

文章编号:1005-3085(2004)07-0079-14

电力市场输电阻塞管理模型

杨双红, 刘 刚, 晏 琦

(武汉大学, 武汉 430072)

编者按: 该文叙述清楚, 对各个问题的考虑及处理非常周全, 特别在安全目标中, 正确地采用了相对裕度的概念, 即使用裕度占最大裕度的百分比, 并在安全与经济双目标问题上, 给出了先安全后经济的两步优化模型, 较好地解决了“电力市场的输电阻塞管理”问题。同时论文对近似表达式的处理及其合理性讨论也非常完整。但是该文给出了两个阻塞费用函数, 第二个费用函数重新计算了清算价, 显然不合理, 应以第一个费用函数为好。

摘 要: 本文对公平开放市场条件下, 独立电网的输电阻塞管理问题做了模型研究。首先, 在局部线性化假设下, 利用多元线性回归求取线路潮流分布与机组出力分配之间的近似公式。本文对带有常数项和没有常数项的两种线性回归模型分别做了回归分析和细致的假设检验, 并由电力系统分析的背景知识, 阐明了电网潮流分布与机组出力只有统计规律性, 带有常数项的回归模型更合理。根据阻塞调整产生的影响, 本文设计了“按损失成比例补偿”和“按市场规则确定费用”两种阻塞费用计算规则, 并做了详细地比较讨论。根据电力市场交易规则, 兼顾计算的时间效率, 本文利用递归策略给出了简单易行的出力分配预案计算方法及其流程图, 在机组数不多时简单的手工计算很容易求得分配预案。对阻塞调整问题, 本文按电网“安全第一, 兼顾经济”的原则, 提出分阶段(共分四个阶段: 阻塞检查、调整预案、裕度输电、拉闸限电)按步骤规划的计算流程, 并对各个规划阶段分别建立了数学模型: 阻塞检查为判断一组不等式; 调整预案是求解以阻塞费用最小为目标的规划问题; 裕度输电规划先以裕度占用率最小为目标, 再在裕度占用率不增的条件下以阻塞费用最小为目标做规划; 拉闸限电规划则是在保证电网最低安全水平的条件下, 以总出力最大为目标做规划。化简后, 各阶段的规划模型, 除调整预案模型是线性约束条件下阶梯函数族的最大最小规划外, 其余阶段规划模型均为线性规划。出于计算效率的考虑, 结合题目特点, 本文发现以Huffman树作为决策树时, 阻塞管理问题的规划流程具有最高计算效率, 此时通过对几条简单的规则的判定即可确定应该进行哪一个阶段的规划, 从而不必一步步按部就班地进行。本文还对Huffman决策树流程的一些技术细节及改进节点定义的最优流程做了讨论。另外, 本文从广义函数角度对阶梯函数的数学分析性能及优化解法做了讨论, 并给出了求解以阶梯函数为目标的优化问题的求解建议及两种简单易行的启发式算法, 并在附录中, 给出了一些典型算法的流程图。本文方法简单有效, 思路清晰。主要缺点表现在: 因专业知识匮乏, 没有结合现行的几种典型的电力市场运营模式的特点给出更合理的阻塞管理办法。

关键词: 输电阻塞管理; 多元线性回归; 分阶段规划流程; Huffman决策树高效规划流程; 启发式算法

分类号: AMS(2000) 62J05

中图分类号: O212.1

文献标识码: A

1 问题重述(略)

2 条件假设

1. 调度中心在制定当前时段电网运行的调度计划时, 不考虑该时段内电网发生故障的可能;
2. AGC 辅助服务需要实时调度, 在制定调度计划时暂不考虑 AGC 调度的实施;
3. 认为网方的调度命令瞬时完成, 不考虑调度延时;
4. 认为给定电网是独立电网, 因而与其他电网之间不存在功率传输;
5. 认为一个时段内负荷、机组出力以及潮流分布都不会有突变;
6. 对每台机组, 只有前面的段容量全部被选择时, 才能选择后面的段容量;
7. 清算价理解为所有机组所有被选用段对应段价的最大值;

8. 不考虑电网的电能损耗。

3 符号说明

- g_i : 第 i 台发电机组出力的调度值, 单位: MW, $i = 1, 2, \dots, 8$;
 g_{i0} : 当前段开始时刻第 i 台发电机组的实际出力, 单位: MW;
 l_j : 第 j 条线路上的有功潮流值, 单位: MW, $j = 1, 2, \dots, 6$;
 a_{ij} : 第 j 条线路有功潮流关于第 i 台机组出力值的线性系数;
 b_j : 第 j 条线路有功潮流关于各机组出力近似公式中的常数项;
 m_j : 第 j 条线路有功潮流值的安全限值, 单位: MW;
 r_j : 第 j 条线路有功潮流的相对安全裕度 (百分数);
 η_j : 使用安全裕度输电时, 第 j 条线路相对安全裕度的利用率;
 v_i : 第 i 台发电机组的爬坡速率, 单位: MW / 小时;
 g_{mi} : 第 i 台发电机组可发出力的上限, 单位: MW;
 $p_i(g_i)$: 第 i 台发电机组出力为 g_i 时, 最大段序对应的段价, 单位: 元/MWh;
 p_M : 清算价, 单位: 元/MWh;
 PL : 某一时段的负荷预测值, 单位: MW;
 E : 阻塞费用, 单位: 元;
 Δt : 每一时段的时间间隔 (题中取 1/4 小时), 单位: 小时;

