

## 考虑碳排放成本的备用市场竞价模型

施泉生<sup>1</sup>, 李士动<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 山东国泰科技有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 以电力低碳化发展趋势为背景, 以备用资源优化配置为目的, 提出了能够体现碳减排因素的备用市场竞价模型。该模型建立机组备用需求曲线, 以考虑容量事故随机性特性和实现多种备用资源的协调配置; 应用外部性内在化理论, 将边际碳排放成本内置到机组备用报价中, 以得到的边际综合成本作为竞价依据, 从而反映机组碳排放特性的影响。最后采用供给与需求理论方法获得备用决策最优解。对该竞价方法与传统竞价方法进行了比较, 比较结果证明该方法可以找到最优的备用配置点, 同时具有碳减排激励作用。该方法兼顾了备用服务的市场化运营与碳减排要求, 算例结果也验证了这一点。

**关键词:** 备用市场; 竞价模型; 碳排放; 外部性内在化; 供给与需求

### A reserve market bidding model considering carbon emission costs

SHI Quan-sheng<sup>1</sup>, LI Shi-dong<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shandong Guotai Technology Co., Ltd, Taian 271000, China)

**Abstract:** On the background of low carbon trends of electric power sector, a reserve market bidding model considering carbon emission reduction is presented. A reserve demand curve is built firstly, which can consider the uncertainty of contingencies and coordinate the allocation of multiple reserve resources. Internalization of externalities theory is applied and according to which the marginal carbon emissions cost is internalized into the bids to get the marginal overall cost to reflect the affects of carbon emission. Last, supply and demand theory is used to obtain the decision point. The differences of the presented method is compared with the traditional method, results show that the former can realize optimal allocation of reserve resources, and also has incentives to the reduction of carbon emission. Case study demonstrates the presented method can balance both marketing operation of reserve service and carbon emission reduction requirements.

**Key words:** reserve market; bidding model; carbon emission; internalization of externalities; supply and demand

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)16-0040-06

## 0 引言

当前, 全球气候变暖迫使各国制定 CO<sub>2</sub> 减排目标和相应低碳发展路线, 我国对此也积极响应, 提出 2020 年单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放比 2005 年下降 40%~45% 的目标。电力行业作为我国国民经济中最大的 CO<sub>2</sub> 排放部门, 必须在其相关环节引入低碳因素, 发展低碳电力, 积极应对碳减排挑战<sup>[1-2]</sup>。

作为电力市场重要组成部分, 备用服务市场主要用于应对可能的负荷意外波动、突发事件等造成的容量缺额问题, 承担着保证电力系统安全运行的重要职能。当前间歇性可再生能源尤其是大规模风电的并网往往要求火电机组提供大量备用, 因此我

国也存在着加快建设备用资源市场化配置机制的迫切需要, 国际上各主要电力市场大都进行竞价交易, 以提高备用获取的经济性<sup>[3-6]</sup>, 备用资源也分为两类来源: 一类是增加电源侧出力, 除了传统上的各类发电机组外, 需求侧自治微网、电动汽车等在未来智能电网环境下也可以用来提供备用服务; 另一类是削减需求侧负荷, 即为可中断负荷(Interruptible Load, IL)。一般认为两种备用资源之间可以协调配置以降低备用成本, 但传统上仅以购买成本最小的方法只注意到两者在保证系统容量充裕性上的等价性, 而忽略了两者的效用差异, 主要是机组备用的负外部性, 如一些机组提供备用服务时也将产生碳排放。显然, 低碳环境下备用决策应计及排放因素, 这是发展低碳电力必然要求。

目前的研究多集中于实现电能交易与节能减

基金项目: 上海市教委科研创新重点课题(12ZS161)

