

多场景下含风电机组的配电网无功优化的研究

陈继明¹, 祁丽志¹, 孙名好², 薛永端¹

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;
2. 山东电力集团公司东营供电公司, 山东 东营 257091)

摘要: 研究了多场景下含风电机组的配电网无功优化问题。利用概率统计的思想解决了风电机组有功输出的不确定性问题, 根据转子侧最大电流限制条件确立了风电机组无功输出范围。结合传统的电容器无功补偿方法, 将风电机组作为连续可调无功源参与到配电网的无功优化。建立了以系统网损最小和节点电压越限惩罚为目标的无功优化模型。算例表明不同场景下的风电机组参与配电网无功优化可有效地降低系统的网损, 提高各节点电压, 同时, 增强配电系统受风速影响的适应性。

关键词: 配电网; 风电机组; 多场景; 无功优化; 改进的细菌群体趋药性算法

Reactive power optimization for distribution network with multi-scenario wind power generator

CHEN Jiming¹, QI Lizhi¹, SUN Mingyu², XUE Yongduan¹

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Dongying Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Dongying 257091, China)

Abstract: The reactive power optimization with wind power generator in multi-scenario is discussed. Through probability statistics method, the uncertainty problem of active power output is solved and reactive power output scope is obtained based on rotor side maximum current limitation. By integrating traditional capacitor reactive power compensation, the wind power generator takes part in the reactive power optimization as a continuous adjustable reactive source. Combining differential evolution algorithm and crossover-mutation operator, the bacterial colony chemotaxis algorithm is improved and the global optimization capability of algorithm is enhanced. The reactive power optimization model is built with the objective function of the minimum loss and out-of-limit voltage punishment. The result shows that reactive power optimization with wind power generator in different scenario can reduce the system loss, improve the voltage level, and enhance the adaptability of the power distribution system under the impact of wind speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184).

Key words: distribution network; wind power generator; multi-scenario; reactive power optimization; improved bacterial colony chemotaxis algorithm

0 引言

近年来, 分布式发电技术 (Distributed Generation, DG) 发展迅猛。大量分布式电源接入使配电网由传统单电源、辐射状结构变为多电源的复杂结构。而分布式电源的灵活并网可以有效地降低网络损耗, 提高电网电压的调整能力, 同时也可以减少输电线路投资, 弥补大电网安全稳定性的不足。风力发电作为分布式发电的一种主要形式, 具有储

量大、分布广、环境友好等优点。目前大多数风电机组采用恒定功率因数控制方式^[1-2], 所以含风电的配电网无功优化问题并没有考虑风电机组的无功输出能力^[3-4], 随着风力发电技术控制方式和并网技术的日趋成熟, 也有学者将风电机组输出无功能力和传统的电容器无功补偿方式相结合, 共同参与到配电网的无功优化中, 但是其无功输出范围都固定不变, 无法反映风速随机性和不确定性对风电机组输出特性的影响^[5-6]。

本文根据概率论方法和转子侧换流器最大电流限制条件, 分析了风电机组有功无功输出特性, 建

立了不同场景下含有风电机组的配电网无功优化模型。同时, 改进了细菌群体趋药性算法(Bacterial Colony Chemotaxis, BCC), 融合微分进化算法, 引入交叉变异算子, 提高了全局搜索能力。利用改进的算法分析了多场景含风电机组的配电网无功优化问题。

1 风电机组不同场景下的输出特性

1.1 基于概率思想的风电机组有功输出特性

风电机组一般分为三种运行状态, 即停机、欠额定运行、额定运行。根据图 1 给出的风电机组输出有功与风速的关系曲线^[7]可以看出, 当风速小于风机切入风速($v < v_i$)或大于切出风速时($v \geq v_o$), 风机为停机状态, 即输出功率为零。当风机大于切入风速小于额定风速时($v_i \leq v < v_n$), 风机运行在欠额定状态下。当风机在额定风速与切出风速之间时($v_n \leq v < v_o$), 风机运行在额定状态下, 即输出功率为风机的额定功率。

