

复杂配电网络可靠性评估的向量法

高炜欣¹, 罗先觉¹, 支岗印²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 西北电力设计院, 陕西省西安市 710049)

摘要:在故障模式后果分析法的基础上,提出配电网络可靠性指标计算的向量法。该方法以构造负荷点供电“最小路馈线段行向量”的方法,方便地求得带子馈线、备用电源的复杂配电网络的可靠性指标。在最小路馈线段行向量生成后,计算中不需要再考虑网络结构,可简化计算。同时,还有助于方便地找出配电网中的薄弱环节。实例计算表明,向量法计算结果准确、计算过程更加简单。

关键词:配电网; 可靠性评估; 向量; 最小路

中图分类号: TM732; TM727.2

0 引言

电力系统可靠性研究始于 20 世纪 60 年代,当时主要侧重于发电、输电系统的可靠性。但自 70 年代以来,配电系统可靠性研究越来越受到重视。在发达国家,配电系统可靠性评估已经成为电网规划和运行的一项常规性工作^[1]。从国际上看,电力系统工作者一直在努力寻找配电系统可靠性评估的有效算法。文献[2~5]对这一问题做了大量的研究,文献[6]对各种已有的可靠性评估方法进行了对比和总结,指出了目前常用方法各自的优缺点。

我国配电系统可靠性研究始于 20 世纪 80 年代。进入 90 年代以来,国家对配电系统可靠性的研究更加重视,1995 年颁布的《电业生产事故调查规程》将 10 kV 用户供电可靠性列入供电安全考核项目中,配电系统可靠性的研究工作进一步得到发展。文献[1]给出了以元件组合关系为基础的故障模式后果分析法(FMEA—failure mode and effect analysis)。文献[7]对配电系统的可靠性模型和评估算法进行了探讨,提出了基于最小路的快速评估算法。上述方法在计算简单放射状网络时是有效的,但当系统复杂、带有子馈线和备用电源时,计算的复杂性就有所增加。

在对复杂系统进行可靠性评估时,主要有:文献[5]提出的网络等值法;文献[8]提出的基于故障扩散的复杂中压系统可靠性算法;文献[9]提出的将网络元件和子馈线分类,利用分层结构来描述它们之间的拓扑关系进行可靠性评估。

本文在上述研究成果的基础上,吸取了文献[9]中将网络元件和子馈线分类、文献[7]中的最小路法

以及文献[1]中 FMEA 法的思想,提出馈线段分级的思想。在此基础上,根据实际配电网中馈线段均是两端装有隔离开关的情况,提出更加方便、实际的“向量法”。该方法通过建立供电馈线段行向量,可以方便地对有备用电源及子馈线的复杂配电网进行可靠性评估。在各负荷点的“供电馈线段行向量”建立后,“向量法”进行可靠性评估时不再考虑网络结构,既方便了编程,又有较强的可操作性。实例计算表明,该方法操作简便、有效。本文约定各馈线段两端均装有隔离开关。

1 配电系统可靠性指标

我国配电系统实际运行多为简单放射状网络,这种网络从电源开始,以后所有元件均为串联。对于串联系统有如下适用于工程计算的公式^[1]:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{U_s}{\lambda_s} \quad (2)$$

式中: λ_s 为系统负荷点的等效故障率; λ_i 为元件 i 的故障率; r_i 为元件 i 的故障修复时间; r_s 为系统负荷点每次故障的等效修复时间; U_s 为系统的不可用率。

对于两元器件并联系统的故障率 λ 、故障修复时间 r ,可以用式(3)、式(4)转换成单元器件的故障率和故障修复时间。

$$\lambda_p = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad (3)$$

$$r_p = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (4)$$

式中: λ_1, λ_2 分别为元器件 1, 2 的故障率; λ_p 为系统

的等效故障率; r_1, r_2 分别为元器件 1, 2 的故障修复时间; r_p 为系统的等效故障修复时间。

3 个或 3 个以上元器件并联系统的故障率 λ 、故障修复时间 r 转换成单元器件的 λ 和 r 的方法可以参考文献[1]的介绍。

配电系统中有一些常用的可靠性指标,如系统平均停电频率指标(SAIFI)、用户平均停电频率指标(CAIFI)等,都是通过计算故障率 λ 、故障修复时间 r 这两项指标,然后再用其他公式计算。SAIFI, CAIFI 等指标的含义和计算公式在文献[1]中有详细说明,这里不再重复。本文将集中讨论 λ, r 这两项核心指标的求解。

求解 λ, r 最常见的方法就是建立故障模式后果分析表,然后逐一计算。但在实际操作中,由于配电网络结构复杂、负荷点众多,导致用故障模式后果分析法计算量大、计算机编程实现困难。因此,本文提出向量法,该方法准确、易操作、易于计算机编程实现。

