

## 线路阻塞引起的电网机会成本分析

姚文峰<sup>1</sup>, 姚建刚<sup>1</sup>, 刘昌<sup>1</sup>, 房华<sup>1</sup>, 张午阳<sup>2</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南湖大华龙电气与信息技术有限公司, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 对于电网输电阻塞的分析, 现有的研究多侧重于阻塞费用的分摊, 而该文则注重于对因阻塞而引起的电网机会成本分析。在阻塞管理中, 通过合理的经济调度可以消除阻塞, 但对于那些经常发生阻塞且情况严重的线路, 也可以考虑通过改造或扩建线路来消除阻塞。该文提出了将全网的机会成本分摊给各条阻塞线路, 再通过对该阻塞线路所摊得的机会成本和为消除该线路阻塞而需要的扩建费用进行比较的方法, 为电网的经济决策提供理论依据。

**关键词:** 电力市场; 输电阻塞; 机会成本; 成本预算

**中图分类号:** TM73; F123.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2005)17-0053-05

### 0 引言

在电力市场环境, 电力用户、发电商、电网经营公司、配电公司等市场参与者之间都是平等的, 经济上是独立的, 传统垄断环境下的垂直管理关系已经不复存在, 四者之间的关系为电力买卖关系。有市场即有竞争, 竞争要求保证市场的自由度, 使得商品可以自由流通, 输电网络是电力交易的平台, 这就要求输电网络对市场参与者公平开放。在理想的电力市场环境下, 电力系统中任意节点的发电机可以自由地向任意节点的负荷供电, 从而保证市场的最大自由度。然而实际的电力市场运营中, 由于电源、负荷的分布不均及随着发电、用电规模的日益增大, 使得某些输电线路发生输电阻塞, 从而迫使电网公司为了消除阻塞不得不调整发电计划, 如减少阻塞线路输端某些报价低的机组发电而增加受端某些报价高的机组发电, 这种由阻塞引起的利润损失称为机会成本<sup>[1,2]</sup>。

对阻塞管理的分析, 文献 [3] 中提出了某个交易时段内有功负荷优化分配模型, 据此可求电网因阻塞引起的机会成本。文献 [5] 提出了一种比较符合实际需求的阻塞调度目标函数, 但只考虑了通过经济调度来消除阻塞, 对那些严重阻塞的线路未做其他的经济比较分析。文献 [7] 仅对阻塞管理的经济学模型进行了分析。电网公司在进行阻塞管理时, 对于那些偶尔发生且轻微的阻塞线路, 由于阻塞所增加的机会成本较小, 相对于电网扩建的费用来说微不足道, 通过调整发电计划消除即可; 对于那些经常性且阻塞严重的线路, 因阻塞而引起的机会成

本通过日积月累是巨大的, 电网公司应该考虑这种机会成本的影响, 考虑是否通过阻塞线路扩建以从根本上消除阻塞。本文对阻塞管理及其机会成本进行了研究, 提出了将全网的机会成本分摊给各条阻塞线路的计算方法, 并对长期阻塞线路所分摊到的机会成本和为消除这条线路阻塞的扩建费用进行比较, 为电网公司的经济决策提供依据。

### 1 阻塞管理中的机会成本

#### 1.1 机会成本的经济学概念

诺贝尔经济学奖获得者保罗·A·萨缪尔森在《经济学》一书中写道: “一项决策的机会成本是做出某一项决策而不做出另一项决策所放弃的东西”。通常认为, 机会成本是在决策分析过程中, 选择某种最优方案, 而放弃次优方案所失去的潜在利益。例如, 有 100 万元的资金, 假设有两种用途, 其一是存入银行可获得利息 9 万元, 其二是用于投资办厂, 可获利润 11 万元。当决策者将这 100 万元存入银行时, 其机会成本为放弃了直接投资的获利 11 万元。机会成本从资源的稀缺性和多用性来认识成本, 以便做出最有利于自己的选择。在实际中, 机会成本有许多名称, 如替换成本、择一成本、经济成本。

#### 1.2 电力市场环境下阻塞管理中的机会成本

机会成本是因选择而发生的, 之所以需要选择是由于资源的稀缺性。输电网络的有限传输容量和传输损失是输电网络的两大基本特征。输电网络的有限传输容量是一种稀缺资源。

在传统的垂直管理体制下, 电力调度中心是根据事先知道的各发电企业的发电成本结合网络中的

输电约束来安排各机组的发电计划的。通过最优潮流程序的分析,输电阻塞现象可以很好地避免。但是,在开放的自由竞争环境下,发电企业关注的是能否成功实现交易而不是如何科学地调度。因此,这就给电力市场环境下实行输电调度提出了新的要求,既要保证输电网络的安全可靠运行,又必须使发电企业在平等竞争的基础上同时尽可能使输电网络有效地传输电力而避免出现阻塞<sup>[8]</sup>。综合起来,电力市场环境下调度必须服从以下三个原则:

1)最低竞价优先并网发电原则。电力交易中心按各机组的报价,依据报价低的先上网原则来安排机组并网发电。在一定的电力交易量下,哪个企业的竞价最低就优先发电,直到满足给定的交易量为止,而定价超过出清电价的发电企业就不能并网发电,从而保持了市场的竞争性和公平性。

2)社会净价值最大化原则。在一个特定的输电网络中,在保证输电线路安全运行条件下,尽可能使电力用户为社会所创造的社会净价值最大。

3)输电网络安全可靠运行原则。要保证整个电网的稳定运行,首先就要保证输电线路畅通无阻。但是,实际很难做到这一点。因为输电线路总有一个安全输送容量。若线路输送的电能超过安全输送容量时,就会对输电网络安全运行构成威胁。为此,总是对输电线路制定出极限容量。

基于以上原则,电网在提供电力交易时以交易利润最大化为导向。电网调度要尽可能地让那些报价低的机组多发电而让那些报价高的机组少发电甚至不发电。于是不可避免地出现系统中某些输电价格较低的线路或某些电能价格较低的发电机周围的线路往往承载着较重的负荷,这些输电线路的容量是有限的,输电服务容易引起这些线路的潮流越限而产生阻塞。此时电网调度部门不得不调整发电计划,如减少那些引起阻塞的电价低的机组发电而增加那些对消除阻塞有利的电价高的机组发电、切除阻塞线路受端的部分负荷、断开过负荷线路、调节变压器抽头或移相器等,由此引发的利润损失称之为阻塞管理中的机会成本。

## 2 阻塞管理

根据阻塞作用的时间本文把阻塞线路分为短期阻塞线路和长期阻塞线路,把那些偶尔发生且轻微的阻塞线路归为前者,把那些经常发生阻塞且严重的阻塞线路归为后者。

电力市场环境下,由于输电网的完全开放准入,

网络的运行方式不再由系统调度员单方面所能决定,而是由市场中所有电能交易的共同组合来决定。这就使得:一方面由于任意一笔交易的电量和传输路径均具有不可预测性,使阻塞的发生具有偶然性,从而产生短期阻塞;另一方面不可避免地出现系统中某些输电价格较低的线路或某些电能价格较低的发电机周围的线路长期发生阻塞,使低价电能无法送出,从而产生长期阻塞。

### 2.1 短期阻塞线路的阻塞管理

对于短期阻塞线路,电力市场调度运营机构不得不放弃一些明显可获利的交易合同,按照一定的优化原则,通过直接调整发电机出力、切除阻塞线路受端的部分负荷、调整交易内容或者在阻塞线路上增加反向交易等手段,实现消除阻塞。

### 2.2 长期阻塞线路的阻塞管理

对于长期阻塞线路,如果通过调整调度计划消除阻塞,长年累月积累的利润损失即机会成本将是巨大的,且长期受阻塞制约不能送出低价电能的电厂也将强烈要求扩建阻塞线路以解除制约,此时应该考虑通过扩建阻塞线路提高输电能力从根本上消除阻塞,线路扩建也需要较大的投入,那么当阻塞达到哪个程度时应该扩建线路?以下将从阻塞引起的机会成本和线路扩建费用比较角度考虑,对其进行经济比较分析。

#### 2.2.1 总的机会成本计算

本文采用以总的发电成本最低为电网调度模型,在不考虑电网容量约束情况下,我们可以得出经济调度结果:总的发电成本、各发电机的有功出力、市场清算价格。然后据经济调度结果进行潮流计算可得出每条输电线路需承担的输电量,结合各条线路的容量约束,可得出发生阻塞的线路。阻塞发生后,在考虑支路容量约束的情况下调整发电计划,我们又可以得到总的发电成本,这两个总的发电成本之差即是电网因阻塞产生的总机会成本。

本文把一天分为二十四个交易日,在不考虑网损和无功潮流,不计支路容量约束的情况下,某个交易时段内有功负荷优化分配的数学模型为:

$$\min C^F = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (1)$$

$$\text{s t } \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n D_i \quad (2)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: $C^F$ 为总发电成本; $C_i(P_i)$ 为发电机*i*的成本函数; $n$ 为电网节点总数; $D_i$ 和 $P_i$ 为节点*i*的负荷

