

# 基于模糊线性规划的无功电压优化

袁 辉, 徐贵光, 周京阳

(中国电力科学研究院, 北京 100085)

## A REACTIVE POWER/VOLTAGE OPTIMIZATION BASED ON FUZZY LINEAR PROGRAMMING

YUAN Hui, XU Gui-guang, ZHOU Jing-yang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

**ABSTRACT:** In general the traditional reactive power/voltage optimization is such a single objective optimization problem in which the decrement of active transmission power loss and the restraint of the least control variables are not considered at the same time, besides, the voltage constraints which are called as the soft constraint is not considered while the voltage constraint is processed. To solve this problem the fuzzy linear programming algorithm is led in and the mathematical model is derived by which the fuzzy multi-objective constraint can be transformed into crisp single objective constraint. The results of calculation examples show that the relation among the decrement of transmission losses, the restraint of the number of control variables and to ensure the voltage margin at the nodes can be well coordinated by fuzzy linear programming algorithm. Under the premise of adjustment of finite control variables the violated voltage can be corrected, the transmission losses can be decreased, meanwhile specified margins for all nodes can be ensured.

**KEY WORDS:** Reactive power/voltage optimization; Soft constraints; Multi-objectives; Fuzzy linear programming; Power system

**摘要:** 传统无功电压优化算法一般是单目标优化问题, 并没有考虑有功网损的降低和限制控制量调节数最少, 而且在处理电压约束时, 未考虑“软约束”特性。针对电压无功问题的这些特点, 引入模糊线性规划算法以解决这一问题。文中推导了将多目标模糊约束问题转化为单目标开明约束问题的数学模型。算例的计算结果表明, 模糊线性规划算法可以很好地协调降低网损、限制调节量和确保节点电压裕度三者的关系, 在有限控制量调节的前提下, 可实现校正违界电压、降低系统网损和确保所有节点电压留有一定的裕度。

**关键词:** 无功电压优化; 软约束; 多目标; 模糊线性规划; 电力系统

## 1 引言

维持系统各母线电压在正常范围内是保证电力系统安全稳定运行不可或缺的前提条件。在满足这一条件下进行无功优化可以降低系统有功网损, 提高系统的电能质量和运行的经济性。

为此, 各国学者开展了大量研究。但是许多作者只考虑在满足电压约束的前提下降低系统有功网损, 而没有考虑系统中控制元件的寿命和系统运行经济性的限制<sup>[1,2]</sup>。虽然文[3]考虑了后一种情况, 在满足电压约束的前提下, 以系统控制变量动作次数最少作为目标函数, 但没有考虑同时应尽量降低系统的网损。只有将这两个问题综合考虑, 才能在满足系统电压安全约束的前提下, 确保系统运行的经济性。

静态电压无功优化控制问题是一非线性优化控制问题。文献[4]~[6]分别采用牛顿法、梯度法和非线性规划法求解该问题, 但计算速度太慢。文献[2]和[7]探讨了将遗传算法(GA)用于求解无功电压优化问题, 虽然该算法从原理上能保证全局最优解, 但是当问题规模较大时, 遗传算法在计算速度上的缺陷就会更加突出, 从而对问题的迅速求解造成困难。文献[8]、[9]采用专家系统求解无功电压优化问题。虽然专家系统采用启发式方法, 更加符合问题的实质, 求解所得结果较之传统的仅采用精确数学描述的算法更优, 但是它依然存在着上述几种算法的共同缺点: 计算速度缓慢。实际上, 一般情况下的静态无功电压优化问题的非线性度较小, 在某一稳态运行点附近将其线性化后再予以解算完全是可行的。线性规划(LP)是解决诸如无功电压优化这样的大型线性化问题的有效工具, 它具有收

敛可靠、计算速度快等优点,因而在电力系统中得以广泛应用<sup>[1,10]</sup>。经典线性规划问题的解位于可行域的边界上,线性化逼近的函数如果偏离线性的程度较大,就会使解落在可行域之外,不能满足约束条件。而将电压约束条件表述为模糊约束,则更符合电压“软约束”的特点,从而使所求得解更好地处于开明(非模糊)约束域内,同时可保证系统有足够的电压裕度,不会因为负荷稍许波动而造成电压违界,进一步提高了系统的安全性。

