

# 电力市场环境下的差价合约电量分解问题

李道强<sup>1</sup>, 龚建荣<sup>1</sup>, 李忠悛<sup>2</sup>, 高 滢<sup>2</sup>, 文福拴<sup>2</sup>

(1. 浙江电力交易中心有限公司, 浙江 杭州 310016; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 差价合约是中长期金融合约, 其应用于电力市场可提前锁定电力价格, 规避现货市场电价波动风险。近年来, 随着中国电力体制改革的深入与试点范围的扩大, 电力差价合约在一些省级电力市场机制中得到应用。由于中国现阶段的电力差价合约严格而言为电量合约而非电力合约, 因此必须将合约电量分解为可调度的电力曲线。首先简要论述了电力差价合约的概况, 并从基于滚动修正与基于优化模型 2 个方面介绍并对比分析了现有的确定性合约电量分解的理论与方法。最后, 展望了在本轮电力工业改革环境下与差价合约电量分解相关的若干问题, 并建议了可能的解决方法。

**关 键 词:** 电力市场; 差价合约; 合约电量; 分解算法; 滚动修正; 优化模型

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.005 中图分类号:TM93 文章编号:1673-9140(2020)01-0040-10

## Decomposition of an electrical energy contract for difference in electricity market environment

LI Daoqiang<sup>1</sup>, GONG Jianrong<sup>1</sup>, LI Zhonghui<sup>2</sup>, GAO Ying<sup>2</sup>, WEN Fushuan<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Power Exchange Center Company Limited, Hangzhou 310016, China;  
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The well-established contract for difference (CfD) is a middle-or long-term financial contract. When the CfD is applied in the electricity market, the electricity price can be fixed and the risk associated with the fluctuated electricity price in the spot market avoided. In recent years, with the advance of the power industry restructuring and the expansion of the pilot scope in China, the electrical energy CfD is included in the designed electricity market mechanisms in several provinces. Currently the implemented CfD contracts for electricity in provincial electricity markets in China are actually electrical energy contracts rather than electrical power ones, and hence it is necessary to decompose the contracted electricity energy into dispatchable electrical power demand curves. A brief overview of the electrical CfD is first presented, and the existing theories and methods from the perspectives of the rolling correction and optimization models based decomposition algorithms for definite contracted electrical energy are presented and compared. Finally, some problems associated with the decomposition of the contracted electrical energy in this round of power industry restructuring are prospected, and possible solved methods addressed.

**Key words:** electricity market; contract for difference (CfD); contracted electrical energy; decomposition algorithm; rolling correction; optimization model

差价合约(contract for difference, CfD)最早于 20 世纪 70 年代以股票掉期的交易形式出现,而后逐渐扩展到外汇、债券、金属、作物、能源等领域的投资问题。差价合约凭借其交易产品丰富、交易过程简单、交易成本低廉等优势,逐步成为一种主流金融产品。在电力市场环境下,电力差价合约作为一种中长期金融合约,具有确定的合约价格与合约电量<sup>[1]</sup>。电力差价合约可以为电力用户或电力零售商和发电公司提前锁定电力价格,从而规避现货交易风险<sup>[2-3]</sup>。

很多国家在电力市场化改革进程中引入了电力差价合约,如英国、美国、澳大利亚等<sup>[4-7]</sup>。在英国的第 4 次电力市场改革中,为促进可再生能源与节能低碳技术的发展<sup>[8-9]</sup>采用了差价合约。差价合约采用金融结算,不涉及物理交割,这样就增加了电力产品流动性。在上世纪末和本世纪初中国开展的第 1 轮电力市场化改革时,浙江省电力市场就采用了差价合约,且运行相当成功。

长期以来,中国只有政府机构或电网公司主导的电量市场,而非电力市场,相应的差价合约为电量合约,并非电力合约,这样就需将合约电量进行分解<sup>[10]</sup>,以满足系统调度的需要。一般地,电力差价合约电量的分解包括在空间维度上分解至各发电机组,时间维度上由年度分解到月度、月度分解到日度,最终由日度分解到各个交易或调度时段<sup>[10-12]</sup>。

随着电力体制改革的逐步深入,市场化建设逐步完善,市场交易份额不断提高,合约种类也随之增加。例如,浙江省电力市场的差价合约类型由 2000 年前后那轮改革时采用的单一政府授权差价合约扩展为政府授权差价合约和双边交易差价合约 2 种。近年来,随着风电和太阳能发电渗透率的不断提高,影响电价波动的不确定性因素增多,在国际上已经运营的一些电力现货市场中电价更加难以准确预测<sup>[13-16]</sup>,而且由于机组类型愈加丰富,电力系统实际运行情况更加复杂,机组特性差异、检修停运、输电阻塞<sup>[17]</sup>等问题趋于突出,电力市场主体面临着的市场风险增大<sup>[18]</sup>。