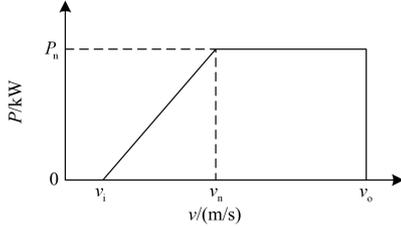


图 1 风电机组功率特性曲线

Fig. 1 Power curve of a wind power generator

由于风速决定着风机的运行状态, 通过不同的风速范围, 划分多个无功优化场景。根据风速的分布概率, 计算各场景发生的概率。本文采用风速 v 服从 Weibull 分布^[8]

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

其中: c 为尺度参数; k 为形状参数, 一般利用实际风速的历史数据通过最小二乘法获得。

根据已知的风速分布情况, 可以获得风电机组运行在停机、欠额定运行、额定运行三种状态下的概率。

① 停机状态

$$p_1 = p\{v \leq v_i\} + p\{v \geq v_o\} = 1 - \int_0^{v_i} f_v(v)dv + \int_0^{v_i} f_v(v)dv \quad (2)$$

② 额定运行状态

$$p_3 = p\{v_n \leq v \leq v_o\} = \int_{v_n}^{v_o} f_v(v)dv \quad (3)$$

③ 欠额定运行状态

按照一种场景计算, 将欠额定运行状态看做一

个场景。

$$p_2 = p\{v_i \leq v \leq v_n\} = \int_{v_i}^{v_n} f_v(v)dv \quad (4)$$

按照多种场景计算, 把欠额定运行状态分为 m 个场景 $(v_i, v_1), (v_1, v_2) \dots (v_{m-1}, v_n)$, 其中 $v_i \leq v_1 \leq v_2 \dots \leq v_{m-1} \leq v_n$ 。

$$p_{21} = p\{v_i \leq v \leq v_1\} = \int_{v_i}^{v_1} f_v(v)dv \quad (5)$$

$$p_{22} = p\{v_1 \leq v \leq v_2\} = \int_{v_1}^{v_2} f_v(v)dv \quad (6)$$

.....

$$p_{2m} = p\{v_{m-1} \leq v \leq v_n\} = \int_{v_{m-1}}^{v_n} f_v(v)dv \quad (7)$$

欠额定运行状态的有功输出可利用此状态下的多个场景求期望^[9]

$$P = \sum_{i=1}^m p_{2i} P_i \quad (8)$$

式中: p_{2i} 为欠额定状态的第 i 个场景发生的概率; P_i 为第 i 个场景时, 风电机组的有功输出功率的平均值。

利用多个场景求期望的思想可以简化实际风速的波动对风机出力的影响, 改善了不确定性对配电网无功优化的影响。

1.2 基于换流器容量的风电机组无功输出范围

不仅风电机组的有功出力随着风速变化, 风电机组无功的输出范围也受风速的影响。对于双馈感应发电机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG), 文献[10-11]都已证明了基于转子换流器容量考虑的转子最大电流小于基于定子绕组极限考虑的转子最大电流, 所以按照考虑转子换流器容量转子最大电流计算无功功率范围。

DFIG 的定子侧输出最大有功为 P_{smax} , 则转子侧换流器设计容量应满足最大转差功率的需要:

$$P_{rmax} = -s_{max} P_{smax} \quad (9)$$

其中, s_{max} 为定子输出功率最大时对应的转差。

转子侧换流器向定子侧提供励磁功率和无功功率^[12], 忽略定子、转子的漏抗, 则

$$Q_r = s(Q_e + Q_s) \quad (10)$$

式中: Q_r 为转子传至气隙的无功功率; Q_s 为由气隙传至定子的无功功率; $Q_e = 3X_m I_m^2$, 为气隙的励磁功率, 令 $X_1 = X_m + X_{so}$, $X_2 = X_m + X_{ro}$, 忽略定子电阻和定子漏抗, $X_m \approx X_1$, 则 $Q_e = \frac{3U_s^2}{X_s}$ 。

通过调节转子的励磁, 可以控制定子侧输出的无功功率。根据 DFIG 的等效电路基本方程, DFIG 定子输出功率与转子电压、电流关系方程^[13], 不考虑定子转子的电阻和漏抗, 得到

$$I_r = \frac{X_1}{3X_m U_s} \sqrt{P_s^2 + (Q_s^2 + \frac{3U_s^2}{X_1})^2} \quad (11)$$

