

文章编号: 1006-4710(2013)04-0450-05

含分布式电源的配电网可靠性评估方法研究

余健明, 冯亚民

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 配电网是电力系统的重要组成部分, 近年来, 随着分布式电源的大量接入, 传统的配电网可靠性评估方法已经无法满足目前的研究要求。本研究提出了一种基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估方法。对负荷点进行编号结合孤岛以及元件故障的处理算法, 计算出配电网的可靠性指标。测试系统证明该方法计算准确快速, 易于对不同的拓扑网络进行仿真。

关键词: 配电网; 可靠性; 分布式电源; 蒙特卡洛法

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A

Reliability Evaluation Method of Distribution System with Distributed Generators

YU Jianming, FENG Yamin

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The reliability evaluation method of traditional distribution system is unable to satisfy the current research. This paper proposes a method based on Monte Carlo method to evaluate the reliability of distribution system. The method numbers the load nodes, and the processing algorithm of islands and element malfunction is used to calculate the reliability Indices of distribution system. Testing system proves that the method is accurate and fast in calculation and easy to simulate different topology network.

Key words: distribution system; reliability; distributed generation; Monte Carlo method

分布式电源(DG)在配电网中的接入使得配电网由单一的辐射式网络变成一个多电源网络^[1]。当配电网发生故障时 DG 可以向孤岛内的负荷点供电, 减少停电的范围和时间, 通常能够改善负荷点和系统的可靠性指标。

本研究提出了一种基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估方法。该方法对负荷点进行编号, 考虑了 DG 输出的随机性, 结合元件故障以及孤岛的处理算法, 能够准确快速地计算出配电网的可靠性指标。该方法还易于对拓扑网络不同的配电网进行仿真, 具有很强的实用性。

1 含有 DG 的配电网可靠性评估方法

由于配电网出现二阶及二阶以上故障的概率非常小可以忽略不计^[2]。因此本研究在只考虑一阶故障的情况下, 研究 DG 接在主馈线时配电网的可靠性评估方法。

1.1 负荷点的编号

负荷点编号的原则是任意一条线路所接的负荷

点的编号是连续的。如图 1 所示, 线路 1 所接负荷点为 (1) ~ (10); 线路 7 所接负荷点为 (4) 和 (5); 线路 8 所接负荷点为 (6) ~ (10); 线路 13 所接负荷点为 (9) ~ (10)。

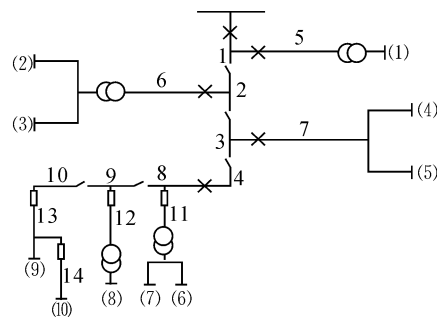


图 1 辐射状配电网

Fig. 1 Radial distribution network

1.2 DG 机组输出功率的计算

定义 PDG 为 DG 的额定输出功率, TTF 为正常工作时间, TTR 为故障修复时间, TTS 为故障隔离时间。

收稿日期: 2012-12-12

作者简介: 余健明, 男, 教授, 研究方向为配电网自动化和电能质量。E-mail: jianmingyu@xaut.edu.cn。

1) DG 的可靠性模型

假定 DG 机组由 n 台小容量 DG 组成,对每台小容量 DG 采用两状态可靠性模型,见图 2。

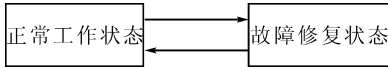


图 2 DG 的两状态模型

Fig. 2 Two-state model of DG

2) DG 输出功率

① 确定小容量 DG 在孤岛起始时刻的状态:

$$\tau = \begin{cases} 1 \cdots \cdots 0 \leq u \leq a\% \\ 0 \cdots \cdots a\% \leq u \leq 1 \end{cases}$$

式中,1 和 0 分别表示 DG 处于正常工作状态和故障修复状态, $a\%$ 为 DG 正常运行时间占全部运行时间的百分比, u 为在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

