

基于降低集电系统损耗的风电场内机组优化调度研究

以风电场内集电系统网损最小为目标函数,同时以电网调度要求、风力发电机组有功输出的功率上下限、风力发电机组无功输出的功率上下限、风力发电机组端电压上下限以及变压器电压比上下限等为约束条件,建立风电场内机组优化调度的数学模型,并分别采用粒子群优化算法和遗传-粒子群优化算法进行寻优。结果表明,遗传-粒子群算法在优化效果和运算效率方面均优于单一粒子群算法。

张晋华^{1,2} 曹群士¹ 刘永前²/1.华北水利水电大学电力学院 2.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室

0 引言

目前,电力系统的风电调度管理只是针对风电场侧或大型风电场群与系统并网点,而风电场内部的优化调度还处于研究阶段^[1-2]。本文研究的风电场内机组功率分配模型是基于最优潮流计算概念而建立的。电力系统中最优潮流是20世纪60年代初期法国学者Carpentien所提出的,把电力系统调度和潮流计算有机地融合在一起^[3],即以潮流计算为基础,进行有功和无功的全面优化。最优潮流问题可以描述为在满足潮流等式约束和不等式约束的条件下,求得一组控制变量和状态变量的值,使系统的目标函数最优。风电场内优化调度是通过最优潮流计算优化风电场内机组的有功与无功出力,这不仅能使风电场内部的损耗最小,风力发电机组得到延寿,实现整个风电场经济运行,还可以通过对风电场内功率分配的研究,分析内部功率损

耗,为风电场经济性评价提供依据。

1 基于降低集电系统损耗的风电场内出力优化调度数学模型

1.1 目标函数的建立

已并网的风力发电机组其输出的有功功率和无功功率会直接影响风电场的输出。设某风电场有 n 台机组运行,每台机组输出的有功功率和无功功率为 P_{Gi} 和 Q_{Gi} ,风电场的有功损耗和无功损耗为 P_{loss} 和 Q_{loss} ,则风电场输出的总的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_{out} = \sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{loss} \\ Q_{out} = \sum_{i=1}^n Q_{Gi} - Q_{loss} \end{cases} \quad (1)$$

风力发电机组的功率因数为

$$\cos \varphi_{Gi} = \frac{P_{Gi}}{\sqrt{P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2}} \quad (2)$$

为了满足电网调度要求而随机安排风电场内机组随意起停机发电,不但会影响机组寿命,而且会增加风电场内的功率损耗,降低风电场内运行的经济性,同时也可能造成风电场内出力空间的浪费^[4-6]。所以,通过按时间段 j 建立风电场内功率分配模型,合理安排机组运行,使风电场内损耗最小。优化目标函数,即

$$F = \min \left(\sum_{j=1}^T P_{lossj} + \sum_{j=1}^T Q_{lossj} \right) \quad (3)$$

1.2 约束条件

(1) 有功功率约束条件

1) 机组出力上下限约束,即



张晋华/副教授

关键词/Keywords

优化调度·
风电场·
集电系统·
粒子群-遗传优化算法·

青年科技创新人才支持计划:基于风电机组延寿的风电场优化运行;华北水利水电大学高层次人才科研启动项目:风电场内机组优化调度研究。

$$P_{i,\min}^j \leq P_{i,\text{predict}}^j \leq P_{i,\max}^j \quad (4)$$

式中, $P_{i,\text{predict}}^j$ 为第 i 台机组的功率预测值; $P_{i,\min}^j$ 、 $P_{i,\max}^j$ 为第 i 台机组的最小和最大出力。

2) 负荷调度约束, 即

$$\sum_{i=1}^n (P_{i,\text{predict}}^j u_i^j) - P_{\text{loss}} = P_{\text{load}}^j \quad (5)$$

式中, P_{load}^j 为第 j 时间段风电场规划的负荷出力, 满足电网中调负荷指令。

3) 最大功率变化率约束。在风电场并网、机组正常停机以及风速增长过程中, 风电场功率变化率应满足如表1所示的要求^[7-9]。

表1 风电场功率变化率

风电场装机容量/MW	10 min最大变量/MW	1 min最大变量/MW
< 30	20	6
30 ~ 150	装机容量/1.5	装机容量/5
> 150	100	30

