

复杂配电系统的可靠性评估

张腾, 张波

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 采用故障模式与后果分析法(FMEA)结合网络等值的原理对带有分支子馈线的复杂配电系统进行了可靠性评估,并提出了一种简单配电系统的等效逻辑模型。该算法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 FMEA 法评估系统的各项可靠性指标,这样就比直接利用 FMEA 法大大提高了效率。

关键词: 配电系统; 可靠性; 等值原理

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)15-0019-04

0 引言

配电系统的可靠性研究最早起始于 20 世纪 60 年代,晚于发电和输电系统的可靠性研究。但随着社会的发展和人民生活质量的不断提高,迫切需要对城市电网进行合理的改造,配电系统的可靠性评估就愈加引起了人们的重视。目前,配电网的可靠性评估已经成为配电系统规划决策中的一项常规性工作。

配电系统的运行状态一般为辐射型或开环辐射型,传统的评估方法是故障模式与后果分析法(FMEA)^[1]。该方法以系统中的元件为对象,列出所有的故障模式并分析每一故障对系统所造成的影响,最后综合建立故障模式与后果分析表,以此评估各负荷点的可靠性指标。FMEA 法被广泛应用于简单辐射型配电系统的可靠性评估中,但结构复杂的配电网由于元件数目和操作方式的增多,FMEA 法需要建立的故障模式后果表将变得十分复杂。文献[2]提出了一种最小路法,可将非最小路上的元件对负荷点可靠性的影响折算到相应的最小路节点上,再依次求得各负荷点可靠性指标。但对于评估带分支馈线的复杂配电网,折算非最小路元件也是比较复杂的。

本文首先对简单配电系统进行了探讨,提出了一种简单配电系统的等效逻辑模型,通过模型分析了简单配电系统的可靠评估,并归纳了一组负荷点可靠性指标的求取公式。对于带子馈线的复杂配电系统,利用网络等值的原理将其逐步等值为简单的辐射型配电系统,进而利用归纳的公式求取其负荷点的可靠性指标,这样就比直接利用 FMEA 法评估复杂配电系统大大提高了效率。

1 简单配电系统的可靠性评估

简单配电系统由一条主馈线构成,主要元件有变压器、输电线、断路器、隔离开关和熔断器,负荷沿途分布在馈线的两侧,有备用电源的配电系统馈线末端装有联络开关。如图 1 所示。由输电线、熔断器和变压器组成的负荷支路将主馈线从头至尾分成若干馈线段。在进行可靠性评估时,我们可将简单配电系统等效成只由负荷支路和馈线段串接在一起的逻辑模型,这样有利于归纳出一组通用的可靠性评估公式。等效逻辑模型如图 2 所示。

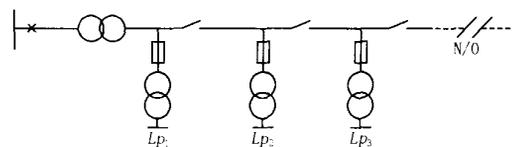


图 1 简单辐射型配电网结构图

Fig. 1 Simple radial distribution system

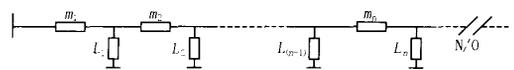


图 2 等效逻辑模型

Fig. 2 Equivalent logical model

等效后的配电系统由 n 条馈线段 (m_1, m_2, \dots, m_n) 和 n 条负荷支路 (L_1, L_2, \dots, L_n) 组成,馈线段中的元件属于集合 $\mathcal{S}_1 = \{\text{变压器, 断路器, 输电线, 隔离开关}\}$,馈线段 i 的故障率为 i 中所有元件的故障率之和;负荷支路中的元件属于集合 $\mathcal{S}_2 = \{\text{变压器, 熔断器, 输电线}\}$,负荷支路 k 的故障率为 k 中所有元件的故障率之和。 N/O 为联络开关。配电系统负荷点的可靠性指标主要有平均故障率、平均停运时间和年平均停运时间。下面以负荷点 j 为例讨论可