② 计算 DG 在 τ 状态下的持续时间

$$T_{\text{DG}} = \begin{cases} -(1/\lambda_{\text{DG}}) \ln v \cdots \cdots \tau = 1 \\ -(1/\mu_{\text{DG}}) \ln v \cdots \cdots \tau = 0 \end{cases}$$

式中, λ_{DG} 和 μ_{DG} 分别为 DG 的故障率和修复率, v 为在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

③ DG 在 TTR 内输出的平均功率 P_{out} 为:

$$P_{\text{out}} = \begin{cases} P_{\text{DG}} \cdots \cdots \tau = 1; T_{\text{DG}} \geq TTR \\ P_{\text{DG}} \times \frac{T_{\text{DG}}}{TTR} \cdots \cdots \tau = 1; T_{\text{DG}} < TTR \\ P_{\text{DG}} \times \left(1 - \frac{T_{\text{DG}}}{TTR}\right) \cdots \cdots \tau = 0; T_{\text{DG}} < TTR \\ 0 \cdots \cdots \tau = 0; T_{\text{DG}} \geq TTR \end{cases}$$

3) DG 机组输出功率

在 TTR 内 DG 机组的输出功率为:

$$P_{\text{机组}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{out}\cdot i}$$

1.3 孤岛的处理方法

1) 功率平衡

孤岛内 DG 的输出功率与孤岛内的负荷总量应满足关系^[3],为:

$$\sum_{i \in D} L_i \leq P_{\text{机组}}$$

式中, L_i 为孤岛内负荷点 i 的负荷大小, D 为孤岛内所有负荷点组成的区域。

当 DG 机组的输出功率小于孤岛内的负荷值时,需要切除多余的负荷以满足孤岛内功率平衡的要求。本研究以分支馈线为最小切除单元。

2) 等值负荷

定义负荷值与权重系数的乘积为负荷点的等值负荷^[4]。第 m 条分支馈线的等值负荷:

$$P_{\text{EL}\cdot m} = \sum_{j \in M} w_j \times L_j$$

式中, w_j 为负荷点 j 的权重系数, M 为第 m 条分支馈线所包含的所有负荷点组成的区域。

根据各分支馈线等值负荷的大小决定各分支馈线的优先级。当 DG 输出不足时按照优先级顺序依次满足各分支馈线区域中负荷点的供电需求。

1.4 配电网可靠性评估算法

1) 可靠性参数的折算

将断路器、熔断器、隔离开关、变压器等非线路元件的故障率和故障修复时间折算到上行线路中,为:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$t = \frac{\lambda_1 \times t_1 + \lambda_2 \times t_2}{\lambda}$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为折算前元件及其上行线路的故障率; t_1 和 t_2 分别为折算前元件及其上行线路的故障修复时间; λ 为折算后线路的故障率; t 为折算后线路的故障修复时间。

2) 配电网的矩阵化

将图 1 配电网的拓扑结构矩阵化。

① 主路线的矩阵形式

将各主馈线的编号作为第一行,各分支馈线上负荷点的起始编号作为第二行,各分支馈线上负荷点的数量作为第三行。用矩阵形式表示为:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 4 & 6 \\ 1 & 2 & 2 & 5 \end{bmatrix}$$

② 其他线路的矩阵形式

定义向量 C 为线路到其上级自动开关(断路器或熔断器)之间负荷点的数量。将线路的编号作为第一行,线路包含负荷点的起始编号作为第二行,线路包含负荷点的数量作为第三行,向量 C 作为第四行。用矩阵形式表示为:

$$G = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & 2 & 4 & 6 & 8 & 9 & 6 & 8 & 9 & 10 \\ 1 & 2 & 2 & 5 & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3) 负荷点的运行及故障时间

① 计算所有线路的正常运行时间 TTF :

$$TTF_i = - (1/\lambda_i) \ln u_i$$

式中, λ_i 为线路 i 的故障率; u_i 在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

② 找到 TTF 最小的线路,认为此时对应的线路发生故障。计算故障线路的故障修复时间 TTR :

$$TTR = -t_j \times \ln v_j$$

式中, t_j 为故障线路 j 的平均故障修复时间; v_j 为在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数。