4 问题分析

4.1 问题背景的理解

电能传输时, 由于输电线路传输容量的限制, 有功潮流的绝对值不能超过其安全限值, 否则, 将引起输电阻塞, 危及电网安全, 此时必须对各机组的出力分配方案做调整, 以消除阻塞。这样就会使一些序内容量 (按分配预案本应取得发电权的发电容量) 不能出力, 而一些序外容量 (竞价中未取得发电权的发电容量) 被迫要在低于其报价的清算价上出力。为了解决利益冲突, 网方要为因输电阻塞而不能严格执行电网规则付出代价, 对发电商潜在的或实际的利益损失给予补偿。购电费用之外的这一部分额外费用即为阻塞费用。

电力市场以安全和经济为目标, 坚持“安全第一, 兼顾经济”的原则, 这也是电力市场规划时应该遵守的原则。

4.2 线路潮流与机组出力的关系

由电力系统分析^[1]的知识知, 输电网络的潮流分布取决于网络拓扑结构、各发电机组的出力以及负荷需求。因电力系统的负荷需求具有随机性, 因此即使对给定的输电网络, 机组出力与网络潮流分布在物理上也没有确定意义的函数关系, 而仅仅呈现统计意义上的规律性。考虑到题目给定的 32 组机组出力数据均是在各机组当前出力值附近的实验值, 假设一个时段 (15 分钟) 内潮流分布不会发生突变, 我们在局部线性的假设下, 利用多元线性回归求得线路潮流与机组出力的近似关系, 并在一定的显著性水平下检验回归结果。

4.3 阻塞费用

出于电网安全的考虑, 阻塞出现时要通过调整出力方案, 尽量避免阻塞。但调整后的方案将有悖于市场规则, 引起网方和厂方的利益冲突。阻塞费用作为解决或缓解这种利益冲突的关键手段, 需要考虑以下方面:

1. 阻塞引起两方面的损失: 使有些机组的序内容量不能出力或少出力, 导致这些机组应得的利益受到损失; 使有些机组的序外容量被迫以低于其报价的清算价格出力, 导致其因

所得利益低于期望利益而造成损失。阻塞费用要对以上两种损失给予适当的、公平的补偿。

2. 调整阻塞后得到的方案与市场规则不符，电网公司要为其违背规则付出代价，一种可行的办法是部分的或完全的履行市场规则。
3. 为了做到非歧视的对待所有市场交易者，保证市场的公平开放，阻塞费用的合理定义以及分摊尤其重要。

4.4 出力分配方案的规划流程

电力市场以安全和经济为目标，而且坚持安全第一的原则，阻塞管理时，应遵守这一原则，按以下步骤分阶段规划出力方案：

1. 计算预案。根据负荷预报、各机组的报价表、当前出力值及爬坡速率，由市场规则求出出力分配预案；若不存在可行的出力分配预案，则直接转入“拉闸限电”阶段做规划（见拉闸限电）；
2. 检查阻塞。利用已经得到的潮流分布公式计算各线路潮流，判断是否发生阻塞。若不发生阻塞，则分配预案就是最优出力分配方案，而且此时阻塞费用为 0；否则，进入下一阶段规划。
3. 调整预案。若出力分配预案引起阻塞，则应首先求取不引起阻塞且经济目标最优（即阻塞费用最小）的出力分配方案；不存在这样的方案时转入下一阶段规划。
4. 裕度输电。若不存在无阻塞条件下的出力分配方案，则必须降低安全目标，利用安全裕度输电。考虑到“安全第一”原则，此时应首先求取安全目标最优（裕度利用最小）的出力方案，再以最优安全目标为约束，求取安全目标不低于该最优值的条件下，经济目标最优的出力方案。不存在安全目标最优的方案时，转入下一阶段规划。
5. 拉闸限电。若不存在满足电网最低安全要求（安全裕度不小于 0）的出力方案，此时如果按负荷全额供电则电网安全不能保证，所以必须拉闸限电。这时，应以停电故障造成的损失最小为目标，即在安全裕度不小于 0 的条件下，求可以保证的总出力最大时的出力方案。

阻塞管理过程流程图见附录图 1。

4.5 约束条件

文中可能涉及的各种约束分别表达如下：

1. 负荷需求约束

除了必须采取拉闸限电措施削减负荷的情形外，电网总要尽量满足符合需求，保证机组总出力等于负荷预报值，即：
$$\sum_{i=1}^8 g_i = PL;$$

2. 机组爬坡速率约束

考虑到机组爬坡速率的限制，所有出力分配方案，只有当各机组的爬坡值均不超过其在单位时段内爬坡值的上限时，才是可行的，即：

$$g_{i0} - v_i \Delta t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i \Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, 8$$

3. 机组可用容量限制

每个机组可用容量均有一上限值 g_{mi} (段容量的总和), 机组的实际出力不应超出此上限值, 即 $g_i \leq g_{mi}, i = 1, 2, \dots, 8$;

