

电力市场的输电阻塞管理

重庆通信学院 郑丽莉 叶淑香 李立埔 指导教师 刘忠敏

【摘要】本问题为电力市场交易与调度一体化管理问题，问题的核心是输电阻塞管理，共有 5 个问题需要我们解决。问题一是确定各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式，我们很好地用多元线性回归解决了此问题；问题二是设计一种简明、合理的阻塞费用计算规则，我们给出了二种方法，其中的第一种为精确算法，问题三是假设下一个时段预报负荷需求是 982.4MW，给出下一个时段各机组的出力分配预案。我们通过对表四段价的排序，结合表 3 巧妙地解决了此问题。问题 4 是检查得到的出力分配预案是否会引起输电阻塞，并在发生输电阻塞时，根据安全且经济的原则，调整各机组出力分配方案，并给出相应的阻塞费用，我们将此问题转化为非线性规划，利用 lingo 且在不启用安全裕度的条件下巧妙地求得了解，用 lingo 时我们用到了自定义函数。问题 5 可转化为双目标规划，其一为每条线路上的潮流绝对值超过限值的百分比尽量小，其二为在安全优先的条件下尽量减小阻塞费用，在不启用安全裕度的条件下，本问题无解，启用安全裕度则有如下结果：最小超安全限值比例因子为 0.397，问题 5 的优化解表明可不用拉闸限电。更详细的结果如下：

W=982.4MW时 阻塞费用 F=5805元 J0=303

$\Delta X = [0.492 \quad 9 \quad 48 \quad -9.42 \quad 27 \quad -43.27 \quad -34.9 \quad 3.1]$

$X_0 = [150.0 \quad 79.0 \quad 180.0 \quad 99.5 \quad 125.0 \quad 140.0 \quad 95.0 \quad 113.9]$

由 $x = X_0 + \Delta X$ 得分配方案即 8 个电机出力如下：

$X = [150.49 \quad 88 \quad 228 \quad 90 \quad 152 \quad 96.73 \quad 60.1 \quad 117]$

由 $Y = A * x + c$ ；及分配预案，得到 6 条线路的潮流值如下：

$Y = [165 \quad 150 \quad -155.1 \quad 124.63 \quad 131.62 \quad 158.96]$

W = 1052.8 Mw 时 用二分法搜索出最小的 R = 0.397，对应如下结果：

阻塞费用 F=2512元 J0=356

$\Delta X = [1.425 \quad 7 \quad 9.8 \quad 0 \quad 17 \quad -35.22 \quad 0 \quad 0]$

$X_0 = [150.0 \quad 81.0 \quad 218.2 \quad 99.5 \quad 135 \quad 150 \quad 102 \quad 117]$

由 $x = X_0 + \Delta X$ 得 8 个电机出力为：

$x = [151.43 \quad 88 \quad 228 \quad 99.5 \quad 152 \quad 114 \quad 102.1 \quad 117]$

6 条线路的潮流值为： $Y = [173.52 \quad 147.44 \quad -155.32 \quad 130.6 \quad 132.32 \quad 167.03]$

【关键字】非线性规划、电力调配方案

一. 问题的提出

我国电力市场采取交易与调度一体化的模式。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，并制定电力市场交易规则，按照购电费用最小的经济目标来运作。此电力市场交易规则为：①以十五分钟为一个时段组织交易，每台机组在当前时段开始时刻前给出下一时段的报价。各机组将可用出力由低到高分成至多 10 段报价，每个段价的长度称为段容量，段价按段序数单调不减。在最低技术出力以下的报价一般为负值，表示愿意付费维持发电以避免停机带来更大的损失。②在当前时段内，市场交易-调度中心根据下一个时段的负荷预报、每台机组的报价、当前出力和出力改变速率，按段价从低到高选取各机组的段容量或其部分，直到它们之和等于预报的负荷，这时每个机组被选入的段容量或其部分之和形成该时段该机组的出力分配预案。最后一个被选入的段价称为该时刻的清算价，该时段全部机组的所有出力均按清算价结算。

