

电力系统低频减载优化整定研究

吴 丹, 王晓茹, 陈义宣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 现有单机单负荷整定、实际系统校核的整定模式中, 如果出现校核时不满足技术规定要求, 就需要手工调整整定值。手工调整难以得到满足要求的整定值, 导致在某些系统功率缺额时低频减载过切或欠切。基于将技术规定作为约束的低频减载优化模型, 提出了一种新的计及实际电网动态频率特性的低频减载优化整定差分算法, 使得整定的方案在系统校核功率缺额集下满足技术规定的要求。利用 PSS/E 仿真软件, 进行了对某实际电网的低频减载方案整定, 证明了该方法的正确有效, 避免了过切或欠切, 有效防止了频率崩溃, 同时还减小了系统切负荷总量。

关键词: 差分算法; 低频减载; 电力系统仿真软件

Abstract: The actual single-machine model scheme often leads to the final frequency suspension and overshoot in some cases when verifying in actual power system, so it is difficult to meet the technical requirements. A new scheme based on differential evolution considering multi-machine dynamic frequency under a constraint optimization model is proposed by the purpose of making all power deficiency meet technical requirements. Under-frequency load shedding scheme under an actual power system is carried out by the use of PSS/E simulation software, which shows that the method is correct and effective to avoid the frequency overshoot and suspension, effectively preventing the frequency from collapsing and minimizing the total load shedding.

Key words: differential evolution; under-frequency load shedding; power system simulation software

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)04-0001-04

0 引 言

低频减载装置是电力系统稳定运行的最后一道防线, 它力图通过切负荷阻止系统频率的继续下降, 从而避免系统出现“频率崩溃”。低频减载装置整定的正确性是影响控制有效性的的重要因素。

当前低频减载整定研究主要是依照中国现行电力行业标准 DL 428-91《电力系统自动低频减负荷技术规定》推荐的传统单机带集中负荷模型^[1, 2]。它将电力系统中多机频率动态行为平均等效为单机系统的动态行为, 依据系统平均频率进行低频减载整定。因为没有计及实际电网中功率的扰动导致频率变化随时间和空间分布^[3]和负荷点电压的变化对频率动态过程的影响^[4], 出现了在多机系统校核时不满足技术规定要求的情况, 导致某些功率缺额时低频减载欠切或过切。有的整定方法^[5, 6]是利用暂态时域仿真软件校核已有的低频减载方案, 根据经验知识不断人工调整整定值直到满足技术规定要求, 工作繁

琐。因此设计出计及实际系统动态频率特性, 不用人工调整整定值的低频减载整定方法显得尤为重要。

由于低频减载优化整定是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题, 该问题没有具体的解析式, 因此无法利用解析的优化方法求得低频减载整定值。在借助电力系统仿真软件 PSS/E 考虑了频率动态过程具有时空分布的这一特点, 利用差分算法搜索低频减载方案, 不再需要手工调整整定值, 以技术规定对动态频率和稳态频率的要求作为约束, 提出了一种新的计及实际电网动态频率特性的低频减载优化整定差分算法。通过某实际系统低频减载整定, 验证了该方法的有效性。

1 低频减载优化模型

在低频减载方案整定过程中, 对各种典型运行方式下不同功率缺额值进行仿真, 根据电力系统自动低频减负荷技术规定^[1], 在满足动态频率和稳态频率情况下, 对功率缺额集中的所有功率缺额值的切负荷总量要尽量小, 提高系统的经济性。数学模型描述如

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (90610026)

下。

1.1 目标函数

$$f(x) = \min_x \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{ij}} [|\Delta P_{ij}^{\text{sh}}(x) - \Delta P_{ij}^{\text{shed}^*}(x)|] \quad (1)$$

$$x = [k, f_{h(1)}, t_{(1)}, \Delta P_1, \dots, f_{h(i)}, t_{(i)}, \Delta P_i, \dots, f_{h(k)}, t_{(k)}, \Delta P_k] \quad (2)$$

