

水电站群年度期货电量的划分与分解

周婷, 王丽萍, 苏学灵

(华北电力大学水资源与水利水电工程研究所, 北京 102206)

摘要: 基于充分发挥期货合约在风险规避、电价平抑中的积极作用的原则, 本文提出了二级电力市场中水电站群期货与现货电量的划分模型; 针对水电站的月发电量的不确定性及月间发电量不均匀性, 进一步建立基于月发电量序列概率特征分析的年度期货电量分解模型, 并给出模型求解算法, 为水电站群在电力期货市场中的合同签订及电量分解提供了一种可行方法和依据。在算例中具体给出期货电量划分与分解的计算步骤及结果, 阐明结果的内在机理。通过在科研项目中的应用, 验证了该方法的有效性和合理性。

关键词: 电力市场; 划分与分解模型; 发电量序列概率特征分析; 水电年度期货电量; 二次调整

Division and decomposition of annual future hydroelectric quantity in power market

ZHOU Ting, WANG Li-ping, SU Xue-ling

(Research Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: For the purpose of making full use of the risk-shelter and price-stabilization function which future contract has made in power market, a new dividing and decomposition model for future hydroelectric quantity in two-level electricity market is proposed. Considering the uncertainty of electric generation and nonuniformity among months, the annual future electric quantity division and decomposition model is established based on the sequential feature of electric quantity with detailed algorithm, which provides a feasible method and enlightenment for the future contract dividing and decomposition. In the example, the calculation procedures and results are given with explanation of internal mechanism to the result. The reasonability and rationality of the model is proved by applications in scientific research project.

Project supported by National Science and Technology Planning Project (No.2006BAC05B03-02); National Natural Science Fund (No.50579019)

Key words: power market; division and decomposition model; sequential feature analysis of electric quantity; annual future hydroelectric quantity; secondary adjustment

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0015-05

0 引言

纵观国外电力市场的历史和经验, 成熟健康的电力市场中期货交易总额总是占很大比例, 它不但对完善的电力市场而言必不可少, 对于发电商来说, 合理的制定期货电力计划也是实现预期效益的重要保证。因此, 水电站的期货电量比例关系到电站全年的竞争获利能力, 如何在来水情况不确定的情况下确定保证程度较高的期货电量, 以及如何将年度期货电量合理分解到月度, 是水电进入市场化运行所

面临的重要问题。

目前对于水电期货电量的划分及合约分解的研究较少。文献[1]提出并解释了以期货交易为主、期货与现货相结合的电力交易模式, 分析了期货市场的重要作用 and 地位; 文献[2]建立了确定二滩电站年度期货电量的优化模型, 并用遗传算法进行模型求解, 但未进行年度期货电量的分解; 文献[3]给出了期货合约电量分解的通用算法, 以各电厂的进度系数均衡化原则来指导合约电量分解, 对于火电机组的期货分解具有一定的指导意义, 但水电机组月度发电空间的不确定性导致难以预测长期的进度系数, 此方法在水电站的合约分解上困难较大。

本文针对水电来水过程不确定性, 在电力市场

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC05B03-02); 国家自然科学基金资助项目(50579019)

化运营的背景下,提出基于月发电量序列概率特征的水电期货电量划分及分解模型;进一步以月发电过程统计特征为依据,进行期货电量合约的分解和调整,并从梯级水电运行特征的角度来验证和解释期货电量的合理性。

1 年度期货合约电量的划分与分解模型

水电年度期货电量方案的划分与分解原则是:

①各水电站多年发电量过程应在水库水量及电站运行等约束的前提下,以调度期内系统总发电量最大为目标进行时段发电量计算得到;②水电站应保证其在不同来水年份完成年度期货市场所签电量,同时预留出一部分电量在下级市场竞争;③在保证完成期货合约的前提下,尽量多签期货合约,但也不应挤占过多火电的发电空间;④期货电量的年内分解要考虑来水的年内不确定性和月间丰枯差异性。