(2) 无功功率约束条件

双馈型异步风力发电机组采用交流励磁, 可测量励磁电流的幅值、频率和相位。改变励磁电流的频率可实现变速恒频运行; 改变励磁电流的相位可使建立的转子磁场在空间上有一个相应的位移, 进而改变发电机的电动势矢量和电网电压矢量之间的相对位置, 也即调节了发电机的功率角。综合改变转子励磁电流的相位和幅值, 实现对有功功率和无功功率的控制。

双馈型异步风力发电机组的无功功率是由发电机定子侧发出或吸收的无功功率和网侧变换器发出或吸收的无功功率共同组成的。对于双馈型异步风力发电机, 传统的无功控制主要模式有单位功率因数控制、恒功率因数控制和恒电压控制。而在已运行的风电场中, 通常将网侧变换器按功率因数为1.0控制, 风力发电机只能发有功功率, 没有无功功率, 即单位功率因数控制模式。

相关设计规范要求风电场机组的功率因数在 $-0.95 \sim 0.95$ 之间连续可调, 若将风力发电机的功率因数设定为恒定值, 一般为0.95以上, 则风力发电机会发出大量的有功功率和少量的无功功率。目前, 双馈风力发电机组大多数选用恒功率因数控制模式实现无功控制。当双馈风力发电机组定

子侧电压恒定时, 风力发电机组有功功率和无功功率运行范围受转子侧变换器最大电流的限制。如果风力发电机组发出的有功功率确定, 则无功输出范围为

$$Q_{\text{Gmin}} \leq Q_{\text{G}} \leq Q_{\text{Gmax}} \quad (6)$$

无功功率极限值由下面三个条件限定^[10]。

1) 转子电流约束。双馈风力发电机组有功功率与无功功率的关系满足 $P-Q$ 曲线, 是一个以 $(0, -\frac{3L_m|U_s||i_{\text{ms}}|}{2L_s})$ 为圆心, $\frac{3L_m|U_s||i_r|}{2L_s}$ 为半径的功率圆。

$$\left(\frac{P_{\text{G}}}{1-s}\right)^2 + \left(Q_s - \frac{3L_m|U_s||i_{\text{ms}}|}{2L_s}\right)^2 = \left(\frac{3L_m|U_s|}{2L_s}\right)^2 |i_r|^2 \quad (7)$$

$$Q_{\text{smax}} = \sqrt{\left(\frac{3L_m|U_s|}{2L_s}\right)^2 |i_{\text{rmax}}|^2 - \left(\frac{P_{\text{G}}}{1-s}\right)^2} - \frac{3L_m|U_s||i_{\text{ms}}|}{2L_s} \quad (8)$$

$$Q_{\text{smin}} = -\sqrt{\left(\frac{3L_m|U_s|}{2L_s}\right)^2 |i_{\text{rmax}}|^2 - \left(\frac{P_{\text{G}}}{1-s}\right)^2} - \frac{3L_m|U_s||i_{\text{ms}}|}{2L_s} \quad (9)$$

式中, $|i_{\text{ms}}| = \frac{|U_s|}{L_m \omega_s}$; i_{rmax} 为转子绕组最大电流, 取值为转子电流的峰值, 一般取值为额定值的1.5倍; L_m 、 L_s 为定子的互感和自感; U_s 为定子的电压, 一般取值为电压峰值; ω_s 为定子转速。

2) 定子电流约束, 即

$$\left(\frac{P_{\text{G}}}{1-s}\right)^2 + Q_s^2 = (3U_s I_s)^2 \quad (10)$$

$$Q_{\text{smax}} = \sqrt{(3U_s I_s)^2 - \left(\frac{P_{\text{G}}}{1-s}\right)^2} \quad (11)$$

$$Q_{\text{smin}} = -\sqrt{(3U_s I_s)^2 - \left(\frac{P_{\text{G}}}{1-s}\right)^2} \quad (12)$$