排政策的有效衔接<sup>[7-9]</sup>,而在备用市场中计及碳排放因素的研究较少。文献[10-11]认识到IL与机组备用效用的等效性与差异性;文献[12-14]研究了IL、机组备用及电动汽车等多种备用资源的协调配置。以上文献都注意到不同类型备用资源之间的经济互补性,但没有考虑碳排放特性差异。文献[15]构建了计及碳排放因素的需求侧备用竞价模型,但没有考虑与机组备用的协调;文献[16]则采用粒子群及熵权决策方法寻找含有碳减排目标的多目标最优解,但无法考虑容量事故随机性的特性。

本文针对低碳环境下事故备用容量(10 min 备用)的配置问题进行研究。场景设置在日前市场,在电能主市场出清的基础上,发电商可将富裕容量参与备用市场竞价,IL也可以参与报价,交易时段为1个小时,均采用市场出清电价(Market Clearing Price, MCP)的结算模式。本文在分析机组备用的机会价值随机性特性基础上,建立机组备用需求曲线;同时,将机组碳排放外部成本内置到机组备用报价中,以得到的边际综合成本作为备用机组竞价依据,通过供给与需求理论方法从社会成本最小角度实现备用资源优化配置。

## 1 考虑事故随机性的机组备用需求曲线

电力市场环境下,IL以投标(或签订IL合同)方式参与备用市场交易,显然以此作为机组备用的机会或风险成本,可以实现两类备用资源的协调配置。假设以IL应对容量缺额时,对某一IL的支付费用为 $C_i(r)$ ,则以总花费的费用最小为目标,如式(1)。

$$\min \sum_{i \in I} C_i(r) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i \in I} r_i = Q_m & (m = 1, 2, \dots, M) \\ r_{i \min} \leq r_i \leq r_{i \max} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I$  为IL用户总量;  $r_i$  为用户  $i$  负荷中断量;  $r_{i \min}$ 、 $r_{i \max}$  为  $r_i$  取值的限值;  $M$  为容量事故集; 定义事故场景  $(p_m, Q_m)$ ,  $p_m$  为事故概率,  $Q_m$  为容量缺额, 上述预想事故集可以通过枚举法或蒙特卡洛模拟法获得。

上述表示仅以IL应对某  $m$  容量事故时的最小费用, 假设为  $C_{\min}(Q_m)$ 。若购买机组备用量为  $R$ , 则  $C_{\min}(Q_m)$  减少期望值为

$$E(R) = \sum_{m \in M} p_m \cdot [C_{\min}(Q_m) - C_{\min}(Q_m - R)] \quad (3)$$

式中, 若  $R \geq Q_m$ , 即备用  $R$  足够多, 足以应对容量缺额, 此时  $C_{\min}(Q_m - R)$  为零值。

显然  $E(R)$  即为机组备用  $R$  的机会价值。不同的  $R$  值下, 机会价值  $E(R)$  是不同的, 假设备用取值为  $R_j$ , 则可以计算其边际机会价值  $M_B(R_j)$  为

$$M_B(R_j) = \frac{E(R_j) - E(R_{j-1})}{R_j - R_{j-1}} \quad (4)$$

式(4)表示以IL成本为标准衡量的机组备用的边际价值。根据经济学理论, 据此得到的机组备用边际价值曲线可以作为其相对需求曲线<sup>[17]</sup>, 记为  $(R(R_j), M_j)$ 。

## 2 基于外部性内在化理论的备用竞价模型

### 2.1 模型理论思想

从发电商私人角度出发, 机组备用的容量与电量成本可以表示备用的“生产”成本, 即内部成本, 传统的备用决策方法仅考虑内部成本, 而没有计及机组因此而产生的外部性成本, 无法从社会角度实现备用的最优配置。低碳经济环境下, 碳价的引入使得碳排放变为显性成本, 对备用决策而言也应随之转变为计及这一显性成本的综合成本决策。