4. 不发生阻塞的条件

不发生阻塞时, 各线路潮流的绝对值均不超过其潮流限值, 即:

$$|l_j| - m_j < 0, \text{ 其中 } j = 1, 2, \dots, 6;$$

5. 电网的最低安全保证约束

电力市场以电网安全为第一目标, 任何出力分配方案均要保证电网安全裕度不小于 0, 这是电网的最低限度的安全保证。即:

$$|l_j| - (1 + r_j)m_j \leq 0, j = 1, 2, \dots, 6$$

5 模型的建立

5.1 潮流分布公式

由前面的分析, 我们以题目所给的 33 组数据为样本, 利用多元线性回归求取潮流分布近似公式。回归模型有式 (1)、式 (2) 两种, 两者的区别仅在于是否带有常数项。我们对两种模型的回归结果在一定置信水平下做检验, 最后对两种模型的合理性做比较讨论。

5.1.1 回归模型

$$l_j = \sum_{i=1}^8 a_{ij} g_i + \varepsilon_j \quad (1)$$

或

$$l_j = \sum_{i=1}^8 a_{ij} g_i + b_j + \varepsilon_j \quad (2)$$

其中 $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma_j^2)$ 为误差项, $j = 1, 2, \dots, 6$ 。

用最小二乘法估计参数 a_{ij} 和 b_j , 样本序号 (0~32) 用上标表示, 则:

对模型 (1), 记:

$$L_j = (l_j^{(0)}, l_j^{(1)}, \dots, l_j^{(32)})^T, \quad G = \begin{pmatrix} g_1^{(0)} & g_2^{(0)} & \dots & g_8^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_1^{(32)} & g_2^{(32)} & \dots & g_8^{(32)} \end{pmatrix}$$

$$A_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{8j})^T, \quad E_j = (\varepsilon_j^{(0)}, \varepsilon_j^{(1)}, \dots, \varepsilon_j^{(32)})^T$$

易得正规方程为:

$$G^T G A_j = G^T L_j \quad (3)$$

解 (3) 即可得 A_j 的最小二乘估计, 容易证明它也是 A_j 的无偏估计。

对模型 (2), 用增广矩阵 $\bar{G} = [N; G]$ 代替 G , (其中 $N = (1, 1, \dots, 1)_{1 \times 33}^T$ 表示全为 1 的列向量), $\bar{A}_j = [b_j, A_j]$ 代替 A_j , 则 \bar{A}_j 的求法与模型 (1) 过程完全相同。

5.1.2 回归结果的检验

为了确定 l_j 与 g_1, g_2, \dots, g_8 之间是否存在显著的线性关系, 需要根据样本值运用假设检验来判断, 以确定求得的回归方程是否有价值。

假设选定的显著性水平为 α , 对本题, 我们要对每个 j ($j = 1, 2, \dots, 6$) 做以下检验:

$$H_0 : a_{1j} = a_{2j} = a_{3j} = a_{4j} = a_{5j} = a_{6j} = a_{7j} = a_{8j} = 0$$

H_1 : 对 $i = 1, 2, \dots, 8$ 至少存在一个 $a_{ij} \neq 0$

可以用常用的 F 检验法和 R^2 检验法检验^[2]。

5.1.3 模型求解及讨论

我们用 MATLAB 统计工具箱对两个模型分别做了回归及假设检验，其中显著性水平取 $\alpha 5\%$ 。回归和检验的结果见实例求解部分表 1、表 2。

显然模型 (2) 的回归效果远比模型 (1) 理想，然而若以模型 (2) 为回归模型，似乎违背了我们的假设“认为给定电网是独立电网，与其他电网之间不存在功率传输”，因为对独立电网，当所有机组停机时，该电网成为一无源网络，而无源网络在稳态时其中功率的流动应该为零，所以常数项应该为 0。下面我们试图对这一现象做出合理解释，说明模型 (2) 的合理性，以消除这种“顾虑”。

1. 对给定电网，其潮流分布取决于负荷需求和机组出力分配，即功率是“按需分配”的。因负荷需求是时变的随机变量（随机过程），因而机组出力与潮流分布只存在统计意义上的规律性。
2. 线性回归建立在局部线性化假设基础上，即认为潮流分布、机组出力以及负荷需求短期内只在一个小区域内变化。线性回归相当于在该小区域内把机组出力与潮流分布的期望关系曲线用其切线近似。该期望曲线本身可能过原点，但其某段的切线则不一定过原点，因此，回归模型带有常数项更合理。

鉴于上述两点，以下计算均以带有常数项的回归方程（模型 (2)），作为有功潮流值与各机组出力的近似公式。不带常数项的潮流公式（模型 (1)）下，计算方法完全类似，本文不再赘述。

5.2 阻塞费用计算规则

由“问题分析”部分对阻塞费用的讨论，我们设计了两种阻塞费用的计算规则，考虑到规则的灵活性，其中均有可供调整的参数。在模型的讨论部分，我们对这两种规划的性能及其它规则作了简单的探讨。