市场交易-调度中心根据负荷预报和交易规则制定满足电网安全运行的调度计划——各发电机组的出力分配方案；在执行调度计划过程中还需实时调度承担 AGC 辅助服务的机组出力，以跟踪电网中实时变化的电荷。它在当前时段内要完成的具体操作如下：

- 1、监控当前出力分配方案的执行，调度 AGC 辅助服务，给出各机组的当前出力值。
- 2、作出下一个时段的负荷需求预报。
- 3、根据电力市场交易规则得到下一个时段各机组出力分配预案。
- 4、计算当执行分配预案时各主要线路上的有功潮流，判断是否会出现输电阻塞。如果不出现，接受分配预案；否则按以下原则实施阻塞管理：(1)调整分配预案使得输电阻塞消除。(2)如果(1)做不到，可使用线路的安全裕度输电，以避免拉闸限电，但要求各线路上潮流绝对值超过限值百分比尽量小。(3)如果无论怎样分配机组出力都无法使每条线路上的潮流绝对值超过限值的百分比小于安全裕度，则必须在用电侧拉闸限电。(4)当改变分配预案时，一些序内容量不能出力；而一些序外容量要在低于对应报价的清算价上出力。因此，网方应该为因输电阻塞而不能执行初始交易给发电方以经济补偿，由此引起的费用为阻塞费用。网方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。

现有 8 台发电机组，6 条主要线路，题目给出了各机组的当前出力、各线路上对应的有功潮流值及围绕方案 0 的 32 组实验数据。各机组的段容量、段价、爬坡速率和潮流限值由表 3、表 4、表 5、表 6 给出。根据上述资料试解决以下问题：

- 1、确定各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式；
- 2、设计一种简明、合理的阻塞费用计算规则，要求除考虑上述电力市场规则外，公平地对待序内容量不能出力的部分和报价高于清算价的序外容量出力的部分。
- 3、假设下一个时段预报负荷需求是 $982.4MW$ ，给出下一个时段各机组的出力分配预案。
- 4、检查得到的出力分配预案是否会引起输电阻塞，并在发生输电阻塞时，根据安全且经济的原则，调整各机组出力分配方案，并给出相应的阻塞费用。
- 5、假设下一个时段预报的负荷需求是 $1052.8MW$ ，重复 3~4 的工作。

二．基本假设

- 1、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。
- 2、每台机组的爬坡速率为常数，并保持不变。
- 3、每台机组在当前时段内最后被选入的段价（最高段价）为该时刻的清算价。
- 4、清算价对应的段容量可能只选取部分。
- 5、清算价在调度前后保持不变。
- 6、通过拉闸限电强制减少的负荷需求量为连续值。
- 7、序外出力部分容量在低于对应报价的清算价上出力，但网方要适当补偿损失。
- 8、在输电安全优先的前提下使阻塞费用尽量小。
- 9、遵守电力市场交易规则。
- 10、对于超过限值而在安全裕度内的调整为统一调整。
- 11、序内不能出力部分产生的利润损失由网方适当补偿。

三．符号说明

- x_{ki} 第 k 次调整方案中各机组的出力
- y_{kj} 第 k 次调整方案对应各线路的潮流值
- h_{ik} 各机组的段价
- e_{ik} 各机组的段容量
- v_i 各机组的爬坡速率
- $\overline{y_j}$ 各线路的潮流限值
- J_0 清算价
- W 预报负荷
- s_j 各线路的相对安全裕度
- R_j 各线路上潮流的绝对值超过限值的百分比
- F 阻塞总费用
- t_j 各线路阻塞费用
- Δx_j 各机组出力调整的大小
- $(i=1,2,\dots,8; \quad j=1,2,\dots,6; \quad k=1,2,3,\dots)$

四. 模型的建立与求解

(一) 问题分析

本问题为电力市场交易与调度一体化的数学模型建立，其重点在阻塞管理的优化策略，即在电网安全优先的前提下追求阻塞费用尽量小，其本质是多目标规划问题。

原题第一问是找出各线路有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式；第二问是设计一种简明、合理的阻塞费用计算规则；第三问是假设下一个时段预报的负荷需求是 982.4MW，让你找出下一个时段各机组的出力分配预案；第四问是在安全且经济的原则下，调整各机组出力分配方案，并给出与该方案相应的阻塞费用。

