

# 综合考虑可靠性成本与缺电成本的电网规划

韦钢<sup>1</sup>, 吴伟力<sup>1,2</sup>, 张子阳<sup>1</sup>, 祖章庆<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 上海大学自动化系, 上海 200072)

**摘要:** 在配电网规划中要提高配电网的供电可靠性, 减少用户侧的缺电成本, 必然要求供电部门增加可靠性投资成本, 然而盲目地追求供电可靠性, 必然导致供电部门可靠性投资成本急剧增加。为了寻求供电可靠性与可靠性成本的平衡点, 综合考虑了可靠性成本和缺电成本, 提出了可靠性成本效益回归模型, 利用此模型在众多配电网规划方案中确定最佳可靠性方案。通过实例分析计算并讨论, 建立的模型及方法能方便有效地确定配电网规划中最佳可靠性方案。

**关键词:** 可靠性成本; 缺电成本; 电网规划; 成本效益; 最佳可靠性

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0038-04

## 0 引言

电力系统的根本任务是尽可能地将高质量的电能可靠地供给用户, 因此安全性、经济性、可靠性是对电力系统的根本要求。传统意义上的配电网供电总成本仅仅指的是供电部门的配电网投资成本和运行成本。然而由于供电可靠性不高, 导致发生电力事故, 造成配电网供电不足的损失有时非常巨大, 因此在进行配电网规划时必须考虑将来配电网供电的可靠性。随着电力市场研究的开展和深入, 不难理解配电网供电总成本不仅包括配电网扩展建设的投资成本、运行成本, 还应包括由于配电网供电可靠性问题导致电力供给不足或中断, 从而造成用户缺电损失, 即需求侧的缺电成本<sup>[1]</sup>。因此在电力市场机制下, 电力作为一种商品, 电价应能反映缺电成本的大小, 合理的电价结构必须考虑供应侧和需求侧两个方面, 即在供应侧能反映生产成本, 在需求侧能反映负荷特性。

要提高配电网的可靠性, 减少用户侧的停电损失, 必然要求电力公司加大对配电网设备的投资, 因此配电网的高可靠性与低投资成本是一对矛盾<sup>[1]</sup>, 为了寻求配电网供电可靠性与可靠性成本之间的平衡点, 在众多配电网备选方案中确定最佳可靠性方案, 本文运用 K. K. Govil 提出的函数关系式, 建立了配电网可靠性成本效益回归模型来确定最佳可靠性方案, 并通过实例分析讨论此模型是方便有效的。

## 1 可靠性成本 - 效益分析<sup>[1,2]</sup>

作为供电部门, 电网供电总成本为电网可靠性成本和电网可靠性效益的现值之和, 可用如下式子表示:

$$T = R_{\text{cost}} + R_{\text{benefit}} \quad (1)$$

式中:  $T$  为方案的电网供电总成本,  $R_{\text{cost}}$  为方案的电网可靠性成本,  $R_{\text{benefit}}$  为方案的电网可靠性效益。

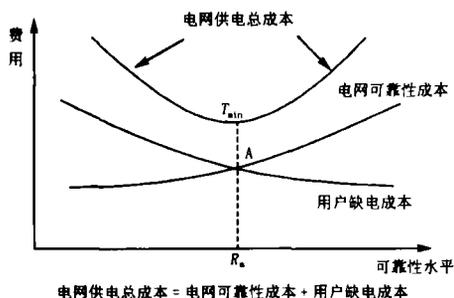
电网可靠性成本定义为供电部门为使电网达到一定供电可靠性水平而需增加的投资成本 (也包括运行成本)。电网可靠性效益可定义为因电网达到一定的供电可靠性水平而使用户获得的效益。由于某一供电可靠性水平下的社会、经济效益较难直接估算, 本文将可靠性效益用用户缺电成本计算, 即由于电力供给不足或中断引起用户缺电、停电而造成的经济损失来表示。用户缺电成本与缺电发生的时间、缺电提前通知时间、缺电量、缺电持续时间、缺电频率及用户类型等多种因素有关, 缺电成本是上述这些因数的函数。缺电成本  $R_{\text{benefit}}$  (单位为元/期间) 可按下式计算<sup>[1,3]</sup>:

$$R_{\text{benefit}} = \sum_{i=1}^n IEAR_i \times EENS_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sum_{k=1}^m L_{ik} \cdot f_k \cdot C_{ik}(d_k)}{\sum_{k=1}^m L_{ik} \cdot f_k \cdot d_k} \cdot EENS_i \right) \quad (2)$$

