

燃煤发电机组调停调峰成本的公平分摊

梅天华^{1,2}, 甘德强¹, 谢俊³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国家能源局浙江监管办公室, 浙江 杭州 310007;
3. 南京邮电大学 先进技术研究院, 江苏 南京 210023)

摘要: 首先建立了机组中长期调停的优化模型, 应用公平分配理论中的无嫉妒性、虚拟价格机制和按责任分摊的原则, 分别建立了燃煤发电机组调停调峰成本的无嫉妒性分摊模型、虚拟价格分摊模型和 Shapley 值分摊模型, 并进行了分析比较。应用加总原理解决了不同机组拥有者对公平分配方案的争议。所提模型较好地解决了当前燃煤机组调停调峰成本无法得到补偿以及外来电如何分摊省内机组调停成本等问题。通过浙江电网实际算例, 表明本文所提模型能够平衡各方利益, 解决当前机组调停的公平效率问题。

关键词: 燃煤机组; 机组调停; 成本分摊; 公平; 电力市场; 模型

中图分类号: TM 73; F426

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.011

0 引言

近年来我国新能源特别是风电、光伏、水电、核电发展迅速。此类机组多数调节能力很弱或者调节成本很高, 在电力系统运行中基本不参与实时调节。受当前经济转型影响, 负荷增长远低于装机容量增长, 电力峰谷差不断增大, 因此火力发电厂需要承担的调峰甚至调停调峰的义务急剧增加^[1-4]。经测算, 2015 年浙江电网燃煤机组日均调停容量在 10^7 kW 以上, 燃煤机组“调停”已经成为当前电力运行的新常态。但受当前体制影响, 燃煤机组为新能源消纳承担了大量启停费用, 却得不到任何补偿, 其经济效益以及参与调峰(调停)的积极性受到很大影响。

在国外调峰主要通过市场竞价, 报价高的机组低出力运行或者解网停机, 不存在调峰补偿问题^[5]。而我国长期受调度“三公”及缺电影响, 机组调停的成本疏导机制并未得到重视。为解决当前电网运行中日益严峻的调峰问题^[6], 原国家电监会开展了“两个细则”考核补偿管理, 初步建立了机组调峰和 24 h 之内的启停补偿机制, 但未包含火电长期调停调峰的成本补偿等内容^[7-8]; 东北区域采用市场化报价和补偿分摊相结合的方法, 但交易中仍未包含长期调停成本^[9]。

分摊机制^[10-11]和市场交易机制^[12-13]的设计是当前调峰费用补偿研究的重点。文献^[14]提出了在节能调度模式下, 通过提取调峰电费建立补偿基金, 建立了等效可用负荷率进行分摊的调峰补偿实用化模型, 但是对调度模型的经济性和分摊方法的公平性缺乏论证; 文献^[15]建立了水电/火电机组的调峰能力评估模型, 根据调峰能力和上网电量建立了调峰费用的分摊模型, 起到激励机组参与调峰运行的

作用, 但未考虑机组中长期调停问题; 文献^[16-18]通过合作博弈理论, 将机组启停优化调度看成机组间的协作过程, 建立了合作盈余的分摊模型, 但是核仁、Shapley 值的计算存在“组合爆炸”等问题, 而且启停优化主要采用日前(短期)机组组合为主导的调度模型, 无法适用于当前调停以中长期为主的实际情况, 其中文献^[16]提出的将启停成本直接分摊至负荷的方法, 与当前国内体制差别过大, 现实可行性不足; 文献^[19]对调峰市场的效用进行了分析, 并建立了省间月度调峰交易的基本模型, 但该模型以发电机会成本为基础, 无法适用于省内交易的情况。