1.1 目标函数

年度期货合约电量属长期合约,是水电站获得基本收益的保证,以占其多年平均电量的百分数表示年度期货合约电量的度量。在保证完成期货合约的前提下,以尽量多签期货合约为目的,模型的第一个目标函数为在满足各约束的条件下,期货电量取多年平均电量的最大百分比,数学描述如下:

$$E_{ci} = \max \{ \alpha_i \bar{E}_i \} = \max \left\{ \alpha_i \sum_{t=1}^T (A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot M_t) / t \right\} \quad (1)$$

式中: E_{ci} 为水电站 i 所签的年度合约电量; α_i 为年度期货电量方案划分系数; \bar{E}_i 为水电站 i 的多年平均发电量; A_i 为第 i 个电站的综合出力系数; $Q_{i,t}$ 为第 i 个电站的 t 时段发电流量; $H_{i,t}$ 为第 i 个电站的 t 时段发电水头; M_t 为调度期内时段总长度; T 为调度期年数。

这里所指的期货合约是余量竞争模式下的物理期货合约而非金融合约,如果无法完成所签期货电量,则发电商会受到相应的惩罚,因此需进一步考虑来水的不确定性,即不同频率来水年份的发电量差异,以避免合约电量无法完成导致的惩罚。为使所签订的期货电量能够适应不同的来水年份(主要考虑特枯年份的完成情况,如 95% 频率年份),防止片面追求期货电量的数量,目标函数式(1)应满足式(2)的约束:

$$E_{ci} \leq E_{ip} (p = 95\%) \quad (2)$$

式中: E_{ip} 表示电站 i 在保证率为 p 的代表年所发电量。

目标函数(3)是对期货电量的年内分解的原则描述:同一电站的各月期货电量分解值的保证率应

尽量一致。另外考虑到水电站丰枯月份发电量差距较大,在汛期适当降低保证率即可大幅提高期货电量,同时可以减轻枯期发电负担,综合考虑认为,各月期货电量保证率相差应在 10% 以内。这样既在一定程度上考虑了月间来水频率差异所导致的月度期货电量比例悬殊,又兼顾了现货市场的竞价空间的尽量均衡:

$$\max p_i^{(j)} - \min p_i^{(j)} \leq 10\% \quad j \in \{1, 2, \dots, 12\} \quad (3)$$

式中: $\max p_i^{(j)}$ 、 $\min p_i^{(j)}$ 分别表示 i 电站的 j 月电量分解值的最大、最小保证率。

1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (q_{i,t} - q_{i-1,t-\tau} - Q_{i,t} - S_{i,t}) \Delta t \quad (4)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第 i 个水库的第 t 时段初、末蓄水量; $q_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段平均入库(区间)流量; $q_{i-1,t-\tau}$ 为第 $i-1$ 个电站第 $t-\tau$ 时段平均下泄流量, τ 为水流滞时; $S_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段弃水流量。

(2) 水库蓄水量约束:

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad (5)$$

式中: $V_{i,t,\min}$ 、 $V_{i,t,\max}$ 分别为第 i 个水库第 t 时段的最小、最大蓄水量。

(3) 水库下泄流量约束:

$$Q_{i,t,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t,\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{i,t,\min}$ 、 $Q_{i,t,\max}$ 分别为第 i 个水库的最小、最大下泄流量。

(4) 电站出力约束:

$$N_{i,t,\min} \leq A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \leq N_{i,t,\max} \quad (7)$$

式中: $N_{i,t,\min}$ 、 $N_{i,t,\max}$ 分别为第 i 个水库的最小、最大出力限制。

(5) 月度期货分解电量约束:

$$\sum_{j=1}^{12} E_{ci}^{(j)} = E_{ci} \quad (8)$$

式中: $E_{ci}^{(j)}$ 为期货电量分解方案中第 j 月的分解电量。

2 基于发电过程概率特征的模型求解方法

上述模型属于多目标、多参数的大系统运筹规划问题,且模型的解包括各电站年度期货电量 E_{ci} ($i=1, 2, \dots, n$) 及其每月分解电量 $E_{ci}^{(j)}$ ($j=1, 2, \dots, 12$), 纯数学方法求解计算量很大。并且如果对目标函数做严格处理的话,优化问题的维度将会变得非常大。