我们按照阻塞检查、调整预案、裕度输电、拉闸限电的顺序来确定机组出力方案，

(二) 模型建立

2.1 各输电线路有功潮流关于发电机组出力的表达式

用多元线性回归的统计方法求出线路1 的有功潮流值关于各机组出力之间关系的近似表达式。依次类推线路2至6的有功潮流与8个机组的出力均成线型关系。

设 $\beta_i (i=1, \dots, 8)$ 分别为线路的有功潮流 y_j 与各发电机组出力 x_i 的表达式的系数，则其多元线性回归模型为：

$$y_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^8 \beta_i x_i$$

关于 y_j 我们可写成矩阵形式 $Y=AX+b$

其中 $b=[110.2029 \quad 131.3297 \quad -108.7072 \quad 77.5706 \quad 132.9927 \quad 120.4706]'$ ；

$$A = \begin{bmatrix} 0.0830 & -0.0545 & -0.0695 & -0.0344 & 0.0005 & 0.2378 \\ 0.0487 & 0.1259 & 0.0602 & -0.1032 & 0.2444 & -0.0592 \\ 0.0531 & 0.0000 & -0.1566 & 0.2052 & -0.0646 & -0.0776 \\ 0.1200 & 0.0333 & -0.0099 & -0.0208 & -0.0412 & 0.0931 \\ -0.0252 & 0.0870 & 0.1239 & -0.0120 & -0.0662 & 0.0472 \\ 19 & -0.1124 & 0.0022 & 0.0060 & 0.0703 & 0.0003 \\ 0.1212 & -0.0191 & -0.0026 & 0.1448 & -0.0041 & 0.1653 \\ -0.0010 & 0.0988 & -0.2013 & 0.0764 & -0.0085 & 0.0012 \end{bmatrix} ;$$

上矩阵 A，b 是由题单上表 1、表 2 所给出的数据，通过 MATLAB 多元线性回归函数计算而出，具体见附录，即

$$[b, bint, r, rint, stats] = \text{regress}(Y, X, \alpha)$$

α 为显著水平 $b, bint$ 为回归系数估计和它们的置信区间， $r, rint$ 为残差及其置信区间， $stats$ 是用于检验回归的三个统计量相关系数，可通过假设检验来验证模型的正确性。检验过程具体如下：

假设 y_j 与 x_i 不呈线性关系即

$$H_0: \beta_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, 8)$$

当 H_0 成立时满足

$$F = \frac{\frac{U}{m}}{\frac{Q}{n-m-1}} \sim F(m, n-m-1)$$

其中, $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 为残差平方和, 反映误差对 y 的影响; $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 为回归平方和, 反映自变量对 y 的影响。

在显著水平 α 下有 $1-\alpha$ 分位数 $F_{1-\alpha}(m, n-m-1)$, 若 $F < F_{1-\alpha}(m, n-m-1)$, 则接受 H_0 ; 否则, 拒绝。

注意, 在此拒绝 H_0 只能说明 y_j 与 x_i 的线性关系不显著, 我们用相关系数 $R = \sqrt{\frac{U}{S}}$

来作为衡量 y_j 与 x_i 相关程度的指标, R 越大关系越紧密, 通常当 $R > 0.8$ 时才认为相关关系成立。通过 MATLAB 计算出这三个指标都相当好, 可见这种处理方法的可信度是较高的。

2.2 制定各机组出力预案

遵循电力市场交易规则, 根据下一时段的每台机组的报价, 从低到高选取段容量或其部分, 直到它们的和等于预报的负荷, 虽然此时的清算价是最低的, 但是, 考虑到爬坡约束 (即机组各时段的耦合关系), 需要增加一个约束:

$$x_{0i} - 15v_i \leq x_i \leq x_{0i} + 15v_i$$

由于以上的约束, 最终结果的某些段容量可能只选取部分。

设各机组出力预案用 1×8 的矩阵 $Z_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{k8})$ 来表示。其中, $k=0$ 时为

$$Z_0 = [73, 180, 80, 125, 125, 81.1, 90]$$

此向量为题单上表 1 的第一行所给的当前时段的方案, 我们需要从此出发寻找下一时段的第一个预案 Z_1 , 把题单上的表 3 (段容量表), 表 4 (段价表) 分别表示为 8×10 的矩

