

文章编号:1005-3085(2004)07-0109-08

电力市场输电阻塞管理模型

万 磊, 龙振兴, 欧小亮

指导教师: 李明奇

(电子科技大学, 成都 610054)

编者按: 本文根据实验数据, 用最小二乘法拟合, 得到各线路上有功潮流关于各机组出力的近似表达式, 设计了较为合理的阻塞费用计算规则。引入危险因子概念, 把输电阻塞管理问题归结为首先以危险因子为目标函数的规划问题, 再以其最小值为约束, 求得使阻塞费用最小的出力分配方案。本文文字简洁, 论述清楚。

摘 要: (略)

关键词: 电力阻塞; 阻塞费用; 危险因子

分类号: AMS(2000) 62J05

中图分类号: O241.2

文献标识码: A

1 问题的分析

根据功率的叠加原理, 各线路上有功潮流应为各发电机组出力的线性组合, 考虑对所有实验数据采用最小二乘法进行线性拟合, 从而得到各线路有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式。得到分配预案后, 代入近似表达式便可计算各线路上的潮流值。为保证电网的安全, 每条线路潮流的绝对值超过潮流限值的百分比应尽量小。若使各线路中潮流超出的百分比中最大的值尽量小, 就可保证所有线路上潮流超出的百分比比较小, 即电网相对较为安全。在电网安全运行的保证下应当同时考虑尽量减少阻塞费用。

阻塞费用分为两个部分: 一是对序内容量不能出力部分的补偿; 二是对报价高于清算价的序外容量出力部分的补偿。以每个机组各自的报价作为其边际成本, 则该机组单位出力的绝对盈利为清算价与报价的差值, 因此, 补偿的主要目的是解决由于方案调整导致的获利变化的问题。

该阻塞管理问题归结为在一定约束条件下的最优化问题。优化目标为使潮流超出现值的百分比尽量小, 同时尽可能减少阻塞费用。

2 基本假设

1. 机组当前出力是对机组在当前时段结束时刻实际出力的预测值;
2. 每个时段的负荷预报和机组出力分配计划的参照时刻均为该时段结束时刻;
3. 机组在单位时间内能增加或减少的出力相同, 出力值为爬坡速率;
4. 各个发电机组出力相互独立, 即出力不受其他机组影响。

3 定义符号说明

x_i 第 i 个机组的出力值; 单位: 兆瓦, 记作 MW

x'_i 调整后第 i 个机组的出力值; 单位: MW

v_i 第 i 个机组的爬坡速率; 单位: $MW/\text{分钟}$

l_j 第 j 条线路的有功潮流值; 单位: MW

- A_j 第 j 条线路的初始潮流值; 单位: MW
 L_j 第 j 条线路的潮流限值; 单位: MW
 a_j 第 j 条线路的潮流的安全裕度;
 p_i 分配预案中第 i 个机组的最终报价; 单位: 元/MWh
 p'_i 调整方案后第 i 个机组的最终报价; 单位: 元/MWh
 f_i^+ 对第 i 个序外容量的补偿; 单位: 元
 f_i^- 对第 i 个序内容量的补偿; 单位: 元
 X 负荷预报; 单位: MW
 P 清算价; 单位: 元/MWh
 T 时段长, T 为15分钟。

4 模型的建立

1) 有功潮流近似表达式的确定

每条线路上的有功潮流取决于电网结构和各发电机组的出力, 问题所研究的电网有8台发电机组, 6条主要线路, 附件1中表1和表2的方案0给出了各机组的当前出力和各线路上对应的潮流值, 方案1-32给出了围绕方案0的一些实验数据。根据功率的叠加原理, 我们认为各线路上有功潮流应为各发电机组出力的线性组合, 随机抽取两组方案进行检验, 得到以下图形。

