

一种电力用户停电损失函数估算方法

刘怀东¹,袁保庆¹,章贤方^{1,2}

(1. 天津大学电气与自动化工程学院,天津 300072; 2. 天津滨海快速交通发展有限公司,天津 300457)

摘要: 电力用户停电损失函数对电力系统规划、运行和电力市场下的安全费用计算等具有重要意义。但求取停电损失函数需要区分不同电力用户的用电性质,也需要大量统计数据资料作为停电损失函数的分析依据,从而使其成为当前电力市场研究工作的一个难点。本文在目前研究成果的基础上,提出一种参考其它地区停电损失函数、根据所研究地区电力用户消耗每 kWh 电力的平均效益估算用户停电损失函数的方法。该方法避免了大量数据统计工作,对不同性质电力用户的停电损失函数进行快速简单分析。用加拿大停电损失函数近似估算了天津市电力用户停电损失函数,实例表明所提方法可行。

关键词: 用户停电损失; 用户停电损失函数; 可靠性; 电力系统; 安全费用

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0036-03

0 引言

电力供应不足和停电给用户带来的损失越来越严重。电力系统规划、电力系统的经济可靠运行,电力市场环境停电损失补偿等,都需要估算电力用户停电损失^[1,2]。

关于停电损失的估算,已有一些研究成果发表。国外在大量统计数据的基础上,提出了有关停电损失费用的理论与方法^[3-6]。国内也开展了这方面的研究工作^[7-9]。

文献[4~6]利用统计资料获得用户停电损失对停电持续时间的函数,费时费力。文献[3]利用国民生产总值和各行业的年用电量数据粗略估算香港地区每 kWh 用户停电损失,需要统计数据少且方法简单,但不能反映每 kWh 停电造成的损失随停电持续时间的变化。在我们没有条件进行大量统计调查时,粗略估计用户停电损失函数是一件有意义的事情。

本文提出一种根据参考地区的停电损失函数和所研究地区的国民生产总值及各行业年用电量粗略估算各类用户的停电损失函数的方法。在保留文献[3]方法需要统计数据少的优点基础上,可提供更多的用户停电损失信息。

1 电力用户停电损失函数快速估算方法

电力用户停电损失包括直接损失和间接损失、短期损失和长期损失。直接损失是实际发生停电时用户遭受的损失,间接损失如停电造成心理恐慌等。短期损失是指停电期间的损失,长期损失如添加备用电源的费用等^[6]。本文只考虑短期直接停电损失。

电力用户停电初期损失包括可能的设备损坏、出现残次品、少生产产品的利润损失与恢复生产启动费用等,单位 kWh 损失相对较大。恢复生产启动费用与停电持续时间关系不大^[5]。

停电持续一定时间后,停电损失主要是少生产产品的利润损失,即损失的是用户正常生产时每 kWh 电力生产产品的平均效益。因此,停电持续时间超过某临界值后,用户停电损失可用用户正常生产时每 kWh 电力生产产品的平均效益近似描述。临界停电时间与用户类型有关,如商业用户临界停电时间短,工业用户相对较长^[4,5]。

我们观察到,以每 kW 停电损失曲线表示的电力用户停电损失函数,是一个凸曲线,如图 1 所示。随着停电持续时间的增加,曲线斜率逐渐减小,并趋于稳定,即停电持续时间足够长后,停电损失曲线趋于直线^[4-9]。该直线段的斜率,反映了停电后期每 kWh 用户平均效益损失。

根据以上分析,用户停电损失对停电持续时间的函数曲线最后阶段直线段的斜率,近似等于用户每 kWh 电力生产的产品平均效益。即:

$$\left. \frac{\partial f(t)}{\partial t} \right|_{t \rightarrow \infty} = P_r \quad (1)$$

其中: t 为用户停电持续时间, $f(t)$ 为用户停电损失函数,单位 \$/kW, P_r 为用户每 kWh 电力生产的产品平均效益,单位 \$/kW。

用户停电损失主要由用户类型、电力消费特点、规模、生产率水平、停电时刻、停电量、停电持续时间等决定^[4,6]。分类越细的同类用户、规模和生产率水平越接近的用户,其停电损失函数越接近。同类