阵 $E_{8 \times 10}$ 、 $H_{8 \times 10}$

表 3 各机组的段容量 (单位: MW)

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	70	0	50	0	0	30	0	0	0	40
2	30	0	20	8	15	6	2	0	0	8
3	110	0	40	0	30	0	20	40	0	40
4	55	5	10	10	10	10	15	0	0	1
5	75	5	15	0	15	15	0	10	10	10

6	95	0	10	20	0	15	10	20	0	10
7	50	15	5	15	10	10	5	10	3	2
8	70	0	20	0	20	0	20	10	15	5

表4 各机组的段价（单位：元/兆瓦小时，记作元/MWh）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-505	0	124	168	210	252	312	330	363	489
2	-560	0	182	203	245	300	320	360	410	495
3	-610	0	152	189	233	258	308	356	415	500
4	-500	150	170	200	255	302	325	380	435	800
5	-590	0	116	146	188	215	250	310	396	510
6	-607	0	159	173	205	252	305	380	405	520
7	-500	120	180	251	260	306	315	335	348	548
8	-800	153	183	233	253	283	303	318	400	800

。

按照“累加段容量”算法规则得到矩阵 $Z_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{18})$ 为上分配预案，其中 x_{11} 为表 3 被选中一号机组的段容量之和，其余类似。此时对应的最后一个被选入的段价为清算价，记作 J_0 。用 matlab 程可完成上述过程，具体见附录。其具体结果为：

当预报负荷为 $W=982.4 \text{ MW}$ 时找到下一时段八个机组的出力为 $[150.0000 \quad 79.0000 \quad 180.0000 \quad 99.5000 \quad 125.0000 \quad 140.0000 \quad 95.0000 \quad 113.9000]$ ；

当预报负荷 $W=1052.8 \text{ MW}$ 时找到下一时段八个机组的出力为 $[150.0000 \quad 81.0000 \quad 218.2000 \quad 99.5000 \quad 135.0000 \quad 150.0000 \quad 102.100 \quad 117.0000]$

2.3 阻塞费用计算方案

(1) 阻塞检查

由上述预案 X 利用 $Y=AX+b$ 可计算出有功潮流 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_6)$ ，用此 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_6)$ 与有功潮流限值 $\bar{Y}=(\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_6)$ 作比较，判断是否发生输电阻塞。

(2)、调整预案

若发生输电阻塞，即某个 $y_i > \bar{y}_i$ (这里指比较绝对值)，则须对 $X=(x_1, x_2, \dots, x_8)$ 进行调整，以使 y_i 满足要求，从而消除阻塞，记 x_i 的变化量为 Δx_i ，形成调整向量

$$\Delta X = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_8)$$

调整时必须满足以下限制条件：

(2)、调整量的代数和为0..... $\sum_{i=1}^8 \Delta x_i = 0$从而保证 $\sum_{i=1}^8 x_i = W$

(1)、潮流值上限的控制..... $|\bar{y}_j| \geq |y_j| \dots j=1 \dots 6$

其中， $[v\text{lb}_i, \text{ulb}_i]$ 为 Δx_i 根据爬坡速率所决定的可调整范围，且

(3)、调整量受爬坡的限制..... $v\text{lb}_i \leq \Delta x_i \leq \text{ulb}_i \dots i=1, 2 \dots 8$

(4)、 $x_i + \Delta x_i$ 不能超过第 i 个机组最大发电量 \bar{x}_i 的限制

$$v\text{lb}_i = (x_{0i} - 15v_i) - x_i, \text{ulb}_i = (x_{0i} + 15v_i) - x_i;$$

$X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{08})$ 为当前时段结束时的各机组出力；

$X = (x_1, x_2, \dots, x_8)$ 为下时段各机组出力分配预案；

$$\sum_{i=1}^8 x_i = W \quad (W \text{ 为当前时段预报负荷}).$$

综上 (1) (2) (3) (4) 它满足：

$$\begin{cases} |\bar{y}_j| \geq |y_j| \dots j=1 \dots 6 \\ \sum_{i=1}^8 \Delta x_i = 0 \\ v\text{lb}_i \leq \Delta x_i \leq \text{ulb}_i \dots i=1, 2 \dots 8 \\ 0 \leq x_i + \Delta x_i \leq \bar{x}_i \dots i=1 \dots 8 \end{cases}$$

