

文章编号:1671-6833(2007)04-0051-04

## 配电网可靠性评估区间算法

王旭东, 陈根永

(郑州大学 电气工程学院, 郑州 河南 450001)

**摘要:** 提出一种利用区间算法评估复杂配电网可靠性的方法. 为使网络简化, 根据复杂配电网的特点, 运用网络等值的方法通过进行向上等效和向下等效过程得到简单的辐射型网络. 该算法对配电系统元件可靠性原始参数进行分析和处理, 得到各元件的可靠性原始区间参数, 在此基础上求出负荷点及系统的可靠性区间指标及停电经济损失区间值. 应用该算法对 RBTS-BUS2 系统进行可靠性评估, 结果表明该算法灵活、高效、有工程实用价值.

**关键词:** 复杂配电网; 可靠性评估; 区间算法; 网络等值

**中图分类号:** TP 393.07

**文献标识码:** A

### 0 引言

对配电系统进行可靠性评估的方法主要有基于蒙特卡罗抽样的概率模拟法<sup>[1]</sup>和解析法. 模拟法可求取可靠性指标的概率分布, 能提供较多的信息, 但为了满足模拟精度的要求, 计算时间较长; 解析法原理简单, 模型准确, 而且便于有针对性地进行不同元件性能对可靠性的影响分析, 已广泛用于配电网的可靠性计算. 文献[2]介绍了一种能灵活响应配电网拓扑结构变化的、可对复杂辐射状配电系统进行可靠性评估的故障遍历算法, 并能有效考虑配电系统自动化特性. 文献[3]提出了一种将最小路法与等值法结合的复杂配电网的可靠性评估算法.

结合配电系统的特点, 笔者提出利用区间算法<sup>[4]</sup>评估配电网的可靠性, 对因统计误差而造成的结果失真具有弥补效果.

### 1 区间数学及系统可靠性指标的区间形式

#### 1.1 区间数及区间运算

由于系统运行工况及负荷预测的偏差等原因, 使数据统计值与真实值有很大差异, 而区间分析<sup>[5]</sup>为解决上述问题提供了可能. 一旦数学模型建立起来以后, 区间分析能反映自变量在某一区间内变化时因变量的变化区间.

设  $S$  为一偏序集, 对于给定的数对  $(\underline{x}, \bar{x})$ ,  $\underline{x}, \bar{x} \in S$ , 且  $\underline{x} \leq \bar{x}$ , 则可定义一个区间数  $[x]$  为  $[x] = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in S | \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$  式中:  $\underline{x}$  称为区间数  $[x]$  的下端点;  $\bar{x}$  称为区间数  $[x]$  的上端点. 若  $\underline{x} = \bar{x}$ , 则定义区间  $[x]$  数为点区间数. 区间函数的四则运算规则:

$$\begin{cases} [x] + [y] = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}] \\ [x] - [y] = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}] \\ [x][y] = [\underline{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}] \quad (\text{若 } 0 \leq \underline{x}, 0 \leq \underline{y}) \\ [x]/[y] = [\underline{x}, \bar{x}][1/\bar{y}, 1/\underline{y}] \quad (0 \notin [y]) \end{cases} \quad (1)$$

#### 1.2 配电系统可靠性指标的区间公式

系统可靠性指标主要有: 平均停电频率指标 SAIFI、平均停电持续时间指标 SAIDI、用户平均停电指标 CAIFI、用户平均停电持续时间指标 CAIDI、平均供电可用率指标 ASAI、系统缺供电量指标 ENS、系统平均缺供电量指标 AENS 等可靠性指标的区间值, 并由下列各式计算:

$$[SAIFI] = \sum [\lambda_i] N_i / \sum N_i \quad (\text{次/用户} \cdot \text{a}) \quad (2)$$

$$[SAIDI] = \sum [U_i] N_i / \sum N_i \quad (\text{h/用户} \cdot \text{a}) \quad (3)$$

$$[CAIFI] = \sum [U_i] N_i / \sum M_i \quad (\text{次/用户} \cdot \text{a}) \quad (4)$$

$$[CAIDI] = \sum [U_i] N_i / \sum [\lambda_i] N_i \quad (\text{h/次} \cdot \text{a}) \quad (5)$$

$$[ASAI] = \sum 8760 N_i - \sum [U_i] N_i / \sum 8760 N_i \quad (6)$$

$$[ENS] = \sum [U_i] [P_{a,i}] \quad (\text{MW} \cdot \text{h/a}) \quad (7)$$

收稿日期: 2007-08-31; 修订日期: 2007-09-16

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目 (0424220182)

