

◆ 环球揽萃 ◆

DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2021.05.019

国外典型调频辅助服务市场综述与启示

杨超¹,孙谊嫒¹,王勇¹,吴春燕²,何凯²,汪洋²

(1. 国网新疆电力有限公司,乌鲁木齐 830017;2. 北京清能互联科技有限公司,北京 100084)

Review and enlightenment of foreign typical frequency regulation auxiliary service market

YANG Chao¹, SUN Yiqian¹, WANG Yong¹, WU Chunyan², HE Kai², WANG Yang²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830017, China; 2. Beijing TsIntergy Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

摘要:调频辅助服务对于维持系统频率稳定、保障系统安全可靠运行具有重要意义。目前,我国调频辅助服务产品类型简单,多采取固定价格结算,不利于调频资源的优化配置。深入研究了美国PJM、英国和北欧3大成熟电力市场的调频辅助服务市场的产品类型、运行方式、价格及结算机制,对比分析了上述3个典型调频辅助服务市场的特点。在此基础上,结合国内实际情况,提出了对国内调频辅助服务市场发展的建议,以期对国内调频辅助服务市场建设提供有益借鉴。

关键词:调频辅助服务;产品类型;运行方式;价格及结算机制

Abstract: Frequency regulation auxiliary service is of great significance for maintaining the stability of the system frequency and ensuring the safe and reliable operation of the system. At present, the types of frequency regulation auxiliary service products in China are simple and fixed price settlement is mostly adopted, which is not conducive to the optimal allocation of frequency regulation resources. The product type, operation mode, price and settlement mechanism of the frequency regulation auxiliary service market in the three mature power markets of PJM in USA, the UK and Nordic are deeply studied, and the characteristics of the above three typical frequency regulation auxiliary service markets are compared and analyzed. On this basis, combined with the domestic actual situation, suggestions for the development of the domestic frequency regulation auxiliary service market are put forward, hoping to provide a useful reference for the construction of the domestic frequency regulation auxiliary service market.

Key words: frequency regulation auxiliary service; product type; operation mode; price and settlement mechanism

0 引言

2015年3月,中共中央发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发〔2015〕9号)》(下称“9号文”),明确提出建立辅助服务分担共享新机制的要求,辅助服务市场建设、辅助服务补偿机制完善势在必行。建立电力辅助服务市场已经获得国家相关政策的支持,并已成为推进电力体制的迫切需求。

目前,我国调频辅助服务大多采用“两个细则”作为运行规则,主要存在调频辅助服务产品类型较为简单、调频辅助服务价格补偿机制不健全、调频辅助服务成本传导方法缺乏公平性等问题。

相关学者对国外成熟辅助服务市场进行了研究。文献[1]—文献[2]分别对美国的PJM、CAISO

等多个调频辅助服务市场的定价机制和调频补偿机制进行了梳理分析,并对中国调频市场的定价和补偿机制提出了可行建议。文献[3]—文献[4]对英国电力市场和辅助服务市场进行了介绍,并总结了对我国的启示。文献[5]—文献[6]研究了北欧电力市场和辅助服务市场。文献[7]—文献[8]对美国、英国、北欧、澳大利亚等多个国家和地区的辅助服务市场进行了比较研究,得到对我国辅助服务市场建设的启示。上述对国外辅助服务市场的研究大多是对包括调频、调压、备用等辅助服务品种在内的整个辅助服务市场进行的,缺乏针对国外不同调频辅助市场中服务类型、运行模式以及结算机制的细致梳理及横向对比分析。

本文将从产品类型、运行方式、价格及结算机制3个方面对美国PJM、英国和北欧调频辅助服务市场进行研究,并对各市场的特点进行对比分析。在此基础上结合国内电力市场发展实际情况,提出对国内调频辅助服务市场建设的建议。

收稿日期:2021-05-17;修回日期:2021-06-21

基金项目:国网新疆电力有限公司科技项目(5230HQZ0004R)

1 美国PJM调频辅助服务市场

1.1 调频辅助服务类型

PJM市场中可以提供调频服务的资源包括发电机组、储能、需求响应资源^[9]。PJM调频辅助服务可以分为传统调频和快速响应调频：

(1) 传统调频由爬坡受限资源提供,包括部分燃气机组、联合循环机组、煤电机组,主要基于传统的调频信号运行(RegA),可以在一段时期内持续增加或减少出力。

(2) 快速响应调频由能量受限资源提供,包括储能、水电、一部分燃气机组,主要基于动态调频信号运行(RegD),瞬时增加或减少出力来抵消区域控制误差偏移量。

1.2 市场运行方式

PJM将调频市场、同步备用市场分3个步骤与实时电能量市场联合优化,包括辅助服务优化程序(ancillary service optimizer, ASO)、滚动安全约束的经济调度程序(intermediate security constrained economic dispatch, IT SCED)、实时安全约束的经济调度程序(real-time security constrained economic dispatch, RT SCED)^[7]。