当 $P_s = P_{s \max}$ 时, $Q_s = 0$, 所以 $Q_r = -Q_c$, 则换流器的最小容量为

$$S_r = \sqrt{P_r^2 + Q_r^2} = |s_{\max}| \sqrt{P_{s \max}^2 + (\frac{3U_s^2}{X_1})^2} \quad (12)$$

根据式(11)推出转子最大电流值为

$$I_{r \max} = \frac{S_r}{3U_r} = \frac{1}{3U_r} \sqrt{P_{s \max}^2 + (\frac{3U_s^2}{X_1})^2} \quad (13)$$

根据式(11)、式(13)得到定子无功功率的范围:

$$\begin{aligned} -\frac{3U_s^2}{X_1} - \sqrt{(\frac{3X_m U_s}{X_1} I_{r \max})^2 - P_s^2} &\leq Q_s \leq \\ -\frac{3U_s^2}{X_1} + \sqrt{(\frac{3X_m U_s}{X_1} I_{r \max})^2 - P_s^2} &\end{aligned} \quad (14)$$

根据以上分析, 可以得到不同场景下 DFIG 所能提供的无功功率的极限范围, 当输出的有功功率越大时, 无功功率的调节范围越小, 所以, 欠功率运行状态下要比额定运行状态下的无功调节范围更大。

2 配电网无功优化数学模型

2.1 目标函数

考虑到配电网的经济效益和安全运行两方面问题, 选用配电网有功网损最小和电压越限惩罚为目标函数^[14]

$$\min F = \min \left(P_{\text{loss}} + \lambda \sum_{n=1}^N \left(\frac{\Delta V}{V_{i \max} - V_{i \min}} \right)^2 \right) \quad (15)$$

其中: $P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^{n_L} R_j (P_j^2 + Q_j^2) / U_j^2$; n_L 为支路数; U_j ,

P_j 、 Q_j 分别为支路 j 始端节点电压、支路 j 流过的有功功率、无功功率; λ 为电压越限惩罚因子, 文中 λ 取值为 1。

$$\Delta V = \begin{cases} V_{\min} - V & (V < V_{\min}) \\ 0 & (V_{\min} < V < V_{\max}) \\ V - V_{\max} & (V > V_{\max}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $V_{i \max}$, $V_{i \min}$ 分别为节点电压 V_i 的上限和下限, 文中分别取为 1.02 和 0.98。

2.2 约束条件

a. 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta + B_{ij} \sin \theta) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta - B_{ij} \cos \theta) \end{cases} \quad (17)$$

式中: N 为节点总数; P_i 、 Q_i 为节点 i 的注入有功功率和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ 分别为节点 i 、 j 之间的支路电导、支路电纳和节点电压相角差。

b. 变量约束

控制变量约束条件有

$$\begin{cases} Q_{Cj \min} < Q_{Cj} < Q_{Cj \max}, j \in N_C \\ T_{k \min} < T_{kj} < T_{k \max}, k \in N_T \end{cases} \quad (18)$$

状态变量约束条件有

$$\begin{cases} U_{Li \min} < U_{Li} < U_{Li \max}, i \in N \\ I_{Lj \min} < I_{Lj} < I_{Lj \max}, j \in n_L \end{cases} \quad (19)$$

式中: Q_{Cj} 为补偿点 j 的无功补偿量; T_{kj} 为当前有载调压变压器档位位置; U_{Lj} 为节点 j 的电压; I_{Lj} 为支路 j 的电流; N_C 表示系统中的无功补偿节点数; N_T 表示有载调压变压器档位; $Q_{Cj \min}$ 、 $Q_{Cj \max}$ 为 j 节点可投切电容容量上下限; $T_{k \min}$ 、 $T_{k \max}$ 为有载调压变压器档位上下限。