5.2.1 按损失成比例补偿的阻塞费用计算规则

此规则考虑阻塞调整引起的损失，并以一定的比例对受损方的损失进行补偿，补偿的总和即为阻塞费用。

阻塞调整引起的损失主要来自两方面，分别表达如下：

1. 序内少出力部分：设按出力分配预案第 i 台机组的第 k 段出力分配值为 $g_{i,k}^{(0)}$ ，段价为 $p_{i,k}^{(0)}$ ，清算价为 $p_M^{(0)}$ ($p_{i,k}^{(0)} < p_M^{(0)}$)，阻塞调整后，该段分配出力为 $g_{i,k}^{(1)}$ ，且 $g_{i,k}^{(0)} > g_{i,k}^{(1)}$ ，则阻塞调整引起的该机组该段利益的损失为

$$E_{i,k} = (p_M^{(0)} - p_{i,k}^{(0)})(g_{i,k}^{(0)} - g_{i,k}^{(1)})\Delta t \quad (4)$$

2. 序外多出力部分：设按分配预案第 i 台机组的第 k 段出力为序外容量（此时该段 $g_{i,k}^{(0)} = 0$ ， $p_{i,k}^{(0)} > p_M^{(0)}$ ），但阻塞调整后该段出力分配值 $g_{i,k}^{(1)} > 0$ 。则阻塞调整引起该机组该段利益的损失值为

$$E_{i,k} = (p_{i,k}^{(0)} - p_M^{(0)})(g_{i,k}^{(1)} - g_{i,k}^{(0)})\Delta t = (p_M^{(0)} - p_{i,k}^{(0)})(g_{i,k}^{(0)} - g_{i,k}^{(1)})\Delta t \quad (5)$$

于是，总损失为所有机组所有段损失值的总和： $E' = \sum_i \sum_k E'_{i,k}$

总阻塞费用由总损失乘以一个比例系数得到： $E = \gamma \cdot E'$

其中： γ 为可调参数，取 0 到 1 间某个适当的值，由调度部门酌情选取。下文为方便求解，取 $\gamma = 1$ （即完全补偿损失）进行计算。

显然 (4)、(5) 两式有完全相同的表达式，且因阻塞调整前后出力没有变化的段（这些段的特点是段序数较小且有 $g_{i,k}^{(1)} = g_{i,k}^{(0)}$ ）其损失为零，因而 E 既可以只对出力分配值在阻塞调整前后有变化的段计算也可对全段统一计算。（对全段统一计算时阻塞费用表达式更简单，有利于下文的规划）。

5.2.2 按市场规则确定阻塞费用

此规则对阻塞调整后的出力分配方案，求得按市场规则应付的清算价，取该清算价与分配预案确定的清算价的折中值作为最终清算价付给购电费，并以两次购电费之差作为阻塞费用。

设总出力为 g_t （等于负荷预测值， $g_t = PL$ ），按分配预案清算价为 $p_M^{(0)}$ ，阻塞调整后的清算价为 $p_M^{(1)}$ ，最终清算价为 $p_M^{(2)}$ ，则此规则表达如下：

$$\text{总阻塞费用 } E = \Delta t \left(P_M^{(2)} - P_M^{(0)} \right) \cdot PL$$

其中 $p_M^{(2)} = (1 - \theta)p_M^{(0)} + \theta p_M^{(1)}$ ， θ 为可调参数，下文计算中取 $\theta = 1$ 。

5.2.3 阻塞费用计算规则的讨论

比较上述两种阻塞费用的计算规则，我们有以下结论：

1. 第一种规则只对利益受损的机组的损失做一定的补偿，对阻塞调整未引起出力分配变化的机组，因阻塞调整没有对其引起损失，因而也就没有补偿。所以第一种规则的阻塞费用一般情况下比较小，对网方更有利。
2. 第二种规则稍简单，更利于出力方案的规划。
3. 第一种规则下，当清算价所对应的段的出力变化时，因有 $p_{i,k} = p_M$ ，所以 $E'_{i,k} = 0$ ，将没有补偿。但实际上对发电方来说，只要网方付给电价高于其发电成本，即有盈利。而报价通常都高于成本，所以当该段出力减少时实际上也有损失，规则一对此处理不公。
4. 考虑规则一的公平性：对因序外容量多发引起损失的机组，可以认为其损失为发生的实际损失，而对因序内容量少发引起损失的机组，虽然应得的利益受到损失，但它也因少发该部分出力而节省了燃料费用等发电成本。所以对其单位出力的损失应扣除发电成本。

5.3 出力分配预案

出力分配预案是在每一时段开始前根据负荷预报以及各机组的报价、当前出力和爬坡速率，由市场交易规则所确定的。由题目所描述的交易规则，兼顾计算的时间效率，出力分配预案的求取方法描述如下：

Step1: 按段价由小到大的顺序选择各机组各段容量，直至所有已选段容量的总和等于负荷预报值 PL ，（此时最末一个被选入的段容量可能只有部分被选中）；

Step2: 对每台机组计算其被选取段容量的和 g_i ，比较 g_i 与当前出力 g_{i0} ，

若 $g_i - g_{i0} \geq v_i \cdot \Delta t$ ，则取 $g_i = g_{i0} + v_i \cdot \Delta t$ ，并令标志变量 $flag_i = -1$ ；

若 $g_i - g_{i0} \leq -v_i \cdot \Delta t$ ，则取 $g_i = g_{i0} - v_i \cdot \Delta t$ ，并令 $flag_i = 1$ ；

