

电网输电分配与阻塞管理的数学模型

董永权

(唐山师范学院 数学与信息科学系, 河北 唐山 063000)

摘要: 研究发电机组供电与电网各线路的有功潮流之间的输电分配和阻塞管理的优化问题. 用多元线性回归理论拟合各线路上的有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式, 建立关于电力市场输电阻塞管理的二次规划数学模型. 分别以预报负荷982.4MW和1052.8MW为例进行实证分析.

关键词: 电力市场; 输电阻塞; 多元线性回归; 二次规划

1 引言

我国电力系统的市场化改革正在积极稳步地进行, 随着用电紧张的缓解, 电力市场化将进入新一轮的发展, 这给有关产业和研究部门带来了可预期的机遇和挑战. 本文研究文[1]提出的发电机组供电与电网各线路的有功潮流之间的输电分配和阻塞管理的优化问题, 建立关于电力市场输电阻塞管理的数学模型. 数据来自 http://mc.edu.cn/mcm04/problem_s2004ab.asp^[2], 所有计算由统计软件R^[3]和Matlab^[4]完成.

1 各线路上有功潮流关于各发电机组出力的模型

将文献[2]表1数据依次设为 $x_j (j = 1, 2, \dots, 8)$, 表示第 j 号机组的出力, 表2数据依次设为 $y_i (i = 1, 2, \dots, 6)$, 表示第 i 条线路的潮流值. 作 y_1 关于 x_1 的散点图(图1), 由图1可见 x_1 对 y_1 的影响是线性的, 同理可作 $x_j (j = 1, 2, \dots, 8)$ 对 $y_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 的散点图(略), 结果均显示呈线性关系. 用多元线性回归^[5]拟合各线路上有功潮流关于各发电机组出力的关系:

$$y_1 = 109.191745909 + 0.081637732x_1 + 0.045642403x_2 + 0.052063053x_3 + 0.119539675x_4 - 0.026796291x_5 + 0.120157115x_6 + 0.148776281x_7 - 0.002723728x_8 \quad (1)$$

$$y_2 = 1.312289e+02 - 5.455769e-02x_1 + 1.278507e-01x_2 - 2.593779e-05x_3 + 3.327651e-02x_4 + 8.684673e-02x_5 - 1.124395e-01x_6 - 1.892812e-02x_7 + 9.872637e-02x_8 \quad (2)$$

$$y_3 = -1.088732e+02 - 6.954203e-02x_1 + 6.164505e-02x_2 - 1.566171e-01x_3 - 9.921824e-03x_4 + 1.244942e-01x_5 + 2.117017e-03x_6 - 2.511198e-03x_7 - 2.013873e-01x_8 \quad (3)$$

$$y_4 = 77.481683486 - 0.034463458x_1 - 0.102408886x_2 + 0.205164449x_3 - 0.020826600x_4 - 0.011828388x_5 + 0.005952754x_6 + 0.144918232x_7 + 0.076545640x_8 \quad (4)$$

$$y_5 = 1.329745e+02 + 5.332491e-04x_1 + 2.432859e-01x_2 - 6.455479e-02x_3$$

收稿日期: 2006-09-28

基金项目: 河北省教育厅自然科学基金(Z2003106)



$$\begin{aligned}
 & - 4.113409e-02x_4 - 6.521987e-02x_5 + 7.034345e-02x_6 - 4.262706e-03x_7 - 8.913135e-03x_8 \\
 & y_6 = 1.207231e+02 + 2.376383e-01x_1 - 6.054261e-02x_2 - 7.760328e-02x_3 \\
 & + 9.291915e-02x_4 + 4.671178e-02x_5 - 1.851552e-04x_6 \\
 & + 1.662369e-01x_7 + 4.738520e-04x_8
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 & + 9.291915e-02x_4 + 4.671178e-02x_5 - 1.851552e-04x_6 \\
 & + 1.662369e-01x_7 + 4.738520e-04x_8
 \end{aligned} \quad (6)$$

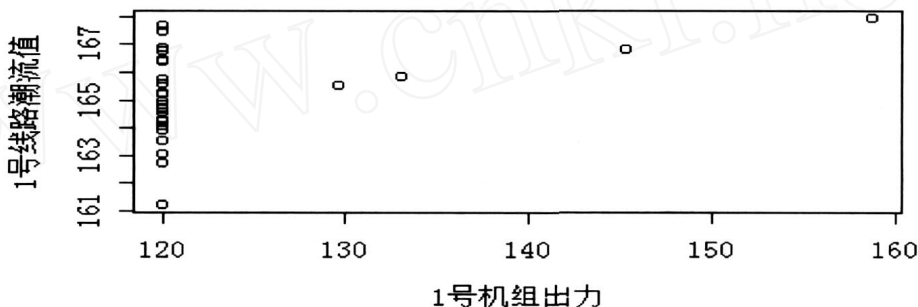


图1 1号机组出力与1号线潮流值的散点图

2 一定负荷需求下的出力分配预案模型

当下个时段的负荷需求已知时,由文[2]表3,4,5的数据可以估计各个发电机组应分配的出力.令 h 表示下一时段的负荷需求, p 表示清算价, z 表示电网方用来购买发电机组电的费用,则有