用户,其规模和生产率水平不同时,我们观察到,其停电函数曲线具有粗略相似的形状^[4~9]。显然,用户分类越细、规模和生产率水平越相近,一般来说这种相似性也越好。即:

$$f_2(\tau) = k \cdot f_1(\tau) \quad (2)$$

其中, $f_1(\tau)$ 、 $f_2(\tau)$ 分别为用户 1 和用户 2 的停电损失函数,单位 \$/kW, k 为常数。

由公式 (1) 和 (2) 可得:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \tau} f_2(\tau) \right|_{\tau=24h} = P_2 \approx k \cdot \left. \frac{\partial}{\partial \tau} f_1(\tau) \right|_{\tau=24h} \quad (3)$$

其中, P_2 为用户 2 每 kWh 电力生产的产品平均效益,单位 \$/kWh。

若已知用户 1 的停电损失函数 $f_1(\tau)$ 和用户 2 的每 kWh 电力生产产品平均效益 P_2 , 已知用户 2 具有和用户 1 同样的类型,利用公式 (2) 可方便地估算出待定系数 k , 进而可估算出用户 2 的停电损失函数 $f_2(\tau)$ 。

显然,两个用户类型、规模、水生产率水平越相近,估算误差也越小。

2 算例

各类电力用户的停电损失特性差别较大,应按停电损失特性对用户进行分类。分类越细,研究结果越接近实际情况。本文按照文献 [4~6] 的方法将电力用户分为住宅用户、工业用户、商业用户 3 类,且仅研究商业用户和工业用户的停电损失函数。

本文选择加拿大作为参考地区,利用加拿大的停电损失函数估算天津市的用户停电损失函数。取停电持续时间 $\tau = 24$ h 时的曲线斜率近似曲线在 24 h 时的斜率。

2.1 加拿大用户停电损失函数

1991 年加拿大工业与商业用户每 kW 停电损失 L_{ind} 、 L_{com} 对停电持续时间 τ 的统计数据见表 1^[5]。

表 1 1991 年加拿大工、商业用户停电损失

Tab 1 Interruption costs of industrial and commercial customers of Canada in 1991 (\$/kW)

	\$/kW							
	2 sec	1 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h
L_{ind}	0.7291	3.1663	4.3217	6.5508	9.1189	16.2679	30.3524	44.7320
L_{com}	0.4572	1.7790	5.2580	13.7910	30.1775	64.9784	109.7704	136.0388

用表 1 数据画图,进行平滑处理,得到如图 1 的工业和商业用户停电损失函数 $f_{ind.ref}(\tau)$ 和 $f_{com.ref}(\tau)$, 单位 \$/kW。

由图 1 可得:

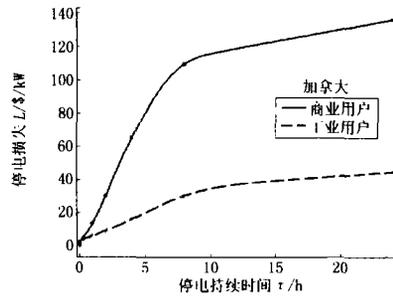


图 1 1991 年加拿大工业、商业用户停电损失函数

Fig 1 Canadian interruption cost functions for industrial and commercial customers in 1991

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial}{\partial \tau} f_{ind.ref}(\tau) \right|_{\tau=24h} = 0.604 \text{ \$/kW h} \\ \left. \frac{\partial}{\partial \tau} f_{com.ref}(\tau) \right|_{\tau=24h} = 1.49 \text{ \$/kW h} \end{cases} \quad (4)$$

可用如下的多项式近似表示图 1 的曲线:

$$\begin{cases} f_{ind.ref}(\tau) = \sum_{i=0}^6 p_{refi} \cdot \tau^i \\ f_{com.ref}(\tau) = \sum_{i=0}^6 q_{refi} \cdot \tau^i \end{cases} \quad (5)$$

其中, p_{refi} , q_{refi} , $i = 0, 1, \dots, 6$ 为多项式系数,见表 2。

表 2 用户停电损失函数多项式系数

Tab 2 Polynomial coefficients of customer interruption cost functions

i	0	1	2	3	4	5	6
p_{refi}	3.550	1.788	0.6734	-0.09003	0.004448	$9.396e-5$	$6.675e-7$
q_{refi}	1.709	8.714	4.178	-0.8004	0.05731	-0.001856	$2.277e-5$

