

电力市场下含风电场电力系统动态无功成本优化研究



鲁改凤, 欧钰雷*, 姜耀鹏, 张 帅, 贺佳琳

(华北水利水电大学电力学院 郑州 450045)

【摘要】在电力市场逐步完善的背景下,为无功调压设备制定计价原则,可以平衡发电企业和供电公司的利益并降低无功补偿成本。首先考虑双馈风机与同步电机的P-Q特性建立发电机无功计价模型,提出了一种在风速波动下的双馈风机无功分段计价策略,建立了以发电机无功成本、离散变量动作折旧价格、有功网损折合成本和节点电压总偏差为目标函数的动态无功优化模型。采用改进杂交粒子群算法对所建立动态无功优化模型进行求解,提高了全局寻优能力和收敛速度。最后以IEEE30节点为例,用MATLAB软件进行了仿真分析,验证了所提出的模型、策略和算法的有效性。

关键词 双馈风机; P-Q特性; 无功优化; 无功成本; 改进杂交粒子群算法
中图分类号 TM731 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019109

Research on Dynamic Reactive Cost Optimization of Power System Containing Wind Farms in Electricity Market

LU Gai-feng, OU Yu-lei*, JIANG Yao-peng, ZHANG Shuai, and HE Jia-lin

(School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power Zhengzhou 450045)

Abstract In the context of the gradual improvement of the electricity market, formulating pricing principle for reactive voltage regulating equipment can balance the profits of power generation enterprise and power supply companies and reduce the cost of reactive power. By considering the P-Q characteristics of DFIG and synchronous motor, a generator reactive power pricing model is established, and a DFIG reactive power segment pricing strategy in case of wind speed fluctuation is proposed. A dynamic reactive power optimization model for power system with wind farm is established, whose objective function are generator reactive power cost, discrete variable action depreciation price, active power network loss combined cost and total node voltage deviation. A new improved HPSO algorithm is proposed to solve the dynamic reactive power optimization model, which improves the global optimization ability and convergence speed. Finally, the IEEE30 node is taken as an example to analyze the effectiveness of the proposed model, strategy and algorithm is verified with simulation on MATLAB.

Key words DFIG; P-Q characteristics; reactive power optimization; reactive power cost; improved HPSO algorithm

风能有着间歇性、波动性的特点,风电场的并网对电力系统会造成冲击并增加系统网损,无功成本随之提高^[1],这对含风电场电力系统无功优化带来了新的挑战。

传统无功优化通过对同步发电机机端电压、分组投切电容器容量、有载调压变压器档位等无功调压装置的控制,达到降低网损和稳定节点电压的目的^[2]。双馈感应风力发电机(double fed induction generator, DFIG)是当前主流风力发电机型,它具

有有功功率、无功功率可独立控制的优点,且风能的低功率密度的特性使机组绝大部分时间在轻载工况下运行,根据DFIG的无功特性,轻载工况下DFIG具有一定的无功潜力^[3-4]。文献[5]在考虑DFIG无功调节能力的情况下,以DFIG无功出力为控制变量建立了含风电场的配电网无功优化模型并求解,有效降低了网损并稳定了节点电压。文献[6]提出了一种改进的差分进化算法对无功优化模型进行了求解,得到了较好的结果。文献[7]提

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-09-24

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(192102210229)

作者简介: 鲁改凤(1968-),女,教授,主要从事电力系统安全运行与保护等方面的研究。

通信作者: 欧钰雷, E-mail: yuleiou@163.com

出了一种 DFIG 无功分配策略,不仅考虑到集电线路,还考虑到了风力机内能量转换系统的损耗。以上文献都直接以网损和节点电压稳定性等传统指标为目标函数,均未考虑到无功成本。

在电力市场逐步完善的背景下,我国实行厂网分离,各发电厂隶属于不同的发电企业,企业为减少运营成本,不愿让机组因增发无功功率而影响机组寿命或有功输出能力。发电企业直接减少无功输出将会给电网带来经济损失和不稳定风险。为避免因发电厂减少无功输出所造成的损失,应兼顾电网公司和发电企业的利益,由电网公司补偿发电企业因机组发出无功所带来的损失。