式中:  $IEAR_i$  (单位为元/kWh) 为节点  $i$  的缺电损失评价率,  $EENS_i$  (单位为 kWh 期间) 为研究期间内节点  $i$  的电量不足期望值,  $n$  为电网的负荷节点数,  $m$  为造成节点  $i$  用户缺电的故障总次数,  $L_{ik}$  为第  $k$  种故障下节点  $i$  的缺负荷量,  $f_k$  及  $d_k$  分别为第  $k$  种故障出现的频率及持续时间,  $C_{ik}(d_k)$  为相应的单位缺

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目 (P1301)

电损失,可由用户综合缺电损失函数求得。



电网供电总成本 = 电网可靠性成本 + 用户缺电成本

图 1 可靠性成本 - 效益分析曲线

Fig 1 Reliability cost-benefit curves

图 1 为可靠性成本 - 效益分析曲线,从图中可见,电网供电总成本一般只有在电网可靠性成本和用户缺电成本相交的 A 点处才最低,此时  $R_m$  为最佳电网可靠性水平。电网供电总成本与可靠性之间的函数关系应满足以下四个条件:

电网可靠性成本  $R_{cost}$  是可靠性的单调递增函数;

用户缺电成本  $R_{benefit}$  是可靠性的单调递减函数;

电网供电总成本  $T$  在某一可靠度  $R_m$  处存在一个最小值  $T_{min}$ ;

在一定条件下,当可靠性水平  $R > R_m$  时,电网可靠性成本  $R_{cost}$  占优势地位,当可靠性水平  $R < R_m$  时,用户缺电成本  $R_{benefit}$  占优势地位。

## 2 利用可靠性成本效益回归模型确定最佳可靠性

### 2.1 可靠性成本效益回归模型的提出<sup>[4]</sup>

本文运用 K K Govil 提出的函数关系式,建立配电网可靠性成本效益回归模型,进行最佳可靠性分析,其模型如下所示:

令式 (1) 中的

$$R_{cost} = K \left( \frac{R}{1-R} \right)^r \quad (3)$$

$$R_{benefit} = F \left( \frac{1-R}{R} \right)^g \quad (4)$$

则式 (1) 可改写成如下表达式:

$$T = K \left( \frac{R}{1-R} \right)^r + F \left( \frac{1-R}{R} \right)^g \quad (5)$$

式 (3)、式 (4)、式 (5) 中,  $K, r, F, g$  均为大于零的常数,  $R$  为配电网可靠度。

式 (5) 模型满足了电网供电总成本与可靠性之间的函数关系应满足的四大条件。

则式 (5) 中的最佳可靠度为:

$$R_m = \frac{1}{1 + \left( \frac{K \cdot r}{F \cdot g} \right)^{\frac{1}{r+g}}} \quad (6)$$

### 2.2 可靠性成本效益回归模型参数的求解<sup>[5]</sup>

由于本文中提出的可靠性成本效益回归模型是非线性模型,因此在通常情况下要先线性化再进行线性回归分析来确定模型参数的值。具体步骤如下:

对式 (3) 进行处理得:

$$\ln R_{cost} = \ln K \left( \frac{R}{1-R} \right)^r = \ln K + r \ln \left( \frac{R}{1-R} \right) \quad (7)$$

令  $Y_1 = \ln R_{cost}, a_1 = \ln K, b_1 = r, X = \ln \left( \frac{R}{1-R} \right)$

则式 (7) 可表示为:

$$Y_1 = a_1 + b_1 X$$

同理,对式 (4) 进行处理,令  $Y_2 = \ln R_{benefit}, a_2 =$

$$\ln F, b_2 = -g, X = \ln \left( \frac{R}{1-R} \right) \text{ 得:}$$

$$Y_2 = a_2 + b_2 X$$

对配电网规划中提出的  $n$  套规划方案中的数据进行处理,见表 1。

表 1 模型数据的处理

Tab 1 Disposal of model data

	处理前	处理后
可靠性成本	$R_{cost1}, R_{cost2}, R_{cost3}, \dots, R_{costn}$	$Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, \dots, Y_{1n}$
缺电成本	$R_{benefit1}, R_{benefit2}, R_{benefit3}, \dots, R_{benefitn}$	$Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, \dots, Y_{2n}$
可靠度指标	$R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$	$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$