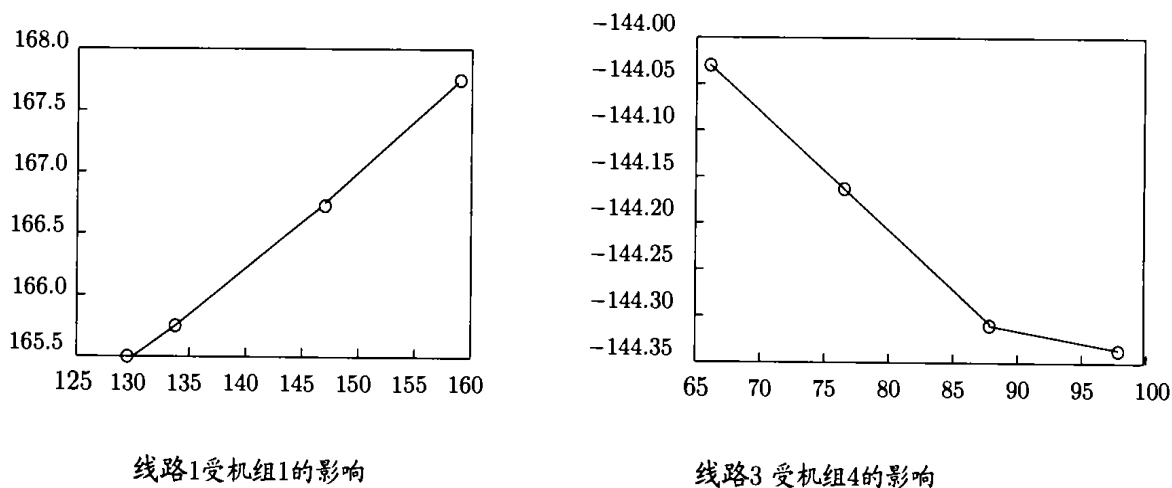


图1 对实验方案的分析

从图形中我们发现, 有功潮流受到各机组的影响近似成线性关系, 因此假设有功潮流关于各个机组出力的函数关系式为

$$l_j = \sum_{i=1}^8 k_{ji} x_i + A_j$$

其中 l_j 表示第 j 条线路上的潮流值, k_{ji} 表示第 j 条线路受第 i 台机组影响的比例系数, x_i 表示第 i 台机组的出力, A_j 表示第 j 条线路对应的初始潮流值。

对应每一条线路, 根据表1表2中的数据可列出关于未知数 $k_{ji}(i=1, 2, \dots, 8)$ 的32个方程的超定方程组, 在Matlab下编程求解方程组, 得到结果如下:

$$\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \\ l_6 \end{pmatrix} = x_1 \begin{pmatrix} 0.0826 \\ -0.0547 \\ -0.0694 \\ -0.0346 \\ 0.0003 \\ 0.2376 \end{pmatrix} + x_2 \begin{pmatrix} 0.0478 \\ 0.1275 \\ 0.0620 \\ -0.1028 \\ 0.2428 \\ -0.0607 \end{pmatrix} + x_3 \begin{pmatrix} 0.0528 \\ -0.0001 \\ -0.1565 \\ 0.2050 \\ -0.0647 \\ -0.0781 \end{pmatrix} + x_4 \begin{pmatrix} 0.1199 \\ 0.0332 \\ -0.0099 \\ -0.0209 \\ -0.0412 \\ 0.0929 \end{pmatrix} \\
+ x_5 \begin{pmatrix} -0.0257 \\ 0.0867 \\ 0.1247 \\ -0.0120 \\ -0.0655 \\ 0.0466 \end{pmatrix} + x_6 \begin{pmatrix} 0.1216 \\ -0.1127 \\ 0.0024 \\ 0.0057 \\ 0.0700 \\ -0.0003 \end{pmatrix} + x_7 \begin{pmatrix} 0.122 \\ -0.0186 \\ -0.0028 \\ 0.1452 \\ -0.0039 \\ 0.1664 \end{pmatrix} + x_8 \begin{pmatrix} -0.0015 \\ 0.0985 \\ -0.2012 \\ 0.0763 \\ -0.0092 \\ 0.0004 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 110.4775 \\ 131.3521 \\ -108.9928 \\ 77.6116 \\ 133.1334 \\ 120.8481 \end{pmatrix}$$

2) 阻塞费用计算规则的设计

当改变根据电力市场交易规则得到的各机组出力分配预案时,一些通过竞价取得发电权的发电容量(称序内容量)不能出力;而一些在竞价中未取得发电权的发电容量(称序外容量)要在低于对应报价的清算价上出力。以机组的最终报价作为其边际成本,则该机组单位出力的绝对盈利为清算价与报价的差值,因此,补偿的主要目的是解决由于方案调整导致获利变化的问题。

