

# 市场环境下的区域电网安全校核方法

熊志杰<sup>1</sup>, 张大伟<sup>1</sup>, 王彦洋<sup>1</sup>, 邓志森<sup>1</sup>, 杨 茜<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**省级电力现货市场的安全校核一般采用边界等值的模式,不能保证联络线各支路未来潮流的准确性,因此需要进行区域电网的安全校核和校正。为此,文中设计了一种考虑省级电力市场运营的区域电网校核方案:首先,各省基于联络线初始计划进行初次出清,并把出清结果上报区域调度;其次,进行区域整体安全校核,获得准确的设备越限结果,通过反向等量配对调整建立越限约束和机组的相关性,并生成各省现货市场对应的区域越限安全约束集;最后,下发区域越限安全约束集到相应省份,各省考虑区域关键安全约束集重新出清,协调至区域电网满足安全约束。所提出方法通过电网算例进行了验证。

**关键词:**区域电网; 省级电力市场; 安全校核; 安全校正

**中图分类号:** TM 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0039-04

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230107

## Security Checking Method of Regional Power Grid under Market Environment

XIONG Zhijie<sup>1</sup>, ZHANG Dawei<sup>1</sup>, WANG Yanfeng<sup>1</sup>, DENG Zhisen<sup>1</sup>, YANG Qian<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The security check of provincial power spot market generally adopts the boundary equivalent mode, which can not guarantee the accuracy of future power flow of each member of tie-line, so it is necessary to carry out the security check and correction of regional power grid. Therefore, a regional power grid check scheme considering provincial electricity market operation is designed. Firstly, based on the initial tie-line schedule, each province carries out the initial clearing and reports the clearing result to the regional dispatching. Secondly, the overall regional security check is carried out to obtain the accurate power overrun results, and the correlations between the violated security constraints and the units are established through equal and opposite quantities in pair. Finally, the violated regional security constraint sets are distributed to the corresponding provinces, and provincial electricity markets are cleared again. The proposed method is verified by a power grid example.

**Key words:** regional power grid; provincial electricity market; security check; security correction

## 0 引言

“三级调度、两级市场”模式下的区域电网安全校核需要省级市场、省级调度和分中心调度之间协同配合,校正策略兼顾到市场公平和电网运行的效率,对传统安全校核提出了新的挑战<sup>[1-2]</sup>。由于分中心调度联络线计划分解到物理线路的方式不一样,造成各省安全校核边界数据不一致,影响到计算的准确性和各省校核结果的一致性。省内安全校核一般采用边界等值的模式,存在计算准确性等问题。

市场化运行模式下,安全校正需要考虑市场运营的影响,不能随意更改机组出力。

目前国内外在电网的安全校核和校正方面已有了不少研究。文献[3]提出了基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正控制方法;文献[4]提出了基于深度强化学习算法的电网有功安全校正方法;文献[5-6]提出了适应电力现货市场运营的省级电网安全校核和校正方法。但是这些校核和校正方法主要考虑本地电网,较少考虑多级电网的协调校正,而国外的调度机构少有上下级<sup>[7-9]</sup>,经验也难以借鉴。目前各省已经陆续开展了电力现货市场建

设,在调度模式及优化目标等方面和区域电网存在较大差别。区域电网对越限设备的校正需要考虑到省级电网的市场公平性,目前尚缺乏考虑省级现货市场运营环境下的多级调度计划协调方法的研究。

为解决上述问题,下面结合各级调度计划和市场的功能定位,通过分析多级安全校核流程现状,提出了一种适应省级电力市场运营的区域安全校核方案。该方案通过关键安全约束生成和协调实现两级调度的协调配合,通过此边界条件编制满足区域校核约束的市场出清结果,并充分考虑了市场的公平性,同时有效提升互联电网的安全性,且能够适应当前的两级调度控制系统架构。

## 1 电网调度多级校核流程分析

目前的国内调度计划流程中,区域电网主要负责多区域的联络线计划,并进行整体安全校核,而省级调度依托安全约束机组组合/经济调度技术完成省内机组计划编制,具体流程是“自上而下”。当区域进行安全校核中发现支路或断面越限时,可以通过调整区域管辖机组或通知省调修改省内机组进行校正。