靠性指标的计算公式。

$$\begin{aligned}
 \lambda_j &= \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} + \sum_{k=1}^n p_{kf} \lambda_{kj} + \lambda_{jl} + \lambda_{jt} \\
 U_j &= \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} r_{ij} + \sum_{k=1}^n p_{kf} \lambda_{kj} r_{kj} + \lambda_{jl} r_{jl} + \lambda_{jt} r_{jt} \\
 r_j &= \frac{U_j}{\lambda_j}
 \end{aligned}$$

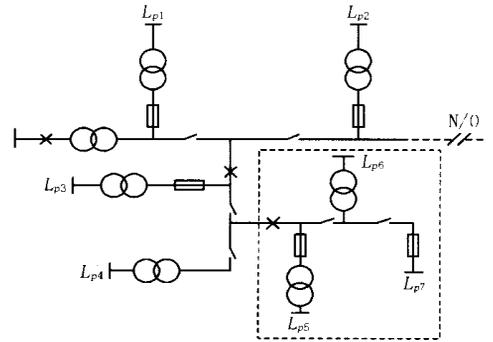
式中： λ_j 、 U_j 、 r_j 分别为负荷点 j 的平均故障率、年平均停运时间和平均停运时间； λ_{ij} 为馈线段 i 的故障率； λ_{kj} 为负荷支路 k 的故障率； λ_{jl} 和 λ_{jt} 分别为负荷支路 j 上输电线和变压器的故障率； p_{kf} 为负荷支路的熔断器不可靠工作的概率值，无熔断器的支路 $p_{kf} = 1$ ； r_{jl} 、 r_{jt} 分别为负荷支路 j 中输电线与变压器的故障修复时间，支路 j 若无变压器则 $r_{jt} = 0$ ； r_{ij} 为馈线段 i 发生故障影响负荷点 j 的断电时间； r_{kj} 为负荷支路 k 发生故障影响负荷点 j 的断电时间； r_{ij} 、 r_{kj} 的取值与系统结构的有关具体讨论如下。

r_{ij} 的取值有 3 种情况：馈线段 i 发生故障且隔离开关无法将负荷点 j 从故障段中隔离出来时， r_{ij} 为馈线段 i 的修复时间 r_i ；馈线段 i 发生故障，隔离开关可将负荷点 j 从故障段中隔离出来，负荷点 j 仍由原电源供电时， r_{ij} 为隔离开关的操作时间 r_s ；馈线段 i 发生故障，隔离开关可将负荷点 j 从故障段中隔离出来，但负荷点 j 需由备用电源供电时， r_{ij} 的值为 $(1 - p_a) r_i + r_a p_a$ 。其中， p_a 为联络开关可靠工作的概率值； r_i 为馈线段 i 的修复时间； r_a 为联络开关的倒闸时间。

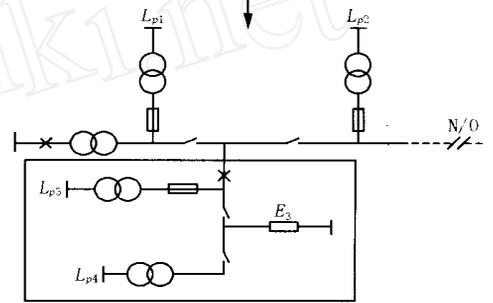
r_{kj} 的取值也有 3 种情况 (k 不等于 j)：负荷支路 k 发生故障且隔离开关无法将负荷点 j 从故障段中隔离出来时， r_{kj} 为负荷支路 k 的修复时间 r_k ；负荷支路 k 发生故障，隔离开关可将负荷点 j 从故障段中隔离出来，负荷点 j 仍由原电源供电时， r_{kj} 为隔离开关的操作时间 r_s ；负荷支路 k 发生故障，隔离开关可将负荷点 j 从故障段中隔离出来，但负荷点 j 需由备用电源供电时， r_{kj} 的值为 $(1 - p_a) r_i + r_a p_a$ 。其中， r_k 为负荷支路 k 的修复时间，其它符号的意义同前述。