我们设计的阻塞费用计算规则如下:

1) 对于序内容量:由于方案的调整,使得一些机组的出力值减少,减少部分的获利值消失。为解决这部分冲突,网方赔偿该机组应得的获利值,有

$$\text{补偿费用} = (\text{清算价} - \text{调整前报价}) \times \text{调整量}$$

即

$$f_i^- = (P - p_i) \times (x_i - x_i')$$

2) 对于序外容量:方案调整后,一些机组由于出力增加,其边际成本(报价)也随之增加,但由于清算价保持不变,机组不得不在低于其报价的清算价上出力,导致了获利损失。因此,网方对调整的出力部分造成的损失应给予补偿,有

$$\text{补偿费用} = (\text{调整前报价} - \text{清算价}) \times \text{调整量}$$

即

$$f_i^+ = (p_i' - P) \times (x_i' - x_i)$$

总的阻塞费用即为

$$f = \sum_{i=1}^8 (f_i^+ + f_i^-)$$

2. 约束条件的讨论

1) 爬坡速率

由假设1,在当前时段,市场交易-调度中心预测出各机组结束时刻的实际出力,即当前出力值,由于爬坡速率的约束,当前出力在时段长15分钟内改变的值有限,有

$$x_{i\min} = x_{i0} - v_i T, \quad x_{i\max} = x_{i0} + v_i T$$

其中, 对于第 i 个机组, x_{i0} 为当前的出力值, $x_{i \min}$ 为其下一时段出力值的下限, $x_{i \max}$ 为其下一时段出力值的上限, v_i 为爬坡速率, T 为时段长。因此, 下一时段的出力值须满足:

$$x_i \in [x_{i \min}, x_{i \max}]$$

2) 线路潮流值

为保证电网的安全, 要求各线路的有功潮流的绝对值低于其安全限值, 在应急情况下还可以使用线路的安全裕度输电, 当用电负荷过大, 无法使用安全裕度输电时, 则必须用电侧拉闸限电。

因此, 线路潮流值的约束为

$$\begin{cases} l_j < L_j & \text{可消除输电阻塞时} \\ l_j < L_j(1 + a_j) & \text{使用安全裕度输电时} \end{cases}$$

其中, l_j 为第 j 条线路的有功潮流值, L_j 为第 j 条线路的潮流限值, a_j 为第 j 条线路的潮流的安全裕度。

3) 负荷需求

各机组分配到的出力总和应为总负荷需求的预报值, 即有

$$\sum_{i=1}^8 x_i = X$$

其中, X 为负荷需求预报。

3. 分配预案的确定

根据市场交易规则, 分配预案制订的算法如下:

- 1) 把各机组相应的段容量和段价输入矩阵;
- 2) 找出段价矩阵中的最小元素;
- 3) 根据最小元素找到段容量矩阵中对应位置的元素, 逐步取出该元素的值, 直到该机组被选入的段容量达到受爬坡速率约束的上限或所有机组的段容量之和等于预报的负荷;
- 4) 把该最小元素赋以一个较大的值, 重复2) -4)。

4. 阻塞管理模型的建立

市场交易-调度中心在整个工作的流程中, 通过电力市场交易规则确定分配预案, 然后计算各线路潮流值并判断执行该预案是否会出现输电阻塞, 若出现, 则需研究如何制订既安全又经济的调度计划。

首先, 我们定义第 i 线路上潮流值的绝对值超过限值的百分比的函数为

$$y_i = \begin{cases} \frac{l_i - L_i}{L_i} & l_i > L_i \\ 0 & l_i \leq L_i \end{cases}$$

进一步, 引入危险因子为

$$z = \max_{1 \leq i \leq 8} \left\{ \frac{y_i}{a_i} \right\}$$

z 即为所有线路中潮流值的绝对值超过限值的百分比相对于安全裕度的最大值。使 z 尽可能小, 则保证了所有线路潮流值超过限值的百分比较小。同时, 在电网安全运行的保证下, 应考虑尽量减少阻塞费用, 可以建立关于 f, z 值的双目标优化模型如下:

$$\begin{cases} \min & z \\ \min & f = \sum_{i=1}^8 (f_i^+ + f_i^-) \end{cases}$$

$$s.t. \quad \begin{cases} x_i \in [x_{i\min}, x_{i\max}] \\ \sum_{i=1}^8 x_i = X \\ l_i < L_i & (z = 0) \\ \text{or}; l_i < L_i(1 + a_i) & (z > 0) \end{cases}$$

