

# 电力系统预防控制的安全定价研究

曹伟斌, 宋依群

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 在传统调度模型基础上, 引入预想故障安全约束, 建立考虑预防控制的优化调度模型。对优化问题的各乘子分量进行分析, 提出预防控制的安全定价和节点价格计算方法, 该价格体现各节点对维护系统静态安全不同价值。通过对 IEEE30 节点系统进行算例分析, 验证了该定价方法的合理性和可行性, 为电力系统安全性与经济性运行的协调分析提供了一种有效的方法。

**关键词:** 电力市场; 预防控制; 安全定价; 优化潮流; 分布因子

## Study on security pricing of power system preventive control

CAO Wei-bin, SONG Yi-qun

(School of Electronic and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Based on traditional dispatch model, this paper considers contingency security constraints and constructs a new model with preventive control. The preventive control security pricing concept and nodal price calculation method are proposed through analysis of Lagrange multipliers. The model price reflects different nodal values for system static security. A case study of IEEE-30 bus system demonstrates the rationality and validity of strategies proposed in this paper and provides an effective method for coordination between power system security and economic operation.

**Key words:** electricity market; preventive control; security pricing; optimal power flow; distribution factor

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0081-06

## 0 引言

在电力市场运营中, 由于市场各参与者的竞争性和不协调, 增加了系统运行的不确定性和安全风险, 如何提高市场运行的经济效率与保证系统本身安全稳定始终是一对矛盾<sup>[1]</sup>。

安全定价是一种在电力市场环境下能够及时反映系统安全状况, 并且试图通过它激励市场参与者积极维护系统安全的定价机制。文献[2]首次提出电力系统安全定价的基本概念, 通过发电商和用户对预想事故进行报价, 推导故障期间发电与用电的价格和故障的概率信息, 当市场安全价格等于故障损失增量时达到社会效益最大化。

电力系统安全控制措施主要分为“预防控制”和“校正控制”两大类, 由此衍生出市场环境下三类与安全有关的成本: 第一类是与预想故障有关的预防控制成本, 包括提供保障系统安全服务的容量费用和燃料成本; 第二类是故障发生后的校正控制成本, 包括机组的增减出力 and 切负荷的成本; 第三

类是由于故障所引起的停电损失成本。文献[3]指出仅仅依靠实时电价不足以激励市场参与者保证系统安全, 市场参与者因有效参与安全维护而得到经济补偿, 而且经济补偿必须大于他们参与安全维护的成本。现有的安全定价方法均从系统角度对系统安全费用进行评估, 主要通过传统的停电损失评估<sup>[4-5]</sup>, 以及经济学中供需理论、公共物品理论、保险理论、风险评估等方法进行评估<sup>[3,6-9]</sup>。

市场环境下 ISO 得到机组或发电商的报价后通过优化潮流算法得到出力计划, 并对计划进行安全校验。如果出力计划不能满足静态安全校验, 则由调度人员按调度经验或事先制定的调度流程调整发电计划, 直至满足安全校验。文献[10]对传统调度模型进行扩展, 加入了预想故障事故安全约束条件, 简称为带预防控制的优化潮流。本文借鉴文献[11]的分析方法, 通过对带预防控制的优化潮流各乘子分量进行分析, 从节点角度提出反应系统安全性的预防控制定价方法和节点价格, 得到的预防控制费用反映系统静态安全水平, 得到的节点价格体现各

节点对维护系统安全的不同价值, 为安全性和经济性的协调分析提供新的思路。

## 1 预防控制的优化调度模型

### 1.1 数学模型

电力系统运行和规划中常需要对系统进行  $N-1$  静态安全校核。 $N-1$  原则指正常运行方式下电力系统中任一元件(线路、发电机、变压器)因检修或故障断开, 系统能保持稳定运行和正常供电, 其他元件不过负荷。传统的调度模型以系统运行费用最小为目标函数, 在约束条件中仅考虑正常运行状况下的潮流平衡等式约束以及支路限额、机组出力等不等式约束, 并没有考虑得到的出力计划是否通过安全校核。在传统调度模型基础上扩展考虑预想故障下安全约束, 得到预防控制优化调度模型如式(1)~式(5):

