

基于区间数和价值理论的配电网可靠性评估

郑彦芹¹, 娄北², 张鸿雁², 杨丽徙¹

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州供电公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 针对配电系统可靠性原始参数不确定对可靠性指标的影响, 引入区间数与区间运算, 给出了可靠性指标的区间计算形式。在算法上, 通过网络等值原理将复杂配电系统逐步等值为只有一条馈线的简单配电系统, 进而结合等效逻辑模型和故障模式后果分析法(FMEA)评估系统的各项可靠性指标, 比直接利用FMEA法大大提高了效率。最后, 将用区间数表示的可靠性指标引入可靠性评估方面, 使用成本/效益比的概念作为电网改造方案可行性和最优性的判据。

关键词: 配电系统; 可靠性; 区间数; 网络等值原理; 成本/效益比

Reliability evaluation of distribution system based on interval data and value

ZHENG Yan-qin¹, LOU Bei², ZHANG Hong-yan², YANG Li-xi¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Against the influence of uncertainty of all of the parameters to reliability indexes, this paper introduces interval numbers and interval operation to evaluation and provides interval formulations of reliability indices. Using equivalent principle turns the complicated distribution system into a simple one step by step, and then obtains the reliability indexes, which is much more efficient than employing FMEA directly. Finally, this paper presents the interval indexes to the reliability evaluation. At the same time, the cost/benefit ratio for the criterion of feasibility and optimization is put forward.

This project is supported by National Natural Science Foundation of the Education Department of Henan Province(No.2004601067).

Key words: distribution system; reliability; interval data; equivalent principle; cost/benefit ratio

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)18-0019-05

0 引言

随着社会的进步和人民生活水平的提高, 停电故障对用户造成的直接损失和间接损失越来越大, 各类用户对于供电可靠性的要求也越来越高。据统计, 约80%的用户停电源于配电系统故障^[1]。因此, 近年来, 对于配电系统可靠性的研究工作不断深入, 出现了很多针对不同网络结构特点的新方法。

文献[2,3]采用网络等值法将复杂网络简化为简单辐射状网络, 避免了直接使用故障模式后果分析法(FMEA)故障模式太多的困难。文献[4,5]在分析计算过程中, 引入数据结构中的深度优先搜索、广度优先搜索和邻接表的概念, 以缩小计算范围和

减少计算时间。文献[6,7]求取从供电点至负荷点的最小路, 非最小路元件的影响折算到最小路节点上, 然后求解可靠性指标。文献[8~10]先对配电网进行最小隔离块的划分, 然后以最小隔离块为枚举对象进行预想事故的模拟, 最终实现可靠性指标的计算。

基于目前配电网可靠性研究现状和配电网运行管理的实际情况, 将区间数和区间运算引入原始数据的统计和分析中, 以解决因为统计资料不足或统计误差以及对电网未来运行环境预测不足而具有不确定性的问题; 同时, 将区间数表示的可靠性指标应用于规划评估方面, 结合价值理论对于现有的配电系统提出改进方案, 同样可以使评估过程摆脱由于原始数据的不确定性带来的影响。

1 采用区间数的可靠性指标计算

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金项目(2004601067)

1.1 可靠性指标计算的基本思想及算法

配电系统可靠性指标的计算和分析都是建立在元件可靠性原始参数基础上的。实际中,原始参数可能会因为统计资料不足或统计误差以及对电网未来运行环境预测不足而具有不确定性,此时若再利用不准确的参数对电力系统进行可靠性定量评估给出一个确切值,将会导致评估结果与实际情况有较大的偏差。因此,针对可靠性原始参数的不确定性,采用一个数值范围区间来表示原始参数和可靠性指标,更加符合配电网运行实际并且更有利于指导实际。

算法上,采用网络等值法,将复杂配电系统逐步等效为简单辐射型配电网,利用FMEA法求得系统的可靠性指标,避免了直接运用故障模式法评估带分支馈线的配电系统所带来的复杂性,极大地提高了计算效率。

