

利用粒子群算法解决电网优化购入电量

张亮, 吕林

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 利用粒子群算法对购电优化问题进行了研究, 建立了考虑供求约束、发电能力约束和输电容量约束的电网优化购入电量模型。按价格最低原则预先确定供电商, 运用粒子群算法解决了当约束中出现非连续变量的问题。提供了一种解决电网优化购入电量问题的方法, 节约了购电成本。

关键词: 电力市场; 购电模型; 电价; 粒子群算法; 优化

Solving bidding model by using particle swarm optimization for power market

ZHANG Liang, Lü Lin

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

Abstract: In this paper, the optimization problem of power purchase through particle swarm optimization algorithm is studied and the model of power purchase for power companies is established which synthetically considers supply and demand, generation and transfer capability constraints. It predetermines the power suppliers in advance on lowest price principle, solves the problem of that constraints arising from the issue of non-continuous variable by particle swarm optimization algorithm. A solution is provided to solve power purchase optimizing, which saves the cost of power purchase.

Key words: power market; power purchase model; electricity price; particle swarm optimization algorithm; optimization

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0049-05

0 引言

我国正处于电力市场改革初期, 电力市场总体结构主要分为三层, 即国家电网电力市场、区域电网电力市场及省网电力市场^[1], 电力市场作为世界电力工业发展的潮流, 促使各国的电力企业在考虑电网安全运行的前提下, 更多地关注电力所产生的经济效益和社会效益。随着社会主义市场经济的不断完善, 发电厂和电网之间将要以电价为纽带, 成为卖方和买方的关系^[2]。灵活而有效地运用综合考虑发电厂上网电价、发送能力和线损的电网优化购入电量方法在“厂网分开, 竞价上网”的电力体制改革中具有重要的现实意义。在目前厂网分开的电力市场环境下, 电厂不再归属于电网, 它们追求的是各自利益的最大化。而传统的计划调度方法没有以上网电价为杠杆进行发供企业之间的市场运作, 显然不利于培育电能市场和资源优化配置^[3]。因此, 对发电厂购入电量进行优化有利于降低供电公司的购电成本并促进发电企业提高效率, 达到买卖双方双赢。

根据市场结算规则方法的不同, 发电侧电力市场的目标函数分为两类: 一类是按电网统一边际成本结算的购电费用最小; 另一类是按照各发电机组实际报价结算的购电费用最小^[4,5]。本文研究第二种结算方法下的电网优化购入电量。文献[2]提出的购电优化数学模型只考虑了上网电价和出力约束, 文献[3]利用拉格朗日松弛法计算电网优化购入电量, 建立了市场竞争原则下的购电计划模型, 文献[6]中讨论了电网公司在长、中、短、超短期电力市场中的多级购电模型, 并对各级购电模型之间的联系进行了分析, 但没给出可行的算法。文献[7]建立了考虑供求约束和发电能力约束的电网优化购入电量模型, 运用改进粒子群算法得到该电网优化购入电量模型的全局最优解, 节约了购电成本, 但该文没有考虑到实际电价和输电线路最大传输容量限制的问题, 且对供求平衡约束这个条件的满足也存在一定的误差。

本文通过分析, 建立了电力市场条件下电网购电优化的数学模型。该模型的目标函数是购电费用最小, 约束条件包括: 供需平衡约束、电厂出力约

束、线路传输容量约束。根据购电优化数学模型的特点, 本文采用粒子群算法用于电网的购电优化^[2,4,7-9], 通过算例验证了该模型与算法的正确性和可行性。

1 购电优化的数学模型

购电优化的目标是在购买电量一定的情况下, 在满足各项约束条件下如何在各发电厂之间合理分配购买电量以实现购电成本最小化。

电能供购双方一般通过关口计量点的读数进行结算, 关口计量点的设置由双方协定。当关口计量点设置在电网侧时, 网损由发电厂承担; 否则由电网承担。由于在电网中所处的位置不同, 不同发电厂的网损率也不同。例如, 同样是发电1 kWh, 甲厂可能有0.98 kWh真正为供电公司所用, 而乙厂可能仅有0.90 kWh为供电公司所用。设甲、乙两厂的竞标电价分别为 C_1 和 C_2 ($C_1 > C_2$), 如果仅按照上述低价优先的原则, 供电公司应向电价低的发电厂乙购买电能。但是由于甲厂的网损率 ΔP_1 小于乙厂的网损率 ΔP_2 使得供电公司向乙厂购电的成本大于向甲厂购电的成本, 即向电价高的电厂买电反而更经济。因此, 当关口计量点设置在发电厂侧时, 从电网公司的角度出发, 模型中还要考虑各电厂分摊的网损对总购电成本的影响, 于是, 在目标函数中采用“实际电价”^[10]的概念, 即

