

# 含风电机组的配电网无功优化补偿

刘学平, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 根据风电机组各运行状态发生的概率, 计算出风机有功输出的期望, 来近似代替随机变化的输出功率。用最大、一般和最小负荷运行方式代替规划时期的运行状况。建立了最大负荷方式下电容器投资成本最小、节省电能损失费用和静态电压稳定性最大的多目标优化模型, 运用 NSGA-II 算法进行求解; 一般及最小负荷方式下以节省电能损失费用最大为目标进行优化。三种运行方式通过补偿后节省的资金最多来协调, 得出电容器的最优配置, 实现整体最优。算例验证了模型和算法的可行性。

**关键词:** 分布式发电; 无功优化; 风电机组; Pareto 最优解; 遗传算法

## Optimal reactive power planning in distribution system with wind power generators

LIU Xue-ping, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The active power output of the wind power generators is calculated by the probability of running state, and the expectations of active power are used to replace the randomly changing output. Considering light, normal, and heavy load operation mode, the mathematical model has been established. In the heavy load operation mode, the multipurpose optimal model is proposed which aims to minimize the investment cost, maximize the level of static voltage stability and the savings in energy cost, the problem is solved by NSGA-II algorithm. In the light and normal load operation mode, the optimal model is proposed which aims to maximize the savings in energy cost. The three operating modes are coordinated by the maximum savings when reactive power has been compensated, the optimum allocation of the capacitor is obtained, and the whole optimization is realized. An example verifies the feasibility of the model and the algorithm.

**Key words:** distributed generation; reactive power optimization; wind power generator; Pareto optimal solution; Genetic algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0130-06

## 0 引言

分布式电源在我国迅速发展, 对缓解用电紧张的局面发挥了重要的作用。但分布式电源的引入给传统配电网的电能质量及调压模式带来了较大的影响, 同时也给配电网无功优化带来了更多的不确定因素, 例如风电机组的输出功率随风速随机变化<sup>[1-4]</sup>, 光伏发电输出功率随太阳光照强度变化等。

本文考虑了风力发电机组的影响, 根据风电机组的输出功率随风速随机变化的特点, 将风电机组分为三种运行状态, 即额定运行、欠额定运行和停机状态, 再由风机各运行状态发生的概率, 计算出风机的有功输出的期望, 近似代替随机变化的有功

输出, 解决了含风电机组的无功优化中风机输出不确定的问题。

在无功优化规划问题上, 国内外学者已有了一定的研究。文献[5]提出了用电力系统分区方法结合灵敏度分析来确定无功源的最佳配置地点, 以实现无功补偿分区平衡, 但系统分区结果的好坏会直接影响到无功补偿地点选择的效果。文献[6]利用经济性目标对节点无功注入的灵敏系数计算, 确定配电网补偿电容量的最佳位置和最佳容量, 但考虑的目标单一。文献[7]以系统无功补偿后有功能耗费用为目标, 建立了包含分布式发电的无功优化模型, 并采用 SVC 做为电网补偿设备。虽然 SVC 能连续调节, 但安装费用高, 目前尚未广泛应用。

在无功优化规划中, 本文将配电网负荷分为最大、一般和最小方式进行研究, 建立了多目标模型,

基金项目: 教育部博士点基金项目 (20070610109)

最后用最大化补偿后节省的资金对这三种运行方式进行协调, 实现了整体最优。同时综合考虑了损失费和投资费之间的关系, 用等年值法将投资费用折合为等年值, 与电能损失费用统一起来, 从而在经济评价方面更合理。

含风电机组的配电网无功优化问题是非线性 0-1 规划问题, 求解该类规划问题时很多经典的非线性和线性规划算法容易由于初始点选择不当而陷入局部最优<sup>[5]</sup>。考虑到遗传算法解决这类问题的独特优势<sup>[8-10]</sup>, 本文采用改进非劣解排序遗传算法 (NSGA-II) 解决上述问题, 该算法能够协调各目标函数之间的关系, 找出使各目标函数能尽量达到比较大(或比较小)的 Pareto 最优解集, 实现了真正的多目标优化。由该算法求得方案各有优势, 兼顾各个规划目标。