3) 稳定约束, 即

$$Q_s \geq -\frac{3U_s^2}{X_s} \quad (13)$$

根据上述表达式和双馈异步风力发电机组的参数, 得到双馈异步风力发电机组定子侧的无功功率范围如图1所示。

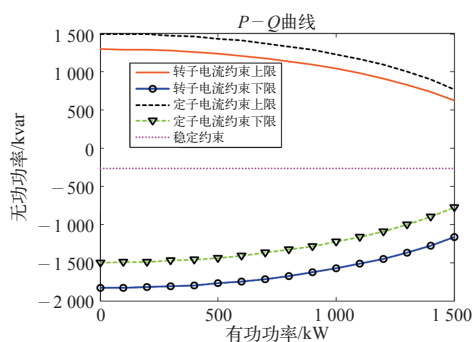


图1 双馈型风力发电机组定子侧的无功功率范围

本次研究的双馈异步风力发电机组相关参数如表2所示^[11]。

表2 1.5 MW, 690 V, 50 Hz双馈异步发电机参数

发电机类型	双馈异步, 1.5 MW, 690 V, 50 Hz	
	有名值	标么值(pu)
额定机械功率/MW	1.5	1.0
额定定子线电压/V	690 (有效值)	
额定定子相电压/V	398.4 (有效值)	1.0
额定转子相电压/V	67.97 (有效值)	0.170 6
额定定子电流/A	1 068.2 (有效值)	0.851 1
额定转子电流/A	1 125.6 (有效值)	0.896 8
额定定子频率/Hz	50	1.0
额定转速/(r/min)	1 750	1.0
额定转速范围/(r/min)	1 200~1 750	0.686~1.0
额定转差率	-0.166 7	
极对数	2	
额定机械转矩/kN·m	8.185	1.0
定子绕组电阻/ $R_s/\text{m}\Omega$	2.65	0.008 4
转子绕组电阻/ $R_r/\text{m}\Omega$	2.63	0.008 3
定子漏感/ L_{ls}/mH	0.168 7	0.167
转子漏感/ L_{lr}/mH	0.133 7	0.132 3
励磁电感/ L_m/mH	5.474 9	5.419
电流基值 $I_B = 1.5 \text{ MW}/(\sqrt{3} \times 690 \text{ V})/\text{A}$	1 255.1 (有效值)	1.0
磁链基值 λ_B/Wb	1.268 1 (有效值)	1.0
阻抗基值 Z_B/Ω	0.317 4	1.0
电感基值 L_B/mH	1.010 3	1.0
电容基值 $C_B/\mu\text{F}$	10 028.7	1.0

(3) 其他约束条件

1) 节点电压约束条件。所有节点电压幅值必须满足其运行在额定电压附近, 即

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (14)$$

2) 电压相位差约束条件。为保证系统正常运行时的稳定性, 节点之间电压的相位差应该满足

$$|\theta_i - \theta_j| < |\theta_i - \theta_j|_{\max} \quad (15)$$

3) 双馈异步风力发电机组潮流计算模型。

双馈异步风力发电机组采用了变频器控制, 其发出的有功功率和无功功率可以解耦控制, 双馈异步风力发电机组具有类似于同步发电机的特性, 在实际运行中, 根据无功功率控制模式的不同, 双馈异步风力发电机组可以看作PQ节点或PV节点。

在恒定功率因数控制模式下, 双馈异步风力发电机组的功率因数为一定值, 其有功功率与无功功率之间为线性关系, 可以看作是PQ节点; 在恒定电压控制模式下, 双馈异步风力发电机组的无功功率根据机端电压与设定电压之间的偏差在一定的范围内进行调节, 此时在控制范围内可以将其看作PV节点, 当无功功率超过极限值时, 无功功率维持在极限值不变, 此时双馈异步风力发电机组由PV节点转化为PQ节点^[12-13]。

2 优化算法

2.1 粒子群优化算法步骤

粒子群优化算法具体步骤如下。

1) 结合风电功率预测数据, 随机列出调度周期内各种可能的机组起停组合, 运行状态表示为1, 停机状态表示为0, 并以矩阵的形式表示。

2) 计算步骤1) 中各种机组状态组合下整个风电场的最大输出功率, 与电力系统负荷限定值相比较, 得到满足电力系统负荷约束条件的机组组合。

3) 将满足电力系统负荷条件的机组组合解传递给粒子群算法, 得到局部最优粒子和全局最优粒子, 进行潮流计算, 得到对应的线路损耗, 然后更新粒子, 筛选出其中线路有功损耗之和最小的组合。