否则 g_i 不变， $flag_i = 0$ 。

Step3: 若所有 $flag_i$ 都为 0, 则此时 g_i 即为出力分配预案中第 i 台机组的出力值, 结束计算。否则, 计算经 **Step2** 调整后的总出力 $g = \sum_i g_i$ 。

Step4: 若 $g = PL$, 则此时 g_i 为出力分配预案中第 i 台机组的出力分配值, 结束计算;

若 $g > PL$ 且所有 $flag_i$ 均为 1 或 $g < PL$ 且所有 $flag_i$ 均为 -1, 则不存在可行的出力分配预案, 结束计算并直接转入拉闸限电阶段做规划;

否则, 转 **Step5**。

Step5: 若 $g < PL$, 则对 $flag_i \neq -1$ 的所有机组的未被选中段的容量 (部分或全部), 按段价由小到大逐个选取, 且每取一个即转至 **Step2**; 若 $g > PL$, 则对 $flag_i \neq -1$ 的所有机组已选的段容量, 按被选取顺序的逆序逐个去除, 且每去一个即转至 **Step2**。

对题目所给数据通过简单的手工操作很容易得到出力分配预案 (求解结果见实例求解部分), 对稍复杂的情形, 由以上算法编程不难求得结果。

5.4 阻塞管理

5.4.1 数学模型

在问题的分析部分, 我们根据电网“安全第一, 兼顾经济”的原则, 已经确定了阻塞管理过程机组出力方案规划的基本步骤, 即阻塞检查、调整预案、裕度发电、拉闸限电四个阶段的规划, 以下分别讨论。

1. 阻塞检查

在得到出力分配预案后, 首先要检查该出力分配方案是否会引起阻塞。若不发生阻塞, 则此预案即为最优的调度方案; 否则, 要转到下一阶段继续规划。

阻塞检查的方法是检查各线路潮流分布是否越限, 即检查下列不等式是否全部成立:

$$|l_j| - m_j < 0, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

$$\text{其中, } l_j = \sum_{i=1}^8 a_{ij} g_i + b_j$$

2. 调整预案

调整预案是在出力分配预案引起阻塞时, 寻找可行的出力分配方案, 使得在不发生阻塞的条件下, 阻塞费用最小, 可用以下模型表述:

$$\begin{aligned} & \min E \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^8 g_i = PL, \\ |l_j| - m_j < 0, \\ g_{i0} - v_i \cdot \Delta t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i \cdot \Delta t, \\ g_i \leq g_{mi} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 四条约束的意义分别为: 负荷需求约束、不阻塞条件、爬坡速率限制、可发功率上限约束; 阻塞费用的表达式已在上文中给出。

若模型 7 存在最优解, 则该解即为最优的出力分配方案。否则, 若 7 的可行域为空, 则表明没有不发生阻塞的可行解, 需要转下一阶段规划。

3. 裕度输电

模型 7 的可行域为空时, 表明不存在无阻塞条件下的出力分配方案, 此时必须考虑利用安全裕度输电。

定义第 j 条线路的安全裕度利用率 η_j 为: 利用了的相对安全裕度与该线路总相对安全裕度的比值, $\eta_j = \frac{|l_j|/m_j - 1}{r_j}$ (即线路的潮流绝对值 $|l_j| = (1 + r_j\eta_j)m_j$)。考虑到各条线路总相对安全裕度数值上的差别, 我们以 η_j 作为这一阶段线路安全的评价指标。根据“安全经济”原则, 这一阶段的规划又可分为两个步骤。

- (a) 先不考虑经济目标, 以安全裕度利用率最小为目标, 求取可行的最安全的 (保留裕度最大) 出力分配方案。我们以各线路最大裕度利用率最小为目标, 建立以下模型:

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \max_j \eta_j \right\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_i g_i = PL \\ |l_j| - (1 + \eta_j r_j) m_j < 0 \\ g_{i0} - v_i t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i t \\ g_i \leq g_{mi} \\ \eta_j \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

若模型 (8) 存在最优解 (记该最优解对应的裕度利用率为 $\{\eta_j^*\}_{j=1}^6$), 则转到下一步进行对经济目标的优化。否则若模型 (8) 的可行域为空, 则表明没有保证系统最低安全水平的可行解, 此时必须拉闸限电。

- (b) 模型 (8) 存在最优解时, 表明保证电网安全水平最高 (保留裕度最大) 的可行出力分配方案存在, 但模型 (8) 中未考虑经济目标, 所以此时应再以安全目标不降低为约束, 寻找经济最优 (阻塞费用最小) 的出力分配方案。用以下模型描述:

$$\begin{aligned} & \min E \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_i g_i = PL \\ |l_j| - (1 + \eta_j r_j) m_j < 0 \\ g_{i0} - v_i t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i t \\ g_i \leq g_{mi} \\ \eta_j \leq \eta_j^* \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

模型 (9) 的最优解即为最优出力分配方案。(因模型 (8) 的最优解一定是模型 (9) 的可行解, 所以若 (8) 有解则 (9) 的可行域必非空)。

4. 拉闸限电

当模型 (8) 的可行域为空时, 则表明若要按负荷需求供电, 则无法保证电网的安全, 此时只能通过拉闸限电削减负荷。因停电故障损失很大, 在该阶段我们以电网安全不低于最低安全水平为约束, 求取可保证的总出力最大时的出力分配方案, 用以下模型描述:

$$\begin{aligned} & \max \sum_i g_i \\ \text{s.t.} & \begin{cases} g_{i0} - v_i t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i t \\ g_i \leq g_{mi} \\ |l_j| - (1 + r_j) m_j \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

