

# 基于改进粒子群算法的高中压配电网 实时电压无功优化

包永金

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

**摘要:**针对高中压配电网电压无功优化中的开关设备动作次数问题,提出了基于改进粒子群算法的实时电压无功优化方法。该方法将带有记忆与指导信息的活性因子加入适应度函数,根据配电网特点初始化粒子种群,实现实时优化计算中动作次数约束的考虑。在速度更新公式中引入约束指导分量,将位于不可行域内的粒子尽快拉回可行域,减少粒子在无效空间的搜索。对粒子群进行分群寻优,通过采取不同的适应度计算策略加速了算法的收敛。对某一实际高压配电系统进行了实时电压无功优化计算仿真测试,结果表明算法在改善系统电压、降低网损和控制动作次数方面是令人满意的。

**关键词:**配电网;电压无功优化;动作次数;改进粒子群算法

**Abstract:** Aiming at the problem of the action times of switching equipment in voltage/reactive power optimization for high and medium voltage distribution networks, a real time voltage/reactive power optimization methods based on the modified particle swarm optimization is presented. An active factor with memory and guidance is added to the fitness function, and the particles are initialized according to the characteristics of distribution networks, so that the action times could be considered in real time optimization. The constraint guidance component is introduced in the speed updating formula, which will bring back the particles located in the infeasible domain as soon as possible to reduce the search in the invalid space. The convergence of the algorithm will be accelerated by means of grouping the particles for optimization, and adopting different strategies for fitness calculation. The proposed algorithm is simulated in a high voltage distribution network for the real time voltage/reactive power optimization. The results show that the algorithm for improving the system voltage, reducing loss and controlling the action times are satisfied.

**Key words:** distribution network; voltage/reactive power optimization; action times; modified particle swarm optimization

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0059-06

配电网电压无功优化是保证电网安全、经济运行的有效手段,其主要通过对有载调压变压器、并联电容器等开关设备进行调度以达到提高电压质量和降低网损的目的。通常无功优化都是针对某一负荷断面来进行,考虑电压约束条件,片面追求有功网损的绝对最小值<sup>[1]</sup>,即所谓的静态无功优化。随着负荷的波动,这种静态优化将导致有载调压变压器和并联电容器等带机械开关的设备频繁动作,由于受当前制造工艺等方面的限制,开关设备的动作次数具有一定的限制,使得在实际运行中不能直接使用优化结果。通过在数学模型中引入变压器和并联电容器的动作次数约束以避免开关设备频繁动作的动态无功优化逐渐引起了人们的关注<sup>[2]</sup>。由于配电网电压无功优化本身就是一个复杂的多变量、多约束的非线性规划

问题,将动作次数约束引入优化,从而使得动态无功优化问题具有了时间和空间复杂性。

针对开关设备动作次数约束问题,文献[3]将动态规划法用于求解考虑动作次数约束的变电站内变压器和电容器动作优化问题,其在理论上可以找到最优解,但随着系统规模的扩大易陷入“维数灾”。文献[2]将静态优化的最优曲线进行分段等值,然后对相应的负荷进行划分、等值,使得负荷的分段自动满足动作次数的约束,将动态优化问题转化为静态优化问题,但此算法要求开关设备的动作具有同时性。文献[4~5]用不同的负荷分段方法将动态优化问题转化为静态优化问题求解。文献[6]直接按静态优化问题求解,然后对最优补偿容量按动作次数进行融合分段,其对结果的后处理带来了误差。这些方法在一

定程度上降低了问题的规模,但仍然不够理想。

处理电压无功优化问题通常的方法是解析法如线性规划等<sup>[1]</sup>,其主要的两个问题就是离散变量被作为连续变量处理和本质上存在近似,这可能使得求出的解是不适当的,也使得很难对设备动作次数进行优化处理。近年来,基于人工智能的优化方法由于不要求优化问题的目标函数线性、连续或者可微,也不要求变量必须是连续等特点而发展迅速,但计算量大计算时间长是其主要缺点。美国学者 Kennedy 和 Eberhart 受鸟群觅食的启发于 1995 年提出的粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[7]</sup>,由于算法简单、参数少、收敛速度快等特点很适合处理电力系统问题<sup>[8]</sup>。粒子群算法应用于无功优化问题已在一些期刊上发表,但其主要目标是网损优化<sup>[9-10]</sup>。