4) 重复上述步骤, 在经过多代进化之后, 选出整个调度周期内线路损耗值最小的机组状态组合计划。

2.2 粒子群优化算法步骤

遗传-粒子群优化算法具体步骤如下。

1) 结合风电功率预测数据, 随机列出调度周

期内各种可能的机组起停组合,运行状态表示为1,停机状态表示为0,并以矩阵的形式表示。

2) 计算步骤1)中各种机组状态组合下整个风电场的最大输出功率,与电力系统负荷限定值相比较,得到满足电力系统负荷约束条件的机组组合。

3) 将满足电力系统负荷条件的机组组合解传递给粒子群算法,得到局部最优粒子和全局最优粒子,进行潮流计算,得到对应的线路损耗,然后更新粒子,筛选出其中线路有功损耗之和最小的组合。

4) 将每个群体计算得到的最优粒子传递到遗传算法中进行选择、交叉和变异操作,得到群体中最优的粒子数。

5) 重复上述步骤,在经过多代进化之后,选出整个调度周期内线路损耗值最小的机组状态组合计划^[14-15]。

3 算例及分析

3.1 算例背景资料

所研究的风电场位于中国河北某县境内,该风电场具有33台1 500 kW变速恒频双馈风力发电机组,容量为49.5 MW。风资源数据为2014年3月31日某一时段的风电功率预测数据。风力发电机出口电压为0.69 kV,基准容量 $S_B = 50 \text{ MV} \cdot \text{A}$,基准电压 $U_B = 110 \text{ kV}$,场内线路电压为35 kV,风电场输出电压为110 kV。

风电场内集电系统布置形式为放射形布局,4串支路,8台风力发电机组一串的3回,最后9台风力发电机组一串,共33台风力发电机组。节点依次而设,共64个节点。其中节点16为平衡节点,节点64为PV节点,其余节点都是为PQ节点。在后面的潮流计算中,仅考虑到变压器低压侧端。

双馈风力发电机为1 500 kW,直径取83 m,列距为7D,则联络线长度为4 067 m左右,从汇流节点到风电场主变压器距离取40 km,假设该风电场内所有风力发电机组之间的线路长度都相等,为581 m左右。35 kV线路选型为LGJ240-30,导

线直径为21.4 mm,铝线截面积为240 mm²。化为标么值的单位线路长度电气参数为 $Z_L^* = 0.000 \ 54 + j0.001 \ 58$ 。从汇流节点到风电场主变压器的距离取40 km,那么该线路的阻抗为 $Z_L^* = 0.021 \ 6 + j0.063 \ 1$ 。

长度不超过100 km的架空线路,线路电纳的影响一般不大,可略去;若线路长度超过100 km,则应该考虑电纳的影响。由于风电场内线路较短,暂不考虑电纳的影响。0.69/35 kV变压器标准参数如表3所示。

表3 某35 kV变压器标准参数

名称	参数
型号	S11-1600/35
性能	油浸,自冷,全密封,低损耗
额定容量/kV·A	1 600
额定电压/kV	$36.75 \pm 2 \times 2.5\%/0.69$
额定频率/Hz	50
联接组标号	Dyn11
阻抗电压(%)	6.5
噪声水平/dB	≤55
空载损耗/W	1 600
负载损耗/W	16 000
短路损耗/W	11 200
短路电流(%)	0.8

经过计算得到箱式变压器阻抗的标么值 $Z_T^* = 0.022 \ 3 + j2.031 \ 25$ 。在优化计算的过程中,暂不考虑风力发电机组的停机检修、故障等影响。

算例中已知未来4个时段电网侧负荷调度指令,分别为19 795 kW、17 655 kW、17 655 kW、21 935 kW;风电场主要由风力发电机组、箱式变压器、集电线路和风电场升压变压器组成电气系统。这些高感性设备运行时伴随着有功功率损耗的同时也会消耗一定的无功功率。