为研究适应本轮电力市场改革环境下的差价合约电量分解方法,有必要对现有相关研究情况进行

归纳总结,在此基础上对未来的研究工作进行展望。在上述背景下,笔者首先简要介绍电力差价合约的分类,然后概述并总结确定性合约电量分解方法。在此基础上,识别了在本轮电力市场改革环境下差价合约电量分解研究时需要着重解决的问题,并提出了相应的解决思路与建议。

## 1 电力差价合约概述

### 1.1 电力差价合约概念及分类

电力体制改革打破了传统的发电、输电、配电、售电一体化的电力工业局面,推动了电力市场化进程,逐步培育了多元化的电力市场主体,但同时也给电力市场主体尤其是竞争环节的市场主体如发电公司、电力零售公司和大用户带来了风险,尤其是价格波动风险<sup>[18]</sup>。发电公司、电力零售公司和大用户这些市场主体可通过电力双边合约锁定电力价格以规避电价波动风险。

电力双边合约可根据合约电量交割是否与电力现货市场有关分为电力物理合约和电力金融合约两大类<sup>[19]</sup>。电力物理合约指具有固定电价且合约交割与电力现货市场无关的远期合约。电力金融合约则指合约电量参与现货市场竞价,并通过现货市场交割的合约。常用的电力金融合约包括差价合约、可选择远期合约以及期货合约等。需要指出,物理合约与金融合约均不影响现货市场的竞争。

差价合约泛指不涉及实物商品或证券的交换,仅以结算价与合约价的差额作现金结算的交易方式。电力差价合约主要针对具有确定的合约价格与合约电量的中长期金融合约,包括单向差价合约与双向差价合约 2 种<sup>[20]</sup>。其中,单向差价合约又可分为买方差价合约与卖方差价合约<sup>[19]</sup>。买方差价合约以现货市场电价与合约电价之间的较低者购入电能,而卖方差价合约则以现货电价与合约电价的较高者售出电能。双向差价合约的结算电价即为合约电价,与现货市场电价无关。电力市场中的差价合约通常为双向差价合约。电力双边合约的分类及常见合约类型如图 1 所示。

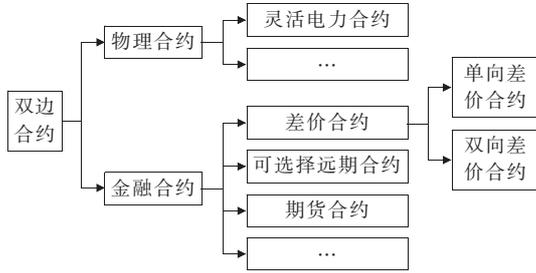


图1 电力双边合同的分类

Figure 1 Classification of electricity bilateral contracts

引入电力差价合约对电力市场主体尤其是竞争环节的主体具有重大意义<sup>[21-22]</sup>。对发电公司而言,差价合约能够提前锁定部分交易电量和电价,在为其提供中长期稳定的电力需求的同时保障其经济收益。对电力用户而言,差价合约不仅可以维持可靠的电力供应,还能在一定程度上规避其购电费用明显上升的风险。

### 1.2 电力差价合约分解的意义

引入电力差价合约可以规避电力市场竞争环节的市场参与者的经济风险,但如何对差价合约电量进行分解对维持电力系统的安全和经济运行至关重要。

一方面,将合约电量科学地分解至各时段,是系统调度机构的要求,并为合约电量结算提供依据。差价合约电量分解方案能否满足各方面要求直接影响差价合约的执行和电力系统的安全经济运行。因此,高质量的差价合约电量分解方案是电力系统安全与经济调度的基础<sup>[23]</sup>。

另一方面,差价合约电量分解是电力中长期合约市场与电力现货市场兼容与衔接的关键环节。不合理的合约电量分解会导致电力价格大幅波动,进而直接影响市场主体的收益。例如,如果差价合约电量分解方法不够公平,有可能恶化个别发电公司滥用市场势力、抬高市场电价而牟利;若分解电量所占比例在负荷高峰时过小或低谷时过大,则会使电网公司购电成本增加,电力用户购电费用升高,不利于整个电力市场的运营。

### 1.3 电力差价合约分解模式

不同的国家由于电力工业的发展背景、发展模式、投资者组成不同,采用了不同的电力差价合约模式。在此以英国、澳大利亚、中国为例,对电力差价合约的特点进行比较分析<sup>[8-12]</sup>,如表1所示。