针对高中压配电网中最复杂的一类问题——考虑开关设备动作次数限制的电压无功优化问题提出了一种基于改进粒子群算法 (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) 的实时电压无功优化方法。该方法通过引入活性因子以考虑动作次数的前后关联,利用粒子群算法固有的记忆能力和快速随机搜索能力,快速实现动作次数受约束的电压无功优化。在 PSO 算法中引入约束指导分量将不可行域的粒子快速拉回可行域,减少粒子的无效搜索。根据粒子的“好”、“坏”进行分群寻优,通过采用不同的适应度计算策略,加速了算法的收敛。

## 1 高中压配电网实时电压无功优化模型

### 1.1 实时优化模型

高中压配电网实时电压无功优化的目标就是在分段优化计算中考虑开关设备的动作次数限制,在动作次数约束下改善电压水平和降低网络损耗,其目标函数为

$$\min F = P_{\text{loss } t} = \sum_{j \in i} G_{ij} (U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \theta_{ij,t}) \quad (1)$$

式中,  $t$  为当前时刻且  $t \in T$ ,  $T$  为一天中的控制时段数;  $P_{\text{loss } t}$  为当前时刻  $t$  的有功网损;  $j \in i$  表示  $\Sigma$  号后标号为  $j$  的节点必须和节点  $i$  直接相连,但不包括  $j=i$  的情况;  $G_{ij}$  为当前时刻节点  $i$  与节点  $j$  的电导;  $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$  分别为当前时刻节点  $i$  和节点  $j$  的电压幅值;  $\theta_{ij,t}$

为当前时刻节点  $i$  与节点  $j$  相角之差。

等式约束条件即为潮流方程

$$P_{i,t} - U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij,t} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij,t} \sin \theta_{ij,t}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{i,t} - U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij,t} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij,t} \cos \theta_{ij,t}) = 0 \quad (3)$$

式中,  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$  分别为当前时刻  $t$  节点  $i$  注入的有功功率和无功功率;  $j \in i$  表示  $\Sigma$  号后的标号为  $j$  的节点必须和节点  $i$  直接相连,并包括  $j=i$  的情况;  $B_{ij}$  为当前时刻节点  $i$  与节点  $j$  的电纳,其他同上。

控制变量与状态变量必须满足的不等式约束

$$T_{j \min,t} \leq T_{j,t} \leq T_{j \max,t} \quad j=1, 2, \dots, N_T \quad (4)$$

$$Q_{CK \min,t} \leq Q_{CK,t} \leq Q_{CK \max,t} \quad Q_{CK} = K_{CK} Q_{UK} \quad k=1, 2, \dots, N_C \quad (5)$$

$$U_{i \min,t} \leq U_{i,t} \leq U_{i \max,t} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中,  $N_T$ 、 $N_C$ 、 $N$  分别为变压器的总台数,并联电容器数和系统总的节点数;  $T_{j,t}$ 、 $Q_{CK,t}$ 、 $K_{CK,t}$ 、 $U_{i,t}$  分别为当前时刻  $t$  变压器  $j$  的分接头挡位,电容器  $k$  的投入容量,投入组数和节点  $i$  的电压幅值;  $Q_{UK}$  为电容器  $k$  的单组容量;  $T_{j \min,t}$ 、 $T_{j \max,t}$ 、 $Q_{CK \min,t}$ 、 $Q_{CK \max,t}$ 、 $U_{i \min,t}$ 、 $U_{i \max,t}$  分别为当前时刻变压器  $j$  的分接头挡位限值、电容器的投入容量限值和节点  $i$  的电压幅值限值。