假设双馈型风力发电机组按照恒功率因数0.98的无功控制方式运行时,33台机组相应的无功功率如图2所示^[16]。

根据双馈异步风力发电机组的无功约束条件,按照恒定功率因数运行的风力发电机组,根据有功功率的预测值得到的无功功率都满足约束条件。

3.2 优化结果

仿真是在CPU为Core (TM) i5 2.5 GHz的

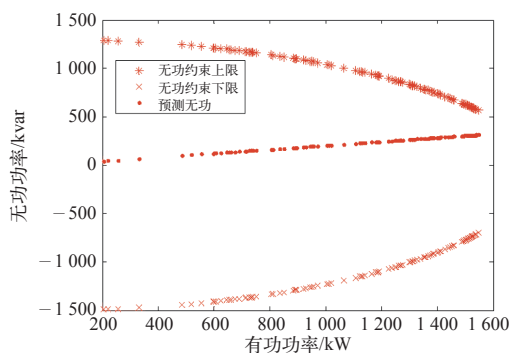


图2 双馈型风力发电机组的P-Q图

Dell-PC、Matlab7.8环境下进行。

粒子群优化算法的参数设置：粒子群规模为40，迭代次数为100次，惯性权重 $w_{\max}=0.9$ ， $w_{\min}=0.4$ ，加速因子 $c_1=c_2=2.05$ 。经过计算得到最优解的迭代过程如图3所示，线路有功损耗最小为0.014 240(pu)。

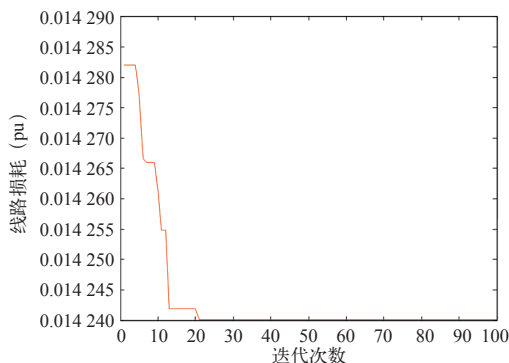


图3 粒子群算法的进化过程

遗传-粒子群优化算法的参数设置：粒子群规模为40，遗传迭代为20次，惯性权重 $w_{\max}=0.9$ ， $w_{\min}=0.4$ ，加速因子 $c_1=c_2=2.05$ ，交叉概率 $P_c=0.7$ ，变异概率为 $P_m=0.05$ 。经过计算得到最优解的迭代过程如图4所示。线路有功损耗最小为0.014 223(pu)。

从图3和图4的进化过程中可以得出，遗传-粒子群算法的结果相对较优，以下主要分析遗传-粒子群算法的机组组合优化结果。

3.3 遗传-粒子群优化结果分析

以线路功率损耗最小为目标，考虑调度周期的4个时段中电力系统负荷调度目标和风电场内集电系统的功率损耗，经过遗传-粒子群优化算法得

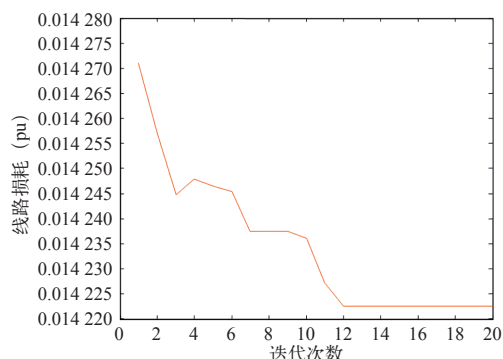


图4 遗传-粒子群算法的进化过程

到调度的4个时间段的总有功出力为20 216 kW、18 100.25 kW、18 386.12 kW和22 089.39 kW。

对于平衡节点16，确定节点电压为1.05(pu)，相角为 0° ；PV节点64，确定节点电压为1.05(pu)；其余PQ节点，根据机组的运行状态确定节点的注入功率；变压器的电压比都定为1.05。

调度周期的4个时段中，线路损耗有功功率的标么值为0.014 223，线路损耗无功功率的标么值为0.167 981，转化为有名值，有功功率为710.7 kW，无功功率为8 398.05 kvar。4个时段的功率损耗分别为：第一时段分别为184.8 kW、2 007.9 kvar；第二时段分别为148.45 kW、2 055.95 kvar；第三时段分别为149.5 kW、2 164.2 kvar，第四时段分别为227.95 kW、2 170 kvar。