## 1 基于概率思想的风电机组输出功率确定

图 1 为典型风机输出的有功与风速间的关系曲线<sup>[11]</sup>。根据不同时段的风速由图 1 可得相应时段风力发电机的有功输出, 其中,  $v_i$ 、 $v_r$ 、 $v_o$  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。从图 1 可知, 风电机组有三种运行工况, 即额定运行、停机、欠额定运行。额定运行状态(风速范围  $v_i < v < v_o$ ) 对应的输出功率为风机额定有功功率  $P_r$ , 停机状态(风速范围  $v \leq v_i$  或  $v > v_o$ ) 输出为零, 欠额定运行状态(风速范围  $v_i < v < v_r$ ) 对应的有功输出介于零和额定值之间, 与风速的具体大小有关系, 本文欠额定输出场景的输出功率取为相应风速范围内输出功率的平均值。

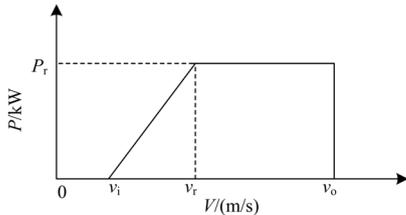


图 1 风电机组功率特性曲线

Fig.1 Power curve of a wind power generator

一般而言, 风电机组的输出功率是不可控的随机变量, 其随机性主要取决于风力发电机安装地点的风速随机性。许多学者对风速的统计规律进行了研究, 目前一般认为风速  $v$  服从 Weibull 分布<sup>[12]</sup>:

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

式中:  $c$  和  $k$  分别为尺度参数和形状参数, 可以根据现场实测风速的历史数据采用最小二乘法辨识。在已

知风速随机分布参数的条件下, 风电机组输出功率对应的三种运行状态发生的概率  $h\{ob_1\}$ 、 $h\{ob_2\}$  和  $h\{ob_3\}$  可由公式 (2) ~ (4) 计算得到<sup>[7]</sup>:

$$h\{ob_1\} = h\{v_r < v \leq v_o\} = \int_{v_r}^{v_o} f_v(v) dv \quad (2)$$

$$h\{ob_2\} = h\{v \leq v_i\} + h\{v > v_o\} = 1 - \int_0^{v_o} f_v(v) dv + \int_0^{v_i} f_v(v) dv \quad (3)$$

$$h\{ob_3\} = h\{v_i < v \leq v_r\} = \int_{v_i}^{v_r} f_v(v) dv \quad (4)$$

以上将风电机组各运行状态的发生概率求得, 于是风电机组的输出功率的期望  $P$  可由式 (5) 得出:

$$P = \sum_{i=1}^3 (P_i h\{ob_i\}) = P_r h\{ob_1\} + \frac{1}{2} P_r h\{ob_3\} \quad (5)$$

用风电机组的输出功率的期望  $P$  近似代替随机变化的有功输出, 由此解决了含风电机组的无功优化中风机输出不确定的问题。

## 2 配电网无功优化补偿模型

本文把配电网无功补偿规划这问题分解为最大负荷方式、一般负荷方式和最小负荷方式三个子模型, 对于系统无功补偿设备的投资费用仅在最大负荷方式时考虑, 对于这三个子模型用最大化补偿后节省的资金来协调统一, 这样既使模型更符合实际情况, 又简化了问题。

### 2.1 最大负荷方式

#### 2.1.1 目标函数

##### (1) 投资成本

无功补偿设备的投资费用在最大负荷方式下计算, 则投资费用  $Z$  为

$$Z = \sum_{i=1}^n (Q_i C_i) \quad (6)$$

式中:  $Z$  为无功补偿设备的投资费用;  $Q_i$  为各节点无功补偿设备的容量;  $C_i$  为单位容量无功补偿设备投资费用系数;  $n$  为补偿节点的个数。

##### (2) 补偿后配电网可节省的电能损失费用

全年在最大负荷方式下补偿后可节省的网损费用  $F_1$  表示为

$$F_1 = (P_{L_{\max}} - P'_{L_{\max}}) t_{\max} K_D \quad (7)$$

式中:  $P_{L_{\max}}$  为补偿前最大负荷方式下的网损;  $P'_{L_{\max}}$  为补偿后最大负荷方式下的网损;  $t_{\max}$  为最大负荷方式下的运行时间;  $K_D$  为系统电价。

## (3) 静态电压稳定性

配电网电压稳定性指标

$$L_{ij} = 4[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})V_i^2] / V_i^4 \quad (8)$$

