

发电市场技术支持系统中的有功安全校正策略

喻 洁¹, 宋燕敏¹, 胡 俊¹, 孙维真²

(1. 国家电力公司电力自动化研究院, 南京 210003; 2. 浙江省电力工业局中心调度所, 杭州 310007)

摘要: 提出了符合中国发电市场运营规则的安全校正策略。考虑了机组出力变化速率约束、线路潮流速率约束和断面潮流速率约束, 在灵敏度计算的基础上, 以机组出力调整量最小和购电费用增量最小 2 种目标对机组出力计划进行调整。依据该算法研制开发的应用软件已在浙江发电市场技术支持系统(PMOS-2000)中投入实时运行, 实践证明, 该算法切实可靠, 收敛速度快, 鲁棒性强, 能够处理实时运行中的各种情况。

关键词: 电力市场; 发电市场技术支持系统; 安全校正策略; 机组出力调整量; 购电费用增量; 机组出力变化速率约束; 线路潮流速率约束; 断面潮流速率约束

中图分类号: TM 73; F123.9

0 引言

当前世界上许多国家都在进行大规模的电力改革, 探索走向电力市场的道路。在市场竞争环境下, 如何进行电网的安全运行控制是电力工作者关心的问题之一。电力系统在垄断模式下运行时, 按系统运行费用最低的原则制订发电计划, 系统运行方式和机组出力一般不会发生太大变化, 系统潮流也较稳定, 发电计划一般不会引发系统安全问题。而在发电市场运行模式下, 机组通过竞价上网, 发电计划的制订原则由系统运行费用最低转变为市场购电费用最低, 不同时段之间系统运行方式和机组出力一般都会发生较大变化, 系统潮流的变化也较大, 因此对按机组报价由低到高的原则编制的发电计划必须进行安全校核, 以保证系统安全稳定运行。

国内外的电力工作者对这一问题都进行了大量的探索, 但是, 大多数的研究文献都是基于理论上的假设, 假设发、输、配电侧都已经开放, 电力市场的交易模式已经形成了双边合同模式或联营交易模式, 将网络安全对发电计划的约束称为传输拥挤管理(transmission congestion management), 而我国的发电侧电力市场, 输、配电侧还未开放, 发电侧也只是初步开放。本文针对这一客观实际情况, 研制开发了适用于我国目前电力市场运营管理机制的软件。

1 发电市场中安全校正策略的设计原则

PMOS-2000 发电市场技术支持系统^[1]中的有功安全校正策略隶属于预计划调度子系统^[2]和实时

调度子系统^[3]。这两个子系统是技术支持系统中最重要的部分之一, 其核心功能是首先按电厂报价由低到高的原则编排发电出力计划, 再进行系统有功安全约束校正, 对计划进行调整, 使系统满足安全运行的需要。目前采用直流潮流进行安全校核, 当编排的出力计划存在网络安全问题时对发电计划进行修正^[2]。通过这一修正能减少初始计划的约束条件, 有效地降低计算量, 保证得到最优可行解, 并可同时用于离线安全校核和实时经济计算。

PMOS-2000 系统应用于浙江省发电市场的运营管理, 在浙江电网发电市场规则中, 对网络的安全约束如下: 当存在网络制约即在一定条件下, 输电网和配电网的限制会使得调度不能完全按照报价的优先顺序进行时, MSO (market system operator) 必须合理修改调度计划, 确保系统安全; 在对调度计划的输入修改时, MSO 对机组容量的变动应尽可能少; MSO 应完整地说明修改调度计划的原因; 由于网络制约而引起的损失市场不予赔偿; 由于网络制约而引起序外运行的机组不能决定市场清算价格。

由此可见, 在目前的发电市场运营规则中, 对于网络安全约束而引起的机组出力计划的调整, 不影响市场清算价格, 没有任何补偿措施。本文的安全校正策略就是依据上述规则而编制的。

2 安全校正策略算法

在市场竞争环境下, 发电计划的制订原则不再是垄断模式下的系统运行费用最低, 而是市场购电费用最低。如图 1 为火电机组发电费用曲线即垄断模式下考虑的机组费用曲线, 图 2 为机组容量段价格曲线, 是发电竞争环境下各电厂的报价曲线, 其报

价分为 10 个容量段,各容量段对应一个价格。机组的报价在各价格段上容量的增量必须不小于零,因此,有可能在几个价格段上容量的增量均为零,甚至出现 9 个价格段容量的增量均为零,此时容量段价格曲线是一条水平的直线。这种不规则的阶跃性给曲线的拟合带来极大的困难,这是优化方法在此运用的一大障碍。因此,本文采用灵敏度类算法。