3 改进的 BCC 优化算法

配电网无功优化是一个多变量、多约束条件、多极值点的大规模混合非线性规划问题。综合考虑计算的快速性和准确性, 本文选用改进的 BCC 算法进行求解。

BCC 算法是在化学诱导剂作用下, 利用单个细菌感受周围环境的趋化过程和一定范围内细菌群体的信息交换的感知过程的共同作用, 来寻找最优值。

为保证搜索精度的前提下提高搜索速度, 本文引入计算精度的自适应调整策略, 计算精度随着迭代次数的增加阶梯形递增。在寻优初期减小精度, 加快搜索速度, 寻优后期, 提高搜索精度, 保证全局搜索的高精度。为了防止算法陷入早熟, 采取了感知范围的自适应调整策略。当细菌群体的聚集程度过高时, 扩大细菌的感知范围, 防止其陷入早熟, 而无法获得全局最优解^[15]。

受到微分进化算法^[16]中变异交叉操作的启发, 在 BCC 算法的基础上引入微分进化算子^[17], 细菌群体在每次迭代时, 会增加一个新的待选位置 $\bar{x}_{i,k+1}''$

$$\bar{x}_{i,k+1}'' = \bar{x}_{i, \text{best}} + F \cdot (\bar{x}_{r_1, k} - \bar{x}_{r_2, k}) \quad (20)$$

其中: $r_1, r_2 \in (1, 2, \dots, n)$ 是随机整数, 且 $r_1 \neq r_2$; $\bar{x}_{i, \text{best}}$ 是细菌 i 在之前迭代过程中的最优位置点, $\bar{x}_{r_1, k}$ 、 $\bar{x}_{r_2, k}$ 为迭代到第 k 步时细菌群中两个随机选取的细菌位置。 F 为比例因数, 一般在 $[0, 2]$ 之间取值, 本文采用参数 F 随迭代次数动态调整的控制策略

$$F = F_{\max} - \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\lambda_{\max}} \lambda \quad (21)$$

式中： F_{\max} 、 F_{\min} 分别为比例因数 F 的最大值和最小值； λ_{\max} 、 λ 分别为最大迭代次数和当前的迭代次数。

由于 $\bar{x}_{i_1,k}$ 、 $\bar{x}_{i_2,k}$ 是一对不受感知范围限制的自由矢量，因此产生的新位置 $\bar{x}_{i,k+1}$ 有较高的随机性，通过引入微分进化算子可以有效地降低细菌群的聚集程度，提高种群的多样性，从而改善全局搜索的能力，改进后的 BCC 算法流程图见图 2。

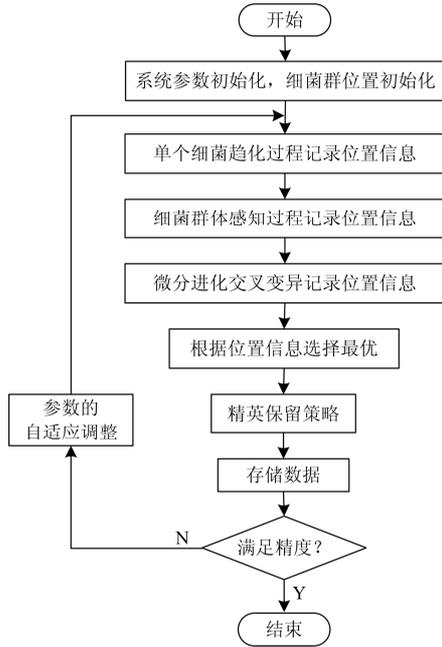


图 2 改进 BCC 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved BCC algorithm

4 算例分析

考虑到风电机组的接入，如图 3 所示，对 IEEE33 节点^[18-19]辐射状配电网系统适当地改进，在首端加入有载调压变压器，其电压标幺值的范围在 0.9~1.1，总共上下±8 个档位，步进量为 1.25%。在 6 节点和 31 节点处分别加入并联补偿电容器，其容量分别为 150×4 kvar 和 150×7 kvar。在 2 节点和 13 节点并入 1.5 MW 的 DFIG，无功出力容量跟随风速变化而变化。DFIG 的具体参数额定有功功率 $P_n = 1.5$ MW，