ASO在实际运行前1~2 h执行,通常是在运行前1 h,联合优化电能量市场、备用市场和调频市场,确定出同步和非同步备用以及调频的容量分配,同时对调频市场进行市场力检测^[10]。

滚动SCED同样在实际运行前1~2 h执行,通常为提前30 min,联合优化电能量市场和备用市场,同时对电能量市场进行市场力检测,并判断备用资源是否短缺。这一阶段当中,可以调用燃气轮机及需求侧响应资源^[11]。

实时SCED在实际运行前10~20 min执行,通常为提前15 min,联合优化在线机组电能和备用以满足系统的需求^[11]。实时SCED的计算结果包括机组的基值运行点,同步备用资源和非同步备用的调用容量。

上述3个步骤只定容量、不定价格,节点价格计算程序(locational pricing calculator, LPC)每5 min执行一次,用来确定实时节点边际电价和辅助服务的出清价格。

1.3 市场价格及结算机制

PJM调频辅助服务市场主体在日前的申报内容包括容量报价、性能报价(里程报价)和调频容量。考虑到调频资源类型和调频性能的差异,PJM会对市场主体的容量报价和性能报价按一定规则进行调整。通过调整后的容量报价、性能报价和机会成本可得到排序价格,按照排序价格由低到高进行出

清。出清的边际价格包括调频辅助服务出清价格和性能出清价格,调频辅助服务出清价格减去性能出清价格即为容量出清价格。

市场参与者按照每小时12个时段的容量出清价的算数平均值和性能出清价的算数平均值进行结算^[1],并在结算时考虑调频性能指标,调频性能指标越高,调频容量收益和调频里程收益也越高,有利于促进高性能调频资源参与市场^[2]。

2 英国调频辅助服务市场

2.1 调频辅助服务类型

英国电力市场中可以提供调频服务的资源包括发电机组和需求响应资源。为了保持系统的实时平衡,英国国家电网主要通过以下4个不同的平衡服务来控制频率:强制频率响应(mandatory frequency response, MFR)、固定频率响应(firm frequency response, FFR)、需求侧频率控制(frequency control by demand management, FCDM)和增强型频率响应(enhanced frequency response, EFR)。

(1) 强制频率响应

强制频率响应根据响应时间可分为一次响应(primary response, PR)、二次响应(secondary response, SR)和高频响应(high frequency response, HFR),具体如表1所示^[8]。

表1 强制频率响应

Table 1 Mandatory frequency response

类型	响应条件	响应时间/s	持续时间
一次响应	频率超过正常范围	10	20 s
二次响应	一次响应无法把频率恢复到正常范围	30	30 min
高频响应	频率高于50.2 Hz	10	整个事故过程

(2) 固定频率响应

固定频率响应通过自动发电控制(AGC)完成控制和记录^[4]。英国国家电网会比较固定频率响应和强制频率响应的价格,选择最经济的调频资源。与强制频率响应不同的是,固定频率响应不仅对平衡机制单元和非平衡机制单元的提供商开放,也对现有的强制频率响应提供者 and 新的提供者开放,从而增加潜在响应提供商的数量并提高流动性。

(3) 需求侧频率控制

需求侧频率控制用于处理大机组跳闸等很大的频率偏差事故,由可中断负荷提供,由英国国家电网按需求自行调度,是一个低频减载的预先约定。当系统频率超出低频率继电器设置时,电力需求会自动中断。需求侧频率控制要求提供商响应

时间小于2 s,且能够提供持续30 min最小3 MW的容量,最小容量要求可以通过在相同的站点聚合多个小负荷来实现。

(4) 增强型频率响应

增强型频率响应要求提供商具有在1 s内实现100%有功功率输出的响应能力,这与现有10 s时间尺度的一次响应和高频响应以及30 s时间尺度的二次响应形成对比。增强型服务发生在较慢的服务恢复之前,包含更快的服务和稳定频率,并随后恢复备用^[12]。