$$C_i' = \frac{C_i}{1 - \Delta P_i} \quad (1)$$

式中: C_i' 为发电厂 i 的实际电价; C_i 为发电厂 i 的上网电价; ΔP_i 为发电厂 i 所发的每单位电能导致的损耗值, $1 - \Delta P_i$ 即为该单位电能中的有效电能。 ΔP_i 的计算公式如式(2)所示, $P_{i,loss}$ 为发电厂 i 分摊到的网损(kW); P_i 为发电厂 i 的出力(kW)。

$$\Delta P_i = P_{i,loss} / P_i \quad (2)$$

设电网由 n 个发电厂供给, 且在某个时段第 i 个发电厂的上网电价为 C_i , 输入电网的网损为 ΔP_i , 电网从第 i 个发电厂购入的电量为 P_i , $i=1, 2, \dots, n$, 当关口计量点设置在发电厂侧时应考虑网损的影响, 可以建立如下模型。在考虑网损的条件下计算出最小购电费用, 即得到最优购电方案。

$$\min F, F = \sum_{i=1}^n C_i P_i \quad (3)$$

$$\text{S.T.} \sum_{i=1}^n (1 - \Delta P_i) P_i = P_d \quad (4)$$

$$P_i = 0 \text{ 或 } P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max} \quad (5)$$

$$-L_{i, \max} \leq P_i \leq L_{i, \max} \quad (6)$$

式中: F 为购电成本函数; P_d 表示系统负荷; $P_{i, \min}$ 和 $P_{i, \max}$ 表示第 i 个发电厂的最小和最大的发电能力, 其中 $P_{i, \min} > 0$; $L_{i, \max}$ 表示第 i 个发电厂与电网相连线路的最大传输容量。为了更符合实际情况, 上述模型将约束(5)中的变量 P_i 由文[2]中的连续变量变为非连续变量, 这样可以将 $P_{i, \min}$ 值在市场竞争原则下可以取0, 而在保护和协调的原则下不能取0的矛盾统一起来^[2]。上述各式构成的模型为一含有约束的多变量线性规划问题, 其中待优化的变量个数为从各个电厂的购入电量。

2 粒子群算法应用于购电优化

2.1 粒子群算法的简介

粒子群优化PSO (Particle Swarm Optimization) 算法最初是由Kennedy和Eberhart博士^[11]于1995年受人工生命研究结果启发, 在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为时提出的一种基于群体智能的演化计算技术。粒子群优化算法(PSO)建立在模拟鸟群社会基础上, 其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解。在改进的粒子群算法中, 为了确保其收敛性, 引入了惯性权重因子 ω 来保证其能够收敛到全局最优解。基本粒子群优化算法在解空间内搜索时, 有时会出现粒子在全局最优解附近“振荡”的现象, 为了避免这个问题, 可作如下改进^[12]: 随着叠代进行, 速度更新公式中的加权因子 ω 由最大加权因子 ω_{\max} 线性减小到最小加权因子 ω_{\min} 。即:

$$\omega = \omega_{\max} - \text{iter} \times \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{itermax}} \quad (7)$$

其中: iter 为当前叠代数, 而 itermax 是总的叠代次数。

当某个粒子与最优粒子很接近时, 其飞行速度将趋于零, 这是粒子群优化算法容易陷入局部极小的主要原因。文献[9]提出一种弹性粒子群优化RPSO (Resilient Particle Swarm Optimization)算法。该算法在计算各粒子的速度时, 粒子飞行的方向与原算法一样, 都是指向两个极值。但其飞行速度的大小与基本粒子群优化算法不一样, 不考虑它与最优粒子距离之间的大小, 而只利用其方向信息, 并采用一种自适应策略弹性地修正粒子速度的幅值。这样能保证各粒子朝最优粒子飞行, 而且当它与最