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{gi}) \quad (1)$$

s.t.

$$g(x): P_G - P_D - P_{\text{loss}} = \mathbf{B}_0 \theta \quad \lambda \quad (2)$$

$$h_1(x): P_{ij,\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad \tau \quad (3)$$

$$h_2(x): P_{gi,\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,\max} \quad \gamma \quad (4)$$

$$h_k(x): P_{ij,\min}^k \leq P_{ij} + \Delta P_{ij}^k \leq P_{ij,\max}^k \quad \mu^k \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

式(1)中  $C_i$  表示机组在日前市场的报价, 可以是分段阶梯报价或者采用二次发电费用系数, 式(2)为潮流约束,  $\mathbf{B}_0$  是以支路导纳建立起来的节点导纳矩阵, 式(3)、(4)分别为正常状况下的机组发电出力约束和线路约束, 式(5)为预想故障下的线路潮流约束,  $K$  表示预想故障集中预想故障数目,  $P_{ij,\max}^k$  表示在预想故障  $k$  下的线路传输容量上限, 通常考虑故障下线路和变压器具有一定的过负荷能力, 可较正常传输容量上限高 10%~20%。

本文模型中的预想故障集主要考虑以下四种故障: ①发电机组故障; ②输电线路故障; ③发电机组降额运行; ④负荷异常波动。由于某些支路开断型故障可能会造成电网解列, 本文对解列型故障暂不考虑。

### 1.2 $\Delta P_{ij}^k$ 的建模

本文使用线路开断分布因子 LODF 和广义发电停运分布因子 GGDF 计算预想故障条件下的线路潮流。他们可以直接由直流潮流方程推导得到<sup>[12]</sup>。

对于  $n$  个节点,  $m$  条支路的系统, 根据直流潮流, 线路功率可按式(6)计算:

$$P_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \mathbf{M}^T \mathbf{X} \mathbf{P} \quad (6)$$

式中:  $x_{ij}$  为支路  $ij$  的线路电抗;  $\mathbf{M}$  为  $n \times m$  维节点-线路关联矩阵;  $\mathbf{P}$  为  $n$  维节点注入功率矢量;  $\mathbf{X}$  为  $n \times n$  维节点电抗矩阵, 其中平衡节点对应的行和列均为零。

#### 1.2.1 线路开断故障模型

采用开断分布因子 LODF 描述单条线路开断后的线路潮流增量。当线路  $mn$  发生开断时, 假设  $\mathbf{P}_{mn}$  为停运支路  $mn$  停运前的有功潮流, 则有

$$\Delta P_{ij}^k = \text{LODF}_{ij,mn}^k P_{mn} \quad (7)$$

式中,  $\text{LODF}_{ij,mn}^k$  计算公式如式(8):

$$\text{LODF}_{ij,mn}^k = \frac{x_{mn}}{x_{ij}} \frac{X_{im} - X_{in} - X_{jm} + X_{jn}}{x_{mn} - (X_{mn} + X_{mm} - 2X_{nn})} \quad (8)$$

#### 1.2.2 机组开断故障模型

采用广义发电分布因子 GGDF 描述了发电机  $k$  故障停运后, 系统所有线路有功潮流的变化。假设  $P_k$  为停运发电机  $k$  停运前有功出力, 则有

$$\Delta P_{ij}^k = \text{GGDF}_{ij}^k P_k \quad (9)$$

当发电机  $k$  停运时系统节点负荷功率保持不变, 传统的机组开断分布因子考虑由平衡节点承担全系统的功率不平衡量, 这与实际运行情况不符。GGDF 假定功率缺额由其他在线机组按一定比例弥补, 因此 GGDF 的计算公式中涉及故障后功率缺额的再分配方法<sup>[12-13]</sup>, 在市场环境下此功率缺额也可由在备用市场中选定的机组容量承担。