2.2 市场运行方式

对于不同类型的频率响应服务,交易方式也不同。强制频率响应采用双边协议的交易方式,所有并网运行发电机必须响应服务需求;固定频率响应采用招投标的交易方式,通过月度招标获取;需求侧频率控制采用双边协议的交易方式,由NGET提供相关需求侧响应的设备并调试,用户需向NGET每周汇报其可用性;增强型频率响应采用竞争合同的交易方式。

英国辅助服务交易在平衡市场中进行,与电能量市场分开独立运行,市场运作流程如图1所示。辅助服务协议通常在关闸前签订,从而可在平衡服务实施之前确定好辅助服务的数量和价格。

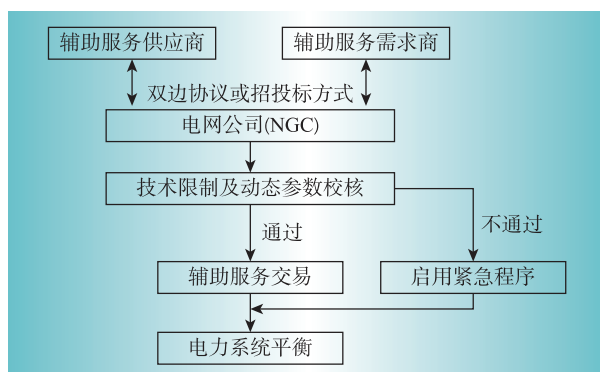


图1 英国辅助服务市场运行流程^[13]

Fig. 1 UK ancillary service market operation process

在平衡机制中,交易的平衡服务数量会受到经济和技术两个方面的限制,因此需要对Bid和Offer进行技术限制及动态参数校核,然后按照它们的价格高低进行选择。当系统中没有可用的Bid和Offer时,就需要启用紧急程序^[14]。

2.3 市场价格及结算机制

强制频率响应的价格包括容量价格和电量价格两部分。固定频率响应的价格包括招标固定费、招标使用费、窗口启动费和响应电量费等4部分。需求侧频率控制的价格依据协议规定、按运行费用确定^[14]。

调频辅助服务的结算机制与交易方式密切相关。强制频率响应和需求侧频率控制是供需双方

通过签订双边协议制定的,故其按照事先签订的协议价格结算。固定频率响应是通过市场竞争获得的,支付给服务提供者的费用根据市场的出清价格以及所提供服务的容量来计算。

3 北欧调频辅助服务市场

3.1 调频辅助服务类型

北欧平衡市场产品包括频率控制备用(frequency containment reserve, FCR)和频率恢复备用(frequency restoration reserve, FRR)。调频辅助服务资源包括水电、太阳能热、光伏等发电机组和负荷侧资源。

(1) 频率控制备用

FCR主要为自动产品,分为频率干扰控制备用(frequency containment reserve-disturbance, FCR-D)和频率普通控制备用(frequency containment reserve-normal, FCR-N)。FCR-D用于系统受到干扰,频率低于49.9 Hz的情况下稳定频率,要求在5 s内实现50%的有功功率输出,在30 s内实现100%的有功功率输出;FCR-N是一种特定的北欧电力市场辅助服务产品,用于在正常频段内(49.9~50.1 Hz)保持系统平衡,要求响应时间小于3 min^[7,15]。

(2) 频率恢复备用

FRR分为自动频率恢复备用(automatic FRR, AFRR)和手动频率恢复备用(manual FRR, MFRR),AFRR主要通过AGC实现,响应时间小于5 min;MFRR是北欧最主要的平衡资源,响应时间小于15 min^[16]。

3.2 市场运行方式

北欧平衡市场采用“辅助服务市场+物理调节电能市场(regulating power market, RPM)”的模式,辅助服务市场独立于电能量市场,由系统运营商(system operator, SO)单独组织。

为保证MFRR的充分有效供应,在辅助服务市场之外还需要RPM作为支撑。RPM在日前市场结束后到实时运行前进行组织,有额外调节能力的市场主体可以在RPM中进行上下调报价,这种方式可视为无容量补偿的MFRR。此外,签订了中长期MFRR合同的市场主体也可以参加RPM的能量报价^[16]。

在平衡资源的调用策略上,AFRR和MFRR分别按照平行调用法和排队法进行调用。当价区间发生阻塞时,需启用特殊调节机制,并由2个价区的SO一同决定是否分开原有的报价队列^[16]。