表1 3个国家采用的电力差价合约模式

Table 1 Comparisons among CFD modes in three countries

国家	差价合约模式	研究问题
英国	直接由交易主体向电力交易中心提交发电计划,自行调度	经济调度问题
澳大利亚	金融市场完全独立,差价合约仅涉及现金交割不涉及物理交易,无需电力公司调度	
中国	差价合约为电量而非电力合约,需将合约电量分解为可调度的电力曲线,以便进行调度	合约电量分解问题

对于不同的电力差价合约模式,相关的研究重点也不相同。在国内,电力差价合约是针对电量的,必须研究适当的合约电量分解方法<sup>[24]</sup>,兼顾发电公司、电网公司、电力零售公司/用户的利益,公平性是需要考虑的重要因素。国外比较侧重于发电公司的经济收益且无需进行合约电量分解,故主要研究经济调度(市场清算)问题<sup>[25]</sup>。

针对是否在制定代表日典型负荷曲线时考虑负荷随机波动和进行合约电量分解时考虑发电机组非计划停运<sup>[10]</sup>这2个方面,可将合约电量分解问题分为确定性合约电量分解与考虑随机性的合约电量分解问题。现有的确定性合约电量算法主要包括基于滚动修正的和基于优化模型的合约电量分解算法。

## 2 基于滚动修正的合约电量分解算法

在20世纪90年代末期那轮电改中,浙江省电力市场采用了“授权差价合约+单一购买者”模式,在相当程度上参照了澳大利亚的电力市场模式。基于滚动修正的确定性合约电量分解算法就是针对这种市场模式并结合浙江省的实际情况提出并得到实际应用的<sup>[11]</sup>。该算法主要包括合约电量按比例初步分解和滚动修正2个步骤,具有方法简单、计算速度快、便于执行等优点。

### 2.1 合约电量按比例初步分解

在满足合理性、公平性、经济性、风险性要求的前提下,将年度合约电量在空间维度上分解至各发电机组,在时间维度上由年度分解到月度、月度分解到日度并最终分解到各时段,得到合约电量的初步分解方案<sup>[11]</sup>。初步分解流程如下:

步骤 1: 对历史负荷曲线进行分析和聚类, 并综合考虑气象、节假日、阴阳历等多种主要影响因素, 修正后得到典型负荷曲线;

步骤 2: 预测年用电量, 并根据规定市场开放比例, 综合考虑厂用电量、电网损耗等因素, 求得年度差价合约电量;

步骤 3: 以机组发电能力作为空间维度上差价合约电量分解的依据, 确定各发电机组的年度合约电量;

步骤 4: 根据典型负荷曲线将差价合约电量进行时间维度上的分解, 即由年度分解至月度、日度、时段。

上述按比例进行差价合约电量初步分解的思路在后期的研究中得到进一步发展。文献[12]首先对历史负荷曲线进行相似性拟合, 扣除非竞价电源出力后, 得到竞价机组对应的负荷曲线; 利用年用电量预测值求得发电设备利用小时数, 再根据合约电量比例确定各竞价机组的合约电量; 最后结合负荷曲线与机组份额进行合约电量分解。文献[26]则综合考虑了发电机组最小技术出力、最大发电能力和合约电量完成度, 先选取最少合约电量作为初步分解方案, 以保证发电机组合约电量足额完成, 之后逐步修正。

## 2.2 滚动修正策略

在按比例分解方法得到的初步分解结果的基础上进行滚动修正, 以综合考虑发电机组检修、停运、热电联产、发电量偏差、电力系统安全稳定运行约束等因素。

文献[11]针对计划检修问题, 按照“非计划检修期平均分摊计划检修期的扣除电量”对初步分解结果进行修正。该滚动修正策略非常简单, 但可能导致发电机组年末可调容量过小、系统调度灵活性较差等问题。文献[27]考虑了月度检修计划变更, 针对月间合同电量偏差问题, 在满足月度发电上下限的条件下, 向相邻月份顺延修正; 这样虽然避免了年末机组可调容量较小、系统调度灵活性较差等问题, 但该方法得到的结果缺乏公平性。

和上述方法相比, 基于二次规划的合约电量分解滚动修正策略<sup>[27]</sup>则更为合理, 得到的结果比较公平。该滚动修正策略将合约电量分解方案用矩阵

描述, 其行数和列数分别为发电机组台数和时段数。首先, 根据实际分解要求得到初步分解方案矩阵; 之后, 综合考虑等式约束与不等约束, 采用多项式算法对各发电机组的合约电量由前至后进行各时段纵、横向修正, 以考虑月内机组检修问题和机组发电出力约束<sup>[27]</sup>。文献[23]提出了一种比较典型的考虑电量滚动的交叉修正方法, 将电量差额按比例分配, 可实现近似最优, 图 2 列出了这种方法的流程。该交叉修正方法既能快速求得全年电量分解方案, 也能有效处理合约电量偏差的滚动分解问题。

