

基于可中断负荷的阻塞管理研究

魏林¹ 魏东² 彭格³

(1. 重庆电力公司南岸供电局, 重庆 400060; 2. 重庆电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;
3. 重庆科技检测中心, 重庆 401147)

摘要: 随着电力市场的逐步完善, 将可中断负荷引入输电阻塞管理成为缓解阻塞和消除市场力的有效手段。提出通过潮流优化并将可中断负荷引入输电阻塞管理, 提出潮流优化与可中断负荷联合调度模型解决输电阻塞问题。对该模型以及 IEEE 6 节点仿真表明, 在电力市场下, 采用潮流优化与可中断负荷联合调度模型, 可以有效缓解输电阻塞。

关键词: 电力市场; 可中断负荷; 阻塞管理; 潮流优化

Abstract: With the development of electricity market, it is an effective way to alleviate the congestion and eliminate the market power by introducing interruptible load into transmission congestion management. It is proposed that the interruptible load is introduced into transmission congestion management through power flow optimization and the combined dispatching model of power flow optimization and interruptible load can solve the transmission congestion. The simulation results of the economical efficiency analysis of the proposed model and the calculation example by IEEE 6-bus system show that in the environment of electricity market the proposed combined dispatching model can alleviate the transmission congestion effectively.

Key words: electricity market; interruptible load; transmission congestion management; power flow optimization

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0044-04

0 引言

未来中国电力市场的改革进入深水区, 输配分离逐步形成, 电力市场将更加趋于完善, 输电阻塞成为亟待解决的问题。在电力市场下, 发电侧完全开放, 自由竞争, 报价低的机组优先发电, 使得电力公司在制定发电计划时以购电费用最低为目标。这将导致与报价低的机组相连的某些节点或线路加大输电阻塞的概率。在开放的电力市场环境下, 如何公平公正地进行输电网络的阻塞调度管理, 保证电网的安全稳定运行成为了国内外学者广泛关注的问题^[1-2]。

可中断负荷应用于输电阻塞管理已经有许多研究, 文献[3]提出了一个基于双边拍卖可中断负荷用于阻塞管理的模式; 文献[4]分析建立激励可中断负荷积极签约的机制; 文献[5]从用户侧出发, 提出了一种考虑负荷需求弹性的阻塞管理定价方法; 文献[6]提出了以总发电成本为目标得到阻塞成本, 并分给发电侧和用户侧共同承担的阻塞管理定

价新方法; 文献[7]提出了允许用户参与, 利用当时电价解决阻塞问题。Thomas. W. Gedra 提出了传输阻塞时阻塞成本和节点电价的计算方法, 并探讨了采用传输阻塞合同(TCC)消除阻塞交易双方收益的影响^[8]; R. S. Fang 和 A. K. David 针对电力联营体制和双边/多边交易同时存在的市场环境提出了阻塞调度模型^[9]; 任震等讨论了发生阻塞时节点的定价问题, 并提出了在不同交易模式下解决传输阻塞的措施^[10]。下面在现有理论的基础上, 提出了利用可中断负荷(interruptible load)配合电网的潮流优化来降低阻塞线路上的负荷需求, 从而有效地降低发生阻塞概率。

1 可中断负荷

随着 20 世纪 60 年代能源危机的出现, 需求侧响应的概念逐渐进入人们视野。所谓需求侧响应是指把用户侧资源和发电侧资源等同看待, 增加电力系统负荷弹性。可中断负荷是需求响应中的一种, 已经在欧美、日本、台湾等地区成功实施多年, 电力

公司通过与用户签订中断合同,采取有效激励,缓解电力高峰期用电紧张的局面。文献 [11] 从最优潮流的角度出发分析了在电力市场条件下电力公司如何正确选择 ILM 的合同类型以及如何最好地实施 ILM,为电力公司科学地进行可中断负荷管理提供了参考依据。

1.1 可中断负荷管理模型有如下几种。

(1) 目标函数

$$\min \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_c} C_i [1 - Z_i(j)] w_i \quad (1)$$

