

文章编号: 1006-4710(2012)02-0183-06

基于改进 DPSO 的含风力发电的配电网无功优化规划

余健明, 高虎成, 田文博, 周波

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 研究了风力发电系统并网后配电网无功优化问题, 将年负荷持续曲线处理为五种负荷运行方式, 考虑风电机组输出功率的波动性, 以年电能损失费用与无功补偿设备的投资费用之和最小为目标函数, 以功率平衡、过补偿约束、电压合格、馈线电流约束为约束条件, 应用改进的离散粒子群算法(PSO-GA)优化并联电容器组的安装位置和容量。仿真结果证明了该优化策略的有效性及其经济性。

关键词: 风力发电; 并联电容器; 离散粒子群算法; 配电网

中图分类号: F830.5 **文献标志码:** A

Improved DPSO Based Reactive Power Planning in Distribution Networks with Wind Power Generation

YU Jianming, GAO Hucheng, TIAN Wenbo, ZHOU Bo

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Reactive power optimization problem in distribution system with wind power system is analyzed in this paper. The load duration curve is approximated with five load levels, considering wind power volatility. In the objective function, the sum of power losses cost and new adding shunt capacitor devices investment divided in each year are considered, and power balance, over compensation, satisfaction voltage quality are the constraints conditions. The improved discrete particle swarm algorithm (PSO-GA) is adopted to optimize placement and sizing of shunt capacitors. The simulation results indicate that method proposed for the optimization problem is effective and economical.

Key words: wind power system; shunt capacitor devices; DPSO; distribution system

目前配电网的无功优化问题在国内外得到广泛的研究, 分布式电源接入配网后对配电网电压及功率损耗有明显的影响^[1-4]。

现代社会对电力安全可靠性的依赖对减轻风力发电系统稳定运行的潜在影响很大, 因而风电接入配电网时需要对风电的波动性进行深入透彻地研究。

本研究在考虑风电波动性和五种负荷运行的方式下进行配电网无功优化规划。应用遗传算法中的交叉和变异操作改进离散粒子群算法(PSO-GA), 在预先设定目标函数的条件下优化并联电容器组的

安装位置和容量。

1 风电输出功率的波动性模型

1.1 风速分布模型

Spahic 等^[5]研究得出年风速近似于 Weibull 分布。Weibull 分布的两个参数为尺度参数 c 和形状参数 k 。Weibull 分布的概率密度函数 $f(x)$ 和分布函数 $F(x)$ 为:

$$f(x) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-(x/c)^k} \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - e^{-(x/c)^k} \quad (2)$$

收稿日期: 2011-11-16

作者简介: 余健明(1956-), 男, 广东台山人, 教授, 研究方向为电能质量、配电网自动化、电网优化规划。

E-mail: jianmingyu@xaut.edu.cn.

与正态分布^[6]相比近似服从 Weibull 分布的风速没有负值,这对于建模和模拟风速的随机性更加有利。本研究将双参数的 Weibull 分布应用到风力发电的建模中。

1.2 输出功率的波动性分析

文献[7]分析了风力发电机组输出功率和风速的关系,图1是原始数据^[8]。

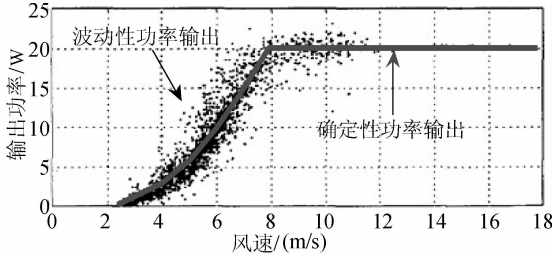


图1 文献[7]的风力发电机输出功率数据
Fig.1 Data for wind power outputs in ref. [7]

如图1所示,在给定风速下不同风力发电机的输出功率存在很大的差异。为适应风力发电机输出功率的波动性变化。文中假定当 $v_c \leq x \leq v_r$ 时输出功率下的标准差 σ_ε 是一个确定值。 σ_ε 在实际中是一个随风速变化的值,但该值相对于平均输出功率是一个较小的值。

基于以上的分析,风力发电机输出功率的概率模型为:

$$P_r(X, \varepsilon) = \begin{cases} 0 & X < v_c, X > v_s \\ cX^3 + \varepsilon & v_c \leq X \leq v_r \\ P_r & v_r \leq X \leq v_s \end{cases} \quad (3)$$