但在省级现货市场的大规模建设趋势下,机组的出力修改需要考虑到市场的公平性和出清电价的合理性。区域电网无法对机组出力直接进行调整,需要充分考虑省内市场运营稳定,而省内市场无法获得外网出清情况。对于直联联络线或单起点、单落点的交流联络线上尚可保证外网等值的准确性;但是电网中存在了不少由多条交流线路组成的联络线断面,当联络线落点不同时,在只获知联络线断面总值的情况下无法保证各条联络线及附近区域的潮流准确性。因此需要区域电网进行全网安全校核。

电力现货市场环境下,电网运行方式由市场决定。耦合紧密的电网联络线潮流的分配需要综合考虑各区域、各省电力电量平衡和清洁能源消纳要求。但电网潮流复杂多变,不确定性大。电网安全校核是调度部门摸清电网安全运行底线、评估电网运行薄弱环节、实施调度运行预控措施的基础。分中心调度和省调分别组织区域安全校核,省内考虑安全约束的现货市场出清,形成基于安全约束经济调度的区域电网和省内机组组合以及运行方式安排,实现对电网更全面的电网风险性管控。

通过考虑省级电力市场规则的区域电网安全校

正和省级电力市场出清协同运作方法的研究,提出区域和省级电网安全校核的协同机制。通过对区域和省级电网同时涉及的关键安全约束的快速定位,并考虑对电力市场运营的影响,建立安全校正目标与电力市场规则的一致匹配优化流程。当出现支路或断面越限时,在区域电网范围内实现更为高效的校正调节,为电网运行预留更多的安全裕度,保障市场利益最大化。

## 2 适应市场环境的区域安全校核流程

近年来省级电力市场的建设和多级协调调度的模式使得计划的编制和执行受到市场交易规则和电网安全运行的双重约束。电网的安全运行和经济运行之间的优化平衡越来越难把控。省级电力市场安全校核缺少精细化的联络线潮流结果;区域电网安全校核缺少各省交易信息。由此,提出区域电网一体化协同安全校核方法。

区域安全校核流程协调优化流程如图 1 所示。

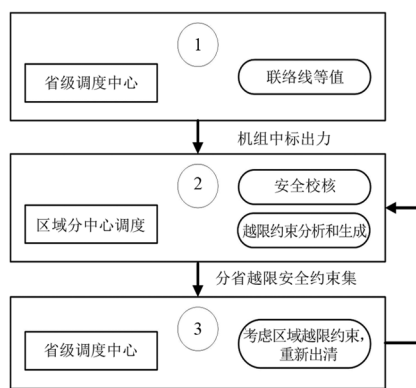


图 1 区域安全校核流程

方案具体流程如下:

1) 各省调对联络线各支路进行等值处理;等值后的联络线各支路功率,一般可以采用历史相似日的联络线各支路实际潮流情况,按比例分配进行现货市场出清,并将机组出力结果上传至区域分中心调度。

2) 区域分中心调度汇总省调上传的机组出力,并进行全网安全校核计算,获得准确的全网潮流。如果全网无越限,则校核结束;如果有越限,则通过反向等量配对调整方法进行越限分析,获得需要调整的机组出力结果。

3) 基于机组出力调整结果,生成分省调整的安全约束集,下发到相应省份;省级电力市场在市场出清模型中增加考虑区域分中心调度下发的安全约束

集,重新出清。返回流程 2 重新进行安全校核。

### 3 基于反向等量配对调整的越限约束分析

流程 2 中,在区域电网采用反向等量配对调整的越限约束分析。反向等量配对调整法是由清华大学邓佑满等提出的有功安全校正方法,详见文献[10]。反向等量配对调整法为每一台出力的机组找到一个与之配对的减出力的机组,反之亦然。每一配对机组加减出力的值相等,达到以最小的代价消除某个支路或断面越限,同时保持电网功率平衡的效果。

这里在反向等量配对调整基本方法的基础上,增加考虑的原则包括:

- 1) 当机组增加出力,优先在同省内寻找与之配对的减少出力的机组。
- 2) 当机组减少出力,优先在同省内寻找与之配对的增加出力的机组。
- 3) 配对的机组出力的变化值保持一致。
- 4) 当省内机组灵敏度绝对值都小于某阈值时,考虑采用省外机组进行配对,并相应修改联络线计划。
- 5) 优先修改未处于上限或下限出力状态的机组。因为当机组出力在中间状态时,可说明其报价状态与市场出清边际电价更为接近,其出力的修改对市场出清结果的影响较小。

