

东北区域市场中长期交易安全校核改进方法

张粒子¹, 陈之栩¹, 舒 隽¹, 杜蕴华²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 东北电网有限公司, 辽宁省沈阳市 110006)

摘要: 以东北区域电力市场年度合同交易、月度合同交易为背景, 研究了这 2 种交易的安全校核和阻塞管理问题。针对当前方法的不足, 结合中长期交易的特点, 提出了采用线性优化模型对中长期交易进行安全校核。将断面输电电量作为优化变量, 结合竞价优化目标, 建立含安全约束的购电优化模型, 在确定中标电量的同时进行安全校核和阻塞管理。针对线性优化模型无解的情况, 提出二次优化的概念, 第 1 次优化得到可行解域的优化模型, 第 2 次优化采用第 1 次优化得到的优化解域获得最优解。从而保证了该方法可以在工程领域实际应用。

关键词: 东北电力市场; 中长期交易; 安全校核; 线性优化; 二次优化

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

东北区域市场于 2004 年 12 月中旬进入试运行, 交易品种主要是年度电量和月度电量, 安全校核和阻塞管理主要针对的是电量, 显然不能直接采用国外现有的安全校核方法^[1-3], 亟须研究相应的安全校核方法。

《东北区域电力市场初期运营规则》^[4] 第 3 章第 2 节第 37 条规定的安全校核和阻塞管理方法, 实质上是对流经输电断面的交易电量进行安全校核, 并应用排队法进行阻塞管理^[5]。具体方法是: 首先针对无约束竞价结果校核输电断面上流经的电量是否超出该断面输送电量的极限值, 如果发生输电阻塞, 根据阻塞断面将电网分区, 电量送出区域考虑电厂最小运行方式后按中标电厂的报价由高到低的顺序减少中标电量, 电量受入区域按未中标电量的报价由低到高增加中标电量, 直到满足安全约束和电量需求^[6]。

为了确保排队法的工程实用, 目前采用分级调整的办法。将安全区划分为 2 个级别^[6]: 辽西辽南、辽宁中、吉林南、吉林北和黑龙江为一级区; 黑龙江内部划分二级区, 即龙江西、龙江中和龙江东, 与吉林北的潮流配额分别是龙江西 10%, 龙江中 80%, 龙江东 10%。连接一级区和二级区的联络线簇不另设限值, 具体说明及分区见文献^[7]。首先校核一级区的关口电量是否发生阻塞, 如果发生阻塞则首先在一级区之间进行电量的调整, 不考虑二级区之间是否发生阻塞。当一级区之间的阻塞缓解之后, 再检查二级区是否发生阻塞。如果二级区内发生阻塞, 就只在二级区内调整。例如黑龙江省内发生阻

塞, 中标电量的调整只限于黑龙江省内, 不跨省。通过安全区级别的设置和分级调整的原则, 将东北电网拆分成 2 个成串连接的区域, 在这 2 个区域内排队法均得以工程应用^[7]。

上述方法是一种局部寻优算法, 有时无法达到全局最优; 另外, 在进行二级区校核时, 可能因为输电阻塞而引起局部区域出现供不应求问题, 算法可能不收敛。针对这些问题, 本文应用线性规划法提出另一种针对中长期电量交易的安全校核与阻塞管理方法, 该方法采用以校核对象为变量的优化模型, 针对供不应求时线性规划无法给出有效信息的情况, 提出了二次优化的概念; 第 1 次优化得到可行解, 第 2 次优化得到最优解。二次优化使得该方法适合工程应用。通过通用算例, 证明该方法的有效性。

1 安全校核优化模型的建立和求解

中长期合同交易安全校核和阻塞管理主要是校核输电断面的输电能力和安全地满足竞价空间的负荷需求。中长期合同不涉及确定的潮流方程, 但遵守一个原则, 即流入一个节点的能量之和等于流出该节点的能量之和。因此, 中长期合同竞价的安全校核可通过建立如下安全校核优化模型来解决:

$$\min [C^T, 0^T][W_G^T, W_L^T]^T \quad (1)$$

$$\text{s. t. } B_G W_G + B_L W_L = W_D \quad (2)$$

$$W_{G\min} \leq W_G \leq W_{G\max} \quad (3)$$

$$W_{L\min} \leq W_L \leq W_{L\max} \quad (4)$$

式中: $W_G = [W_{G1}, W_{G2}, \dots, W_{Gl}]^T$, 为中标电量的列向量, l 为竞价机组个数; $W_L = [W_{L1}, W_{L2}, \dots, W_{Ln}]^T$, 为流经输电断面的电量列向量; n 为需要校核的输电断面条数; C 为发电机申报电价列向量^[8];