式中,输出功率的变化值 $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$; v_c, v_r, v_s 分别为风机切入风速、额定风速和切出风速; P_r 为风机额定输出功率; 功率曲线系数 $c = 0.5\eta_{\max}\rho A\theta$ 是空气密度; A 为风机叶片扫过的面积; η_{\max} 为风能利用系数。

从式(3)可见,当 $v_c \leq X \leq v_r$ 时风力发电机是一个由风速 X 和输出功率的偏差 ε 决定的随机输出功率值。 X 和 ε 都是一个随机数。综合以上的分析可得出输出功率的期望值,计算式为:

$$E[P_r(X, \varepsilon)] = c \int_{v_c}^{v_r} x^3 f(x) dx + P_r(F(v_s) - F(v_r)) \varepsilon \quad (4)$$

式中, $f(x)$ 为风速概率密度函数, $F(x)$ 为风速分布函数。

利用式(5)求得概率性曲线的二阶矩为:

$$E[P_r^2(X, \varepsilon)] = c^2 \int_{v_c}^{v_r} x^6 f(x) dx + \sigma_\varepsilon^2 (F(v_r) - F(v_c)) \varepsilon + P_r^2 (F(v_s) - F(v_r)) \quad (5)$$

得出概率性功率曲线的方差为:

$$\text{var}(P_r(X, \varepsilon)) = E[P_r^2(X, \varepsilon)] - (E[P_r(X, \varepsilon)])^2 \quad (6)$$

设定 $k = 2.17, c = 11.1 \text{ m/s}, P_r = 2 \text{ MW}, v_c = 4, v_r = 10, v_s = 22, E[\varepsilon] = 0, \sigma_\varepsilon = 2 \text{ kW}$ 。由式(4)得: $E[P_r(X, \varepsilon)] = 1.259 \text{ MW}$, 由式(6)得概率性功率曲线的方差为 $\sigma(P_r(X, \varepsilon)) = 0.623 \text{ MW}^2$ 。

2 配电网无功优化的数学模型

本研究以配电网的有功功率损耗和无功补偿设备的成本之和最小为目标函数,即:

$$\min(f_p + f_R) = \sum_{k=1}^{N_B} P_{k\text{loss}} + \sum_{i=1}^{N_C} k_{ci} Q_{ci} \quad (7)$$

式中, f_p 为配电网的有功损耗, N_B 为配电网总支路数, $P_{k\text{loss}}$ 为第 k 条支路的有功损耗; f_R 为无功补偿设备的成本, k_{ci} 为单位电容器的投资费用系数, Q_{ci} 为第 i 个无功补偿设备的补偿容量, N_C 为补偿设备的安装点个数。

等式约束条件为:

$$0 = Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$0 = P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (9)$$

不等式约束条件为:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (10)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (11)$$

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max} \quad (12)$$

$$Q_{fi} \geq 0, I_{fi} \leq I_{fi}^{\text{rated}} \quad (13)$$

式中, P_{Gi}, Q_{Gi} 为发电机 i 的有功和无功, Q_{Ci} 为节点 i 无功补偿设备的注入无功功率, P_{Di}, Q_{Di} 为节点 i 的有功和无功负荷, G_{ij}, B_{ij} 为支路 $i-j$ 上的电导、电纳, Q_{fi} 为馈线 i 注入根节点的无功, I_{fi} 为馈线电流, I_{fi}^{rated} 为馈线额定电流。当约束条件越限时将作为罚函数计入目标函数中,惩罚因子随越限的程度而变化。

3 改进 DPSO 优化算法

优化变量的选择是使用最优化方法的第一步。无功源的位置可看作是一个二进制变量,由于并联电容器的容量是一个离散值,本研究二进制变量数与节点数相同,都等于离散变量数的编码机制。为解决此类编码问题本研究应用改进离散粒子群算法(PSO-GA)。