但在考虑模型的背景及物理意义的基础上,将多目标规划分解为多个单目标规划,对模型进行分步求解,具体求解方法步骤如下:

(1) 在综合考虑模型式(4)~(7)约束的基础上,以调度期内总发电量最大为目标进行梯级优化调度,模拟水电站群多年发电过程;拟定各电站期货合约电量为各自多年平均电量的不同百分比 α_j ,由此确定若干年度期货电量待选方案 E_{ck} 。

(2) 计算各期货待选方案 E_{ck} 占电站代表年发电量的百分比,分析期货合约所签年电量能够完成的保证程度以及期货与现货电量的比例关系,以此确定期货电量 E_c 。在方案寻优过程中应遵从的原则为:水电首先保证完成年度期货电量,其次遇枯水年份时还有一定的电量能够参与现货市场竞争;遇丰水年份水电有较多的电量参与竞争时,也不过多挤占火电的竞争空间。

(3) 年度期货电量的初步分解。根据水电站月发电量过程统计特征分析,构造满足一定条件的虚拟发电过程序列,使其各月发电量具有相同频率。设初步分解的各月期货电量为 $E_{qj}^{(j)}$ ($j=1,2,\dots,12$),其中 q 表示各月期货电量的保证率。按照各月期货电量分解值应尽量取同一保证率的原则,在虚拟发电过程序列中最接近期货电量 E_c 的一个作为初步分解方案,即满足 $\min\left\{\left|\sum_{j=1}^{12} E_{qj}^{(j)} - E_c\right|\right\}$,由此确定初步分解结果 $E_{qj}^{(j)}$ ($j=1,2,\dots,12$)。

(4) 初步分解充分考虑了水电站的发电过程统计分布特性,但是该方案的年电量 $\sum_{j=1}^{12} E_{qj}^{(j)}$ 与实际期货电量 E_c 会存在偏差,即出现 $\min\left\{\left|\sum_{j=1}^{12} E_{qj}^{(j)} - E_c\right|\right\} > \alpha(\alpha > 0)$ 的情况,因此还须进行二次分解,协调月电量分解方案与年度期货电量的一致性,即满足模型中约束(8)。为方便下文叙述,这里定义分解差额百分比 $d = \frac{\left|\sum_{j=1}^{12} E_{qj}^{(j)} - E_c\right|}{E_c} \times 100\%$,并用分解差额百分比来衡量偏差程度。对于初步分解结果的调整方法如下:

①当 $d \in [0, 10\%]$ 时,需对部分月度分解电量进行调整。调整电量为年度期货电量和初步分解方案差额 $\left[E_c - \sum_{j=1}^{12} E_{qj}^{(j)}\right]$,调整方案应以月度现货市场竞价空间的均衡化为目标:取一保证率为 p 的代表年,初步分解方案中各月在现货市场的竞价空间可表示为 $S_{pi}^{(j)} = \frac{E_{ip}^{(j)} - E_{qi}^{(j)}}{E_{ip}^{(j)}} \times 100\%$ ($j=1,2,\dots,12$),以竞价空间均值 $\bar{S}_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^{12} S_{pi}^{(j)}}{12}$ 为界,若 $\sum_{j=1}^{12} E_{qi}^{(j)} > E_c$ 说明需要减少月度期货

电量,则对 $S_{pi}^{(j)} < \bar{S}_{pi}$ 的所有月份进行二次调整,任一月份 j 的调整电量 $E_{\alpha}^{(j)}$ 为:

$$E_{\alpha}^{(j)} = \frac{S_{pi} - \bar{S}_{pi}}{\sum_{j=1}^k (S_{pi} - \bar{S}_{pi})} \times \left(E_{ci} - \sum_{j=1}^{12} E_{qi}^{(j)} \right) \quad (9)$$