其中, $z = 0$ 时表调整方案后可以使得输电阻塞消失, $z > 0$ 表示无法消除阻塞, 只能采用安全裕度输电。

5 模型的求解

1. 预报负荷需求为982.4MW时

1) 分配预案的制定

调用源程序, 输入预报负荷需求 $X = 982.4$, 可得分配预案为

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 150 | 79 | 180 | 99.5 | 125 | 140 | 95 | 113.9 |

此方案的清算价是303元/MWh, 购电成本 $= 982.4 \times 303 \times \frac{1}{4} = 74416.8$ (元)

2) 潮流值的计算

将分配预案代入有功潮流的表达式, 得到各线路潮流值为

| l_1 | l_2 | l_3 | l_4 | l_5 | l_6 |
|--------|--------|---------|-------|--------|--------|
| 173.31 | 141.02 | -150.92 | 120.9 | 136.81 | 168.51 |

此时, 线路1、5、6的潮流值均超过其限值, 造成了输电阻塞。

3) 阻塞管理模型调整的结果

由于双目标函数的程序量和计算量较大, 我们对模型做了适当的转化:

① 双目标问题的转化

电网公司在组织交易、调度、和配送时, 必须遵循电网“安全第一”的原则, 在电网安全运行的保证下同时考虑尽量减少阻塞费用。求解这个双目标问题时, 我们采取“两步走”的策略: 首先不考虑阻塞费用, 对方案进行调整使危险因子 z 最小; 然后在此基础上, 固定 z , 对方案进一步调整使得阻塞费用最小。

② 阻塞费用的近似等价转化

根据阻塞费用的计算规则, 我们建立了阻塞费用关于各机组出力的非线性方程, 在Lingo下编程得到的解为局部最优解, 且十分不稳定, 故考虑对其进行近似等价, 使之转化为线性规划。算法如下:

a. 计算 f_i^+ 时, 根据规则每台机组应当以取得发电权的各段序外容量的最终报价与清算价的差值进行补偿, 现在调整为各段分别按对应的报价与清算价的差值进行补偿;

b. f_i^- 的计算方法不变;

c. 通过转化后的函数得到结果, 再代回原规则计算阻塞费用。

在Lingo下编写程序进行计算, 得到较优的调整方案为

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 150.4 | 88 | 228 | 75.6 | 152 | 95 | 76.4 | 117 |

相应的各线路潮流值为

| l_1 | l_2 | l_3 | l_4 | l_5 | l_6 |
|-------|-------|---------|--------|-------|--------|
| 165 | 149.4 | -154.98 | 127.26 | 132 | 160.28 |

此时目标结果为:

$$z = 0, \quad f = 3264$$

调整结果分析:

当预报负荷需求为982.4MW 时, 可以消除输电阻塞, 阻塞费用为3264元。

2. 预报负荷需求为1052.8MW 时

1) 出力分配预案的确定

调用源程序, 输入预报负荷需求 $X = 1052.8MW$, 可得分配方案为:

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 150 | 81 | 218.2 | 99.5 | 135 | 150 | 102.1 | 117 |

此方案的清算价为356元/MWh, 购电成本 $= 1052.8 \times 356 \times \frac{1}{4} = 93699.2$ (元)

2) 潮流值的计算

将分配预案代入有功潮流表达式, 得到各线路潮流值为:

| l_1 | l_2 | l_3 | l_4 | l_5 | l_6 |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 177.24 | 141.18 | -156.15 | 129.73 | 134.81 | 167.06 |

此时, 线路1, 5, 6的潮流值均超过其限值, 造成输电阻塞。

3) 阻塞管理模型调整的结果

同理, 调用源程序, 求解得调整后的方案为:

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 153 | 88 | 228 | 99.5 | 152 | 155 | 60.3 | 117 |

相应的各线路潮流值为:

| l_1 | l_2 | l_3 | l_4 | l_5 | l_6 |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 173.41 | 143.6 | -155.2 | 124.67 | 135.38 | 160.41 |