B_G 为发电机与安全区的关联矩阵, B_G 中每一行对应一个安全区, 当竞价机组处于该安全区内时, 该行中对应的元素为 1, 反之为 0; B_L 为输电断面与安全区的关联矩阵, B_L 中每一行对应一个安全区, 当输电断面连接该安全区且参考方向指向它时, 该行中对应的元素为 1, 当输电断面连接该安全区且参考方向背离它时, 该行中对应的元素为 -1, 当输电断面与该安全区不相连时, 该行中对应的元素为 0; $W_D = [W_{D1}, W_{D2}, \dots, W_{Dm}]^T$, 为安全区竞价电量列向量; m 为安全区个数; W_{Gmax}, W_{Gmin} 分别为竞价机组申报的最大、最小电量列向量; W_{Lmax}, W_{Lmin} 分别为输电断面最大、最小允许输送电量列向量。

所建立的安全校核优化模型中, 以竞价机组中标电量 W_G 和输电断面流经电量 W_L 为优化变量。如果竞价机组多段报价, 可以采用虚拟机组的方式, 将一台机组的多段报价电量拆分成多台一段报价的机组, 这样处理并不影响线性优化的效果^[9]。式(1)为目标函数, 根据东北区域电力市场初期运营规则, 取购电费用最小化。 W_L 不影响购电费用, 因此, 在目标函数中其对应的价格列向量为 0。通过式(2)保证购得电量满足竞价空间需求。式(3)为竞价机组的最小方式约束和最大竞价能力约束。式(4)为输电断面输送电量约束。该优化模型在求得购电费用最优解的同时, 完成中标电量的确定、安全校核和阻塞管理。

该优化模型可以采用单纯形法、内点法等来求解, 非常方便^[10]。

2 可行解优化模型的建立

分析模型(1)~(4)可知, 该模型的约束条件之间可能存在矛盾, 此时, 线性规划法无法给出工程上可作为参考的解。例如某个安全区处于供不应求的状态, 即所有竞价机组的最大申报电量总和加上输电断面最大允许注入电量仍然小于该区的竞价空间, 此时线性规划无法给出有意义的解。然而, 实际应用中, 调度交易人员往往关心的是最大能满足多少竞价空间的负荷, 然后是在满足最大竞价空间的前提下, 竞价结果如何。

为达到此要求, 本文建立以下可行解优化模型:

$$\max [0^T, 1^T][W_G^T, W_L^T, W_d^T]^T \quad (5)$$

$$\text{s. t. } B_G W_G + B_L W_L - W_d = 0 \quad (6)$$

$$W_{Gmin} \leq W_G \leq W_{Gmax} \quad (7)$$

$$W_{Lmin} \leq W_L \leq W_{Lmax} \quad (8)$$

$$0 \leq W_d \leq W_D \quad (9)$$

式中: $W_d = [W_{d1}, W_{d2}, \dots, W_{dm}]^T$, 为最大能够满足的安全区竞价电量列向量; m 为安全区个数; 1 为全 1 的列向量, 维数与 W_d 相同。

式(5)~式(9)用来确定在当前的申报数据情况和输电断面输送能力的情况下, 市场所能满足的最大竞价负荷。该模型以安全区竞价空间最大化建立目标函数, 等式约束不变, 增加一个对安全区竞价空间的变量约束, 即式(9)。此约束是为了保证优化出的竞价空间不高于竞价前公布的空间。

该模型仍可用传统的线性规划模型求解。

3 二次优化过程

二次优化过程如下:

1) 首先调用可行解优化模型(式(5)~式(9)), 得到 W_d 。如果 $W_d = W_D$, 说明本次竞价能够满足竞价时公布的负荷; 如果不等, 比较 W_d, W_D 中对应的元素, 哪个元素不同, 说明哪个安全区无法满足该区公布的竞价空间。

2) 以 W_d 作为新的竞价空间, 即替代 W_D 。求解安全校核优化模型(式(1)~式(4)), 通过该模型得到最终的竞价结果, 即各电厂的中标电量, 从而满足购电费用最小的目标。