本文在文献 [8] 建立的同步发电机模型的基础上分析了考虑风速波动的 DFIG 计价模型,在电力市场下以有功网损价格最低、无功购买费用最小、离散设备动作折旧费用最低和节点电压总偏差最小为目标函数,建立了含风电场的电力系统动态无功优化模型,并提出了一种风速波动下的分段无功计价策略。利用改进的杂交粒子群算法对所提出的动态无功优化模型进行求解。最后以 IEEE30 节点为例,验证了本文提出模型和算法的有效性和合理性。

1 发电机的无功计价模型

电网公司在潮流计算和无功优化时将发电企业发出的无功功率进行重新分配,由于给发电机组分配过多无功输出对机组寿命和有功输出能力有影响,这将会提高发电企业的发电成本。电网公司应从技术层面出发减少对成本影响过大的无功分配。

1.1 同步电机无功计价模型

根据文献 [8] 建立的同步电机数学模型,得到同步电机的 P-Q 特性图如图 1,其中 GBDF 区域为运行区域,将同步电机运行区域按照计价原则分为 3 个区域:

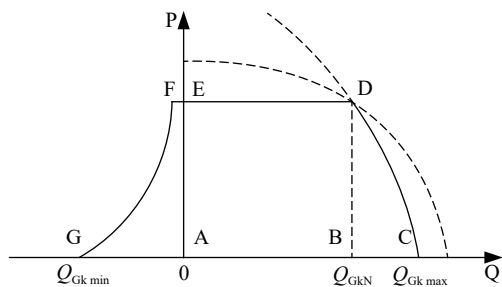


图 1 同步发电机 P-Q 特性图

区域 1: AEFB 区域,即从电网吸收无功时,

最大有功出力随吸收的无功功率增大而减少,随定子铁芯温度的发热,机组寿命将会下降。

区域 2: ABDE 区域,发出无功功率会使电流增大,加快绝缘老化速度,进而增加运行维护费用,但此时发出无功对发电成本影响较小。

区域 3: BCD 区域,最大有功出力随着发出的无功增加而减少,并造成功率因数降低。

电网公司应向发电企业支付的无功损失为:

$$f_{Q_{Gm}} = \begin{cases} \lambda_1 |Q_{Gk}| & Q_{Gk} \in [Q_{Gkmin}, 0) \\ \lambda_2 Q_{Gk} & Q_{Gk} \in [0, Q_{GkN}] \\ \lambda_2 Q_{Gk} + \lambda_{loss} \Delta P_G & Q_{Gk} \in (Q_{GkN}, Q_{Gkmax}] \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ_1 、 λ_2 分别为区域 1 和区域 2 的同步电机边际无功价格; λ_{loss} 为有功功率边际价格; Q_{Gk} 为同步电机受电网调度输出无功功率; Q_{Gkmin} 和 Q_{Gkmax} 为同步电机可发出无功的最小和最大值; ΔP_G 为同步电机因增发无功而减少的有功输出; Q_{GkN} 为发电机额定无功输出。

1.2 DFIG 无功计价模型

DFIG 输出有功功率和无功功率运行范围受定子绕组最大电流 I_{Smax} 和转子侧变换器最大电流 I_{Rmax} 限制,可表示为^[9]:

$$\begin{cases} \left(\frac{P_T}{1-s} \right)^2 + \left(Q_T + 3 \frac{U_S^2}{X_S} \right)^2 = \left(3 \frac{X_M}{X_S} U_S I_R \right)^2 \\ \left(\frac{P_T}{1-s} \right)^2 + Q_T^2 = (3 U_S I_S)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_T 与 Q_T 为 DFIG 有功输出和无功输出; s 为转差率; U_S 为定子侧电压; X_S 与 X_M 分别为定子漏抗和励磁电抗; I_S 为定子绕组电流; I_R 为转子侧变换器电流。

根据某 1.5 MW DFIG 电气参数^[5],考虑 DFIG 的静态稳定极限^[10],得到 DFIG 的 P-Q 特性图如图 2,图中阴影部分为 DFIG 运行区域。