运用统计学中的“回归分析”和“最小二乘法”,得出  $\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_2$  的值,求出式 (5) 各参数值:

$$\hat{K} = e^{\hat{a}_1}, \hat{r} = \hat{b}_1, \hat{F} = e^{\hat{a}_2}, \hat{g} = -\hat{b}_2$$

根据式 (6), 求出式 (5) 的最佳可靠度为:

$$\hat{R}_m = \frac{1}{1 + \left( \frac{\hat{K} \cdot \hat{r}}{\hat{F} \cdot \hat{g}} \right)^{\frac{1}{\hat{r} + \hat{g}}}} \quad (8)$$

其对应的最小供电总成本  $T_{min}$  为:

$$T_{min} = K \left( \frac{\hat{R}_m}{1 - \hat{R}_m} \right)^{\hat{r}} + F \left( \frac{1 - \hat{R}_m}{\hat{R}_m} \right)^{\hat{g}} \quad (9)$$

### 2.3 配电网规划中确定最佳可靠性方案方法

配电网规划中确定最佳可靠性方案流程如图 2 所示。

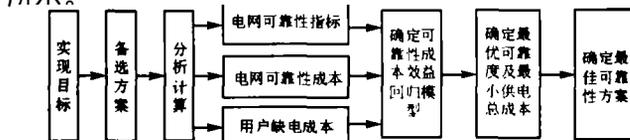


图 2 确定最佳可靠性方案流程图

Fig 2 Flow chart of decision best reliability scheme

在配电网规划中,利用本文建立的可靠性成本效益回归模型分析解决问题时,首先要明确规划区实现的目标,确立达到目标的若干备选方案,然后分析计算各备选方案的配电网可靠性指标、配电网可靠性成本及用户停电成本,并确定配电网的可靠性成本效益回归模型表达式,算出该地区配电网最优可靠度及相应的最小电网供电总成本,最终在备选

方案中确定最佳可靠度方案。

### 3 算例与分析

某地区配电网规划中,确定了七个可靠度不同的配电网规划方案,七种配电网规划方案对应的电气接线情况见表 2。

表 2 配电网规划方案

Tab 2 Distributed network planning schemes

两端节点	线路容量	长度 /km	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七
1—2	100	40							
1—3	100	31							
1—4	100	20							
1—5	100	30							
1—6	100	40							
2—3	75	63							
2—4	82	59							
2—5	100	30							
2—6	80	60							
3—4	100	20							
3—5	78	61							
3—6	100	20							
4—5	100	48							
4—6	100	38							
5—6	70	68							

注:“ ”表示两节点有架空线或电缆直接相连

七种不同方案可靠性投资成本(包括电源投资成本以及配电主要设备费用)列于表 3 中。

表 3 供电可靠性及可靠性成本

Tab 3 Power supply reliability and reliability cost

	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七
供电可靠率	0.999 6	0.999 3	0.998 8	0.996 2	0.993 5	0.990 8	0.987 6
可靠性成本 /亿元	423.40	330.56	271.25	232.12	207.52	165.25	113.75

每个节点的综合停电损失列于表 4。

表 4 综合停电损失

Tab 4 Composite customer damage (Yuan/kW)

停电持续时间	元 /kW							
	1 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	240 min	480 min
节点 1	14.62	34.81	54.82	81.77	120.53	180.73	226.47	502.27
节点 2	3.43	26.72	35.14	76.97	132.37	205.73	281.85	747.07
节点 3	9.05	13.57	15.37	20.02	25.12	31.24	35.71	74.16
节点 4	0.009	0.837	1.35	4.34	10.28	31.75	44.23	141.21
节点 5	8.06	12.11	14.23	18.75	25.32	30.43	36.75	52.78
节点 6	0.4	3.32	7.13	13.43	27.34	45.56	59.02	234.36

根据表 4 的综合停电损失以及七个方案中各节点的故障类型、缺负荷量、停电次数及停电持续时间,应用式(2)给出的计算方法,分别计算出各个方案的每个节点的缺电成本,最终可以求得各个方案的总缺电成本。