具体模型如下:

优化目标为

$$\min \sum_{u \in U} \Delta P_u + \sum_{d \in D} \Delta P_d + \sum_{n \in N} |\Delta P_n| \quad (1)$$

约束条件为:

$$\sum_{u \in U} S_u \Delta P_u - \sum_{d \in D} S_d \Delta P_d = \Delta P_l \quad (2)$$

$$\sum_{u \in U} \Delta P_u - \sum_{d \in D} \Delta P_d + \sum_{n \in N} \Delta P_n = 0 \quad (3)$$

$$P_{l,\min} \leq P_l - \Delta P_l \leq P_{l,\max} \quad (4)$$

式中: $\Delta P_u$ 、 $\Delta P_d$ 、 $\Delta P_n$  分别为当支路或断面  $l$  发生越限时,与其有正、负、零灵敏度机组的功率调整量, $u$ 、 $d$ 、 $n$  分别代表正、负和零灵敏度机组; $U$ 、 $D$  和  $N$  分别为正、负和零灵敏度机组集合; $S_u$ 、 $S_d$  和  $S_n$  分别为正、负和零灵敏度机组的灵敏度; $P_l$  为线路  $l$  的初始潮流; $\Delta P_l$  为线路  $l$  的潮流调整量。

反向等量配对调整的步骤详见文献[11]。排序规则中,同省机组次序优先,再次出力未达限值的机组优先;然后,按照灵敏度大小进行排序,当灵敏

度值低于一定门槛而仍然无法消除越限时,则可调用外省机组并修改联络线计划。对于零灵敏度的机组也要尽可能选择同一省份的机组,当选择了不同省份的机组配对时也需要相应修改联络线计划。

### 4 关键安全约束生成

在流程 3,可以获得与越限支路或断面灵敏度不为零的调整机组,以及尽量与其在同一省份的零灵敏度机组。在不考虑网损的情况下,支路或断面的潮流由全区域所有机组、负荷与对该支路或断面的灵敏度的乘积和组成,可得安全约束变化为

$$\sum_{n=1}^m \sum_{k \in G_n} S_{nkl} P'_{nk} = P_l - \Delta P_l - \sum_L S_L P_L \quad (5)$$

式中: $m$  为省份总数; $S_{nkl}$  为第  $n$  个省的机组  $k$  对支路(或断面)  $l$  的灵敏度; $G_n$  为省  $n$  的机组集合; $P'_{nk}$  为省  $n$  的机组  $k$  的经过反向等量配对调整后的出力; $P_L$  和  $S_L$  为负荷  $L$  和相关的灵敏度。

由此,针对灵敏度不为零且进行了功率调整的机组,对该机组所在省份的关键安全约束为

$$\sum_{k \in G_n} S_{nkl} P_{nk} = \sum_{k \in G_n} S_{nkl} P'_{nk} \quad (6)$$

式中:右侧为经过反向等量配对调整后的计算结果;左侧的灵敏度  $S_{nkl}$  为区域电网计算的灵敏度结果; $P_{nk}$  为下发于省级电力市场进行再次出清得到的出清结果。将关键约束下发到相应的调整机组所在省份进行再次出清,按照式(4),可以消除对应的支路或断面越限。

### 5 算例分析

采用国内某区域电网及下辖某省级电力市场的典型日为实际算例进行计算,对建立的模型进行验证分析。

省级电力市场和外网有 6 条联络线,在丰水期有较多的水电需要外送,电网阻塞情况明显。以某实时断面为基础,区域电网在安全校核时发现某断面过载 198 MW,应对断面越限所做的机组调整结果如表 1 所示。在此算例中,省  $R_1$  的机组出力整体上调整量为 79 MW,因此联络线计划需要增加 79 MW。

区域电网下发关键约束如式(7)、式(8)所示。

对于省  $R_1$ :

$$0.546P_A + 0.347P_B - 0.484P_C + \dots =$$

$$\sum_{k \in G_{R_1}} S_{nkl} P'_{nk} = 193.5 \text{ MW} \quad (7)$$

表 1 断面(5 回线潮流之和)过载的校正措施

省调 机组	所属 省份	灵敏度	最大 可调 出力/ MW	机组 原出力/ MW	区域 校核 调整量/ MW	省调 重新 出清 调整量/ MW	措施
A	R <sub>1</sub>	0.546	87	243	87	63	增出力
B	R <sub>1</sub>	0.347	292	308	135	240	增出力
C	R <sub>1</sub>	-0.484	135	270	135	123	减出力
D	R <sub>1</sub>	0	67	533	8	0	减出力
E	R <sub>2</sub>	-0.484	79	179	79	43	减出力