该方法可以确保在任何报价情况下最终总能得到一个工程实用的解, 并帮助调度人员了解当前的竞价数据是否能够满足竞价空间的需求。

4 通用算例分析

采用 IEEE 118 节点对本文提出的方法进行验证。将系统分为 5 个区: 安全区 2~安全区 4、安全区 4~安全区 5 为一级区; 安全区 1~安全区 2、安全区 2~安全区 3 为二级区, 见图 1。

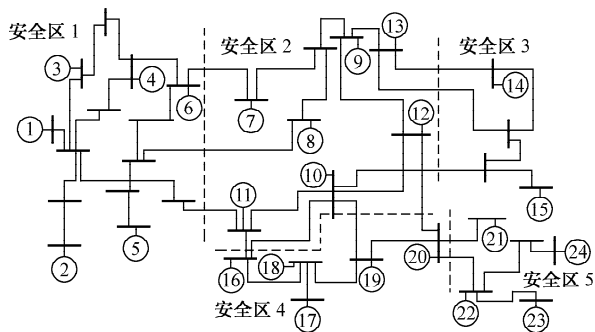


图 1 IEEE 118 系统分区简化示意图
Fig. 1 Simplified diagram of area partition of IEEE 118 system

各安全区竞价空间如下: 安全区 1 为 1 749 530 MW · h; 安全区 2 为 2 963 100 MW · h; 安全区 3 为 237 860 MW · h; 安全区 4 为 3 611 798 MW · h; 安全区 5 为 890 400 MW · h。

各安全区校核断面的校核值如下: 安全区 1~安全区 2 为 318 628 MW · h; 安全区 3~安全区 2

为 486 420 MW · h;安全区 2 ~ 安全区 4 为 387 148 MW · h;安全区 5 ~ 安全区 4 为 247 956 MW · h。

根据模拟竞价数据比较本算法与原算法。简化竞价机组,其申报数、无约束竞价结果见表 1。

表 1 竞价机组申报数据及无约束中标结果

Table 1 Bid data and bid results of without regard to congestion

安全区	电厂	折算价格/ (元 · (MW · h) ⁻¹)	申报电量/ (MW · h)	无约束中标/ (MW · h)
1	1	181.12	367 920	367 920
	2	182.46	245 280	245 280
	3	183.66	429 240	429 240
	4	184.56	625 464	625 464
	5	185.76	61 320	61 320
	6	186.34	502 824	502 824
2	7	187.64	981 120	981 120
	8	188.73	245 280	245 280
	9	191.34	613 200	613 200
	10	192.33	735 840	735 840
	11	193.35	122 640	122 640
	12	205.68	122 640	0
3	13	206.53	245 280	0
	14	194.34	490 560	490 560
4	15	204.77	735 840	0
	16	195.35	245 280	245 280
	17	196.67	735 840	735 840
	18	197.66	429 240	429 240
	19	198.87	735 840	735 840
	20	199.43	245 280	245 280
5	21	200.56	981 120	981 120
	22	201.59	919 800	659 400
	23	202.80	858 480	0
	24	203.24	245 280	0

首先进行无约束竞价,调度交易人员按报价从低到高确定中标电量。此时流经输电断面的电量超出了校核值,见表 2。分别采用原方法和本文提出的方法对交易结果进行了安全校核。

表 2 无约束竞价结果断面流经的电量

Table 2 Energy flowing through flowgates

断面	校核值/(MW · h)	无约束竞价/(MW · h)
安全区 1 ~ 安全区 2	318 628	482 518
安全区 3 ~ 安全区 2	486 420	252 700
安全区 2 ~ 安全区 4	387 148	470 198
安全区 5 ~ 安全区 4	247 956	750 120

观察无约束竞价结果,安全区 4 申报电量全部中标,提供 2 391 480 MW · h 的电量。连接安全区 4 的输电断面安全区 2 ~ 安全区 4、安全区 5 ~ 安全区 4 最多分别能为安全区 4 提供 387 148 MW · h、247 956 MW · h。在此报价数据下,安全区 4 最多

只能满足 3 026 584 MW · h,处于供不应求状态。首先求解可行解优化模型,得到在此次报价数据下能够满足的最大负荷需求,结果见表 3。

表 3 最大能够满足负荷

Table 3 Maximize load to be served

安全区	W _D /(MW · h)	W _d /(MW · h)
1	1 749 530	1 749 530
2	2 963 100	2 963 100
3	237 860	237 860
4	3 611 798	3 026 584
5	890 400	890 400