式中 k 为进行调整的月份数,式(9)的含义是按照各月的现货竞价空间偏离 \bar{S}_{pi} 的程度占 k 个月份总偏离之和的比例来确定该月二次修正电量,该修正方法的特点是 $S_{pi} - \bar{S}_{pi}$ 越大的月份得到的修正电量 $E_{\alpha}^{(j)}$ 也越大,反之修正量较小,并且保证各月调整量之和与初步分解的所需调整量相等,具体数学说明见下式:

$$\sum_{j=1}^k E_{\alpha}^{(j)} = \sum_{j=1}^k \left(\frac{S_{pi} - \bar{S}_{pi}}{\sum_{j=1}^k (S_{pi} - \bar{S}_{pi})} \times \left(E_{ci} - \sum_{j=1}^{12} E_{qi}^{(j)} \right) \right) = \left(\sum_{j=1}^{12} E_{qi}^{(j)} - E_{ci} \right) \quad (10)$$

经过上述调整后,一方面可以使月度分解电量之和与年度期货电量相等,另一方面使各月现货竞价空间趋于均衡化。对于 $\sum_{j=1}^{12} E_{qi}^{(j)} < E_{ci}$ 的情况,同样可用式(9)进行二次分解,调整对象为 $S_{pi}^{(j)} > \bar{S}_{pi}$ 的月份。

②当 $d > 10\%$ 时,说明初步分解方案的年电量与期货电量偏离较大,这时在原分解方案的基础上进行调整收效不大,考虑这种情况产生的原因在于期货电量选择过于保守,即使各月取最大保证率对应电量也超过期货电量10%以上,通常这种情况的发生与水电站运行方式以及来流情况有关系,在后文的算例中有详细说明。在这种情况下则可以对期货电量 E_{ci} 进行调整:保持月度初步分解方案不变,使 $E_{ci} = \sum_{j=1}^{12} E_{qi}^{(j)}$,相当于在各月期货电量保证率不变的前提下,适当提高了期货电量,同时也降低了分解方案年电量和年度期货电量之间的偏差。

(5) 各月期货电量分解值为初步分解电量与调整量之和:

$$E_{ci}^{(j)} = E_{qi}^{(j)} + E_{\alpha}^{(j)} \quad j \in \{1, 2, \dots, 12\} \quad (11)$$

上述分解方法虽充分考虑了水电站的发电过程统计分布特性,但是考虑到电站在实际履行合同过程中可能有一些临时调度安排如调峰、调频,或者安排机组检修,实际发电量与申报分解电量仍然不可避免存在一些误差,建议在保证年度总期货电量完成的前提下,允许水电站的期货电量月分解值在一定范围内进行月间的结转(滚动)调整。比如允许水电站年度期货电量的结转量不超过期货电量的

10%。

该方法能够使各月分解电量具有相同的保证率,较好的体现了期货合约电量月分解计划的保证要求这一划分原则,同时保证各月在现货市场上具有较为均衡的竞价空间,不会对现货市场造成过大的冲击。

3 实例应用

将本模型应用在黄河干流主要电站的期货合约电量与现货电量的划分研究中,首先在模拟黄河干流主要电站 1972-2005 年间的年月发电过程基础上,分别取频率为 5%(特丰)、80%(平偏枯)、95%(特枯)的代表年份,对各期货电量方案占代表年发电量比例进行分析。计算结果显示,当期货合约电量取多年平均发电量的 70%时,拉西瓦、李家峡及直岗

拉卡电站在来水频率为 95%以上的年份下,合约电量比例超过 100%,说明这些电站在特枯年份无法完成期货合约,故期货合约电量应该小于多年平均发电量的 70%;当期货合约电量方案为多年平均发电量的 65%时,仍有一些水电站期货合约占年发电总量的 90%以上,这也不符合期货合约的划分原则。另外,考虑如果期货合约电量比例过低(如 50%、55%),势必导致大量电量被安排在现货市场,这不利于现货市场价格的稳定,水电站也会面临较大的经营风险。综合考虑认为,期货合约电量占多年平均电量的 60%左右为宜。

在期货合约与现货电量比例的划分基础上,进一步进行各电站年度期货合约电量的年内月间分解。通过期货电量与各月电量同频率的年发电序列对比后,初步分解结果见表 1。

表 1 期货电量年内初步分解结果(单位:亿千瓦时)

Tab.1 Preliminary result of future electric quantity decomposition(Unit: billion-kilowatt hours)