根据外部性内在化理论<sup>[18]</sup>, 可以将碳排放以外成本的方式嵌入到备用报价中, 从而有效衔接备用市场交易与碳减排目标。由此, 本文定义机组备用边际综合成本为

$$M_{SC} = M_{PC} + M_{EC} \quad (5)$$

式中:  $M_{SC}$  为边际综合成本;  $M_{PC}$  为边际内部成本;  $M_{EC}$  为机组边际外部成本, 本文指碳排放成本。

设机组竞价序列对为  $(P_r, P_e, R)$ ,  $P_r$ 、 $P_e$  为容量价格与电量价格, 两者报价一般为阶梯状递增曲线。由此可以得到  $M_{PC} = P_r + \sum_{m \in M} p_m \cdot P_e$ , 电量成

本属于不确定性成本, 支付与否取决于事故是否发生, 所以应计及事故概率; 而容量成本是确定性的, 不论事故是否发生都要对中标机组进行支付。机组备用容量配置量为本文的决策变量, 最优的配置量可以实现备用预期总成本最小, 显然容量成本也会随之达到最小, 此时, 为了防止发电商通过减小电量电价而增大容量电价进行报价投机, 电量电价可以采用机组在电能市场上的报价或合同电价。

### 2.2 边际碳排放外部成本确定

本文外部性内在化方法的关键在于机组边际碳排放成本的计算, 由文献[19]知常规火电机组电

碳特征函数为

$$e = \frac{f}{q} \frac{1}{\eta} g \quad (6)$$

式中： $e$  为  $\text{CO}_2$  排放量；本文考虑燃质可充分燃烧的情况，此时  $f$  为单位燃质的  $\text{CO}_2$  量排放量，可将其表示为  $f = M_{\text{CO}_2} / M$ ，其中， $M_{\text{CO}_2}$ 、 $M$  为排放量与电厂所用燃质质量； $q$  为单位燃质发热值； $\eta$  为机组发电效率； $g$  为发电功率，显然也表示机组的单位小时发电量。

由  $\text{CO}_2$  分子量关系得

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} M \alpha\% \quad (7)$$

式中， $\alpha\%$  表示燃质中基碳含量百分值，可以通过火电厂媒质数据获取。

联立式(6)、式(7)得到机组碳排放因子  $\beta$  为

$$\beta = \frac{de}{dg} = \frac{44}{12} \frac{\alpha\%}{q\eta} \quad (8)$$

式中， $\beta$  的单位为  $\text{kg}/\text{MWh}$ ，可以表示机组不同出力水平状态下单位发电量的  $\text{CO}_2$  微增量。

由式(8)知，常规机组碳排放因子  $\beta$  与机组效率  $\eta$  有关，而  $\eta$  受机组出力水平影响，这又涉及该时段电能市场中标量，但考虑到发电效率通常往往随机组出力水平变化而在较小范围内波动，对于提供备用容量的机组，其出力变化范围并不会太大，因此可假定机组效率在这一范围为常数，此时可以将碳排放因子简化为常数，从而不再考虑出力水平的影响，降低与电能市场的耦合关系。

综上，得到机组备用边际综合成本为

$$M_{\text{SC}} = P_r + \sum_{m \in M} p_m \cdot (P_e + \lambda \beta) \quad (9)$$

式中， $\lambda$  为  $\text{CO}_2$  排放指标价格，真实情况下应取自每排放 1 单位  $\text{CO}_2$  而造成的环境损害成本，显然碳排放成本也应属于不确定性成本。

式(9)显然可以容纳水电、碳捕集等零碳排放或低排放机组，对于采用碳捕集及封存技术(Carbon Capture and Storage, CCS)的机组，捕集过程也将导致机组净对外输出功率下降，捕集率一定时的  $\text{CO}_2$  对外等效碳排放因子并不随该功率值变化而变化，所以其边际碳排放成本可依然等效为常数。

### 2.3 模型特征分析

外部成本内在化的核心思想是根据机组边际碳排放成本加收外部成本，以促使发电商将排放成本内置到备用报价中，从而得到机组边际综合成本。然而考虑到备用需求用户的成本分摊负担，实际结

算时可不对机组征收其碳排放成本，只是以此修正机组备用报价曲线，从而通过得到的边际综合成本曲线找到真正意义的备用配置最优点  $R^*$  (见下文)，对中标机组可依然根据其内部成本报价结算。