式中:  $R_{ij}$  和  $X_{ij}$  分别为支路  $ij$  的电阻和电抗;  $P_j$  和  $Q_j$  分别为流入支路末节点  $j$  的有功和无功功率;  $V_i$  为首节点  $i$  的电压。整个配电网的电压稳定指标为各支路中  $L_{ij}$  的最大值, 即:

$$L = \max \{L_1, L_2, \dots, L_N\} < 1 \quad (9)$$

$L$  对应的支路为系统最薄弱的支路, 因此可以根据  $L$  值与临界值 1.0 的距离来判断系统电压稳定的程度。显然, 对于电压稳定的配电网电压稳定指数应该远远小于 1。

## 2.1.2 约束条件

潮流约束为节点功率方程:

$$h(x) = \begin{cases} P_i - V_i \sum_{j=1}^b V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j=1}^b V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_i$ ,  $Q_i$  为各节点的注入有功、无功功率;  $V_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $G_{ij}$  为支路电导;  $B_{ij}$  为支路电纳;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  电压相角差;  $b$  为与节点  $i$  相关联的支路数。

电压上下限约束为:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (11)$$

可调变压器变比的上下限约束:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \quad (12)$$

补偿点  $i$  的无功补偿容量约束:

$$0 \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (13)$$

其中:  $V_{\min}$  和  $V_{\max}$  分别为节点  $i$  电压的上下限;  $K$  为可调变压器变比,  $K_{\min}$  和  $K_{\max}$  为可调变压器变比的上下限;  $Q_i$  为节点  $i$  的无功补偿容量;  $Q_{\max}$  为节点  $i$  的上限。

## 2.2 一般和最小负荷方式

由于无功补偿设备的投资已在最大负荷方式下计入了, 当系统处于一般负荷方式或最小负荷方式时, 将最大负荷方式下的补偿设备作为现有补偿, 不考虑投资问题, 目标函数中只需考虑电能损失。约束条件同最大负荷运行方式。

全年在一般负荷方式下, 补偿后可节省的电能损失费用  $F_2$  为:

$$F_2 = (P_{\text{Lnor}} - P'_{\text{Lnor}}) \times t_{\text{nor}} \times K_D \quad (14)$$

全年在最小负荷方式下, 补偿后可节省的电能损失费用  $F_3$  为:

$$F_3 = (P_{\text{Lmin}} - P'_{\text{Lmin}}) \times t_{\text{min}} \times K_D \quad (15)$$

其中:  $P_{\text{Lnor}}$  和  $P_{\text{Lmin}}$  分别为一般负荷和最小负荷方式下的网损;  $t_{\text{nor}}$  和  $t_{\text{min}}$  分别为一般负荷和最小负荷方式下的运行时间。

## 2.3 潮流计算中风电机组的处理

本文选用的风机为异步风力发电机, 在潮流计算中可以将其作为电压静特性节点来处理。风电机组的功率方程同式 (10), 吸收的无功  $Q_i$  是机端电压的函数  $f(V)$ , 由机端电压和异步发电机组的参数决定。在用牛顿法<sup>[13]</sup>进行潮流计算时, 只需修改雅克比矩阵中的对应元素  $V_i \partial \Delta Q_i / \partial V_i$ , 其他元素的表达式及计算步骤与传统的不含风电机组的潮流计算无差别。

## 2.4 无功补偿后节省的资金的计算

在对电力系统无功补偿优化规划进行经济评价时, 应以新增无功补偿设备的投资费用和电能损失费用为评价的主要内容。由于无功补偿设备的投资费用是一次性的, 且在较长时间内发挥作用, 而电能损失费用是逐年计算的, 两者必须通过一定的关系协调起来。所以, 本文将无功补偿设备的投资费用转换为等年值, 现值和等年值可通过转换系数  $A$  进行转换, 于是无功补偿设备的投资费用转换为等年值  $Z'$ , 表示为:

$$Z' = ZA = \sum_{i=1}^n (Q_i C_i) \cdot \frac{a(1+a)^n}{(1+a)^n - 1} \quad (16)$$

其中:  $a$  为贴现率;  $n$  为补偿设备使用年限。

则无功补偿后每年可节省的总资金  $S$  为:

$$S = F_1 + F_2 + F_3 - Z' \quad (17)$$

等年值法综合考虑了损失费和投资费之间的关系, 在经济评价方面更合理。

## 3 配电网无功优化规划计算步骤

本文在计算最大方式下涉及到三个目标, 考虑到多目标遗传算法——NSGA-II<sup>[14]</sup>求得的 Pareto 最优解分布均匀, 收敛性和鲁棒性好, 于是在最大负荷方式下采用该方法。在一般和最小负荷方式下, 由于只涉及到一个目标函数, 采用一般遗传算法就能求得比较满意的解。