设  $r_k$  为发电机  $k$  停运情况下的分配矢量, 它对应停运发电机  $k$  的第  $k$  行取值为 -1, 再分配方法中选定的发电机  $i$  相对应的第  $i$  行元素为分配比例  $r_{ik}$ , 其余为 0, 且满足  $\sum_{i,i \neq k} r_{ik} = 1$ 。本文采用根据机组装机容量比例进行功率缺额的再分配, 根据式(10)计算机组开断后的分配比例:

$$r_k = \frac{P_{gi,\max}}{\sum_{i \neq k} P_{gi,\max}} \quad (10)$$

式中,  $P_{gi,\max}$  为发电机组  $i$  的最大出力上限, 则机组开断分布因子为

$$\text{GGDF}_{ij,k} = \frac{1}{x_{ij}} \mathbf{M}^T \mathbf{B}^{-1} r_k \quad (11)$$

对于机组降额运行和负荷异常波动, 同样可以采用 GGDF 分布因子, 可将式(9)中机组停运功率量  $P_k$  替换为降额功率缺额量和负荷有功变化量。

## 2 预防控制的安全定价

### 2.1 节点价格的计算公式

对优化问题式 (1) ~ (5), 对应的拉格朗日乘子

$$L(P_g, \lambda, \tau, \gamma, \mu^k) = C(P_g) - \lambda^T g(P_g) - \tau^T h_1(P_g) - \gamma^T h_2(P_g) - \sum_{k=1}^K (\mu^k)^T h_k(P_g) \quad (12)$$

根据 KKT 条件得到

$$\frac{\partial L}{\partial P_g} = \frac{\partial c(P_g)}{\partial P_g} - (\frac{\partial g(P_g)}{\partial P_g})^T \lambda - (\frac{\partial h_1(P_g)}{\partial P_g})^T \tau - (\frac{\partial h_2(P_g)}{\partial P_g})^T \gamma - \sum_{k=1}^K (\frac{\partial h_k(P_g)}{\partial P_g})^T \mu^k = 0 \quad (13)$$

不考虑机组上下限出力约束, 得到节点  $i$  的节点电价  $\pi_{Gi}$  为

$$\pi_{Gi} = \lambda(1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}}) + \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Gi}} \tau + \sum_{k=1}^K \frac{\partial h_k}{\partial P_{Gi}} \mu^k \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  是市场统一结清电价;  $\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}}$  是节点  $i$  的网损率;

$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Gi}} \tau$  是转换到节点上的阻塞价格;

$\sum_{k=1}^K \frac{\partial h_k}{\partial P_{Gi}} \mu^k$  为折算到节点  $i$  上的用于保证系统在预防故障下元件不发生超负荷的边际机会成本。定义  $\lambda_{Si}$  为节点  $i$  的预防控制安全价格

$$\lambda_{Si} = \sum_{k=1}^K \frac{\partial h_k}{\partial P_{Gi}} \mu^k \quad (15)$$

对各预防故障, 预防控制价格反应在节点新增单位出力对预防故障下超限元件的影响。对机组  $k$  故障, 由式 (9)、(15) 得到故障对应的节点  $i$  预防控制安全价格为

$$\lambda_{Si} = \begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Gi}} + GGDF_{ij,k} \mu^k & i = k \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Gi}} \mu^k & i \neq k \end{cases} \quad (16)$$

对线路  $mn$  故障, 由式 (7)、(15) 得到故障对应的节点  $i$  预防控制价格为

$$\lambda_{Si} = (\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Gi}} + LODF_{ij,mn} \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_{Gi}}) \mu^k \quad (17)$$