电力市场环境下，传统备用竞价模式仅依据机组内部成本报价竞价上网，导致一些低效率、高排放、成本低的小机组被安排为备用，造成资源浪费、环境污染。显然，单纯市场竞价与碳减排政策并不一致，通过文中边际综合成本形成备用序位表，可使低排放的机组优先被安排为备用，实现备用市场减排的目的；同时，边际综合成本是基于内部成本报价产生，反映了备用主体的经济意愿，符合电力市场运行规律。

### 3 备用配置最优点

当机组备用的边际综合成本  $M_{\text{SC}}$  等于其边际机会价值  $M_B$  时，得到最优的备用配置点为

$$M_B(R^*) = M_{\text{SC}}(R^*) \quad (10)$$

如图 1 所示，可以找到最优点  $(R^*, M_B(R^*))$ ，从而搜索到位于边际点的机组，所有边际综合成本小于  $M_B(R^*)$  的机组都将中标，对于 IL 则可以针对具体的容量事故根据式(1)、式(2)选择。

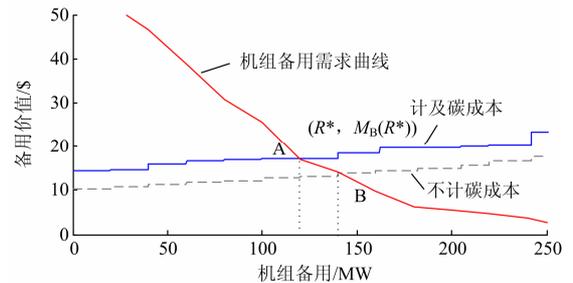


图 1 最优机组备用容量确定

Fig. 1 Optimum units reserve capacity

应指出，机组备用要考虑机组容量约束和爬坡速率约束，采用外部性内在化法后并不会增加形成图 1 所示供给曲线的难度，可依然采用排队法求解。

### 4 仿真分析

#### 4.1 算例描述

某日前市场上，IL 与发电商 G 针对某时段的备用报价数据如表 1 所示，容量事故集场景如表 2 示。备用的电量电价采用该电能市场统一出清电价，设为 60 \$/MW，欧盟碳交易体系运行实践表明，碳排放指标价格  $\lambda$  波动较大，最高可以达到 40 \$/t，本文将  $\lambda$  取为 30 \$/t。并假设对中标的备用机组根

表 1 某时段备用市场竞价数据

Table 1 Bids of reserve market

IL	报价/ (\$/ MW)	容量/ MW	G	报价/ (\$/ MW)	容量/ MW	$\beta$ / (kg/MW·h)
IL1	90	20	G1	2.5	20	1 100.55
	180	40		5	40	
	300	62		8	55	
IL2	110	21	G2	3	20	900.32
	200	41		5.4	40	
	340	61		9	62	
IL3	130	19	G3	3.5	20	1 520.7
	220	41		6	40	
	380	61		9.5	62	
IL4	145	21	G4	4	20	1 050.25
	245	43		6.5	42	
IL5	160	20	G5	4.4	20	1 200.76
	270	41		7.2	43	

表 2 容量事故集

Table 2 Fault sets

事故	发生概率	容量缺额/MW
1	0.06	100
2	0.04	150
3	0.03	250

据其内部成本报价也采用 MCP 方式结算。

#### 4.2 两种备用资源的协调优化

如图 2 所示, 通过文中方法计算各事故下的预期总成本(包括机组备用内部成本、实际碳排放成本和 IL 成本)与机组备用成本分量。分析图中曲线知: 1) 备用决策时应充分利用多种备用间的经济互补性, 某一种备用过多或过少都将使预期总成本增大, 备用配置存在最优点; 2) 最优的机组备用配置量与事故概率及容量缺额有关, 小概率的严重事故(事故 3) 对备用配置往往有着较大的影响, 应在全面模拟整个事故集的基础上做出备用决策。由文中第 1 部分知, 图 1 中需求曲线的建立融入了容量事故的随机性本质, 同时也可以协调配置不同类型备用, 可由图 2 直观得到这种协调配置对预期备用总成本的影响。