由于变压器和电容器在一天中的动作次数受到了限制,所以一天中的动作次数还应该满足以下的“软约束”

$$\sum_{t=1}^T |K_{k,t+1} - K_{k,t}| \leq M_{CK} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T |T_{k,t+1} - T_{k,t}| \leq M_{TK} \quad (8)$$

式中,  $K_{k,t}$  为  $t$  时刻补偿电容器  $k$  投入的电容器组数;  $M_{CK}$  为补偿电容器  $k$  在一天中允许投切的次数;  $T_{k,t}$  为变压器  $k$  的第  $t$  时刻变压器挡位;  $M_{TK}$  为变压器  $k$  在一天中允许调挡的次数。

### 1.2 活性因子

根据负荷预测曲线,对各变电站的负荷曲线进行简单分段。首先计算出无功  $Q_k$  在一天内的变化量总和为

$$Q_{k\Sigma} = \sum_{i=1}^{24} |\dot{Q}_{k,t} - \dot{Q}_{k,t-1}| \quad (9)$$

每一分段中无功  $Q_k$  的变化量即为  $\Delta Q_k = Q_{k\Sigma} / M_{CK}$ 。从第一个时间点开始累加各时间段无功变化量的值,当变化值累加到  $\Delta Q_k$  时将所累积的时

段作为一个分段,则得到该分段内电容器允许动作的次数为

$$z_k = Q_{k \in (l_k, i)} \triangle Q_k \quad (10)$$

式中,  $Q_{k \in (l_k, i)}$  为变电站  $k$  的第  $i$  分段无功变化量的累加值,  $l_k$  为变电站  $k$  的第  $i$  分段, 包括  $m$  到  $n$  时段,  $1 \leq m \leq n \leq 24$ 。

在  $t$  时刻的实时电压无功优化中, 通过对负荷预测曲线分析得出后一时刻变电站无功需求的大致变化情况, 这里定义两个概念: 梯度  $\Delta_{k, t}$  和活性因子  $\eta_{k, t}$ 。

$$\Delta_{k, t} = \frac{Q_{k, t} - Q_{k, t-1}}{Q_{Uk}} \quad (11)$$

式中,  $Q_{k, t}$  为补偿电容器  $k$  所在变电站  $t$  时刻的无功负荷;  $Q_{k, t-1}$  为变电站  $t-1$  时刻的无功负荷;  $Q_{Uk}$  为变电站内电容器的单组容量。梯度其实质为无功负荷数据两时段之差所对应的电容器组数, 它的正负也代表了电容器组是具有投入还是切除的趋势。活性因子定义如下

$$\eta_{k, t} = (z_k - z_{k, t}) \times \frac{\Delta_{k, t}}{|\Delta_{k, t}| + \dots + |\Delta_{k, n}|} \quad (12)$$

式中,  $z_k$  为变电站电容器该分段允许动作总次数;  $z_{k, t}$  为变电站  $t$  时刻所属分段内已经动作的累计次数。

由活性因子的定义可以看出其记忆了当前为止该分段的动作情况, 利用了负荷预测数据的梯度使其带有了部分预测信息, 从而使得活性因子具有了记忆与指导的作用。活性因子的大小表示了变电站电容器组参与调节的活跃程度, 即电容器组参与调节的可能性大小。由于电压也主要受负荷波动的影响, 因此对变压器动作次数的分配可以参照电容器进行。

## 2 改进粒子群算法

### 2.1 标准粒子群算法模型

PSO 是一种群体智能进化计算技术, 其通过模拟群体的社会行为与记忆能力引导粒子搜索解空间中的最优区域。首先随机初始一个种群, 每一个潜在解被称为一个粒子, 具有一个随机的速度在问题解空间中飞行。粒子具有记忆能力, 每一个粒子记忆自己之前所经历过的最好位置, 这一位置被称为个体极值以