当前关于调峰问题的研究或实践要么没有考虑机组调停, 要么套用国外电力运行中的机组组合模型, 无法适用于我国“三公”调度体制。对公平性本质的研究不足, 导致机组所有者对分摊方法合理性的质疑, 影响了模型的现实可行性。由于不含调停的机组调峰成本分摊在“两个细则”和东北调峰市场等实践中已经形成了基本共识, 本文重点研究燃煤火电机组调停调峰成本的公平分摊问题。首先建立了中长期机组优化调停模型, 论证了开机权分配和机组调停的等价性, 从而将调停成本分摊建模为公共物品(开机权)的分配问题, 进而应用文献^[20]的成果, 建立了机组启停的无嫉妒性分摊模型、虚拟价格分摊模型和 Shapley 值分摊模型。为了解决机组拥有者对公平分摊方法的争议, 引入了加总机制^[21], 通过程序公平加以调和。算例表明本文模型可以兼顾公平与效率, 适合当前机组中长期启停调峰成本的分摊, 具备较强的实用性。

1 机组调停的优化模型

1.1 问题的基本描述

我国长期受缺电影响, 当前电力调度仍然以“三

公”为主导^[12],主要采用“轮停”的方法确定调停机组。该方法相对公平,但受体制影响,外来发电机组常作为省内发电的边界条件,不参与“轮停”;另一方面,不同类型机组调停成本差异很大,简单“轮停”对系统运行经济性影响较大,缺乏激励。在成本分摊机制缺位的情况下,调停成本较低的机组不愿承担过多的调停任务。当前可再生能源发展迅速,如果不能充分激发系统的潜在调峰能力,将造成大规模的弃水、弃风、弃核等问题。由于省内燃气机组及水电机组启停调峰已经在上网电价中充分考虑,本文仅研究燃煤机组的调停调峰成本分摊。

1.2 机组调停容量的确定

按规定^[22],原则上系统运行负荷率不低于 70%,机组调停时间不少于 7 d。受电力安全及“三公”调度等影响,实践中调度机构往往通过压低负荷率来提高安全裕度。根据《电网运行准则》(GB/T 31464—2015),电网企业应当开展 7 d 的日 96 点负荷预测。所以本文按调停调度周期 7 d、平均负荷率不小于 0.7 确定调停方案,计算模型为:

$$\min \sum_{i \in n} (1 - V_i) u_{ci} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i \in n} V_i \underline{P}_i \leq (1 - \omega) L_{\min} \quad (2)$$

$$\frac{Q_T}{T \left(\sum_{i \in n} V_i \bar{P}_i \right)} \geq 0.7 \quad (3)$$

其中, $V_i = 1$ 表示开机, $V_i = 0$ 表示调停; u_{ci} 为机组的调停报价; $L_{\min}$ 为调停周期 T 内的最低负荷; ω 为负荷备用率; Q_T 为调停时段的总负荷电量(燃煤机组部分); n 为可调度机组集合; $\underline{P}_i$ 、 $\bar{P}_i$ 分别为机组出力的下限、上限。模型以调停成本最低为优化目标,同时需要满足负荷备用约束式(2)和平均负荷率不小于 0.7 的约束式(3)。没有考虑正备用约束,主要是因为本文模型按照调停成本最少为目标,正备用约束自然满足(如果不能满足,则会削减负荷)。没有考虑网络约束,主要是因为中长期电力电量平衡主要按照分区平衡进行安排,同一区域内视为单母线模型,不同区域内的机组不考虑备用的互济作用。没有考虑年度计划电量对运行的制约作用,主要是因为当继续调停导致其计划电量无法完成时,机组可以通过申报更高的调停价格自行予以调整。

比较式(1)—(3)还可以发现,如果将优化目标修改为: $\max \sum_{i \in n} V_i u_{ci}$, 同时满足约束式(2)、(3),则优化结果与上述模型的求解结果是一致的。目标函数 $\max \sum_{i \in n} V_i u_{ci}$ 可以看成以社会福利(总收益)最大化为目标优化分配“开机权”。所以机组调停问题等价于“开机权”分配问题。

机组开停机安排以调停总成本最低为目标,满足

了系统运行的经济性,但是会导致调停成本低的机组长期承担启停任务,而调停成本高的机组则无需参与调停调峰。如果没有补偿机制,将会导致不公平。如何公平确定补偿金额则是本文继续研究的内容。

