

基于电力生产环节的英美电力市场 成本覆盖对比分析

高怡静¹,魏路平²,林凯颖¹,郑亚先³,王蓓蓓¹,朱炳铨²

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 210096;2. 国网浙江省电力公司,杭州 310000;
3. 中国电科院 南京分院,南京 210008)

Cost coverage comparison analysis of British and American electricity markets
based on the electricity production

GAO Yi-jing¹, WEI Lu-ping², LIN Kai-ying¹, ZHENG Ya-xian³, WANG Bei-bei¹, ZHU Bing-quan²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310000, China;

3. Nanjing Branch of China Electric Power Research Institute, Nanjing 210008, China)

摘要:在电力市场化改革进程中,欧美国家成熟的电力市场运营对我国电力市场建设有重要的借鉴经验。从电力生产成本覆盖的角度,以英国电力库时期、NETA时期和美国PJM时期电力市场为例,在简单介绍3种电力市场模式结构的基础上,深入分析对比三者电力生产环节——发电侧、输电侧、变电和配电侧的成本覆盖情况,以宏观介绍和微观比较相结合的方式阐述在不同时期及市场环境下的电力市场交易模式与规则。

关键词:电力市场;成本覆盖;PJM;NETA;电力库

Abstract: In the process of electricity market reform, the market construction of American and European electricity markets can provide important reference value for China. POOL, NETA and PJM electricity markets are taken as the examples to analyze the cost coverage in the process of electricity production. In the part of market composition, the trading mechanism of three markets are explained from a macro perspective. In the part of cost coverage, the cost generation and corresponding way of cost coverage is analyzed from three aspects: generation, transmission and distribution. The overall introduction and detailed comparisons from different aspects are combined to explain the electricity market models and rules under the different periods and market environment.

Key words: electricity market; cost coverage; PJM; NETA; electric power pool

近年来,随着电力体制改革的稳步进行,逐步开放的市场化模式成为电力工业的长期发展目标。欧美等发达国家的电力市场建设起步早,运营经验丰富,其中不乏一些较为完善的电力市场。

相关学者对国外电力市场的研究,已经取得了一定基础的理论成果。文献[1]—文献[5]梳理了国外电力市场在发电侧和售电侧引入竞争、建立市场的基本模式,从市场模式和建设目标、电力市场范围、需求侧资源潜力以及加强电力市场监管等几个方面,对国际电力市场最新发展趋势进行了分析,并结合中国电力市场建设发展的需求,提出了有关建议。文献[6]、文献[7]分析了加州电力市场的结构、发生事故的原因、解决措施以及防范启示。文献[8]在双边交易和电力库模式共同存在的情况下,为开放性的电力传输系统提出新的阻塞管理机制。

英国电力市场和美国电力PJM电力市场作为较

收稿日期:2018-07-19;修回日期:2018-08-14

基金项目:国家电网公司科技项目“省级电力现货市场运营推演平台研究与开发”(52110118000A)

中图分类号:F416.61;TK018 文献标志码:C

有代表性的两大电力市场,以各具特点的运营机制,完成电能竞争性市场的交易,也引起各学者的关注。文献[9]、文献[10]介绍了欧洲和澳洲的电力市场和其电力工业的发展。文献[11]、文献[12]介绍了美国电力改革的概况,并阐述了美国不同区域电力市场的运行机制。文献[13]分析了英国NETA时期电力市场的交易机制,并且比较其与传统的集中批发式电力市场模式的区别。文献[14]概述了美国PJM和NYISO市场需求响应机制的演变情况,阐述了需求响应对高峰时负荷削减的作用,并分析了当前需求响应在未来缓解可再生能源不确定性等方向的发展机会。文献[15]介绍了美国电力市场的建设历程,深入分析其市场设计和运行中存在的问题。但目前国内对于欧美电力市场的介绍主要关注在其市场的结构以及交易流程,在研究时通常以整体作为关注点,缺乏不同市场对应交易机制之间的横向对比。