式中, x 为低频减载整定参数; k 为低频减载切负荷总轮次; $f_{h(i)}$ 为低频减载第 i 轮启动频率; $t_{(i)}$ 为低频减载第 i 轮动作延时; ΔP_i 为低频减载第 i 轮切负荷量。 N 为典型运行方式的个数, 第 i 个方式下考虑 N_{ij} 个功率缺额; $\Delta P_{ij}^{\text{sh}}$ 为低频减载的切负荷比列; $\Delta P_{ij}^{\text{shed}^*}(x)$ 为功率缺额对应的集中切负荷控制的最小切负荷比例因子。

1.2 典型运行方式及功率缺额集的选择

为简化装置, 低频减载装置通常只采集少量就地信息, 故其减载量在相当长的时间 (例如 1 年) 内不变, 装置的减载量一旦设置好, 就不再随运行方式和故障而改变。因此, 优化低频减载参数时应该考虑各种可能出现的运行方式和可能发生的功率缺额故障。

故障集的设置应根据电力系统安全稳定导则^[7]和电力系统自动低频减负荷技术规定^[1]的要求, 并结合实际系统的具体情况, 不同运行方式的故障集可能不同。

1.3 $\Delta P_{ij}^{\text{shed}^*}$ 最优切负荷因子的求取

假设集中切负荷 ΔP^{shed^*} (P^{shed^*} = 切负荷总量 / 总负荷量, 是个比例因子) 后, 稳态频率恰好能恢复到所允许的最小值 f_{min} , 且动态频率满足要求, 这是保证系统频率稳定的最小切负荷量。如果低频减载装置切除的负荷恰好为 P^{shed^*} , 这是最理想的效果, 与该值偏离越大, 造成欠切或过切的可能性就越大。因此低频减载的切负荷比例应该尽量接近与它对应的集中切负荷控制的最小切负荷比例。

计算 P^{shed^*} 的具体步骤如下。

1) 忽略系统网损及负荷压变效应, 根据发电机组和负荷的静态频率特性, 预估待切负荷比例 ΔP_{shed}^* (切除 ΔP_{shed}^* 负荷后, 稳态频率恰好为 f_{min})。

若系统频率下降至 f_{min} , 发电机的总出力 P_G 如式 (3) 所示。

$$P_G = \sum_{i=1}^N [P_{G0,i} + (\frac{1}{R_i})(\frac{P_{G\max,i}}{f})(f - f_{\text{min}})] \quad (3)$$

其中, N 为系统运行的发电机总数; $P_{G0,i}$ 为第 i 台发电机的初始有功出力; R_i 为第 i 台发电机的调差系数;

f 为系统的额定频率; $P_{G\max,i}$ 为第 i 台发电机最大有功出力。如果 $P_{G,i} > P_{G\max,i}$, 即发电机出力越限, 应修改 $P_{G,i}$, 即 $P_{G,i} = P_{G\max,i}$ 。

计及负荷的频率调节效应, 系统频率下降至 f_{min} , 总负荷量 P_L 如下。

$$P_L = P_{L0} [1 - K_D (f - f_{\text{min}}) / f] \quad (4)$$

其中, P_{L0} 为初始总负荷量; K_D 为负荷的频率调节效应系数。

计算出 P_G 、 P_L 后, ΔP_{shed}^* 可通过式 (5) 求得。

$$\Delta P_{\text{shed}}^* P_{L0} = P_G - P_L \quad (5)$$

2) 利用暂态稳定仿真程序, 计算切除 ΔP_{shed}^* 负荷后系统的动态频率 (最大、最小值) 和稳态频率, 如果动态频率不满足要求或稳态频率不等于 f_{min} , 则以 ΔP_{shed}^* 为中心点, 利用二分法进一步修正 ΔP_{shed}^* , 直到稳态频率为 f_{min} 且动态频率满足要求。