1.2 区间数和区间运算法则

对于给定数对 $x_{dn}, x_{up} \in R, R$ 为实数域,若满足条件 $x_{dn} \leq x_{up}$, 则有界数集合:

$$\tilde{x} = [x_{dn}, x_{up}] = \{x \in R | x_{dn} \leq x \leq x_{up}\} \quad (1)$$

式中: x_{dn}, x_{up} 分别为区间数 \tilde{x} 的上、下端点。

若 $x_{dn} = x_{up}$, 则定义 $x = [x_{dn}, x_{up}]$ 为点区间数,将实数域 R 上所有有界闭区间数的集合记为 $I(R)$ 。

区间四则运算满足加法律、乘法律 and 齐次率。其算术运算是封闭的,代数性质与数运算有所区别,但仍满足加法和乘法的交换律、结合律。

1.3 可靠性指标的区间形式

对于 n 个元件串联系统,可靠性区间计算的基本方程为:

$$\tilde{\lambda} = \sum_{i=1}^n \tilde{\lambda}_i = \sum_{i=1}^n [\lambda_{i\min}, \lambda_{i\max}] \quad (2)$$

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^n \tilde{\lambda}_i \tilde{\gamma}_i = \sum_{i=1}^n [\lambda_{i\min}, \lambda_{i\max}] \cdot [\gamma_{i\min}, \gamma_{i\max}] \quad (3)$$

$$\tilde{\gamma} = \tilde{U} / \tilde{\lambda} \quad (4)$$

式中: $\lambda_{i\min}, \lambda_{i\max}$ 分别为第 i 个元件的最小和最大故障率, $\gamma_{i\min}, \gamma_{i\max}$ 分别为第 i 个元件的最小和最大故障修复时间, $\tilde{\lambda}_i, \tilde{\gamma}_i$ 分别为第 i 个元件的故障率区间值和修复时间区间值; $\tilde{\lambda}, \tilde{\gamma}, \tilde{U}$ 分别为串联系统的故障率区间值,平均故障修复时间区间值和年故障修复时间区间值。

相应的,系统可靠性指标的区间形式如下:系统平均停电频率:

$$\tilde{f}_{SAIFI} = \sum_i \tilde{\lambda}_i N_i / \sum_i N_i \quad (5)$$

系统平均停电持续时间:

$$\tilde{t}_{SAIDI} = \sum_i \tilde{U}_i N_i / \sum_i N_i \quad (6)$$

用户平均停电持续时间:

$$\tilde{t}_{CAIDI} = \sum_i \tilde{U}_i N_i / \sum_k N_k \quad (7)$$

平均供电可用率:

$$\tilde{\eta}_{ASAI} = (8760 \sum_i N_i - \sum_i \tilde{U}_i N_i) / 8760 \sum_i N_i \quad (8)$$

式中: N_i 为负荷点 i 所带用户数; k 为故障负荷点数; N_k 为负荷点 k 所带用户数。

1.4 可靠性指标计算的网路等值法

网络等值法的基本思想是对复杂网络从主干线依次向下分层,从最末层开始计算该层可靠性指标对上层的影 响,用一个和最末层网络具有相同可靠性指标的简单元件代替该层网络,依次向上等值,从而将复杂结构的配电网逐步简化成简单辐射状主馈线系统,完成网络等值法的上行等值过程。

