

Study on Reserve Market Organization Model in Regional Markets

Hui Yu¹, Jian Zhou¹, Zhiyong Li¹, Yumin Zhou¹, Honghui Kuang², Deliang Zhang²

¹CSG Dispatching Control Center, Guangzhou Guangdong

²Qingdakeyue Corporation, Beijing

Email: yuhui@csg.cn, zhoujian@csg.cn, lizhiyong@csg.cn

Received: Jul. 2nd, 2017; accepted: Jul. 18th, 2017; published: Jul. 21st, 2017

Abstract

The interconnection of power grid could reduce reserve costs and increase the operation efficiency by the reserve and support between different sub-area. Based on the orderly clearing pattern of power energy and power reserve, this paper proposed a power reserve market organization model in regional markets. This organization model has three steps, including reserve declaration in sub-area, listed transaction and reserve safety checking. Based on these steps, reserve schedule between different sub-area could be compiled, its validity is proved by a case study on a four-node system.

Keywords

Regional Markets, Power Reserve in Sub-Area, Reserve Support, Power Market

区域市场中备用市场组织模式研究

俞 蕙¹, 周 剑¹, 李智勇¹, 周毓敏¹, 匡洪辉², 张德亮²

¹中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州

²北京清大科越股份有限公司, 北京

Email: yuhui@csg.cn, zhoujian@csg.cn, lizhiyong@csg.cn

收稿日期: 2017年7月2日; 录用日期: 2017年7月18日; 发布日期: 2017年7月21日

摘 要

区域电力市场中, 各分区互为备用的运行模式能够有效降低区域电网备用成本, 提升运行效率。在电能市场与备用市场顺序出清的组织模式基础上, 本文构建了区域市场备用组织模式, 通过实施各分区备用市场申报、挂牌交易和区域备用安全校验, 实现对各分区备用交易计划安排, 最后基于四节点系统构造算例验证了本文所提出模型的有效性。

关键词

区域市场, 分区备用, 备用支援, 电能市场

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

区域电网互联互通, 是实现区域间资源优化配置的有效手段。当前我国电力市场发展迅速, 在逐步开放电能市场的基础上, 研究以备用为代表的辅助服务市场, 对进一步深化体制改革具有非常重要的作用。

以 PJM 为代表的国外电力市场在区域备用市场方面研究和应用较早, PJM 电力市场中主要通过现货市场中电能和备用联合优化出清确定机组的备用服务[1] [2]。文献[3] [4]深入分析我国的实际, 指出我国区域市场规模庞大, 备用安排中必须确保电网的安全运行, 从各分区的资源禀赋出发, 实现各分区的备用支援, 最大化社会效益。文献[5] [6]借鉴国外的辅助服务市场组织模式, 设计了我国的备用市场组织模式, 该模式的主要特点在于电能市场和备用市场顺序出清, 上述设计的初衷在于我国市场还处于起步阶段, 市场成员对市场规则的理解还需要不断深化, 顺序出清能够在一定程度降低决策难度。文献[7] [8]在其基础上进一步考虑网络约束实现了对备用安排的安全性校验。文献[9]引入网络流理论构建了区域市场的备用预留模式, 但是该模式下需要对整个区域市场建模, 掌握各分区的运行数据, 这一点往往在市场环境下实现。文献[10]提出了区域市场中备用获取和定价方法, 充分考虑了各分区的信息保密要求, 但是对各分区之间的信息传递机制没有给出充分的规定。

针对上述问题, 本文结合我国区域市场的特点, 提出了考虑分区备用支援的区域市场备用协调优化模式, 设计该模式下各分区信息交互的接口, 通过实施各分区备用市场出清和区域间备用支援安全性校验实现区域市场的备用安排, 最后通过四节点系统构造算例验证本文所提出方法的有效性。

2. 区域市场中分区备用的信息交互机制

本文所提出的区域市场中分区备用是在电能市场、备用市场顺序出清的模式基础上进行的, 其信息交互模式如图 1 所示。在区域市场中共涉及四个层级的市场主体, 分别是区域市场交易机构、区域市场调度机构、分区市场交易机构、各分区内发电厂。四类市场主体的信息交互共包括三个层面。