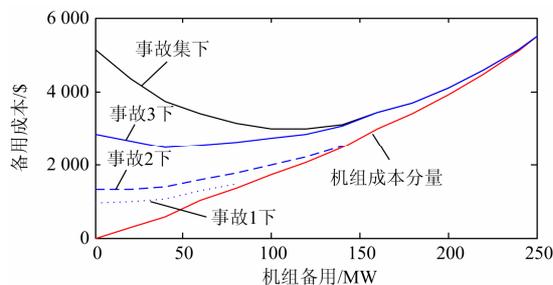


图 2 不同机组备用的成本曲线

Fig. 2 Cost curve on different units reserve capacity

#### 4.3 碳排放因素对备用配置影响

碳排放价格表征机组备用的外部性成本, 本文将其内化到机组备用报价中, 成为备用决策的考虑因素。图 1 中, 均衡点 B 的机组备用配置量大于最适点 A 配置量, 表明若不计及外部碳成本, 会造成机组备用的过量配置。

传统上仅以机组备用内部成本竞价模式下,  $R^*=144$  MW, 预期总成本 3 211.3 \$, 本文所提外部成本内在化改进模式下,  $R^*=120$  MW, 预期总成本 2 983.7 \$, 表 3 为相关成本分量对比(单位/美元), 可以看到碳排放成本明显降低。以上证明了传统竞价模式的局限性, 单纯市场均衡点 B 是无效的, 不能够真正实现预期总成本最小。由图 1 可直观观察到两种模式下的差异, 两条供给曲线所围面积即为碳排放外部性成本。

表 3 相关成本分量对比

Table 3 Comparison of cost components

	内部成本	碳排放成本	IL 成本	总成本
传统模式	1 987.2	630.1	594	3 211.3
改进模式	1 584	487.7	912	2 983.7

#### 4.4 备用竞价模式对比

对比上述两种备用竞价模式, 对机组备用报价进行排序与分析: 1) 传统模式下, 按内部成本报价排序 G11→G21→G31→G41→G51→G12→G22→G32→G42→G52→G13→G23→G33; 2) 本文改进模式下, 对报价修正后排序 G21→G11→G41→G22→G51→G12→G31→G42→G32→G52→G13→G23→G33。表 4 为两种方式下各机组中标备用量差别。

表 4 两种备用竞价方式比较

Table 4 Comparison of two bidding models

机组	1	2	3	4	5	总量/MW
传统竞价模式/MW	40	40	24	20	20	144
改进模式/MW	40	40	0	20	20	120

改进后的备用竞价模式下, 低排放机组备用序位前移(机组 2、4), 从而可以使低排放机组优先中标, 高排放机组将成为边际机组或不再中标(机组 3)。由于本文机组报价最多只有 3 段, 若采用更为精细化的报价或者竞价机组足够多, 备用出清差别会更明显一些。改进模式下不再仅仅根据单纯内部成本报价选择备用机组, 还要考虑机组的排放特性, 从而在备用市场中引入了碳减排激励因素。

#### 5 结语

在备用服务市场中计及碳排放因素, 不仅能够提高备用资源配置效率, 也是发展低碳电力的必然要求。本文通过供给与需求方法实现备用资源优化配置, 需求曲线可以计及容量事故随机性特性, 同

时实现不同类型备用资源的协调配置, 供给曲线则可以计及、区分备用机组碳排放特性上的差异, 方法简单易行、经济含义明确, 从社会角度出发实现备用成本最小化。此外, 外部性内在化方法建立在备用主体的经济意愿之上, 很好地兼顾了备用服务的市场化运营要求与低碳环境下碳减排要求。

应该指出的是, 传统机组在提供备用的同时也会产生其他负外部性, 如 SO<sub>2</sub> 排放、备用机组的可靠性问题等, 这些问题都可以采用外部性内在化方法进行研究。