电站名称	期货电量年内分解												保证率	差额百分比
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月		
龙羊峡	2.29	2.26	4.58	4.58	3.83	1.03	1.09	1.13	1.19	4.15	1.25	2.16	95%	10.89%
拉西瓦	4.89	4.97	10.21	7.04	8.91	2.41	2.41	2.41	2.41	8.1	2.41	4.1	95%	1.79%
尼娜	0.39	0.39	0.81	0.56	0.71	0.19	0.19	0.19	0.19	0.64	0.19	0.34	95%	4.80%
山坪	0.33	0.33	0.68	0.47	0.6	0.16	0.16	0.16	0.16	0.54	0.16	0.29	95%	2.54%
李家峡	2.87	2.92	6.03	4.16	5.24	1.42	1.42	1.43	1.42	4.79	1.41	2.58	95%	1.82%
直岗拉卡	0.32	0.33	0.68	0.47	0.59	0.16	0.16	0.16	0.16	0.54	0.16	0.29	95%	0.50%
公伯峡	2.38	2.45	4.99	3.48	4.42	1.2	1.2	1.24	1.18	4.01	2.06	2.18	95%	3.22%
苏只	0.34	0.35	0.71	0.49	0.62	0.17	0.17	0.17	0.17	0.57	0.17	0.3	95%	1.20%
积石峡	1.64	1.66	3.42	2.36	2.98	0.81	0.81	0.81	0.81	2.71	0.81	1.44	95%	0.25%
刘家峡	2.66	2.68	2.52	4.61	5.55	4.64	2.58	1.74	1.81	3.21	5.34	2.8	95%	20.72%
盐锅峡	1.06	1.05	0.99	1.62	2.01	2.07	1.01	0.67	0.67	1.14	1.98	1.07	95%	19.19%
八盘峡	0.5	0.5	0.52	0.75	1.07	1.08	0.57	0.45	0.43	0.77	0.89	0.51	95%	35.29%
小峡	0.39	0.39	0.4	0.61	0.89	0.89	0.48	0.37	0.36	0.64	0.72	0.4	95%	23.67%
大峡	0.84	0.84	0.9	1.28	1.82	1.83	1	0.76	0.74	1.32	1.53	0.88	95%	26.19%
青铜峡	0.62	0.61	0.64	0.87	1.26	1.16	0.61	0.5	0.51	0.94	0.98	0.63	95%	24.07%

初步分解结果说明,调节性能比较好的龙羊峡电站和刘家峡电站及其经过了这两级水库调节后的刘家峡下游各电站,满足各月期货电量分解值具有 95%保证率时,年度分解电量仍超过期货电量 10%以上,这些电站年度期货合约电量比例可依据二次调整算法中的第②种情况进行调整,调整后的期货电量可达到多年平均发电量的 65%~70%:龙羊峡电站期货电量占多年平均发电量的 65%;八盘峡电站期货电量占多年平均发电量的 75%,刘家峡及其下游其他各级电站期货电量占多年平均发电量的 70%。调整后的方案进一步提高了电站的期货电量,增加了电站基本收益,同时对平抑电价波动作出了

一定贡献。调整后最终确定的各电站年度期货电量占代表年电量的比例见图 1。

进一步分析该算例中的若干电站二次调整产生的原因:龙头电站龙羊峡有多年汛期水位未蓄至正常蓄水位,这时根据调度规则,在汛期只能按最小流量约束发电,尽量蓄水,由此造成年电量变幅较大,多年平均发电量及期货电量随之降低;而对于多年调节性能的龙羊峡电站来说,其非汛期发电量非常均匀,丰枯年份不会相差太多,因此多年平均电量 60%的期货电量较易满足,所以各月 95%保证率的发电量之和仍超出按多年平均 60%拟定的期货电量的 10.89%。对于刘家峡及其下游各电站,由于