本文探讨了模糊线性规划(FLP)算法用于解决无功电压优化的问题。首先根据模糊集理论,推导出多目标模糊约束规划问题转化为给定模糊集下单目标开明约束规划的公式,然后将以系统网损和控制量偏移最小为目标,以节点电压和控制量调整为约束条件的多目标模糊非线性规划问题转化为标准的 LP 问题,最后解算一个实际系统算例,并对计算结果进行了分析。

## 2 多目标模糊线性规划

自从 Zadeh 于 1956 年提出模糊集理论以来,模糊理论在许多领域得到了广泛应用。模糊理论第一次应用于电力系统是用于解决系统的长期决策问题<sup>[11]</sup>。由于电力系统是一个巨大而复杂且地域分布广阔的分布式系统,在电力系统的各种问题中都存在着许多不确定因素,因而仅通过严格的数学方程式便难以取得令人满意的效果,模糊理论以其能处理包含不确定因素的问题的优势,而展现出巨大的潜力。

模糊线性规划(FLP)算法结合模糊集理论在反映不确定因素的特质以及计算快速、收敛可靠等方面,较之单纯采用基于专家知识的启发式专家系统和仅基于在稳态运行点附近线性化的线性规划算法更好。实际上无功电压优化问题的电压约束属于“软约束”,有载调压变压器(OLTC)的变比、并联元件的容量、发电机的机端电压等属于“硬约束”(即受物理条件的制约),必须保持在上下界限之内。但在传统的 LP 问题中,将所有的约束都处理为“硬约束”,这不大符合问题的实际情况。通过引入模糊集,就可以对“软约束”进行处理,从而能建立起更符合实际的数学模型。

考虑一个标准 LP 问题

$$\min F = C^T X \quad (1)$$

$$\text{s.t. } A X \geq b \quad (2)$$

$$X \geq 0 \quad (3)$$

式中  $F$  为目标函数; $C^T$  为目标函数对控制量灵敏度矩阵的转置矩阵; $A$  为约束量对控制量的灵敏度矩阵; $X$  为控制矢量; $b$  为控制量约束矢量。

将该标准 LP 问题扩展为多目标非线性函数问题,并将约束条件(2)模糊化,则可得

$$\min F' = [C_1^T X, \dots, C_N^T X] \quad (4)$$

$$\text{s.t. } A X \gtrsim b \quad (5)$$

$$X \geq 0 \quad (6)$$

式中  $F' = [F_1, \dots, F_N]^T$  表示该问题有  $N$  个目标函数;符号“ $\sim$ ”表示模糊关系。

设  $C_M$  为目标函数允许接受的最大值,则不等式(5)可以扩展为

$$A' X \gtrsim b' \quad (7)$$

式中  $A' = [A | -C_1^T, \dots, -C_N^T]$ ;  $b' = [b | -C_{M1}, \dots, -C_{MN}]$

对于每一个约束条件都定义相应的模糊可行域,这些可行域的交集就是可行解的模糊集。根据模糊集交的定义<sup>[12]</sup>,模糊约束不等式(7)等价于  $S = \min\{m_{B1}(X), \dots, m_{BM}(X), m_{C1}(X), \dots, m_{CN}(X)\} =$

$$m_{B1} \wedge \dots \wedge m_{Bm} \wedge m_{C1} \wedge \dots \wedge m_{CN} \quad (8)$$

式中  $S$  为满意度; $m_{Bm}$  为与约束条件对应的模糊集, $m=1, \dots, M$ ;  $m_{Cn}$  为与目标函数对应的模糊集, $n=1, \dots, N$ 。

根据模糊集理论可知,模糊集的隶属度越大,所得的解就越优,也就是越好。因此等式(8)对应的最优解被定义为

$$S^* = \max S = \max \min\{m_{B1}(X), \dots, m_{BM}(X), m_{C1}(X), \dots, m_{CN}(X)\} \quad (9)$$

将与不等式(7)对应的隶属度函数定义为一分段线性函数

$$m_i(X) = \begin{cases} 0 & A'_i X - b'_i \\ \frac{A'_i X - b'_i}{b'_{Mi} - b'_i} & b'_i < A'_i X \leq b'_{Mi} \\ 1 & A'_i X > b'_{Mi} \end{cases} \quad (10)$$