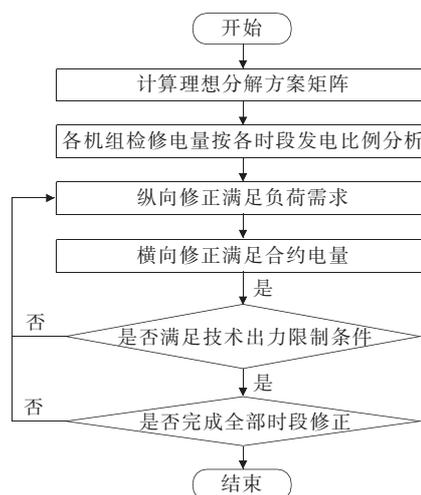


图 2 滚动交叉修正流程

Figure 2 Flowchart of the rolling intersectant amendment

制定滚动修正策略时可以针对机组计划检修、发电量偏差、机组停备等问题, 也可针对不同的时间尺度有所侧重。文献[28]考虑了发电计划的调度可执行性, 如机组发电负荷率过低等, 建立了机组组合优化模型。文献[29]考虑到针对年和月这类较大的时间尺度, 常规机组有充裕时间对风电出力的随机性进行调节, 故研究侧重于不平衡修正, 而针对日和时段这类较小的时间尺度, 研究则侧重于对风电机组出力的消纳。

基于滚动修正的合约电量分解算法虽然能在不考虑负荷随机波动与机组非计划停运的前提下确定合约电量分解比例, 计算速度快, 但该方法不能保证合约电量分解结果的最优性。针对这一问题, 提出了基于优化模型的合约电量分解算法。

### 3 基于优化模型的合约电量分解算法

基于优化模型的合约电量分解算法针对设定目标,考虑等式与不等式约束条件,运用线性规划、非线性规划、动态规划等方法确定合约电量分解的最优方案。

#### 3.1 优化模型的建立

在构建合约电量分解的优化模型时需要确定决策变量(优化变量)、目标函数和约束条件。所构建的优化模型可以是单目标的、也可以是多目标的。在单目标优化模型中,一般将购电成本最小、经济效益最大、有毒或温室气体排放最少、公平性最好等作为优化目标。当以经济效益最大或购电成本最小作为优化目标时,通常建立合约交易量与竞价交易量经济分配模型<sup>[30-32]</sup>;当以公平性和环境友好性最好等作为目标时,可基于发电机组可调容量、机组检修成本<sup>[33]</sup>、发电量进度系数<sup>[26]</sup>、均衡进度<sup>[34]</sup>、平均负荷率<sup>[23]</sup>、发电利用率<sup>[35]</sup>、负荷曲线满意度<sup>[36]</sup>、火电厂排放对人居环境空气质量影响系数<sup>[37]</sup>等因素建立优化模型。在合约电量分解的不同阶段,也可以针对该阶段需要解决的主要问题,采用不同的单目标或多目标优化模型<sup>[24,38]</sup>。

文献[31-32]以电网公司购电费用最低为目标函数,建立了在交易日对日合同交易量和竞价交易量进行优化分配的数学模型。文献[26]定义了发电进度系数概念,可在考虑机组检修、电量受限、热电联产等因素的同时,反映发电机组完成合约电量的进度,并以全网中所有发电机组发电进度系数的一致性最好作为目标建立了优化模型。文献[39]采用差异评估函数衡量发电公司申报发电曲线与实际发电曲线的差异,并以该函数值最小作为优化目标。在文献[24]中,月度电量分解以电网公司购电成本最小化作为优化目标,而在按机组进行电量分解时则将发电燃料成本函数与废气排放函数进行转换并引入加权因子后得到的函数最小为目标。文献[38]引入风险规避系数来兼顾购电费用最少与波动风险最小2个目标,在此基础上建立了优化模型。

滚动修正问题也可以采用优化方法解决,即将

滚动修正量作为决策变量,针对滚动修正问题的目标和需要考虑的约束建立优化模型并求解。文献[40]针对保证年末发电机组可调容量问题,定义了合约电量完成率的均衡性指标,在此基础上以全网中发电机组的合约电量完成均衡性最好作为目标建立了优化模型。文献[41]以与合约电量分解相关的调整成本最小为目标建立了优化模型。

在合约电量分解时,需要考虑一些等式约束条件,如发电机组年度合约电量约束和电力系统负荷平衡约束。需要考虑的不等式约束则包括发电机组检修时段、出力上下限、热电联产机组运行状态约束、输电线路容量约束、系统备用容量约束、水电出力受限等。需要指出,针对不同时间尺度的合约电量分解,需要考虑的约束条件也不同。文献[28]建立了考虑边界条件变化的月度计划跟踪与调整机制,可监视边界条件和计划执行情况,在边界条件与计划执行偏差超过给定阈值时就触发调整。