作者简介: 王旭东 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划及运行分析.

$$[AENS] = \sum [U_i][P_{a,i}] / \sum N_i \quad (\text{MW} \cdot \text{h} / \text{用户} \cdot \text{a}) \quad (8)$$

式中:  $\lambda_i$  是年平均停运率, 次/a;  $U_i$  是平均年停电时间, h/a;  $N_i$  为负荷点  $i$  的用户数;  $M_i$  为负荷点  $i$  故障停电用户数;  $P_{a,i}$  为接入负荷点  $i$  的平均负荷, (MW)。

为了评估配电网可靠性与经济性的关系, 提出负荷点经济损失指标“年停电经济损失”。

$$[L(i)] = C_m \cdot P_{a,i} \cdot \sum ([\lambda_i][r_i]) \quad (9)$$

式中:  $[\lambda_i]$  是年停电次数 (次/km · a 或次/台 · a);  $[r_i]$  是平均停电时间 (h/次);  $C_m$  是不同负荷类型单位停电时间的经济损失, 万元/h · MW, (取 5 ~ 30);  $P_{a,i}$  为负荷点  $i$  的年平均负荷, MW, 其中共有  $m$  类负荷类型。

## 2 复杂配电网的网络等值

### 2.1 两元件串并联时可靠性指标的区间形式

$$\text{串联: } \begin{cases} [\lambda_s] = [\lambda_1] + [\lambda_2] \\ [U_s] = [\lambda_1][r_1] + [\lambda_2][r_2] \\ [r_s] = [U_s] / [\lambda_s] \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{并联: } \begin{cases} [\lambda_s] = [\lambda_1][\lambda_2]([r_1] + [r_2]) \\ [U_s] = [\lambda_1][r_1][\lambda_2][r_2] \\ [r_s] = [r_1][r_2] / ([r_1] + [r_2]) \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2 简单辐射型网络的可靠性计算<sup>[6]</sup>

简单辐射状主馈线供电系统在配电系统中占有重要地位。在这种系统中负荷沿途分布在馈线的两旁, 它是研究复杂结构配电网的基础。典型的简单辐射状主馈线系统的结构如图 1 所示。有备用电源的配电系统主馈线末端装有联络开关。

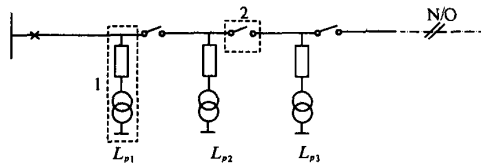


图1 简单辐射状主馈线结构图

Fig.1 Simple distribution system

图1中, 虚线框1代表一负荷支路, 虚线框2代表隔离开关, N/O表示联络开关, 在靠近电源的地方是断路器。典型的简单辐射状主馈线系统由断路器、若干段主馈线、负荷支路、分段开关、联络线及联络开关构成。在进行可靠性评估时, 把断路器、各馈线段、分段开关分别看成一个节点, 如果把负荷支路也当成串在回路中的一个节点元

件, 则图1可由图2来等效, 就可以运用串联系统的区间评估公式进行计算。

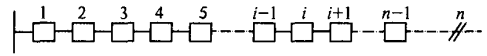


图2 简单辐射状主馈线系统等效图

Fig.2 Equivalent configuration for simple distribution system

负荷支路一般由熔断器、变压器、负荷支路导线组成。设熔断器的可靠性工作概率为  $p$ , 则负荷支路  $i$  的等效参数  $\lambda'_i, U'_i, r'_i$  可按下式计算:

$$\begin{cases} \lambda'_i = (1-p)(\lambda_u + \lambda_{ui}) \\ U'_i = \lambda_u r_u + \lambda_{ui} r_{ui} \\ r'_i = U'_i / \lambda'_i \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\lambda_u$  和  $r_u$  分别为负荷支路  $i$  上线路的故障率和故障修复时间;  $\lambda_{ui}$  和  $r_{ui}$  分别为负荷支路  $i$  上变压器的故障率和故障修复时间。若要进行区间运算只需把相应的参数换为相应的区间形式即可。