(3) 写出目标函数，即阻塞费用 F

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。因此，发电商和网方将产生经济利益冲突。网方应该为因输电阻塞而不能执行初始交易结果付出代价，网方在结算时应该适当地给发电商以经济补偿，由此引起的费用称之为阻塞费用。网方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。

显然不管网内网外，发电商均先按实际发电量以清算价结算，而后为发电商的损失做另外的补偿，这另外的补偿称之为阻塞费用。

在给出设计方案前先定义阶跃函数便于使用，

$$u(x) = \begin{cases} 1 & \dots x > 0 \\ 0 & \dots x \leq 0 \end{cases}$$

在设计阻塞费用时，让我们来看看序内序外容量发电的特点

1、当 $\Delta x_i \leq 0$ 时，即部分序内容量不能发电时，电厂因不能发的电成本支出一般来说会减少，但分析表 3、表 4 易知电厂 1 到 10 段中成本支出主要在前面几段出现，

后面几段主要是利润收入，当然也有一部分成本支出，通常厂方序内容量不能发电时，损失的主要是利润。

2、当 $\Delta x_i \geq 0$ 时，即部分序外容量参与发电时，按电厂的报价与清算价的差价补偿应是简明合理的。

表 3、表 4 显示电厂 1 到 10 段中大的成本支出主要在前面几段出现，后面几段主要是利润收入，当然也有一部分成本支出。

故 阻塞费用 $F = p \times \text{序内容量费用} + \text{序外容量费用}$

其中 p 为序内容量不能发电时，网方进行利润补偿的权重

基于实际情况、计算难度、可行性等方面的考虑，我们设计了二种计算规则，分别如下：

1° 精细计算阻塞费用的方法

首先根据段价矩阵 $H = h_{ik}$ 和段容量矩阵 $E = e_{ik}$ ($i = 1, 2, \dots, 8; k = 1, 2, \dots, 10$) 写出第 i 台机组出力 x_i 和对应当前段价的函数关系式 $\phi_i(x_i)$ ，设矩阵

$$EE = [ee_{ik}]_{8 \times 10} \dots \text{其中 } ee_{ik} = e_{i1} + e_{i2} + \dots + e_{ik}$$

则有

$$\phi_i(x_i) = h_{i1}u(x_i) + (h_{i2} - h_{i1})u(x_i - ee_{i1}) + (h_{i3} - h_{i2})u(x_i - ee_{i2}) + \dots + (h_{i10} - h_{i9})u(x_i - ee_{i9})$$

设第 i 台机组序外发电的补偿为 T_i ，则其每小时的补偿为：

$$T_i = \Delta x_i [\phi_i(x_i + \Delta x_i) - J_0]$$

阻塞费用（每小时的补偿）为：

$$F = p \cdot \sum_{i=1}^8 J_0 \cdot (-\Delta x_i) \cdot u(-\Delta x_i) + \sum_{i=1}^8 T_i \cdot u(\Delta x_i)$$

上式中的 p 为序内容量不能发电时，网方进行利润补偿的权重，显然， p 可取为本行业在此情况下的平均利润率。若算 15 分钟的补偿，应为：15F/60=F/4。

方法一的计费方式较复杂，但却精确。

2° 简明实用的方法

设当 $\Delta x_i \leq 0$ 时，即部分序内容量不能发电时，网方进行补偿的权重为 p ，显然， p 可取为本行业在此情况下的平均利润率。

当 $\Delta x_i \geq 0$ 时，网方进行成本 and 对应利润的两方面补偿，成本的全部或绝大部分在清

算价里已体现，该补偿的基本上也是损失的利润，补偿权重 q 可取为本行业在对应情况下的平均利润率。则阻塞费用可表示为：

$$F = p \cdot J_0 \cdot \sum_{i=1}^8 (-\Delta x_i) \cdot u(-\Delta x_i) + q \cdot J_0 \cdot \sum_{i=1}^8 \Delta x_i \cdot u(\Delta x_i) \dots \dots \dots \text{其中 } J_0 \text{ 为清算价}$$