#### 3.2 优化模型的求解

从总体上讲,对合约电量优化模型的求解主要包括传统优化方法和智能算法两大类<sup>[32]</sup>。

传统优化方法主要包括线性规划法、非线性规划法、动态规划法等<sup>[32]</sup>。传统优化方法理论完善,计算速度快,但要求优化模型是良态的,如可微的。

文献[31]采用线性规划法求解日合约电量和竞价电量经济分配的优化模型。文献[32]则首先对模型进行简化,之后再线性规划法求解并修正。文献[26]首先确定起始时段初步的合约电量分解矩阵,再根据进度系数逐段分解,即利用发电机组剩余时间单元最大发电能力及其利用率由先至后进行电量分解,以期各时间单元各发电机组合约电量的分解进度是均衡的。

基于人工智能的优化方法又称现代启发式优化方法,以进化算法为主流,对优化问题的数学特性要求不高,如不要求优化模型是连续的(自然也不要求可微)。常用的方法包括遗传算法、进化算法、蚁群算法、粒子群算法、模拟退火算法、混沌优化算法和人工神经网络算法等<sup>[32]</sup>。基于人工智能的优化方法模仿自然进化过程,可同时寻找多个优化

解,属于全局优化方法,适应范围广,但计算量大。

文献[24]联合采用基于电荷系统的搜索算法与和声搜索求解优化问题,全局搜索能力较强。文献[35]首先对要求解的优化模型降维,把差价合约电量分解优化问题的决策变量由原来高维离散的转化为低维连续的,之后利用粒子群优化方法迭代求解。

## 4 本轮电改背景下合约电量分解问题与展望

中共中央国务院于2015年3月颁布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》。本次电改力求形成主要由市场决定电能价格与资源配置的机制,着力构建主体单元、竞争有序的电力格局。有几个省份已经发布了电力市场改革方案,其中有些采用了差价合约。下面对这轮电改背景下合约电量分解方面有待研究的问题进行讨论。

### 4.1 发电机组特性差异问题

随着电力市场改革的逐步深化,参与市场化运营的发电机组类型愈加丰富(如各类统调煤电机组、水电机组、燃气机组、核电机组、网外来电等)。不同类型机组的技术出力限制不同,调峰深度、爬坡速率差异较大,这给合约电量分解问题提出了新要求。现有合约电量分解方法大都根据各时段电力负荷情况对各机组年度合约电量在时间维度上进行分解,忽视了在不同时间维度各类型机组的特性差异。因此,为满足公平性要求,在合约电量分解过程中需要考虑各类发电机组的特性差异,对于有特殊要求的机组在合约电量分解时需要适当考虑。

从实用角度考虑,在电力市场改革初期,所采用的差价合约电量分解模型不宜过于复杂,建议采用基于滚动修正的合约电量分解算法。具体地,可根据各类发电机组出力特性曲线进行由年度至月度的合约电量分解,再以日典型负荷曲线为依据进行月度至日的分解,这样可使分解结果既符合各类型发电机组的出力特性,又能满足各时段电力负荷需求。

对于调峰机组如燃气机组或出力难以预测的机

组如无调节能力水电机组等,应在现有合约电量分解方法基础上进行适当改进以容纳这些机组的特征。无调节能力水电机组发电出力受来水情况限制,当发电计划出力与实际出力间偏差较大时,可向电力交易中心申请交叉修正;当实际发电出力与计划出力偏差较小时,可进行合约转让<sup>[42]</sup>。此外,水电机组也可通过在现货市场购售电自行调节出力偏差。燃气机组成本较高且一般参与系统调节,电力交易中心可不为其制定发电曲线作为调度依据,基于其合约电量并考虑电力供需关系适当确定其在每月的合约电量比例。

### 4.2 发电机组检修与停运问题

针对发电机组检修与停运问题,现有方法多采用滚动修正策略<sup>[23,26,27]</sup>对合约电量分解方案进行调整,但这种方法对非计划检修、非主观意愿导致的偏差等突发问题具有一定的局限性。可以考虑用合约转让<sup>[42]</sup>方式解决这类问题。合约转让比较灵活,但如何适当确定合约电量转让的时间、形式、过程、费用等都是有待研究的问题。

由于发电机组检修与停运问题涉及较广的时间维度,可以结合滚动修正策略、合约转让交易、现货市场买卖等方式针对不同情形采取不同的处理方式。例如,针对年度可采用交叉修正策略<sup>[23]</sup>;针对月度时,大容量发电机组采用交叉修正策略,小容量发电机组采用合约转让方式;对于更短的时间维度,可由发电机组自行确定是否从现货市场买电。