### 2.3 复杂辐射型网络的网络等值方法

网络等值法针对实际配电网的结构特点, 利用一个等效元件来代替一部分配电网, 从而将一个复杂结构的配电网逐步简化为简单辐射状的主馈线系统。等值法首先是向上等效, 该过程主要处理下层元件对上层元件的可靠性影响, 将一个复杂的副馈线分支用等效分支线代替, 逐层向上层等效, 最终将网络简化为一个简单辐射状的主馈线网络; 然后进行向下等效过程, 主要处理上层元件对下层元件可靠性的影响, 将这种影响用等效串联元件表示, 并分层计算分布在各层负荷点的可靠性。现举例说明。

如图3(a)所示, 馈线4及其所连接的元件为最末层, 包括分支线、熔断器及馈线上的主干线。它们发生故障不仅会影响本层负荷点的可靠性指标, 而且还会影响其上层负荷点的可靠性, 这样馈线  $F_4$  对馈线  $F_3$  的影响等效于一条分支线产生的影响。所以, 可以用一条等效分支线  $EL_4$  来等值馈线  $F_4$ , 等效分支线故障率  $\lambda$  和停运时间  $r$  包含了第4层也就是馈线  $F_4$  上所有元件故障的影响。然后, 用等效分支线  $EL_3$  来代替馈线  $F_3$  的影响, 如图3(b)所示。同样, 馈线  $F_2$  的等效分支线  $EL_2$  如图3(c)所示, 至此, 图3(a)所示的配电系统就完全等效为如图3(c)所示的只包含简单分支的结构。图中:  $SL_i$  是等效串联元件;  $EL_i$  是等效分支线;  $F_i$  是馈线;  $M_i$  是各馈线的主干线;  $LP_i$  是负荷

点;  $T_i$  是变压器;  $f_i$  是熔断器。

在计算等效分支线可靠性参数时,由于馈线上隔离开关或分段断路器位置的不同,各个元件参与计算的方式也不同,如果馈线上装有隔离开关或分段断路器,那么隔离开关或分段断路器后的元件发生故障所引起的等效分支线停运时间为隔离开关或分段断路器的操作时间,并且后段元件的检修不会引起等效分支线的停运,隔离开关或分段断路器前的元件发生故障所引起的等效分支线停运时间仍然为元件故障的修复时间. 等效分支线可靠性:  $\lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{j=1}^m \lambda_j$ ;  $u_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i + \sum_{j=1}^m \lambda_j r_j$ ;  $r_n = U_n / \lambda_n$ . 式中:  $\lambda_n$  为系统的平均停运率,次/a;  $u_n$  为系统的平均年停运时间, h/a;  $r_n$  为系统的平均停运持续时间, h/次;  $\lambda_i$  隔离开关或分段断路器前的元件的故障率,次/a;  $\lambda_j$  为隔离开关或分段断路器后的元件的故障率;  $r_i$  为元件的停运时间;  $r_j$  为隔离开关或分段断路器的操作时间。