3) 此时求出 ΔP_{shed}^* 的即为 ΔP^{shed^*} 。

1.4 约束条件

在整定低频减载方案时, 式 (1) 的不等式约束包括切负荷总量、切负荷时间、动态及稳态频率的上下限约束等, 具体如下所示。

1) 动作轮次 k 一般需要满足一定范围, 即

$$k_{\min} \leq k \leq k_{\max} \quad (6)$$

2) 第 j 轮和 $j+1$ 低频减载动作频率阈值之间需有一定间隔, 即

$$|f_{h(j)} - f_{h(j+1)}| \geq \sigma_w \quad (7)$$

3) 第 j 轮低频减载动作的切负荷量 ΔP_j 不宜过小或者过大, 它需要满足一定的范围, 即

$$\Delta P_{\min} \leq \Delta P_j \leq \Delta P_{\max} \quad (8)$$

4) 第 j 轮低频减载动作的时延 $t_{(j)}$ 不宜过长或者过短, 即

$$t_{\min} \leq t_{(j)} \leq t_{\max} \quad (9)$$

5) 切负荷总量一般需要在一定范围内, 即

$$\sum_{j=1}^k \Delta P_j \leq \Delta P_{s\max} \quad (10)$$

6) 当第 i 个方式第 j 个故障发生时, 低频减载动作后的稳态频率 f_s 需满足终值频率的要求, 即

$$f_{\min} \leq f_s \leq f_{\max} \quad (11)$$

第 i 个方式第 j 个故障发生时, 根据规定, 低频减载装置动作后, 运行系统稳态频率 f_s 应恢复到不低于 49.5 Hz 水平。这里研究的某实际电网属于中、小系统。根据系统正常运行所允许的频率偏差^[8], 中、

小系统允许频率偏差值为 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ 因此, 最高稳定频率可设置为 50.5 Hz

7) 低频减载动作后系统动态频率 f_j 需在一定范围内, 避免发电机的高频或者低频保护动作, 即

$$f_{s \min} \leq f_j \leq f_{s \max} \quad (12)$$

低频减载动作后系统动态频率 f_j 需在一定范围内, 避免发电机的高频或者低频保护动作。根据规定, 频率下降的最低值必须大于低频保护的整定值, 并留有不小于 $0.3 \sim 0.5$ 的裕度。按照要求, 所研究的频率最低值取 47.7 Hz 。因负荷过切引起恢复时的系统频率过调, 其最大值不能超过 51 Hz 。

2 低频减载方案优化算法

2.1 PSS/E 的 IPLAN 语言

电力系统仿真软件 PSS/E 中提供了专门用于增强 PTI 应用程序功能的编程语言 IPLAN^[9], 其为用户提供了一个对 PSS/E 进行二次开发的平台。通过 IPLAN 语言编制程序, 实现对低频减载方案整定, 通过 PSS/E 强大的时域仿真功能对低频减载方案实施后系统频率的动态过程和稳态频率进行仿真分析, 并引入差分算法 (ED) 对问题的求解过程进行优化, 快速、方便地求得优化解。

2.2 差分算法

差分演化算法是一种快速的演化算法, 它采用实数编码, 通过变异、交叉和选择获得个体间的差分信息来指导新产生个体的搜索。与其他演化算法相比, 它具有结构简单、容易使用、快速和鲁棒性等特点。由于其优良的性能及易于实现等特点, 该算法在电力系统中得到了日益广泛的应用^[10-11]。

不失一般性, 考虑非线性最小化问题

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & l_j \leq x_j \leq u_j, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

标准形式的差分算法求解此优化问题的具体步骤如下。

2.2.1 群体初始化

设种群规模为 NP, 种群中第 G 代个体 i 表示为 X_{iG} ($i = 1, 2, \dots, n$), 即 $X_{iG+1} = (x_{1iG+1}, x_{2iG+1}, \dots, x_{niG+1})$, 差分算法利用 NP 个维数为 n 的实数值参数向量作为每一代的种群。通常初始种群 X_{i0} 是从决策变量可行域中随机产生, 且所有随机初始化种群个体符合均匀概率分布, 即

$$\begin{aligned} X &= l + \text{rand}(0, 1) \cdot (u - l) \\ j &= 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, NP \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\text{rand}(0, 1)$ 为均匀分布在 $(0, 1)$ 之间的随机数, 用 PSS/E 的 RND() 函数生成。