式中 $w_i = \frac{0.7 \arctan(\frac{EI - I_r}{EI})}{2}$; C_i 为第 i 个电力公司的中断量; n_i, n_c 表示参与可中断负荷管理的参与数目、控制时段数; $Z_i(j)$ 为第 i 个控制用户在第 j 时段的被控状态; EI 为用户平均激励比率; I_r 为第 i 个用户的激励比率。

(2) 负荷约束

为了保持电网的安全稳定运行,当系统出现容量短缺时,应将负荷降至系统能够承受的范围之内。即系统中被中断的负荷总量应该大于或等于容量短缺量,其数学表达式为

$$\sum_{i=1}^{n_i} C_i [1 - Z_i(j)] \geq SC \quad (2)$$

式中 SC 为系统 j 时刻缺额容量。

(3) 最大中断时间约束

用户与电力公司签订的可中断负荷合同中通常规定了电力公司在某个时段中断用户的电力供应所能持续的最大时间,当第 i 个用户的负荷中断时间的累计值达到合同所规定的中断时间上限时,电力公司必须恢复用户 i 的电力供应,即

$$Z_i(j) = 1, \text{ 当 } T(j-1) = T_i^{\max} \quad (3)$$

式中 $T(j-1)$ 为第 i 个用户至 $j-1$ 时刻的累积中断时间; T_i^{\max} 为用户与电力公司签订的最大中断时间。

(4) 最小供电时间约束

电力公司对第 i 个可中断用户的供电时间必须足够长以满足该用户的电力需求,即当电力公司对用户 i 的电力持续供应没有达到合同所限定的下限值时,电力公司不能中断对用户 i 的供电,即

$$Z_i(j) = 1, \text{ 当 } T(j-1) < T_i^{\min} \quad (4)$$

式中 $T(j-1)$ 为第 i 个用户至 $j-1$ 时刻的累积中断时间; T_i^{\min} 为用户与电力公司签订的最小中断时间。

2 阻塞管理的数学模型

2.1 最优调度原则

在竞争的电力市场中,既要使输电线路的安全得到保障,又要使发电侧自由竞争,避免发生输电阻塞,因此调度必须满足以下 3 个原则。

(1) 最低竞价优先并网原则。电力公司购买电量时要保证支出最小化,从而让报价最低的机组优先并网发电,保证发电侧的公平竞争。

(2) 输电网络安全原则。保证电能能在传输过程中不能超过线路的最大输送容量,保证电力系统稳定运行。

(3) 社会效益最大化原则。在线路安全运行的前提下保证用户创造的价值最大化。

2.2 阻塞管理的目标函数

在发生输电阻塞的情况下,将导致有些节点边际成本上升,造成全网购电费用上涨,因此依据购电费用最小的原则,将全网购电费用最小为目标函数。

$$\min \sum_{i=1}^n c_i P_i \quad (5)$$

式中 n 表示发电侧机组数目; C_i 表示第 i 台发电机组发电容量; P_i 表示第 i 台发电机组边际成本价格。

2.3 约束条件

(1) 系统节点的有功、无功功率平衡约束

$$\begin{aligned} P_{gi} - P_{di} &= u_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n u_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{gi} - Q_{di} &= u_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n u_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $P_{gi}, P_{di}, Q_{gi}, Q_{di}$ 分别为节点 i 的发电机和负荷的有功功率、节点 i 的发电机和负荷的无功功率; u_i, u_j 为节点 i, j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角差。

(2) 支路传输容量约束

$$P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad (7)$$

式中 $P_{ij}^{\min}, P_{ij}^{\max}$ 表示支路 $i-j$ 的传输容量上下限。

(3) 控制变量与状态量约束

$$\begin{aligned} v_i^{\min} &\leq v_i \leq v_i^{\max} \\ \theta_i^{\min} &\leq \theta_i \leq \theta_i^{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 v_i^{\min}, v_i^{\max} 表示节点 i 的电压幅值最小、最大值; $\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}$ 表示节点 i 的电压相角最小、最大值。