除区域 4 外,其他区域均能满足负荷需求。将求得的安全区 4 最大满足负荷量 3 026 584 MW · h 替代原先公布的竞价空间 3 611 798 MW · h,然后求解安全校核优化模型。此时就得到了在本次报价数据下的竞价结果。中标电量和购电费用见表 4。

表 4 新算法优化结果及与原方法比较

Table 4 Comparison of bid result between original and new method

安全区	电厂	原方法中 标电量/ (MW · h)	新方法中 标电量/ (MW · h)	原方法 购电费/元	新方法 购电费/元
1	1	367 920	367 920	66 637 670.40	66 637 670.40
	2	245 280	245 280	44 753 788.80	44 753 788.80
	3	429 240	429 240	78 834 218.40	78 834 218.40
	4	625 464	625 464	115 435 635.84	115 435 635.84
	5	61 320	61 320	11 390 803.20	11 390 803.20
	6	338 934	338 934	63 156 961.56	63 156 961.56
2	7	981 120	981 120	184 097 356.80	184 097 356.80
	8	245 280	245 280	46 291 694.40	46 291 694.40
	9	613 200	613 200	117 329 688.00	117 329 688.00
	10	735 840	735 840	141 524 107.20	141 524 107.20
	11	39 590	122 640	7 654 726.50	23 712 444.00
	12	0	0	0.00	0.00
3	13	0	0	0.00	0.00
	14	490 560	490 560	95 335 430.40	95 335 430.40
	15	163 890	80 840	33 559 755.30	16 553 606.80
	16	245 280	245 280	47 915 448.00	47 915 448.00
	17	735 840	735 840	144 717 652.80	144 717 652.80
	18	429 240	429 240	84 843 578.40	84 843 578.40
4	19	735 840	735 840	146 336 500.80	146 336 500.80
	20	245 280	245 280	48 916 190.40	48 916 190.40
	21	981 120	981 120	196 773 427.20	196 773 427.20
	22	157 236	157 236	31 697 205.24	31 697 205.24
	23	0	0	0.00	0.00
	24	0	0	0.00	0.00
合计				1 707 201 839.64	1 706 253 408.64

表 5 中的断面流经电量表明,2 种方法均可以对竞价结果进行阻塞管理。但表 4 的购电费用合计表明新方法的最终购电费用低于原方法的购电费用,因此更为有效。

表 5 调整后流经校核断面的电量
Table 5 Energy flowing through flowgate after adjust

断面	流经断面的电量/(MW·h)		
	校核值	原方法	新方法
安全区 1~安全区 2	318 628	318 628	318 628
安全区 3~安全区 2	486 420	416 590	333 540
安全区 2~安全区 4	387 148	387 148	387 148
安全区 5~安全区 4	247 956	247 956	247 956

无约束竞价后,安全区 1~安全区 2、安全区 2~安全区 4、安全区 5~安全区 4 的输电断面的输送电量均超出了校核值。原方法采用的是分级调整的原则,首先调整安全区 2~安全区 4、安全区 5~安全区 4 的输电断面,然后调整安全区 1~安全区 2 的输电断面。在调整安全区 1~安全区 2 的输电断面时,原方法仅在二级区内调整中标电量,无法进行更大范围的优化。而新方法取消了安全区级别的设置,首先确定各安全区能够满足的最大负荷,然后确定中标电量。确保一级区内竞价电厂参与缓解二级区内的阻塞。最大竞价空间的求解从根本上保证了在任何报价数据下调度人员都能获得竞价结果,了解各区域的供求情况。

5 结语

目前东北区域电力市场主要以年度合同交易、月度合同交易为主。这 2 类交易开展的情况对东北区域电力市场具有重要的影响。安全校核在年度、月度合同竞价中扮演着重要的角色,直接影响市场的公平性和资源的优化配置。

本文采用线性优化的模型对这 2 类交易的安全校核进行求解,同时提出二次优化的概念,确保该方法得以实际工程应用。以 IEEE 118 节点测试系统和简化报价数据为例,对所提出的方法进行了验证,证明了该方法的有效性和工程实用性。

参考文献

[1] 张永平,焦连伟,倪以信,等. 区域电力市场双边交易阻塞管理实用计算方法. 电力系统自动化,2003,27(14):18-22.
ZHANG Yongping, JIAO Lianwei, NI Yixin, et al. A practical approach for inter-regional bilateral contracts congestion management. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 18-22.