刘家峡的年调节作用, 使刘家峡及其下游的入流变得较为均匀, 良好的来水条件使各电站年电量序列

的方差较小, 这有利于各月分解的期货电量的完成。

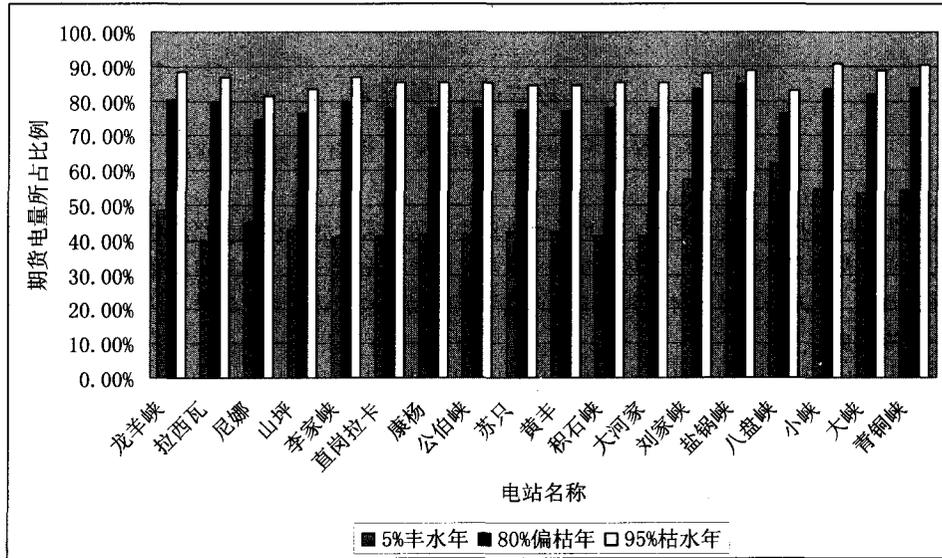


图 1 各水电站年度期货电量占代表年发电量比例

Fig.1 Percentage of annual future electricity in typical years' total production of each power station

4 结论

本文所提出的水电站年度期货电量划分及分解的模型与方法, 综合考虑了水电站的发电过程特征及在电网中的运行方式, 物理意义直观明确, 方法简捷有效且普适性较强, 具有较好的实用性。通过在黄河干流上主要水电站的应用, 所得到的期货合约电量划分及分解结果使各水电站在期货市场上有足够的保证程度完成期货合约电量, 同时也为现货市场预留了适宜的空间, 均衡了火电在期货现货两个市场上竞争空间的波动幅度, 对各市场主体都为有利。

参考文献

- [1] 江健健, 夏清, 祁达才, 等. 基于期货的新兴电力交易模式[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (4): 31-37. JIANG Jian-jian, XIA Qing, QI Da-cai. New Mechanism of Electricity Trade Based on Futures[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (4): 31-37.
- [2] 吴世勇, 马光文, 李辉. 二滩水电站期货电量优化研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25 (2): 99-102. WU Shi-yong, MA Guang-wen, LI Hui. Study on the Optimization of the Forward Electric Quantity of Ertan Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25 (2): 99-102.
- [3] 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 Can-bing, HU Ya-jie, ZHAO Hong-jun, et al. General Model and Algorithm for Contract Energy

Decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 25 (2): 99-102.

- [4] 王剑辉, 刘伟, 王良友. 电力市场中市场力与管制问题研究[J]. 继电器, 2004, 32 (1): 4-9. WANG Jian-hui, LIU Wei, WANG Liang-you. Study on Market Power and Surveillance in Power Market[J]. Relay, 2004, 32 (1): 4-9.
- [5] 石磊, 高志华, 黄金凤. 电力市场中的多机组合作效益分配研究[J]. 继电器, 2003, 31 (2): 43-45. SHI Lei, GAO Zhi-hua, HUANG Jin-feng. Study on Benefit Allocation of Multiple Unit Cooperation in Power Market[J]. Relay, 2003, 31 (2): 43-45.
- [6] 宋正强, 侯志俭, 王承民, 等. 长期合约电量对电力市场价格影响的定量分析[J]. 继电器, 2007, 31 (2): 58-60. SONG Zheng-qiang, HOU Zhi-jian, WANG Cheng-min, et al. Quantitative Analysis of Forward Contract's Effect on Power Price[J]. Relay, 2007, 31 (2): 58-60.
- [7] 李扬, 王蓓蓓, 万秋兰. 基于需求侧可靠性差别定价的电力市场交易新机制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (4): 18-22, 75. LI Yang, WANG Bei-bei, WAN Qiu-lan. A New Mechanism for Reliability Transaction of Power Market Based on Reliability Price Discrimination of Demand Side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4): 18-22, 75.