$p_{id}$  来代表。所有粒子的个体极值中的最好值称为全局极值以  $p_{gd}$  来代表。PSO 技术的基本观点就在于在每一步中都加速每一粒子向  $p_{id}$  和  $p_{gd}$  飞行, 至于加速量则是以随机权重的方式给出。下面的步骤解释了标准 PSO 算法的计算过程。

- 1) 在解空间中随机初始粒子的位置和速度;
- 2) 对每一粒子进行适应度评估;
- 3) 每一粒子的当前值与自身的个体极值进行比较, 如果当前值好于个体极值则将个体极值设为当前值;
- 4) 更新后的个体极值与以前的全局极值作比较, 如果个体极值好于全局极值, 则更新全局极值;
- 5) 根据式 (13) 和 (14) 分别计算粒子新的速度和位置,  $v_{id}$  和  $x_{id}$  分别代表粒子  $i$  的第  $d$  分量的速度和位置,  $rand_1$  和  $rand_2$  是一个 0 到 1 之间的随机函数;
- 6) 重复步骤 2) 直到指定的终止原则满足, 通常为一足够好的适应度值或者是达到了最大迭代次数。

式 (13) 中  $w$  称为惯性因子, 控制着粒子进行邻域与全局搜索。速度应限制在某一范围,  $v_{max}$  是粒子的最大允许速度, 如果  $v_{max}$  太大, 粒子可能飞过最好解, 如果  $v_{max}$  太小, 粒子则可能陷入局部最小。 $c_1$  和  $c_2$  分别为认知分量和社会分量的加速常数, 其可以分别改变飞向  $p_{id}$  和  $p_{gd}$  的速度。

### 2.2 实时优化的适应度函数

PSO 算法中粒子飞行位置的好坏由适应度来评价, 因此适应度函数的选取至关重要。根据高中压配电网实时电压无功优化的要求, 在开关设备动作次数满足要求和电压水平在合理范围的基础上, 以每个时刻网损最小化来选取适应度函数。为了约束开关设备的动作次数, 利用活性因子定义一适应度分量使开关设备动作次数不至于过多。

$$\lambda_2 \left( \sum_{k=1}^{N_C+N_T} Y_k \right) / \sum_{k=1}^{N_C+N_T} (z_k - z_{k, t}) \quad (15)$$

式中,  $\lambda_2$  为动作次数超过预测动作次数的罚因子;  $Y_k$  定义如下

$$Y_k = \begin{cases} Y_k = 0 & |x_k| \leq (z_k - z_{k, t}) \\ Y_k = (|x_k| - z_k + z_{k, t}) / \eta & |x_k| > (z_k - z_{k, t}) \end{cases} \quad (16)$$

为了限制这一分量过大或过小,  $\eta$  在 0.1~10 的

范围内取值。各节点电压约束作为罚函数引入适应度函数中, 得出 PSO 的适应度函数为

$$f = C - 100P_{\text{loss } t} / P_{\text{loss } t} - \lambda_1 \sum_{i=1}^N (V_{i,t} - V_{\text{lim},t})^2 - 100\lambda_2 \sum_{k=1}^{N_C + N_T} Y_k \quad (17)$$

式中,  $C$  为一足够大的常数, 以保证适应度为正值;  $\lambda_1$  为节点电压越界罚因子;  $V_{\text{lim},t}$  定义如下

$$V_{\text{lim},t} = \begin{cases} V_{i \max} & V_i > V_{i \max} \\ V_{i \min} & V_i < V_{i \min} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

需要注意的是寻优的前提是解必须满足电压等约束条件, 为了保证电压越 0.01 pu 造成的惩罚比开关设备动作次数造成的惩罚大,  $\lambda_1$  应满足大于  $10^6 \lambda_2 (N_C + N_T) \max\{M_C, M_T\}$  的要求。