这里 $u(x)$ 为阶跃函数， F 的前一部分为序内容量的补偿， F 的后一部分为序外容量的补偿，为每小时的补偿，若算 15 分钟的补偿，应为：15F/60=F/4。

在实际生产中，根据统计数据， p 、 q 是容易得到的，其优点是简洁切合实际，

2.4、问题四、五的统一模型与求解：

问题四、五，实际上可用统一的模型来求解，下面我们给出最简明且全面的模型。要求各线路上潮流绝对值超过限值百分比尽量小，网方在电网安全运行优先的条件下，应当同时考虑尽量减少阻塞费用。由此我们得到如下双目标规划模型：

$$\begin{aligned} & \text{Min } R \\ & \text{Min } F \\ & \left\{ \begin{array}{l} (1 + R\alpha_i) |\bar{y}_j| \geq |y_j| \dots j = 1 \dots 6 \\ \sum_{i=1}^8 \Delta X_i = 0 \\ vlb_i \leq \Delta x_i \leq ulb_i \dots i = 1, 2 \dots 8 \\ 0 \leq x_i + \Delta x_i \leq \bar{x}_i \dots i = 1 \dots 8 \end{array} \right. \end{aligned}$$

其中， F 为阻塞费用， R 反映各线路上潮流绝对值超过限值百分比的比例，即最大安全裕度利用的相对百分比值， $R \in [0, 1]$ ，即我们用

表 6 各线路的潮流限值（单位：MW）和相对安全裕度

线路	1	2	3	4	5	6
限值	165	150	160	155	132	162
安全裕度	13%R	18%R	9%R	11%R	15%R	14%R

$R\alpha$ 来反映实际中安全裕度的伸缩量，其中 $\alpha = [13\% \ 18\% \ 9\% \ 11\% \ 15\% \ 14\%]$ 。

求解本模型有多种方法，其中的一些是非专业的方法，不具有一般性的特点，且求出的解最优性不强，下面我们讨论怎样用最优化问题的专业方法来求解。

由于此非线性规划，不好给出初始可行解，因此用 Matlab 实现较困难，故我们转而利用最优化问题的专业求解程序 lingo 编程来求解，但模型中涉及到阶跃函数，而 lingo 中没有此函数，但 lingo 中有个自定义函数，故我们用 C 语言编了一个阶跃函数加入到 lingo 中，从而顺利地解决了这个问题。

用第一种精确计费方法计算：15 分钟的补偿

(1)、当 $W=982.4$ MW 时（取 $p=0.5$ ）

对分配预案进行输电阻塞检测，结果为：

输电阻塞检测

线路	1	2	3	4	5	6
限值(MW)	165	150	160	155	132	162
潮流值(MW)	173.3074	141.0023	-151.5798	120.9124	136.8228	168.5210
超过限值的百分比	0.0503	0	0	0	0.0365	0.0403

由上表知在分配预案下发生输电阻塞，则需对预案进行调整：首先只需考虑限值，不使用安全裕度时，即 $R=0$ 时，用第一种计费方法

$$F = p \cdot \sum_{i=1}^8 J_0 \cdot (-\Delta x_i) \cdot u(-\Delta x_i) + \sum_{i=1}^8 T_i \cdot u(\Delta x_i)$$

得如下结果：

出力预案及调整方案

线路	1	2	3	4	5	6	7	8
初始出力	150.0	79.0	180.0	99.5	125.0	140.0	95.0	113.9
出力调整量	0.492	9	48	-9.42	27	-43.27	-34.9	3.1
调整后的出力	150.49	88	228	90	152	96.73	60.1	117
清算价	303							
阻塞费用	5805 元/15 分							

(2)、当 $W=1052.8\text{MW}$ 时，只考虑限值不使用安全裕度时，无可行解，即不能消除阻塞，则要使用安全裕度，要求各线路上潮流的绝对值超过限值的百分比尽量小，即电网安全运行优先的条件下来求解，为了满足此条件，在 $[0, 1]$ 区间，我们利用二分法来搜索最好的 R ，解出最小的裕度因子 $R=0.397$ ，同时算出此时最小阻塞费用： $F=2512$ 元，详细结果如下：