## 3.1 最大负荷方式下计算流程

(1) 用式 (1) ~ 式 (5) 计算出风机的有功输出, 输入最大负荷运行方式数据, 随机产生无功补偿位置和容量的初始种群  $M$ , 无功补偿位置的范围为 0~最大节点号, 无功补偿容量  $Q_i = m_i Q_s$ ,  $Q_s$  为单位编号对应的额定容量;

(2) 根据每个个体的目标函数值 (投资、节省

的费用、静态电压稳定指标)进行快速非支配排序,通过遗传算法的选择、交叉、变异三个基本操作,得到第一代子代种群;

(3) 从第二代开始,将父代种群和子代种群合并,进行快速非支配排序,同时对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算,根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群;

(4) 通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群,依此类推,直到满足程序结束的条件,得到  $N$  个位置和容量的 Pareto 解及每个解补偿后可节省的网损费用  $F_1$ 。

### 3.2 一般和最小负荷方式计算流程

由于在最大负荷方式时确定了无功补偿的地点和容量,其他运行方式时就在最大负荷方式决定的无功补偿位置和容量限制下进行优化。由于在最大负荷方式时确定了补偿的最大值,一般和最小负荷方式时不再增加电容补偿。

在一般和最小负荷方式进行无功补偿优化时仅以系统可节省的网损费用最大为目标函数,依次分别在最大方式时得到的  $N$  个 Pareto 解的条件下使用遗传算法进行优化,得到一般负荷和最小负荷运行方式下节省的网损费用  $F_2$  和  $F_3$ 。

### 3.3 最终方案的选择

从  $N$  个位置和容量的 Pareto 解中选择无功补偿后每年可节省的资金  $S$  ( $S$  的计算见式 (17)) 最大的方案。

## 4 算例

本文以 IEEE33 节点配电网系统(如图 2 所示)为例,应用上面所述方法进行规划。该系统电压等级为 10 kV,节点 0 为平衡节点。原始线路参数见文献[15]。节点 17 和节点 32 分别有一台异步风力发电机,其技术参数如表 1 所示<sup>[16]</sup>,机端额定电压 690 V,切入风速、额定风速和切出风速分别为 5、8 和 22 m/s,Weibull 分布参数  $c$  和  $k$  分别为 8.5 和 2.0。风机在额定运行状态、停机状态和欠额定运行状态输出功率分别为 0.6、0 和 0.3 MW。在计算过程中,基准容量取为 1 MVA,新增无功补偿设备的单组容量取为 50 kvar,每组电抗器及电容器的综合投资为 70 元/kvar(包括维护、管理费用),补偿设备有效使用年限取为 20 年,贴现率取为 0.1,电价取为 0.6 元/kWh。系统年运行时间按 8 760 h 计,设最大负荷方式下运行时间为 2 190 h,一般负荷方式下运行时间为 4 380 h,最小负荷方式下运行时间为 2 190 h。

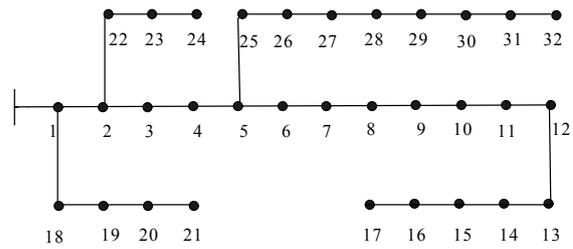


图 2 IEEE33 节点配电网系统

Fig.2 IEEE33 distribution network system

表 1 异步风力发电机的电气参数

Tab.1 Electrical parameters of wind turbine induction generator

参数	$X_1/\Omega$	$X_2/\Omega$	$R_2/\Omega$	$X_m/\Omega$
数值	0.762	0.232 89	0.007 59	3.447 97

在最大负荷运行方式下使用 NSGA-II 算法进行优化,得到 6 个优化方案,如表 2 所示。这 6 个方案各具优势,同时兼顾了电容器投资成本、节省的电能损失费用和静态电压稳定性,都为 Pareto 最优解。每个方案的第一行为在最大负荷运行方式下的优化结果。第二行和第三行分别为在一般负荷和最小负荷方式的在优化结果。其中,括号外数字为配置节点,括号内数字为电容器组数。