功率与发电功率;  $P = [P_1, P_2, \dots, P_n]$  为发电机有功出力向量;  $P_{i, \max}$  为节点  $i$  处发电机出力上限;  $\lambda^F$  和  $\mu^F$  分别为约束 (2) 和 (3) 的拉格朗日乘子。不计支路容量约束的经济调度结果为  $(C^F, P^F, \lambda^F, \mu^F)$ , 其中  $P^F$  是节点发电机的最优有功出力向量,  $\lambda^F$  是市场清算价格。

当输电线路有阻塞发生, 则调整发电计划, 再求计及支路容量约束的经济调度方案, 保证系统的安全经济运行, 也就是解以下的最优潮流问题:

$$\min C^c = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } B \cdot V = P - D \quad (5)$$

$$H \cdot \mu^c \leq FL_{\max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{i, \max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中:  $P$  和  $D$  分别为节点发电功率和负荷功率向量;  $V$  为节点电压相角向量;  $L_{\max}$  为支路极限传输功率向量;  $H$  为支路节电并联矩阵; 式 (5) 为直流潮流方程; 式 (6) 为支路容量约束;  $\mu^c$  为式 (6) 的拉格朗日乘子向量。计及支路容量约束的经济调度结果为  $(C^c, P^c, \lambda^c, \mu^c)$ , 其中  $P^c$  是计及支路容量约束的节点发电机最优有功出力向量。  $\lambda^c$  是节点电价或发电边际成本向量。  $C^c = C^c - C^F$  就是在这个交易时段内电网因阻塞而引起的机会成本。

### 2.2.2 某条阻塞线路全年所分摊到的机会成本

1) 不计支路容量约束的情况下, 由上文第 2.2.1 部分可确定某交易时段发电机发电量和负荷的分配情况, 由此可计算出计及容量约束情况下各条线路所担负的输电容量  $LTC$  (Load Transmission Capacity)。

2) 由这条线路的实际情况可计算出该线路总的传输容量  $TTC$  (Total Transmission Capacity), 留一定的传输裕度  $TM$  (Transmission Margin), 在此条件下, 由以下公式把电网在某个交易时段总的机会成本按阻塞的严重程度分摊给各条阻塞线路 ( $L_1, L_2, \dots, L_n$ )。

$$LTC = LTC - TTC - TM \quad (8)$$

$$X_{Li} \% = \frac{LTC_{Li}}{\sum_{j=1}^n LTC_{Lj}} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$C_{Li, Tj} = X_{Li} \% \cdot C \quad (10)$$

式中:  $LTC$  是阻塞电量的大小;  $X_{Li} \%$  为  $i$  线路对全电网由阻塞引起的机会成本贡献大小百分比, 即占全电网机会成本总额的比例大小;  $C_{Li, Tj}$  是  $i$  阻塞线路在某个交易时段里所分摊的机会成本。将一天分

为 24 个交易日, 分别计算出每个交易时段的机会成本  $C_{Li, Tj}$ ; 再求和则得出一天中该线路的机会成本

$$C_{Li, Dk} = \sum_{j=1}^n C_{Li, Tj} \quad (11)$$

式中:  $C_{Li, Dk}$  是  $i$  阻塞线路在某一天里所分摊到的机会成本。

根据电网公司长期的历史统计数据表明, 一年之中用电高峰时期从开始到结束每天的用电量和各时段负荷分布基本保持稳定, 低谷和平常时期也是如此。由于是进行粗略的经济比较分析, 故取该电网用电高峰时期具有典型日负荷曲线特性的 5 到 10 天作为分析样本, 计算阻塞线路取样这几天每天所分摊到的机会成本, 取其平均值, 将这个平均值乘以用电高峰的持续天数即可得到某条阻塞线路在一年用电高峰时期的机会成本。再用此方法求出用电低谷时期和平常时期的机会成本。这样可以求出全年这条阻塞线路的机会成本。具体计算公式如下:

$$C_{L, Dh} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{L, Dk}}{n} \quad (12)$$

$$C_{L, Dl} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{L, Dk}}{n} \quad (13)$$

$$C_{L, Dn} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{L, Dk}}{n} \quad (14)$$

$$C_{L, Y} = C_{L, Dh} \cdot n_h + C_{L, Dl} \cdot n_l + C_{L, Dn} \cdot n_n \quad (15)$$