图1中的复杂配电系统由3层馈线组成,最下面的第3层馈线发生故障不仅会对其本身的负荷点有影响而且还会影响上面两层馈线的负荷点。

可以把第3层馈线等值为一个元件 E_3 串在第2层馈线中,如图2所示,这样第2层馈线就等效为一分支馈线的简单配电系统。

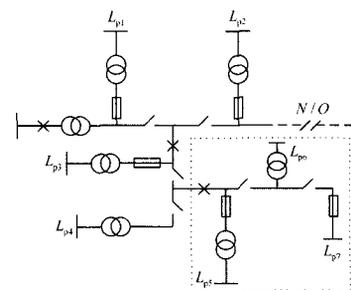


图1 复杂配电网的上行等值图

Fig.1 Ascending equivalent of complex distribution network

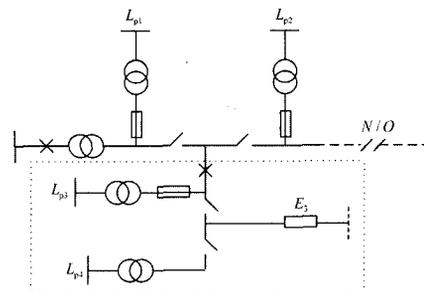


图2 复杂配电网的上行等值图

Fig.2 Ascending equivalent of complex distribution network

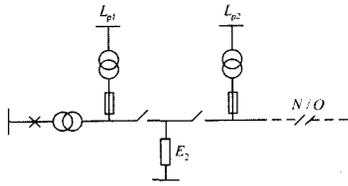


图3 复杂配电网的上行等值图

Fig.3 Ascending equivalent of complex distribution network

同样也可将等效后的第2层馈线等值为一元件 E_2 串在第1层馈线中, 使第1层馈线等效为一简单配电系统 (图3), 从而利用前面公式计算第1层馈线的负荷点可靠性指标。

另一方面, 上层馈线发生故障也会影响下层馈线负荷点的可靠性, 其等值过程与上行等值相反, 称为复杂配电网的下行等值过程。

上行等值支路的可靠性指标:

$$\begin{cases} \lambda_E = P_b \left(\sum_{i=1}^{n'} \lambda_i + \sum_{k=1}^{n''} P_{kf} \lambda_k \right) \\ \gamma_E = \gamma_S \\ U_E = \lambda_E \gamma_E = P_b \left(\sum_{i=1}^{n'} \lambda_i + \sum_{k=1}^{n''} P_{kf} \lambda_k \right) \gamma_S \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_b 为等值支路首端断路器不可靠工作的概率值; λ_i, λ_k 分别为等值支路上馈线段 i 和负荷支路 k 的故障值; n', n'' 分别为等值支路上馈线段和负荷支路的总个数; P_{kf} 为负荷支路的熔断器不可靠工作的概率值, 无熔断器的支路 $P_{kf} = 1$; γ_S 为隔离开关的操作时间。

下行等值支路的可靠性指标:

$$\begin{cases} \lambda_F = \sum_{j=1}^n \lambda_j + \sum \lambda_E \\ U_F = \lambda_F \gamma_F = \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_j + \sum \lambda_E \gamma_E \\ \gamma_F = U_F / \lambda_F \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ_j, γ_j 分别为主馈线上馈线段 j 的故障值和故障修复时间; n 为主馈线上馈线段的总个数; $\sum \lambda_E, \sum \lambda_E \gamma_E$ 分别为除等值支路外其他所有分支馈线的下行等值故障率和等值年故障修复时间之和。

2 基于价值理论的可靠性评估

将区间运算得出的可靠性指标应用于配电网改造方案的评估中, 结合价值理论判定改造方案的可行性和最优性。

基于价值理论的可靠性预测评估方法从最小化成本着手, 这里的总成本 $C(R)$ 包括两个部分^[11]:

一是为了提高电网可靠性而需增加的设备投资成本及运行管理成本 $f(R)$; 二是由于电网故障或检修造成供电中断而使供电公司因少售电而无法获得的电费、用户停电损失赔偿费以及故障设备的维修费等 $g(R)$ 。图 3 显示了 $f(R)$ 和 $g(R)$ 与可靠性水平之间的关系曲线。