优粒子很接近时, 仍能保持一定的飞行速度。因此, 如果找到一个局部极值点, 其他粒子能比较容易地跳出其约束范围, 以避免算法的早熟收敛^[9]。

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 \text{rand1} \Delta_{v_{id}}^1(t) + c_2 \text{rand2} \Delta_{v_{id}}^2(t) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta_{v_{id}}^1(t) = \Delta_{id}^1(t) \cdot \text{sgn}[p_{id}(t) - x_{id}(t)] \\ \Delta_{v_{id}}^2(t) = \Delta_{id}^2(t) \cdot \text{sgn}[p_{gd}(t) - x_{id}(t)] \end{cases} \quad (9)$$

其中: p_{id} 为局部最优解; p_{gd} 为全局最优解; c_1 和 c_2 为两个学习因子; rand1 和 rand2 为一随机函数, 可取 $[0, 1]$; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\Delta_{id}^1(t)$ 和 $\Delta_{id}^2(t)$ 采用如下自适应策略弹性地修正: 当粒子前后两次飞行方向一致时, 说明粒子正从个体“极值”(或全局“极值”)的一侧向其逼近, 因此可以加大 $\Delta_{id}^1(t)$ (或 $\Delta_{id}^2(t)$), 以加快算法的收敛速度; 如果前后两次飞行的方向不一致, 则说明该粒子正在个体“极值”(或全局“极值”)附近徘徊, 此时应降低 $\Delta_{id}^1(t)$ (或 $\Delta_{id}^2(t)$)以避免算法在极值点附近徘徊过久; 如果粒子前后两次迭代有一次与个体“极值”(或全局“极值”)重合, 则不改变 $\Delta_{id}^1(t)$ (或 $\Delta_{id}^2(t)$)。于是, 可按下式修正 $\Delta_{id}^1(t)$ 和 $\Delta_{id}^2(t)$:

$$\Delta_{id}^1(t) = \begin{cases} \eta^+ \Delta_{id}^1(t-1), & \text{if } [p_{id}(t-1) - x_{id}(t-1)] \cdot [p_{id}(t) - x_{id}(t)] > 0; \\ \eta^- \Delta_{id}^1(t-1), & \text{if } [p_{id}(t-1) - x_{id}(t-1)] \cdot [p_{id}(t) - x_{id}(t)] < 0; \\ \Delta_{id}^1(t-1), & \text{else;} \end{cases} \quad (10a)$$

$$\Delta_{id}^2(t) = \begin{cases} \eta^+ \Delta_{id}^2(t-1), & \text{if } [p_{gd}(t-1) - x_{id}(t-1)] \cdot [p_{gd}(t) - x_{id}(t)] > 0; \\ \eta^- \Delta_{id}^2(t-1), & \text{if } [p_{gd}(t-1) - x_{id}(t-1)] \cdot [p_{gd}(t) - x_{id}(t)] < 0; \\ \Delta_{id}^2(t-1), & \text{else;} \end{cases} \quad (10b)$$

其中: η^- 和 η^+ 分别称为递减因子和递增因子, 它们满足 $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$ 。同时, 为了保证算法的收敛性和快速性, $\Delta_{id}^1(t)$ 和 $\Delta_{id}^2(t)$ 都必须限定在一个合理的范围内, 即 $\Delta_{id}^1(t)$ 和 $\Delta_{id}^2(t) \in [\Delta_{\min}, \Delta_{\max}]$ ^[9]。

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (11)$$

对搜索空间大小加以限制, 使得搜索空间中表示个体的点与解空间中表示可行解的点一一对应,

对不满足约束条件限制的解, 取其上下限, 使其成为可行解^[13]。通过算例验证了限定搜索空间有利于提高算法的效率。

2.2 约束条件的处理

由于粒子群算法同其它智能算法一样, 仅靠适应度函数来评估和引导搜索, 因此应用它解决此类优化问题时需要约束条件进行处理。对此, 本文采取了一种惩罚函数方法, 将约束优化问题转换成考虑惩罚的无约束优化问题^[14]。

