

安全约束对区域电力市场的影响

刘敦楠¹, 武亚光², 姜晓亮², 何光宇¹, 张化清², 邵 滨², 陈雪青¹, 周双喜¹

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 东北电网有限公司, 辽宁省沈阳市 110006)

摘要: 网架结构薄弱与安全约束问题是影响区域市场交易的重要因素。安全约束的存在使电力市场产生了有约束成交与无约束成交的差别, 直接影响了市场成交结果; 安全约束还改变了电力市场不同地区实际的 market 结构和供需平衡, 改变了市场参与者的竞标地位和市场力, 从而间接影响了市场参与者的竞标策略。文中根据区域电力市场的规则特点和模拟运行实践, 研究了评价安全约束对市场影响程度的指标, 并提出了“等效区外供应者”的概念, 深入分析了安全约束对各地区市场结构和参与者报价策略的影响。

关键词: 安全约束; 区域电力市场; 指标

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

自 2004 年起, 以东北和华东为代表的区域电力市场投入模拟运行。区域电力市场跨越多个省市, 电网结构复杂, 电网安全约束对市场交易的影响更加明显。电力市场的成交结果需要根据安全约束进行校核, 从而产生了有约束成交结果与无约束成交结果的差别。安全约束是电力市场区别于其他商品市场的特有约束, 对电力市场的竞价交易具有重要影响^[1]。由于存在安全约束, 在统一平台上竞价的大市场实际上被划分成多个小市场, 竞价电厂可以利用网架结构特点和自身地理位置优势制定相应的竞标策略, 牟取暴利。安全约束还会带来购电费用的增加和市场效率与效益的降低。因此, 研究电网安全约束对市场的影响, 有助于市场运行部门分析市场的供需与结构特征, 发、购电方制定合理的报价策略, 市场监管机构评价发电方的竞标行为, 以及电力规划部门进行电网、电源规划的决策和评价。

本文根据区域电力市场的规则特点和模拟运行实践, 深入探讨了电网安全约束对电力市场的直接影响和间接影响方式, 并给出了评价影响程度的指标和分析方法。

1 安全约束的主要类型

安全约束主要分为线路传输能力、电网运行方式和电厂运行方式 3 种。从产生约束的根本原因上讲, 3 种安全约束分别是为了满足跨区电网联络线、地区电网和发电厂的安全运行而设定的。日前、实

时市场以发电功率为约束对象, 合约市场以电量为约束对象。

1.1 日前市场与实时市场中的安全约束

日前和实时电力市场中的功率约束是根据机组、电网的基本参数直接计算设定的^[2~4], 包括:

- 1) 阻塞约束: 联络线输电能力对交换功率的限制。
- 2) 机组约束: 主要包括机组最小出力、机组最大出力、机组爬坡能力、机组最小持续开机时间、持续停机时间、机组当前状态、机组热启动与冷启动过程持续时间等。

3) 网络约束: 主要包括安全稳定约束、节点电压范围约束、系统负荷平衡约束、足额备用约束、足额的调峰与调频容量约束等。

1.2 年度、月度合约市场中的安全约束

年度、月度合约市场的电量约束^[2~4]包括:

- 1) 断面输电约束: 根据联络线传输能力对各区域间交换电量的限制。
- 2) 电网最小方式约束: 为保证电网安全, 对各电厂发电量的最低要求。
- 3) 电厂最小方式约束: 由各电厂自己申报的、满足电厂安全运行的最小电量。

年度、月度市场中的电量约束是根据合约执行期内各日各时段功率累计计算得到的, 反映了功率约束在较长时期内的综合影响。下文正是以本节所介绍的 3 种电量约束为主要研究对象。

2 安全约束影响市场的方式

如图 1 所示, 按影响方式划分, 安全约束对市场交易结果具有直接影响和间接影响 2 种。

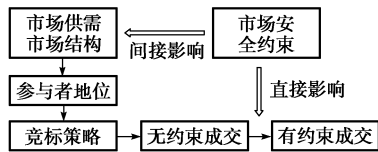


图 1 安全约束的直接影响和间接影响
Fig. 1 Direct and indirect impact of security constraints on the market

2.1 直接影响

安全约束的直接影响体现为安全校核对交易结果的改变。根据市场规则,市场交易结果分为无约束和有约束 2 种。其中,无约束交易结果是将按网损系数折算后的报价进行统一排序,再根据申报的发电量和购电量进行出清;有约束出清则是对无约束交易结果进行安全校核而得到的,市场最终按照有约束出清结果进行结算。

