接入电力系统技术规定 第1部分陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S].

作者简介

李泽宽 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电场无功优化控制。

张飞 (1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电系统优化控制。

任晓颖 (1978—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电技术。

(收稿日期: 2022-12-19)