3.3 市场价格及结算机制

北欧调频辅助服务市场的结算方式如表2所示^[16]。RCR除瑞典按报价结算外,其余国家/地区均按边际价格结算。AFRR挪威按边际价格结算,丹

表2 国外调频辅助服务市场特点

Table 2 Characteristics of foreign frequency regulation auxiliary service market

	PJM	英国	北欧	
资源类型	发电机组、储能、需求响应资源	发电机组、需求响应资源	发电机组(包括水电、太阳能热、光伏发电)、负荷侧	
调频种类	传统调频(RegA)、快速响应调频(RegD)	强制调频、固定调频、需求侧调频、增强型调频	频率控制备用	频率恢复备用
交易类型	时前+实时	实时	日前+日内	中长期合同
是否与电力市场联合出清	是	否	否	否
报价时序	日前报价、小时前可变更	日前报价+日内更新	日前报价+日内更新	无
申报内容	容量报价+性能报价+调频容量	竞报价格	电量+价格	容量+价格
结算方式	边际价格结算	合同价格结算或边际价格结算	边际价格结算或按报价结算	

麦西部按规定价格结算,其余国家/地区均按报价结算。MFR瑞典和芬兰按报价结算,其余国家/地区均按边际价格结算。

4 国外调频辅助服务市场特点分析及经验借鉴

4.1 调频辅助服务资源对比启示

在国内现行的“两个细则”中提供调频辅助服务的一般只有满足一定条件的发电机组。而在国内为适应新能源大规模发展而配套投资建设储能系统的背景下,有必要在设计调频辅助服务市场时,充分考虑储能系统的技术经济特性,逐步引入储能和需求响应资源提供调频辅助服务,进一步丰富调频辅助服务资源类型,使市场竞争更充分,同时为储能等市场主体提供新的盈利途径。

4.2 调频辅助服务产品类型对比启示

在“三公调度”的模式下,当前我国调频辅助服务的产品类型设计较为简单,未充分反映出不同类型机组的调频特性,亦未引入新的高性能调频资源。为此在调频辅助服务市场建设中,应考虑对调频产品的性能成本特性进行精细化区分,并逐步发展出类似于PJM的调频产品类型,完善市场竞争。

4.3 调频辅助服务责任承担对比启示

现阶段,国内调频辅助服务一般由电力调度机构按需从发电机组调用,调频辅助服务责任由发电机组承担。辅助服务市场建设的准则是“谁使用,谁承担”,因此在建设调频辅助服务市场时,应结合电力市场建设情况,设立基于负荷侧代理商及售电商负荷比例分摊的责任承担机制,逐步实现调频辅助服务费用向用户侧的传导机制。

4.4 调频辅助服务交易机制对比启示

我国现阶段“两个细则”中所采取的交易模式一般为符合条件的发电资源必须提供调频辅助服务。

参照国外辅助服务市场的建设历程。在电力现货市场建设起步之后,应结合现货市场的建设方式,采取与电能量市场独立运行并逐步过渡到联合出清的模式进行集中竞价,并根据辅助服务的责任分配,引入售电公司与发电厂之间的双边交易机制。

4.5 调频辅助服务价格及结算机制对比启示

国内现阶段在“两个细则”的指导下多采取固定价格的方式对调频辅助服务产品进行结算,以及对发电机预留的调频容量进行补偿。固定的价格无法反映出调频辅助服务的真正价值。在针对调频辅助服务价格机制设计时,需充分考虑到预留调频容量的机会成本,可以有两种考虑:第一种是综合考虑预留容量的影响,在进行调频价格出清时,将不同类型资源参与调频辅助服务市场的机会成本纳入出清排序价格的计算之中,并将机会成本纳入出清价格之中,以此来补偿机组预留的调频容量成本;第二种是设计单独的调频容量价格和调频电量价格,两者分别报价,但综合结算,同时预出清时出清调频容量和调频电量的边际价格,并按照预出清容量价格和实时出清电量价格对调用到的资源的容量和电量结算,对于已出清但未调用到的资源,按照预出清容量价格进行结算。第一种方式比较容易实现,适合调频市场起步阶段;第二种方式精确但相对复杂,适用于调频市场建设相对成熟的中后期。

5 结束语

调频辅助服务为保障电力系统安全稳定运行发挥了重要作用,我国现行调频辅助服务机制已经不能满足电力体制改革的要求。为此,本文对美国PJM、英国和北欧3个典型电力市场的调频辅助服务市场进行了研究,并对各市场的特点进行了对比分

析,以期得到对国内调频辅助服务市场建设的启示。然后,结合国内调频辅助服务发展的实际情况,分别从调频资源、产品类型、责任承担机制、交易机制、价格及结算机制5个方面,对国内调频辅助服务市场建设提出了建议。D