2.2 间接影响

安全约束的间接影响是指:由于安全约束的存在,改变了电力市场的实际结构和各地区的供需平衡,改变了市场参与者的竞标地位和影响力,从而影响了参与者的竞标策略。竞标策略的改变,会同时改变市场无约束和有约束的竞标结果。

下文将具体介绍直接影响和间接影响的评估方法。由于本文着眼于发掘安全约束对市场影响的长期规律,且本文分析的基础,即东北和华东区域电力市场,目前只进行了年度、月度合约市场的模拟运行,因此,下文所涉及的交易均是电量的交易。

3 安全约束对市场的直接影响及评估

评价各类安全约束对市场的直接影响,意义在于可将各类安全约束的机会成本与对其进行相应改造的投资成本进行比较,从而确定电网、电源改造项目的可行性,为决策部门提供参考。

3.1 安全约束校核的基本原则

安全约束校核按表 1 所示原则进行^[2]。

表 1 安全约束校核的基本原则
Table 1 Basic rule of security constraints

约束类型	影响方式	结算方式
断面输电约束	电量送出区域按报价由高到低减少交易电量,受电区域按未中标电量的报价由低到高增加交易电量,直到满足约束	调整部分电量按平均成交价结算
电网最小方式约束	电厂无约束成交电量小于电网最小运行方式,按市场中标电量的报价由高到低减少相应的电量安排给该电厂	调整部分电量按市场出清价结算
电厂最小方式约束	电厂无约束成交电量小于电厂最小运行方式,按市场中标电量的报价由高到低减少相应的电量安排给该电厂	调整部分电量按最低报价结算

3 种安全约束都会改变不同地区电厂的成交电量和电价,从而改变市场总的购电费用。

3.2 直接影响的指标与决策

评价安全约束对交易结果的直接影响,可根据具体约束类型,分别计算该约束引起的校核前后购电费用的差别。例如,可计算以下 3 个指标:①断面约束成本(CTC——cost of transfer constraints,记为 C_{CTC} 表示);②电网约束成本(CGC——cost of grid constraints,记为 C_{CGC});③电厂约束成本(CPC——cost of plant constraints,记为 C_{CPC} 表示)。

C_{CTC} , C_{CGC} 和 C_{CPC} 分别表示线路断面输电约束、电网约束和电厂约束引起的购电费用的变化量,可用考虑某一种约束前后的购电费用之差来衡量:根据有约束交易的结算模型,排除某一约束条件重新计算,可以得到不考虑该约束的购电成本,再将这一购电成本与有约束购电成本相比较即可。

安全约束的直接影响是带来购电费用的变化,绝大多数情况下,安全约束将导致购电费用的增加,计算这一增加值,有利于电网和电源规划部门评价改进电网的经济效益。下面以断面输电能力约束为例进行介绍。

断面输电能力是指 2 个地区电网之间所有联络线的输电能力的总和。分别统计一段时期(如 1 年)内每 2 个地区电网之间断面输电能力约束带来的购电费用增加 C_{CTC} ,可以评价在该断面增建电力线路的投资是否可行。根据项目评价净现值(NPV——net present value,记为 V_{NPV})模型:

$$V_{NPV} = -C_{invest} + \sum_{i=1}^n (1+I)^{-i} (C_{CTC,i} - M_i) \quad (1)$$

式中: I 表示期望的投资回报率; C_{invest} 表示初始投资成本; $C_{CTC,i}$ 表示每年消除断面约束节省的购电成本; M_i 表示因增加输电线路带来的维护费等相关费用。

$V_{NPV} > 0$,表示该项目的内在回报率大于预期回报率 I ,扩建项目可以接受;否则,不予接受。

以上内容是以断面约束为例,介绍了断面输电约束成本对于电网改造投资决策的重要意义。 C_{CGC} 和 C_{CPC} 同样是电网改造、电厂建设、机组设备更新决策中必须考虑的因素。 C_{CTC} , C_{CGC} 和 C_{CPC} 可以按照不同的时间段、不同的安全区、不同的电厂进行统计,根据实际决策需要而定。