考虑约束条件时该算法的数学模型中, 令惩罚函数 $\gamma = \sum_{i=1}^l (1 - \Delta P_i) P_i - 200$, 则适应度函数为:

$$\min F, F = \begin{cases} \sum_{i=1}^n C_i P_i & \text{if } \gamma \geq 0 \\ \sum_{i=1}^n C_i P_i + \beta \gamma & \text{else } \gamma < 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中: β 为惩罚系数。

2.3 粒子群算法计算购电成本的步骤

考虑到实际电价的问题, 通过对各个发电厂报出竞标电价、网损和竞标电量, 按实际价格最低原则预先筛选出可购买电量的厂商, 然后再应用RPSO解出优化结果即所要购的电量和所需要最小费用。按RPSO的思想, 可以给出其具体算法如下:

Step1: 确定粒子位置及飞行速度的边界 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 和 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 。设定最大迭代次数, 在满足式(4)、(5)、(6)约束条件下, 随机生成粒子群中所有粒子的初始位置和初始速度。计算出相应的适应度 F_i 。设定参数 ω_{\max} , ω_{\min} , $\Delta_{id}^1(t)$, $\Delta_{id}^2(t)$, η^- , η^+ , Δ_{\min}^d 和 Δ_{\max}^d , 令 $p_{id}(0) = p_{gd}(0) = x_{id}(0)$ 。

Step2: 令粒子 i ($i = 1, 2, \dots, m$)当前的最优位置为 $P_i = X_i$, 对应的适应度为 $F_{\text{best}i} = F_i$; 并从粒子群中找出全局最优粒子, 令其位置为 P_g , 对应的适应度为 G_{best} 。

Step3: 按式(10)修正 $\Delta_{id}^1(t)$ 和 $\Delta_{id}^2(t)$, 并将其限定在范围 $[\Delta_{\min}^d, \Delta_{\max}^d]$ 内。

Step4: 按式(9)计算 $\Delta_{v_{id}}^1(t)$ 和 $\Delta_{v_{id}}^2(t)$ 。

Step5: 对所有粒子执行如下操作:

1) 按式(8)修正粒子飞行速度, 并将其限定在范围 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 内;

2) 按式(11)修正粒子位置, 并将其限定在范围 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 内, 同时计算其适应度 F_i ;

3) 如果 $F_i > F_{\text{best}i}$, 则令 $P_i = X_i$, $F_{\text{best}i} = F_i$;

4) 如果 $F_i > G_{best}$, 则令 $P_g = X_i$, $G_{best} = F_i$ 。

Step6: 如果最优适应度几乎不再变化或达到最大迭代次数, 则停止; 否则, 跳至Step3。

Step7: 输出该优化问题的最优解, 令其为最后一次迭代更新的 G_{best} 。

3 算例

根据本文算法, 用Matlab软件中的M语言编制了粒子群算法优化电网购入电量的程序^[9,15], 假设某个电网T时期计划从5个发电厂购入电量200 GWh为例, 购电模型图如图1。

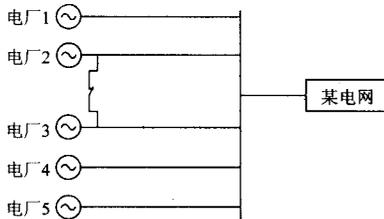


图1 五电厂购电模型图

Fig.1 Power purchase model from five plants

设电厂2和电厂3之间有一条备用联络线, 在正常工况下电厂2和电厂3之间的联络线断开, 各个电厂通过独立的线路向某电网供电, 当电厂2或电厂3向某电网供电的其中一条线路发生故障时跳开时, 继电器动作闭合电厂2和电厂3之间的联络线, 电厂2和电厂3共用另一条线向某电网供电, 假设电厂2和电厂3之间联络线的线损为0.002。