粒子群优化算法^[9-10]是基于群体智能原理的自适应优化算法。

该算法在多维空间中并行处理种群个体,从而得到最佳的解决方案。

群体中每个粒子以自适应速度向最佳的位置移动。在程序迭代中每个粒子的速度和位置的更新见公式(14)、公式(15)。

本研究对每次更新后的粒子群应用改进自适应交叉和变异算子^[11]增加种群的多样性,改善 DPSO 易陷入局部最优的缺点。

图 2 所示为改进自适应交叉和变异算子示例图。本文研究无功优化的基本步骤见图 3 所示。

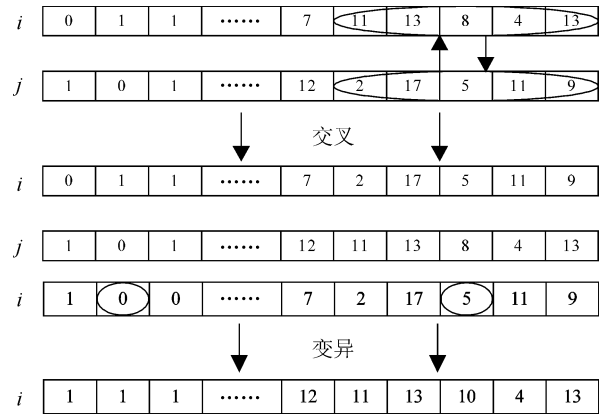


图 2 交叉和变异操作示例

Fig. 2 A simple crossover and mutation operation

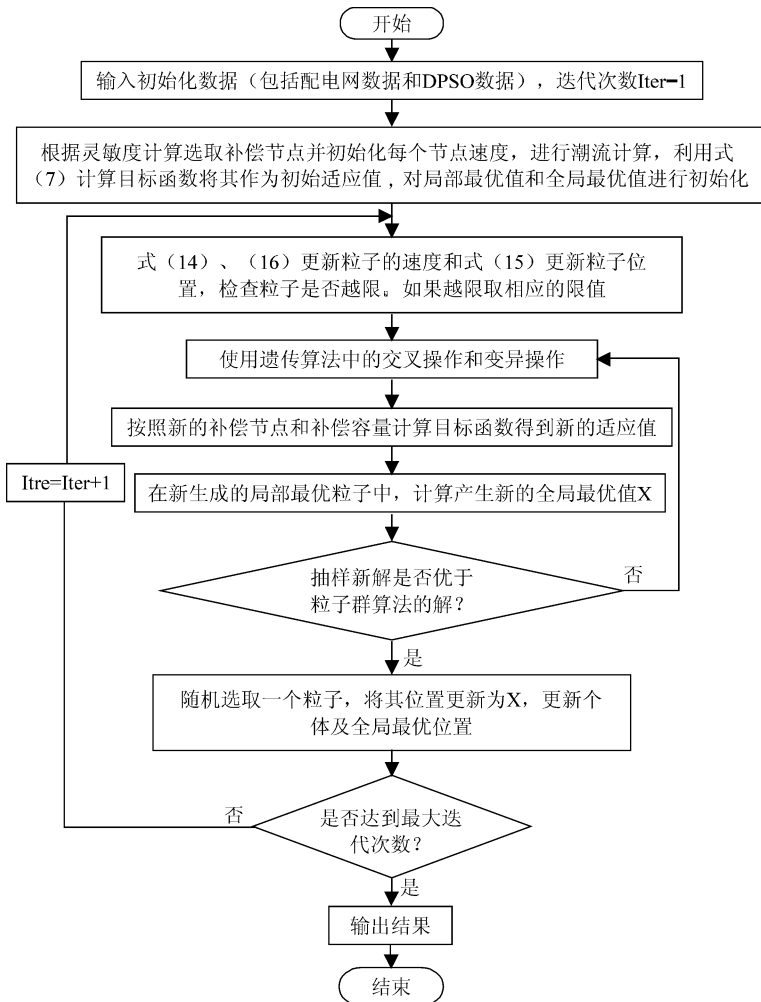


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of algorithm

$$V_j^{k+1} = \omega V_j^k + c_1 \text{rand}(pdest_j^k - X_j^k) + c_2 \text{rand}(gbest_j^k - X_j^k) \quad (14)$$

$$X_j^{k+1} = X_j^k + V_j^{k+1} \quad (15)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{Iter_{\max}} \times Iter \quad (16)$$

基于初始值的选取对智能算法的寻优能力有较大的影响,本研究用式(17)计算每个节点的灵敏度,将各节点的灵敏度按降序排列,在无功补偿优化程序中优先考虑灵敏度较大的点作为待选的并联电容器组的安装位置,即:

$$\frac{\partial P_{kloss}}{\partial Q_k} = \frac{2Q_k R_k}{U_k^2} \quad (17)$$

式中, P_{kloss} 、 Q_k 、 U_k 、 R_k 分别为第条配电线路的有功损耗、末端总无功功率和电压、支路电阻。

4 算例分析

图4为美国PG&E69节点辐射状配电网^[12], 系统含有68条支路, 48个负荷节点, 总负荷 $P = 3\ 802.19\ \text{kW}$ 、 $Q = 2604.60\ \text{kvar}$ 。线电压的基准值 $U_B = 12.66\ \text{kV}$ 。