2 复杂配电系统的可靠性评估

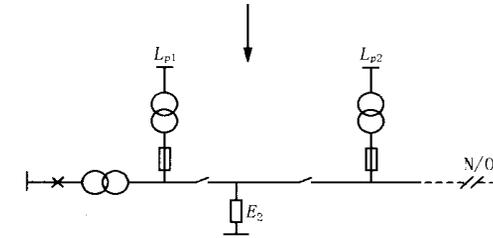
本文研究的复杂配电系统是指带有分支子馈线的辐射型配电网，如图 3 (a) 所示。对于复杂的配电系统不易直接利用简单配电系统的公式计算其可靠性指标，但可以首先对复杂配电系统进行网络等值，将其逐步等值为简单的辐射型配电系统，再利用前面归纳的公式计算可靠性指标。



(a) 三层馈线示意图



(b) 等值后的两层馈线示意图



(c) 等值后的一层馈线示意图

图 3 复杂配电网的上行等值图

Fig.3 Upward equivalent circuit of complex distribution network

等值过程如图 3 所示。(a) 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，因此可以把第 3 层馈线等值为一个元件 E_3 串在第 2 层馈线中，这样第 2 层馈线就等效为一不分支馈线的简单配电系统。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，从而利用前面归纳的公式计算第 1 层馈线的负荷点可靠性指标。这个过程称为复杂配电网的上行等效过程。以图 3 为例，(a) 中第 3 层馈线由 3 段馈线段和 3 段负荷支路组成，其中任意一段发生故障都会影响上两层馈线的负荷点，假定断路器不可靠动作的概率值为 p_b ，则等值后的故障率 λ_{E_3} 为第 3 层馈线所有元

件的故障率之和与 p_b 的乘积。如果第 3 层馈线首端的断路器不能可靠断开,则由上层馈线中的断路器动作,由于断路器都配有隔离开关,因此等值后的平均停运时间 r_{E_3} 为隔离开关的操作时间 r_s 。因此有以下公式:

$$E_3 = p_b \left(\sum_{i=1}^3 i + \sum_{k=1}^3 p_{kf} k \right)$$

$$U_{E_3} = E_3 r_{E_3} = p_b \left(\sum_{i=1}^3 i + \sum_{k=1}^3 p_{kf} k \right) r_s$$

$$r_{E_3} = r_s$$

式中: i 和 k 分别为馈线段 i 和负荷支路 k 的故障率; p_b 为第 3 层馈线首端断路器不可靠工作的概率值; p_{kf} 为负荷支路 k 上的熔断器不可靠工作的概率值; r_s 为隔离开关的操作时间。等效后的第 2 层馈线为一简单辐射型配电系统,由三段馈线段、两条负荷支路和等值元件 E_3 串联组成,同理可求得等效元件 E_2 的平均故障率 E_2 、平均停运时间 r_{E_2} 和年平均停运时间 U_{E_2} 。

$$E_2 = p_b \left(\sum_{i=1}^3 i + \sum_{k=1}^2 p_{kf} k + E_3 \right)$$

$$U_{E_2} = E_2 r_{E_2} = p_b \left(\sum_{i=1}^3 i + \sum_{k=1}^2 p_{kf} k + E_3 \right) r_s$$

$$r_{E_2} = r_s$$

式中: i 和 k 分别为第 2 层馈线中馈线段 i 和负荷支路 k 的故障率; p_b 为第 2 层馈线首端断路器不可靠工作的概率值。经过两次等值,第 1 层馈线已等效为简单的辐射型配电系统,因此可以利用简单电网的公式计算 L_{p1} 、 L_{p2} 等负荷点的可靠性指标。