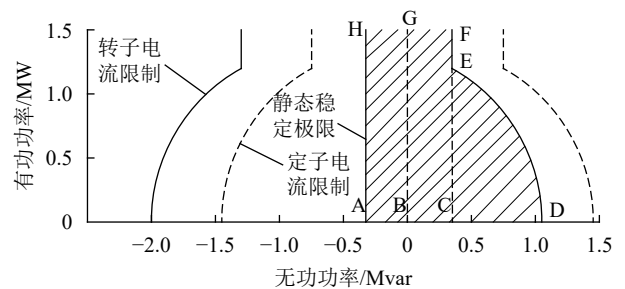


图 2 1.5 MW DFIG P-Q 曲线图

与同步电机相似,DFIG 无功计价分为 3 个区域:区域 ABGH、区域 BCFG、区域 CDE,下称

区域 4、区域 5、区域 6。

电网公司应向发电企业支付的无功损失为：

$$f_{\text{QDm}} = \begin{cases} k_1 |Q_T| & P_T \text{与} Q_T \in \text{区域4} \\ k_2 Q_T & P_T \text{与} Q_T \in \text{区域5} \\ k_2 Q_T + \lambda_{\text{loss}} \Delta P_D & P_T \text{与} Q_T \in \text{区域6} \end{cases} \quad (3)$$

式中， k_1 与 k_2 分别为区域 1 与区域 2 的 DFIG 边际无功价格； ΔP_D 为 DFIG 因增发无功而减少的有功输出。

1.3 风速波动下 DFIG 无功计价模型

动态无功优化模型对 24 小时风速分段，同一时段内风速会实时波动，DFIG 的 P_T 与 Q_T 可能在某段内某些区域因无功输出分配过大而减少有功输出。

设在某段风速下有 n 个 DFIG 减少有功输出区域，某 DFIG 有功输出减少区域如图 3 中阴影部分所示。设 DFIG 在阴影部分内运行时的平均有功输出为 P_m ； P_N 为 DFIG 有功输出未因无功输出过大而减小时的平均有功输出。

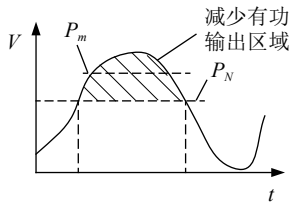


图 3 某段风速下 DFIG 减少有功输出区域

在有功输出减少区域运行时，总有功减少量为：

$$\Delta W_D = \sum_{m=1}^n (P_N - P_m) t_m \quad (4)$$

在某段风速内的无功价格为：

$$f_{\text{QD}} = k_2 Q_T t + \lambda_{\text{loss}} \Delta W_D \quad (5)$$

式中， t_m 对应风机在该段风速下第 m 段减少有功输出的运行时间； t 为在本段风速下运行的总时间。

2 含风电场的电力系统动态无功优化模型

离散无功调压设备的动作不但会影响离散设备的寿命，还会对电力系统造成冲击^[11]，除考虑发电机无功购买费用最低、有功网损价格最低、节点电压总偏差最小外，还考虑了离散变量动作折旧费用最低构建目标函数。以同步电机机端电压、DFIG 机组无功出力、有载调压变压器档位、分组投切电容器投切容量为控制变量，建立了动态无功优化模型。

2.1 风功率曲线分段计价策略

由于风能的随机性和波动性，将风速进行分段可减少离散变量动作次数。将风电场作为一个负的波动负荷，并借鉴负荷分段^[12]的方法将风功率曲线进行分段，风功率分段模型采用 Top-Down 算法^[13]进行求解。

分段使各段间风电出力平均值离散性最大而各段内风电出力离散性最小，数学模型如式：

$$\begin{cases} F_1 = \max \sum_{i=1}^N (P_i - P)^2 \\ F_2 = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} (P_{ij} - P_i)^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中， N 为风速分段数； K_i 为第 i 段预测点个数； P 为风电 24 小时 288 点预测风速平均值； P_i 为第 i 段风速平均值； P_{ij} 为第 i 段风速的第 j 点的值。

为避免每段风速内风机因无功输出分配过大而减少有功输出，在计算每段内风电机组有功输出减少量 ΔW_D 时，将段内风功率最大点代替风功率平均值，在避免减少机组有功功率输出的同时可在一定程度上增加风电机组的无功裕度。

即当每台风电机组无功输出满足：

$$Q_{\text{DFIG}} > \sqrt{\left(3 \frac{X_M}{X_S} U_S I_{R \max}\right)^2 - \left(\frac{P_{T \max}}{1-s}\right)^2} \quad (7)$$

计算每台 DFIG 机组减少的有功功率为：

$$\Delta P_{\text{Di}} = (1-s) \sqrt{\left(3 \frac{X_M}{X_S} U_S I_{R \max}\right)^2 - \left(Q_{\text{DFIG}} + 3 \frac{U_S^2}{X_S}\right)^2} \quad (8)$$