4) 负荷点的可靠性指标计算

定义 k 为主馈线的数量。计算编号为 i 的元件发生故障时, 各负荷点的停电次数 N 和停电时间 T 。

a) 当 $i=1$ 时, 线路 1 所接的负荷点为负荷点 1 到负荷点 $F(3, 1)$ ($F(3, 1)$ 是矩阵 F 第三行第一列对应的负荷点编号) 停电, 其停电时间为线路 1 的故障修复时间 TTR ; 其余负荷点的停电时间由分布式电源的输出功率和负荷点的用电需求及负荷类型决定。

b) 当 $1 < i \leq k$ 时, 线路 i 所接的负荷点为负荷点 $F(2, i)$ 到负荷点 $[F(2, i) + F(3, i) - 1]$ 停电, 其停电时间为线路 i 的故障修复时间 TTR , 线路 i 以上的负荷点由电网恢复供电, 其停电时间为故障隔离时间 TTS ; 其余负荷点的停电时间由分布式电源的输出功率和负荷点的用电需求及负荷类型决定。

c) 当 $i > k$ 时, 即发生故障的线路在分支馈线上, 不在主馈线上。

① $G(4, i-k) \neq 0$ 时, 即故障线路所在的分支馈线在故障线路 i 之前还接有其他负荷点。由于分布式电源接在主馈线上, 因此故障线路 i 所在分支馈线上从故障线路 i 连接的负荷点 $G(2, i-k)$ 一直到其末端线路连接的负荷点 $[G(2, i-k) + G(3, i-k) - 1]$ 停电, 其停电时间为线路 i 的故障修复时间 TTR ; 故障线路 i 所在分支馈线比线路 i 更靠近主馈线的负荷点 $[G(2, i-k) - G(4, i-k)]$ 到负荷点 $[G(2, i-k) - 1]$ 由电网恢复供电, 其停电时间为故障隔离时间 TTS ; 其余负荷点的不停电。

② $G(4, i-k) = 0$ 时, 即故障线路所在的分支馈线在故障线路 i 之前没有其他负荷点。由于分布式电源接在主馈线上, 因此故障线路 i 所在分支馈线上从故障线路 i 连接的负荷点 $G(2, i-k)$ 一直到其末端线路连接的负荷点 $[G(2, i-k) + G(3, i-k) - 1]$ 停电, 其停电时间为线路 i 的故障修复时间 TTR ; 其余负荷点的不停电。

1.5 算法流程

本研究的算法流程见图 3。

2 算例分析

以 IEEE-RBTS Bus6 系统主馈线 F4^[7] 为例。如图 4 所示, 该测试系统一共有 23 个负荷点、30 条线路、14 个断路器、22 个隔离开关、13 个熔断器、2 个 DG 机组, 各含 20 台 DG, 每台 DG 容量为 0.1 MW。