参考文献:

- [1] 陈中飞,荆朝霞,陈达鹏,等.美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J].电力系统自动化,2018,42(12):1-10.
CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12):1-10.
- [2] 陈达鹏,荆朝霞.美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J].电力系统自动化,2017,41(18):1-9.
CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18):1-9.
- [3] 何永秀,徐玲玲,张福伟.日益成熟的英国辅助服务市场(ASM)[J].国际电力,2002,6(2):24-26.
HE Yongxiu, XU Lingling, ZHANG Fuwei. The ancillary service market of electric industry in UK[J]. International Electric Power for China, 2002, 6(2):24-26.
- [4] 杨萌.英国电力市场的平衡机制与辅助服务[N].中国能源报,2017-11-27(4).
- [5] 李博,朱元成.北欧电力市场辅助服务[J].中国电力,2008,43(4):88-92.
LI Bo, ZHU Yuancheng. Ancillary services of the Nordic electricity market[J]. Electric Power, 2008, 43(4):88-92.
- [6] 包铭磊,丁一,邵常政,等.北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J].中国电机工程学报,2017(17):4 881-4 892.
BAO Minglei, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Review of Nordic electricity market and its suggestions for China[J]. Proceeding of the CSEE, 2017(17):4 881-4 892.
- [7] 何永秀,陈倩,费云志,等.国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J].电网技术,2018,42(9):2 915-2 922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2018, 42(9):2 915-2 922.
- [8] 何永秀,马昕,王怡,等.电力辅助服务市场(ASM)国际比较研究[J].华东电力,2003,7:9-13.
HE Yongxiu, MA Xin, WANG Yi, et al. Comparative study of ancillary service market (ASM) of different countries[J]. East China Electric Power, 2003, 7:9-13.
- [9] 董振斌,王文,周珏,等.需求响应参与系统频率调节研究综述[J].电力需求侧管理,2017,19(4):18-22.
DONG Zhenbin, WANG Wen, ZHOU Jue, et al. Review on demand response participating in power system frequency regulation[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(4):18-22.
- [10] 董超,黄筱翌.美国PJM电力市场及对广东电力改革的启示[J].云南电力技术,2017,45(1):16-20.
DONG Chao, HUANG Xiaozhao. Experiences in PJM market in the United States: a good reference for the power market reform in Guangdong Power Grid[J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(1):16-20.
- [11] 陈晔,陈雨果,刘文涛,等.南方(以广东起步)电力辅助服务市场发展展望[J].南方电网技术,2018,12(12):55-63.
CHEN Ye, CHEN Yuguo, LIU Wentao, et al. Prospect for the development of power ancillary service market in southern China (starting from Guangdong) [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12):55-63.
- [12] National Grid. Enhanced frequency regulation response: invitation to tender for pre-qualified parties [EB/OL]. 2016-06-17. <http://www2.nationalgrid.com/Enhanced-Frequency-Response.aspx>.
- [13] 王韬,张磊.新电改背景下的电力市场交易模式综述与研究[J].电器与能效管理技术,2018(6):76-81.
WANG Tao, ZHANG Lei. Review and research on power market transaction mode under the background of new electricity reform [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(6):76-81.
- [14] 邹建平.辅助服务的市场化定价与交易模式研究[D].北京:华北电力大学,2012.
ZOU Jianping. Research on ancillary services market pricing and trading mode [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [15] ENTSO-E. Network code on load-frequency control and reserves [EB/OL]. (2018-05-04) [2021-05-17]. https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/resources/LCFR/130628-NC_LFCR-ssue1.pdf.
- [16] 贺宣恒,周明,武昭原,等.国外典型电力平衡市场的运作模式及其对中国的启示[J].电网技术,2018,42(11):3 520-3 528.
HE Yiheng, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Study on operation mechanism of foreign representative balancing markets and its enlightenment for China [J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3 520-3 528.

作者简介:

杨超(1990),男,新疆乌鲁木齐人,学士,工程师,研究方向为电力系统安全经济运行、现货市场、负荷电力平衡;

孙谊嫔(1974),女,山东滨州人,硕士,教授级高工,研究方向为电力系统安全控制、电力市场运营;

王勇(1983),男,新疆乌鲁木齐人,学士,高级工程师,研究方向为电力系统自动化、电网设备检修;

吴春燕(1993),女,通信作者,山东文登人,硕士,研究方向为电力市场、电网规划与运行。

(责任编辑 水 鸽)