1) 分区内备用信息申报与出清

分区 i 内发电厂 j 在完成电能市场出清后, 根据自身机组运行情况, 申报所能提供的备用容量上限 $\overline{R}_{i,j}$ 和备用价格 $\gamma_{i,j}$ 。分区市场交易机构向其公布中标的备用容量 $R_{i,j}$ 和备用出清价格 γ_i^I 。

2) 分区间备用信息申报与出清

分区根据其内各电厂备用的申报容量和申报价格, 评估其备用供需充裕度和当其自身备用平衡时的备用出清价格。分区间采用挂牌交易模式, 当某分区根据其评估结果, 决定参与区域市场备用交易时, 则向区域市场交易机构申报欲购入的备用容量 R_i^O 和备用价格 γ_i^O 。区域市场交易机构向其他分区市场交易机构公开该信息, 按照“满足安全校验, 时间顺序优先”的原则各分区市场交易机构可摘牌, 摘牌后两个分区之间即按照申报的备用容量和备用价格形成预成交方案。

3) 区域市场备用市场安全校验

由区域市场交易机构将上述通过挂牌交易形成的各分区市场预成交方案和分区间电能计划方案提交至区域市场调度机构。调度机构在电能计划方案的基础上,根据各分区间传输容量进行安全校核。若上述备用方案满足区域市场调度机构安全校核要求,则将该信息反馈至区域市场交易机构;否则亦告知区域市场交易机构,由其匹配下一个摘牌分区。

3. 分区备用定价模式

3.1. 分区备用模式

依托上述分区备用信息交互机制,本文所提出的分区备用模式如图2所示。整个实施过程包括3个实施步骤,分别为1)分区内备用申报及评估;2)区域备用挂牌及摘牌;3)区域备用支援安全校验。

分区内备用申报及评估,其主要内容包括各电厂向该分区内交易机构申报其备用容量上限 $\overline{R}_{i,j}$ 和备用价格 $\gamma_{i,j}$ 两项信息。分区内交易机构根据上述两项信息,结合备用管理规定对分区内备用供需进行评估,决定是否需要开展区域市场备用交易。

区域备用挂牌及摘牌,分区内交易机构根据评估结果将欲购入的备用容量 R_i 和备用价格 γ_i^0 。提交至区域市场交易机构。区域市场交易机构在规定时间内向区域市场内各分区交易机构公布,分区内各交易机构对该购入需求摘牌。摘牌即表示摘牌一方分区市场交易机构愿意接受挂牌一方分区市场交易机构所规定的成交价格,在其规定的时段内,提供规定的备用容量。区域市场交易机构将按照“时间优先”的顺序对上述摘牌的分区市场交易机构排序,排序靠前且满足安全校核的分区市场交易机构摘牌成功。