为此,本文主要以英美电力市场为研究点,以

英国电力库时期、NETA时期电力市场和美国PJM电力市场3个典型欧美电力市场为例,类比其电力生产环节的不同成本覆盖方式。从宏观角度介绍了三者电能出清各环节的交易机制,在此基础上,从发电侧、输电侧、变配电侧3个角度分析对比3个电力市场的成本产生和对应费用覆盖方式。

1 英美电力市场结构设置

英国的电力市场主要分为2个阶段:电力库时期和NETA时期。

英国电力库是一个日前市场,根据机组竞价和负荷预测的信息,国家电网公司在日前制定无约束的发电计划^[9]。在实际运营当天,由于发电机可能存在故障、线路约束等,需要对发电计划进行调整,实行有约束的机组组合,因此国家电网公司将重新调度,并以最终的交易价格对电力库中的电量进行出清。

NETA时期的英国电力市场,存在日前市场和实时市场,其主要由3个环节组成:合同市场、平衡机制以及不平衡结算。NETA的核心是双边合同,电能交易的双方在自由谈判的情况下签订协议,完成市场中绝大部分电量的交易^[10]。但在实际情况中,合同电量并不能完全交付,其与实际运行时的电量之间也存在差距,称为不平衡电量。这部分电量需要通过不平衡结算来消纳。在平衡机制中,发电商和供应商自愿参与平衡服务,提交相应的增减量报价来交易不平衡电量。系统调度员会在实现最终供需平衡的基础上重新调度,将该部分不平衡电量出清,完成最后的不平衡结算过程。

美国PJM市场则分为日前市场和实时市场。在日前市场中,PJM将根据发电侧、需求侧的投标以及市场成员提供的双边交易计划计算次日24h每小时的节点边际电价,以日前价格完成部分结算。实时市场是现货市场,按照电网的实际运行条件每5min计算一次实时市场出清价格。实时市场实质是一个平衡市场,其作用是平衡实际运行与日前计划之间的偏差量^[11]。实时市场距离实际运行的时间较短,能够获得更加准确的预测结果,出清计算即可形成可执行性较好的发电计划,与实际运行的差异较小,有利于确保电网运行的安全性^[16]。英国电力库时期和NETA时期在成本覆盖形式上存在差异,因此将分别介绍这2个时期,并与美国PJM市场进行比较,从发电侧、输电侧、变配电侧3个方面阐述其成本覆盖的具体内容。

2 英美电力市场发电侧成本覆盖比较

发电侧的成本主要由2部分构成:一部分是发

电成本,另一部分是容量成本。发电成本就是发电过程中人力、物力投入的总和,属于变动成本。容量成本主要反映发电厂的固定成本,与发电厂类型、投资费用、还贷利率和折旧方式等密切相关。

2.1 发电成本

在英国电力库时期,系统发电结算电价(PPP)由2部分组成:一部分是电量费用,另一部分是容量费用。电量费用即发电部分的成本,以系统边际价格(SMP)的形式存在。英国国家电网公司根据机组的竞价和负荷预测,在不考虑约束的情况下制定最低成本的发电计划。在每半小时交易时段里,满足负荷的发电机组组合中,价格最高的机组报价称为系统边际价格(SMP),此价格构成结算电价的电量费用部分。

英国电力市场的NETA时期,在合同市场,90%以上的电量交易以合同签订的方式完成,其交易量按每半小时来确定。在实时运行过程中,实际的电量和不平衡电量之间存在偏差,因此除了合同电价以外,还需要对不平衡量进行结算。在不平衡结算过程中,需要比较合同电量与实际电量,并以不平衡电价进行结算。不平衡电价分为不平衡买入价(SBP)和不平衡卖出价(SSP)^[17]。对于发电侧而言,签订合同的购买方向卖电方支付合同购电费用,为消除实际电量与合同电量之间的偏差,购买方又以SBP向发电商购买不平衡电量。两者共同构成了发电成本的回收。