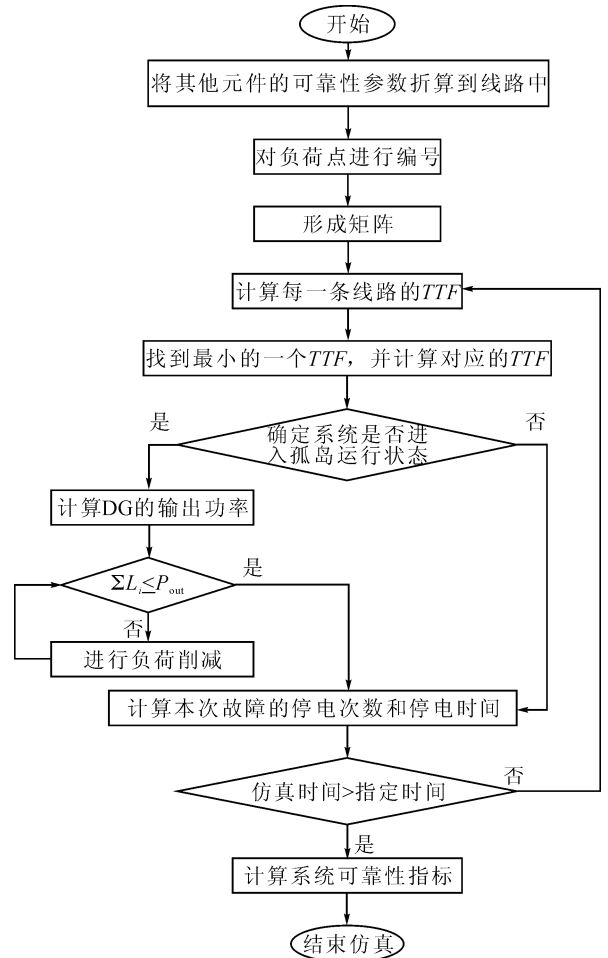


图 3 可靠性指标计算流程图

Fig. 3 Flowchart of the reliability indices calculation

该测试系统线路的长度数据如表 1 所示:

表 1 线路数据

Tab. 1 Feeder line data

馈线类型	线路长度/km	线路编号
1	0.6	7, 13
2	0.75	27
3	0.8	9, 21
4	0.9	4, 10
5	1.6	3, 5, 8, 15, 20, 28
6	2.5	2, 6, 18, 23, 26
7	2.8	1, 12, 16, 22, 25, 30
8	3.2	11, 17, 19, 24, 29
9	3.5	14

该测试系统的元件的可靠性数据如表 2 所示:

表 2 元件的可靠性参数

Tab. 2 Equipment Reliability Data

元件	故障率	故障时间/h
线路	0.050 次/(km·a)	4
分布式电源	4.000 次/a	40

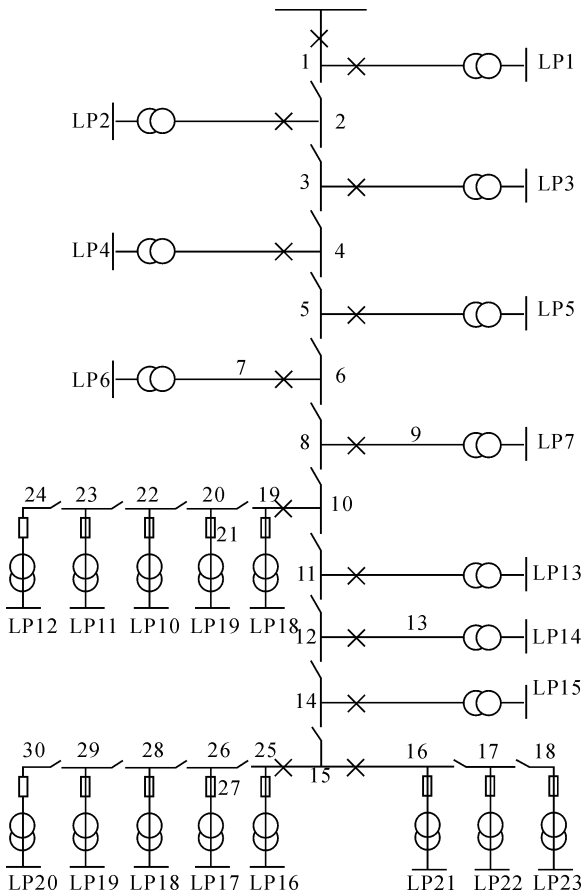


图4 测试系统网络结构

Fig. 4 Network architecture of test system

该测试系统的负荷点参数如表3所示:

表3 负荷参数

Tab. 3 Load data

负荷点编号	负荷类型	负荷值/MW
LP2	二类	0.180 8
LP5	一类	0.207 0
LP1, LP6	二类	0.165 9
LP12, LP20	二类	0.192 9
LP4, LP15	一类	0.263 3
LP7, LP23	三类	0.305 7
LP9, LP21	三类	0.283 1
LP3, LP14, LP18	二类	0.250 1
LP10, LP13, LP17, LP22	三类	0.158 5
LP8, LP11, LP16, LP19	三类	0.155 4