此时目标结果为:

$$z = 0.3922075, \quad f = 1437.5$$

调整结果分析:

当预案需求为1052.8MW 时, 无法消除输电阻塞, 但可以使用安全裕度输电, 调整前方案的 $z = 0.57$, 调整后 $z = 0.3922075$, 降低了潮流超过限值的百分比, 使电网运行更加安全, 此时阻塞费用为1437.5元。

6 结果分析

1. 对有功潮流近似表达式的分析

为了检验拟合质量, 我们计算出各线路拟合值和33组已知值绝对误差的平均值

$$\overline{err} = \frac{\sum_{i=1}^{33} (|l_i - l'_i|)}{33}$$

其中 l'_i 为实验数据, l_i 为拟合数据, 计算得到

$$\overline{err} = (0.0260 \quad 0.0233 \quad 0.0251 \quad 0.0242 \quad 0.0274 \quad 0.0273)$$

结果表明, 6条线路潮流的拟合值和实际值比较, 几乎没有什么变化。下图为第5条线路拟合值和实际值的离散图。其中圆圈表示拟合值, 实点表示实际值。从图中可见用线性拟合的效果非常好。

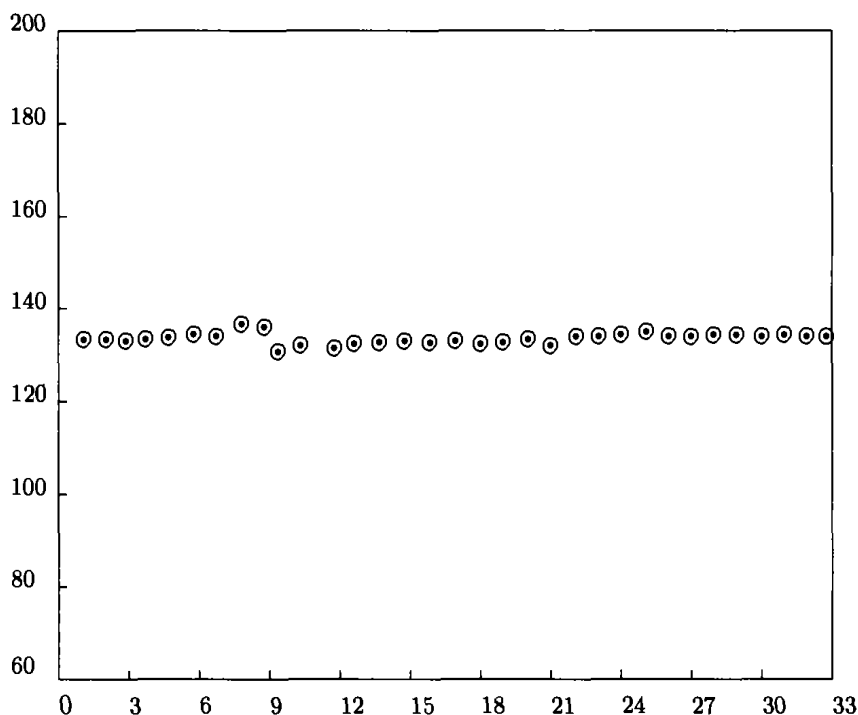


图2 拟合值与实际值的比较 (横坐标表33组方案序号, 纵坐标表潮流值)

2. 对负荷需求的限制

由于线路潮流值的约束, 对负荷需求有一定的限制:

1) 不出现输电阻塞

此时线路上的潮流值不能超过其限值, 以负荷最大最为规划目标, 在Lingo下编程求解, 得到该条件下的最大负荷能力为983.483MW, 即当负荷需求大于983.483MW时, 将无法调整方案使输电阻塞消失。

2) 不拉闸限电

此时线路上的潮流值不能超过其安全裕度, 在同样的目标函数下对约束条件进行修正, 运行程序得到结果最大负荷为1249.24MW, 即当负荷需求大于此值时, 必须采取拉闸限电措施。

3. 对线路改进的建议

随着用电需求的增加, 当用电负荷大于1249.24MW时, 现行的电网结构已明显不能保证电网安全运行, 因此, 当用电需求较高时必须对线路进行整改。我们考虑不拉闸限电时最大负荷受各线路潮流限值的影响, 当把各线路安全裕度下的潮流上限适当提高时, 观察最大负荷的变化。