这样在该定义下,等式(9)就等价于

$$S^* = \max S = \max \min\{m_i(X)\} \quad (11)$$

$$\text{s.t. } X \geq 0$$

$$0 \leq S \leq 1$$

$$m_i(X) - S \geq 0 \quad i=1, \dots, m+n$$

至此,就将原多目标非线性模糊约束问题构造为给定模糊集下的单目标非线性问题,将其线性化

之后就可以构造出标准的单目标 LP 问题。

### 3 无功电压优化的模糊线性化

对于所考察的无功电压优化问题,以系统网损及控制量偏移最小为目标函数,以节点电压和控制量调节范围的上、下限值为约束条件,构造多目标非线性规划问题。即

$$\min F' = C^T X \quad (12)$$

$$\text{s.t. } U_{j,\min} \leq U_j(X) \leq U_{j,\max} \quad (13)$$

$$Q_{g,k,\min} \leq Q_{g,k} \leq Q_{g,k,\max} \quad (14)$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (15)$$

$$g(X) = 0 \quad (16)$$

$$X \geq 0 \quad (17)$$

式中 目标函数  $F' = [P_1, B]^T$ , 包含系统有功网损  $P_1$  和控制量偏移  $B$  目标;  $U_j(X)$  为节点  $j$  的电压幅值,  $U_{j,\min}$  和  $U_{j,\max}$  分别为其上、下限值;  $Q_{g,k}$  为发电机  $k$  发出的无功功率,  $Q_{g,k,\min}$  和  $Q_{g,k,\max}$  分别为其上、下限值;  $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$  分别为控制变量  $X$  的上、下限值; 式(16)为潮流方程系统功率平衡条件。

因为在优化过程中,除平衡机有功注入发生变化外,其余发电机节点的有功注入均保持不变,所以网损的变化量与平衡机有功注入的变化量相等,故此可以用平衡机的  $\Delta P$  来代替  $\Delta P_1$ 。

将问题模糊化的关键在于确定模糊集所对应的隶属度函数。本文采用分段线性函数来表示目标函数有功网损  $P_1$  和控制量偏移  $B$  的隶属度函数,以构造单目标模糊线性规划问题。

网损  $P_1$  的隶属度函数采用降半梯形分布,即

$$m(P_1) = \begin{cases} 1 & P_1(X) \leq P_{1M} - e_{P_1} \\ \frac{P_{1M} - P_1(X)}{e_{P_1}} & P_{1M} - e_{P_1} < P_1(X) \leq P_{1M} \\ 0 & P_1(X) > P_{1M} \end{cases} \quad (18)$$

式中  $e_{P_1}$  为理想的最大网损下降值。

控制量偏移  $B$  的隶属度函数为

$$m(B) = \begin{cases} 1 & B(X) = 0 \\ \frac{e_B - B(X)}{e_B} & B(X) \leq e_B \\ 0 & B(X) > e_B \end{cases} \quad (19)$$

式中  $e_B$  为控制量偏移  $B$  的最大允许变化值。

节点电压约束  $U_j(X)$  的隶属度函数采用梯形分布

$$m(U_j) = \begin{cases} 1 & U_{j,\min} + e_{v_j} < U_j(X) \leq U_{j,\max} - e_{v_j} \\ \frac{U_{j,\max} - U_j(X)}{e_{v_j}} & U_{j,\max} - e_{v_j} < U_j(X) < U_{j,\max} \\ \frac{U_j(X) - U_{j,\min}}{e_{v_j}} & U_{j,\min} \leq U_j(X) < U_{j,\min} + e_{v_j} \\ 0 & U_{j,\max} < U_j(X) \text{ 或 } U_j(X) < U_{j,\min} \end{cases} \quad (20)$$