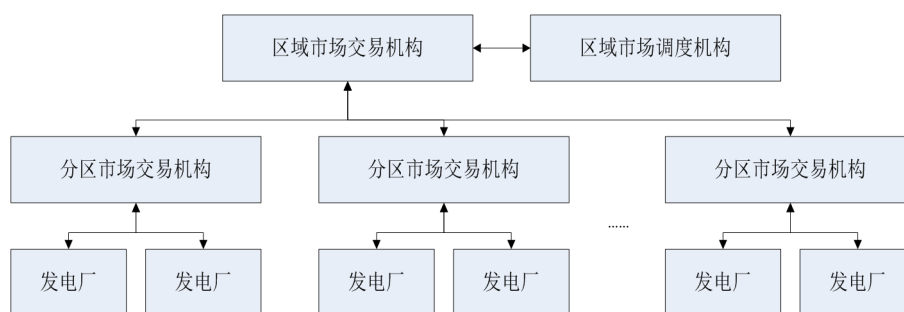


Figure 1. Information interaction

图1. 信息交互图

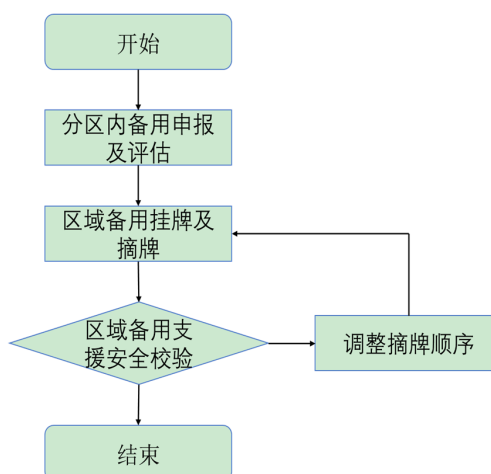


Figure 2. Pricing process of inter-regional reserve

图2. 分区备用定价流程

区域备用支援安全校验，区域市场交易机构将挂牌的分区市场交易机构挂牌容量和摘牌的分区市场交易机构，分区市场间的电能计划两方面信息提交区域市场调度机构。由调度机构根据上述信息进行安全校验，并将满足安全校验的分区告知区域市场交易机构。区域市场交易机构根据安全校验和摘牌顺序决定成交结果，提交各分区市场交易机构。

3.2. 分区内备用申报及评估

分区 i 内发电厂 j 向分区市场交易机构申报所能提供的备用容量上限 $\overline{R}_{i,j}$ 和备用价格 $\gamma_{i,j}$ 。按照《电力系统技术导则》相关要求，各省区的负荷备用应为最大发电负荷的 2%~5% [11]。设定分区 i 的负荷备用需求为 R_i 。定义分区的备用供需充裕度指标 η_i 为各电厂所申报的备用容量上限之和与其备用需求的比值，可表示为：

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i^p} \overline{R}_{i,j}}{R_i} \quad (1)$$

式(1)中， N_i^p 为分区 i 内电厂数量。当负荷备用充裕度 η_i 大于 1 时，表明仅依靠分区内电厂所提供的备用服务，即可以满足该分区的备用需求。所有电厂所提供的备用价格按照从小到大排序，使其之前的所有电厂提供的备用容量恰好满足备用需求的电厂即为分区内备用平衡时的边际备用电厂，其申报价格即为边际备用价格。当备用充裕度小于 1 或者分区市场交易机构认为边际备用价格较高时，即可以参与区域市场备用交易。

3.3. 区域备用挂牌及摘牌

有需要从其他分区购入备用负荷的分区市场交易机构在规定时段范围内向区域市场交易机构提交其欲购入的备用容量 R_i^o 和备用价格 γ_i^o 。在挂牌交易模式下，其他分区市场交易机构根据自身备用评估结果可进行摘牌。区域市场交易机构根据挂牌时间和摘牌时间对所有的交易项目进行排序，对同一挂牌交易项目当摘牌时间相同时则对挂牌的备用容量平均分配。

区域市场交易机构将各分区市场交易机构的挂牌备用容量、摘牌备用容量组合模式、各分区市场间电能计划三方面信息提交分区市场交易机构，由其进行区域备用市场安全校验。

3.4. 区域备用市场安全校验

设区域市场内共有 m 项挂牌的备用交易，第 i 项挂牌的备用交易对应 n_i 项摘牌组合方式。则当区域市场调度机构进行安全校核时，必须同时考虑上述所有挂牌、摘牌的组合情况。

为此，本文所提出的决策模型可表示为：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} \\ \text{s.t.} \quad & \underline{P}_T \leq P_T + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} H_{i,j} R_i \leq \overline{P}_T \\ & \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} \leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中， P_T 为由各分区电能计划所确定的联络线 T 基本潮流下所对应的关键断面潮流， \overline{P}_T 、 \underline{P}_T 为其上、下限，电能计划安全校核环节保证了 $\underline{P}_T \leq P_T \leq \overline{P}_T$ 。 H 为直流潮流模型下的转移分布因子， $H_{i,j}$ 为第 i 项挂牌中第 j 项摘牌情况下的转移分布因子， R_i 为第 i 项挂牌所需求的备用容量，为 0~1 状态变量， $\alpha_{i,j}$ 用