在计算过程中, 算法的参数分别设置为: 粒子数 m 取为20, 维数 D 取为5, 学习因子 $c_1=c_2=2$, 权重系数 $\omega_{min}=0.1$, $\omega_{max}=0.9$, $\eta^- = 0.5$ 和 $\eta^+ = 1.1$, 将所有的 $\Delta_{id}^1(0)$, $\Delta_{id}^2(0)$ ($i=1, 2, \dots, m; d=1, 2, \dots, D$) 都初始化为 $\Delta(0)$, $\Delta(0)=0.01\Delta x$, 其中 Δx 为优化变量的上、下限之差。另外, 将 $\Delta_{id}^1(t)$ 和 $\Delta_{id}^2(t)$ 限制在同一范围内, 即上限为 $\Delta_{max} = 0.5\Delta x$, 下限为 $\Delta_{min} = 0.001\Delta x$ 以保证算法的收敛性及收敛速度^[9]。每个粒子的搜寻空间如表1所示的电价、线损、发电能力数据^[2]。并在文[2]数据基础上假定了输电能力限制条件, 并根据实际电价的高低对发电商进行排序。

正常工况下, 输电能力限制均大于最大发电能力, 在保护和协调原则下取得的结果与文献[3]和文献[7]中的优化结果的比较见表2, 结果显示总费用比文献[3]和文献[7]中总费用稍大, 但本文是在严格满足供求平衡的前提下取得的优化结果, 文献[3]

和文献[7]中的优化结果在供求平衡这个条件的满足上都存在一定的误差。

表1 电价、线损和发送能力的数据库

Tab. 1 Data of electricity price, line loss, generation ability and transmission ability

序号	C_i (元 /kWh)	ΔPi	P_{min} /GWh	P_{max} /GWh	L_{max} /GWh
电厂1	0.10	0.088 2	43.2	86.4	100
电厂2	0.12	0.072 2	21.6	64.8	90
电厂3	0.15	0.045 1	21.6	43.2	60
电厂4	0.18	0.042 2	14.4	43.2	60
电厂5	0.20	0.055 4	14.4	28.8	40

表2 保护和协调原则结果比较表

Tab. 2 Comparison of results on protection principle

序号	文献[3]结果	文献[7]结果	本文结果
电厂1	86.397 9	86.400 0	86.400 0
电厂2	64.638 4	64.800 0	64.800 0
电厂3	35.246 7	35.296 3	35.635 6
电厂4	14.514 5	14.400 0	14.400 0
电厂5	14.454 9	14.400 0	14.400 0
费用/万元	2 719.498	2 718.25	2723.33
供求平衡	199.639 1	199.676 0	200.000 0

在正常工况下, 按市场原则取得的优化结果与文献[3]和文献[7]中的结果比较见表3。

表3 市场竞争原则结果比较表

Tab.3 Comparison of results on competition principle

序号	文献[3]结果	文献[7]结果	本文结果
电厂1	86.400 0	86.400 0	86.400 0
电厂2	64.800 0	64.800 0	64.800 0
电厂3	43.200 0	43.200 0	43.200 0
电厂4	21.060 1	20.721 8	21.060 1
电厂5	0.000 0	0.000 0	0.000 0
费用/万元	2 668.68	2 662.69	2 668.68
供求平衡	200.000 0	199.676 0	200.000 0

文献[7]中的优化结果并不严格满足供求平衡约束条件, 本文和文献[3]的优化结果一致, 为全局最优解, 且均严格满足供求平衡约束条件。

当电厂3与某电网相连的输电线路发生故障跳开, 继电器动作闭合电厂2、3之间的联络线, 此时电厂2、3共用电厂2的这条线向某电网供电。若按保护和协调原则 $P_{imin} > 0$, 取得的优化结果为2 767.79万元; 按市场竞争原则 $P_{imin} = 0$, 结果为2 735.41万元, 两种原则下的结果对比见表4。

表 4 非正常工况下的结果比较表

Tab. 4 Comparison of results under non-normal operating conditions

序号	保护和协调原则	市场原则
电厂 1	86.400 0	86.400 0
电厂 2	64.800 0	64.800 0
电厂 3	25.200 0	25.200 0
电厂 4	25.565 9	39.767 5
电厂 5	14.400 0	0.000 0
费用/万元	2 767.79	2 735.41
供求平衡	200.000 0	200.000

算例的计算结果表明,粒子群算法能有效地找出全局最优点,随着购电量的增加,购电的费用将会有更加显著的降低。这表明了弹性粒子群优化算法的有效性,而且该方法应用方便,建模也简单易行。