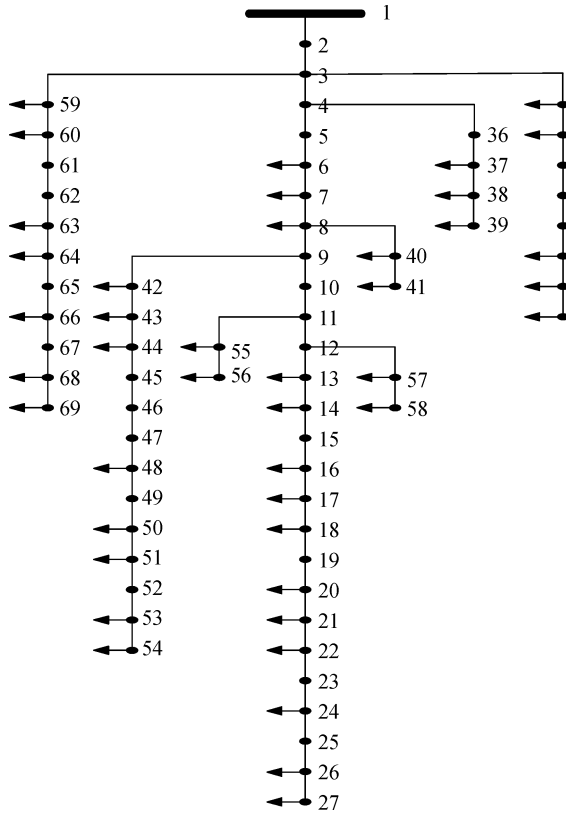


图4 美国PG&E69节点辐射状配电系统
Fig.4 PG&E69 bus test distribution system

本研究将风力发电机作为恒功率因数控制的PQ节点, 安装在最大负荷节点50处。优化算法参数设置如表1所示。

表1 优化方法参数设定表
Tab.1 Optimization parameter table

PSO-GA 算法参数				
学习因子1	C_1	1.2	染色体长度	$chro$ 138
学习因子2	C_2	0.5	交叉概率1	P_{cmax} 0.9
初始惯性权重	w_{min}	0.9	交叉概率2	P_{cmin} 0.6
迭代至 $Iter_{max}$ 的惯性权重	w_{max}	0.4	变异概率1	P_{mmax} 0.2
最大迭代次数	$Iter_{max}$	100	变异概率2	P_{mmin} 0.01

图5所示为年负荷持续曲线。处理年负荷持续曲线最复杂的方法就是研究每个时间点的负荷从而解决该时间段下的优化问题, 然而, 采用这种方法计算效率极低。最简单、快速的处理方法就是将年负荷曲线近似处理成2~3个负荷水平, 这种处理方法误差大、准确性差。为保证计算效率和准确性将年负荷曲线近似的处理为5种负荷运行方式(见图6)。表2所示为各负荷率下系统运行的小时数。

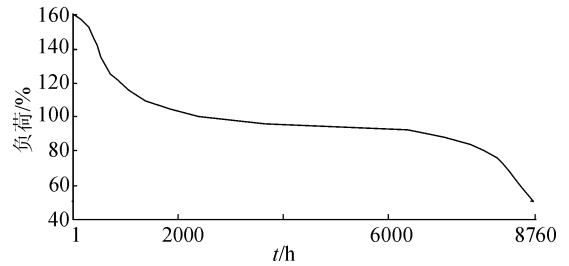


图5 测试系统使用的年负荷持续曲线
Fig.5 Load duration cure used in the testing distribution system

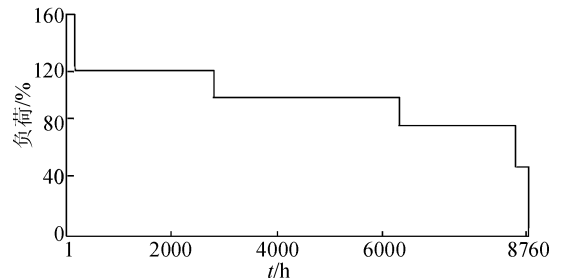


图6 近似年负荷持续曲线
Fig.6 Approximation of load duration cure

表2 各负荷率下系统运行的小时数

Tab.2 System operating hours at different load levels					
负荷率/%	160	120	100	80	50
持续时间/h	262.8	2 190	3 504	2 628	175.2