### 2.2 求解流程

假设有  $n_g$  台机组,  $n_l$  条线路, 所有预防故障数目最多可能为  $n_l(n_g-1)$  个, 如此众多的约束条件对于优化问题的求解造成极大困难。根据 PJM 运行经验, 市场实际运行中有效的预防故障个数不多,

文献[14]据此提出了采用传统的日前调度模型式 (1) ~ (4) 进行安全校核, 对不考虑预防故障的出清结果进行事后安全校核, 如果输电线路或变压器在预防故障下发生超限情况时, 则将该预防故障加入有效预防故障集, 调用模型式 (1) ~ (5) 进行优化, 直至出清结果满足  $N-1$  安全校核。

由 KKT 条件也可知, 当出清结果在预防故障  $k$  不发生超限情况下对应的影子价格  $\mu^k$  为零, 并不会对优化结果和静态安全价格造成影响, 据此本文提出求解带安全约束日前调度模型的如下算法:

**Step1:** 计算无预防故障的出清模型 OPF, 即约束条件考虑式 (2) ~ (4), 得到无预防故障的出力计划;

**Step2:** 对得到的出力计划进行安全校核, 若各预防故障下无超限情况, 则该结果为最优解; 若对应第  $k$  个预防故障出现安全超限情况, 则判断该故障是否引起系统解列, 将非解列故障  $k$  加入有效预防故障集  $K$  中;

**Step3:** 计算带有有效预防故障集  $K$  下的日前模型式 (1) ~ (5), 得到出力计划, 返回 Step2。

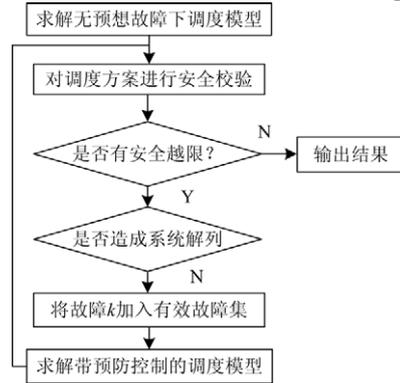


图 1 求解流程

Fig.1 Flow for solving the problem

## 3 算例分析

本文采用 IEEE30 节点系统进行仿真计算, 图 2 给出给系统支路连接情况。系统中发电机节点位置、有功功率上下限及边际发电成本函数如表 1 所示。本文假定所有发电机在正常工况下均运行正常, 且按照边际成本函数曲线报价。取节点 11 作为平衡节点。定义以下四种情况作为算例

- case1: 低谷负荷, 调度模型中不考虑预防故障;
- case2: 低谷负荷, 调度模型中考虑预防故障;
- case3: 高峰负荷, 调度模型中不考虑预防故障;
- case4: 高峰负荷, 调度模型中考虑预防故障。

表 1 IEEE-30 节点系统发电机参数

Tab.1 Generation data of IEEE-30 bus system

机组	节点位置	有功上限/MW	有功下限/MW	边际成本函数/(\$/MW·h)
1	1	120	30	0.04P+2
2	2	120	30	0.035P+1.75
3	5	50	10	0.125P+1
4	8	55	10	0.017P+3.25
5	11	30	10	0.05P+3
6	13	40	10	0.05P+3