1.3 公平的主要原则

从文献[13,20]来看,公平的主要原则有:①无嫉妒性^[13](no envy),即各机组都认为自己的开停机状态和补偿(支付)金额不差于其他机组的开停机状态和补偿(支付)金额;②共担基本义务原则,即每台机组应当免费承担一定的启停义务,超出基本义务部分则根据成本获得相应补偿;③按贡献分配原则,即按照机组在提高系统运行总体社会福利中的作用,分配相应的补偿(支付)费用。无嫉妒性保证了市场主体对分配方案公平性的认可;共担基本义务是我国当前“三公”调度和固定上网电价制的基本出发点;而按贡献分配是按劳分配原则的扩展。这 3 种公平观对应于 3 种不同的公平分配算法,都体现了公平的不同方面。

2 调停成本的公平分摊

2.1 基于无嫉妒性的分摊模型

从开机权分配角度来看,由于机组单位容量的调停成本 $u_{ci}/\bar{P}_i$ 较高,才获得了机组在线运行的权利,机组 i 开机相当于分配其 u_{ci} 的收益。获得开机权的机组应当支付多少费用呢? 由于开机权分配总量主要由系统运行需要的开机容量决定,从无嫉妒性角度来看,获得开机权机组应当支付的单位容量开机费用应当是相同的,假设为 p_1 。如果机组之间存在差别,支付单位容量开机费用高的机组必然认为优待了费用低的机组,从而不满足无嫉妒性。同理对于调停机组而言,其单位容量获得的停机补偿也应当一致,假设为 p_2 。考虑到机组调停至少补偿其成本,所以对调停边际机组,其开机收益 u_{ck} 减去分摊费用与不开机时可以获得的费用相同。假设机组 k 为边际机组,则有:

$$u_{ck} - p_1 \bar{P}_k = p_2 \bar{P}_k \quad (4)$$

从收支平衡来看,有:

$$p_1 \sum_{i \in n_1} \bar{P}_i = p_2 \sum_{i \in n_2} \bar{P}_i \quad (5)$$

其中, n_1 为开机机组集合; n_2 为调停机组集合。由式(4)、(5)可求解得:

$$p_1 = \left(\sum_{i \in n_2} \bar{P}_i / \sum_{i \in n_1} \bar{P}_i \right) (u_{ck} / \bar{P}_k) \quad (6)$$

$$p_2 = \left(\sum_{i \in n_1} \bar{P}_i / \sum_{i \in n_2} \bar{P}_i \right) (u_{ck} / \bar{P}_k) \quad (7)$$

其中, $n = n_1 \cup n_2$ 。

从无嫉妒性角度来看,开机机组 i 为获得开机权应当支付费用 $p_1 \bar{P}_i$, 而调停机组 j 则获得 $p_2 \bar{P}_j$ 的费

用。无嫉妒分摊模型仅按照边际机组确定支付费用,单位容量调停成本低的机组参与调停还可能获得额外收益,有利于推动启停调峰补偿和激励机组参与调停。

2.2 基于虚拟价格的分摊模型

在我国发电机组普遍采取固定上网电价机制,其价格核定的主要依据是发电成本加合理利润,而成本中已经包含了一定量的机组调停费用,因此机组有义务承担一部分免费调停调峰义务。从平均状态来看,虚拟价格 VP(Virtual Price) p_v 就是固定上网电价中用于补偿机组调停成本的那部分价格,只补偿超出虚拟价格的那部分调停成本才是公平的。不调停的机组(获得开机权的机组)则应当把包含在固定电价中的 p_v 部分收益,按照调停成本情况支付给参与调停的机组。对于 $u_{ci} < p_v \bar{P}_i$ 的机组,如果不调停,则应当支付 $p_v \bar{P}_i$ 的费用;而对于 $u_{ci} > p_v \bar{P}_i$ 的那部分机组,从补偿成本的角度看,其调停时获得的费用为 $u_{ci} - p_v \bar{P}_i$ 。