对于美国PJM电力市场而言,分为电量市场和容量市场。在电量市场中,PJM又分为日前市场和实时市场,两者都用相应的节点电价LMP来覆盖能量费用^[18]。在日前市场中,除了由预测值得到的负荷需求以外,还会存在增减量报价。这是一种虚拟的报价方式,市场成员可以任意地选择成为买方或卖方,报价时提供增/减的电量 and 相应的价格。对减量报价而言,日前LMP价格低于买方提出价位,其愿意从市场中购买一定量电能,因此这部分费用也会支付给发电商。发电商通过正常提交的负荷需求和减量需求,可以支取电能费用^[19]。

2.2 容量成本

电力库中容量费用的存在主要是为了保证在负荷突增或发电机故障时,电力容量和备用的充足性。容量费用由2个因素决定:失负荷概率(LOLP)和失负荷电价(VLL)。其中,失负荷概率是以半小时为一个时段进行计算,其定义为负荷超过可用发电容量的概率。失负荷电价在一年期内是固定值,它是用户为避免停电愿意支付的保险金。容量部分对应费用为

容量费用=失负荷概率×(负荷电价-系统边际价格)

NETA时期,容量价格同时也包含在电价中,因此购买方在签订合同的电价以及以SBP购买不平衡电量时,已将容量成本覆盖。

在美国PJM电力市场中,可以在容量市场上对容量信用进行买卖,使发电能力满足负荷需求,保证容量义务的履行^[20]。容量市场确定出清价格以后,购买容量资源的一方向出售方支付容量信用的费用,发电侧的容量成本得到回收。

2.3 发电侧成本覆盖总结

在发电侧电量成本覆盖方面,电力库的电量费用由系统边际价格SMP来决定。而NETA和PJM都有2个结算过程,因此电量成本在日前交易和用于调整不平衡量的结算中都有涉及。

容量成本部分,电力库按照统一的固定收费标准向购买者收取,不存在竞争。在NETA时期,引入竞争,将容量费用包含在最终的竞价结果中。美国PJM电力市场则采用更加完善的市场制度,使容量与电量相互独立,设立专门的容量市场,进一步增加了市场的竞争性。表1为发电侧成本覆盖方式。

表1 发电侧成本覆盖方式

成本类型	电力市场	收费方	付费方	费用形式	
电量成本	电力库	发电商	电力库	SMP	
	NETA	合同卖方	合同买方	合同电费	
		发电商	系统调度员	SBP	
	PJM	发电商	RTO	日前LMP、实时LMP	
	容量成本	电力库	发电商	电力库	容量费用
		NETA	合同卖方	合同买方	合同电费
发电商			系统调度员	SBP	
PJM		发电商	供电商	容量市场价格	

3 英美电力市场输电侧成本覆盖比较

输电成本主要包括输电服务费和输电使用费。输电服务费用包括输电网的投资成本(固定成本)和运行维护成本(可变成本)2个部分;输电使用费包括网络损耗和阻塞成本,两者分别是由于传输过程中的网络损耗和网络传输中容量越限而产生的成本。

3.1 输电投资和运维成本

在英国电力库时期和NETA时期,输电建设成本即为折旧费的固定资产投资^[21]。其对应收取的费用为电网的使用费(TNUOS),由发电商、供电商共同向国家电网支付。运维费部分的覆盖由供电商向国家电网支付。

美国的输电服务分为2种,点对点服务和网络

服务^[22]。网络输电服务用以满足控制区内的负荷输电需求。电网投资是在监管环境下满足本区域内供电而建,并从本区域用户电费中回收。网络输电服务需要电网为其提供长期稳定的服务,输电时不要求固定的输电通道。点对点服务是过网交易的输电费用,可以是跨区间的供电和售电,也可以是转运服务。点对点服务的特征是有明确的注入点和输出点,分为固定点对点服务和非固定点对点服务。固定点对点服务与网络服务享有同等的最高优先权,在输电阻塞时能保证服务。在输电网络优先满足点对点服务和网络服务,在仍有剩余容量的情况下,非固定点对点服务的请求才会被考虑。对于长期固定的点对点传输服务,PJM还有义务通过输电网改造、升级或资源再调度来满足其服务申请。该部分费用均由传输服务申请者来承担。美国的输电服务费采用一部制容量电价,本质上是一种邮票法,即采用固定输电价格为输电服务收费。ISO的输电服务范围被划分为多个分区,不同区域有确定的输电价格。网络服务用户按照最大负荷的比例分担所处分区中输电所有者的年度收入需求,点对点服务输电价格按照注入节点所在区域来确定。对于注入点在区外的过网交易,输电价格为所有分区的输电价格平均值。