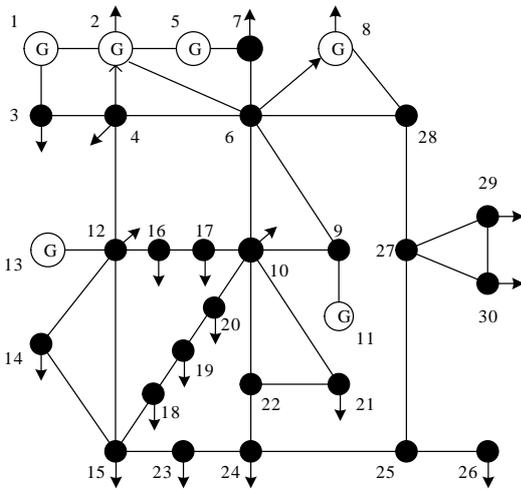


图 2 IEEE-30 节点系统

Fig.2 IEEE-30 bus test system

表 2、表 3 列出了四种不同情况下的机组计划出力安排和系统运行状况。通过 Case1 和 Case2 的出力计划安排可以看到，在正常运行状况下，两种情况下的计划出力安排相同，并且都能通过静态安全校核。通过 Case3 和 Case4 的出力计划安排说明，在高峰负荷下如果发电计划模型不考虑预想故障，得到的出力计划安排不能通过静态安全校核。根据 Case3 的计划安排，机组 4 故障和线路 27-28 故障分别引起线路 6-28 和线路 22-24、24-25 越限。而将

表 2 四种情况下的机组出力计划安排

Tab.2 Dispatch result for generators in all 4 cases

节点	Case1/MW	Case2/MW	Case3/MW	Case4/MW
1	41.87	41.87	47.77	41.36
2	55	55	61.74	54.08
5	21.4	21.4	23.28	20.88
8	25	25	38.87	32.55
11	13.5	13.5	18.22	27.02
13	13.5	13.5	18.22	32.20

机组 4 和线路 27-28 加入有效预想故障集，得到 Case4 的出力计划出力安排能通过系统安全校核。

通过对运行费用的分析也可以看到，为了提高系统的安全程度，考虑预想故障后的调度计划必须牺牲一定的经济性，Case4 的出力计划安排中增加了高报价机组 5 和机组 6 的出力，市场运行费用因此增加了 16.6%。

表 3 四种情况下的运行状况和安全校核情况

Tab.3 Operation and security assessment in all 4 cases

	运行费用/(\$/MW·h)	有效预想故障集	安全校核
Case1	494.72	无	通过
Case2	494.72	无	通过
Case3	547.62	无	机组 4 故障引起线路 6-28 越限，线路 27-28 断开引起线路 22-24、24-25 越限
Case4	638.25	机组 4 线路 36	通过

图 3 给出了不同负荷下对应的预防控制安全费用增长情况，在正常运行状况下，各节点预防控制安全价格和系统预防控制费用均为 0；当负荷增长到一定程度时，需要调整发电计划出力以满足预想故障下的安全约束，对应的机会成本即为预防控制费用。可以看到，该费用增长情况与负荷增长并不是比例关系，这也从另一方面验证了本文提出的安全价格能反映系统的系统运行的安全水平，激励发电商在系统安全充裕度不足时遵守调度计划安排，并给予其足够的经济补偿。

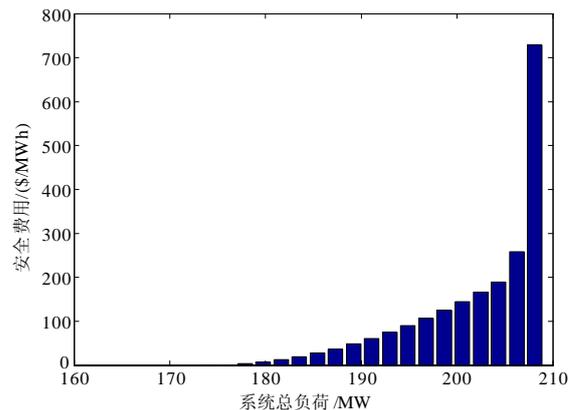


图 3 系统安全费用与负荷增长关系

Fig.3 Relationship between security cost and total load

表 4 列出了机组 4 和线路 27-28 两种有效预想故障下的安全价格分量，从系统图上可以看到，当线路 27-28 断开时，供给节点 26、29、30 的负荷全部转移到线路 24-25 上，通过线路故障时对应的各

节点安全价格分量也可以看到, 节点 23 到节点 30 的价格分量显著高出其他节点, 说明安全价格反应了预想故障对系统各节点的影响, 体现各节点对保证预想故障下系统安全的价值。