### 4.3 输电阻塞问题

现有的差价合约电量分解方面的文献一般仅从时间维度与发电机组角度进行研究,但在实际运营的电力市场中还存在空间上的问题,如输电阻塞等。输电阻塞不仅会阻碍发电计划的执行,降低设备与资源的利用率,危害电力系统的安全与经济运行,还可能导致发电公司滥用市场势力、操纵局部市场价格的风险<sup>[43]</sup>。因此,在合同电量分解时需要考虑输电阻塞问题。

一方面,可以建立综合考虑时间、空间联合优化的合约电量分解模型,如基于安全校正的阻塞管理模型<sup>[17]</sup>,和以调整容量最小和调整成本最少为目标的优化模型<sup>[44]</sup>,以确定发电计划最优调整策

略。另一方面,输电阻塞会引起附加阻塞成本,由此引出阻塞成本分摊问题<sup>[45-48]</sup>。

#### 4.4 随机因素

对于各时段电力负荷与实时电价都确定的情形,不难求得满足约束条件下的合约电量最优分解方案。严格而言,在对合约电量进行分解时,需要考虑各时段电力负荷和实时电价的随机波动,但这无法提前获得,只能基于预测结果。预测结果不可避免的存在误差,这样基于预测结果得到的合约电量分解方案一般无法得到最优解。可先建立随机负荷模型,在此基础上发展合约电量最优分解的随机规划模型和求解方法<sup>[49]</sup>。考虑到实时电价的随机性,首先建立电价风险模型,以购电成本最低和电价波动风险最小为优化目标,发展合约电量最优分解的随机规划模型和求解方法<sup>[38]</sup>。

#### 4.5 电力市场演化

在电力工业市场化运营的初期,对市场开放的电量比例较小,合约电量占比较大,此时合约电量分解结果会对市场均衡状态产生较大影响,主要体现在发电公司市场势力、现货市场出清价格、市场主体经济收益等方面<sup>[50]</sup>。

随着电力市场化交易的逐步放开,发电公司应关注改革不断演化期间所采用的差价合约电量分解方法的衔接性与连续性。一方面,电力交易中心应形成具有详细准则的监管体系,使市场参与主体、运营机构、监管部门等各方都能了解与差价合约相关的电力市场运营情况、变化趋势和存在问题。另一方面,电力交易中心应建立全面、科学、结果可量化的差价合约电量分解结果评估模型,并根据实际评估结果对合约电量分解策略进行改进和完善。

## 5 结语

随着中国电力市场化改革的逐步推进,在一些省区已经公布的电力市场化改革方案中包括了差价合约,这样如何对差价合约电量进行适当分解对电力市场的运营和电力系统的运行就至关重要。笔者首先概述了电力差价合约,重点论述了基于滚动修正与基于优化模型的合约电量分解方法的研究状况,比较了二者的优缺点。在此基础上,展望了在本轮