上述是从平均固定上网电价的定价机制角度,对虚拟价格原理及其合理性进行了描述。实践中由于系统运行方式不同, p_v 的数值将相应变化,文献[20]对这一方法的合理性及其特性进行了深入分析。采用虚拟价格机制时,由于不调停机组需要支付 $p_v \bar{P}_i$ 的费用,所以 $u_{ci} < p_v \bar{P}_i$ 的机组会主动要求调停。基于虚拟价格的分摊模型为:

$$\sum_{i \in n} (u_{ci} - p_v \bar{P}_i)_+ = \sum_{i \in n_1} u_{ci} \quad (8)$$

获得开机权的机组支付 $p_v \bar{P}_i (i \in n_1)$ 的费用,而停机机组获得的费用为 $(u_{cj} - p_v \bar{P}_j)_+ (j \in n_2)$ 。其中,有:

$$(u_{cj} - p_v \bar{P}_j)_+ = \max(u_{cj} - p_v \bar{P}_j, 0) \quad (9)$$

实际分摊时,先由式(8)计算 p_v ,然后分别计算各机组的收支费用,显然该方法不满足无嫉妒性。

2.3 基于 Shapley 值的分摊模型

Shapley 值的本质是根据参与人对合作联盟的边际贡献量分配合作盈余,体现按贡献分配的公平理念。调停成本分摊问题等价于开机权分配问题,仅有集合 $S \subseteq n$ 中的机组参与开机权分配时,其合作收益为:

$$\pi_S = \max_{i \in S} V_i u_{ci} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i \in S} V_i \bar{P}_i \leq (1 - \omega) L_{\min} \quad (11)$$

$$\frac{Q_T}{T \left(\sum_{i \in S} V_i \bar{P}_i \right)} \geq 0.7 \quad (12)$$

约束条件式(11)、(12)表明,从平均负荷率和备用要求来看,可调机组的开机容量不能过多。仅由 S 中的机组开机时,负荷平衡是不能保证的。从

尽量减少负荷损失来看,所有机组均应当开机,而这已经包含在式(10)~(12)所示的模型中。

对于上述合作博弈,超加性一般是不成立的,应用 Shapley 值进行分摊,主要是因为机组是否开机,不是机组自行合作的结果,而是由系统运行的需要强制决定,机组自身并没有选择权^[23]。

合作博弈的 Shapley 值^[16]计算公式如下:

$$\gamma_i(\pi) = \sum_{\psi \subseteq n} \sum_{i \in \psi} \frac{(|n| - |\psi|)! (|\psi| - 1)!}{|n|!} (\pi_\psi - \pi_{\psi/i}) \quad (13)$$

其中, $|\psi|$ 表示集合 ψ 中包含的机组数量; ψ/i 表示集合 ψ 去除机组 i 后形成的集合。各机组收支情况为:开机机组 i 支付 $u_{ci} - \gamma_i(\pi)$ 的费用,停机机组 j 获得 $\gamma_j(\pi)$ 的收入。式(13)中,集合 ψ 的数量为 $2^n - 1$,所以计算机组 i 的 Shapley 值时,需要求解式(10)~(12)共 $(2^n - 1)$ 次,当机组数量较多时其计算复杂性是不可接受的。文献[20]针对整数分配问题,提出了式(13)的近似算法,文献[18]结合机组组合的实际背景,提出了“聚类法”和“双边 Shapley 值”等简化算法。由于调停成本分摊主要为了平衡各方利益,而发电机组所属发电集团间的利益平衡尤其关键。浙江省能源集团公司及五大发电集团在浙分公司等,也曾多次提出按照集团进行利益平衡的诉求。所以在浙江电网的算例中,本文采用按照发电集团“聚类”的方法计算 Shapley 值。