4 安全约束对市场的间接影响及评估

分析安全约束对市场的间接影响,主要是分析安全约束如何改变了区域电力市场的市场结构及各

地区的供需平衡,以及对各地区市场参与者的竞标地位和竞标策略产生的影响。

4.1 对市场结构的影响

区域电力市场一般包括多个省市,参与竞价的电厂是省级市场的数倍,因此表面上看来市场结构相对于各省级电厂有大幅度改善;但实际上,由于断面输电约束的存在,不同地区间的电能不能有效、畅通无阻地交换,实质上将统一竞价的大市场划分为若干个小市场。在这种情况下,简单地根据电厂个数和市场份额来评价市场结构,是不准确的,应当充分考虑断面输电约束的影响。

以目前国内外广泛使用的评价市场结构^[5]的HHI(Herfindahl-Hirshman index,记为 I_{HHI})指标为例: $I_{HHI} = \sum_{i=1}^N (100s_i)^2$ 其中 s_i 表示各供应者的市场份额, $I_{HHI} < 1\ 800$ 说明竞争性良好。

东北区域电力市场有28家竞价电厂,按照上述公式计算得到 $I_{HHI} \approx 650$,大大低于1 800,说明市场竞争十分充分。但实际上,辽宁、黑龙江两省电力供需形势迥异,且中间隔着吉林省,输电能力约束使得两省供需不能畅通无阻地实现平衡。因此,仅以 $I_{HHI} = 650$ 而断定市场结构满足竞争需要是不够充分的。

为解决区域市场结构评价问题,首先介绍区域电力市场中的以下概念:

1) 安全区。区域电力市场都根据断面输电能力划分了安全区,安全区的划分并不一定与行政省份的划分相同,如东北年度交易划分为辽宁、吉林、黑龙江中西和黑龙江东4个区域^[2],而华东市场的月度竞价安全区划分与四省一市的行政划分相同^[3]。

2) 等效区外供应者。区域电力市场中客观存在安全区的划分,在这种情况下,为了更好地评价区域市场的竞争性,本文提出“等效区外供应者”的概念。对某一安全区来说,区内电厂个数小于全网电厂个数,而断面输电约束决定了只允许有限的区外来电满足区内用电需要。根据该安全区最大输入电量,可将区外来电等效为1个或若干个区外供应者,在计算安全区的 I_{HHI} 时,供应者应包括本地供应者和等效区外供应者。

等效区外供应者的个数和成交量的计算方法如下:

每个等效区外供应者的电量,可以取所有区外电厂的平均成交电量 Q_{ave} ;等效区外供应者的个数为最大输入电量 Q_{max} 除以 Q_{ave} 后取整。如 $Q_{ave} = 40$, $Q_{max} = 100$,则等效区外供应者为3个,容量分别40,

40和20。这种估算虽不是十分精确,但用于评价市场结构不会有很大偏差。

将安全区内的实际电厂和等效区外供应者都视为安全区内的供应者,代入HHI公式,可以计算出该安全区的 I_{HHI} ,这一指标可以反映该地区实际的市场结构。例如,按照上述方法计算出东北年度市场安全区的 I_{HHI} 为:辽宁约1 450,黑龙江东部约1 850,这些数值更能反映该地区的市场竞争性。

各安全区HHI与整个区域市场HHI的差别可以反映传输约束的影响:当断面最大输入能力 $Q_{max} = 0$,该安全区是一个完全独立的小市场; Q_{max} 足够大时,等效区外供应者将包括区域市场内所有的其他电厂,此时,该安全区的HHI与整个区域市场HHI将趋于一致,区域市场才真正形成了统一的大市场。

类似地,在评价购发双边市场时,可以建立等效区外购电者的概念,此处不做详细介绍。

4.2 对市场供需的影响

由于存在断面传输约束,安全区内的供需平衡状况一般与全市场总的供需平衡不同。安全区内的供需状况可用以下指标反映:区内申报供需上限=(区内电厂总申报+受入电量上限)/区内总需求。

实际上,由于断面传输能力的限制,常常会出现区域整体缺电而部分地区有电送不出的情况。计算各安全区内的申报供需比,往往比整个市场的供需比更能说明问题。

区域内存在以下的电量平衡公式:①区内用电量=区内供应量+受入电量;②区内发电量=供区内电量+送出电量。

由此,可以定义以下2个指标,用于直观地评价断面输电约束对市场供需的影响程度:①输入开放度=受入电量上限/区内用电量;②输出开放度=送出电量上限/区内发电量。

输入开放度,反映了当安全区外电厂报价普遍低于区内报价时,受入电量能满足本地用电需求的最大比例。本指标用于分析那些用电量大而本地发电不足的地区,如东北市场的辽宁及华东市场的浙江。输出开放度,反映本地发电量有多大比例能够外送,这一指标用于分析发电量外送的地区,如东北的黑龙江、华东的安徽等。