2.2 天津市用户停电损失函数估算

以 1991 年天津市工业、商业电力用户停电损失函数为研究目标,以加拿大作为参考地区。根据公式 (2),有:

$$\begin{cases} f_{ind}(\tau) \approx k_{ind} \cdot f_{ind.ref}(\tau) \\ f_{com}(\tau) \approx k_{com} \cdot f_{com.ref}(\tau) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $f_{ind}(\tau)$ 、 $f_{com}(\tau)$ 分别为 1991 年天津市工业、商业电力用户停电损失函数, k_{ind} 、 k_{com} 为待定系数。

表 3 1991 年天津电力用户每 kWh 电力平均效益

Tab 3 A average revenue for each kWh consumption of Tianjin power customers in 1991

工业	2.34 元 /kWh
商业	11.0 元 /kWh

根据统计资料^[10, p 95], 1991 年天津市工业、商业电力用户平均效益见表 3。

根据公式 (1),有:

$$\begin{cases} \left| \frac{\partial f_{\text{ind}}(\tau)}{\partial \tau} \right| = 2.34 \text{ 元/kWh} \\ \left| \frac{\partial f_{\text{com}}(\tau)}{\partial \tau} \right| = 11.0 \text{ 元/kWh} \end{cases} \quad (7)$$

对公式(6)求导,并设 $1 \text{ \$} = 8.0 \text{ 元}$,将公式(4)、(7)代入,可得:

$$\begin{cases} k_{\text{ind}} = 0.4843 \\ k_{\text{com}} = 0.9228 \end{cases}$$

代入公式(6),可得 $f_{\text{ind}}(\tau)$ 、 $f_{\text{com}}(\tau)$ 的类似于公式(5)的表达式,单位为元/kWh,其系数 p_i 、 q_i 见表4,函数曲线见图2。

表4 天津市用户停电损失函数的系数

Tab 4 Polynomial coefficients of customer interruption cost functions of Tianjin

i	0	1	2	3	4	5	6
p_i	1.719	0.8659	0.3261	-0.04360	0.002154	$4.551e-5$	$3.233e-7$
q_i	1.577	8.041	3.856	-0.7386	0.05289	-0.0017132	$101e-5$

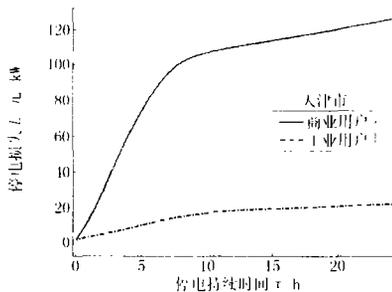


图2 1991年天津电力用户停电损失函数曲线

Fig 2 Tianjin interruption cost function curves of power users in 1991

3 结论

本文针对电力用户停电损失提出了两点假设:

1)当停电持续时间足够长时,单位功率停电损失与停电持续时间基本呈线性关系,直线段的斜率近似等于用户消耗 1 kWh 电力的平均生产效益;2)性质相近的同类用户具有相似的停电损失函数。根据这两点假设,提出了一种在缺乏必要的停电损失统计资料的情况下估算停电损失函数的方法。利用该方法,由加拿大停电损失函数,仅仅根据天津市工业和商业消耗每 kWh 电力的平均效益,估算了天津市工业和商业用户停电损失函数。

参考文献:

- [1] 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

Cost Optimization Based on Practical Dynamic Security Region[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 13-18