于明确第 i 项挂牌中第 j 项情况是否被选用。当 $\alpha_{i,j} = 1$ ，则表明该方案被选用；否则表明未被选用。

上述决策模型中，第一个约束项保证了各种场景下调用备用容量均不会导致联络线功率越限，第二个约束项保证每一种挂牌场景均最多有一种摘牌情况被选用。目标函数为摘牌的状态变量之和取最大值，则当该目标存在时，表明该情况下挂牌成交是最充分的。

实际上不同的挂牌、摘牌方式组合均能够满足网络安全约束的要求，因此上述问题本质上是多解的。当选用广度搜索算法时，实际上就能够满足上述时间优先的选择标准。因此上述优化问题存在可行解时，该解的物理意义在于在保证挂牌成交最广泛且满足网络约束的前提下时间优先原则下的成交方案。

3.5. 对比分析

与当前的区域市场备用市场组织模型相比，本文的优势主要体现在：

1) 信息交互模式与当前职能部门业务职责相契合，充分考虑了各职能部门的业务范畴，有利于所提出模式的推广应用。与文献[3] [5] [6] [7]相比，本文所提出的组织模式在信息交互机制设计上充分考虑了交易和调度等不同部门的业务职能，与当前业务部门的职责划分相契合，有利于模式的推广。

2) 交易方式简单，避免了采用集中撮合等较为复杂的交易方式可能造成的市场成员入门门槛高的问题。挂牌模式与集中撮合交易相比，挂牌交易的实施流程更加简单，大大降低了备用市场中各市场成员的入门门槛，有利于市场初期的发展[5] [8]。

3) 注意信息保密性，所需信息少，有利于市场成员充分参与。与文献[3] [9]相比，由于不需要对整个区域进行建模分析，所需的信息少，充分保护了各市场成员的隐私数据信息，利于市场成员的参与。

4. 算例分析

4.1. 基础数据

本文在图 3 所示的四节点模型基础上构造算例，验证本文所提出方法的有效性。考虑到区域市场内各分区内部联系较紧密，本文认为各分区可视为一个节点，分区间通过联络线连接。

根据其电能计划，各联络线潮流及线路传输容量限制如表 1 所示。特别说明，表格中当联络线传输潮流上、下限为负值时，表明该潮流与规定的正方向相反。

各分区的经过分区内备用信息申报，所得的其备用容量供需充裕度和备用边际出清价格如表 2 所示。

4.2. 算例分析

1) 单一挂牌情况

设定仅分区 D 挂牌 100 MW，分区 A、B、C 均摘牌。区域市场交易机构根据其摘牌顺序排序结果如表 3 所示。

经潮流校验，分区 C 若摘牌成功，则其备用调用时，联络线 C→D 潮流将增加 80 MW，由于其基础

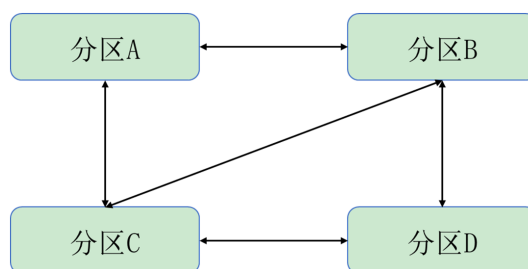


Figure 3. Four-buses system

图 3. 四节点系统

Table 1. Interconnection line parameter**表 1.** 联络线参数

名称	传输潮流上限/MW	传输潮流下限/MW	基本潮流/MW
A→B	500	0	400
A→C	500	-500	400
B→C	300	0	200
B→D	-300	500	450
C→D	200	-200	150