七个方案的供电可靠性、可靠性成本、总缺电成本及供电总成本列于表 5。

表 5 模型数据

Tab 5 Model data

	供电可靠性	可靠性成本 /亿元	总缺电成本 /亿元	供电总成本 /亿元
方案一	0.999 6	423.40	17.19	440.59
方案二	0.999 3	330.56	18.24	348.80
方案三	0.998 8	271.25	19.40	290.65
方案四	0.996 2	232.12	43.10	275.22
方案五	0.993 5	207.52	91.08	298.60
方案六	0.990 8	165.25	147.12	312.37
方案七	0.987 6	113.75	241.62	355.37

从表 5 的数据可以看出:从较低的可靠性水平开始,提高可靠度水平,配电网的供电总成本逐步减小,然后又逐步增大;当一个地区的配电网的可靠性水平越高,它需要的可靠性成本也随之增加,用户侧的缺电损失随之降低;然而并非配电网的可靠性水平越高,所带来的社会效益越好,任何配电网的可靠性水平都达不到 100%,当配电网的供电可靠性接近 100%时,其可靠性投资成本就急剧增大,此时用户缺电成本的减少却相当少,也就是说,提高单位可靠性水平所需的可靠性投资成本将超过由于减少的缺电成本而得到的社会效益,此时电网的可靠性投

资成本占优势,进一步提高电网的可靠性水平是不值得的;相反,配电网的供电可靠性水平越低,此时虽然供电部门的可靠性投资成本减少,但用户缺电成本占优势,其增加的速度快于可靠性投资成本的减少,从而导致供电总成本的增加。因此在配电网规划中如何寻找这个最佳可靠性水平是目前电网规划人员关心的问题。

由表 5 中的七个方案的电网供电可靠性、可靠性投资成本及总缺电成本,根据本文介绍的可靠性成本效益回归模型参数的求解方法,可求得可靠性成本效益回归模型的参数值:  $K = 37.0330$ ,  $r = 0.3085$ ,  $F = 4839.1859$ ,  $g = 0.7699$ 。

则该地区配电网的可靠性成本效益回归模型可以表示成如下形式:

$$T = 37.0330 \left[ \frac{R}{1-R} \right]^{0.3085} + 4839.1859 \left[ \frac{1-R}{R} \right]^{0.7699}$$

由式 (8) 可求出该地区的配电网的最优供电可靠性  $R_m = 0.9954$ , 利用式 (9) 可求出对应的最小供电总成本  $T_{\min} = 271.64$  亿元。

根据表 5 的数据,在七个备选方案中,只有方案乙的供电可靠性  $R = 0.9962$ , 及相应的配电网供电总成本  $T = 275.21$  亿元与可靠性成本效益回归模型算出的最优供电可靠性和最小供电总成本比较接近。由此可得,方案四在七个备选方案中是最佳可靠性方案。

对于本文提出的可靠性成本效益回归模型,若模型的原始数据(即备选方案)越多,则该模型的精确度就越高,即提高了的最优可靠度及相应的最小供电总成本的精确度。

#### 4 结论

随着电力市场的兴起和可靠性价值概念的形成,可靠性模型越来越受到重视,因此在实际的电网规划中,应给予充分考虑。根据本文的研究结果,得出如下结论:

本文建立的可靠性成本效益回归模型综合考虑电网可靠度、可靠性投资成本、总缺电成本等多方面的因素,能够较准确地得到最佳可靠度。

本文对配电网规划中可靠性成本效益研究进行了数学模型化处理,相比传统的研究更直观、更方便、更有效,易于计算。

根据上面得出的两点结论,本文所做的研究便于今后进一步对配电网规划可靠性成本效益进行研究,对现场具体配电网规划有较大的指导价值,同时为电网规划工作人员提供有益的参考。

#### 参考文献:

- [1] 张焰. 电网规划的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36  
ZHANG Yan Research on Cost-benefit Analysis of Electric Power Network Reliability Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15) 33-36
- [2] 曹世光. 缺电成本与可靠性规划的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 52-54  
CAO Shi-guang Research on Outage Cost and Reliability Planning[J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 52-54
- [3] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划方法与应用[M]. 上海: 科学技术出版社, 2002  
CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan The Method and Application on Power Network Planning[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 2002
- [4] Govil K K New Analytical Models for Logistics Support Cost and Life Cycle Cost Reliability Function[J]. Microelectron Reliab, 1984, 24(1): 61-63
- [5] 张尧庭. 工程数学: 概率统计[M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1993  
ZHANG Yao-ting Engineering Mathematics: Probability and Statistics[M]. Beijing: Central Radio & TV University Press, 1993