式中:  $C_{L, Y}$  是  $i$  条阻塞线路全年所分摊到的机会成本,  $C_{L, Dh}$ 、 $C_{L, Dl}$ 、 $C_{L, Dn}$  是用电高峰、低谷、平常时期分摊到的平均机会成本;  $n_h$ 、 $n_l$ 、 $n_n$  是用电高峰、低谷、平常时期在一年中各自持续的天数。

### 2.2.3 电力市场环境下载路扩建应考虑的因素

对阻塞比较严重的长期阻塞输电线路, 可通过提高其输电能力以从根本上来消除阻塞。目前提高输电能力的办法主要有两种: 一种是充分利用现有网络的资源, 安装部分 FACTS 器件调整网络参数以提高网络的整体输电能力; 另一种则是对电网采取适当的投资, 扩建该阻塞线路。由于 FACTS 器件对潮流的控制作用有限, 提高阻塞线路输电能力不是很明显, 在此很难满足要求, 且这种设备比较昂贵, 性价比不高。线路扩建能大幅提高阻塞线路输电能力, 但线路扩建作为电网规划的一部分, 应充分考虑经济性、安全性及其对环境的影响。电力市场环境

下的线路扩建应遵从以下电网规划原则：满足电厂电能送出。输、变、配电比例适当，容量充裕。主干网架满足  $N-1$  要求。电压支持点多，能在正常及事故情况下保证电力系统的安全及电压质量。保证用户供电的可靠性。系统运行的灵活性。电网结构应能适应各种可能的运行方式，包括正常及事故情况下、高峰及低谷负荷时的运行方式。潮流分布合理，无迂回倒流或送电距离过长等现象。提供足够的输变电容量，保证竞争市场的电力交易的顺利进行。根据上网规则和负荷需求的实际情况收购电量，而不是无条件地满足所有电厂和所有机组的送出。通过核算电网服务价格，公正地回收提供服务的费用，保证电网经营的合理收益。

#### 2.2.4 扩建费用预算值的具体计算

对线路扩建各因素进行充分考虑后，如满足电网规划要求，即可计算扩建费用的预算值，可参考我国现行电力建设预算体系。该体系是由原电力工业部制定的一系列标准、规定和办法组成的。主要包括电力工程建设预算费用构成及计算标准、电力工业基本建设预算编制办法、电力工业基本建设预算项目及费用性质划分办法、电力工业引进成套设备基本建设工程预算编制办法以及与之相对应的电力行业定额体系。据此可计算出相应电压等级下每千米所需费用  $P$ ，再结合线路的实际情况，进行相应的修正，得出某条阻塞线路扩建的预算费用，一般输电线路的经济寿命年限取 25 年（可据电网公司实际情况确定），即可得出电网为消除阻塞而分摊到每年的扩建预算费用  $T$ 。

$$T = \frac{P \cdot L \cdot (1+i)^{25}}{25} \quad (16)$$

式中： $P$ 为相应电压等级下每千米的建设费用， $L$ 为整条线路的长度， $\alpha$ 为该线路的修正系数， $i$ 为该线路寿命年限内维护费用修正因子。对阻塞线引起的机会成本和电网为消除阻塞的扩建费用  $T$  进行比较，而取舍之。

#### 2.2.5 经济比较分析的计算步骤（参见图 1）及具体应用

1) 根据电网公司的年历史负荷曲线确定用电高峰、低谷、平常时期各自持续的天数，从中选取各个时期的典型负荷日，依据统计数据得出每个负荷日每个交易时段电网所有机组的报价函数。