2.1 仿真结果

假定系统电源供电完全可靠,故障隔离时间TTS为0.5 h。

表4为对机组DG1和DG2仿真模拟得到的部分负荷点的停电频率。

表4 部分负荷点的停电频率

Tab. 4 Part of load points' outage rate

机组		负荷点停电频率/(次/年)				
DG1	DG2	LP1	LP4	LP11	LP18	LP23
无	无	1.289 1	1.291 8	1.956 3	1.736 5	1.961 6
15	5	1.279 7	1.280 4	1.955 2	1.722 0	2.007 7
8	5	1.278 6	1.278 4	1.932 8	1.723 8	2.013 4
15	14	1.283 6	1.285 3	1.948 2	1.691 9	1.999 2

表5为对机组DG1和DG2仿真模拟得到的部分负荷点的年平均停电时间。

表5 部分负荷点的年平均停电时间

Tab. 5 Part of load points' outage time

机组		负荷点年平均停电时间/(小时/年)				
DG1	DG2	LP1	LP4	LP11	LP18	LP23
无	无	1.535 3	2.426 4	5.679 0	6.589 3	8.318 0
15	5	1.541 9	1.162 1	3.437 2	4.589 8	4.189 6
8	5	1.549 0	1.152 9	3.936 1	5.702 7	6.374 1
15	14	1.537 8	1.155 9	3.255 1	2.775 4	4.033 3

表6为对机组DG1和DG2仿真模拟得到的整个系统的可靠性指标。

表6 系统的可靠性指标

Tab. 6 System reliability indicators

DG1	DG2	SAIFI/ (次/年)	SAIDI/ (小时/年)	CAIDI/ (小时/次)	EEN/ (SMWh/年)	ASAI
无	无	1.625 9	4.878 4	2.967 5	24.195 6	99.94%
15	5	1.641 9	2.790 3	1.699 5	13.314 7	99.97%
8	5	1.636 1	3.639 2	2.226 1	17.516 4	99.96%
15	14	1.625 6	2.414 8	1.486 9	11.778 9	99.97%

将测试系统的仿真结果与文献[6]中的数据进行对比,空白柱状图表示的本文算例分析结果,阴影柱状图表示的是文献[6]的数据。对比结果通过图5可以看出:两者的各种可靠性指标都非常接近,证明本研究提出的算法切实有效。

2.2 仿真结果分析

1) 对比几种工况的仿真结果,可以看出负荷的停电次数和系统平均停电频率没有明显变化,这是因为DG通过断路器接在主馈线上,当各条主馈线发生故障时,DG与系统电源一样都要在故障隔离后才能重新投入使用。

2) 对比两台DG接入不同位置的仿真结果,可以看出两台DG的接入位置不同,其可靠性指标有明显的差异。两台DG的接入位置都是越靠近主馈线末端越可以有效地改善配电网的可靠性指标,这

是因为 DG 越接近主馈线末端,其负责的负荷点越多,出现孤岛的几率也越大。

DG 接入主馈线可以有效的改善配电系统的可靠性指标,但是改善的效果大小受到 DG 接入位置的影响。在实际应用中,应尽可能将 DG 都接在主馈线末端,以使配电系统的可靠性指标得到最大程度地改善。