出力预案及调整方案

线路	1	2	3	4	5	6	7	8
初始出力	150.0	81.0	218.2	99.5	135	150	102	117
出力调整量	1.425	7	9.8	0	17	-35.22	0	0
调整后的出力	151.43	151.43	151.43	99.5	99.5	114	102.1	117
清算价	356							
阻塞费用	2512元/15分							

安全裕度的使用情况

线路	1	2	3	4	5	6
限值(MW)	165	150	160	155	132	162
潮流值(MW)	173.52	147.44	-155.32	130.6	132.32	167.03
安全裕度	13%	18%	9%	11%	15%	14%
潮流超过限值的百分比	5.1636%	0	0	0	0.242%	3.105%

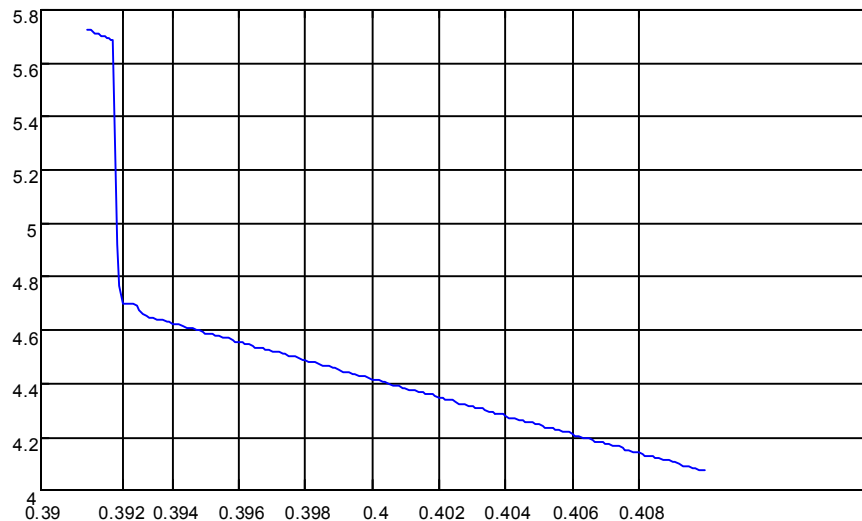
在计算阻塞费用时，我们设计出了二种不同的计算方法，当 $p=0.5$ $q=0.5$ 时按 15 分钟算

	第一种精确计费方法	第二种计费方法
W=982.4 MW	5805	6635
W=1052.8MW	2512	3232

按 1 小时算

	第一种精确计费方法	第二种计费方法
W=982.4 MW	23220	26540
W=1052.8MW	10048	12928

进一步的，我们能很方便的讨论 R, F 的关系，并给出 R, F 的关系图。



这里横坐标为 R, $R < 0.39$ 时基本上无可行解，当 $R > 0.60$ 时, $F=0$

当然我们也可用多目标规划的其它方法来解，比如定义新的目标函数：

$$U(\Delta x) = k_1 \times R + k_2 \times F \dots\dots\dots k_1, k_2 \text{ 为权重，不过应注意 } R, F \text{ 的归一化问题}$$

如果你没法找到好的权重组合，并证明这种组合的确好的话，就相当于没有解出此问题，所以在此我们并不强调此方法，还是按原题意——“安全运行优先”来解。

2.5 问题的进一步分析——几个关键数据

1° 不用安全裕度 ($R=0$) 的情况下最大可供电量 w

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^8 (1+R\alpha_i) |x_i| \geq y_j, \dots\dots j=1\dots6 \\ vlb_i \leq x_i \leq ulb_i, \dots\dots i=1,2,\dots,8 \end{cases}$$

其中 $y = Ax + b$ $vlb = z_0 - 15 * v$ $ulb = z_0 + 15 * v$ (v 爬坡速度)