2) 根据电网公司得到的电网运行的基本参数，推算出各条阻塞线路总的传输容量  $TTC$  (Total

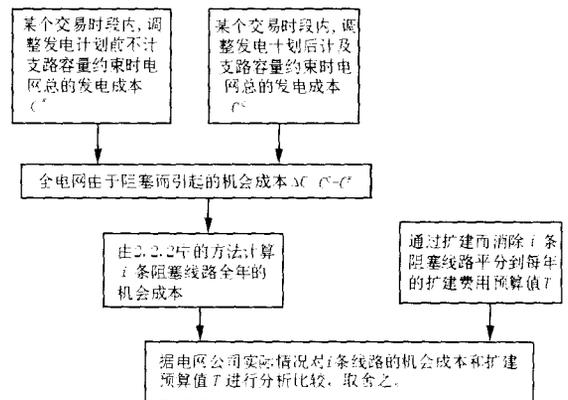


图 1 计算流程图

Fig 1 Computing flow chart

Transmission Capacity)以及其它的约束条件。

3) 利用上文第 2 部分所阐述的方法计算某条阻塞线路全年总的机会成本，再分析求和计算出该阻塞线路所分摊到的阻塞机会成本，从而得出最终的优化结果。

由于在计算过程中需涉及到上百次的迭代优化求解，而且当确定某条阻塞线路扩建所需预算费用时，涉及到很多的工程问题，数据运算量很大，需用计算机辅助完成。

### 3 结论

本文从机会成本的角度对阻塞管理进行了研究，侧重长期阻塞线路全年所摊得的机会成本分析与计算，并使之与扩建该线路平分到每年的费用进行比较，从而决定是否扩建该线路。该理论充实了现有的阻塞管理研究，为电网规划者做出正确的决策提供了科学的参考依据。基于上文所介绍的运算模型框架，结合电网实际运行参数，作者编制相关的流程化计算程序，大大加快了运算速度。

#### 参考文献：

- [1] 姚建刚,章建. 电力市场分析 [M] 北京:高等教育出版社, 1999.  
YAO Jian-gang, ZHANG Jian Power Market Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [2] 陈收,毕少菲. 管理经济学 [M]. 湖南:湖南大学出版社, 1999.  
CHEN Shou, B I Shao-fei Managerial Economics [M]. Hunan: Hunan University Press, 1999.
- [3] Bakitizis A G Aumann-shapely Transmission Congestion Pricing[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21 (3): 67-69.

- [4] Gedra T. On Transmission Congestion and Pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 14(1): 241-248
- [5] 李平,宋燕敏,曹荣章. 电力市场的阻塞调度[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 11-12  
LI Ping, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang. Congestion Dispatch in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 11-12
- [6] 杨洪明,荆朝霞,段献忠. 电力市场下电网的可传输容量[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(2): 34-37.  
YANG Hong-ming, JING Zhao-xia, DUAN Xian-zhong. Available Transfer Capability of Transmission Network in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 22(2): 34-37.
- [7] 汤振飞,于尔铿,唐国庆. 电力市场输电阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 13-16  
TANG Zhen-fei, YU Er-keng, TANG Guo-qing. Transmission Congestion Management in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 13-16
- [8] 任震,吴杰康,等. 在竞争的电力市场下的传输阻塞管理与定价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 19-22  
REN Zhen, WU Jie-kang, et al. Congestion Management and Pricing in Competitive Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 19-22

收稿日期: 2004-12-13; 修回日期: 2005-02-27

作者简介:

姚文峰(1980-),男,硕士研究生,主要从事电力市场理论研究及电力市场技术支持系统的软件开发;

姚建刚(1952-),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场、配电系统自动化和新型输电方式的研究;

刘昌(1980-),男,硕士研究生,主要从事电力市场方向研究。E-mail: liuchang-2000@etang.com

### Analysis of electric network opportunity cost caused by congestion

YAO Wen-feng<sup>1</sup>, YAO Jian-gang<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, FANG Hua<sup>1</sup>, ZHANG Wu-yang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan HDHL Electric & Information Tech Co., Ltd, Changsha 410012, China)

**Abstract:** In transmission congestion research, most of the existing researches focus on the congestion cost. However, this paper emphasizes particularly on electric network opportunity cost caused by congestion. In congestion management, congestion can be eliminated by rational transmission management. For congestion happened frequently and seriously in some lines, congestion can be eliminated by line enlargement. The paper presents a method that by reconstruction and network opportunity cost is allocated among the congestion lines. Comparison and analysis of the opportunity cost that the congestion line allocated and the enlarging expenditure for eliminating congestion lay a foundation for power system economic decision.

**Key words:** electricity market; transmission congestion; opportunity cost; cost budget

(上接第 48 页 continued from page 48)

### Application of the quasi-synchronous sampling method in the measuring control instrument for electricity

CAO Hui<sup>1</sup>, YUAN Shi-ying<sup>1</sup>, YI Jun<sup>2</sup>, CAO Dong<sup>2</sup>

(1. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Guangdong Phamc College, Guangzhou 510640, China;

3. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper analyzes the relation between the accuracy of quasi-synchronous sampling method and frequency deviation through studying the quasi-synchronous sampling method. Two methods of improving the accuracy of the quasi-synchronous sampling method through reducing frequency deviation are presented. The formula for accurately calculating the frequency is given. The simulation results show this method can improve the RMS value of the measured signal and the accuracy of the harmonic. Finally, this method is applied in the measuring control instrument for electricity. The purposes of small volume, strong anti-jamming ability, high measuring speed and measuring accuracy of this instrument are achieved.

**Key words:** quasi-synchronous sampling method; measuring control instrument for electricity; frequency adjustment sampling method; quadratic approach method