3 公平争议的处理

本文第2节中的3种分摊方法,是从不同侧面提出的公平分摊方案。这3种方法都是公平的,且都能一定程度解决利益平衡问题。机组拥有者总是从最有利于自身的角度提出分摊方法。在实践中到底如何分摊,需要对参与人的不同诉求进行磨合。“加总(aggregation)”是解决这一问题的常用方法,文献[24]从 k 分配性(k -allocation property)、有界性、单调性等角度,对加权平均加总方法进行了公理化。由于加总不是本文研究重点,本文仅仅将这一结论应用于分摊模型的构建,据此分摊算法表述如下。

a. 参与人(机组) i 在第2节的3种分摊方法中任选1种分摊策略,形成分摊方案 $\hat{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 。

b. 各参与人的分摊方案依次排列后形成 $m \times m$ 阶分摊矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mm} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, x_{ij} 表示在参与人 i 的分摊方案中参与人 j 的份额。

c. 加权平均加总分摊就是对这一矩阵根据权重

按列求取平均值,形成集体分摊方案。记列向量 $\check{x}_j=[x_{1j},\cdots,x_{mj}]^T$,考虑加总后参与人 j 的分摊份额为 $y_j=\sum_{i\in I}\xi_i x_{ij}$,其中 $\xi_i>0$, $\sum_{i\in I}\xi_i=1$,可取 $\xi_i=1/m$ 为简单平均,类似选举中的“一人一票”;取 $\xi_i=\bar{P}_i/(\sum_{i\in I}\bar{P}_i)$ 为按机组容量占比加权平均,类似股份公司的“同股同权”。

由于加总分摊份额 y_j 关于 x_{ij} 单调递增,且各参与人有且只有1次机会提出分摊方案,所以按自身收益最大(支付最少)的分摊方法提出分摊方案将是一个弱占优策略。

4 算例及分析

4.1 简单模拟算例

算例包含10台机组,1—8号机组为常规燃煤火电机组,9号机组为核电机组,10号机组为外来电机组。

假设交易期内最高负荷预测值为3800 MW,最低负荷为2700 MW,总用电量为492.2 GW·h。各机组单位容量的调停报价如图1所示。机组根据1.2节模型计算结果为3号机组或4号机组调停、8号机组调停,这主要是因为8号机组单位容量调停报价最低;没有选择单位容量调停报价次低的5—7号机组调停,主要是因为开停机具有0–1整数性质,5—7号机组调停总成本较高。此时调停总容量为1300 MW,调停总费用为175万元,边际调停价格为0.1667万元/MW(4号机组为边际机组)。

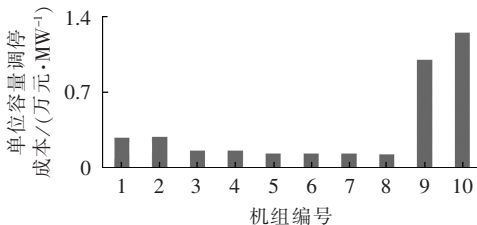


图1 单位容量的调停成本
Fig.1 Unit shutdown cost per MW

表1列举了无嫉妒性分摊、虚拟价格分摊、Shapley值分摊、简单平均加总分摊和加权加总分摊情况(负数表示支出,正数表示收入),从中可以看出各种分摊方法均满足收支平衡。无嫉妒性分摊按照边际调停价格结算,所以单位调停成本较低的8号机组获得了超出成本的收益,这一特性是虚拟价格分摊方法和Shapley值分摊方法都不具备的。与此对应的是,无嫉妒性分摊时开机机组需要支付的费用相应最多。

由于开机机组较多,根据式(8)计算的虚拟价格较低,仅为0.0321万元/MW,所以调停机组均获得了 $u_{ij}-p_v\bar{P}_j>0$ 的补偿。虚拟价格体现的是成本补偿

表1 各模型的机组调停补偿费用分摊情况
Table 1 Cost allocation by different models

机组 编号	费用分摊/万元				
	无嫉妒 性分摊	虚拟价格 分摊	Shapley 值分摊	简单平均 加总分摊	加权加总 分摊
1	-4.969	-4.014	-3.925	-4.047	-4.056
2	-4.969	-4.014	-3.933	-4.053	-4.062
3	-11.927	-9.633	-11.856	-11.419	-11.456
4	38.073	40.367	38.144	38.582	38.544
5	-23.853	-19.266	-18.675	-19.311	-19.353
6	-23.853	-19.266	-18.675	-19.311	-19.353
7	-23.853	-19.266	-18.675	-19.311	-19.353
8	126.911	92.890	93.825	96.947	97.296
9	-39.755	-32.110	-31.175	-32.220	-32.291
10	-31.804	-25.688	-25.056	-25.857	-25.915
合计	0	0	0	0	0