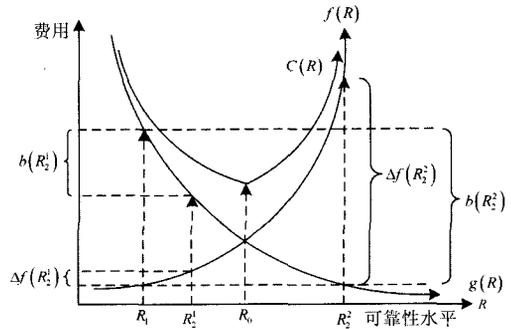


图4 电网可靠性的成本效益图

Fig.4 Cost/benefit of electric network reliability

年度总成本函数为:

$$C(R) = f(R) + g(R) \quad (11)$$

从图中可以看出, R_0 是最优的可靠性水平。其中, 函数 $g(R)$ 看作是停电持续时间的函数, 同时也与停电地区用户性质相关。

由于区间数的使用:

$$\tilde{g}(R) = \tilde{\lambda}_j L_p C(\tilde{r}_j, p) \quad (12)$$

其中: $\tilde{\lambda}_j$ 是 j 区域馈电线路故障率区间值, L_p 是负荷点 p 的平均联络负荷, $C(\tilde{r}_j, p)$ 是以美元/千瓦为单位的停电损失区间值, 它与停电区域 j , 停电时间 \tilde{r}_j 相关。 $C(\tilde{r}_j, p)$ 是用户类型和停电持续时间的函数, 可以通过用户调查数据得出, 如表 1^[13] 所示。使用插补法或者外推法, 就可以得到任意停电持续时间的停电损失。

表1 不同用户类型停电损失函数

用户类型	停电持续时间 (分钟) 及损失 (美元/千瓦)				
	1 分钟	20 分钟	60 分钟	240 分钟	480 分钟
大用户	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
小工业用户	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
商业用户	0.381	2.969	8.552	31.32	83.01
农业用户	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120
居民用户	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
政府及院校	0.044	0.369	1.492	6.558	26.04
办公场所	4.778	9.878	21.06	68.83	119.2

在实际情况下, 由于电网改造方案的有限性,

很难出现最优可靠性水平的投资方案。这里引入电网改造后产生效益的概念 $\tilde{b}(R)$ 和改造成本的概念 $\Delta f(R)$ ：

$$\begin{cases} \tilde{b}(R) = \tilde{g}(R_{cs}) - \tilde{g}(R_{gz}) \\ \Delta f(R) = f(R_{gz}) - f(R_{cs}) \end{cases} \quad (13)$$

式中： R_{cs} ， R_{gz} 分别为电网初始状态和改造后的可靠性水平，为了从两个及以上的可行方案中选取一个最优方案，引入成本/效益比的概念：成本/效益 = $\Delta f(R)/\tilde{b}(R)$ ，在可行的几种方案中取成本/效益比最小的方案即为最优方案。综上可得电网规划方案的可行性判据为（成本/效益） ≤ 1 ，最优方案的判据为 $\min(\text{成本/效益})$ 。

3 算例与分析

本文采用 IEEE RBTS BUS6 的主馈线 F4 及三条分支馈线 F5、F6、F7 为研究对象，系统包括 30 条线路，23 个负荷点，23 个熔断器，23 个变压器，4 个断路器，1 个隔离开关。设备参数及负荷点相关指标采用文献[14]中提供的数值，假设原始参数具有 25% 的统计误差，得到原始参数区间值见表 2。

表 2 相关设备原始参数

Tab.2 Initial parameters of relevant devices

设备名称	故障率 (次/年*公里)	故障修复时间 (小时)	不可靠 工作概率
断路器	[0.0015,0.0025]	[3, 5]	[15%, 25%]
变压器	[0.011,0.019]	[36,60]	——
隔离开关	[0.0015,0.0025]	[3, 5]	——
线路	[0.0345,0.0575]	[6,10]	——

计算过程基于以下假设：

- (1) 联络开关 100% 可靠动作，倒闸时间为 [0.8,1.2] 小时；
- (2) 隔离开关操作时间取为 [0.375,0.625] 小时；
- (3) 负荷支路的熔断器位于负荷支路首端，且负荷支路以下设备故障时，熔断器 100% 可靠熔断；
- (4) 不考虑各种形式的母线故障。