2.2.2 变异

对每个目标向量个体 X_i , G ($i = 1, 2, \dots, n$), 从当前 G 代中随机选择 3 个互不相同的个体, 按式 (15) 进行变异操作, 产生变异个体 V_{iG+1} , 即

$$\begin{aligned} V_{iG+1} &= X_{r_1G} + F \cdot (X_{r_2G} - X_{r_3G}) \\ n &\neq r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \end{aligned} \quad (15)$$

式中, 随机选择序号 $n, r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ 互不相同, 且与目标向量个体序号 i 也应不同。变异因子 $F \in [0, 1]$ 为一个常数, 起着控制偏差变量的放大作用。

2.2.3 交叉

交叉操作能够增加种群的多样性。对变异个体 V_{iG+1} 和与之对应的目标向量个体 X_{iG} 按式 (16) 进行交叉操作生成试验向量个体 U_{iG+1} , 即

$$U_{iG+1} = (u_{1iG+1}, u_{2iG+1}, \dots, u_{niG+1})$$

$$u_{jiG+1} = \begin{cases} v_{jiG+1}, & \text{if } \text{rand}(j) \leq CR \text{ or } j = \text{rand}(i) \\ x_{jiG}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\text{rand}(j)$ 是 $[0, 1]$ 之间的均匀分布; CR 是 $[0, 1]$ 之间的一个常数, 称为交叉概率; $\text{rand}(i)$ 是 $\{1, 2, \dots, n\}$ 之间的一个随机整数。

2.2.4 选择

为决定试验向量个体 U_{iG+1} 是否会成为下一代种群中的新个体, 根据式 (17) 将试验向量个体与当前种群中相应的目标向量个体 X_{iG} 进行比较, 具有较小目标函数值的向量个体将被保留至下一代种群中而成为新个体。

$$X_{iG+1} = \begin{cases} U_{iG+1}, & \text{if } f(U_{iG+1}) \leq f(X_{iG}) \\ X_{iG}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

2.3 不等式约束条件处理——罚函数

采用罚函数对式 (11) 和式 (12) 的不等式约束条件进行处理, 即在目标函数中加入惩罚项以反映所得到的解是否在约束范围内, 从而使整个问题变为无约束问题。

采用的罚函数形式如下。

$$P_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x \in X \\ C_1 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_2 + C_3 \cdot N_3 + C_4 \cdot N_4 & x \notin X \end{cases} \quad (18)$$

式中, x 为优化问题的一个解, 式 (2) 是 x 的详细描述。X 为问题的可行解域; C_1, C_2, C_3 和 C_4 为很大的

正数; N_1 为稳态频率小于最低稳态频率的累计数; N_2 为稳态频率大于最大稳态频率的累计数; N_3 和 N_4 是动态频率大于最大值和小于最小值的累计数。 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 都在仿真过程中不断更新。稳态频率小于最低值的功率缺额故障数越多, N_1 则越大。 N_2 同理。 N_3 和 N_4 则相同。

采用上述罚函数不仅能反映所得的解是否可行, 还能对解的不可行程度进行估计, 即解 x 不满足的约束条件数目越多, 即 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 的值越大, 其不可行度越高, 从而惩罚的程度越强。

将罚函数并至目标函数, 可得到适应度函数的表达式如下。

$$f_{fit}(x) = \begin{cases} f(x) & x \in X \\ f(x) + C_1 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_2 + C_3 \cdot N_3 + C_4 \cdot N_4 & x \notin X \end{cases} \quad (19)$$