最终风力发电机组送到风电场内变压器站低压端的有功功率：第一时段为19 988.05 kW，第二时段为17 950.75 kW，第三时段为18 237.67 kW，第四时段为21 904.59 kW，这个值与调度要求有出入，未来4个时段电网侧负荷调度指令分别为19 795 kW、17 655 kW、17 655 kW和21 935 kW。

在4个时段的潮流计算中，从平衡节点16可以得出，该节点的注入功率标么值分别为 $-0.004 7 + j(-0.209 6)$ 、 $-0.005 933 + j(-0.188 527)$ 、 $-0.011 629 + j(-0.187 506)$ 和 $0.001 474 + j(-0.225 177)$ ，也就是意味着需要第一时段到第三时段从节点16送出有功功率和无功功率，但在第四时段需要注入有功功率。

运行的风力发电机组的母线电压基本都维持在1.01(pu)，相角也均能满足要求。由于潮流计算

中设定每台发电机母线电压初始值为1(pu), 当发电机不投入运行时, 潮流计算中处理成中间不带电源的节点或者发电机空载状态, 则可以判断出1(pu)左右的发电机不运行。

4 结束语

本文中最优潮流计算的目标函数是风电场内集电系统网损最小, 约束条件主要有风电场出力满足电网调度要求、风力发电机有功输出的功率上下限、风力发电机无功输出的功率上下限、风力发电机端电压上下限以及变压器电压比上下限等。通过最优潮流计算, 得到风电场内机组功率最优分配, 经过分析得到以下结论。

1) 依据华北某49.5 MW风电场, 建立风电场内潮流计算模型, 确定平衡和PV节点的电压、相角值, 通过粒子群和遗传-粒子群算法对场内机组组合寻优, 得到线路有功损耗分别为0.014 240(pu)和0.014 223(pu), 遗传-粒子群算法结果较优。

2) 通过分析可知运行的风力发电机的机端电压在1.01(pu)左右, 满足电压的安全约束条件, 线路有功损耗达到最小; 在限电的情况下, 风力发电机组以恒定功率因数的无功控制运行, 输出的有功功率满足系统需要, 且不需投切无功补偿装置。

3) 由于本文机组组合优化的目标函数是线路有功损耗最小, 并没有考虑机组运行工况下的疲劳损伤和起停机工况下的疲劳损伤, 从机组组合的结果可以看出, 机组的起停机次数较多。

参考文献

- [1] 肖创赢. 欧洲和美国的风电发展的经验和启示 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 郭诚谦. 考虑排放和经济性的风能的大量渗透发电调度 [J]. 能源转换和管理, 2010, 51 (1): 89-97.
- [3] Carpentier J. Contribution a l'etude du dispatching economique [J]. Bull Soc Francaise des Electriciens, 1962, 3 (8): 431-447.
- [4] Tapia G, Tapia A, Ostolaza J X. Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances [J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 2006, 21 (12): 909-920.
- [5] 雷亚洲, 王伟胜, 阴永华. 风力发电集成系统中的最佳潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 26 (6): 18-21.
- [6] Quanyuan J, Guangchao G. A reduced-space interior point method for transient stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (3): 1232-1240.
- [7] Q/GDW 432—2010 风电调度运行管理规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [8] Zhang Jinhua, Liu Yongqian, Tian De. Optimal power dispatch in wind farm with life extension of wind turbine blades as target [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5 (3): 8-11.
- [9] Liu J Z, Liu Y, Zeng D L, et al. Optimal short-term load dispatch strategy in wind farm [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55 (4): 1140-1145.
- [10] Carlos F Moyano, Joao A Pecos Lopes. An optimization approach for wind turbine commitment and dispatch in a wind park [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79 (1): 71-79.
- [11] Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, et al. 风力发电系统的功率变换与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [12] 潘柏崇. 风电场电气系统设计技术的研究与应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [13] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [14] Holland J H. Adaptation in natural and artificial system [M]. Cambridge: MIT Press, 1975.
- [15] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6 (2): 182-197.
- [16] 阎洁, 刘永前, 韩爽, 等. 风力发电组预测及其使用优化相关向量机的不确定度分析 [J]. 可再生和可持续能源评论, 2013 (27): 613-621.

(收稿日期: 2016-03-03) EA