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。仍以图 3 为例,可以把第 2、3 层馈线视为第 1 层馈线的一个特殊负荷点,由简单辐射型配电系统的可靠性公式求得第 1 层馈线的所有元件故障对这一特殊负荷点的影响,并将这种影响等值为一元件 E_{q1} 串在第 2 层馈线的首端,如图 4 (a) 所示。同样,第 1、2 层馈线对第 3 层的影响也可等值为一元件 E_{q2} 串在第 3 层馈线的首端,如图 4 (b) 所示。这个过程称为复杂配电网的下行等效过程。这样,(a)与 (b) 中的网络均为简单辐射型配电网,用简单辐射型配电网的可靠性公式可以计算负荷点 L_{p3} 、 L_{p4} 、 L_{p5} 、 L_{p6} 和 L_{p7} 的可靠性指标。

3 算例

本文选用 RBTS Bus6 中的主馈线 F_4 及其 3 条分支馈线 F_5 、 F_6 和 F_7 作为研究系统,系统接线如

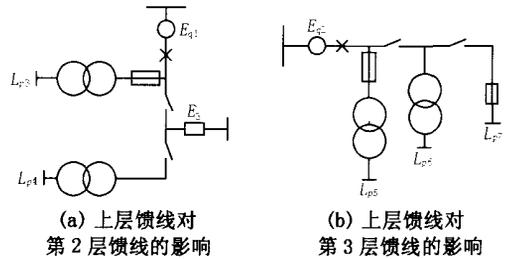


图 4 复杂配电网的下行等值图

Fig. 4 Downward equivalent circuit of complex distribution network

图 5 所示。该系统包括 30 条线路、23 个负荷点、23 个熔断器、23 个变压器、4 个断路器和 1 个隔离开关。线路和负荷点的相关数据参照文献[3,4]。设断路器不可靠工作的概率值为 20%,故障率为 0.002 次/年,修复时间为 4 h;变压器故障率为 0.015 次/年,修复时间为 48 h;隔离开关的操作时间为 0.5 h;联络开关的倒闸时间为 1 h;线路的故障率取为 0.046 次/年·km;假设熔断器都能 100%可靠熔断。下面分无备用电源和有备用电源两种情况计算负荷点及系统的可靠性指标,其中假设联络开关 100%可靠工作。计算结果如表 1~4 所示。

表 1 分支馈线的等值结果

Tab. 1 Equivalent results of lateral feeders

子馈线	上行等效			下行等效			
	/次年 ⁻¹	r/h	U/h年 ⁻¹	/次年 ⁻¹	r/h	U/h年 ⁻¹	
无备用电源	F_5	0.124 4	0.5	0.062 2	1.375 9	4.115 9	5.663 0
	F_6	0.080 0	0.5	0.040 1	1.420 1	6.754 2	9.591 6
	F_7	0.120 7	0.5	0.060 4	1.379 6	6.881 9	9.494 2
有备用电源	F_5	0.124 4	0.5	0.062 2	1.375 9	4.115 9	5.663 0
	F_6	0.080 2	0.5	0.040 1	1.420 1	1.004 2	1.426 1
	F_7	0.120 7	0.5	0.060 4	1.379 6	1.004 3	1.385 6

表 2 典型负荷点的可靠性指标

Tab. 2 Reliability indexes of typical load points

负荷点	无备用电源			有备用电源		
	/次年 ⁻¹	r/h次 ⁻¹	U/h年 ⁻¹	/次年 ⁻¹	r/h次 ⁻¹	U/h年 ⁻¹
L_{p18}	1.515 3	4.253 4	6.445 2	1.515 3	4.253 4	6.445 2
L_{p23}	1.542 9	4.320 4	6.666 0	1.542 9	4.320 4	6.666 0
L_{p26}	1.542 9	6.802 4	10.495 5	1.542 9	3.793 3	5.852 7
L_{p30}	1.828 1	9.560 2	17.477 0	1.828 1	2.777 5	5.077 6
L_{p32}	2.041 5	6.714 9	13.708 5	2.041 5	6.714 9	13.708 5
L_{p40}	1.990 0	9.333 4	18.573 5	1.990 0	3.389 2	6.744 7