原则,所以不会出现机组收入大于调停成本的情况。开机机组按容量支付费用,所以尽管开机收益不同,1号机组和2号机组需要支付的费用是相同的,而9号、10号机组尽管调停报价相同,受容量差异其需要支付的费用不同。

Shapley值体现按贡献(责任)分摊的原则,一般而言调停报价高的机组需分摊的费用也相应较高,所以2号机组支付费用略高于1号机组。“加总分配”由于引入了“程序公正”机制,分摊结果争议较小。采用加权分摊时,由于8号机组容量较大,而无嫉妒性分摊对其最为有利,所以相比简单平均加总分摊方法,加权加总分摊方案更接近于无嫉妒性分摊。从表1还可以看出,尽管完全相同的3号机组和4号机组两者只有1台可以开机,但始终有“3号机组支付+4号机组收入=3.4号机组开机调停报价”,满足式(4),所以3、4号机组净收益相同,满足“无嫉妒性”。

4.2 实际场景算例

2014年8月浙江省某地电网共有燃煤火电机组66台,总装机35695 MW,其中浙能集团(J₁)36台装机17260 MW,华能集团(J₂)8台装机5260 MW,大唐集团(J₃)4台装机2400 MW,国电集团(J₄)4台装机3200 MW,华电集团(J₅)2台装机265 MW,神华集团(J₆)10台装机5310 MW,华润集团(J₇)2台装机2000 MW。外来电中,中核集团(J₈)5台装机3980 MW,三峡集团(J₉)(宾金直流)9台装机(按落地量计算)6400 MW。以8月14日至20日调停安排为例计算成本分摊,该段时间内累计电量4.58×10⁹ kW·h,最高负荷35448 MW,最低负荷22477 MW(燃煤机组部分)。机组开停机安排及费用分摊如表2所示。

以调停成本最低为目标,优化结果为:共调停15台机组,合计7165 MW。从机组分布来看,调停机组主要集中在小型机组较多的浙能集团。除神华集团外,参与调停的发电集团均获得了调停收益。神华集团需要支付费用,主要是因为该集团共有10台机

表 2 各发电集团的机组调停补偿费用分摊情况
Table 2 Cost allocation to different generation groups

发电集团	调停数量/台	费用分摊/万元				
		无嫉妒性分摊	虚拟价格分摊	Shapley 值分摊	简单平均加总分摊	加权加总分摊
J ₁	10	295.52	174.67	326.25	257.99	245.94
J ₂	2	181.85	166.80	143.09	158.01	159.72
J ₃	0	-57.42	-39.79	-59.33	-50.78	-49.22
J ₄	0	-76.56	-53.05	-75.48	-66.08	-64.27
J ₅	1	14.43	7.61	5.94	7.71	7.80
J ₆	2	-61.66	-51.03	-73.82	-62.61	-60.84
J ₇	0	-47.85	-33.16	-50.27	-42.69	-41.33
J ₈	0	-95.22	-65.98	-90.40	-80.62	-78.63
J ₉	0	-153.09	-106.08	-125.99	-120.92	-119.18
合计	15	0	0	0	0	0

组,其需承担调停义务较大。从结算总量来看,虚拟价格分摊机制的调停补偿金额较小,所以没有参与调停的机组多数倾向于虚拟价格分摊。Shapley 值分摊转移金额较大,从计算结果看,承担大量调停的浙能集团显然倾向于 Shapley 值分摊。华能集团和华电集团从无嫉妒性分摊中获得最大收益,会要求按无嫉妒性模型分摊。

采用加总分摊方案可以较好地调和参与人诉求,容易在参与人之间形成共识。表 2 第 6、7 列显示了加总分摊的结果。考虑到 2014 年夏季机组调停主要是由于不调峰外来电引起的,从平衡本地发电和外来电利益的角度,采用简单平均加总分摊方案,可以最大限度向外来核电和水电分摊调停成本。