- [2] Kaye R J, Wu F F, Varaiya P. Pricing for System Security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 575-583
- [3] Mok Y L, Chung T S Prediction of Domestic, Industrial and Commercial Interruption Costs by Relational Approach[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97. Hong Kong: 1997. 209-215.
- [4] CIGRE Methods to Consider Customer Interruption Costs in Power System Analysis[R]. CIGRE Report, 2001.
- [5] Jonnavithula A, Billinton R. Features that influence Composite Power System Reliability Worth Assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1936-1941.
- [6] Wacker G, Billinton R. Customer Cost of Electric Service Interruptions[A]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(6): 919-930
- [7] 万官泉,任震,郭小龙,等.考虑馈线自动化的用户停电损失计算[J].电网技术,2005,29(1):24-29.
WAN Guan-quan, REN Zhen, GUO Xiao-long, et al Calculation of Customer's Outage Cost Considering Feeder Automation[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 24-29.
- [8] 陈晓,王健兴,臧宝锋.城市电网用户停电损失及其估算方法的研究[J].昆明理工大学学报,2003,28(1):53-56
CHEN Xiao, WANG Jian-xing, ZANG Bao-feng Research on the Power Outage Cost and Its Estimation in the Electric Power Network[J]. Journal of Kunming University of Technology, 2003, 28(1): 53-56
- [9] 白剑飞,来广志.停电损失调查及估算[J].西北电力技术,2002,30(6):20-23
BAI Jian-fei, LAI Guang-zhi Investigate and Estimation about Customer Outage Costs[J]. Northwest China Electric Power, 2002, 30(6): 20-23.
- [10] 国家电网公司.2000中国电力市场分析与研究[M].北京:中国电力出版社,2000
State Grid Corporation of China Research & Analysis of Electricity Markets of China, 2000 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000

收稿日期: 2006-02-10; 修回日期: 2006-03-03

(下转第73页 continued on page 73)

CSU-EPSA, 2004, 16 (5): 32-35.

[9] 张晓东,高波. 基于供给函数均衡模型的区域电力现货市场模拟分析[J]. 电网技术, 2005, 29 (13): 80-84.

ZHANG Xiao-dong, GAO Bo. Simulation of a Real Spot Market Based on Supply Function Equilibrium Model[J]. Power System Technology, 2005, 29 (13): 80-84.

收稿日期: 2006-02-20

作者简介:

胡福年(1967-),男,博士研究生,副教授,主要从事电力系统及其自动化,电力市场方面的教学和研究工作;
E-Mail: faunian@sina.com

吴军基(1955-),男,教授,博士生导师,主要从事检测及电力系统自动化方面的研究工作;

邹云(1962-),男,博士,教授,博士生导师,美国国家数学学会会员,美国数学评论评论员,主要从事控制理论及其应用,电力系统分析控制,电力市场领域的研究工作。

Analysis of bidding strategies of suppliers based on supply function equilibrium

HU Fu-nian^{1, 2}, WU Jun-ji³, ZOU Yun¹

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Department of Electrical Engineering, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China;

3. College of Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The electricity market is an oligopolistic competition market. Consequently, the bidding strategy is very important to the suppliers. Usually, the suppliers try to gain maximal profit by developing their best bidding strategy in the electricity market. In this paper, supply function model is employed to simulate bidding strategy of suppliers in power pool. The equilibrium equations are proposed when different bidding parameters are selected to maximize profits of suppliers, and the block bidding and power demand elasticity are also considered. The simulation results show that the method is feasible and efficient.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60474078).

Key words: electricity market; supply function; equilibrium; bidding strategies

(上接第 38 页 continued from page 38)

作者简介:

刘怀东(1963-),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统安全性和稳定性、电力市场; E-mail: hdliu@tju.edu.cn

袁保庆(1977-),男,硕士研究生,研究方向为电力市场及电力系统安全性分析;

章贤方(1970-),男,硕士研究生,研究方向为电力市场及电力系统安全性分析。

A method for estimating power customer interruption cost function

LU Huai-dong¹, YUAN Bao-qing¹, ZHANG Xian-fang^{1, 2}

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Binhai Mass Transit Development Corporation Ltd, Tianjin 300457, China)

Abstract: Power customer interruption cost functions (PCICF) are important for power system planning, operation, and security pricing under deregulation. But needed to distinguish the nature of Power customer Large and needed to work out amounts of statistical data of PCICFs. So it is a difficulty for the research of power market. A PCICF estimating method is presented, which refers to PCICFs of other areas and the average revenue from each kWh power consumption of power users in the studied area, and the need for large amounts of data is avoided and analyze PCICF of power customers of each nature is simply and quickly. A group of Canadian PCICFs is used to estimate Tianjin's PCICFs. The example shows that the presented method is practical.

Key words: customer interruption cost; customer interruption cost function; reliability; power system; security pricing