### 2.3 初始粒子定制策略

由于 PSO 具有记忆功能, 故上一时刻的控制变量作为一个初始粒子可以使得 PSO 可能记忆控制变量的大量良好信息。为了加快 PSO 的收敛速度, 基于无功就地平衡思想, 控制变量为电容器的分量用梯度值  $\Delta$  对粒子的每一分量分别赋值得到  $N_C$  个初始粒子。电压无功优化控制中有载调压变压器一次调档次数一般不超过 3 档, 同时由于优化的目标之一在于减少开关设备动作, 故粒子的变压器分量采用在上一时刻变压器分量的基础上分别叠加  $\pm 3 \times \text{rand}(0, 1)$  得到  $N_T$  个初始粒子。剩余粒子采用标准 PSO 完全随机初始化的方法。

### 2.4 约束指导寻优

在 PSO 进化的前期, 由于大量粒子的随机分布, 使得不少粒子处于不可行解的位置, 为了避免粒子过多的在无效空间搜索, 对引起状态变量越限的粒子根据配电网无功优化的特点在式中引入一约束指导分量。如变压器低压侧电压过高, 则按照就地控制的原则切除一组电容器, 或降低一档分接头挡位, 反之亦然。

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 \times \text{rand}_1 \times (p_{id} - x_{id}) = c_2 \times \text{rand}_2 \times (p_{gd} - x_{id}) + \text{round}(\text{rand}_3) \times \text{sgn}(dx) \quad (19)$$

式中,  $\text{round}$  为四舍五入函数;  $\text{rand}_3$  为 0 到 1 间的随机数;  $\text{sgn}$  为符号函数;  $dx$  为约束指导分量。通过约束指导寻优可以将位于不可行域内的粒子快速拉回可行域, 提高了 PSO 算法的收敛效率。

### 2.5 分群寻优

如前所述, PSO 算法在进化初期通常有一些适应

度很高的“超级粒子”, 这些粒子因竞争力太突出从而控制了飞行方向, 影响了算法的全局优化性能; 而在 PSO 进化的中后期如其他智能算法一样由于粒子的差异性变小, 进化速度很慢, 最终可能导致局部最优解或次优解。为了克服这一问题, 提出了根据粒子适应度的大小将粒子群分成两个子群: 基本群与激励群, 思想为不同群体采用不同的策略。基本群就是标准 PSO 的粒子群, 而激励群为一极具开拓力的群体, 其始终保持较为活跃的状态, 因而能在更为广泛的解空间中搜索最优解从而解决算法前期的“超级粒子”问题和中后期粒子的群聚倾向问题。适应度计算占了整个算法的大部分, 由此有必要对两个群体进行分群计算。基本群的适应度计算采用潮流算法为核心, 而激励群的适应度计算则以灵敏度计算为核心, 这样减少了适应度的计算量, 加快了 PSO 算法的收敛速度。

### 2.6 改进 PSO 流程

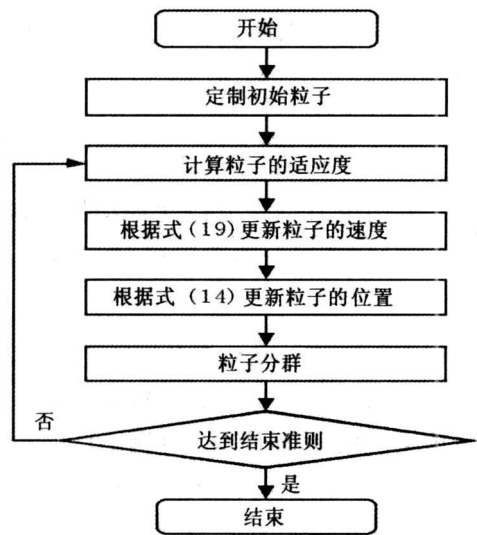


图 1 改进 PSO 流程图

## 3 算例及其分析

为了验证所提方法的有效性, 将某一实际高压配电网作为测试系统, 该系统包括三个 110 kV 变电站和一个 220 kV 枢纽变电站, 其优化控制范围从变电站 220 kV 进线端到 10 kV 出线端。状态变量母线电压的上下限值分别为 1.07 和 0.98, 其开关设备配置情况见表 1, 网络示意图如图 2 所示。