5 结论

为解决当前电力调停调峰利益格局不公平、机组调停安排经济性不足、启停成本无法分摊等问题,本文建立了切合当前电力运行体制和惯例的机组调停安排及成本分摊模型。主要研究成果如下:

- a. 建立了机组中长期优化调停模型;
- b. 从无嫉妒性、虚拟价格及按责任分摊等角度,分别建立了启停成本的无嫉妒性分摊模型、虚拟价格分摊模型和 Shapley 值分摊模型;
- c. 从程序公平角度引入加总机制,解决了参与人对分摊方案的争议;
- d. 采用简单平均加总分摊机制,可以较好地平衡本地发电和不调峰外来电之间的利益矛盾,有利于促进清洁能源消纳。

参考文献:

[1] 吴慧军,申建建,程春田,等. 网省两级调度多电源短期联合调峰方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2743-2755.
WU Huijun,SHEN Jianjian,CHENG Chuntian,et al. Coordination method of regional and provincial grids for short-term peak shaving operation among hybrid energy sources[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(11):2743-2755.

[2] 张志锋,徐箭,闫秉科,等. 考虑特高压送风电的湖北电网调峰方案[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):6-11.
ZHANG Zhifeng,XU Jian,YAN Bingke,et al. Hubei Power Grid peak load regulation considering wind power transmitted by UHV network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):6-11.

[3] 侯婷婷,娄素华,吴耀武,等. 含大型风电场的电力系统调峰运行特性分析[J]. 电工技术学报,2013,28(5):105-111.
HOU Tingting,LOU Suhua,WU Yaowu,et al. Analysis on peak load regulation operation characteristics of power system integrated with large-scale wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):105-111.

[4] 姜欣,陈红坤,向铁元,等. 考虑调峰特性的电网风电接入能力分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):13-18,25.
JIANG Xin,CHEN Hongkun,XIANG Tiejuan,et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):13-18,25.

[5] 王若谷,王建国,张恒,等. 水电机组调峰服务的成本分析及实用补偿方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):41-46.
WANG Ruogu,WANG Jianxue,ZHANG Heng,et al. A cost analysis and practical compensation method for hydropower units peaking service[J]. Automation of Electric Power systems,2011,35(23):41-46.

[6] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等. 基于热风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):30-34.
LONG Hongyu,XU Ruilin,HE Guojun,et al. Analysis of peak load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):30-34.

[7] 原国家电监会. 关于印发并网发电厂辅助服务管理暂行办法的通知(电监市场[2006]43号)[EB/OL]. (2011-02-23)[2015-07-16]. http://china.findlaw.cn/jingjifa/dianlifa/dlfg/43563_2.html.

[8] 原华东电监局. 关于印发《印发实施华东区域发电并网运行管理实施细则(试行)》和《华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)的通知》(华东电监市场 2009[65]号)[EB/OL]. (2008-12-25)[2015-07-16]. <http://www.doc88.com/p-6721807661172.html>.

[9] 国家能源局东北监管局. 东北电力调峰辅助服务市场监管办法[EB/OL]. (2014-09-28)[2015-07-16]. <http://www.docin.com/p-70153000.html>.

[10] 赵云丽,吕泉,朱全胜,等. 风电并网后系统旋转备用费用分摊方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):154-160.
ZHAO Yunli,L Ü Quan,ZHU Quansheng,et al. Spinning reserve cost apportionment for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):154-160.

[11] 王娟娟,吕泉,李卫东,等. 电力市场环境需求侧 AGC 成本的分摊策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):31-35.
WANG Juanjuan,LÜ Quan,LI Weidong,et al. Allocation of customer-side AGC cost in electricity market environment [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):31-35.

[12] 梅天华,甘德强. 基于调度“三公”的浙江电力调峰交易市场模型[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(2):369-376.
MEI Tianhua,GAN Deqiang. Market model of Zhejiang peak load regulation market based on principles of openness,equity and justness [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2016,50(2):369-376.