在电网传输能力有限时,以上2个指标可以反映各段约束对安全区内供需的影响程度;当输电能力足够时,输入开放度和输出开放度都大于1,区内与区外可以进行充分的电量交换,安全区的划分也就没有意义了,这时各个地区真正联为一体,真正形成一个统一竞价的大市场。

4.3 对供应者竞标地位的影响

安全约束改变了市场结构和各地区的供需平衡,因此也改变了不同地区供应者的竞标地位,从而影响其报价。

反映供应者竞标地位的有发电成本、供应者份额、剩余供应率^[6] (RSI—residual supply index, 记为 I_{RSI})、最小/最大市场份额比和必运行率 (MRR—must-run ratio, 记为 I_{MRR}) 等多个指标^[5]。其中与电量计算相关的指标,都受到安全约束的影响。

4.3.1 断面输电约束的影响

断面输电约束的存在将市场划分为多个安全区,因此应根据安全区的划分来重新计算。计算时具体体现为:①市场总需求应用安全区内需求代替;②市场供应者不再是全部供应者,应只包括本地供应者和等效区外供应者(见 4.1 节)。

重新计算这些指标,是为了体现安全约束引起的市场供需、市场结构的变化:

1) 市场结构变化对竞标地位的影响:由于市场结构变化,安全区内供应者个数相对较少,会使各供应者的市场份额增大,安全约束赋予区内电厂更大的左右价格的能力。

2) 市场供需变化对竞标地位的影响:从公式定义可以看出,RSI,MMR 等反映供应者地位的指标均受市场供需平衡的影响。以 RSI^[6] 为例,对第 i 个供应者:

$$I_{RSI,i} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N q_j}{D} = \frac{\sum_{j=1}^N q_j}{D} - \frac{q_i}{D} \quad (2)$$

式中: q_i 表示供应者的申报量; D 表示市场需求。

从式(2)可看出:某供应者的剩余供应率等于区内其他电厂的供应与需求之比。如 4.2 节所述,安全约束往往使得安全区内供需与整个市场的供需不尽相同,供应者地位也因此受到相应的影响。

4.3.2 电网和电厂最小方式约束的影响

电网最小方式与电厂最小方式影响市场的共同点是它们都为各电厂设定了成交量的下限;区别是对于无约束成交量基础上进行调整的那部分电量,2 种约束以不同价格结算。如在东北年度市场中:按电网方式约束调整的成交电量以市场结清价结算,按电厂最小方式调整的成交量以市场最低报价结算。

鉴于以上特点,可以提出电网约束必运行率 $I_{MRR,N}$ 和电厂约束必运行率 $I_{MRR,G}$ 这 2 个指标分别反映 2 种约束对供应者地位的影响:

$$I_{MRR,N} = \frac{Q_{N,\min}}{q_{\max}} \quad (3)$$

$$I_{MRR,G} = \frac{Q_{G,\min}}{q_{\max}} \quad (4)$$

式中: $Q_{N,\min}$, $Q_{G,\min}$ 分别为电网和电厂约束规定的最小成交量; $q_{\max}$ 为申报量上限。

MRR 是指市场需求缺口占供应者申报量上限的比例。 $I_{MRR,N}$ 和 $I_{MRR,G}$ 分别反映了电网约束和电厂约束的最小成交量占供应者申报空间的比。

东北电力市场模拟运行的实际数据表明:多数电厂按市场需求缺口计算的 I_{MRR} 都为 0, 市场需求并不依赖单个电厂来满足,因此多数电厂不具有市场力;但是,所有电厂都具有一定的 $I_{MRR,G}$; 其中有些电厂,由于地理位置与网架结构特点的原因, $I_{MRR,N}$ 指标值很大,接近 70%, 这些电厂在报价前就能确定有 70% 的申报量可以市场结清价成交,竞标地位优越,因此很可能制定相应的竞标策略左右市场边际价格。

上述分析表明,电源分布不均、网架结构不合理等原因引起的安全约束,客观上会提高某些电厂的市场力,对市场竞争有负面影响。

4.4 对购电方购电地位的影响

安全约束同样对市场购电方产生影响。区域电力市场有发电侧单边竞争和购电、发电双边竞争之分,东北市场属于前者,华东市场属于后者。双边竞争的市场中,购电、发电分别申报电量电价,共同决定市场成交结果^[2~4]。