2.3 低频减载优化整定差分算法

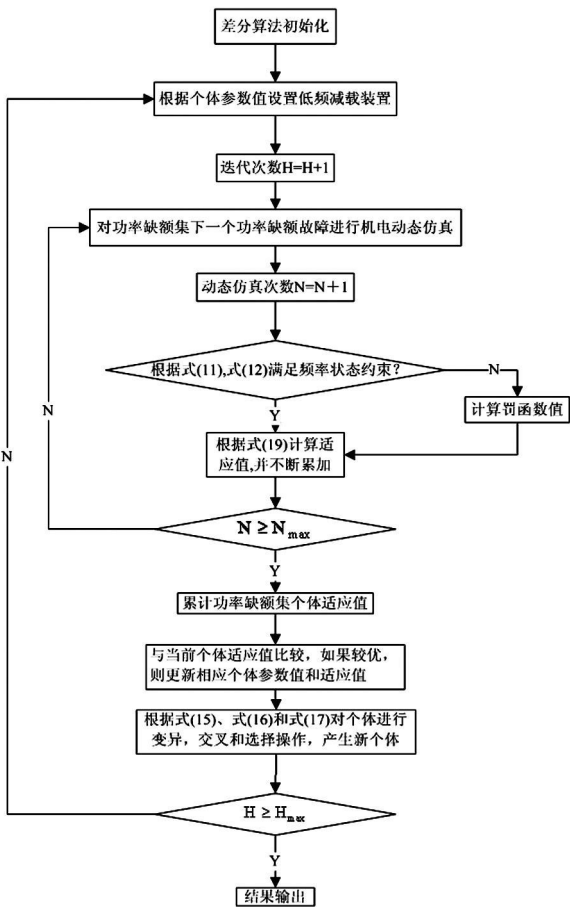


图 1 低频减载方案优化整定差分算法流程

综上所述, 使用差分算法先对低频减载方案进行初始化, 并对低频减载装置设置相应参数, 在预设的缺额故障下进行校验, 如果有故障不能满足频率稳定要求, 则使用惩罚函数修正目标函数, 如果所有故障的频率均满足要求, 则校验低频减载方案性能, 如

果不是最优, 则进行下一方案校验, 直到满足仿真结束条件。实现低频减载优化整定粒子群算法的计算流程如图 1 所示。

3 某实际电网的低频减载优化整定

该电网的主网是 220 kV 环网, 其负荷量随季节变化而变化, 丰大、枯大、丰小、枯小四种典型方式下的发电功率差异巨大。如丰大方式下共有 18 台发电机、124 个节点、77 条非变压支路、104 条变压器支路。有功负荷为 2 037.2 MW、无功负荷 513.7 Mvar。发电机有功出力为 2 077.8 MW。在低频减载方案的整定过程中, 选取了 26 个故障, 包括四种典型方式下的最大功率缺额。

在 PSS/E 扩展动态仿真过程中, 发电机采用 6 阶模型, 没有考虑调速系统, 负荷中没有考虑电动机模型。仿真时间取 30 s 积分步长为 0.01 s。

3.1 低频减载目前整定方案

该实际电网目前低频减载方案为快速动作基本轮 7 轮, 分别为 49.1 Hz、48.9 Hz、48.7 Hz、48.5 Hz、48.3 Hz、48.1 Hz、47.9 Hz 时延 0.2 s 切负荷比例分别为 5%、7%、7%、7%、7%、7%、10%。特殊轮 1 轮, 整定值为 49.0 Hz 时延 15 s 切负荷量为 3%。

通过 26 个功率缺额值仿真结果表明, 目前方案能适应大部分故障情况。但某些故障仍存在不同程度的欠切或过切, 频率低于 49.5 Hz 的故障有 4 个, 频率高于 50.5 Hz 的故障有 5 个, 有两个功率缺额值稳态频率甚至达到 51.5 Hz 以上, 将导致系统频率崩溃。因此动态频率及稳态频率不满足技术规定要求。

3.2 低频减载优化整定方案

优化时, 根据低频减载整定原则对式 (2) 中的低频减载整定参数进行优化。优化整定方案为: 基本轮 7 轮, 分别为 49.0 Hz、48.8 Hz、48.6 Hz、48.4 Hz、48.2 Hz、48.0 Hz、47.8 Hz 时延 0.25 s 切负荷比例分别为 4%、6%、6%、5.6%、5.4%、6%、6.2%。特殊轮第 1 轮, 整定值为 49.0 Hz 时延 15 s 切负荷量为 3.9%。特殊轮第 2 轮, 整定值为 49.5 Hz 时延 20 s 切负荷量为 2.45%。

实施优化的低频减载方案后, 之前将导致频率崩溃的两个功率缺额情况的频率满足技术规定要求, 避免了系统频率崩溃。所有功率缺额值的稳态频率都

(下转第 42 页)

[3] 何益宏,卓放,李红雨,等. Kaiser窗在谐波电流检测中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 9—12.