式中， $P_{T \max}$ 为每台机组本段风速下不减少有功输出时有功输出的最大值； $I_{R \max}$ 为转子侧电流最大值。

2.2 目标函数

以发电机无功购买费用最低、有功网损价格最低、离散设备动作折旧费用最低、节点电压总偏差最小，构造多目标函数：

$$\begin{cases} f_1 = \min (\lambda_{\text{loss}} P_{\text{loss}} + \sum f_{\text{QD}} + \sum f_{\text{QG}} + \sum f_{\text{Cq}}) \\ f_2 = \min \sum_{j=1}^n |U_j - 1| \end{cases} \quad (9)$$

式中， P_{loss} 为有功网损； f_{QD} 、 f_{QG} 和 f_{Cq} 分别为同步电机无功价格、DFIG 机组无功价格、离散设备动作折旧费用； U_j 为节点 j 的电压。

将目标函数归一化^[14]后最终的目标函数为：

$$F_1 = a_1 f_1^* + a_2 f_2^* \quad (10)$$

式中, f_1^* 与 f_2^* 为归一化后的目标函数; a_1 与 a_2 为根据层次分析法^[15]计算的目标函数权重。

2.3 约束条件

等式功率约束条件:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + P_{Li} \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + Q_{Li} \end{cases} \quad (11)$$

式中, P_i 与 Q_i 、 P_{Li} 与 Q_{Li} 分别为注入节点 i 的有功功率和无功率、节点 i 的有功负荷和无功负荷; G_{ij} 和 B_{ij} 分别是节点 i 、 j 之间的电导与电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电压相角差。

不等式约束条件为:

$$\begin{cases} P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \\ Q_{gimin} \leq Q_{gi} \leq Q_{gimax} \\ U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \\ P_{wfmin} \leq P_{wf} \leq P_{wfmax} \\ Q_{wfmin} \leq Q_{wf} \leq Q_{wfmax} \\ Q_{Cimin} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Cimax} \\ \sum_{t=1}^T C_i(t) \oplus C_i(t-1) \leq n_{cmax} \\ T_{imin} \leq T_i \leq T_{imax} \\ \sum_{t=1}^T T_i(t) \oplus T_i(t-1) \leq n_{tmax} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_{gimin} 与 P_{gimax} 和 Q_{gimax} 与 Q_{gimin} 分别为第 i 台同步电机有功出力下限与上限、无功出力上下限; U_{imax} 和 U_{imin} 分别为第 i 个节点电压的上下限; P_{wfmax} 与 P_{wfmin} 和 Q_{wfmax} 与 Q_{wfmin} 分别为风电场有功出力上下限和无功出力上下限; Q_{Cimax} 和 Q_{Cimin} 分别为第 i 组并联电容器投入组数的上下限; T_{imax} 和 T_{imin} 分别为第 i 台变压器分接头位置上限与下限; $C_i(t)$ 和 $C_i(t-1)$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻第 i 组电容器的接入容量; $T_i(t)$ 和 $T_i(t-1)$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻第 i 个变压器的档位; n_{cmax} 和 n_{tmax} 为一天内电容器组的最大投切次数和变压器档位最大动作次数。

3 求解算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[16]具有易陷入局部最优、难以处理不同类型变量和易早熟等缺点, 本文对基本 PSO 算法做了以下改进:

1) 无功优化中不同类型变量的约束条件和变化范围不同, 在不同维度下采用相同权重难以兼顾不同维度下粒子惯性分量。在不同维度下采用不同的惯性权重, 并用线性递减权重代替固定权重。

不同维度下线性递减权重公式如下:

$$\omega_d = \omega_{dmax} - \frac{t(\omega_{dmax} - \omega_{dmin})}{t_{dmax}} \quad (13)$$