式中  $e_{v_j}$  为节点  $j$  的电压允许最大偏移值。

根据模糊集理论,将多目标无功电压优化问题转化为单目标满意度优化问题。即

$$\max S \quad (21)$$

$$\text{s.t. } P_1(X) + e_{P_1} \cdot S \leq P_{1M} \quad (22)$$

$$B(X) + e_B \cdot S \leq e_B \quad (23)$$

$$U_j(X) - e_{v_j} \cdot S \geq U_{j,\min} - e_{v_j} \quad (24)$$

$$U_j(X) + e_{v_j} \cdot S \leq U_{j,\max} + e_{v_j} \quad (25)$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (26)$$

$$g(X) = 0 \quad (27)$$

$$0 \leq S \leq 11 \quad (28)$$

$$X \geq 0 \quad (29)$$

式(26)为系统控制量。发电机端电压幅值  $U_{g_s}$ 、并联补偿元件补偿容量  $S_c$  和有载调压变压器(OLTC)变比  $T_K$  为所允许调节范围的约束条件。

式(21)是一非线性优化问题。由满足等式  $g(X) = 0$  的初始潮流计算得到的系统初始运行点,并在该点附近对目标函数和约束条件进行线性化处理。设  $X_0$  和  $S_0$  分别为控制变量  $X$  和满意度  $S$  的初始值,  $\Delta X$  及  $\Delta S$  分别为控制量  $X$  和满意度  $S$  在初始值附近的增量。线性化之后,原非线性优化问题就近似为如式(30)所示的线性优化问题。

$$\max \Delta S \quad (30)$$

$$\text{s.t. } \left. \frac{\partial P_1(X)}{\partial X} \right|_{X_0} \cdot \Delta X + e_{P_1} \cdot \Delta S \leq P_{1M} - P_1(X_0) - e_{P_1} \cdot S_0$$

$$\left. \frac{\partial B(X)}{\partial X} \right|_{X_0} \cdot \Delta X + e_B \cdot \Delta S \leq e_B - B(X_0) - e_B \cdot S_0$$

$$\left. \frac{\partial U_j(X)}{\partial X} \right|_{X_0} \cdot \Delta X - e_{v_j} \cdot \Delta S \geq U_{j,\min} - U_j(X_0) - e_{v_j} \cdot S_0$$

$$\left. \frac{\partial U_j(X)}{\partial X} \right|_{X_0} \cdot \Delta X + e_{v_j} \cdot \Delta S \leq U_{j,\max} - U_j(X_0) + e_{v_j} - e_{v_j} \cdot S_0$$

$$\left. \frac{\partial Q_{g,k}(X)}{\partial X} \right|_{X_0} \cdot \Delta X \geq Q_{g,k,\min} - Q_{g,k}(X_0)$$

$$\left. \frac{\partial Q_{g,k}(X)}{\partial X} \right|_{X_0} \cdot \Delta X \leq Q_{g,k,\max} - Q_{g,k}(X_0)$$

$$X_{\min} - X_0 \leq \Delta X \leq X_{\max} - X_0$$

$$X_{\min} - X_0 \leq \Delta X \leq X_{\max} - X_0$$

$$-S_0 \leq \Delta S \leq 1 - S_0$$

式中  $Q_{g,k}$  为发电机  $k$  发出的无功功率,  $Q_{g,k,\min}$  和  $Q_{g,k,\max}$  分别为其上、下限值;  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为控制变量  $X$  的上、下限值,  $\left. \frac{\partial f(X)}{\partial X} \right|_{X_0}$  为函数  $f(X)$  对自变量  $X$  的偏导数在初始点  $X_0$  处的取值。至此, 就构造出了标准的 LP 问题。

#### 4 算例及分析

以一实际的 97 母线系统为例进行计算分析。该系统控制量包括: 11 台发电机、42 组并联电容器和 130 台有载调压变压器。其中当前可以控制的有发电机 7 台、并联电容器 27 组和有载调压变压器 84 台。

系统合格的电压范围设为 0.95~1.05 pu, 无功电压优化结果列于表 1, 其中违界节点数为 7, 控制量调节数为 9, 满意度  $S_{p1}$  为 1.0,  $S_U$  为 0.6348,  $S_B$  为 0.9401。表中  $\bar{U}$ 、 $\underline{U}$  分别表示系统当前最高、最低电压幅值。