电力市场化改革背景下与差价合约电量分解相关的有待解决的重要问题,并给出了一些建议。

#### 参考文献:

- [1] 骆子雅,季天瑶,荆朝霞,等. 电力差价合约机制设计与应用[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2743-2751.  
LUO Ziya, JI Tianyao, JING Zhaoxia, et al. Design and application of contract for difference in electricity market[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2743-2751.
- [2] Sheblé G B, Ng K H. Economic lessons from the market evolution of present US power markets[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 185-188.
- [3] 王锡凡,王秀丽,陈皓勇. 电力市场基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [4] Cheng D T Y. Economic analysis of the electricity market in england and wales[J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(4): 57-59.
- [5] Mork E. Emergence of financial markets for electricity: a european perspective[J]. Energy Policy, 2001, 29(1): 7-15.
- [6] Mielczarski W, Michalik G. Open electricity markets in australia: contract and spot prices[J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(2): 49-50.
- [7] Wang X, Hatziargyriou N, Tsoukalas L H. Australian electricity market [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(5): 4-15.
- [8] 王秀丽,刘春阳. 英国低碳化电力市场化改革方案初析[J]. 电力系统自动化, 2014, 28(13): 10-17.  
WANG Xiuli, LIU Chunyang. Preliminary analysis of UK low carbon electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 28(13): 10-17.
- [9] 马莉,范梦华,郭磊,等. 国外电力市场最新动向及其启示[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 1-9.  
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9.
- [10] 陈建华,张宁,戴铁潮,等. 确定性电量分解算法实证分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 21-25.  
CHEN Jianhua, ZHANG Ning, DAI Tiechao, et al. Empirical analysis on the deterministic contract decomposition algorithm[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2008, 32(2): 21-25.
- [11] 戴铁潮, 张丹. 确定性合约电量分解算法在浙江发电市场的应用[J]. 华东电力, 2000, 28(10): 7-9+59.  
DAI Tiejiao, ZHANG Dan. Application of resoluting computation of decisive contract electric energy in Zhejiang generation power market[J]. East China Electric Power, 2000, 28(10): 7-9+59.
- [12] 赵学顺, 戴铁潮, 黄民翔. 电力市场中风险规避问题的研究(二): 差价合约分析系统的实现[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 16-19.  
ZHAO Xueshun, DAI Tiejiao, HUANG Minxiang. Study on risk evasion in electricity market (part two): implementation of an analytical system of the contract for differences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 16-19.
- [13] Mount T. Market power and price volatility in restructured markets for electricity[J]. Decision Support Systems, 2001, 30(3): 311-325.
- [14] Ni E, Luh P B. Forecasting power market clearing price and its discrete PDF using a Bayesian-based classification method[C]//2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194), Columbus, OH, USA: IEEE, 2001.
- [15] Deb R, Albert R, Hsue L L, et al. How to incorporate volatility and risk in electricity price forecasting [J]. The Electricity Journal, 2000, 13(4): 65-75.
- [16] Vucetic S, Tomsovic K, Obradovic Z. Discovering price-load relationships in California's electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 280-286.
- [17] 张永平, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 1-9+32.  
ZHANG Yongping, JIAO Lianwei, CHEN Shousun, et al. A survey of transmission congestion management in electricity markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 1-9+32.
- [18] Dahlgren R, Liu C C, Lawarree J. Using market simulation to manage price risk in a centrally cleared market[C]//1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36364). Edmonton, Alta, Canada: IEEE, 1999.
- [19] 张显, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 电力市场中的双边合同[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 77-86.  
ZHANG Xian, WANG Xifan, CHEN Haoyong, et al. Survey of bilateral contracts in power market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(11): 77-86.
- [20] 张少华, 李渝曾, 王长军, 等. 电力市场中的远期合同交易[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 6-10+50.  
ZHANG Shaohua, LI Yuzeng, WANG Changjun, et al. Forward contracts in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 6-10+50.
- [21] 黄永皓, 尚金成, 康重庆, 等. 电力中长期合约交易市场的运作机制及模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 24-28.  
HUANG Yonghao, SHANG Jincheng, KANG Chongqing, et al. An operation mechanism and model of long and middle term contract market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 24-28.
- [22] 赵学顺, 黄民翔, 韩祯祥. 电力市场中风险规避问题的研究(一): 不同电力市场阶段风险规避模型[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 14-20.  
ZHAO Xueshun, HUANG Minxiang, HAN Zhenxiang. Study on risk evasion in electricity market (part one): risk evasion models corresponding to the different stages of power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7): 14-20.
- [23] 王冠群, 刘锋, 梅生伟, 等. 合同电量优化分解模型计算法[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7): 58-64.  
WANG Guanqun, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Optimization model and algorithm for contract energy decomposition [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(7): 58-64.
- [24] 张少迪. 基于 CSS 的年度合约电量分解方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 135-141.  
ZHANG Shaodi. Annual contract power decomposition method based on CSS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 135-141.
- [25] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 电力系统优化调度概述——经济调度与最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2): 60-63.  
LI Caihua, GUO Zhizhong, FAN Aijun. Summary of power system optimal dispatch: economic dispatch and optimal power flow [J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(2): 60-63.