4 结束语

本文应用粒子群算法解决了考虑实际电价和输电容量限制时购入电量的优化问题。通过引入线性减小的加权因子 ω 及自适应策略弹性地修正粒子速度的幅值,提高了粒子群优化算法的效率,避免了粒子在全局最优解附近“振荡”现象的发生和粒子群算法的早熟收敛。从 5 家电厂购入电量 200 GWh 的算例结果表明该算法正确有效,可得到电网优化购入电量的全局最优解,节约了可观的购电费用。

参考文献

- [1] 尚金成,黄永皓,夏清,等. 电力市场理论研究与应用[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 段树乔. 电网优化购入电量的方法[A]. 2000年上海国际大电网会议论文专辑[C],上海:2000.
- [3] 庄丽蓉,蔡金锭,李天友. 电力市场条件下地市级电网优化购电模型[J]. 电网技术,2007,31(17):81-84.
ZHUANG Li-rong, CAI Jin-ding, LI Tian-you. Research on Optimized Model of Electric Power Purchased by Regional Power Network in Electricity Market Environment[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 81-84.
- [4] 陈松波,丁振华,张崇见. 利用拉格朗日松弛法解决电网优化购入电量[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(1):76-78.
CHEN Song-bo, DING Zhen-hua, ZHANG Chong-jian. Solving Bidding Model by Using Lagrangian Relaxation Method for Power Market[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(1): 76-78.
- [5] 于尔铿,周京阳,张学松. 电力市场竞价模型与原理[J]. 电力系统自动化,2001,25(1):24-27.
YU Er-keng, ZHOU Jing-yang, ZHANG Xue-song. Bidding Model and Bidding Principle for Power Markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(1):24-27.

- [6] 谭忠富,张立辉,李晓军,等. 区域电力市场环境下的电网公司的多级购电优化模型分析[J]. 电力学报,2004,19(4):273-275.
TAN Zhong-fu, ZHANG Li-hui, LI Xiao-jun, et al. On Multilevel Purchasing Electricity Model for Electricity Grid Company in Region Electricity Market[J]. Journal of Electric Power, 2004,19(4): 273-275.
- [7] 张涛,蔡金锭.改进粒子群优化算法用于电网优化购入电量[J]. 高电压技术,2006,32(11):131-134.
ZHANG Tao, CAI Jin-ding. Application of Improved Particle Swarm Optimization in Power Purchase Model Optimization Problem[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 131-134.
- [8] 魏星,崔鹏程. 粒子群优化算法及其在电力系统中的应用[J]. 电力科学与工程,2005,(3):21-24.
WEI Xing, CUI Peng-cheng. Particle Swarm Optimization and Its Applications in Power Systems[J]. Electric Power Science and Engineering, 2005,(3): 21-24.
- [9] 李勇刚,桂卫华,阳春华,等. 一种弹性粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2008,23(1):95-98.
LI Yong-gang, GUI Wei-hua, YANG Chun-hua, et al. A Resilient Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Control and Decision, 2008, 23(1):95-98.
- [10] 谭伦农,张保会,周亦山. PX 市场中交易电量的优化确定[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):19-22.
TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi-shan. Economic Determination of Market Clearing Quantity of Electricity in Power Exchange[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 19-22.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia):1995.1942-1948.
- [12] Shi Y, Eberhart R C. A Modified Swarm Optimizer[A]. in: IEEE International Conference of Evolutionary Computation [C]. Anchorage(Alaska):1998.
- [13] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [14] 张寒,文习山,邓维. 小生境遗传算法的模糊识别在局放中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(6):15-18.
ZHANG Han, WEN Xi-shan, DENG Wei. Application of Fuzzy Pattern Recognition in Partial Discharge Based on Nicher Genetic Algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6):15-18.
- [15] 吴建生,秦发金. 基于 MATLAB 的粒子群优化算法程序设计[J]. 柳州师专学报,2005,20(4):97-100.
WU Jian-sheng, QIN Fa-jin. A Design of Particle Swarm Optimization with MATAB[J]. Journal of Liuzhou Teachers College, 2005,20(4):97-100.

收稿日期:2008-11-26; 修回日期:2009-01-15

作者简介:

张亮(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力市场运营;E-mail: z-aliang@163.com

吕林(1963-),男,副教授,研究方向为配电网自动化,电力市场运营。