表 2 显示了利用标准 PSO 进行分时段静态优化和 MPSO 进行实时优化的综合结果比较。从表中可以

看出 PSO 和 MPSO 都改善了系统电压, 但 MPSO 的网损优化效果比 PSO 好 3.29%, 计算时间快了近 3 倍。

表 1 开关设备配置情况

变电站名称	电容器(组)	每组容量(p.u)	变压器挡位
龙头站(T <sub>1</sub> )	6	0.10 008	8×±1.25
巡场站(T <sub>2</sub> )	4	0.024	8×±1.5
竹海站(T <sub>3</sub> )	1	0.03	8×±1.5
红桥站(T <sub>4</sub> )	1	0.03	8×±1.25

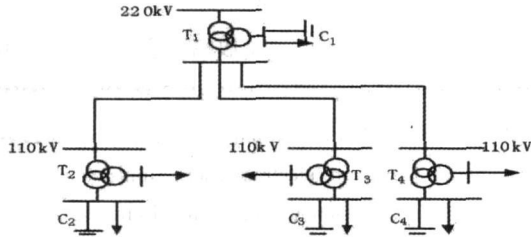


图 2 网络拓扑示意图

表 2 综合结果比较表

方法	优化前	PSO	MPSO
电压越限次数 次·天 <sup>-1</sup>	14	0	0
网损下降率 %	—	11.94	15.23
电容器动作次数 次·天 <sup>-1</sup>	—	72	8
变压器动作次数 /·天 <sup>-1</sup>	—	162	5
计算时间 /s	—	21.24	8.40

图 3 显示了电容器组 C<sub>1</sub> 的投入情况, 图 4 显示了变压器 T<sub>2</sub> 的调挡情况。从以上两幅图可以清楚看出 MPSO 的电容器和变压器动作次数比 PSO 少了许多, 且动作更为平稳, 动作次数得到了有效抑制。图 5 显示了优化前、使用 PSO 进行分时段优化和使用 MPSO 进行实时优化后的网损曲线。这些测试结果表明所提方法不仅在恢复电压水平、降低网络损耗而且在控制开关设备动作次数方面都获得了较为满意的结果。

## 4 结论

在所提高中压配电网实时电压无功优化模型的基础上, 提出改进粒子群算法实现在提高系统电压水平、降低网络损耗的同时控制开关设备的动作次数。在所提方法中, 改进 PSO 考虑配电网无功优化特点, 通过活性因子进行记忆与指导寻优, 引入约束指导分量提高了算法的搜索效率, 对粒子进行分群计算进一步提高了算法的计算速度。