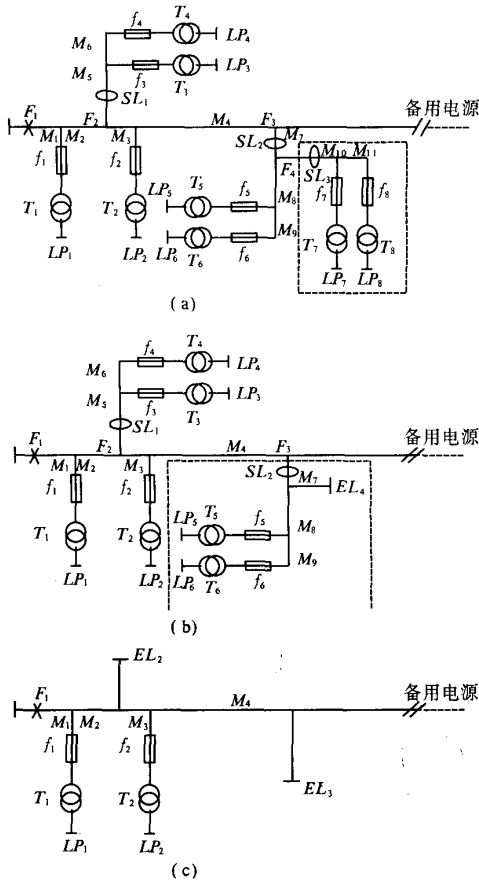


图 3 网络的等值过程

Fig. 3 Procedure of network - equivalence

万方数据

另外,主馈线  $F_1$  上的元件故障也会影响其子馈线 2, 3, 4 上的负荷点的可靠性. 为了描述上层元件故障对下层负荷点可靠性的影响,在下一层的主馈线上增加了一个等值的串联元件  $SL$ , 这样在计算下一层负荷点的可靠性指标时,仍然可以按只含有一条馈线的简单配电系统计算,从而简化了计算. 在图 3(a) 中,第 1 层元件故障对第 2 层负荷点的影响等值为馈线  $F_2$  上的一个串联元件  $SL_1$ . 此时,馈线 2 变成了一个含有串联元件和分支线的简单配电系统,可以方便地计算出馈线 2 上各负荷点的指标. 同理,可以计算出馈线  $F_3$  上的等值串联元件  $SL_2$ , 从而求出馈线  $F_3$  上各负荷点的指标,最后获得整个系统的可靠性指标. 在网络的简化过程中,用相应的区间值代替点值进行计算即可得到区间运算的结果。

3 算例分析

笔者利用 IEEE RBTS BUS-2 为例验证算法的可行性<sup>[7]</sup>. 母线 2 有 35 kV 变电所一座,出线 4 条,36 条馈线,22 个负荷点,12 个断路器,2 个联络开关,用户 1 908 户,总平均负荷 12. 291 MW. 系统接线如图 4.

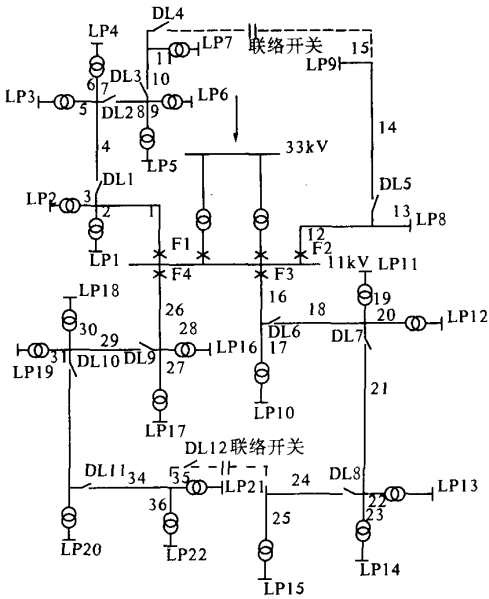


图 4 RBTS 母线 2 的配电系统

Fig. 4 Distribution system for RBTS-BUS2

表 1 是母线的馈线类型及其对应的长度;表 2 给出了负荷点的类型及负荷大小的平均值;表 3 中,  $\lambda$  是故障率,次/(km · a)或次/(台 · a);  $\lambda''$  是

表 1 母线 2 的馈线类型及长度表  
Tab.1 Feeder types and lengths of Bus2

馈线 类型	长度 /km	对应的馈线 编码
1	0.60	2 6 10 14 17 21
		25 28 30 34
2	0.75	1 4 7 9 12 16 19
		22 24 27 29 32 35
3	0.80	3 5 8 11 13 15 18
		20 23 26 31 33 36

表 2 用户数据表  
Tab.2 Customer data

负荷 点数	负荷点	符合 类型	负荷平均 值/MW
5	1 2 3 10 11	居民	0.535
4	12 17 18 19	居民	0.450
1	8	企业	1.000
1	9	企业	1.150
6	4 5 13 14 20 21	政府	0.566
5	6 7 15 16 22	商业	0.454

表 4 部分负荷点的可靠性指标  
Tab.4 Part of load point reliability indices of Bus2

负荷点	$\lambda/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	$R/(\text{h} \cdot \text{次}^{-1})$	$U/(\text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	$L(i)/(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$
1	0.153	31.859 61	4.874 52	0.453
	[0.114 75,0.203 49]	[24.210 62,42.373 28]	[3.802 12,5.946 91]	[0.362,0.548]
4	0.153	31.885 1	4.878 42	5.522
	[0.113,0.192]	[24.551 5,38.899 8]	[3.853 93,5.610 18]	[5.501,6.957]
8	0.086	22.473 49	1.932 72	2.417
	[0.068 8,0.098]	[19.167 7,130.446 8]	[1.681 46,2.551 19]	[2.132,2.843]
12	0.163	31.769 45	5.178 42	1.166
	[0.127 1,0.216 7]	[22.238 61,42.306 45]	[4.557 0,6.214 10]	[0.956,1.737]
22	0.163	30.495 21	4.970 72	4.062
	[0.007 36,0.206 88]	[24.396 16,38.423 9]	[3.479 504,6.511 64]	[2.842,5.218]