表 1 7 违界点的无功电压优化  
Tab. 1 Reactive power/voltage optimization with 7 violated nodes

|                      | 优化前     | 优化后     |
|----------------------|---------|---------|
| 网损/pu                | 0.208   | 0.199   |
| 1:                   | 0.911 2 | 0.954 6 |
| 2:                   | 0.927 4 | 0.970 4 |
| 3:                   | 0.945 6 | 0.951 6 |
| 违界点电压/pu             | 4:      | 0.945 8 |
|                      | 5:      | 0.946 0 |
|                      | 6:      | 0.946 1 |
|                      | 7:      | 0.949 4 |
|                      | 0.955 3 |         |
| $\bar{U}$ / pu       | 1.041 3 | 1.045 5 |
| $\underline{U}$ / pu | 0.911 2 | 0.951 6 |

从该算例可以看出, 对系统中可控元件有限数量的调整, 消除了系统的电压违界节点, 而且没有因控制元件的调整而带来新的违界节点, 使所有节点的电压都留有一定的裕度, 不会因负荷的稍许波动而导致节点电压违界, 从而提高了系统的安全水平。

优化过程中, 经过两次 LP 计算后系统中所有的违界节点电压得以恢复正常。第一次 LP 计算之后, 违界节点 2、3、4、5、7 电压恢复至限值以内, 节点 1、6 电压分别上升为 0.9473 和 0.9489; 第二次 LP 计算之后, 节点 1、6 的电压也被拉回到限值以内, 因此系统中所有节点的电压均位于上下限值以内, 并留有一定裕度, 满足了系统电压安全的要求。

FLP 计算之后, 各目标函数所对应的满意度指标都达到了一个令人满意的值。系统有功网损  $P_1$  所对应的满意度指标  $S_{P_1}$  为 1.0, 这说明校正之后所得的网损值位于相应隶属度函数值为 1 的区域内, 已经达到了相应定义下的最优状态; 系统电压对应的满意度指标  $S_U$  为 0.6348, 此值不像网损满意度  $S_{P_1}$  和控制量偏移满意度  $S_B$  那么大, 这是因为校正以前系统中所有违界节点都是违电压下界, 说明系统此时的无功功率不足, 通过系统无功电压控制元件的调整, 增加了系统的无功功率, 提高了系统的电压水平, 使得所有违界节点的电压都被拉回到限值以内。但是由于系统的无功分布不均衡, 其最低、最高电压水平差别较大, 如果想要进一步提高最低节点电压水平和使较高电压水平节点维持一定的电压裕度, 就必须提高系统的无功功率, 同时增加系统中参与调节的元件数, 而这与系统降低参与调节的控制元件数的目标函数相悖。因此为了使系统中所有节点的电压都保持有一定的裕度, 就必须协调好参与调节的控制元件数量的目标函数和节点电压裕度。在算例给定的条件下, 程序运算之后就得到了当前的电压满意度; 与系统控制量偏移对应的满意度标  $S_B$  为 0.9401; 为了消除系统中的 7 个违界节点而调节了 9 个控制元件 (即调节 3 台发电机的机端电压, 投入 1 组并联电容器, 调节 5 台 OLTC 的分接头), 仅占系统当前可控元件总数的 7.63%。这说明在目标函数中引入的对可控元件调节数量的控制是成功的。

从以上的算例分析可以看出: 在所选取的隶属度函数下, 模糊线性规划算法对于解决多目标无功电压优化问题是十分有效的。

#### 5 结论

本文以系统网损和控制量偏移最小为目标函数, 考虑了节点电压的“软约束”特性, 通过选取合适的模糊隶属度函数构造了单目标线性规划问题。通过算例的解算表明, 优化后系统网损及控制量调整数量令人满意, 违界电压不仅得以校正, 还保证了所有节点的电压在优化后都留有一定的裕度。

#### 参考文献

- [1] Abdul-Rahman K H, Shahidehpour S M. A fuzzy-based optimal reactive-power control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 662-670.

(下转第 57 页 continued on page 57)

## 4 结论

考虑了电介质、屏蔽环、线路及铁塔对绝缘子电压分布的影响,计算了 750kV 线路绝缘子的电压分布,计算结果和实测结果比较一致,并取得了以下结论:

(1) 绝缘子串承受电压百分比的分布情况可通过有限元计算的方法求得,并可有效排除系统、环境等因素的干扰。

(2) 本文采用三维有限元计算方法,考虑了各种因素的影响,计算结果具有实际参考意义。

(3) 对玻璃绝缘子串加屏蔽环以减少第 1 片绝缘子承受的电压百分比,效果明显。屏蔽环的最佳位置是将第 1 片绝缘子埋入屏蔽环中。

(4) 三维有限元法是计算绝缘子串电压分布的理想方法,可以进行进一步的分析讨论,如系统部分电容矩阵的计算、伞裙爬电路径的电场分布计算、含有缺陷绝缘子及污秽绝缘子的绝缘子串电压分布计算等。