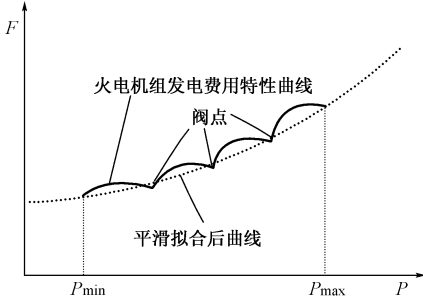


图 1 火电机组发电费用曲线

Fig. 1 Cost curve of thermal generator

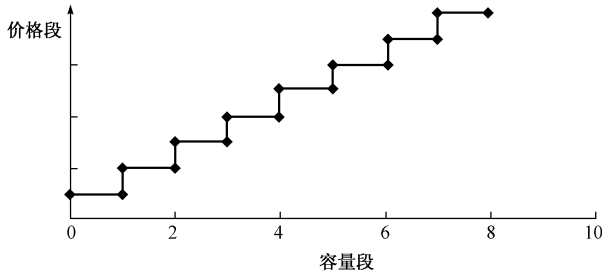


图 2 机组容量段价格曲线

Fig. 2 Price curve of generator capacity bands

3 灵敏度分析^[4]

灵敏度分析是通过各变量之间函数关系的线性化表达式来研究一些变量的微小变化引起另一些变量如何改变,相应的这种线性化表达式称为灵敏度模型。本文所用的灵敏度是节点有功出力对线路有功潮流的灵敏度,其物理意义是:当系统中节点 i 有功增加 1 个单位时,支路 L 有功潮流的变化量。通过这个灵敏度关系,由修正节点出力来改变线路潮流的过载情况。

3.1 节点有功出力对支路有功的灵敏度

本文采用一种简便的计算灵敏度的方法。设第 k 条线路的两端节点号为 i 和 j ,则灵敏度矩阵 A 的第 k 行为线性方程组(1)的解 X 的转置。

$$B'X = b \quad (1)$$

其中 $b = [0, \dots, 0, \frac{1}{x_{ij}}, 0, \dots, 0, -\frac{1}{x_{ij}}, 0, \dots, 0]$; $\frac{1}{x_{ij}}$

是 b 的第 i 个元; $-\frac{1}{x_{ij}}$ 是 b 的第 j 个元。

3.2 节点有功出力对断面合功率的灵敏度

所谓断面合功率即某几条线路按各自方向的潮流之和,节点有功出力对断面合功率的灵敏度是各节点有功出力对断面中各支路潮流的灵敏度之和。公式表示为:

$$S_{i-T} = \sum_{L \in T} S_{i-L} \quad (2)$$

其中 S_{i-T} 为机组 i 对断面 T 的灵敏度; S_{i-L} 为机组 i 对断面中支路 L 的灵敏度。

4 安全校正数学模型^[5]

4.1 目标函数

安全校正策略的目标函数通常有 2 类:为了快速解决系统中的安全问题,以调整量最小为目标,可使运行方式尽快回到可行域;为了运行优化,将发电费用的微增率最小作为目标,可使调整运行方式更经济。本文的安全校正策略紧密结合市场运营规则,同时必须体现市场竞争的公平性,其目标函数也有 2 类:

a. 由于目前的市场运营规则中,对安全校核没有任何经济性的补偿与惩罚规定,也可以只考虑尽快消除系统安全问题,对机组报价不加以考虑,即机组的调整量最小。此方法以调整量最小为目标,使系统快速达到安全性,尤其适用于实时调度。

b. 与以往发电费用最优的目标函数不同的是,在电力市场技术支持系统中安全控制以购电费用的增量最小作为目标,使购电费用偏离最经济运行点的增量最小(最优性得到保持),从而使整个系统牺牲最小的经济性,保证系统的安全性。根据发电市场规则,目前采用“低价机组优先上调,高价机组首先下调”的原则,在保证系统安全的情况下,适应电力市场运营体制的需要,鼓励低价上网,充分体现市场竞争的公平性。

4.1.1 调整量最小目标函数

$$\min(\sum_{i \in G_+} \Delta P_{Gi} + \sum_{j \in G_-} \Delta P_{Gj} + \sum_{z \in G_0} |\Delta P_{Gz}|) \quad (3)$$

其中 G_+, G_-, G_0 分别为正灵敏度、负灵敏度、零灵敏度机组序列; $\Delta P_{Gi}, \Delta P_{Gj}, \Delta P_{Gz}$ 分别为正灵敏度机组出力下调、负灵敏度机组出力上调和零灵敏度机组的调整量。