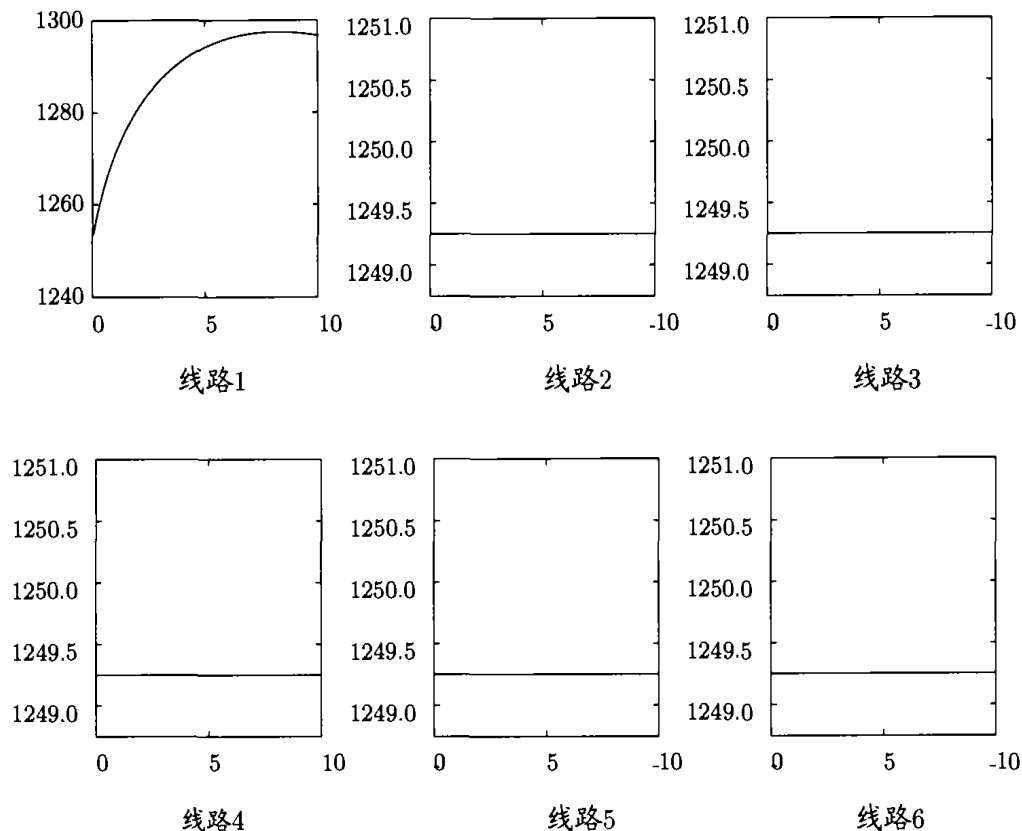


图3 最大负荷随各线路安全裕度下潮流上限的变化趋势

其中横坐标表示各线路安全裕度下的潮流上限的提高量,纵坐标表示最大负荷的变化。从图像中可以发现,线路1对最大负荷的影响比较明显,而线路2-5对最大负荷几乎没有影响。因此,在对线路进行整改时通过提高线路1的潮流安全裕度可以有效地提高最大负荷能力,使电网在高负荷前提下能够安全运行。

7 模型的评价与改进

1. 我们的模型采用了“两步走”的策略,将双目标规划转化为两次单目标规划问题,大大降低了模型求解的难度,减少了程序运行时间;

2. 引入危险因子反映电网线路的安全性,具有一定的实际意义。

设计阻塞费用计算规则时我们仅考虑了序内容量和序外容量的损失,模型进一步改进的方案是在设计阻塞费用时充分权衡发电商和网方双方的利益,以达到真正意义上的公平。

参考文献:

- [1] 尚金成等. 电力市场理论研究与应[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002

Models for Electric Jam Management

WAN lei, LONG Zhen-xing, OU Xiao-liang

Advisor: LI Ming-qi

(UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract: In this paper, we design a rule of jam-expense calculating, and introduce the danger index to reflect the security of the transfer route, and then put forward a model of electric jam management. Finally we give a suggestion to the electric department on how to enhance the permissible load on the route.

Keywords: electric jam; jam-expense; danger index