3.2 网络损耗和阻塞成本

英国电力库时期,上抬价格(UPLIFT)作为电力库售电和购电之间的差价,用来覆盖预测误差和非计划可用费用(USAV)的成本,即实际运行和无约束发电计划费用的差异,包括:输电约束、负荷预测误差、机组可用性的变化、机组实际输出和计划输出的差异、不受集中调度约束的小机组的运行、网损、辅助服务^[23]。因此,上抬价格中考虑了线路约束和网络损耗的问题,国家电网公司需要向电力库支付相应的传输上抬价格。但最终这一部分价格会计算在负荷方购电价格PSP中,发电价格PPP与上抬价格UPLIFT之和为出清价PSP,因此这部分成本实际由负荷商承担。但最终这一部分价格会计算在负荷方购电价格PSP中,发电价格PPP与上抬价格UPLIFT之和为出清价PSP,因此这部分成本实际由负荷商承担。

在英国NETA时期,对于网络损耗和阻塞的成本,一方面在签订合同时,合同电价会包含网损和阻塞费用,由购电方向出售方支付;另一方面,平衡机制中的增减量报价也会覆盖这2部分的成本。平衡机制是参与者通过有偿的形式提供平衡服务,解决输电约束问题,维持系统供需平衡。参与者提供Bid和Offer的竞价信息,并在系统调度员的指示下调整发电或出力水平。上调量与下调量的交易在“签约方”与系统调度员之间进行,增减量报价表明

的是实际运行时“签约方”是否愿意偏离申报的水平以及针对偏离量希望得到的补偿^[24]。而偏离合同量主要是输电约束、系统存在电能不平衡、受一次能源和天然气市场等产生的影响,因此增减量报价中涵盖阻塞和网络损耗费用。由于平衡机制中的 Bid 和 Offer 为市场报价,经过加权平均得到最终结算时的系统电能不平衡卖出价(SSP),并以此来售出不平衡电能,因此阻塞和网损实质上也是由 SSP 来覆盖。

美国 PJM 电力市场中,在发生输电阻塞时,固定点对点服务不能被取消或者削减,其将根据注入和送达节点之间的 LMP 差价支付阻塞费用^[25]。固定点对点用户还可以参与阻塞收入的分配。非固定点对点服务在发生阻塞时可以被削减或取消,但其可以不放弃输电权力,并且支付相应的阻塞费用。非固定点对点服务相较于点对点服务更灵活,可以选择取消输电服务或者为继续输电支付相应的阻塞费用,但是其无权参与阻塞费用的分摊,也不能用来承担输电网成本回收。非固定点对点用户不必重复支付输电服务费和阻塞费用,选择较多的一部分费用缴纳即可。这部分收费将按照传输服务的比例分配给网络传输用户和固定点对点用户。由于节点电价的构成就是电能费用、阻塞费用和损耗费用的总和,因此在用节点电价完成支付时,损耗成本已经被覆盖。

3.3 输电侧成本覆盖总结

对于输电网的固定投资和运维部分,英国电力市场无论是在电力库时期还是 NETA 时期,都是由发电商和供电商支付输电费,由国家电网公司承担输电业务。同时,国家电网公司会向供电商收取平衡服务费,用以覆盖运营产生的费用。相较于英国统一收取的标准,PJM 输电服务的分类更加细致:点对点输电主要负责跨区输电服务,网络输电服务于本区域用户,两者的收费标准也随之存在不同。

在网络阻塞和损耗部分,3个市场均将这部分费用包含于电价之中:电力库通过上抬价格收取该部分费用,加上之前购入电能的费用得到最终的电力库售电价格;NETA 时期和美国 PJM 电力市场同样按照2个不同阶段的售电价格涵盖该部分阻塞和损耗的费用。表2为输电侧成本覆盖方式。

