

## 需求价格弹性对发电侧备用容量配置的影响

罗运虎<sup>1</sup>, 邢丽冬<sup>1</sup>, 王勤<sup>1</sup>, 刘海春<sup>1</sup>, 翁晓光<sup>1</sup>, 孙秀娟<sup>2</sup>, 王传江<sup>2</sup>, 吴娜<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 山东科技大学信息与电气工程学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 需求价格弹性 PED (price elasticity of demand) 通过影响可中断负荷 IL (interruptible load) 成本进而影响到发电侧备用容量 RCGS (reserve capacity of generation side) 的配置, 然而迄今为止, 从风险角度有关量化 PED 对 RCGS 配置影响方面的研究一直被长期忽视。为此, 在基于微观经济学消费者剩余理论建立 IL 成本的基础上, 将 PED 引入到 IL 停电赔偿风险中, 并基于风险管理与协调优化观点提出了市场环境下配置 RCGS 的数学模型, 通过仿真量化分析了 PED 对 RCGS 配置的影响。仿真结果表明了增加 PED 将有利于减少 RCGS 的最优配置量以及为此所付出的代价。

**关键词:** 需求价格弹性; 发电侧备用容量; 安全性; 经济性; 风险管理; 协调优化; 电力市场

## Influence of price elasticity of demand to configuration for the reserve capacity of generation side

LUO Yun-hu<sup>1</sup>, XING Li-dong<sup>1</sup>, WANG Qin<sup>1</sup>, LIU Hai-chun<sup>1</sup>, WENG Xiao-guang<sup>1</sup>, SUN Xiu-juan<sup>2</sup>, WANG Chuan-jiang<sup>2</sup>, WU Na<sup>2</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics &amp; Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Institute of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** Price elasticity of demand (PED) influences configuration of reserve capacity of generation side (RCGS) by influencing interruptible load (IL) cost. Quantitative analysis of PED on RCGS configuration from risk viewpoint has been ignored till now. Mathematic model of configuring RCGS in the market environment is proposed from the viewpoint of risk management and coordination optimization based on building IL cost and its interruption compensation risk by customer surplus theory in microeconomics. Influence of PED on RCGS configuration is analyzed quantitatively by simulation. Simulation results show that increasing PED is beneficial to decrease optimal configuration for RCGS and its cost.

**Key words:** price elasticity of demand; reserve capacity of generation side; security; economy; risk management; coordination optimization; electricity market

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0031-04

## 0 引言

市场环境下, 发电机停运、输电网故障、负荷意外波动等容量事故场景具有高度的不确定性<sup>[1]</sup>, 会随时破坏电力生产与消费之间的实时平衡, 轻则影响电能质量, 重则破坏电力系统的物理稳定性<sup>[2]</sup>。当系统出现容量缺额时, 既可以购买发电侧备用容量 RCGS (reserve capacity of generation side), 也可购买需求侧可中断负荷 IL (interruptible load) 来应对, 故 RCGS 与 IL 都可视为系统备用容量, 且 IL 容量可视为一种虚拟的紧急备用容量资源。

RCGS 按发电机响应时间及其与系统是否同步,

可分为瞬时备用、快速备用、慢速备用以及冷态备用。RCGS 的配置, 过少不能满足系统运行可靠性要求, 而过多又会不必要地降低经济性<sup>[3]</sup>。作为购买方电网公司来说, 如何组织各类 RCGS 去应对系统可能出现的各种容量事故, 满足电网的安全性与经济性要求, 已成为当前系统规划和市场运营中的重要问题之一。

需求价格弹性 PED (price elasticity of demand) 是反映 IL 参与系统备用能力的一个重要参数, 它会通过 IL 中断成本来间接影响到 RCGS 的配置。文献[4~6]定量研究了 PED 对 RCGS 最优配置量的影响。

虽然上述文献已经取得了一些进展, 但依然存在改进的方面, 包括: ①没有将 PED 引入到 IL 停

基金项目: 南京航空航天大学引进人才科研基金(S0736-032)

电赔偿风险中；②没有引入风险观点，即没有反映 RCGS 配置不足时所带来的停电赔偿风险；③没有针对 RCGS 与 IL 的不同经济特性及互补性，对其加以协调；④对 RCGS 的配置，往往局限于单一容量事故，没有针对容量事故集。

为此，本文在基于消费者剩余理论建立 IL 成本模型的基础上，将 PED 引入到 IL 停电赔偿风险中，并基于风险观点的协调，建立市场环境下配置 RCGS 的数学模型，运用灵敏度技术来搜索 RCGS 最优配置量，量化分析 PED 对其配置的影响。