- [26] 黎灿兵, 胡亚杰, 赵弘俊, 等. 合约电量分解通用模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 26-30.  
LI Canbing, HU Yajie, ZHAO Hongjun, et al. General model and algorithm for contract energy decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 26-30.
- [27] 温丽丽, 刘俊勇, 吴志云, 等. 基于月度滚动修正的合同电量分解算法与应用[J]. 现代电力, 2008, 25(1): 82-87.  
WEN Lili, LIU Junyong, WU Zhiyun, et al. Study and application of resolution algorithm of contract volume based on monthly rolling amendment[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(1): 82-87.
- [28] 施磊, 耿照为, 张晶, 等. 风险适应型的月度发电计划管理模式[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3384-3389.  
SHI Lei, GENG Zhaowei, ZHANG Jing, et al. Risk-adaptable monthly generation scheduling mode [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3384-3389.
- [29] 董京营, 高红均, 刘俊勇, 等. 风电接入下的时序渐进滚动修正调度模型[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1711-1718.  
DONG Jingying, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. The gradually time-sequential rolling revising dispatch model with wind power integration[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1711-1718.
- [30] 王漪, 于继来, 柳焯. 基于月度竞价空间滚动均衡化的年中标电量分解[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 24-27+64.  
WANG Yi, YU Jilai, LIU Zhuo. Decomposition of yearly bided volume based on roll-uniformization of monthly competitive bidding spaces[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 24-27+64.
- [31] 王雁凌, 张粒子, 舒隽, 等. 合同交易量和竞价交易量在日计划中的经济分配[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 45-48.  
WANG Yanling, ZHANG Lizi, SHU Juan, et al. Coordination of the dispatching relationship between the contract volume and competitive bidding volume in daily generation scheduling [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 45-48.
- [32] 蒋东荣, 刘学军, 李群湛. 电力市场环境下电网日发电计划的电量经济分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 94-98.  
JIANG Dongrong, LIU Xuejun, LI Qunzhan. Economically distributing strategies for daily generation scheduling in a power system under power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 94-98.
- [33] 胡书强, 胡利宁, 田捷夫, 等. 基于中长期风电光伏预测的多能源电力系统合约电量分解模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 13-19.  
HU Shuqiang, HU Lining, TIAN Jiefu, et al. Contract power decomposition model of multi-energy power system based on mid term wind power and photovoltaic electricity forecasting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 13-19.
- [34] 陈雨果, 王一, 李嘉龙, 等. 双边交易合约电量的分解模型与结果评估[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8): 32-37.  
CHEN Yuguo, WANG Yi, LI Jialong, et al. Bilateral energy tradecontract decomposition model and results evaluation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8): 32-37.
- [35] 王良缘. 基于粒子群优化的年度合同电量降维分解模型[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11): 63-69.  
WANG Liangyuan. Dimensionality reduction model of annual contract electricity based on particle swarm optimization [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(11): 63-69.
- [36] 杨斌, 杨世海, 曹晓冬, 等. 基于 EMD-QRF 的用户负荷概率密度预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 1-7.  
YANG Bin, YANG Shihai, CAO Xiaodong, et al. Short-term consumer load probability density forecasting based on EMD-QRF[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 1-7.
- [37] 尹楠, 于继来. 考虑火电对空气质量影响的机组检修计划与电能分解方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 72-79.  
YIN Nan, YU Jilai. Generator maintenance scheduling and electric energy decomposition method considering influence of thermal power on air quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 72-79.
- [38] 苏鹏飞. 考虑不确定性的合约电量分解策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [39] 陈建华, 杨莉, 张宁, 等. 基于发电商申报的差价合同电量分解[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 30-

- 34+63.  
CHEN Jianhua, YANG Li, ZHANG Ning, et al. Decomposition of contract for difference based on generation companies declaration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 30-34+63.
- [40] 王步云, 张成刚, 陈艺华, 等. 基于中长期机组组合的外送断面电量极限计算方法[J]. 智慧电力 2018, 46(2): 72-76.  
WANG Buyun, ZHANG Chenggang, CHEN Yihua, et al. Computing method for outwards transmission section electric energy limit based on medium & long-term unit commitment[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 72-76.
- [41] 何治华, 刘友波, 刘俊勇, 等. 考虑多规则约束的统调火电机组合同电量修正策略[J]. 四川电力技术, 2013, 36(3): 52-56.  
HE Zhihua, LIU Youbo, LIU Junyong, et al. Generation contract adjustment strategy for central-dispatched coal-fired units based on multi-constraints of operation and management rules [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2013, 36(3): 52-56.
- [42] 张森林, 孙延明, 张尧. 南方电力市场省间合同转让与置换交易机制研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 262-268.  
ZHANG Senlin, SUN Yanming, ZHANG Yao. Research on mechanism of inter-provincial contract transfer and replacement transaction in south China electricity market[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 262-268.
- [43] LEI Jiansheng, DENG Youman, ZHANG Rui. Congestion management for generation scheduling in a deregulated Chinese power system[C]//2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194), Columbus, OH, USA; IEEE, 2001.
- [44] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 10-13+22.  
WANG Xiuli, GAN Zhi, LEI Bing, et al. Sensitivity analysis approach to transmission congestion management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 10-13+22.
- [45] 李帆, 朱敏. 英国电力市场及输电系统简介[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(2): 33-40.  
LI Fan, ZHU Min. An introduction to the UK electricity pool and NGC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(2): 33-40.
- [46] Singh H, Hao S, Papalexopoulos A. Transmission congestion management in competitive electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 672-680.
- [47] Rau N S. Transmission loss and congestion cost allocation-an approach based on responsibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1401-1409.
- [48] Baran M E, Banunarayanan V, Garren K E. Equitable allocation of congestion relief cost to transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 579-585.
- [49] 陈建华. 中长期差价合同分解及相关问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [50] 刘利, 张新华, 童小娇. 考虑合约市场和日前市场共同风险的发电商报价策略分析[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(1): 61-67+91.  
LIU Li, ZHANG Xinhua, TONG Xiaojiao. Analysis of generation companies' optimal bidding strategy considering risks of contract market and day-ahead market [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(1): 61-67+91.