5.4.2 模型的化简

1. 预案调整模型 (7) 的化简

我们采用问题二中阻塞费用定义的第二种规则, 即

$$E = \max_i \{ (p_i(g_i) - p_M^{(0)}) \cdot PL \},$$

去掉与决策向量 G 无关的项, 则可等效地取目标为: $\max_i p_i(g_i)$

另外, 考虑到出力变化不大时, 潮流值的正负号不会改变。而且对题目给出的数据, 出力在其爬坡速率限制的范围内取值时, 潮流值的正负号也确实不会改变, 故只要将初始实际潮流为负的每条线路 (记为 j_*) 对应的回归方程系数全部取相反数 ($-a_{ij*} \rightarrow a_{ij*} \quad i = 1, 2, \dots, 8$), 则可去掉绝对值约束得到线性约束 (下文所有模型中 a_{ij*} 均做了这种变换, 因此所有约束均为线性约束), 化简后的模型为:

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \max_i p_i(g_i) \right\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^8 g_i = PL, \\ l_j - m_j < 0, \\ g_{i0} - v_i \cdot \Delta t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i \cdot \Delta t \\ g_i \leq g_{mi} \end{cases} \end{aligned}$$

上述模型是线性约束下阶梯函数族的最大最小问题。可以直接用 MATLAB 优化工具箱求解。然而, 考虑到阶梯函数的梯度^[3] (从广义函数角度) 是在间断点处取值的几个冲激函数的叠加 (见附录), 其他区域取值均为 0, 其优化性能很不理想。为此, 针对阶梯函数优化问题, 我们提出以下求解建议:

(a) 使用代理目标函数

寻找或构造一个优化性能良好的函数, 若它与阶梯函数具有良好一致性, 即具有这样的特点: 当该函数取最优解时, 阶梯函数取得次优解, 则取该函数为代理目标。用代理目标代替阶梯函数目标做规划, 得到代理目标的最优解, 再在该最优解的邻域内搜索阶梯目标的局部最优解作为最终的非劣解。

代理目标的一种构造方法是将阶梯函数光滑 (比如采用样条拟合)。

(b) 采用非梯度优化算法

阶梯函数目标难于优化的关键在于其梯度函数不理想。因此不适于用梯度优化算法优化。若使用非梯度算法优化, 则不需梯度函数, 因而如果方法选取适当, 应该能得到更好的解。考虑到本题各模型的约束均为线性约束, 建议对单纯形法做改进^[6], 构造非梯度算法求解。

(c) 针对具体问题设计启发式算法

- i. 考虑到本问题的目标函数为阶梯函数, 而各机组可选用段只有有限几个。因此在预案基础上, 按段价由小到大的顺序逐个列举未使用段, 做穷举搜索 (实际上是以预案为起点的邻域搜索), 也不难得到结果。
- ii. 考虑到潮流分布公式已经取得, 在对 a_{ij*} 做取反变换后, 显然, 若第 j 条线路潮流超限即 $l_j > m_j$, 则应优先考虑对 $\{a_{ij*}\}$ 中取值为负的机组增加出力或对取值为正的机组减少出力, 以消除阻塞。由上一步我们设计以下启发式算法。记分配预案为 G_0 , 其清算价为 $p_M^{(0)}$, 算法描述如下:

Step1: 对所有机组未被选入 G_0 (部分或全部) 的各个非空段 (段容量非 0), 按对应段价由小到大统一排序, 并按序逐个选取段容量 (每次选一个) 加入 G_0 , 记此时第 i 个机组已选段容量总和为 g_i^* 。

Step2: 以不发生阻塞、满足爬坡限制以及 $g_i \leq g_i^*$ 为约束, 以机组总出力为目标, 求解以下线性规划模型

$$\begin{aligned} & \max \sum_i g_i \\ \text{s.t.} & \begin{cases} l_j \leq m_j \\ g_{i0} - v_i t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i t \\ g_i \leq g_i^* \end{cases} \end{aligned}$$

Step3: 判断上述模型的解: 若 $\sum_i g_i \geq PL$, 转 **Step4**; 否则转 **Step2**。

Step4: 从最末一个被选入的段开始逆序调整出力值直至 $\sum_i g_i = PL$, 以此时出力分配方案作为最优方案, 结束计算。

我们用 MATLAB 编程对题目所给的两种负荷需求下的数据求解, 得到的结果分别如表 4、表 5 所示。

2. 裕度输电模型的化简

(a) 模型 8 的化简

模型 8 可等价地表示为如下的线性规划模型

$$\begin{aligned} & \min \eta \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_i g_i = PL \\ l_j - (1 + \eta_j r_j) m_j < 0 \\ g_{i0} - v_i t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i t \\ g_i \leq g_{mi} \\ \eta_j \leq \eta \\ 0 \leq \eta \leq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

其中决策变量有 15 个 ($g_1, g_2, \dots, g_8, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_6, \eta$)。