Table 2. Assessment result of each sub-area**表 2.** 分区内评估结果

名称	供需充裕度	边际出清价格
A	1.6	1
B	1.1	1.2
C	1.15	1.2
D	0.95	3

Table 3. Delisting sorting result**表 3.** 摘牌排序结果

挂牌方	摘牌方	备用容量
D	C	100
D	B	100
D	A	100

潮流已经达到 150 MW。则分区 C 备用调用不能满足网络运行约束要求，则分区 C 的摘牌不成功。而分区 B 摘牌后，其备用调用能够满足网络安全校验的要求，则该情况下分区 B 摘牌成功。

2) 多挂牌情况

设定分区 C、D 均存在备用交易需求。上述两分区挂牌后，A、B 两个分区摘牌，区域市场交易机构根据其挂牌、摘牌时间排序所得结果如表 4 所示。

若对于挂牌方 C，摘牌方 A 摘牌成功，则当其 100 MW 备用容量被调用时，联络线 A→C 的潮流将增加 85 MW。对于挂牌方 D，摘牌方 A 摘牌成功，则当其 100 MW 备用容量被调用时，联络线 A→C 的潮流将增加 45 MW。此时尽管对挂牌方 D，摘牌方 A 排序靠前，而若分区 C、D 的备用同时调用，则联络线 A→C 的线路潮流将达到 530 MW，超过该联络线的传输容量上限。因此在该情况下，按照广度搜索的原则，最终校核优化结果如表 5 所示。

上述结果表明，在区域市场中由于挂牌交易模式组合方式的复杂性，单一校核结果可能不能满足网络安全约束的要求。为此，必须综合考虑不同组合场景下的潮流变化情况，按照“时间优先”的根本原则，综合考虑网络约束和挂牌成交的充分性，才能得到最有利于区域资源配置的备用市场交易结果。

5. 结论

在电能与备用服务顺序出清市场框架体系下，本文深入研究了区域市场中备用市场的组织模式问题，在信息交互机制层面，提出了从分区内电厂、分区市场交易机构、区域市场交易机构、区域市场调度机

Table 4. Delisting sorting result
表 4. 摘牌排序结果

挂牌方	摘牌方	备用容量
C	A	100
C	B	100
D	A	100
D	B	100

Table 5. Check result
表 5. 校核结果

挂牌方	摘牌方	备用容量
C	A	100
D	B	100

构的四大主体三层交互体系；在定价模式层面，提出了以挂牌交易为主要方式的区域市场备用服务定价模式。算例表明：该方法能够在满足安全约束的前提下给出挂牌模式下最优的备用支援方式，大大提升电网运行效率。

参考文献 (References)

- [1] Tong, J.Z. (2004) Overview of PJM Energy Market Design Operation and Experience. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring and Power Technologies*, Hong Kong, 1-5 September 2004, 24 -27.
- [2] Lin, Y., Jordan, G., Whitaker, E., et al. (2005) Impact Assessment of Expanding PJM Market Area by Incorporating Incremental Loss Model. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, 12-16 June 2005, 1199-1204.
- [3] 葛炬, 张粒子, 周小兵, 等. 备用市场运营方法的探讨[J]. 中国电力, 2003, 36(6): 10-13.
- [4] 王建学, 王锡凡, 别朝红, 等. 电力市场中的备用问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 7-11, 14.
- [5] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力备用市场的竞价模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 7-11.
- [6] 丁军威, 沈瑜, 康重庆, 等. 备用辅助服务市场的组织与交易决策[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 29-32, 59.
- [7] 王建学, 王锡凡, 丁晓莺, 等. 区域电力市场中的分区备用模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 28-33.
- [8] José, M. Arroyo, F. and Galiana, D. (2005) Energy and Reserve Pricing in Security and Network-Constrained Electricity Markets. *IEEE Transaction on Power System*, **20**, 634-643.
- [9] 王建学, 王锡凡, 王秀丽, 等. 采用网络流理论的分区备用模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 51-55.
- [10] 赵学顺, 文福拴, 汪震, 等. 区域电力市场运行备用容量的确定和获取初探[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 7-12.
- [11] 水利水电部. SD131-84 电力系统技术导则[S]. 北京: 标准出版社, 1984.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org