3 基于可中断负荷的电网输电阻塞管理

一般情况下,电力调度员根据发电公司报价和潮流计算程序计算相关线路的潮流,分析哪些线路可能会出现输电阻塞,重新分配线路潮流,再依据阻塞费用的分摊原则将阻塞所导致的机会成本公平合理地分摊到各线路及其用户。这种消除阻塞的方式所带来的直接后果便是全电网的总体交易电价比原来明显高出许多,因为它从边际价格高的发电厂取得了电力,通过长距离或绕道进行传输导致了电网的整体购电费用攀升,进而增加了用户的电费负担。与用户签订可中断负荷合同是一种有效缓解输电阻塞的方法。当线路出现阻塞时,电力公司根据与用户签订的可中断合同切断相应负荷,并利用最优潮流程序分析确定切负荷后的线路潮流分布是否满足电网稳定性及安全可靠输电的要求,通过此种方式可以较好地缓解线路的阻塞状况,全网的整体购电费用也不会攀升得很高。这里提出潮流优化与可中断负荷相结合的综合调度方法:①调度员利用潮流仿真程序确定线路潮流;②结合可中断合同条件确定阻塞线路所能够中断的负荷容量,进行初步经济分析,确定哪些线路可以利用可中断负荷来消除阻塞;③利用潮流程序确定通过联合调度后的线路潮流是否符合线路安全。

4 算例

以图 1 所示的 IEEE 6 节点系统为例对所提出的方法进行了模拟计算,此系统包括 3 台发电机、2 台变压器及 4 个负载,系统总有功负荷为 320 MW,总无功负荷为 92 Mvar。计算所用的线路参数见表 1 表和以下各表中的中各量均为标么值,系统容量基准值为 100 MVA。

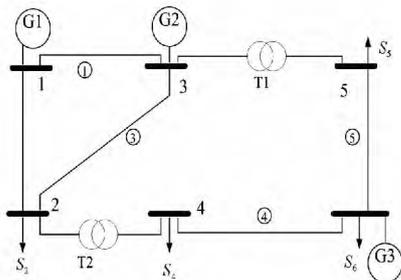


图 1 IEEE6 节点系统

表 1 线路参数

支路	首末端线号	支路电阻	支路电抗	1/2 充电电纳
①	1-3	0.082 05	0.192 07	0.000 00
②	1-2	0.054 03	0.223 04	0.024 60
③	3-2	0.056 95	0.173 88	0.017 00
④	4-6	0.037 00	0.084 50	0.000 00
⑤	5-6	0.019 38	0.059 17	0.024 60

发电机 G1、G2、G3 竞价上网的电价分别为 30 元/MWh、35 元/MWh 和 38 元/MWh。母线 2、4、5、6 的负荷 S2、S4、S5、S6 的标么值分别为 $0.6 + 0.1j$ 、 $0.6 + 0.1j$ 、 $1.0 + 0.4j$ 、 $1.0 + 0.32j$,所有交流支路的传输极限容量均为 100 MW。

假定在节点 2 的用户已和电力公司签订了可中断负荷合同,规定电力公司如提前 1 小时通知用户切负荷则赔偿金额为 32 元/MWh,最大可中断负量小于或等于 10 MW。在节点 5 的用户也和电力公司签订了可中断负荷合同,规定电力公司如提前 1 小时通知该用户切负荷必须付出的赔偿金额为 33 元/MWh,最大可中断负荷容量小于或等于 20 MW。

仅按照潮流优化程序对计及支路容量约束的传统的调用高价电能的经济调度方法求解,得到以此种模式消除阻塞适宜的发电策略为发电机 G1 发电 $1.8 + 0.15j$,发电机 G2 发电 $1.3 + 1.1j$,发电机 G3 发电 $0.208 61 - 0.117 79j$,所导致的目标函数即电网整体购电费用为 $S1 = 107 42.68$ 元/h,产生的阻塞成本为 $T1 = 10 742.68 - 10 650 = 92.68$ 元/h,每条支路流过的潮流如表 2 所示。