表 2 无功优化方案

Tab.2 Schemes for reactive power optimization

方案	优化结果	
1	最大	7 (6)、13 (4)、16 (2)、29 (4)、31 (6)
	一般	7 (6)、13 (4)、16 (2)、29 (4)、31 (6)
	最小	7 (6)、13 (4)、16 (2)、29 (4)、31 (6)
2	最大	6 (7)、12 (6)、17 (3)、29 (6)、31 (6)
	一般	6 (6)、12 (5)、17 (3)、29 (6)、31 (6)
	最小	6 (6)、12 (5)、17 (3)、29 (6)、31 (6)
3	最大	7 (4)、13 (9)、18 (7)、29 (8)、31 (8)
	一般	7 (4)、13 (1)、18 (6)、29 (8)、31 (8)
	最小	7 (4)、13 (3)、18 (4)、29 (7)、31 (8)
4	最大	3 (6)、7 (11)、17 (4)、29 (15)、31 (7)
	一般	3 (4)、7 (11)、17 (3)、29 (12)、31 (7)
	最小	3 (6)、7 (8)、17 (3)、29 (12)、31 (5)
5	最大	5 (11)、12 (12)、24 (9)、29 (10)、30 (12)
	一般	5 (10)、12 (7)、24 (8)、29 (10)、30 (9)
	最小	5 (8)、12 (6)、24 (8)、29 (9)、30 (7)
6	最大	2 (12)、9 (15)、23 (10)、28 (11)、30 (15)
	一般	2 (8)、9 (10)、23 (9)、28 (10)、30 (11)
	最小	2 (7)、9 (7)、23 (9)、28 (10)、30 (8)

表 3 为六个方案具体参数比较,其中节省的总资金  $S$  的值由式 (16) 和式 (17) 得出,以方案 1

为例,  $S = F_1 + F_2 + F_3 - Z' = 14.6248 + 31.2732 + 11.4318 - 7.7 \times 0.1175 = 56.425$ , 其余方案计算方法相同。因为方案 2 节省的总资金最多, 所以最终选择方案 2, 该方案同时综合考虑了投资成本、节省电能损失费用和静态电压稳定性, 实现了整体最优。从表 3 可以看出, 并不是投资越大, 无功优化的效果越好, 例如方案 6, 投资最大, 效果却不是最理想。表 4 为各方案静电电容器利用率的比较, 结合表 2 可以看出, 在高投资方案下, 如方案 3~6, 电容器的利用率都不高, 得不到充分利用; 而在低投资下, 如方案一和方案二, 电容器得到了较充分的利用。

表 3 优化结果比较

Tab.3 Comparison of optimal schemes

方案	投资/万元	节省的网损费用/(万元/年)	电压稳定指标	节省的总资金 S/(万元/年)	
1	7.7	$F_1$	14.624 8	0.069 2	56.425
		$F_2$	31.273 2	0.069 2	
		$F_3$	11.431 8	0.051 9	
2	9.8	$F_1$	29.407 3	0.063 3	75.165 6
		$F_2$	34.689 6	0.063 3	
		$F_3$	12.220 2	0.048 8	
3	12.6	$F_1$	23.914 8	0.070 8	69.817 1
		$F_2$	35.162 6	0.070 7	
		$F_3$	12.220 2	0.051 8	
4	15.05	$F_1$	24.348 4	0.067 3	72.735 4
		$F_2$	37.317 6	0.058 6	
		$F_3$	12.837 8	0.045 7	
5	18.9	$F_1$	24.361 5	0.061 9	73.636 3
		$F_2$	38.368 8	0.055 0	
		$F_3$	13.126 8	0.043 7	
6	22.05	$F_1$	23.652	0.057 6	71.478 8
		$F_2$	37.580	0.053 4	
		$F_3$	12.837 7	0.041 7	

表 4 静电电容器利用率

Tab.4 Static capacitor utilization ratio

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
最大	100%	100%	100%	100%	100%	100%
一般	100%	92.8%	77.1%	86.0%	81.4%	76.2%
最小	100%	92.8%	74.2%	79.1%	70.0%	65.1%