可求出 $\text{Max } w = 983.19 \text{ MW}$, 即从表 1 第一行 $z_0 = [120, 73, 180, 80, 125, 125, 81.1, 90]$ 出发, 受爬坡速度限制之最大可供电量 $w = 983.19 \text{ MW}$, 因问题 4 给的 $W = 982.4 \text{ MW} < 983.19$, 所以不用安全裕度 ($R=0$) 的情况下可供电。

2° 用安全裕度的情况下 ($R=1$) 最大可供电量 w

$$\begin{aligned} \text{Max. } w &= \sum_{i=1}^8 x_i \\ \begin{cases} (1 + R\alpha_i) |\bar{y}_j| \geq |y_j|, \dots, j = 1 \dots 6 \\ vlb_i \leq x_i \leq ulb_i, \dots, i = 1, 2, \dots, 8 \\ 0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, \dots, i = 1, 2, \dots, 8 \end{cases} \end{aligned}$$

其中 $y = Ax + b$ $vlb = z_0 - 15 * v$ $ulb = z_0 + 15 * v$ (v 爬坡速度)

可求出 $\text{Max } w = 1094.6 \text{ MW}$, 即从表 1 第一行 $z_0 = [120, 73, 180, 80, 125, 125, 81.1, 90]$ 出发, 受爬坡速度限制之最大可供电量 $w = 1094.6 \text{ MW}$, 因问题 5 给的 $W = 1052.8 \text{ MW} < 1094.6$, 所以在安全裕度的情况下可供电。

3° 拉闸限电

显然当 $W > 1094.6 \text{ MW}$ 无论怎样分配机组出力都无法使每条线路上的潮流绝对值超过限值的百分比小于相对安全裕度, 故必须在用电侧拉闸限电。假设下一个时段预报的负荷需求是 $W = 1100.0 \text{ MW}$, 因 $W > 1094.6 \text{ MW}$, 故必须在用电侧拉闸限电。显然此时的阻塞费用 F 的计算同问题五类似, 只不过序内的情况多一些。

五. 模型的检验

1、我们在用多元线性回归的方法拟合各线路有功潮流关于各机组出力的近似表达式时, 计算出了系数矩阵 A 的置信区间。然后, 又用假设检验的思想在 matlab 中计算出了三个统计量, 具体数值如下:

$$\text{残差 } R^2 = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$F = [5862 \quad 7229 \quad 22352 \quad 25583 \quad 6972 \quad 17455]$$

$$P = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

满足对应的概率 $p < 0.05$, $R > 0.8$

由此可见我们所得表达式的可信度是相当高的。

2、在计算阻塞费用时，我们设计出了二种计算方法，按 1 小时算，当 $W=982.4$ MW 时，算出来的结果分别为 23220、26540，当 $W=1052.8$ MW 时为，10048、12928，它们相互印证，说明我们的结果是可靠的。

3、利用 matlab 对阻塞费用进行仿真，从这个角度也证实了我们结果的可靠性、方法的合理性。

六. 模型的评价与推广

我们对题目要求解决的每一个问题都给出了比较彻底、圆满的解答，所给电力市场阻塞费用管理的模型是较为完美、经典的。其主要优点主要有以下几点：

- 1、思路清晰，简明易懂，彻底全面。电力市场输电管理本是一个相当复杂的问题，但我们仔细分析、精辟论述、严密推理比较彻底地解决了此问题，并且文字表述清晰易懂。
- 2、方法新颖，设计合理，算法巧妙。我们在设计方案、计算结果时充分体现了创新的理念，根据实际需要设计出了公平合理的阻塞费用规则和具体的算法编程，清新自然、朴实无华。
- 3、切合实际，合理适用。在整个建立模型的过程中，我们始终在“安全第一”的要求下寻找购电费用最小的方案，因而得到的调度计划是安全经济、切实可行的。
- 4、通用性好。模型所给出的各机组出力预案是在当前出力的基础上得到的，只要改变各机组当前出力的初始值就能马上得到不同的出力预案，非常方便。

参考书目

- [1]郭科、胥泽银. 最优化方法及其程序设计. 四川科学技术出版社. 1998. 8
- [2]胡毓达. 非线性规划. 高等教育出版社. 1990
- [3]周纪芄. 回归分析. 华东师范大学出版社. 1993. 3