表 4 节点预防控制安全价格及预想故障下分量

Tab.4 Static security price index and its components under contingency

节点	线路 27-28 故障/ (\$/MW·h)	机组 4 故障/ (\$/MW·h)	其他预想 故障/ (\$/MW·h)	预防控制 安全价格/ (\$/MW·h)
1	0.023	-0.072	0	-0.049
2	0.023	-0.073	0	-0.050
3	0.025	-0.069	0	-0.044
4	0.025	-0.068	0	-0.043
5	0.021	-0.076	0	-0.055
6	0.020	-0.079	0	-0.059
7	0.021	-0.078	0	-0.057
8	0.020	-0.057	0	-0.037
9	0.000	0.000	0	0.000
10	-0.010	0.042	0	0.031
11	0.000	0.000	0	0.000
12	0.064	0.019	0	0.083
13	0.064	0.019	0	0.083
14	0.082	0.036	0	0.118
15	0.095	0.049	0	0.144
16	0.032	0.029	0	0.061
17	0.002	0.038	0	0.040
18	0.058	0.046	0	0.105
19	0.037	0.045	0	0.081
20	0.025	0.044	0	0.069
21	-0.031	0.069	0	0.038
22	-0.037	0.077	0	0.040
23	0.190	0.109	0	0.299
24	0.319	0.190	0	0.509
25	0.319	0.496	0	0.815
26	0.319	0.496	0	0.815
27	0.319	0.691	0	1.010
28	0.020	1.063	0	1.083
29	0.319	0.691	0	1.010
30	0.319	0.691	0	1.010

表 4 同时给出了各节点的预防控制安全价格, 该价格体现了折算到各节点上的用于保证系统在预想故障下不发生线路过载的阻塞成本, 节点 1-8 的安全价格为负值, 说明这些节点对于预防控制的成

本增量小于零; 其余节点安全价格为正, 说明这为保证预想故障下系统运行安全, 这些节点需支付额外费用。需要说明的是, 与节点电价体系下的阻塞盈余一样, 安全电价也会出现结算盈余, 算例中安全费用结算盈余为 35.71 \$/MW·h, 占由于考虑预防控制后所增加的市场运行费用的 39.2%, 可以参照阻塞盈余的分摊方法对该盈余进行分摊。

## 4 结论

本文基于预防控制的安全约束调度模型, 从系统各节点角度提出了预防控制定价方法和节点价格, 该价格能根据市场出清结果有效反应市场的安全程度, 体现各节点对保证系统安全的价值, 从而激励市场参与者保证系统的安全性。对于如何减少优化模型中的预想故障集数量进行了初步分析, 以 IEEE30 节点系统为例进行计算, 计算结果验证本文所提方法的合理性和有效性。最后, 作者认为预防控制安全定价与备用定价模型相结合和在需求侧管理中有进一步应用的潜力。

## 参考文献

- [1] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28 (9): 1-6.  
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28 (9): 1-6.
- [2] Kaye R J, Wu F F, Varaiya P. Pricing for system security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2): 575-583.
- [3] 赵傲, 康重庆, 夏清, 等. 电力市场中基于供给需求原理的安全电价体系[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44 (10): 1333-1336.  
ZHAO Jing, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Electricity market security pricing system based on the theory of supply and demand[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44 (10): 1333-1336.
- [4] Gedra T W. A frame work for security pricing in a re-regulated environment[C]. //Frontiers of Power Conference. 1996.
- [5] Strbac G, Ahmed S, Kirschen D, et al. A method for computing the value of corrective security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (3): 1096-1102.
- [6] 汤振飞, 于尔铿. 基于风险管理的电力市场安全服务价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 12-16.  
TANG Zhen-fei, YU Er-keng. Power market security service pricing based on risk management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (24): 12-16.