## 5 结语

(1) 研究了含风力发电机的配网无功优化规划问题。利用风机各运行状态发生的概率, 计算出有

功输出的期望, 近似代替随机变化的有功输出, 解决了含风电机组的无功优化中风机输出不确定的问题。

(2) 在配电网中用最大、一般和最小负荷方式代替规则时期的运行状况, 建立了三种方式下的优化模型, 综合考虑了损失费和投资费之间的关系, 用等年值法将投资费用折合为等年值, 与电能损失费用统一起来, 从而在经济评价方面更合理。

(3) 用 NSGA-II 算法进行求解, 该算法能够协调各目标函数之间的关系, 找出使各目标函数都比较优的 Pareto 最优解集, 算例表明, 该算法可得到较满意的方案。

## 参考文献

- [1] 牟聿强, 王秀丽, 别朝红, 等. 风电场风速随机性及容量系数分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 65-70.  
MU Yu-qiang, WANG Xiu-li, BIE Zhao-hong, et al. Analysis of wind speed probability distribution and wind turbine generator capacity factor[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 65-70.
- [2] LI Ling, ZENG Xiang-jun, ZHANG Ping. Wind farms reactive power optimization using genetic/tabu hybrid algorithm[C]. //2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2008: 1272-1276.
- [3] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.  
CHEN Shu-yong, SHEN Hong, ZHANG Yang, et al. Researches on the compensation and control of reactive power for wind farms based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 1-6.
- [4] Spahic E, Balzer G. Power fluctuation from a large wind farm[C]. //2005 International Conference on Future Power Systems. 2005.
- [5] 胡彩娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(3): 46-49.  
HU Cai-e, YANG Ren-gang. Optimal allocation of reactive Power sources using net work partition[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2004, 16(3): 46-49.
- [6] Delfanti M, Granelli G P, Marannino P, et al. Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1041-1046.
- [7] 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 Yi-xin, et al. Optimal reactive power planning of radial distribution systems

- with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (14): 20-24.
- [8] 余后强, 金升平. 遗传算法在非线形规划中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5 (19): 5252-5253.  
YU Hou-qiang, JIN Sheng-ping. Application of genetic algorithms for non-linear programming problem[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5 (19): 5252-5253.
- [9] 章文俊, 程浩忠, 王一, 等. 基于树形结构编码单亲遗传算法的配电网优化规划[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (5): 154-160.  
ZHANG Wen-jun, CHENG Hao-zhong, WANG Yi, et al. Distribution network optimal planning based on tree structure encoding partheno genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (5): 154-160.
- [10] 刘沛津, 谷立臣, 韩行. 基于内点法与改进遗传法的无功规划优化混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17): 56-59.  
LIU Pei-jin, GU Li-chen, HAN Xing. Reactive power planning based on IPM and improved GA hybrid method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17): 56-59.
- [11] 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 Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 1-5.
- [12] Patel M R. Wind and solar power systems design, analysis, and operation[M]. CRC Press, 2008.
- [13] 孙健, 江道灼. 基于牛顿法的配电网 Zbus 潮流计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (15): 40-44.  
SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A Zbus power flow calculation method for distribution network based on Newton method[J]. Power System Technology, 2004, 28 (15): 40-44.
- [14] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
ZHENG Jin-hua. Multi-objective evolutionary algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [15] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏, 等. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng, et al. The complex distribution networks simplification analysis and its optimization[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [16] Andrés E, Feijóo, José Cidrós. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (1): 110-115.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2009-12-18

作者简介:

刘学平 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 分布式发电; E-mail: liuxueping2004@163.com

刘天琪 (1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

李兴源 (1945-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

(上接第 129 页 continued from page 129)

- [10] 孙才华, 宗伟, 何磊, 等. 一种任意整数次谐波电压实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (18): 70-73.  
SUN Cai-hua, ZONG Wei, HE Lei, et al. A real time detection method for any integral harmonic voltage based on instantaneous reactive power theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (18): 70-73.
- [11] 孙生鸿, 李鹏, 陈志业. 谐波及无功电流的直接检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (19): 52-55.  
SUN Sheng-hong, LI Peng, CHEN Zhi-ye. Harmonic and reactive currents detection for active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (19):

52-55.

收稿日期: 2009-11-05; 修回日期: 2009-12-24

作者简介:

陈永延 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量问题及电力电子在电力系统中的应用; E-mail: eechenyy@163.com

吴为麟 (1944-), 男, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电能质量分析与研究和分布式发电的研究;

邹家勇 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护、电力电子技术和电磁场理论及其应用的研究。