## 1 IL 成本及建模

### 1.1 PED

PED 是指某种商品需求量的变化率和价格的变化率之比<sup>[7]</sup>，即：

$$E_{D_0} = \frac{\Delta D / D_0}{\Delta p / p_0} = \frac{\Delta D}{\Delta p} \cdot \frac{p_0}{D_0} \quad (1)$$

式中： $D_0$ 为需求量； $p_0$ 为需求量为 $D_0$ 时的价格； $\Delta p$ 、 $\Delta D$ 分别是价格、需求量的变化量。

由于电力属于一种特殊需求，且电能可以在许多场合都难以用其它商品来代替，所以它应属于缺乏弹性类型，满足 $0 < E_{D_0} < 1$ 。

### 1.2 IL 成本及估计方法

IL 成本是指负荷的停电损失，通常是指直接损失。IL 成本的估计方法有统计法(例如投入产出法)、市场行为法和调查估计法。目前国际上较流行通过问卷的调查估计法。

### 1.3 IL 成本模型的建立

然而，上述方法并没有考虑不同 $D_0$ 和 $p_0$ 对 IL 成本的影响。为此，一些学者将 IL 成本理解为用户因停电而实际减少的静利润，并基于用户不同需求曲线和消费者剩余理论来建立 IL 成本模型<sup>[4-6,8]</sup>。

针对线性需求情况，IL 成本模型可表示为：

$$C(p_0, D_0, E_{D_0}, x) = p_0 x^2 / (2D_0 | E_{D_0} |) \quad (2)$$

式中： $x$ 为负荷中断量。

## 2 电网公司购买备用所付出的成本

发电商、备用管理中心及用户采用竞价模式组成综合的备用服务市场。市场规则要求各 RCGS、IL 按边际成本申报线性报价函数，并按成本的等微增率准则参与市场竞价。

### 2.1 购买 RCGS

设瞬时备用机组 $g$ 所申报的综合报价<sup>[9]</sup>为 $p_g(Q_g) = \alpha_g + q_m \beta_g Q_g$ ，它是成交的瞬时备用容量 $Q_g$  (满足 $Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max}$ )的非下降函数， $\alpha_g$ (容量价格)

和 $\beta_g$ ( $\beta_g Q_g$ 为电量价格)反映了其竞标策略，极限情况下为常数，其中 $q_m$ 为容量事故 $m$ 的发生概率。该市场交易模型可表示为：

$$\min \sum_{g=1}^G p_g(Q_g) \times Q_g \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \sum_{g=1}^G Q_g = x \quad (4)$$

$$Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad \forall g \quad (5)$$

式中： $x$ 为瞬时备用总量； $G$ 为瞬时备用机组的总数。求解各瞬时备用机组所分配到的备用容量可参照文献[10]。

购买瞬时备用所支付的成本可表示为：

$$f_x(x) = \sum_{g=1}^G \alpha_g Q_g t_z + \sum_{m=1}^M q_m t_m \sum_{g=1}^G \beta_g (Q_g)^2 \quad (6)$$

式中： $t_z$ 为研究时段的长度； $M$ 为容量事故集的事故总数； $t_m$ 为事故 $m$ 的事故持续时间。

式(6)右边第1项为瞬时备用的容量成本，第2项是其电量成本。瞬时备用成交后，不论是否发生容量事故，都必须支付确定性的容量费，而电量成本则与事故有关，故属于风险性成本。对于其它非瞬时性备用而言，其成本还需要追加在响应滞后期间由系统保护切除的负荷损失<sup>[3]</sup>。

### 2.2 购买 IL

设用户 $d$ 按式(2)的边际成本所申报的价格为 $p_d(Q_d) = \beta_d Q_d$ ，它是成交的可中断容量 $Q_d$  ( $Q_d^{\min} \leq Q_d \leq Q_d^{\max}$ )的非下降函数， $\beta_d$ 反映了竞标策略，极限情况下为常数。该市场交易模型可表示为：

$$\min \sum_{d=1}^D p_d(Q_d) \times Q_d \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \sum_{d=1}^D Q_d = y_m \quad (8)$$