计算结果见表 3~5。

表 3 分支馈线等效可靠性指标

Tab.3 Equivalent reliability indices of sub-feeders

馈线名称	$\tilde{\lambda}$	\tilde{U}
F5	上行等效	[0.07033,0.1937]
	下行等效	[0.9276,1.6689]
F6	上行等效	[0.04549,0.1247]
	下行等效	[0.9524,1.7379]
F7	上行等效	[0.06826,0.1879]
	下行等效	[0.9296,1.6747]

表 4 部分负荷点可靠性指标

Tab.4 Reliability indices of some load points

负荷点	$\tilde{\lambda}$	\tilde{U}	
	有/无备用电源	无备用电源	有备用电源
LP18	[1.0089,1.8816]	[3.7826,10.7354]	[3.7826,10.7354]
LP25	[1.0089,1.8816]	[5.3388,14.9944]	[2.7420,7.6615]
LP28	[1.2582,2.2482]	[7.0858,19.8165]	[3.2763,9.2037]
LP31	[1.3990,2.4552]	[6.5367,18.2743]	[4.2408,11.8378]
LP37	[1.4131,2.4811]	[8.1433,22.7383]	[4.3133,12.0497]
LP40	[1.3872,2.4380]	[7.9880,22.3070]	[4.1580,11.6184]

表 5 系统可靠性指标

Tab.5 Reliability indices of the system

可靠性指标	无备用电源	有备用电源
\tilde{f}_{SAIFI}	[1.1471,2.0853]	[1.1471,2.0853]
\tilde{f}_{SAIDI}	[5.3688,15.0912]	[3.7059,10.4375]
\tilde{f}_{CAIDI}	[2.5746,13.1564]	[1.7772,9.0994]
$\tilde{\eta}_{ASAI}$	[0.9983,0.9994]	[0.9988,0.9996]

以分支馈线 F6 为例分析电网改造方案的可行性。改造前分支馈线 F6 无备用电源，为单电源供电；改造后分支馈线 F6 有备用电源，为双电源供电。改造前后的停电损失变化见表 6。

表 6 改造前后分支馈线 F6 故障损失

Tab.6 Comparison of the interruption cost of sub-feeder F6 before and after the reconstruction

项目	负荷点	L_p (千瓦)	$C(\tilde{r}_j, p)$ (美元/千瓦)	$\tilde{g}(R)$ (美元/年)
改造前	LP28	1554	[4.86,69.45]	[9502.5,242637.7]
	LP29	1585	[4.86,69.45]	[9691.6,247466.2]
	LP30	2501	[1.62,8.11]	[5102.0,45593.2]
	总计			[24296.1,535697.1]
改造后	LP28	1554	[2.25,32.26]	[4399.3,112706.9]
	LP29	1585	[2.25,32.26]	[4486.8,114949.8]
	LP30	2501	[0.75,3.77]	[2350.9,21208.5]
	总计			[11237.0,248865.2]

其中： L_p 是以千瓦为单位的平均联络负荷， $C(\tilde{r}_j, p)$ 是以美元/千瓦为单位的停电损失区间值， $\tilde{g}(R)$ 是以美元/年为单位的停电损失区间值。

由表可知：对 F6 加备用电源后产生的效益为 $\tilde{b}(R) = \tilde{g}(R_{cs}) - \tilde{g}(R_{gz}) = [13059.1, 286831.9]$ 美元/年，综合考虑城市发展和配电线路运行寿命等因素，取线路经济运行期为 10 年，按最不利的情况考虑，加备用电源后产生的总效益为 130591 美元，即对所有

投资成本 $\Delta f(R) \leq 130591$ 美元的增加备用电源的方案从经济性方面考虑都是可行的。

4 结论与展望

引入区间数的概念,解决了配电系统原始参数不确定性对于可靠性指标的影响,利用网络等值的方法,将复杂配电系统等效为简单辐射型配电网,用 FMEA 法求得可靠性指标,大大提高了计算效率。最后,使用价值理论中成本/效益比的概念结合可靠性指标区间值确定电网改造方案的可行性。