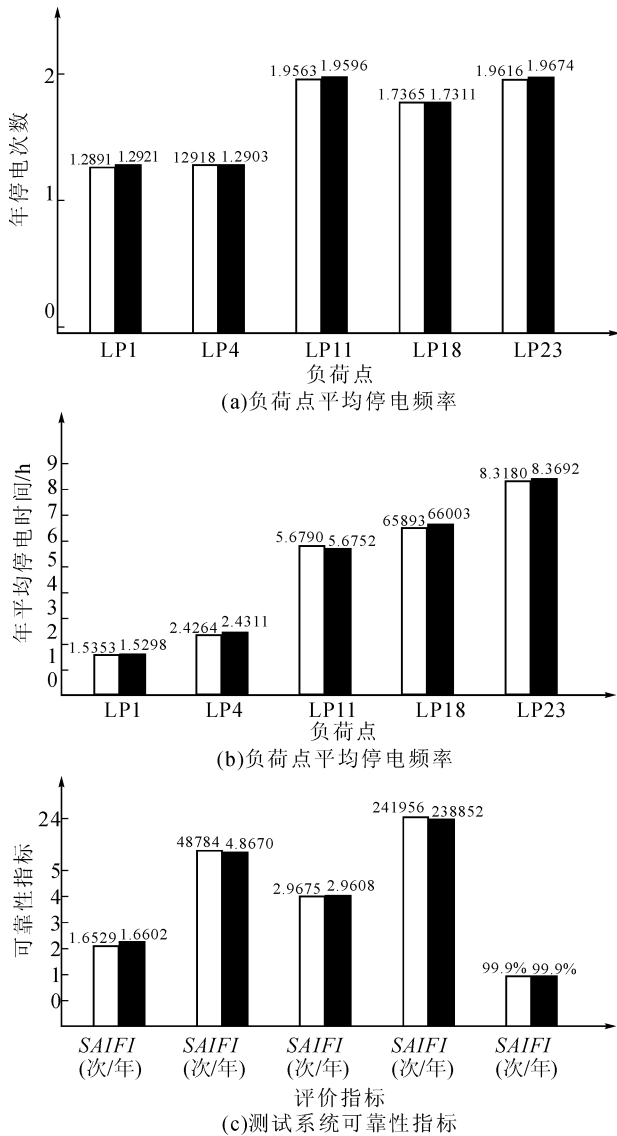


图5 本研究与文献[6]数据对比结果

Fig.5 The results of article[6] data and References data comparing

3 结论

1) 提出了一种基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估方法;

2) 对配电系统的负荷点进行编号,通过元件可靠性参数的折算有效地简化了系统的网络结构;

3) 结合适当的 DG 运行方式和孤岛处理方法,计算出配电系统的各种可靠性指标;

4) 通过测试系统验证了该方法的正确性和有效性,其仿真结果表明 DG 接入主馈线位置的不同对配电系统可靠性指标的影响十分显著,应尽可能将 DG 安装在主馈线的末端以达到对配电系统可靠性的最优改善效果。

参考文献:

- [1] 王旭东. 基于网络简化的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2010,34(4):38-43.
Wang Xudong. Reliability evaluation based on network simplification for the distribution system with distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,34(4):38-43.
- [2] 雷振,魏甘,蔡阳,等. 含分布式电源区域节点的配电网模型和可靠性计算[J]. 电力系统自动化,2011,35(1):39-43.
Lei Zhen, Wei Gan, Cai Yang, et al. Model and reliability calculation of distribution network with zone-nodes including distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(1):39-43.
- [3] 伍婷婷,刘涤尘,王波,等. 带分布式电源配电网的最小路可靠性分析方法[J]. 南方电网技术,2012,6(1):46-50.
Wu Tingting, Liu Dichen, Wang Bo, et al. Analysis method of the minimal path method reliability for contribution [J]. Southern Power System Technology, 2012,6(1):46-50.
- [4] 刘传铨,张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化,2010,31(22):46-49.
Liu Chuanquan, Zhang Yan. The distribution network reliability assessment considering the distribution generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,31(22):46-49.
- [5] 别朝红,王秀丽,王锡凡. 复杂配电系统的可靠性评估[J]. 西安交通大学学报,2000,34(8):9-13.
Bie Zhaohong, Wang Xiuli, Wang Xifan. Reliability evaluation of complicated distribution systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000,34(8):9-13.
- [6] 叶萌,刘文霞. 分布式电源选址定容及其对配电网可靠性的影响分析[D]. 北京:华北电力大学,2011
Ye Meng, Liu Wenxia. Locating and sizing of distributed generation and its impacts on distribution system reliability [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [7] Allan R N, Billinton R. A reliability test system for educational purposes- basic distribution system data and result [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1991,6(2):813- 821.

(责任编辑 李虹燕)