## 参考文献

- [1] 丁一正,张俊兰,陈雄一,等 (Ding Yizheng, Zhang Junlan, Chen Xiongyl *et al*). 500kV 线路绝缘子串电压分布的现场实测与分析 (Field measurement and analysis of voltage distribution on 500kV

transmission line insulator strings) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2000, 33(2): 45-47.

- [2] 李明,马仪. 高海拔 500kV 形绝缘子串工频电压分布研究[J]. 云南电力技术, 2000, 28(2): 25-26.
- [3] 李晓峰,李正瀛,陈俊武,等 (Li Xiaofeng, Li Zhengying, Chen Junwu *et al*). 提高线路绝缘子防污闪及抗泄漏性能的新方法 (A new method for improving flashover and leakage characteristics of line insulator) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2001, 25(10): 69-72.
- [4] 丁立健,李成榕,王景春,等 (Ding Lijian, Li Chengrong, Wang Jingchun *et al*). 真空中绝缘子沿面预闪络现象的研究 (Study on pre-flashover of aluminium insulator in vacuum) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21(9): 27-32.
- [5] 许中,钟连宏,谷莉莉 (Xu Zhong, Zhong Lianhong, Gu Lili). 特高压线路绝缘子串电压分布测试方法初探 (The measurement method of voltage distribution on insulator strings of the UHV line) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 1998, 24(4): 59-63.

收稿日期: 2003-04-22。

作者简介:

沈鼎申 (1971-), 男, 本科, 高级工程师, 从事高电压技术研究工作;

张孝军 (1969-), 男, 硕士, 工程师, 从事高电压技术研究工作;

万启发 (1951-), 男, 硕士, 教授级高工, 从事高电压技术研究工作;

阮江军 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电磁场、电磁兼容研究工作。

(编辑 马晓华)

(上接第 45 页 continued from page 45)

- [2] 宋军英,刘涤尘,陈允平 (Song Junying, Liu Dichen, Chen Yunping). 电力系统模糊无功优化的建模及算法 (A fuzzy model and approach for power system reactive power optimization) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2001, 25(3): 22-25.
- [3] Kevin Tomsovic. A fuzzy linear programming approach to the reactive power/voltage control problem [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 287-293.
- [4] Dommel H W, Tinney W F. Optimal power flow solutions [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1968, 87(10): 1866-1876.
- [5] Shoults R R, Sun D T. Optimal power flow based upon PQ decomposition [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1982, 101(2): 397-405.
- [6] Mansour M O, Abdel-Rahman T M. Non-linear VAR optimization using decomposition and coordination [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1984, 103(2): 246-255.
- [7] 文劲宇,江振华,江霞,等 (Wen Jinyu, Jiang Zhenhua, Jiang Xia *et al*). 基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现 (Genetic algorithm based reactive power optimization and its application in Ezhou city power system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(2): 45-47.
- [8] Liu C C, Tomsovic K L. An expert systems control [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3): 195-201.

- [9] Cheng S J, Malik O P, Hope G S. An expert system for voltage and reactive power control of a power system [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(4): 1449-1455.
- [10] Sanchez-Gasca J J, Clark K, Miller N W *et al*. Identifying linear models from time domain simulations [J]. IEEE Trans on Computer Applications in Power, 1997, 10(2): 26-30.
- [11] Dhar S B. Power system long-range decision analysis under fuzzy environment [J]. IEEE Trans on PAS, 1979, 98(2): 585-596.
- [12] 刘普寅,吴孟达. 模糊理论及其应用 [M]. 长沙: 国防大学出版社, 2000.

收稿日期: 2002-07-10。

作者简介:

袁辉,男,工程师,从事 EMS 应用软件、电力市场、无功电压优化的研究及工程化工作;

徐贵光,男,工程师,从事 EMS 应用软件的研究及工程化工作;

周京阳,女,高级工程师,研究方向为经济调度、EMS 和电力市场。

(编辑 查仁柏)