(b) 模型 9 的化简

与模型 7 化简求解方法类似, 只是此时多了一条线性约束

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \max_i p_i(g_i) \right\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_i g_i = PL \\ l_j - (1 + \eta_j r_j) m_j < 0 \\ g_{i0} - v_i t \leq g_i \leq g_{i0} + v_i t \\ g_i \leq g_{mi} \\ \eta_j \leq \eta_j^* \end{cases} \end{aligned}$$

3. 拉闸限电模型的化简

模型 10 可化为如下的线性规划模型:

$$\max \sum_i g_i$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_{i0} - v_i \cdot \Delta t \leq g_{i0} \leq g_{i0} + v_i \cdot \Delta t \\ g_i \leq g_{mi} \\ l_j - (1 + r_j)m_j \leq 0 \end{cases}$$

其中决策变量有 8 个 (g_1, g_2, \dots, g_8)。

5.5 最高效率规划流程 (略)

6 实例求解结果

6.1 对问题一的解答

6.1.1 模型 (1) (不带常数项) 的线性系数及其检验结果

表1 不带常数项的模型的线性系数及其检验结果

	$a_{ij}(i=1,2,\dots,8)(10^{-2})$	R^2	F	$\alpha': 10^{-10}$
1	[19.382,32.389,14.084,24.792,10.393,32.064,6.7494,13.063]	0.7307	9.6882	85053
2	[7.7276,46.115,10.453,18.548,24.079,12.39,-8.3441,25.564]	0.6213	5.8596	4196100.
3	[-17.89, -21.49,-24.34,-13.62,-0.322,-19.396,5.098,-33.156]	0.8008	14.357	240.85
4	[4.3359,9.4364,26.689,6.9081,7.905,14.548,10.693,16.917]	0.8750	24.996	8.7098
5	[13.411,58.101,4.1388,11.312,9.0764,30.982,-6.9572,15.007]	0.6036	5.4375	6979500
6	[35.901,24.627,1.823,23.298,18.844,21.738,10.674,14.494]	0.7797	12.638	7992.1

表 1 中第 j 行对应第 j 条线路。检验结果中 $1 - \alpha'$ 为可信度。

表2 带常数项的模型的线性系数及其检验结果

	$a_{ij}(i=1,2,\dots,8)(10^{-2})$	b_j	R^2	F	α'
1	[8.2607,4.7764,5.2794,11.986,-2.5705,12.165,12.199,-0.15179]	110.48	0.99944	5376.8	0
2	[-5.4717,12.75,0.014644,3.3244,8.6667,-11.269,-1.8644, 9.8528]	131.35	0.99957	6970.2	0
3	[-6.9387,6.1985,-15.65,-0.9871,12.467,0.23561,-0.2787, -20.119]	-109	0.99986	21788	0
4	[-3.4632,-10.278,20.504,-2.0882,-1.2018,0.56932,14.522, 7.6336]	77.612	0.99988	24424	0
5	[0.03271,24.283,-6.471,-4.1202,-6.5452,7.0026,-0.38961, -0.917]	133.13	0.99953	6433.9	0
6	[23.757,-6.0693,-7.8055,9.2897,4.6634,-0.029128,16.64, 0.0388]	120.85	0.99981	16029	0

6.1.2 模型 (2) (带常数项) 的线性系数及其检验结果

6.2 对问题二的解答

本文设计了两种阻塞费用计算规则, 并对其优劣做了详细讨论。具体细节见模型建立部分。

6.3 对问题三的解答

预报负荷需求为 982.4MW 时的分配预案如表 3。

6.4 对问题四的解答

预报负荷需求为 982.4MW 时的分配预案 (表 3), 其阻塞检查结果及调整后的最终出力分配方案分别如表 4, 表 5 所示。

其中阻塞费用 1、2 分别是用阻塞费用规则一、二求得的。

6.5 问题五的求解结果

预报负荷需求为 1052.8MW 时分配预案、阻塞检验结果及最终出力分配方案分别如表 6, 表 7, 表 8所示。

表3 分配预案

机组号	1	2	3	4	5	6	7	8
初始出力(兆瓦)	120	73	180	80	125	125	81.1	90
出力分配预案(兆瓦)	150	79	180	99.5	125	140	95	113.9
报价(元)	252	300	233	302	215	252	260	303
允许爬坡值(兆瓦)	33	15	48	19.5	27	30	21	27
实际爬坡值(兆瓦)	30	6	0	19.5	0	15	13.9	23.9
清算价(元)	303							

表4 阻塞检验结果

线路	1	2	3	4	5	6
限值	165	150	160	155	132	162
潮流分布	173.3047	141.0049	-150.9235	120.9114	136.8265	168.519
超限值	8.3047	-8.9951	-9.0765	-34.0886	4.8265	6.519

表5 调整后的方案

机组出力(兆瓦)	[153,86.87, 228, 90.1124, 152, 95.3222, 60.1,117]
允许爬坡值(兆瓦)	[33,15,48,19.5,27,30,21,27]
实际爬坡值(兆瓦)	[33,15,48,10.11,27,-29.69,-21,27]
潮流限值(兆瓦)	[165,150,160,155,132,162]
实际潮流分布(兆瓦)	[165,150,155.26,124.51,131.51,159.53]
清算价(元)	495
阻塞费用1(元)	3183.1
阻塞费用2(元)	47155