式中, d 为变量类型; ω_{dmin} 与 ω_{dmax} 为权重最小值和最大值; t 为当前迭代次数。

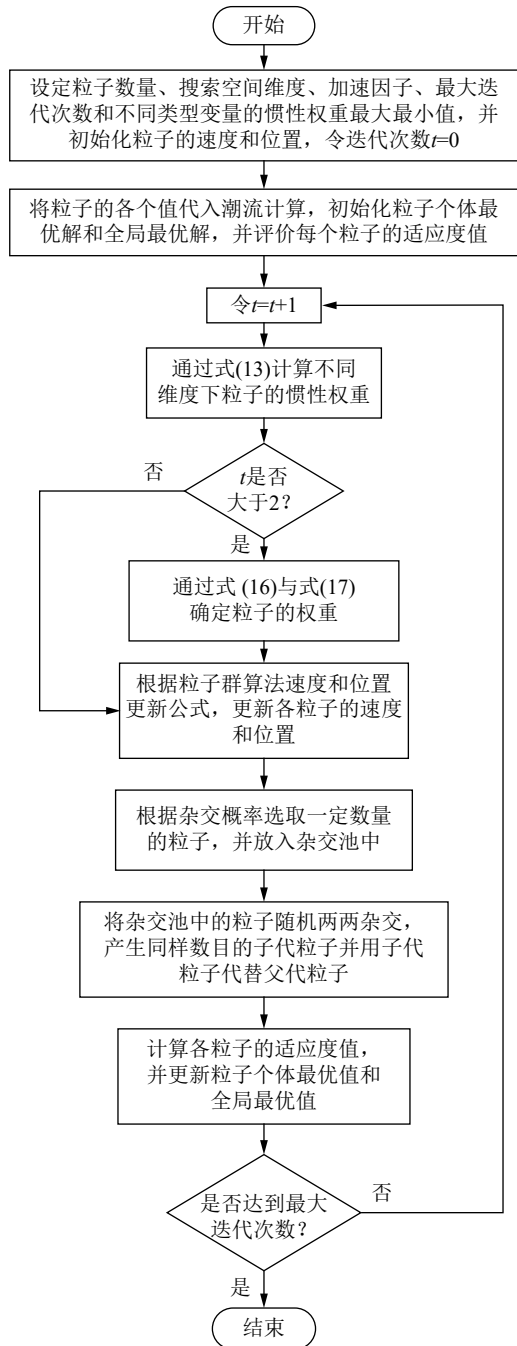


图 4 改进 HPSO 算法流程图

2) 在迭代过程中, 依照杂交概率在杂交池中设置一定数量的粒子, 并在杂交池内让所设置的粒子两两随机进行杂交, 杂交过后产生与父代粒子数量相同的子代粒子, 并用子代粒子代替父代粒子。

子代粒子的位置:

$$nx = imx(1) + (1 - i)mx(2) \quad (14)$$

子代粒子的速度:

$$nv = \frac{mv(1) + mv(2)}{|mv(1) + mv(2)|} |mv| \quad (15)$$

式中, mx 表示父代粒子的位置; i 为 $0 \sim 1$ 之间的均匀随机数; mv 表示父代粒子的速度。

3) 为改进迭代中前轮迭代适应度值变差的粒子惯性分量引导粒子向适应度变差的方向运动, 提出当上一轮迭代粒子适应度大于本轮迭代粒子适应度时, 设置该粒子惯性权重为 0, 其余粒子惯性权重线性递减, 即:

$$\omega_i^t = \begin{cases} \omega_i^t & \delta f(x_i^t) \geq 0 \\ 0 & \delta f(x_i^t) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\delta f(x_i^t) = f(x_i^t) - f(x_i^{t-1}) \quad (17)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$, $t \geq 2$; $\delta f(x_i^t)$ 为粒子两次迭代适应度的差值; $f(x_i^t)$ 为粒子 i 在第 t 次迭代后的适应度值; ω_i^t 为粒子 i 在第 t 次迭代的惯性权重。

改进 HPSO 算法流程图如图 4。

4 算例分析

在 Matlab 平台上利用 Matpower 软件进行潮流计算, 利用 IEEE30 节点系统来验证所提出策略与算法的有效性, 详细系统参数见文献 [17]。其中, 所有变压器均为有载调压变压器, 可调节档位为 ± 6 档, 调节变比为 1%; 在节点 26、29、30 处均接入分组投切并联电容器 10 组, 每组容量 1Mvar。节点 7 接入由 50 台 1.5M 双馈风机组成的风电场, DFIG 具体参数见文献 [5], 风电场不考虑尾流效应和因机组地理位置不同而造成的风速差异。

发电机运行区域见表 1; 根据参考文献 [8, 18] 边际无功价格数据制定边际无功价格见表 2; 改进 HPSO 算法参数见表 3。有功边际电价 λ_{loss} 为 200 元/(MW·h), 分组投切电容器与有载调压变压器折旧费用分别为 30 元/档和 40 元/档。