4.1.2 购电费用增量最小

$$\min(\sum_{i \in G_+} F_i \Delta P_{Gi} + \sum_{j \in G_-} F_j \Delta P_{Gj} + \sum_{z \in G_0} F_z \Delta P_{Gz}) \quad (4)$$

其中 F_i, F_j, F_z 分别为正灵敏度、负灵敏度、零灵敏度机组的排序报价。

4.2 约束条件

4.2.1 系统有功平衡约束

$$\sum_{i \in G} \Delta P_{Gi} = 0 \quad (5)$$

其中 ΔP_{Gi} 为机组 i 的有功出力调整量; G 表示系统所有机组集合。

4.2.2 机组容量上下限约束

$$P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}^0 \leq \Delta P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} - P_{Gi}^0 \quad (6)$$

其中 $P_{Gi}^{\max}, P_{Gi}^{\min}$ 分别为机组 i 的最大容量上限和最小技术出力下限; P_{Gi}^0 为机组 i 的初始有功出力。

4.2.3 机组可调容量约束

为了尽可能地近似机组调整情况,本文算例将机组出力从最小技术出力到最大可用容量分为 5 段,调整速率也分为 5 段,每段上调与下调速率数值相等,采用哪一段的调整速率,由机组出力处于哪一个容量段决定。

$$|\Delta P_{Gi}| \leq R_i T \quad (7)$$

其中 R_i 为机组 i 的调整速率; T 为可调时间。

4.2.4 支路有功安全约束

$$P_L^{\min} - P_L^0 \leq \Delta P_L \leq P_L^{\max} - P_L^0 \quad (8)$$

式(8)亦可写为:

$$P_L^{\min} - P_L^0 \leq \sum_{i \in G} S_{i-L} \Delta P_{Gi} \leq P_L^{\max} - P_L^0 \quad (9)$$

其中 $P_L^{\min}, P_L^{\max}$ 分别表示支路 L 的最小、最大有功潮流限值; ΔP_L 为支路 L 的有功潮流变化量; P_L^0 为支路 L 的初始潮流; S_{i-L} 为发电节点 i 对支路 L 的灵敏度。

4.2.5 价格容量段约束

$$\begin{cases} F_{Gi} = F_{Gi,j} \\ P_{Gi,jmin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,jmax} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $P_{Gi,jmin}, P_{Gi,jmax}$ 分别为机组 i 在 j 价格容量段的容量下限与上限; F_{Gi} 为机组 i 在出力为 P_{Gi} 时的价格; $F_{Gi,j}$ 为机组 i 在第 j 价格容量段的价格。

4.2.6 断面潮流约束

$$\left| \sum_{L \in T} P_L \right| \leq P_T^{\max} \quad (11)$$

其中 $P_T^{\max}$ 为断面 T 的有功潮流限值; P_L 为断面 T 中支路 L 的有功潮流; $\sum_{L \in T} P_L$ 表示断面 T 的合功率(有方向)。

5 算例分析

依据本文算法研制开发的安全校正软件已经在浙江发电市场技术支持系统中投入了实际应用,为保证在发电市场竞争环境下系统安全运行提供了可

靠的有用工具,运行效果良好,无收敛性问题。

5.1 单支路安全校正算例

越限线路为台州至临海的“2348”线,限值 150 MW,过载 16.453 6 MW。

将调整量最小目标和购电费用增量最小目标进行比较,见表 1、表 2。

表 1 调整量最小目标校正措施
Table 1 Correction measure aimed to minimum adjustment capacity

机组名	调整前 出力/ MW	调整前价 格/(元· (MW·h) ⁻¹)	调整后 出力/ MW	调整后价 格/(元· (MW·h) ⁻¹)	调整量/ MW
TZC—UNIT5	125.00	0.450 0	83.92	0.350	-41.08
WZC—UNIT1	76.63	0.159 9	117.71	0.475	+41.08

表 2 购电费用增量最小目标校正措施
Table 2 Correction measure aimed to minimum increment of cost

机组名	调整前 出力/ MW	调整前价 格/(元· (MW·h) ⁻¹)	调整后 出力/ MW	调整后价 格/(元· (MW·h) ⁻¹)	调整量/ MW
TZC—UNIT5	125.00	0.450 0	90.00	0.345 0	-35.0
TZC—UNIT6	125.00	0.666 0	115.00	0.153 0	-10.0
TZC—UNIT7	330.00	0.580 0	312.70	0.450 0	-17.3
XSC—UNIT1	90.00	0.151 0	125.00	0.489 0	+35.0
XSC—UNIT2	90.00	0.156 0	105.00	0.178 0	+15.0
WZC—UNIT1	76.63	0.159 9	83.93	0.159 9	+7.3