4 英美电力市场变、配电侧成本覆盖比较

4.1 并网、配电成本

在变电、配电侧,配电商需要先并网,再将电能配送给终端用户,由此产生并网费用。用户向配电网支付的配电服务费包含并网费用的成本以及配电商提供服务的费用。对于英国电力市场,无论是

表2 输电侧成本覆盖方式

成本类型	电力市场	收费方	付费方	费用形式
输电建设和运维成本	电力库	国家电网公司	发电商、供电商	TNUOS
		国家电网公司	供电商	BSUOS
	NETA	国家电网公司	发电商、供电商	TNUOS
		国家电网公司	供电商	BSUOS
	PJM	RTO	点对点传输用户	点对点服务费
		RTO	网络传输用户	网络传输服务费
网络损耗和阻塞成本	电力库	国家电网公司	电力库	UPLIFT
	NETA	系统调度员	市场参与者	SSP
		合同卖方	合同买方	合同电价
	PJM	RTO	供电商	LMP

电力库时期还是 NETA 时期,并网费用(connection charges)都是由配电商向国家电网公司支付。并网费,一般采用插座式模型,由国家电网公司向发电侧和用电侧收取。它与网络使用费的区别是依据“浅并网”原则,即:该部分费用只包含特定并网设备的成本,而不包含因某用户并网而引起的增加容量需求等费用。同时,用户会向配电商支付配电服务费(DUoS),覆盖配电建设的固定成本和由配电服务产生的可变成本部分。美国 PJM 电力市场中,用户和市场运营部(PJM interconnection)之间会签订相关的限制使用条例,如果用户在 PJM 的使用规则下并网和使用相关设备,则不需要支付额外的费用^[26]。PJM 的配电服务已经向用户全面开放,用户可以选择配电商对其进行配电服务。

4.2 变电、配电侧成本覆盖总结

表3为变电、配电侧成本覆盖方式。变电侧的费用形式比较简单,NETA 和电力库中的配电商向国家电网支付并网费,并向用户收取对应的配电网

表3 变电、配电侧成本覆盖方式

成本类型	电力市场	收费方	付费方	费用形式
并网费	电力库	国家电网公司	配电商	connection charges
	NETA	国家电网公司	配电商	connection charges
	PJM			
配电服务费	电力库	配电商	用户	DUoS
	NETA	配电商	用户	DUoS
	PJM	配电商	用户	配电费

务费。PJM 电力市场的并网则不收取额外费用,配
电时用户向配电商支付一定的费用。

5 结束语

本文以 2 个时期的英国电力市场和美国 PJM 电
力市场为例,简单介绍了不同电力市场的结构:英
国电力库时期通过 POOL 作为电能交易的中间商,
以价格的上拾平衡日前无约束计划与实际运行之
间的偏差;英国 NETA 时期以双边交易为主要方式,
通过平衡机制、不平衡结算调整不平衡电量;美国
PJM 电力市场通过考虑日前和实时 2 个市场的双结
算系统进行全电量的出清。本文还从发电侧、输电
侧、变电配电侧 3 个角度具体分析了不同市场机制
下成本的覆盖方式以及不同环节的费用产生和收
取。通过市场整体运行规则的宏观介绍和不同环
节成本覆盖的微观阐述,对英美两国电能交易的过
程和方式有了深入的了解。D

参考文献:

[1] 马莉,范孟华,郭磊,等. 国外电力市场最新发展动向
及其启示[J]. 电力系统自动化,2014(13):1-9.

[2] Hogan W W. Electricity Market Restructuring: Reforms of
Reforms [J]. Journal of Regulatory Economics, 2002, 21
(1): 103-132.

[3] Jamasb T, Pollitt M. Electricity Market Reform in the Eu-
ropean Union; Review of Progress toward Liberalization &
Integration [J]. Energy Journal, 2005, 26(Special Issue):
11-41.

[4] Joskow P L. Lessons Learned from Electricity Market Lib-
eralization [J]. Energy Journal, 2008, 29(Special Issue):
9-42.