收稿日期: 2006-03-21; 修回日期: 2006-06-09

作者简介:

韦钢(1958-),男,硕士生导师,教授,主要研究方向为电力系统运行分析、配电系统规划、电力系统继电保护; E-mail: wg5815@sohu.com

吴伟力(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划、电力系统运行分析。

#### Power network planning considering reliability cost and unserved energy cost

WEI Gang<sup>1</sup>, WU Wei-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Zi-yang<sup>1</sup>, ZU Zhang-qing<sup>1</sup>

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

2. Automation Department, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(下转第 46 页 continued on page 46)

试,其主要性能指标为:适用于 48 V、110 V、220 V 直流系统;接地电阻测量范围:范围 10 ~ 10 000 k,精度  $\pm 5\%$ ;电阻报警值设置:10 ~ 1 000 k;检测时间:小于 500 ms

该在线绝缘仪是一种自动化监测装置:它集检测、显示、记录于一体,无需在直流系统中注入任何信号,因此对直流系统无任何影响;能够抑制直流系统分布电容对检测结果的干扰;利用数字电位器和仪表放大器,实现宽范围测量;采用 WNBOND 公司的微控制器 W78E58B 作为主机,结合简洁的可编程逻辑器件,提高了装置性能和处理速度;采用带看门狗的 E<sup>2</sup>PROM,可记忆 255 组接地故障,装置掉电后信息不丢失;留有 RS485 对外通信接口,可实现远程监控;采用汉字液晶显示和触摸式按键,直观明了,操作简单,使用户能够在无需说明书的情况下熟练使用本装置。现场运行表明,该仪器具有在线测量速度快、测量精度高、可靠性高、人机界面友好等显著优点。

#### 参考文献:

[1] 白忠敏,於崇干,刘百震. 电力工程直流系统设计手册

[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

BAI Zhong-min, YU Chong-gan, LU Bai-zhen Design Manual of DC Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[2] 施慧,贾秀芳. 对现有检测直流系统接地故障几种方法的比较 [J]. 东北电力技术,1999,(9):48-50.

SHI Hui, JIA Xiu-fang The Comparison of Present Several Methods for Detecting the Grounding Faults of DC System [J]. Northeast Electric Power Technology, 1999, (9): 48-50.

[3] 贾秀芳,赵成勇. 直流系统绝缘监测综合判据 [J]. 电力系统自动化,1999,23(16):47-49.

JIA Xiu-fang, ZHAO Cheng-yong Synthesized Criteria of DC System Insulation Monitoring [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (16): 47-49.

收稿日期: 2006-03-21; 修回日期: 2006-07-10

作者简介:

杨波(1977-),男,硕士,工程师,主要从事电厂自动化设备的开发和研究工作;E-mail: cblueocean@163.com

张宝生(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力拖动。

### Research and realization of online insulating resistance measuring instrument in DC system

YANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Bao-sheng<sup>2</sup>

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** After comparing and analyzing several conventional insulating resistance measuring methods, their shortcomings are pointed out. A new kind of insulating resistance measuring instrument in DC system is presented, integrating of the functions resistance measuring, displaying and recording. The instrument takes MSC51 as kernel and CPLD as accessory controlling unit, adopts Ping-Pong variable bridge method, and accomplishes online measuring insulating resistance exactly. Its principle, hardware and software design are introduced in detail. The practical operation shows that the instrument has the advantages of high precision, better anti-interference and low price.

**Key words:** DC system; online measurement; insulating resistance; Ping-Pong method

(上接第 41 页 continued from page 41)

**Abstract:** It is necessary for power supply company to increase reliability investment cost in order to improve power supply reliability of distributed network and decrease consumer unserved energy cost on distribution network planning, however, if the power company blindly pursuit power supply reliability, it certainly results in sharp increase of reliability investment cost. In order to pursuit the balance between power supply reliability and reliability cost, this paper considers reliability cost and unserved energy cost, and introduces reliability cost-benefit regressive model with which the company can decides optimum reliability scheme in numerous power distribution network planning schemes. It is convenient and efficient that the model and method can decide best reliability scheme on power distribution network planning with the example.

This project is supported by Shanghai Leading Academic Discipline Project (No. P1301).

**Key words:** reliability cost; unserved energy cost; power network planning; cost-benefit; optimum reliability