由表 1 可计算出价格变化量为 8.836 3 元/h ((0.35 - 0.45) × 41.08 + (0.475 - 0.159 9) × 41.08 = 8.836 3), 由表 2 可计算出价格变化量为 1.106 元/h (35 × (0.345 - 0.45) + 10 × (0.153 - 0.666) + 17.3 × (0.45 - 0.58) + 35 × (0.489 - 0.151) + 15 × (0.178 - 0.156) + 7.3 × (0.159 9 - 0.159 9) = 1.106)。可见:考虑价格的调整方法调整机组的数目较多;考虑价格的调整方法总价格比不考虑价格的方法低。

5.2 断面安全校正算例

断面安全校正结果见表 3。其中断面“秦二线”包括 2 条线路:“秦双 2424”、“秦越 2428”,限值 450 MW,潮流计算得到的合功率 483.256 1 MW,越限 33.256 1 MW。

表 3 断面安全校正结果
Table 3 Correction measure for transmission interface

厂站名称	机组名称	调整前出 力/MW	调整后出 力/MW	调整量/ MW
秦山厂	QSC—UNIT1	197.07	163.814	33.256
台州厂	TZC—UNIT3	60.00	93.256	-33.256

6 结语

本文对在发电市场中如何进行网络安全约束校

正控制进行了有益探索,提出了2种不同的目标函数,既考虑了系统安全运行的实时性,又结合了电力市场运行机制的经济性,将以往安全校正的经济性目标由发电费用最小转换成购电费用最小,符合我国发电市场运行的实际情况。依据本文算法所研制开发的应用软件已在浙江发电市场技术支持系统中投入实时运行,结果表明算法收敛速度快、鲁棒性强,能够处理实时运行中的各种情况。

随着我国电力市场改革步伐加快、力度加强,对电网运行的安全性和经济性的要求也不断提高。同时,电力市场运营机制的修改和完善,有关系统安全性问题的规则不久也将出台,对这一方面的研究工作,已越来越被各试点单位和研究人员所关注。

参考文献

- 1 宋燕敏,曹荣章,华定中,等(Song Yanmin, Cao Rongzhang, Hua Dingzhong, et al). PMOS-2000 发电市场技术支持系统概述(Introduction of PMOS-2000 Power Market Operator System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(4)
- 2 宋燕敏,杨争林,胡俊,等(Song Yanmin, Yang Zhenglin, Hu Jun, et al). 发电市场的核心技术——预计处理子系统(Introduction of PMOS-2000 Power

Market Operator System——Pre-Dispatch Schedule Disposal Subsystem (PDS)). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(8)

- 3 宋燕敏,杨争林,胡俊,等(Song Yanmin, Yang Zhenglin, Hu Jun, et al). 实时发电市场的技术保证——实时调度子系统(The Technique Support of Spot Power Market——Real Time Dispatch Subsystem). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(12)
- 4 李文沅(Li Wenyan). 电力系统安全经济运行——模型与方法(Safe and Economic Operation in Power System——Model and Method). 重庆:重庆大学出版社(Chongqing: Chongqing University Press),1989
- 5 Harry Singh, Shangyou Hao, Alex Papalexopoulos. Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2)

喻洁,女,硕士,主要从事电力市场方面的研究与开发工作。

宋燕敏,女,高级工程师,主要从事水火电经济调度、自动发电控制和电力市场方面的研究开发工作。

胡俊,男,硕士,从事电力市场方面的研究开发工作。

STRATEGY OF ACTIVE POWER SECURITY CORRECTION IN POWER MARKET OPERATOR SYSTEM

Yu Jie¹, Song Yanmin¹, Hu Jun¹, Sun Weizhen²

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(2. Zhejiang Electric Power Dispatching and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Strategy of active power security correction conforming to Chinese power market regulations is proposed. Based on sensitivity calculation, the algorithm is for adjusting the output so that the amount of adjustment and the increment of cost are minimum. It considers rate of output change, available transfer capability limitations of both lines and transmission interface. The software according to this algorithm has been implemented in Zhejiang Power Market. The results show that it is practical, robust and valid.

This project is supported by State Power Corporation of China (No. SPKJ018-01).

Keywords: electricity market; power market operator system; strategy of active power security correction; adjustment capacity of unit; increment of cost; rate of output change; available transfer capability limitations of lines; available transfer capability limitations of transmission interface