根据以上的理论分析本研究从电压质量、优化结果的经济性、PSO-GA 算法的收敛性三个部分进行仿真分析:

1) 电压质量分析

如图7和图8所示, 在最大负荷和最小负荷下, 系统节点电压没有出现越限的情况。系统中只安装分布式电源时系统处于最大负荷运行方式下, 系统末梢节点出现了越下限的情况, 进行无功补偿后系统恢复到正常的电压水平。因此, PSO-GA 算法优化后配电网的电压质量得到了显著改善。

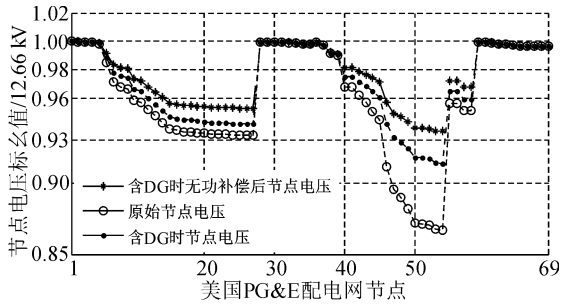


图7 最大负荷下优化前与优化后节点电压
Fig. 7 Voltage profile in peak level before and after optimization

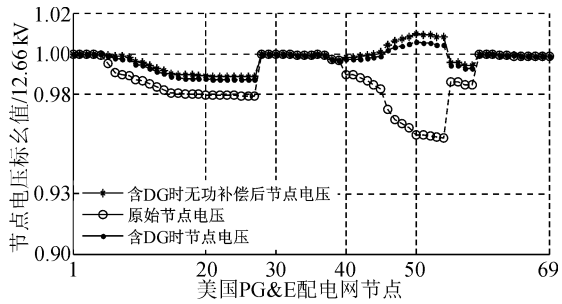


图8 最小负荷下优化前与优化后节点电压
Fig. 8 Voltage profile in light level before and after optimization

2) 经济性分析

表3为 PSO-GA 算法优化结果。从表4的对比分析知 PSO-GA 算法进行无功优化后,有功损耗显著减小。

表3 不同负荷率下 PSO-GA 的优化结果

Tab. 3 PSO-GA optimization results at different load levels

节 点	负 荷 率 %				
	50	80	100	120	160
11	0	0	0	0	250
12	0	150	200	300	350
21	100	150	200	250	350
48	0	0	0	0	350
50	200	650	750	100	1 000
53	0	0	200	250	500
54	100	0	0	0	0
总计/kvar	400	950	1 350	1 800	2 800

表4 不同负荷率下有功损耗

Tab. 4 Power loss at different load levels

算 法	不同负荷率下的有功损耗/kW				
	50%	80%	100%	120%	160%
PSO-GA	8.88	13.17	29.15	56.78	150.63
未优化	48.19	123.37	192.77	277.59	493.49

设定电量价格为 0.06 美元/kWh, 电容器使用年限为 20 年, 折现率 4%, 单位电容器的费用 3 美元/kvar^[13]。表5为风力发电机的部分参数^[14], 使

用年限为 30 年, 折现率为 4%, 利用式(18)折算为等年值的费用, 则每年实际风力发电机的费用 70 232 美元, 年电容器的费用为 1 611 美元。

$$F_{ini} = F_{ini0} \left[\frac{i_r(1+i_r)^{D_y}}{(1+i_r)^{D_y} - 1} \right] \quad (18)$$

式中, F_{ini} 为每年电容器的费用, i_r 为投资时刻的折现率, D_y 为设备的使用年限。

表5 分布式电源(DG)数据
Tab. 5 DG parameters used

使用 年限/a	安装费用/ (美元/MW)	年运行和维护 费用/(美元/MW)	额定容量/ MW
30	386 750	12 750	2

如表6所示安装 DG 及无功补偿后电能损耗费用明显减少, 年总电能损耗费用从优化前的 104 754 美元减少到 18 134 美元。可知安装分布式电源及并联电容器后, 系统每年节约总费用(104 754 - 89 977)美元即 14 777 美元, PSO-GA 算法优化后系统的经济性得到提高。