实际测试系统表明所提方法在改善电压水平、降低网络损耗与减少动作次数方面简单、有效, 计算时

间对于实时运行已基本满足要求。文中采用了一天 24 时段的负荷进行实时优化, 方法可以轻易推广到目前供电企业所采用的 48、96 等时段的系统中。

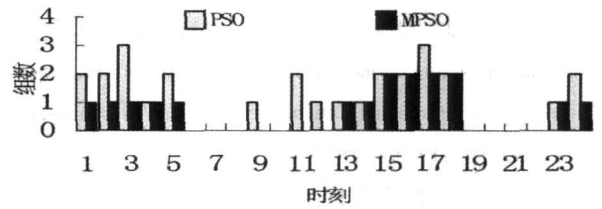


图 3 电容器投入情况

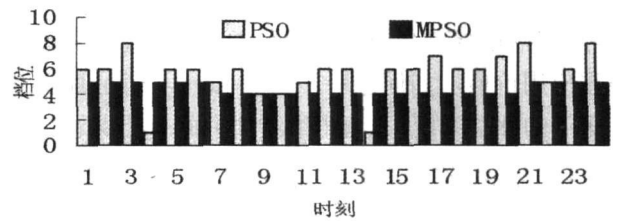


图 4 变压器挡位情况

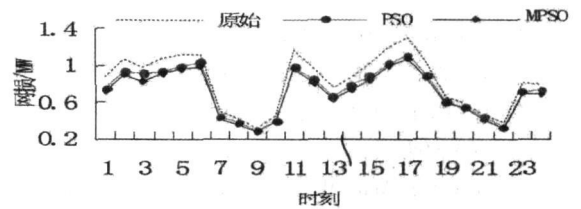


图 5 网损对比曲线

由于带动作次数约束的电压无功优化是一个具有时间和空间复杂性的非线性优化问题, 所提的 MPSO 方法进行记忆与指导寻优在一定程度上对时间进行了解耦, 但如何更好地利用历史和预测信息, 开发更合适的算法进行更富有成效的优化将是下一步应深入讨论的两个问题。

## 参考文献

- [1] 刘明波, 陈学军, 程劲晖. 三种无功优化线性规划建模方法的比较 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(2): 31-36.
- [2] 邓佑满, 张伯民, 田田. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 241-244.
- [3] Lu FC, Hsu Y Y. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(6): 639-645.
- [4] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略

[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 45—49.

[5] 方兴, 郭志忠. 配电网时变无功电压优化方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 40—44.

[6] 吴文传, 张伯明. 能量损耗最小的无功补偿动态优化算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 68—73.

[7] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks Perth Australia 1995, 4: 1942—1948.

[8] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14—19.

[9] Mantawy A H, Al-Ghandi M S. A new reactive power optimization algorithm [C]. IEEE Bologna Power Tech Conference Bologna, Italy, 2003(4): 1—6.

[10] 唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 81—84.

作者简介:

包永金 (1975—), 男, 宜宾电业局营销部配网运行工程师, 主要从事配电网的研究和管理工作。

(收稿日期: 2008—10—10)

(上接第 22 页)

际, 评估精度较高, 具有一定的理论价值和明显的工程应用价值。如何进一步研究和开发满足真实系统所需的评估系统, 是值得继续研究的重要课题。

参考文献

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56—59.

[3] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63—69.

[4] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.

[5] 肖先勇, 王希宝, 薛丽丽, 等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法 [J]. 电网技术, 2007, 31(22): 30—33.

[6] Djokic S Z, Stockman K, Milanovic J V, et al Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494—505.

[7] Djokic S Z, Desmet J, Vanalme G, et al Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 375—383.

[8] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of ac coil contactors to voltage sag short interruptions and undervoltage transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299—1307.

[9] 赵剑锋, 王浔, 潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32—37.

[10] Pema C D, Olgun G, Verde P, et al On probabilistic system indices for voltage dips [C]. 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems Ames USA, 2004, 9: 796—800.

[11] Martínez J A, Martín-Amedo J. Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1975—1982.

[12] Bollen M H J. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 1996, 32(6): 1414—1423.

[13] Qader M R, Bollen M H J, Allan R N. Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 1999, 35(1): 152—162.

[14] Moschakis M N, Hatziangyrio N D. Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1727—1734.

[15] Chang-Hyun Park, Gilsoo Jang, Thomas R J. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

[16] 王彬. 熵与信息 [M]. 西安: 西北工业出版社, 1994.

[17] 朱成骥, 孙宏斌, 张伯明. 基于最大信息熵原理的短期负荷预测综合模型 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 1—6.

[18] 马超, 肖先勇, 李勇. 线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估 [J]. 中国电机工程学报 (已录用).

[19] 姚建刚, 付维生, 陈庆祺, 等. 电力市场中电价与能源及环境保护的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 71—75.

[20] Juarez E E, Hernandez A. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1493—1500.

作者简介:

马超 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968—), 男, 副教授, 长期从事电能质量及其控制技术的教学与研究。

(收稿日期: 2008—12—08)