(下转第 49 页 continued on page 49)

- 站仿真培训系统[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 74-77.
- GONG Qing-wu, JIANG Fang-fang, CHEN Yi-fei. Virtual Reality Technique Based Substation Training Simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 74-77.
- [7] 季刚, 陆达. 一种通用的变电站仿真培训系统构建平台[J]. 继电器, 2005, 33(13): 68-72, 76.
- JI Gang, LU Da. A General Substation Training and Simulating System Constructing Platform[J]. Relay, 2005, 33(13): 68-72, 76.
- [8] 姜芳芳, 来文青, 龚庆武, 等. 虚拟现实在变电站仿真培训系统中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 68-70.
- JIANG Fang-fang, LAI Wen-qing, GONG Qing-wu, et al. Application of Virtual Reality in Substation Simulation and Training System[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 68-70.
- [9] 陈天翼, 邱家驹, 邱淘西. 电力系统虚拟现实场景开发研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(5): 7-10.
- CHEN Tian-yi, QIU Jia-ju, QIU Tao-xi. PC-based VR Environment of a Power System Training System[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(5): 7-10.
- [10] 杨永生, 郝小欣. 分布交互式仿真技术在变电站仿真中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(9): 49-53.
- YANG Yong-sheng, HAO Xiao-xin. Application of High Level Architecture/Run Time Infrastructure(HLA/RTI) to Substation Simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24(9): 49-53.
- [11] 曾祥辉, 宋玮, 邓健, 等. 面向对象的电力图形系统的分析和设计[J]. 继电器, 2004, 32(5): 36-39.
- ZENG Xiang-hui, SONG Wei, DENG Jian, et al. Object-oriented Analysis and Design of Graphic System of Power System[J]. Relay, 2004, 32(5): 36-39.
- [12] 张炳达, 陈伟乐, 黄大鹏. 变电站控制与信号系统的仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 60-63.
- ZHANG Bing-da, Chan W L, HUANG Da-peng. Simulation of Control and Signal System for Substations[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 60-63.
- [13] Tzouramanis T, Vassilakopoulos M, Manolopoulos Y. Overlapping Linear Quadrees and Spatio-temporal Query Processing[J]. The Computer Journal, 2000, 43(4): 325-343.
- [14] Kollios G, Gunopulos D, Tsotras V, et al. Indexing Animated Objects Using Spatio-temporal Access Methods[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2001, 13(5): 758-777.
- [15] 卢超, 卢炎生. TDLRtree 时空数据库索引结构及实现算法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(5): 743-746.
- LU Chao, LU Yan-sheng. TDLRtree Index Structure and Implementation Algorithm for Spatio-Temporal Database[J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(5): 743-746.

收稿日期: 2008-01-14

作者简介:

解大(1969-), 男, 副教授, 主要从事电力系统仿真研究; E-mail: xieda@sju.edu.cn

余江燕(1969-), 女, 高级工程师, 主要从事实时仿真系统的设计和研究;

唐寅初(1981-), 男, 工程师, 主要从事电力系统软件工程研究。

(上接第 19 页 continued from page 19)

- [8] 陈晓林, 刘俊勇, 宋永华, 等. 利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 75-81.
- CHEN Xiao-lin, LIU Jun-yong, SONG Yong-hua, et al. Use of CFDs and FTRS to Hedge Against Risks of Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 75-81.
- [9] Lise W, Kruseman G Long-term Price and Environmental Effects in a Liberalised Electricity Market[J]. Energy Economics, 2006, 06(5):230-248.
- [10] Aron R, Ungar L, Valluri A. A Model of Market Power and Efficiency in Private Electronic Exchanges[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187(3): 922-942.

收稿日期: 2008-01-21; 修回日期: 2008-03-04

作者简介:

周婷(1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源经济学和水电电力市场方向研究; E-mail: zhouting02@gmail.com

王丽萍(1956-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水电能源经济、电力市场与水电站经济运行。