按照文中风功率分段方法对某风电场 24 小时每 5 分钟取一个点, 共 288 点, 风功率预测图分段为 6 段, 如图 5 所示。

表 1 发电机运行区域

节点	区域1/Mvar	区域2/Mvar	区域3/Mvar
1	(-13.3, 0)	(0, 75)	(75, 100)
2、5、8	(-10, 0)	(0, 27)	(27, 36)
11、13	(-7, 0)	(0, 18)	(18, 24)
7	(-12.4, 0)	(24.7, 0)	(24.7, 64.3)

表 2 发电机边际无功价格

节点编号	λ_1 或 k_1 元/Mvar	λ_2 或 k_2 元/Mvar
1	57.5	17.5
2、5、8、11、13	50	12.5
7	100	10

表 3 改进 HPSO 算法参数

参数	数值
粒子数量	20
最大迭代次数	50
关于电容器投切的权重的最大值	0.6
关于电容器投切的权重的最小值	0.25
关于风电场无功出力的权重的最大值	0.7
关于风电场无功出力的权重的最小值	0.05
关于PV节点电压和变压器分接头的权重的最大值	0.15
关于PV节点电压和变压器分接头的权重的最小值	0.05
学习因子 c_1 、 c_2	2、2
杂交池的大小比例	0.8
杂交概率	0.2

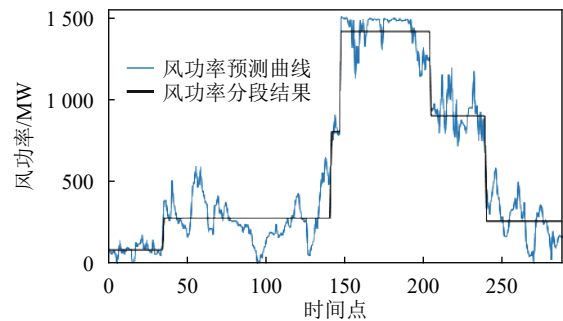


图 5 风功率预测曲线及分段

首先对时段 1 以网损最小和节点电压总偏差最小为目标函数进行无功优化求解, 确定离散设备初始档位。时段 2 至时段 6 分别对目标函数 1: 网损最小、节点电压总偏差最小; 目标函数 2: 发电机无功成本最小、网损成本最小、节点电压总偏差最小; 目标函数 3: 发电机无功成本最小、离散设备折旧费用最低、网损成本最低、节点电压总偏差最小, 进行动态无功优化求解, 并在对目标函数 3 进行求解时考虑本文提出的段内计价策略。

时段 5 的发电机无功出力如表 4 所示, 据表 4 可知无功计价后目标函数 2 与目标函数 3 对无功成本更低的节点处分配了更多的无功, 且没有分配发

电机运行在成本较高的吸收无功运行方式。时段 5 的风功率平均值和最大值分别为 45.27 MW 和 60.01 MW, 对应不降低有功输出的无功输出最大值分别为 48.35 Mvar 和 32.65 Mvar, 考虑所提出计价策略的目标函数 3 与目标函数 2 相比在节点 7 处分配了更少的无功, 在风速波动下有效避免了因输出无功功率过多而减少有功输出 0.375 MWh。

表 4 发电机无功出力对比

节点	目标函数1发电机 无功输出/Mvar	目标函数2发电机 无功输出/Mvar	目标函数3发电机 无功输出/Mvar
1	22.40	0.00	0.00
2	-1.67	8.14	6.24
5	19.18	0.02	0.73
7	8.58	38.32	30.74
8	35.08	4.07	16.33
11	1.02	4.26	1.49
13	-6.64	0.11	8.08

在时间段 1 由目标函数 1 确定电容器初始档位, 时间段 2 至时间段 6 的电容器档位对比如表 5 所示, 每个时间段的仿真计算初始值取前一时间段仿真计算的结果, C1、C2、C3 分别对应节点 26、29、30 的电容器档位。变压器档位动作数对比如图 6 所示。由表 5 与图 6 可知目标函数 1 离散变量动作次数较多; 目标函数 2 在电容器上分配过多的无功功率, 电容器总是处于较高档位处, 降低了系统的无功裕度, 不利于系统稳定。目标函数 3 在时间较长的时段分配给电容器档位的变化次数更多得到了更低的无功成本, 离散设备动作次数更少, 电容器档位更适中。目标函数 3 的电容器动作次数比目标函数 1 和目标函数 2 分别降低了 43.75% 和 60.87%; 目标函数 3 的变压器档位动作数比目标函数 1 和目标函数 2 分别降低了 60.54% 和 60.32%。