[2] 汤振飞,于尔铿,唐国庆. 电力市场输电阻塞管理. 电力系统自动化,2001,25(23):13-16.
TANG Zhenfei, YU Erkeng, TANG Guoqing. Transmission congestion management in power market. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 13-16.

[3] 于尔铿,周京阳,张学松. 电力市场竞价模型与原理. 电力系统自动化,2001,25(1):24-27.

YU Erkeng, ZHOU Jingyang, ZHANG Xuesong. Bidding model and bidding principle for power markers. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 24-27.

[4] 国家电力监管委员会供电监管部. 东北区域电力市场试点工作理论与实践探索——两部制电价模式. 北京:国家电力监管委员会,2004.
The State Electricity Regulatory Commission Distribution Regulatory Department. Northeast electricity market experimental work explore for theory and practice: two-part price model. Beijing: the State Electricity Regulatory Commission, 2004.

[5] 于尔铿,周京阳,吴玉生. 发电竞价算法:(一)排队法. 电力系统自动化,2001,25(4):16-19.
YU Erkeng, ZHOU Jingyang, WU Yusheng. Generation bidding algorithm tutorials: Part one the merit-order method. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 16-19.

[6] 李承东,林伟,杜蕴华,等. 东北区域电力市场长期合同交易中的安全校核//第二十九届中国电网调度运行会论文集,2005 年 10 月 26-27 日,上海. 北京:中国电力出版社,2005.
LI Chengdong, LIN Wei, DU Yunhua, et al. The congestion management of long time trade of northeast electrical market// Paper Collection of 29th China Grid Dispatching Conference, Oct 26-27, 2005, Shanghai, China. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[7] 王功涛,丁鹏,刘霞,等. 东北区域电力市场月电量计划的分区安全校核. 电网技术,2004,28(10):18-21.
WANG Gongtao, DING Peng, LIU Xia, et al. Sectional security constrained dispatching in northeast regional power market. Power System Technology, 2004, 28(10): 18-21.

[8] 于尔铿,周京阳,吴玉生. 发电报价曲线研究. 电力系统自动化,2001,25(2):23-26.
YU Erkeng, ZHOU Jingyang, WU Yusheng. A study on generator bidding curves. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 23-26.

[9] 汪峰,白晓民. 面向电力市场交易计划算法研究. 电网技术,2001,25(8):45-49.
WANG Feng, BAI Xiaoming. Research of electricity market oriented transaction algorithm. Power System Technology, 2001, 25(8): 45-49.

[10] 王功涛,于尔铿,周京阳,等. 发电竞价算法:(五)线性规划法. 电力系统自动化,2001,25(8):20-23.
WANG Gongtao, YU Erkeng, ZHOU Jingyang, et al. Generation bidding algorithm tutorials: Part five the linear programming method. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 20-23.

张粒子(1963—),女,博士,教授,博士生导师,从事电力市场、人工智能及专家系统和电力系统分析与控制等领域的研究。

陈之栩(1978—),男,博士研究生,从事电力市场、电力系统优化等研究. E-mail: chen_zhixu@126.com

舒 隽(1974—),男,博士,副教授,从事电力市场、人工智能在电力系统中的应用等领域的研究。

An Improved Security Correction Method for Medium and Long-term Transaction of Northeast Electricity Market

ZHANG Lizi¹, CHEN Zhixu¹, SHU Jun¹, DU Yunhua²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(2. Northeast Power Grid Company, Shenyang 110006, China)

Abstract: Taking the annual and monthly contract transactions of Northeast Electricity Market as background, the security correction problems for these two transactions are studied. Considering the shortage of the current methods and the medium and long-term transaction characteristics, linear programming is proposed to handle the security correction problems. the Optimization model is set up with the security constrains for different optimized bidding objectives by taking the flowgate transmitted energy as the optimized variable. The bidding results are obtained and the security correction and the congestion management are implemented at the same time. For the situation that the linear optimization problem has no solutions, a two sub-optimization conception is proposed, that is, during the first sub-optimization process, the optimization model is set up to get the feasible solution domain, then in the second sub-optimization process, the optimal solution is obtained from the feasible solution domain that is got by the first sub-optimization. Thus the proposed method is guaranteed to be feasible for actual engineering application.

Key words: Northeast electricity market; medium and long-term transaction; security correction; linear programming; two sub-optimizations