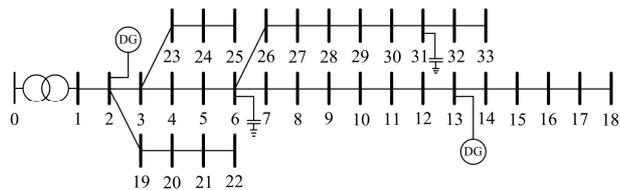


图 3 改进的 IEEE33 配电网系统

Fig. 3 Improved IEEE33 distribution network system

额定视在功率 $S_n = 1.5/0.9$ MVA，额定电压 $U_n = 690$ V，励磁电抗标幺值 $X_m^* = 2.9$ 。风机切入风速为 3 m/s，额定风速为 11 m/s，切出风速为 30 m/s。Weibull 分布参数 c 和 k 为 8.5 和 2.0。

本文选取 10 个场景进行研究，第 1 个是停机状态，根据式(2)得出此场景发生的概率为 0.117 1，风机此时没有输出， $P_s = 0$ ， $Q_s = 0$ 。欠功率运行状态的发生的概率为 0.695 5，将此状态分为 8 个场景，即第 2~9 个场景，根据式(5)~式(7)得到各场景在该状态下发生的概率分别为 0.117 2、0.134 9、0.143 7、0.143 8、0.136 8、0.124 3、0.108 4、0.090 9，由式(8)得到有功功率的期望值 $P = 714.14$ kW，根据输出有功结合式(14)，计算出无功输出范围(-2 186.7 kvar, 1 037.1 kvar)。第 10 个场景是额定功率场景，根据式(3)得出此场景发生的概率为 0.187 4，进一步得到无功输出范围(-1 501.2 kvar, 351.7 kvar)。

利用改进 BCC 对算例进行优化分析，分别计算了考虑风电机组无功调节作用和不考虑风电机组无功调节两种情况的配网无功优化，优化结果如表 1、表 2。

表 1 只考虑风电机组有功输出的配电网优化

Table 1 Results of optimization only considering the active power capacity of DFIG

	停机状态	欠功率状态	额定状态
风速范围	$v \leq 3$ $v \geq 30$	$3 \leq v \leq 11$	$11 \leq v \leq 30$
DFIG 有功/MW	0	0.714	1.500
变压器分接头	4	2	2
Qc1 (6#)	4×150	4×150	4×150
Qc2 (31#)	5×150	5×150	5×150
网损 (kW)	129	81.98	70.87
2#压降比	0.228 6%	0.165 9%	0.068 3%
13#压降比	5.771 4%	3.180 5%	1.634 1%

表 2 风电机组参与无功调节的配电网优化结果

Table 2 Results of optimization with the reactive power regulation of DFIG

	停机状态	欠功率状态	额定状态
风速范围	$v \leq 3$ $v \geq 30$	$3 \leq v \leq 11$	$11 \leq v \leq 30$
DFIG 无功/Mvar	0	(-2.18, 1.03)	(-1.5, 0.35)
变压器分接头	4	2	1
DFIG1 (2#)	0	846.64	351
DFIG2 (13#)	0	272.63	274.35
Qc1 (6#)	4×150	3×150	3×150
Qc2 (31#)	5×150	5×150	5×150
网损/kW	129	75.97	66.10
2#压降比	0.228 6%	0.136 6%	0.059 3%
13#压降比	5.771 4%	2.351 2%	1.382 7%

以欠功率状态为例, 给出考虑风电机组无功调节特性和不考虑风电机组无功输出时的电压水平曲线对比图, 如图 4。

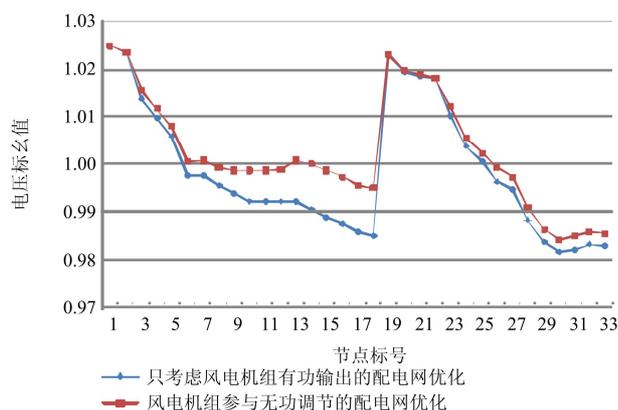


图 4 系统电压水平曲线

Fig. 4 Diagram of system voltage

由表 1 可以看出, 分布式电源的接入可以有效地降低系统的网损。风电机组运行在额定功率状态比其他运行状态下系统的网损更低, 并网点电压降落更少。通过对比表 1、表 2 和图 4 可以看出, 充分利用风电机组自身的无功输出容量, 并使其参与配电网的无功调节, 可以有效地降低系统的网损, 提高各节点电压, 减少无功补偿电容的投入组数, 降低了配电网的投资成本。