本文将区间可靠性运算的结论应用于电网规划方面,是作者个人的一点尝试。对于区间数在区间内分布情况的问题,是在此论文的基础上,进行更深入研究的一个方向,不能将其简单等值为均匀或者正态分布。同时,若将本文结论应用于安排运行方式和开关操作方面,则可以在现有设备和电网结构的基础上,提高系统可靠性水平,投入少,收效快,更具应用价值,本人将努力继续深入这方面的研究。

参考文献

- [1] 陈文高. 配电系统可靠性实用基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
CHEN Wen-gao. Practical Foundation of Reliability for Distribution System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] Billinton R, Wang P. Reliability Network Equivalent Approach to Distribution System Reliability Evaluation[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1998, 145(2): 149-153.
- [3] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.
WAN Guo-cheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on Model of Reliability Network Equivalent of Distribution System Reliability Evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.
- [4] 谢开贵, 周平, 周家启, 等. 基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 45-48.
XIE Kai-gui, ZHOU Ping, ZHOU Jia-qi, et al. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Radial Distribution Networks Based on Fault-spreading Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 45-48.
- [5] 邱生, 张焰, 徐洋, 等. 复杂配电网的供电可靠性定量评估[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (12): 2078-2082.
QIU Sheng, ZHANG Yan, XU Yang, et al. The Quantitative Evaluation of Complex Distribution System Reliability[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39 (12): 2078-2082.
- [6] XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi, Billinton R. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks Based on the Shortest Path[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2003, 10(6): 686-690.
- [7] 戴雯霞, 吴捷. 基于最小路的配电网可靠性快速评估法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 29-31.
DAI Wen-xia, WU Jie. Fast Evaluation for Distribution Network Reliability Based on Minimal Path[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(7): 29-31.
- [8] 李志民, 李卫星, 刘迎春. 辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 25(1): 53-57.
LI Zhi-min, LI Wei-xing, LIU Ying-chun. Fault-traversal algorithm of Complex Radial Distribution-system reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 25(1): 53-57.
- [9] 徐珍霞, 周江昕. 复杂配电网可靠性评估的改进故障遍历法[J]. 电网技术, 2005, 29 (14): 64-67.
XU Zhen-xia, ZHOU Jiang-xin. An Improved Fault Traversal Algorithm for Complex Distribution System Reliability Evaluation[J]. Power System Technology, 2005, 29 (14): 64-67.
- [10] 刘伯私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 40-45.
LIU Bo-si, XIE Kai-gui, MA Chun-lei, et al. Section Algorithm of Reliability Evaluation for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25 (4): 40-45.
- [11] 邱生, 张焰, 孙建生, 等. 提高中压配电网供电可靠性的措施及其成本/效益分析研究[J]. 继电器, 2005, 33(13): 34-38.
QIU Sheng, ZHANG Yan, SUN Jian-sheng, et al. Measurement of Improving the Reliability of Medium Voltage Power Distribution System and Its Cost/benefit Analysis[J]. Relay, 2005, 33(13): 34-38.
- [12] Chowdhury A A, Koval Don O. Value-Based Distribution System Reliability Planning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1998, 34(1): 23-29.
- [13] Tsao Teng-Fa, Chang Ying-pin, Tseng Wen-Kung. Reliability and Costs Optimization for Distribution System Placement Problem[A]. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific[C]. Dalian(China): 2005.
- [14] Billinton R, Jonnavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

收稿日期: 2007-11-16; 修回日期: 2008-03-13

作者简介:

郑彦芹(1978-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济运行与规划; E-mail: zhengyanqin2005@sina.com

娄北(1970-), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事电力系统生产计划管理及规划工作;

张鸿雁(1978-), 女, 工程硕士, 工程师, 主要从事电力系统生产用电管理及规划工作。