对于省 R<sub>2</sub>:

$$0.484P_D + \dots = \sum_{k \in G_{R_2}} S_{nkl} P'_{nk} = 67.6 \text{ MW} \quad (8)$$

省级电力市场通过在市场出清模型中增加了该关键约束后重新出清。机组的最终出清调整量和区域电网基于灵敏度的校正调整量有所差别,这是因为考虑了市场出清的因素。由于在选择调整机组时考虑了其所在边际电价状态,因此对各省市场影响较小;同时在各省都增加了断面越限的相关约束,因此消除了断面越限。

在春秋季节的枯水期,电网负荷有所下降,但是电网的检修安排较多,因此也可能出现一定的电网阻塞。以某实时断面为例,联络线断面中有一条线路检修,导致了省级和区域电网潮流计算的不一致。应对断面越限所做的机组调整结果如表 2 所示,区域电网调整和各省重新出清所调整的机组和方向基本一致,同时调整的出力大小也相差不大,证明采用所提方法,区域校核可以有效引导各省市场来消除全网范围内的越限。

表 2 枯水期断面过载的校正措施

省调 机组	所属 省份	灵敏度	最大 可调 出力/ MW	机组 原出力/ MW	区域 校核 调整量/ MW	省调 重新 出清 调整量/ MW	措施
F	R <sub>1</sub>	0.512	176	424	176	138	增出力
G	R <sub>1</sub>	0.423	102	198	89	101	增出力
H	R <sub>1</sub>	-0.663	280	580	265	253	减出力

## 6 结 论

上面以保障省内电力现货市场稳定运营为基础,以解决区域内全网安全校核在市场环境下保障电网安全稳定运行所面临的问题为目的,建立省间、省内两级市场的校核高效协同机制。通过基于反向等量配对调整的越限约束分析,生成关键安全约束,

进行了区域安全校核和多级协调校正的闭环协调,实现了考虑省级电力市场规则的区域电网安全校正和省级电力市场出清协同计算,从而满足电力市场化改革的客观需求,保障电力市场运营环境下区域电网的安全。在后续的研究中可以进一步考虑检修计划或 N-1 等情况下的安全校正方法。

### 参考文献

- [1] 樊国旗,樊国伟,刘昌东,等.基于改进的电力现货交易下调度研究[J].四川电力技术,2020,43(4):15-19.
- [2] CAI Zhi, CUI Hui, HAN Bin, et al. Analysis and outlook of future Chinese electricity spot market model [C]. 2nd IEEE Asia Energy and Electrical Engineering Symposium, 2020:875-880.
- [3] 孙淑琴,颜文丽,吴晨悦,等.基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正控制方法[J].电力系统保护与控制, 2021, 49(7):75-85.
- [4] 孙立钧,顾雪平,刘彤,等.一种基于深度强化学习算法的电网有功安全校正方法[J].电力系统保护与控制, 2022, 50(10):114-122.
- [5] 路轶,蔡帜,张国芳,等.适应电力现货市场运营的省级电网安全校核实现方案[J].电力系统自动化, 2021, 45(16):216-223.
- [6] 邓韦斯,吴云亮,孙宇军,等.面向现货市场出清的发电计划校正决策方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(2):164-172.
- [7] PATTANAİK J K, BASU M, DASH D P. Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2: 2-11.
- [8] HELM D. The European framework for energy and climate policies[J]. Energy Policy, 2014, 64: 29-35.
- [9] European Network of Transmission System Operator for Electricity (ENTSO-E). Statistical Yearbook 2011 [R]. Berlin, Germany: Oswald and Martin Werbeagentur, 2012.
- [10] 邓佑满,黎辉,张伯明,等.电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J].电力系统自动化, 1999,23(18):5-8.

### 作者简介:

熊志杰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及网络安全运行管理;

张大伟(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化运行管理;

王彦洋(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及调控运行管理。(收稿日期:2022-06-01)