表 5 一条馈线和系统的可靠性指标  
Tab.5 Reliability indices of one feeder and system

馈线	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS	AENS
$F_1$	0.158	5.04	31.79	0.999 42	18 295	28.06
	[0.118,0.197]	[3.83,6.35]	[23.52,40.37]	[0.993 1,0.995 8]	[16 433,22 789]	[21.88,35.35]
SYS	0.159	5.02	31.38	0.999 43	54 744	28.69
	[0.144,0.168]	[4.13,5.96]	[27.47,34.30]	[0.993 8,0.995 4]	[48 174,61 313]	[22.30,32.76]

计划检修率,次/(km·a)或次/(台·a); $r$ 是平均计划检修时间,h/次; $r''$ 是平均计划检修时间,h/次;并对参数取±30%的误差而得到参与区间运算时的区间值.例如:变压器 $\lambda$ 点值为0.015,考虑误差后的区间值是[0.010 5,0.019 5].

表 3 系统元件可靠性指标  
Tab.3 System components reliability indices

设备名称	$\lambda$	$r$	$\lambda''$	$r''$
变压器	0.015	200	0.002 5	8.0
断路器	0.07	4	1	72
电缆	0.04	30	—	—
隔离开关	0.005	8	0.008	4.0

根据 2.3 所述的步骤对测试系统中的配电网逐步进行向上等值和向下等值,限于篇幅,等值过程所得到的结果省略,只列出最终反映部分负荷点及系统可靠性指标和经济性指标的点值和区间值,见表 4 与表 5.从这两个表可以看出,所计算的点值都落在相应的区间以内,可见区间值更符合实际情况,包含更多的信息.

4 结论

笔者讨论了配电网的区间评估问题,并结合网络等值法对测试系统进行分析计算,发现计算的点值与给定值接近,区间值涵盖点值,这就使系统参数不确定或运行状况复杂时计算结果有一定

的容错能力,从另一个角度来讲,结果更有可信度,从而验证了算法的可行性.同时,引入可靠性经济学的概念,用负荷点的停电损失衡量可靠性效益,从而反映可靠性成本与效益的关系,使得评估更加具有实际指导作用.

(下转第 79 页)

## Research into Distance Measurement Method With Underwater Ultrasonic based on Wavelet Transform

DENG Yue - hong, NIE Shuang - shuang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The disadvantages of traditional ultrasonic distance measure method by detecting threshold of echo are analyzed, and the distance measure method by underwater ultrasonic based on wavelet transform is proposed. With the digital signal processing technique, the digital pass - band filter based on Hamming window function is designed and the sampling signal is filtered. Gauss wavelet is constructed. An underwater ultrasonic distance measure system is presented, which catches the echo time accurately with the wavelet transform by convoluting the sampling signal and the wavelet. The experiments are done using the traditional method by detecting threshold and the ultrasonic distance measure method based on wavelet transform separately in the laboratory pool and the measure data are compared. It proves that the distance measure method with underwater ultrasonic based on wavelet transform can gain higher precision and excels the traditional method by detecting threshold.

**Key words:** ultrasonic wave; wavelet transform; detection of threshold; distance measurement

(上接第54页)

### 参考文献:

- [1] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38 - 42.
- [2] 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.
- [3] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 复杂配电系统的可案性评估[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(8): 9 - 13.
- [4] 张鹏, 王守相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 71 - 77.
- [5] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 271 - 272.
- [6] 任震, 万官泉, 黄雯莹. 参数不确定的配电系统可靠性区间评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 68 - 73.
- [7] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes basic system data and results [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813 - 821.

## Interval Algorithm of Distribution Reliability Evaluation

WANG Xu - dong, CHEN Gen - yong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** An interval arithmetic based approach to evaluate the reliability of complex distribution networks is proposed. To simplify the network model, according to the complex distribution network characteristic, this paper obtains the simple radiation pattern network using the network-equivalent method through upward equivalent and the downward equivalent process. This algorithm analyzes and processes the primitive distribution system component reliability parameter, based on which it obtains various component reliability primitive interval parameters and working-out the load and the system reliability interval indices and the power cut economic loss interval value. Through the application of the proposed algorithm in the evaluation of RBTS-BUS2 system, the results show that this algorithm is flexible, highly effective, and has practical engineering value.

**Key words:** complex distribution network; reliability evaluation; interval algorithm; network-equivalent