[5] Alvey T, Goodwin D, Ma X, et al. A security-constrained
bid-clearing system for the New Zealand wholesale elec-
tricity market [J]. Power Systems IEEE Transactions on,
1998, 13(2): 340-346.

[6] Mensah-Bonsu C, Oren S. California Electricity Market
Crisis: Causes, Remedies, and Prevention [J]. Power En-
gineering Review IEEE, 2002, 22(8): 4-11.

[7] Puller S L. Pricing and Firm Conduct in California's De-
regulated Electricity Market [J]. 2007, 89(1): 75-87.

[8] Fang R S, David A K. Transmission congestion manage-
ment in an electricity market [J]. IEEE Transactions on
Power Systems, 1999, 14(3): 877-883.

[9] 国家电力监管委员会. 欧洲、澳洲电力市场[M]. 北京:
中国电力出版社,2006.

[10] Wolak F, Patrick R H. The Impact of Market Rules and
Market Structure on the Price Determination Process in
the England and Wales Electricity Market [J]. Social
Science Electronic Publishing, 2001, 22(3): 27-62.

[11] 国家电力监管委员会. 美国电力市场[M]. 北京:中国
电力出版社,2005.

[12] James B. Bushnell, Erin T. Mansur, Celeste Saravia. Ver-
tical Arrangements, Market Structure, and Competition:
An Analysis of Restructured US Electricity Markets [J].
American Economic Review, 2008, 98(1): 237-266.

[13] Hesmondhalgh S. Is NETA the blueprint for wholesale
electricity trading arrangements of the future? [J]. IEEE
Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 548-554.

[14] Walawalkar R, Fernands S, Thakur N, et al. Evolution
and current status of demand response (DR) in electric-
ity markets: Insights from PJM and NYISO [J]. Energy,
2010, 35(4): 1 553-1 560.

[15] Ott A L. Experience with PJM market operation, system
design, and implementation [J]. Power Systems IEEE
Transactions on, 2003, 18(2): 528-534.

[16] Borenstein S, Bushnell J B, Wolak F A. Measuring Mar-
ket Inefficiencies in California's Restructured Whole-
sale Electricity Market [J]. American Economic Review,
2002, 92(5): 1 376-1 405.

[17] Dettmer R. Living with NETA [New Electricity Trading
Arrangements] [J]. Iee Review, 2002, 48(4): 32-36.

[18] 谢开. 美国电力市场运行与监管实例分析[M]. 北京:
中国电力出版社,2017.

[19] PJM Interconnection. Energy & Ancillary Services Market
Operations [EB/OL][2018-04-12](2018-05-12)http://
www.pjm.com/-/media/documents/manuals/m11.ashx.

[20] PJM Interconnection. PJM Capacity Market [EB/OL]
[2018-02-22] (2018-05-12) http://www.pjm.com/-/
media/documents/manuals/m18.ashx.

[21] Wu F F, Zheng F L, Wen F S. Transmission investment
and expansion planning in a restructured electricity mar-
ket [J]. Energy, 2006, 31(6): 954-966.

[22] PJM Interconnection. Transmission Operations [EB/OL]
[2017-12-22] (2018-05-12) http://www.pjm.com/-/
media/documents/manuals/m03.ashx.

[23] Holmberg P, Lazarczyk E. Congestion Management in
Electricity Networks: Nodal, Zonal and Discriminatory
Pricing [J]. Working Paper, 2012, 915(2): 32-33.

[24] De Vries L J. Capacity allocation in a restructured elec-
tricity market: technical and economic evaluation of con-
gestion management methods on interconnectors [C]//
Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto. IEEE, 2001,
1(6): 1-6.

[25] PJM Interconnection. Financial Transmission Rights
[EB/OL] [2017-09-01] (2018-05-12) http://www.
pjm.com/-/media/documents/manuals/m06.ashx.

[26] PJM Interconnection. PJMnet Network Connection [EB/
OL][2014-12-18](2018-05-12)http://www.pjm.com/-/
media/about - pjm/member - services/membership - assis-
tant/pjmnet-network-connection-limited-use-agreement-
no-fee.ashx.

(本栏责任编辑 孙 晶)