$$z = p \cdot h \cdot \frac{15}{60} \quad (7)$$

由上式,只要清算价 p 达到最小值,就可以使费用 z 最小.另一方面,由于爬坡速率的约束,预案出力的选取应在一定的范围之内.设第 j 个发电机组的当前出力为 x_j^0 ,预案出力为 \hat{x}_j ,爬坡速率为 q_j ($j = 1, 2, \dots, 8$),则有

$$-15 \leq \frac{\hat{x}_j - x_j^0}{q_j} \leq 15 \quad (8)$$

由(8)式得到各发电机组的预案出力 \hat{x}_j 的范围如表1:

表1 各发电机组出力范围

发电机组	1	2	3	4	5	6	7	8
当前出力	120	73	180	80	125	125	81.1	90
出力范围	87~153	58~88	132~228	60.5~99.5	98~152	95~155	60.1~102.1	43~117

假设 $h = 982.4 \text{ MW}$,依据(7)式求使清算价 p 达到最小的分配预案:

首先,表3^[2]中所有机组前五段段容量之和为903MW,其最高段价为260元/MWh,后五段中段价低于260元/MWh的有第六段的1,3,5,6号机组和第七段的5号机组,它们的段容量分别为30MW,0MW,15MW,15MW和0MW,而且各自的段容量之和均未超过其出力范围,这样出力总和达到963MW.

其次,下一个段价较低者依次为第六段的8号机组(段容量为0MW),2号机组(段容量为0MW)和4号机组(段容量为10MW),因4号机组出力总和达到100MW,超出出力范围(99.5MW),所以只取其中的9.5MW,这样出力总和达到978.5MW.

最后, 下一个段价最低者为第七段的8号机组, 段价为303元/MW h, 段容量为20MW, 取其部分39MW, 总出力达到9824MW. 这样就得到各机组出力分配预案, 如下表:

表2 机组出力分配预案(h= 9824MW)

发电机组	1	2	3	4	5	6	7	8
预案出力	150	79	180	99.5	125	140	95	113.9

这样最后取得的最底段价即清算价为303元/MW h, 最小费用:

$$z^* = p \cdot h \cdot \frac{15}{60} = 303 \times 9824 \times \frac{1}{4} = 744168(\text{元})$$

(9)

3 分配预案的调整与阻塞费用的计算

将分配预案中各发电机组的出力(表2)代入(1)~(6)式, 得到在预案情况下各线路的有功潮流:

表3 各线路的有功潮流(h= 9824MW)

线路	1	2	3	4	5	6
有功潮流	173.6047	141.0129	-150.9313	120.9198	136.8368	168.5224

对比表6^[2]各线路的潮流限值可知第1、5、6条线路发生阻塞, 需要对线路进行调整. 调整预案后应使阻塞费用达到最小. 阻塞费用的计算方法: 序外容量出力部分按不低于清算价的报价给予补偿, 序内容量不能出力部分按清算价与报价之差给予补偿(利润).

设: p_j : 分配预案中第 j 号机组最后被选用的段容量的段价;

Δp_j : 第 j 号机组下一段容量的段价与 p_j 之差;

p : 预案的清算价;

v_j : 第 j 号机组的平均出力速率(MW/分);

Δx_j : 第 j 号机组的发电增量;

$\delta_j = \begin{cases} 1, & \text{当 } \Delta x_j > 0 \text{ (第 } j \text{ 号机组序外增发)} \\ 0, & \text{当 } \Delta x_j < 0 \text{ (第 } j \text{ 号机组序内减发电)} \end{cases}$;

\tilde{y}_i : 第 i 条线路上的潮流上限;

c_i : 多元线性回归方程(1)~(6)中的常数项;

a_{ij} : 多元线性回归方程(1)~(6)中的 x_j 的系数

在对出力的调整过程中, 考虑到段容量是15分钟内的出力, 则各机组平均出力速率 v_j (MW/分)为

表4 机组平均出力速率

发电机组	1	2	3	4	5	6	7	8
平均速率 v_j	12.67	5.93	18.67	7.73	10.33	12	8.33	10.67

根据阻塞费用计算规则, 以阻塞费用最小化为目标, 以电机能力, 电网安全, 电力平衡为约束, 设计调整分配方案的二次规划模型为:

$$\min_{j=1}^8 [\delta_j(p_j + \Delta p_j) + (1 - \delta_j)(p - p_j)] |\Delta x_j|^2 / 60 v_j \tag{10}$$

$$\text{s t } \begin{cases} \Delta x_j = 0 \\ x_j^0 - 15q_j \leq (\Delta x_j + x_j) \leq x_j^0 + 15q_j \\ c_i + \sum_{j=1}^8 a_{ij}(x_j + \Delta x_j) \leq \tilde{y}_i \\ \delta_j \Delta x_j \geq 0 \\ (1 - \delta_j) \Delta x_j \leq 0 \\ i = 1, 2, \dots, 6, \quad j = 1, 2, \dots, 8 \end{cases} \tag{11}$$