表 5 电容器档位对比

时间段	目标函数1电容器 档位C1、C2、C3	目标函数2电容器 档位C1、C2、C3	目标函数3电容器 档位C1、C2、C3
1	3、2、5	—	—
2	5、2、5	5、10、10	5、5、6
3	3、4、5	7、9、9	5、5、5
4	4、3、5	7、10、9	5、5、6
5	3、0、3	7、10、9	5、5、6
6	4、1、4	7、7、9	4、5、6

图 7 与图 8 分别为有功网损对比和无功成本对比。由图 6 与图 7 可知, 目标函数 1 网损最低, 无功成本最高; 目标函数 2 网损最高, 无功成本低于

目标函数 1; 目标函数 3 网损比目标函数 1 略高, 且无功成本最低。单位时间内, 目标函数 3 的无功成本为 1 183.4 元/h 比目标函数 1 的 1 763.8 元/h 降低了 32.91%, 比目标函数 2 的 1 240.6 元/h 降低了 4.61%。

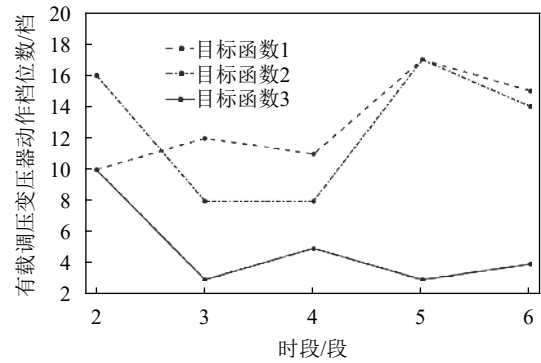


图 6 变压器档位动作数对比

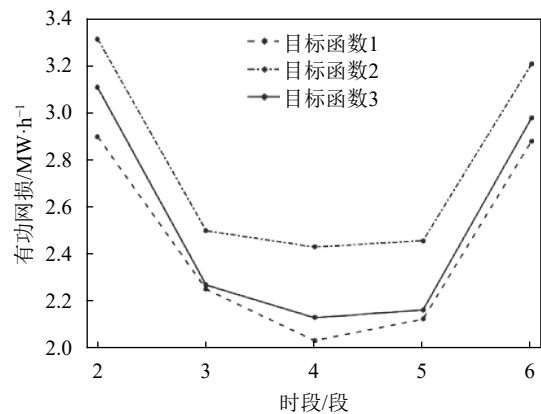


图 7 有功网损对比

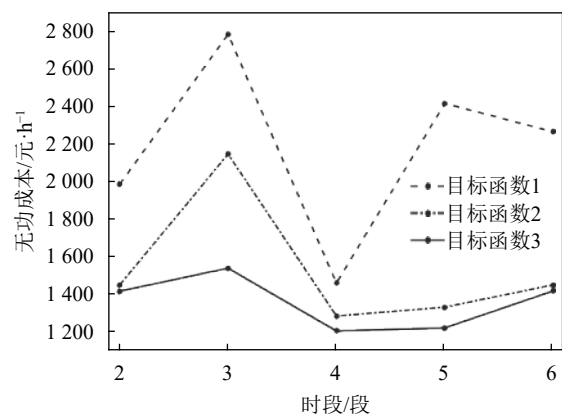


图 8 无功成本对比

以时段 2 为例, 分别用改进 HPSO 算法与基本 PSO 算法对所建立模型求解, 迭代图如图 9。由图 9 可见, 改进 HPSO 算法比基本 PSO 算法收敛速度与全局寻优能力均有提升, 使用改进 HPSO 算法时的目标函数优化值比基本 PSO 算法降低了 4.07%。

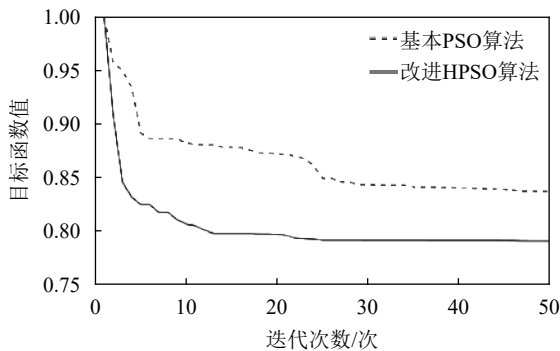


图 9 算法迭代图

5 结束语

本文在充分考虑无功成本的情况下建立了动态无功优化模型, 采用改进 HPSO 算法对所建立模型进行求解, 结果表明:

1) 与传统模型和静态无功成本优化模型相比, 所建立模型的求解能有效降低无功成本并减少离散设备动作次数, 并在时间较长的时段减少更多的无功成本。

2) 提出的风功率分段计价策略能有效避免因 DFIG 机组无功输出分配过多而引起的机组有功输出减少。

3) 使用改进 HPSO 算法求解所提出无功优化模型能有效提高收敛速度和全局搜索能力, 为无功优化问题提供了一种新的求解方法。

参 考 文 献

- [1] REZAEI F, ESMAEILI S. Decentralized reactive power control of distributed PV and wind power generation units using an optimized fuzzy-based method[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2017, 87: 27-42.
- [2] HUANG Jin-bo, LI Zhi-gang, WU Q H. Fully decentralized multiarea reactive power optimization considering practical regulation constraints of devices[J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 105: 351-364.
- [3] KANNA B, SINGH S N. Towards reactive power dispatch within a wind farm using hybrid PSO[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 69: 232-240.
- [4] WANG Ni, LI Jian, HU Wei-hao, et al. Optimal reactive power dispatch of a full-scale converter based wind farm considering loss minimization[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 292-301.
- [5] 赵晶晶, 符杨, 李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(11): 33-38. ZHAO Jin-jin, FU Yang, LI Dong-dong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(11): 33-38.
- [6] SUGANTHI S T, DEVARAJ D, RAMARC K, et al. An improved differential evolution algorithm for congestion management in the presence of wind turbine generators[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 635-642.
- [7] 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.

- LI Li-xia, YAO Xing-jia, WANG Xiao-dong, et al. An optimal reactive power dispatch strategy for interior-point method based wind farms[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(5): 1397-1404.
- [8] 黄志刚, 李林川, 杨理, 等. 电力市场环境下的无功优化模型及其求解方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003(12): 82-86. HUANG Zhi-gang, LI Lin-chuan, YANG Li, et al. The reactive power optimization model under power market and its solution[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2003(12): 82-86.
- [9] EL-SHIMYI M. Modeling and analysis of reactive power in grid-connected onshore and offshore DFIG-based wind farms[J]. *Wind Energy*, 2014, 17: 279-295.
- [10] SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, AMENEDO J L R. Reactive power capability of double fed asynchronous generators[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(11): 1837-1840.
- [11] SCHÖNLEBER K, COLLADOS C, PINTO R T, et al. Optimization-based reactive power control in HVDC-connected wind power plants[J]. *Renewable Energy*, 2017, 109: 500-509.
- [12] XU Lei, WANG Sheng-wei, TANG Rui. Probabilistic load forecasting for buildings considering weather forecasting uncertainty and uncertain peak load[J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 180-195.
- [13] 王达. 时间序列数据挖掘研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004. WANG Da. A study on time series data mining[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [14] 李闯, 陈民铀, 付昂, 等. 含风电场的配电网无功优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(9): 100-105. LI Chuang, CHEN Min-you, FU Ang, et al. Reactive power optimization strategy in distribution network with wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(9): 100-105.
- [15] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100. DENG Xue, LI Jia-ming, ZHENG Hao-jian, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100.
- [16] 敖永才, 师奕兵, 张伟, 等. 自适应惯性权重的改进粒子群算法[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 43(6): 874-880. AO Yong-cai, SHI Yi-bing, ZHANG Wei, et al. Improved particle swarm optimization with adaptive inertia weight[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(6): 874-880.
- [17] 何宣虎. 基于人工蜂群算法的最优潮流相关技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016. He Xuan-hu. Research on related technology of optimal power flow based on artificial colony algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [18] 何健, 范晓龙, 许高俊, 等. 电力市场下含风电的电网多目标无功优化[J]. *陕西电力*, 2017, 45(1): 11-16. HE Jian, FAN Xiao-long, XU Gao-jun, et al. Multi-object reactive power optimization of power grid with wind power in electricity market[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2017, 45(1): 11-16.