[4] 薛惠,杨仁刚. 基于 FFT的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106—110.

[5] 薛惠,杨仁刚. 基于连续小波变换的非整数次谐波测量方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 49—53.

[6] 王志群,朱守真. 基于 Pisarenko谐波分解的间谐波估算方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 72—77.

[7] 兰华,孙量. 基于互高阶谱 Pisarenko方法的间谐波计算[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 24—29.

[8] 丁屹峰,程浩忠等. 基于 Prony算法的谐波和间谐波频谱估计[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94—97.

[9] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis[M]. Proc R. Soc. Land A, 1993(443): 203—205.

[10] Newland D E. Wavelet Analysis of Vibration Part 1: Tho-

ery[J]. Trans ASME J Vibration & Acoustics 1994(116): 409—416.

[11] Pham V L, Wong K P. Antidistortion Method for Wavelet Transform Filter Banks and Nonstationary Power System Waveform Harmonic Analysis[J]. IEE Proceedings On Generation Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 177—182.

[12] 丁屹峰,程浩忠,吕干云,等. 基于 Prony方法的谐波和间谐波频谱估计[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94—97.

作者简介:
杨润田 (1963—),男,工程师,长期从事电力系统调度运行工作。
(收稿日期: 2010—03—19)

(上接第 4 页)

稳定在 49.5~50.5 Hz之间,满足系统对频率约束的要求,避免了欠切或过切。切负荷总量也比目前方案少。前面优化方案和目前方案的比较如下表 1 所示。

表 1 所提优化方案与目前方案比较

低频减 载方案	功率缺额值 (26个)			切负荷 总量 /MW
	稳态频率 在 49.5 ~50.5 Hz	稳态频率 在 49.0 ~49.5 Hz	稳态频率 在 50.5 Hz 以上	
目前方案	17	4	5	8 630.14
优化方案	26	0	0	8 182.40

4 结 论

1)借助于电力系统仿真软件实施低频减载方案的整定具有重要的意义,它改变了现有的单机单负荷整定,多机系统校核的整定模式,为低频减载整定提供了一种新的有效方法。

2)提出的计及实际电网动态频率特性的低频减载优化整定差分算法,通过某实际电网的低频减载整定,证明了其有效性。优化后的方案使 26个功率缺额值稳态频率都在 49.5~50.5 Hz之间,满足技术规定对频率稳定要求,系统没有欠切或过切,同时还减小了系统切负荷总量。

参考文献

[1] DL 428—91, 电力系统自动化低频减负荷技术规定[S].

[2] Anderson P M, Miheydar M. A Low—order System Frequency Response Model[J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(3): 720—729.

[3] 闵勇. 复杂扩展式电力系统中功率—频率动态过程的分析及低频减载装置整定[D]. 北京:清华大学, 1991.

[4] 时伯年,黄志刚,韩英铎. 并联电容投切对孤立系统低频减载设计的影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 41—44.

[5] Western System Coordinating Council WSCC Coordinated Off—nominal Frequency Load Shedding and Restoration Plan 1997.

[6] CTGRE Task Force 38—02—14. Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Frequency Disturbances Final Report 1999.

[7] DL 755—2001, 电力系统安全稳定导则[S].

[8] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 浙江大学出版社, 1997.

[9] Power Technologies Inc. IPLAN Program Manual PSS/E Brochure New York, NY, USA; Power Technologies Inc 2004.

[10] Storn R, Price K. Differential Evolution— a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization 1997, 11(4): 341—359.

[11] 袁晓辉,苏安俊,聂浩,等. 差分进化算法在电力系统中的应用研究进展[J]. 华东电力, 2009, 37(2): 243—249.

作者简介:
吴丹 (1985—),女,硕士,研究方向为电力系统安全稳定控制。
(收稿日期: 2010—05—12)