对 $\delta_j (j = 1, 2, \dots, 8)$ 依次分别取 0, 1, 这样将 δ_j 变为已知, 调用 MATLAB 软件求解二次规划的程序求解, 即可求得阻塞费用为 1236.6 元, 调整后的方案为:

表 5 调整出力方案 ($h = 982.4 \text{ MW}$)

发电机组	1	2	3	4	5	6	7	8
调整出力	153	86.56	227.92	78.54	152	100.92	66.47	117

如果负载需求为 1052.8 MW, 按照前面分配预案的求解方法, 得到各机组出力分配预案如下:

表 6 机组出力分配预案 ($h = 1052.8 \text{ MW}$)

发电机组	1	2	3	4	5	6	7	8
预案出力	150	81	218.2	99.5	135	150	102.1	117

再将表 6 中机组出力数据代入 (1)~ (6) 式, 得到在预案情况下各线路的有功潮流:

表 7 各线路的有功潮流 ($h = 1052.8 \text{ MW}$)

线路	1	2	3	4	5	6
有功潮流	177.6662	141.1833	-156.1668	129.7598	134.8507	167.0839

对比表 6^[2] 各线路的潮流限值可知, 仍然是第 1、5、6 条线路发生阻塞, 需要对线路进行调整. 然而利用预案调整模型 (10)、(11) 进行求解, 发现无法使输电阻塞消除, 只好使用线路的安全裕度输电. 此时既要使每条线路上潮流的绝对值超过限值的百分比尽可能小, 又要使各机组所调配出力值变化的绝对值总和最小, 才可达到安全且经济的目的, 模型改进如下:

将约束条件 (11) 中的第 3 式: $c_i + \sum_{j=1}^8 a_{ij}(x_j + \Delta x_j) \leq \tilde{y}_i$ 改为:

$$c_i + \sum_{j=1}^8 a_{ij} \times (x_j + \Delta x_j) \leq \tilde{y}_i + \alpha \times \tilde{y}_i \times r_i \tag{12}$$

其中 r_i 为第 i 条线路上的安全裕度, α 是为了控制第 i 条线路上的潮流值超过限值的百分比尽可能小而设置的参数, 实际求解中, 首先将 α 取为 1, 若不满足要求, 则需要拉闸限电; 若满足要求, 则每次减半, 直至没有满足条件的解为止, 前一次所求结果即为最优解.



表8 调整出力方案($h=1052.8\text{MW}$)

发电机组	1	2	3	4	5	6	7	8
调整出力	152.79	88	228	87.81	152	137.62	89.58	117

各条线路上潮流的绝对值超过限值的百分比的最大值是5.10%，此时阻塞费用为203元，各机组所调配出力值变化的绝对值总和也相对较小。

综上，本文采用了多种方法求解电力市场的输电阻塞管理问题。分别以预报负荷为982.4和1052.8为例进行实际计算，结果例1发生阻塞，在线路潮流限值下消去阻塞，费用为1236.6元；例2阻塞更为严重，需要利用安全裕度输电，阻塞费用为203元。例2中负荷需求大于例1，但因为各线路使用安全裕度输电，调整值较小，所以阻塞费用较小，但安全风险相对较大，费用的减少是以安全风险的增大为代价的。

参考文献:

[1] 姜启源. 2004 高教社杯全国大学生数学建模竞赛[J]. 工程数学学报, 2004, 21(7): 1-28.
[2] <http://mcm.edu.cn/mcm04/problems2004ab.asp>.
[3] Peter Dalggaard. Introductory Statistics with R[M]. Springer Verlag, New York, 2002.
[4] 刘则毅. 科学计算技术与Matlab[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
[5] Richard A. Johnson, Dean W. Wichern, 陆璇等译. 实用多元统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

Mathematical Models of Power Transmission
Assignment and Congestion Control

DONG Yong-quan

(Department of Mathematics and Information Science, Tangshan
Normal College, Tangshan 063000, China)

Abstract: The optimality problems of transmission assignment and congestion control between the units power supply and power flow through system lines are studied in this paper. Using multivariate linear model we approximate the units power supply to lines power flow, then give the quadratic programming models to avoid congestion under electricity market. Load forecast 982.4MW and 1052.8MW are examples being analyse specially.

Keywords: electricity market; transmission congestion; multivariate linear regression; quadratic programming