表6 分配预案

机组号	1	2	3	4	5	6	7	8
初始出力	120	73	180	80	125	125	81.1	90
出力方案	150	81	218.2	99.5	135	150	102.1	117
最高报价	252	320	356	302	310	305	306	303
清算价	356							

表7 阻塞检验

线路	1	2	3	4	5	6
限值	165	150	160	155	132	162
潮流分布	177.24	141.17	156.15	129.74	134.83	167.06
超限值	12.24	-8.83	-3.85	-25.26	2.83	5.06

注：超限值为负表示该线路未发生阻塞。

表8 调整后的出力分配方案方案

出力方案（兆瓦）	[153,88,228,99.5,152,155,60.3,117]
最高报价（元）	[489,495,356,302,510,380,120,303]
允许爬坡值（兆瓦）	[33,15,48,19.5,27,30,21,27]
实际爬坡值（兆瓦）	[33,15,48,19.5,27,30,20.8,27]
潮流限值（兆瓦）	[165,150,160,155,132,162]
实际潮流分布（兆瓦）	[173.4093,143.5833,155.2113,124.6828,135.2969,160.4221]
相对安全裕度利用率	[39.2%,12.3%,4.25%,-85.16%,30.23%,19.29%]
清算价（元）	510
阻塞费用1（元）	1962.3
阻塞费用2（元）	40533

7 总结评价

本文对公平开放市场条件下独立电网的输电阻塞管理问题做了模型研究。文章的主要优点是：

1. 在局部线性假设下，对带有常数项和没有常数项的线性回归模型分别做了回归分析和细致的假设检验，并以回归方程作为潮流分布和出力分配的近似公式；
2. 根据电力系统分析的背景知识，阐明了电网潮流分布与机组出力只有统计规律性，因而带有常数项的回归模型更合理；
3. 出于对阻塞调整影响的两种考虑，设计了两种阻塞费用计算规则，并对其做了详细的比较说明；
4. 根据市场规则，兼顾计算的时间效率，利用递归策略得到了简单易行的出力分配预案计算方法；
5. 在阻塞调整阶段，按电网“安全第一，兼顾经济”的原则，提出分阶段（共四个阶段）按步骤规划的计算流程，并对各个规划阶段分别建立了数学模型；
6. 对各个规划模型做了充分的化简，并对其求解方法做了说明；
7. 出于计算效率的考虑，提出以 Huffman 树作为决策树的高效规划流程，并对一些技术细节做了改进；
8. 在附录中给出了一些典型计算规则的流程图，从广义函数角度对阶梯函数的数学分析性能做了讨论，并给出了求解建议和两种启发式算法。

主要缺点表现在：因专业知识匮乏，没有结合现行的几种典型的电力市场运营模式^[7]（如 Pool 模式、双边交易模式等）的特点给出更合理的阻塞管理办法；对阻塞费用的分摊问题讨论还不充分。

8 附录 (略)

参考文献:

- [1] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 (第三版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003
- [2] 范金城, 梅长林. 数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [3] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [4] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [5] 王春森. 系统设计师教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [6] 张智星等. 神经-模糊和软计算[M]. 西安交通大学出版社, 2000
- [7] 杨洪明, 段献忠, 何仰赞. 阻塞费用的计算和分摊方法[J]. 电力自动化设备, 2002;(5):10-12

A Management Model for Transmission Congestion in Power Market

YANG Shuang-hong, LIU Gang, YAN Qi

(Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: In this paper, on the basis of an open and competitive market, model is developed to study the management of transmission congestion in an independent power system. Firstly, under the assumption of local linearization, the approximate formula for the relation of the power flow distribution to the machine output is derived by multivariate linear regression. Both the models with and without constant-term are considered and tested. Furthermore, according to the knowledge from power system analysis, we demonstrate that the model with the constant-term is more reasonable. Considering the effect of the congestion adjustment, we design two rules for calculating congestion cost and make detailed comparison between them. According to the transaction rule of the power market and accounting for the computation efficiency as well, we use the recursion strategy to figure out a simple and feasible method for the preliminary scheme of output allocation. This article proposes a four-stage computation strategy for the congestion adjustment, which is: congestion check, pre-scheme adjustment, margin transmission and load limitation. In the first stage, a group of inequalities are judged; the second stage is to program with the objective of minimum congestion cost; in the third stage, our first target is the minimum occupancy of the margin, then the objective is the lowest congestion cost while the occupancy remains the same if no less than. In the last stage, assuring the lowest security level, the objective is maximum output. After simplification, all models are linear except the second one, which is a staircase function maxi-min programming subjected to linear constraint condition. Also, we find that the procedure is most efficient if the Huffman tree is used as the decision tree. In this case, only a few simple rules are needed to determine which stage ought to be carried on instead of doing step by step. Last but not the least, we study the programming performance of staircase function from the perspective of generalized function, and we propose two simple heuristic algorithms and other suggestions for the optimization problem whose objective is staircase function. The methods proposed in this paper are clear and efficient. However, for the lack of the professional knowledge, we do not give reasonable congestion management method for some current typical patterns of the power market.

Keywords: power congestion management; multivariate linear regression; programming flows by stages; efficient programming flow of Huffman decision tree; heuristic algorithms