附录

根据本文方法, 文中的预期总成本是采用下式计算的。

$$\text{预期总成本} = P_r R + \sum_{m \in M} p_m P_e R + \sum_{m \in M} p_m \sum_{i \in G} \lambda R_i \beta_i + \sum_{m \in M} p_m \cdot C_{\min}(Q_m - R)$$

式中: 第 1、2 项为机组备用容量成本与电量成本; 第 3 项为备用机组碳排放成本; 第 4 项为 IL 成本; P<sub>r</sub>、P<sub>e</sub> 为统一出清的容量与电量电价; R 为保留的机组备用容量总量, 且  $R = \sum_{i \in G} R_i$ , R<sub>i</sub> 为中标机组 i 的备用容量; β<sub>i</sub> 为该机组实际碳排放因子; 其余变量与文中一致。

同时, 为了便于分析, 现给出文中预期总成本各相关分量数据, 如表 5。机组备用序位是按本文提出的机组边际综合成本进行排序, 根据机组备用容量取值按此序位选择中标机组。机组备用成本包括容量成本、电量成本及碳排放成本。

不同机组备用容量取值下的机组备用成本中,

表 5 预期总成本分量

Table 5 Total expected costs components

机组备用/MW	机组备用成本/\$	事故3下IL成本/\$	事故2下IL成本/\$	事故1下IL成本/\$
0	0	2 850	1 320	960
20	286.2	2 346	1 040	696
40	588.1	1 890	792	468
60	946	1 539	576	264
80	1 364.23	1 249.5	406	108
100	1 721.8	990	260	0
120	2 071.33	780	132	0
140	2 454.35	594	36	0
160	2 976.3	432	0	0
180	3 377.22	304.5	0	0
200	3 903.1	195	0	0
220	4 466.9	99	0	0
240	5 093.12	27	0	0
250	5 499.8	0	0	0

容量成本、电量成本和碳排放成本分量如表 6 所示。

表 6 机组备用成本分量对比

Table 6 Comparison of unit reserve cost components

机组备用/MW	机组备用成本/\$	容量成本/\$	电量成本/\$	碳排放成本/\$
0	0	0	0	0
20	286.2	60	156	70.23
40	588.1	120	312	156.1
60	946	240	468	238
80	1 364.23	432	624	308.23
100	1 721.8	540	780	401.88
120	2 071.73	648	936	487.73
140	2 454.35	756	1 092	606.3
160	2 976.3	1 040	1 248	688.27
180	3 377.22	1 170	1 404	803.2
200	3 903.1	1 440	1 560	903.09
220	4 466.9	1 760	1 716	990.9
240	5 093.12	2 160	1 872	1 061.12
250	5 499.8	2 375	1 950	1 174.85

参考文献

[1] 丁然, 康重庆, 周天睿, 等. 低碳电网的技术途径分析与展望[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 1-8.  
DING Ran, KANG Chong-qing, ZHOU Tian-rui, et al. Analysis and prospect on technical approaches for low carbon power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 1-8.

[2] 卢斯煜, 娄素华, 吴耀武. 低碳经济下基于排放轨迹约束的电力系统电源扩展规划模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 175-181.  
LU Si-yu, LOU Su-hua, WU Yao-wu. A model for generation expansion planning of power system based on carbon emission trajectory model under low-carbon economy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 175-181.

[3] 薛志英, 周明, 李庚银. 大规模风电接入电力系统备用决策评述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 148-155.  
XUE Zhi-ying, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Survey on reserve decision of power systems with large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 148-155.

[4] SOLER D, FRÍAS P, GÓMEZ T. Calculation of the elastic demand curve for a day-ahead secondary reserve market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 615-623.