表 3 系统可靠性指标

Tab. 3 System reliability indexes

系统可靠性指标	无备用电源	有备用电源
SAIFI	1.688 9	1.688 9
SAIDI	10.983 9	7.156 7
CAIDI	6.503 6	4.237 5
ASAI	0.998 7	0.999 2
ASUI	0.001 3	0.000 8

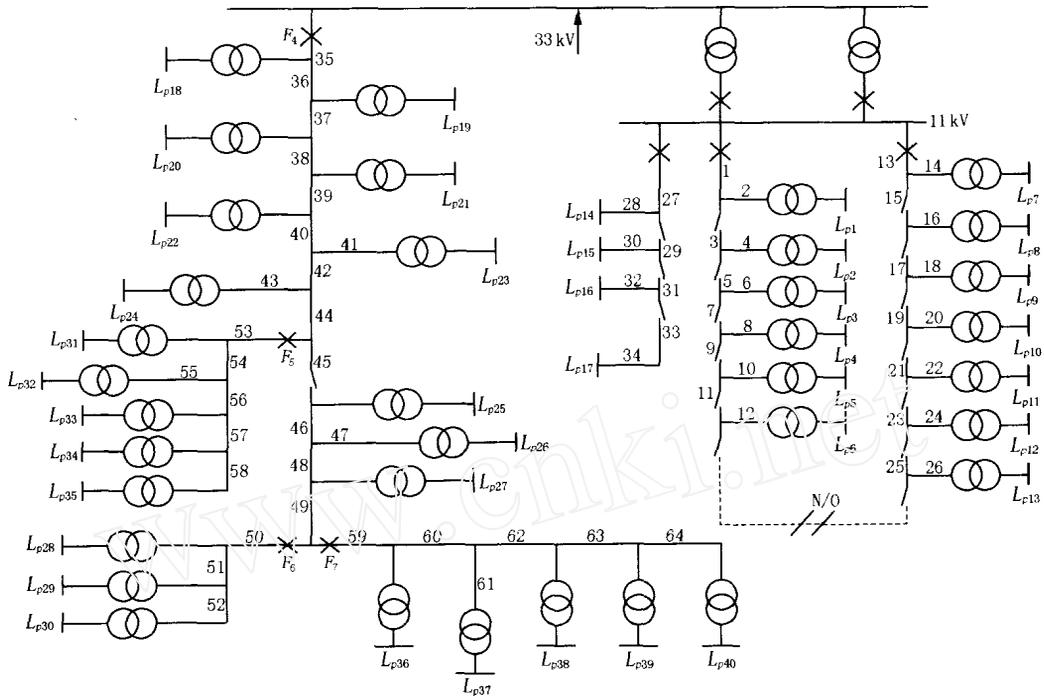


图5 RBTS 母线6的配电系统接线图

Fig. 5 Distribution system connection of RBTS bus 6

表4 FMEA 法的计算结果

Tab. 4 Calculation results with FMEA

系统可靠性指标	无备用电源	有备用电源
SAIFI	1.675 4	1.699 9
SAIDI	10.972 3	7.195 6
CAIDI	6.503 4	4.223 5
ASAI	0.998 8	0.999 3
ASUI	0.001 2	0.000 7

为了更好地比较两种方法的计算效率,表5列出计算所有负荷点的故障率指标两种方法各自需用的计算量。

表5 两种方法计算量比较

Tab. 5 Calculation capacity comparison with two kinds of methods

	FMEA 法	FMEA 结合等值法
计算量/步	1 334	591

由计算结果可以看到,加入备用电源后虽然系统的断电频率没有发生变化,但断电的持续时间有了明显的减少,系统的平均用电有效度有了改善。由表3和表4可以看出运用等值原理结合FMEA法和直接运用FMEA法的计算结果基本一致,误差很小。表5结果显示FMEA结合等值原理的方法比纯粹运用FMEA法减少了56%的计算量,由于所计算的RBTS系统规模不是很大,可以预见对于大规模、结构复杂的配电系统,应用本文方法进行可靠性评估将会更有效地提高计算效率。