按照所提出的消除阻塞的方法,利用潮流程序分析得出此系统最优的经济调度方式为:切除节点 S2 的可中断负荷 5 MW,切除节点 S5 的可中断负荷 10 MW,发电厂 G1 发电 $1.9 + 0.12j$,发电厂 G2 发电 $1.27 + 1.038j$,发电厂 G3 不发电,再次利用潮流优化程序分析,得出的结论为利用此种方法消除网络阻塞电网的潮流分布符合稳定性的要求,确定以此进行经济调度。结果显示此种模式下的电网整体购电费用为 $S2 = 10 635$ 元/h,在这种模式下每条支路流过的潮流见表 3。

由表 3 可见,采用潮流优化与可中断负荷联合调度能够有效解决输电阻塞问题,并使全网购电费用最优化。

表 2 未考虑可中断负荷的线路潮流

编号	I 侧母线	J 侧母线	I 侧有功	I 侧无功	J 侧有功	J 侧无功
支路 1	1	3	0.888 71	0.038 64	0.083 126	-0.095 84
支路 2	1	2	0.911 30	0.111 37	0.087 068	-0.003 72
支路 3	3	2	0.128 86	-0.083 59	0.127 66	-0.053 09
支路 4	4	6	-0.201 68	-0.258 63	-0.205 61	-0.267 61
支路 5	5	6	-0.088 98	-0.546 98	-0.094 39	-0.512 39
变压器 T1	3	5	0.911 02	-0.130 05	0.911 02	-0.146 98
变压器 T2	2	4	0.398 32	-0.156 81	0.398 32	-0.158 63

表 3 考虑可中断负荷的线路潮流

编号	I 侧母线	J 侧母线	I 侧有功	I 侧无功	J 侧有功	J 侧无功
支路 1	1	3	0.954 72	0.011 72	0.890 62	-0.144 66
支路 2	1	2	0.942 58	0.108 30	0.899 07	-0.018 88
支路 3	3	2	0.091 79	-0.063 27	0.091 19	-0.031 01
支路 4	4	6	-0.159 74	-0.252 04	-0.163 00	-0.259 50
支路 5	5	6	-0.102 51	-0.495 67	-0.107 00	-0.458 50
变压器 T1	3	5	0.797 49	-0.082 81	0.797 49	-0.095 67
变压器 T2	2	4	0.440 26	-0.149 89	0.440 26	-0.152 04

(3): 46-49.

5 结 论

提出了一种新的解决输电阻塞思路,即将潮流优化和可中断负荷管理相结合的模型,将灵活性高的可中断负荷引入输电管理中,解决单纯潮流优化的不足。潮流优化与可中断负荷管理相结合,既能使全网的整体购电费用低于仅仅采用潮流优化,又使电力用户创造的价值增加,达到了发电商、电力公司、用户三者的共赢。

参考文献

[1] 张永平,焦连伟,陈寿孙,等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 2-9, 32.
 [2] Shrestha G B, Fonseca P A J. Congestion-driven Transmission Expansion in Competitive Power Markets [J]. IEEE Transactions on Power System, 2004, 19(3): 1-8.
 [3] Marannino P, Vaiati R, Zanellini et al. OPF tools for optimal pricing and congestion management in a Two Sided Auction Market Structure [C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference: 1-7.
 [4] 鲁丽娟,侯云鹤,吴耀武,等. 计及用户需求弹性影响的输电阻塞解决方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28

[5] 许林,余贻鑫,刘怀东,等. 双侧输电阻塞管理与 Aumann-Shapley 拟定价[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 56-60.
 [6] 凌永伟,辛洁晴,言茂松. 基于输电当量电价的直接阻塞管理[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 19-24.
 [7] Thomas W G. On transmission congestion and pricing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 241-248.
 [8] Fang R S, David A K. Transmission congestion management in an electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 877-883.
 [9] 任震,吴杰康,吴重民,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.
 [10] Uturbey W, Costa A S. Interruptible load management assessment via dynamic optimal power flow [C]. IEEE Bologna PowerTech Conference 2003(7): 23-26.

作者简介:

魏 林(1971),本科,主要从事电气工程设计研究;
 魏 东(1968),本科,主要从事电能计量及互感器检定研究;
 彭 格(1975),硕士,主要从事高电压绝缘研究。

(收稿日期: 2014-04-02)