断面输电约束和安全区的划分形成了安全区内的买卖双边博弈的情形,例如,华东市场安全区划分与四省一市的划分相一致,每个安全区内有 1 家省级电网公司作为购电方。

下面介绍反映安全约束对购电方地位的影响的交易前评价指标和交易后评价指标。

1) 交易前评价指标。以下 2 个指标可反映安全约束对购、发双方相对地位的影响:①区内必购电量=区内需求量-受入电量上限;②区内垄断电量=区内供应量-送出电量上限。

区内必购电量,反映了省电力公司为满足本省用电需求,必须向省内发电方采购的电量,这一指标越大,对省内发电方抬高价格越有利;区内垄断电量,反映了区内发电方申报量中无法外送的部分,这部分电量客观上只能有一个买家,即本省电力公司,因此该指标越大,对购电方压低价格越有利。

2) 交易后评价指标。在每次交易之后,根据交易结果还可统计以下指标,反映安全约束对购电成交的影响程度:有无约束成交量比=有约束成交量/无约束成交量。本指标的比值大于 1,说明安全约

束“调增”了成交量,安全约束对其成交有帮助。

5 结语

本文基于对东北、华东 2 个区域电力市场的市场规则的研究,结合东北区域电力市场模拟运行数据,分析了安全约束对市场交易直接和间接的影响方式,提出了评价影响程度的指标,希望能对区域电力市场的分析评价提供参考。

参考文献

- [1] COHEN A I, BRANDWAHJN V, SHOW-KAN Chang, Security Constrained Unit Commitment for Open Markets. In: Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Power Industry Computer Applications, Santa Clara (CA, USA): 1999, 39—44.
- [2] 国家电力监管委员会. 东北区域电力市场初期运营规则. 电监供电[2004]20 号. 2004.
State Electricity Regularity Commission of China. Rules for the Initial Stage Operating of North East China Electricity Market. SERC Power Supply (2004) No 20. 2004.
- [3] 国家电力监管委员会. 华东电力市场月度竞价实施细则. 电监市场[2004]16 号. 2004.

State Electricity Regularity Commission of China. Detail Rules for the Monthly Bidding of East China Electricity Market. SERC Market (2004)No 16. 2004.

- [4] 国家电力监管委员会. 华东电力市场运营规则. 电监市场[2004]13 号. 2004.
State Electricity Regularity Commission of China. Operating Rules for East China Electricity Market. SERC Market (2004) No 13. 2004.
- [5] 刘敦楠,李瑞庆,陈雪青,等. 电力市场监管指标及市场评价体系. 电力系统自动化,2004,28(9):16—21.
LIU Dun-nan, LI Rui-qing, CHEN Xue-qing et al. Surveillance Indices and Evaluating System of Electricity Market. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 16—21.
- [6] SHEFFRIN A. Predicting Market Power Using the Residual Supply Index. <http://www.caiso.com/docs/2002/12/05/200212050855521628.pdf>.

刘敦楠(1979—),男,博士研究生,研究方向为电力市场分析. E-mail: liudunnan@163.com

武亚光(1963—),男,博士,高级工程师,长期从事电力市场运营和电力系统调度工作。

姜晓亮(1962—),男,硕士,高级工程师,长期从事电力市场运营工作。

Impact of Security Constraints on Regional Electricity Market

LIU Dun-nan¹, WU Ya-guang², JIANG Xiao-liang², HE Guang-yu¹, ZHANG Hua-qing², SHAO Bin²,
CHEN Xue-qing¹, ZHOU Shuang-xi¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Northeast China Grid Co Ltd, Shenyang 110006, China)

Abstract: Weak network configuration and security constraints have great impact on the bid and bargain of regional electricity market. The direct impact of security constraints on the market is due to the difference between the final bargain outcomes with security constraints and the non-constraint outcomes. It also changes different areas' practical market structure and relation between supply and demand, as well as the market power and bidding status. So it indirectly impacts suppliers' bidding strategy in different areas. Based on the research on rules and practical operating of the territorial market in China, the estimation index is studied for direct and indirect impacts of security constraints on the market clearing and bid behaviors. The concept of equivalent external supplier is put forward and analytical method and indices are introduced to evaluate the degree of these influences.

Key words: security constraints; regional electricity market; index