4 结论

本文对带有分支馈线的复杂辐射型配电系统的可靠性评估进行了研究,通过网络等值可以将复杂配电系统逐步等效为简单辐射型配电网,利用故障模式与后果分析法求得系统的可靠性指标,这样就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,并通过RBTS BUS6实例计算验证了方法的有效性。

参考文献:

- [1] Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power System[Z]. 1984.
- [2] 别朝红,王锡凡(BIE Chao-hong, WANG Xi-fan). 配电系统的可靠性分析(Reliability Analysis of Distribution Networks)[J]. 中国电力(Electric Power), 1997, 30(5): 10-13.
- [3] 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.
- [4] Allan R N, Billinton R, Sjarief I. A Reliability Test System for Educational Purposes—Basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

(下转第33页 continued on page 33)

附录:

750 kV 线路全长 300 km, 三相参数对称, 线路采用贝瑞隆模型, 每周采样 40 点。线路参数如下:

正序: $r = 0.013\ 326\ \Omega/\text{km}$; $x = 0.266\ 079\ \Omega/\text{km}$;

$c = 0.013\ 87\ \mu\text{F}/\text{km}$

零序: $r = 0.321\ 64\ \Omega/\text{km}$; $x = 0.833\ 354\ \Omega/\text{km}$;

$c = 0.009\ 778\ 57\ \mu\text{F}/\text{km}$

收稿日期: 2003-11-23

作者简介:

翟永昌(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;E-mail: ychzhai@tom.com

李永丽(1963-),女,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化;

曾治安(1966-),男,高级工程师,主要从事电力系统继电保护运行管理方面的工作。

Integrative fault location method based on double-terminal information of high voltage transmission line

ZHAI Yong-chang¹, LI Yong-li¹, ZENG Zhi-an², MA Zhi-yu¹

(1. Department of Electric Power Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: The fault location method of transmission line based on voltages and currents at double terminals consists of traditional fault location using fault fundamental component and travelling wave location employing fault transient travelling wave. In this paper, a new type of integrative fault location system for transmission line combining these two methods is developed. Then the traditional fault location method based on lumped parameters and distributed parameters in the line model are integrated into travelling wave method. The precision is enhanced through wavelet transforming to detect the head of travelling wave. The defects in travelling wave location method are analyzed and improved. The method using reclosure impulse is developed when travelling wave is so weak that the location method can't work. The simulation results of EMTDC show that this method is available and accurate.

Key words: power transmission lines; fault location; travelling wave; reclosure; wavelet transform

(上接第 22 页 continued from page 22)

- [5] 万国成,任震,田翔(WAN Guo-cheng, REN Zhen, TIAN Xiang). 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究(Study on Model of Reliability network-equivalent of Distribution System Reliability Evaluation) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(5): 48-52.
- [6] 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.
- [7] 陈文高(CHEN Wen-gao). 配电系统可靠性实用基础

(Practical Basis of Distribution System Reliability) [M]. 北京: 中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2003-11-18; 修回日期: 2004-01-08

作者简介:

张腾(1978-),硕士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性研究;E-mail: zht-sohu123@sohu.com

张波(1963-),男,教授,研究方向为电力系统运行与控制。

Evaluation of complex distribution system reliability

ZHANG Teng, ZHANG Bo

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper presents a method using failure mode and effect analysis(FMEA) associated with equivalent principle to assess the reliability of complicated distribution system. An equivalent logical model for simple distribution system is also presented. This algorithm turns the complicated distribution system into a simple one step by step using equivalent principle, and then obtains the reliability indexes, which is much more efficient than directly employing FMEA.

Key words: distribution system; reliability; equivalent principle