[5] 许子智, 曾鸣. 美国电力市场发展分析及对我国电力市场建设的启示[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 161-166.  
XU Zi-zhi, ZENG Ming. Analysis on electricity market development in US and its inspiration to electricity market construction in China[J]. Power System

- Technology, 2011, 35(6): 161-166.
- [6] 谢恺, 宋依群, 唐佳晖. 发电商最优备用报价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 8-13.  
XIE Kai, SONG Yi-qun, TANG Jia-hui. Study on genco' optimal bidding strategies in reserve market[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 8-13.
- [7] 葛亮, 谢宇翔, 李湘祁, 等. 与市场机制相协调的发电交易与调度的节能减排方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 167-173.  
GE Liang, XIE Yu-xiang, LI Xiang-qi, et al. The method about energy saving and emission reduction of power generation transaction dispatch conformed to market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 163-173.
- [8] 谭忠富, 董力通, 刘文彦, 等. 发电机组污染排放约束下电量互换合作博弈优化模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 245-251.  
TAN Zhong-fu, DONG Li-tong, LIU Wen-yan, et al. A cooperation game optimization model for energy generating interchange between power generation units with environmental emission constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 245-251.
- [9] 龙军, 郑斌, 李珊, 等. 电力系统节能环保调度的多目标决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 35-40.  
LONG Jun, ZHENG Bin, LI Shan, et al. A multi-objective decision-making method for economic dispatch of power system considering energy conservation and environmental protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 35-40.
- [10] 葛炬, 张粒子. 可中断负荷参与的备用市场的帕累托优化模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 34-37.  
GE Ju, ZHANG Li-zi. Pareto optimally model of reserve market including interruptible load as participants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 34-37.
- [11] 吴集光, 刘俊勇, 牛怀平, 等. 电力市场环境最优备用容量的确定[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 10-13.  
WU Ji-guang, LIU Jun-yong, NIU Huai-ping, et al. Determination of optimal reserve capacity in electricity market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 10-13.
- [12] 张新松, 袁越, 傅质馨. 基于隐性备用约束的机组组合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 136-142.  
ZHANG Xin-song, YUAN Yue, FU Zhi-xin. The unit commitment formulation with implicit reserve constraint[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 136-142.
- [13] 罗运虎, 陈海牛, 李磊, 等. 基于风险的微网分布式发电备用配置决策[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 54-58.  
LUO Yun-hu, CHEN Hai-niu, LI Lei, et al. Risk decision-making for configuration of microgrid distributed generation reserve[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 54-58.
- [14] 张谦, 史乐峰, 任玉珑, 等. 计及 V2G 备用服务的交易式[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 59-67.  
ZHANG Qian, SHI Le-feng, REN Yu-long, et al. The reserve trading model considering vehicle-to-grid reserve[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 59-67.
- [15] 刘晓, 艾欣, 杨俊. 考虑未来碳排放交易的需求侧备用竞价与调度模式设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 38-42.  
LIU Xiao, AI Xin, YANG Jun. Design of demand side reserve bid-scheduling strategy considering future carbon emission trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 38-42.
- [16] 蔡秋娜, 文福拴, 丁剑鹰, 等. 计及经济性、可靠性和排放因素的备用市场竞价模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 38-44.  
CAI Qiu-na, WEN Fu-shuan, DING Jian-ying, et al. A reserve market bidding model considering economics, reliability and emissions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 38-44.
- [17] 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 电力备用市场化运营需求研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 46-50.  
HE Yong-xiu, HUANG Wen-jie, TAN Zhong-fu, et al. A study on demand of electricity reserve market in marketing operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 46-50.
- [18] 曼昆. 经济学原理: 微观经济学分册[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.  
MAN Kun. Economics: microeconomics volumes[M]. Beijing: Beijing University Press, 2006.
- [19] 陈启鑫, 康重庆, 夏清, 等. 低碳电力调度方式及其决策模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 18-23.  
CHEN Qi-xin, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Mechanism and modelling approach to low-carbon power dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 18-23.

收稿日期: 2013-11-09; 修回日期: 2013-12-31

作者简介:

施泉生(1961-), 男, 硕士, 教授, 从事电力经济与管理科学的研究工作;

李士动(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力市场理论、电力系统运行优化。E-mail: lsd.yes@163.com