$$Q_d^{\min} \leq Q_d \leq Q_d^{\max} \quad \forall d \quad (9)$$

式中： $y_m$ 为事故 $m$ 下所需要中断的 IL 容量； $D$ 为 IL 市场用户的总数。求解方法可参照上面的瞬时备用容量市场。

容量事故 $m$ 下所支付的停电赔偿费用为：

$$f_{y_m}(y_m) = \sum_{d=1}^D \beta_d (Q_d)^2 \quad (10)$$

停电赔偿风险是指电网公司为中断 IL 所付出的赔偿风险，与容量事故有关，故属于风险性成本。针对容量事故集，它可表示为：

$$f_r = \sum_{m=1}^M q_m t_m \sum_{d=1}^D \beta_d (Q_d)^2 \quad (11)$$

## 3 配置 RCGS 的数学模型

3.1 模型建立

该模型以 RCGS 的购买成本与 IL 的停电赔偿总风险之和最小为目标函数, 约束中包括各事故下所需要的备用总量等式约束(由对事故  $m$  分析确定的容量缺额  $Q_m$ )以及各 RCGS、IL 市场可用容量不等式约束, 其数学模型可描述为:

$$\min f = f_x(x) + f_r(y_1, y_2, \dots, y_m, \dots, y_M) \quad (12)$$

$$\text{s.t. } x + y_m = Q_m \quad (13)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (14)$$

$$y_m^{\min} \leq y_m \leq y_m^{\max} \quad (15)$$

该模型不是以  $f_x$  或  $f_r$  最小, 而是以两者之和最小为目标, 引入了风险管理观点与协调优化理念。

3.2 RCGS 最优配置问题的定性描述

图 1 表示当  $x$  增加时,  $f_x$  随之增加, 同时,  $x$  的增加使需要的  $y_m$  减少, 故  $f_r$  单调下降。总成本  $f$  呈二阶导数为正的曲线, 具有最小值  $f_{\min}$ , 其对应的  $x$  值即为 RCGS 最优配置量  $x_0$ 。

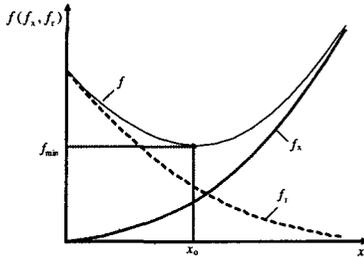


图 1 RCGS 的最优配置

Fig.1 Optimal configuration for the RCGS

3.3 模型求解

为加快寻优速度, 可采用数值灵敏度技术, 搜索到  $df/dx$  为零值的点( $x_0, f_{\min}$ )。求取数值灵敏度所用的步长和收敛门限值可按对精度的要求而定。虽然该方法不能保证得到最优解, 但能通过较少的计算量得到满意解, 故比较适合工程应用。

4 仿真分析

4.1 计算条件

以瞬时备用代表 RCGS 为例进行仿真。设各瞬时备用机组的电量为 600 元/MWh, 研究时段  $t_z$  为 24 h, 电价为 400 元/MWh。瞬时备用及 IL 市场参数如表 1、表 2 所示, 容量事故场景见表 3。

表 1 瞬时备用容量市场报价

机组 $g$	可调用容量		竞标策略 $\alpha_g$
	下限/MW	上限/MW	
1	0	20	240
2	0	40	280
3	0	40	320
4	0	60	360

表 2 IL 市场报价

用户 $d$	可中断容量		需求价格弹性 $E_{Dol}$
	下限/MW	上限/MW	
1	0	20	1/70
2	0	40	1/80
3	0	40	1/90
4	0	60	1/100

表 3 容量事故场景

事故 $m$	发生概率	容量缺额/MW	持续时间/h
1	0.050	50	3
2	0.015	100	5
3	0.005	150	7

4.2 最优瞬时备用配置决策

利用灵敏度搜索技术, 不难得到单一事故下的  $x_0$  及  $f_{\min}$  (见表 4)。对于不同的容量事故, 其  $x_0$  不同 (见图 2)。为此, 在制定最优配置方案时, 需考虑整个事故集, 此时  $x_0$  为 35 MW,  $f_{\min}$  为 1017.50 万元。

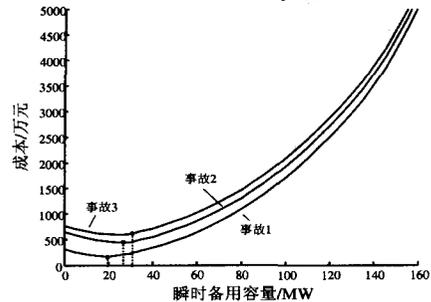


图 2 针对单个容量事故

Fig.2 For the individual capacity fault

表 4 优化结果

事故 $m$	$x_0$ /MW	$f_{\min}$ /万元
事故 1	20	174.19
事故 2	25	448.40
事故 3	30	609.00
事故集	35	1017.50