[7] 童明光, 刘万福, 张恩源, 等. 电力市场环境系统安全的定价研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (6): 31-36. TONG Ming-guang, LIU Wan-fu, ZHANG En-yuan, et al. Research on electricity pricing considering system security under electricity market[J]. Power System Technology, 2004, 28 (6): 31-36.

[8] 余贻鑫, 赵义术, 刘辉, 等. 基于实用动态安全域的电力系统安全成本优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 13-18. YU Yi-xin, ZHAO Yi-shu, LIU Hui, et al. Power system security cost optimization based on practical dynamic security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 13-18.

[9] 张保会, 王立永, 谭伦农, 等. 市场环境下电力系统安全可靠措施的经济当量[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (24): 41-46. ZHANG Bao-hui, WANG Li-yong, TAN Lun-nong, et al. Economic equivalent of the power system security and reliability measure in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24): 41-46.

[10] Biskas P N, Bakirtzis A G. Decentralised security constrained DC-OPF of interconnected power systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151 (6): 747-754.

[11] Arroyo J M, Galiana F D. Energy and reserve pricing in

security and network-constrained electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (2): 634-643.

[12] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.

[13] 刘皓明, 李卫星, 倪以信, 等. 计及静态安全约束的跨区域双边交易最大交易量实用计算方法[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 1-5. LIU Hao-ming, LI Wei-xing, NI Yi-xin, et al. A practical method for calculating maximum transaction volume of bilateral transaction in multiregional electricity market considering static security constraints[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 1-5.

[14] Chen H, Liu J. Practices of system security pricing[C]. //2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008: 1-4.

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2009-11-24

作者简介:

曹伟斌 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场; E-mail: caoweibin@sjtu.edu.cn

宋依群 (1970-), 女, 副教授, 主要从事电力系统分析及电力市场研究。E-mail: yqsong@sjtu.edu.cn

(上接第 54 页 continued from page 54)

[10] 王绍玉, 唐桂娟. 综合自然灾害风险管理理论依据探析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18 (2): 33-38. WANG Shao-yu, TANG Gui-juan. Exploratory analysis of theoretical basis for integrated natural disaster risk management[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18 (2): 33-38.

[11] Ezell B C. Toward a system-based vulnerability assessment methodology for water supply system[C]. // Risk-based Decisionmaking, 2002: 91-103.

[12] Bucle P, Marsh G, Smale S, et al. Assessing resilience & vulnerability: principles strategies & actions[M]. Emergency Management Australia, 2001.

[13] 赵炜炜, 张建华, 尚敬福, 等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 27-31. ZHAO Wei-wei, ZHANG Jian-hua, SHANG Jing-fu, et al. Power system large scale blackout emergency evaluation index system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 27-31.

[14] 王明, 叶青山, 王得道. 电力系统自然灾害应急系统评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (13): 57-60. WANG Ming, YE Qing-shan, WANG De-dao. The development of natural disaster response capacity for

power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (13): 57-60.

[15] 范明天, 刘思革, 张祖平. 城市供电应急管理研究与展望[J]. 电网技术, 2007, 31: 38-41. FAN Ming-tian, LIU Si-ge, ZHANG Zu-ping. A research and review on the emergency management of power supply in urban power network[J]. Power System Technology, 2007, 31: 38-41.

[16] 黄声. 上海市综合减灾管理体制研究-以上海市民防办公室承担减灾职能为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2005. HUANG Sheng. Study of Shanghai's comprehensive management of calamity system[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.

收稿日期: 2009-10-22; 修回日期: 2010-08-05

作者简介:

程正刚 (1984-), 男, 研究生, 从事电力系统应急以及继电保护装置方面研究; E-mail: zcheng173@sjtu.edu.cn

房鑫炎 (1963-), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统继电保护及系统安全方面研究; E-mail: xyfang2000@sjtu.edu.cn

俞国勤 (1962-), 男, 长期从事电力系统运行与管理工