[13] 梅天华,李磊,陈靖文. 考虑外来电分摊的浙江燃煤机组调停调

- 峰市场机制研究[J]. 电力建设,2016,37(3):117-123.
- MEI Tianhua,LI Lei,CHEN Jingwen. Shut-down peaking market mechanism of Zhejiang coal-fired units considering import power allocation[J]. Electric Power Construction,2016,37(3):117-123.
- [14] 胡建军,胡飞雄. 节能发电调度模式下有偿调峰补偿新机制[J]. 电力系统自动化,2009,33(10):16-18.
- HU Jianjun,HU Feixiong. A novel compensation mechanism of remunerative peak load regulation under energy-saving dispatch framework[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(10):16-18.
- [15] 谢俊,白兴忠,甘德强. 水电/火电机组调峰能力的评估与激励[J]. 浙江大学学报(工学版),2009,43(11):2079-2084.
- XIE Jun,BAI Xingzhong,GAN Deqiang. Evaluation and incentive mechanism of peaking capability of hydroelectric/thermoelectric generators[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2009,43(11):2079-2084.
- [16] HU Zhaoyang,CHEN Lin,GAN Deqiang,et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):653-662.
- [17] XIE Jun,BAI Xingzhong,FENG Donghan,et al. Peaking cost compensation in Northwest China Power System[J]. European Transactions on Electrical Power,2009,19(7):1016-1032.
- [18] 谢俊,张晓花,吴复霞,等. 基于合作博弈论和工程方法的调峰费用分摊[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(11):16-23.
- XIE Jun,ZHANG Xiaohua,WU Fuxia,et al. Peaking cost allocation using cooperative game theory and engineering concept[J]. Power System Protection and Control,2012,40(11):16-23.
- [19] 梅坚,杨立兵,李晓刚,等. 调峰市场效用分析与低谷调峰市场设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(21):134-138.
- MEI Jian,YANG Libing,LI Xiaogang,et al. Utility analysis for peak regulation market and trading market design for peak regulation capacity in valley time[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(21):134-138.
- [20] MOULIN H J. Three solutions to a simple commons problem[J]. Seoul Journal of Economics,2001,14(3):245-267.
- [21] DIETRICH F. A generalized model of judgment aggregation[J]. Social Choice and Welfare,2007,28:529-565.
- [22] 国家发改委. 关于加强和改进发电运行调节管理的指导意见(发改运行[2014]985号)[EB/OL]. (2014-05-18)[2015-07-16]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/jjyx/zhd/201405/t20140522_612456.html.
- [23] 甘德强,杨莉,冯冬涵. 电力市场与电力经济[M]. 北京:机械工业出版社,2010:118-122.
- [24] ACZEL J,WAGNER C. A characterization of weighted arithmetic means[J]. Siam Journal on Algebraic & Discrete Methods,1980,1(3):259-260.

作者简介:



梅天华

梅天华(1980—),男,浙江台州人,博士,研究方向为电力市场与电力系统负荷侧管理(E-mail:352252271@qq.com);

甘德强(1966—),男,重庆人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定性与电力市场;

谢俊(1979—),男,安徽安庆人,副教授,博士,研究方向为电力市场与电力系统

优化运行。

Fair allocation of coal-fired unit shutdown cost for peaking in valley time

MEI Tianhua^{1,2},GAN Deqiang¹,XIE Jun³

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Energy Regulatory Office of National Energy Administration, Hangzhou 310007, China;

3. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: An optimal unit commitment model of mid/long term shutdown for peaking is proposed and three cost allocation models of coal-fired unit shutdown for peaking in valley time are established respectively based on “no envy”, virtual price and Shapley value according to the “no envy” concept, virtual price mechanism and responsibility principle of fair allocation theory, which are analyzed and compared. The aggregation method is applied to treat the controversy of different unit owners over the fair allocation scheme. The proposed models can be used to solve some problems properly, such as the compensation of coal-fired unit shutdown cost for peaking in valley time, the allocation of provincial unit shutdown cost for peaking in valley time to the electricity from outside, etc. With Zhejiang Power Grid as an example, the proposed models can properly balance the benefits of different sides and enhance the fairness and efficiency of unit shutdown for peaking in valley time.

Key words: coal-fired unit; shutdown; cost allocation; equity; electricity market; models