5 结论

(1) 在考虑风电机组的无功输出的配网优化问题中, 利用多个场景的风机运行状态的期望来衡量输出, 可以减小风机出力的波动性对配电网无功优化的影响, 简化风力发电机无功控制策略, 避免无功补偿装置随风速频繁动作, 增强风机接入配电网无功优化适应性。

(2) 利用风电机组自身的无功调节特性, 结合传统的电容器无功补偿方式进行配电网的无功优化, 可以有效地降低系统的有功损耗, 提高各节点电压, 改善风电机组并网点电压的稳定性。同时可以减少无功补偿电容的投入组数, 降低配电网的投资成本。

(3) 在整个配电系统中, 不同位置的风机所受风速的不同对无功优化带来的影响, 值得进一步研究。

参考文献

[1] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunqing, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid

under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.

[2] 马祎炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 202-208.

MA Yiwei, YU Junjie, WU Guoxiang, et al. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 202-208.

[3] 邱晓燕, 夏莉丽, 李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 7-10.

QIU Xiaoyan, XIA Lili, LI Xingyuan. Planning of distributed generation in construction of smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 7-10.

[4] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40-45.

CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 40-45.

[5] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.

ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.

[6] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 20-24.

CHEN Lin, ZHONG Jin, NI Yixin, et al. Optimal reactive power planning of radial distribution systems with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 20-24.

[7] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.

YANG Xiuyuan, XIAO Yang, CHEN Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5.

[8] 洪芦诚, 石立宝, 姚良忠, 等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 116-122, 130.

HONG Lucheng, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122, 130.

[9] 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): 130-135.

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): 130-135.
- [10] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(9): 77-82.
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(9): 77-82.
- [11] 申洪, 王伟胜, 戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. *电网技术*, 2003, 27(11): 60-63.
SHEN Hong, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Reactive power limit of variable speed constant frequency wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(11): 60-63.
- [12] 付超. 风电并网的无功优化控制及其数模混合仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
FU Chao. Study on reactive power optimal control for wind power grid integration and its digital/physical hybrid simulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [13] 赵仁德. 变速恒频双馈风力发电机交流励磁电源研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
ZHAO Rende. Investigation of the AC-excited power supply for a variable-speed constant-frequency wind energy generation system with doubly-fed induction generator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [14] 陈钰. 基于改进遗传算法的中低压配电网无功优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
CHEN Yu. Research on reactive power optimization of low and medium voltage distribution network based on improved genetic algorithm[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [15] 黄伟, 张建华, 张聪, 等. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(7): 29-33.
HUANG Wei, ZHANG Jianhua, ZHANG Cong, et al. Reactive power optimization in power system based on bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(7): 29-33.
- [16] 刘自发, 闫景信, 张建华, 等. 基于改进微分进化算法的电力系统无功优化[J]. *电网技术*, 2007, 31(18): 68-72, 82.
LIU Zifa, YAN Jingxin, ZHANG Jianhua, et al. Power system reactive power optimization based on improved differential evolution algorithm[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(18): 68-72, 82.
- [17] 李秀卿, 孙守刚, 姜世金, 等. 基于混合优化微分进化算法的电力系统无功优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 38(7): 26-29, 39.
LI Xiuqing, SUN Shougang, JIANG Shijin, et al. A hybrid optimization based on DE for optimal reactive power flow[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 38(7): 26-29, 39.
- [18] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的DEIWO算法配电网无功优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(4): 69-73.
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(4): 69-73.
- [19] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含DG配电网实时无功优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(23): 117-124.
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(23): 117-124.

收稿日期: 2014-12-31; 修回日期: 2015-12-25

作者简介:

陈继明(1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及油田自动控制、软测量技术和智能技术等。E-mail: jimingchen@126com

(编辑 葛艳娜)