表6 考虑不同负荷率下的系统年支出费用

Tab. 6 The total system costs considering different load levels

算 法	不同项目的年支出费用/美元		
	DG	电容器	电能损耗
PSO-GA	70 232	1 611	18 134

3) 改进 DPSO 算法的收敛性分析

程序设计中将不同负荷运行方式下的目标函数值求和作为该次迭代下的目标函数值。如图9所示, 改进 DPSO 算法能在 38 次迭代时有效收敛, 而未改进 DPSO 算法在 55 次迭代时收敛, 且在相同目标函数条件下, 改进 DPSO 算法的收敛性优于未改进 DPSO 算法, 因此遗传算法的交叉和变异操作增加了种群的多样性, 能够改善 DPSO 算法易于陷入局部最优的缺点。

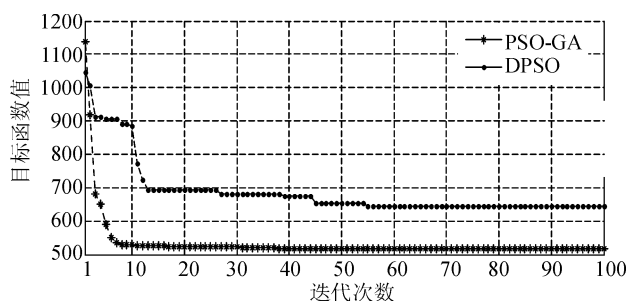


图9 不同优化算法的收敛曲线

Fig. 9 Convergence curve of different optimization algorithms

5 结 论

1) 利用负荷年持续曲线,采用多种负荷方式进行计算,优化结果能保证在最大负荷方式下,系统电压不越下限,同时在最小负荷方式下系统安装无功补偿装置后,不发生无功倒送,且系统电压不越上限;

2) 通过分析风电源自身的特点,建立了风力发电机的波动性模型,将其作为 PQ 节点接入配电网,使用 PSO-GA 算法优化并联电容器组的最佳安装位置及容量,在程序设计中将灵敏度计算的结果作为初始候选的配电网最佳安装位置,从而使得程序计算的精度、收敛的速度得到明显的提高,且优化后显著改善了配电网的电压质量,有效降低了网损。

参考文献:

- [1] 张立梅,唐巍,赵云军,等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):91-101.
Zhang Limei, Tang Wei, Zhao Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5):91-101.
- [2] 张节潭,程浩忠,黄微,等. 含风电场的电源规划综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(2):35-41.
Zhang Jietan, Cheng Haozhong, Huang Wei, et al. Review of generation expansion planning for power system with wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(2):35-41.
- [3] 刘学平,刘天琪,李兴源. 含风电机组的配电网无功优化补偿[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):130-136.
Liu Xueping, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Optimal reactive power planning in distribution system with wind power generators[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20):130-136.
- [4] 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]. 电力系统及其自动化,2011,35(11):33-38.
Zhao Jingjing, Fu Yang, Li Dongdong. Reactive power op-

- timization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11):33-38.
- [5] Vallee F, Lobry J, Deblecker O. Impact of the wind geographical correlation level for reliability studies[J]. IEEE Transacation Power Syst, 2007, 22(4):2232-2239.
- [6] Haghifam M R, Omidvar M. Wind farm modeling in reliability assessment of power system: proceedings of the 9th international conference on probabilistic methods applied to power systems[C]. Stockholm, Sweden, 2006.
- [7] Thiringer T, Linders J. Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(3):520-526.
- [8] Kusiak A, Linders J. Short-term prediction of wind farm power: a data mining approach[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1):125-136.
- [9] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, 1995(4):1942-1948.
- [10] Deepa S N, Sugumaran G. Model order formulation of a multivariable discrete system using a modified particle swarm optimization approach[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(4):204-212.
- [11] 余健明,张凡. 基于改进免疫遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2009, 33(19):101-102.
Yu Jianming, Zhang Fan. Distribution network reconfiguration based on improved immune genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19):101-102.
- [12] Mesut E B, Felix F W. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1):725-734.
- [13] Khodr H M, Olsina F G. Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78:1192-1203.
- [14] Clara Novoa, Tongdan Jin. Reliability centered planning for distributed generation considering wind power volatility[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81:1654-1661.

(责任编辑 李虹燕)