4.3 不同备用配置方案的经济性比较

比较 3 种配置备用容量的方案: ①方案 1: 仅配置瞬时备用; ②方案 2: 仅配置 IL 容量; ③方案 3: 优化配置瞬时备用与 IL。表 5 给出了针对单个事故各方案下的代价。显然, 方案 3 的经济性最优。

表 5 单个事故下各方案的代价

事故 $m$	方案 1 代价/万元	方案 2 代价/万元	方案 3 代价/万元
1	384.0	313.1	172.5
2	1617.5	655.2	444.3
3	4121.6	770.0	591.6

4.4 PED 的影响分析

针对事故 1, 图 3 给出了改变 PED 的影响结果。

随着 $|E_{D0}|$ 的增加,  $x_0$ 、 $f_x$ 以及 $f$ 随之减少;  $f_r$ 与 $q_1$ 以及中断强度 $y_1$ 有关,其综合影响使 $f_r$ 先增加后减少。

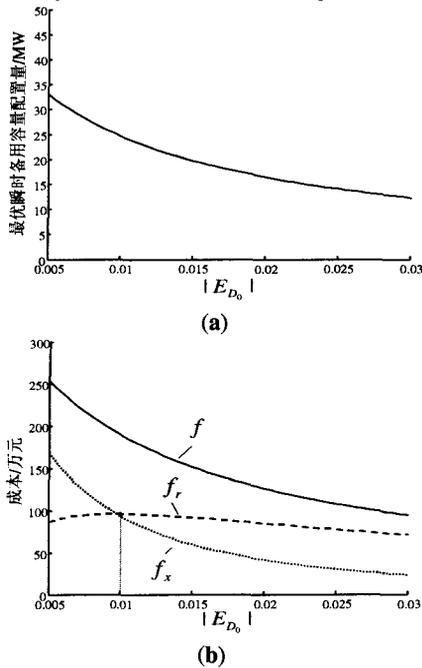


图3 需求价格弹性的影响

Fig.3 Influence of price elasticity of demand

## 5 结论

本文将 PED 引入到 IL 停电赔偿风险中,并基于风险观点的协调,对 RCGS 的配置进行了优化,量化分析了 PED 对 RCGS 最优配置的影响。仿真结果表明了其有效性。

## 参考文献

- [1] 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 30-34.  
MENG Xiang-xing, HAN Xue-shan. Discussion on Reserve Caused by Uncertain Facts[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 30-34.
- [2] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 1-6.  
XUE Yu-sheng. Interactions between Power Market Stability and Power System Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6.
- [3] 赖业宁, 薛禹胜, 汪德星, 等. 备用容量服务市场的风险决策[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 1-5.  
LAI Ye-ning, XUE Yu-sheng, WANG De-xing, et al. Risk Decision-marking for Reserve Capacity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 1-5.

- [4] 何永秀, 王怡, 黄文杰, 等. 电力需求价格弹性与系统最优备用的关系[J]. 电力需求侧管理, 2003, 5(5): 20-23.  
HE Yong-xiu, WANG Yi, HUANG Wen-jie, et al. Electricity Price Elasticity and Optimal System Reserve[J]. Power DSM, 2003, 5(5): 20-23.
- [5] 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.
- [6] 王蓓蓓, 李扬, 万秋兰, 等. 需求弹性对系统最优备用投入的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 13-17.  
WANG Bei-bei, LI Yang, WAN Qiu-lan, et al. Influence of Demand Elasticity on Optimal System Spinning Reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 13-17.
- [7] 宋承先. 现代西方经济学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1997.  
SONG Cheng-xian. Modern Western Economics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1997.
- [8] Fahriouglu M, Alavarado F L. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 317-322.
- [9] 王建学, 王锡凡, 张显. 电力市场中弹性运行备用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 20-27.  
WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, ZHANG Xian. The Flexible Operation Reserve Model in the Power Market[J]. Proceedings of the CSSE, 2005, 25(18): 20-27.
- [10] 罗运虎, 薛禹胜, DONG Z, 等. 低电价与高赔偿 2 种可中断负荷的协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 17-21.  
LUO Yun-hu, XUE Yu-sheng, DONG Z, et al. Coordination of Low Price Interruptible Load and High Compensation Interruptible Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 17-21.

收稿日期: 2007-06-22; 修回日期: 2007-08-14

作者简介:

罗运虎 (1975-), 男, 博士, 讲师, 从事变电站电气检测与故障诊断、电力需求侧管理方面的研究工作; E-mail: yluo@nuaa.edu.cn

邢丽冬 (1968-), 女, 副教授, 从事远场涡流无损检测方面的研究工作;

王勤 (1967-), 男, 副教授, 从事电力电子与电力传动方面的研究工作。