为了使向量法能够正确用于带有串并联元器件混合的复杂网络,本文约定:若网络中含有串联元器件和并联元器件,将各元器件的故障率 λ 、故障修复时间 r 用式(1)~式(4)转换为所在馈线段的 λ, r 。

如图 1 所示,含有元器件串并联的馈线段 l' 可以通过式(1)~式(4)等效为单一馈线段 l 。两者的故障率、故障修复时间相同。

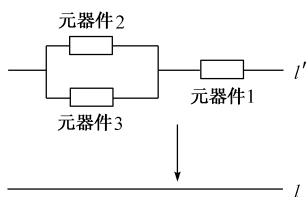


图 1 馈线段等效示意图
Fig. 1 An example of feeder equivalence

2 向量法原理

为了清楚地描述向量法,首先给出如下两个定义。

定义 1 与主供电源直接相连的馈线为 1 级馈线,与 1 级馈线相连的馈线为 2 级馈线,与 2 级馈线相连的馈线为 3 级馈线,馈线的级别以此类推。

定义 2 对于有相同的 1 级馈线的负荷点称为同类负荷点。

定义 1 中的馈线是由连续的、功率流向无分岔的馈线段构成。如图 2 中, $l_5 + l_6 + l_7 + l_8 + l_9$ 可以视为一条馈线,但 $l_8 + l_9 + l_{10} + l_{11} + l_{12}$ 则不能视为一条馈线,必须将其视为 $l_8 + l_9$ 和 $l_{10} + l_{11} + l_{12}$ 两条馈线。

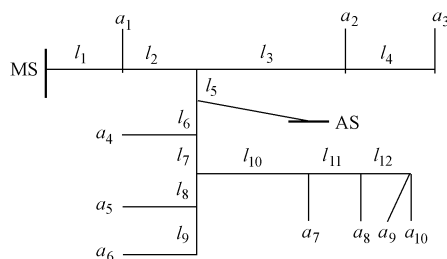


图 2 某复杂配电网
Fig. 2 An example of complex distribution system

在按定义 1 对馈线分级时,同一配电网可能会有不同的分法。这不会导致计算结果不同,但会使计算的复杂性有差异。一般说来,同一级馈线的数目越少,计算的过程就越简单。

以图 2 为例,可以有以下几种分法:

- 分法 1: $l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ 为 1 级馈线, $l_5 + l_6 + l_7 + l_8 + l_9$ 为 2 级馈线, $l_{10} + l_{11} + l_{12}$ 为 3 级馈线;
- 分法 2: $l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ 为 1 级馈线, $l_5 + l_6 + l_7$ 为 2 级馈线, $l_8 + l_9$ 为 3 级馈线, $l_{10} + l_{11} + l_{12}$ 为 3 级馈线;
- 分法 3: $l_1 + l_2$ 为 1 级馈线, $l_3 + l_4$ 为 2 级馈线, $l_5 + l_6 + l_7$ 为 2 级馈线, $l_8 + l_9$ 为 3 级馈线, $l_{10} + l_{11} + l_{12}$ 为 3 级馈线。

可能的分法还有很多,但分法 1 的 1, 2, 3 级馈线的数目均为 1;分法 2 的 3 级馈线数目为 2;分法 3 的 2 级、3 级馈线数目均为 2。显然分法 1 的各级馈线的数目最少,因此对图 2 而言,馈线分级时应尽可能采用分法 1。

无论哪种分法, $a_1 \sim a_{10}$ 都要通过相同的 1 级馈线与电源连接,从供电的角度来看,它们都有相同的 1 级馈线,因此 $a_1 \sim a_{10}$ 为同类负荷点。

设 L 为同类负荷点所涉及的所有馈线段所构成的集合,仍以图 2 为例则有:

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_{12}\} \quad (5)$$

对同类负荷点中任一负荷点 a_i , 都可以找到它由主电源供电时的最小路馈线,该最小路馈线上的各个馈线段可以构成一个如表 1 所示的负荷点 a_i 的主供电源馈线段行向量。主供电源馈线段行向量中各元素则构成负荷点 a_i 的主供电源馈线段集合 L_i , L_i 为 L 的子集。

表 1 主供电源馈线段行向量表
Table 1 Feeder sections vector for main supplier

a_i	$l_{i,1}$	$l_{i,2}$	$\dots$	$l_{i,n}$
-------	-----------	-----------	---------	-----------

以图 2 中负荷点 a_{10} 为例, a_{10} 的主供电源馈线段行向量如表 2 所示;主供电源馈线段集合为 L_{10} , 见式(6)。

表 2 a_{10} 主供电电源馈线段行向量表Table 2 The a_{10} feeder sections vector for main supplier

a_{10}	l_1	l_2	l_5	l_6	l_7	l_{10}	l_{11}	l_{12}
----------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------

$$L_{10} = \{l_1, l_2, l_5, l_6, l_7, l_{10}, l_{11}, l_{12}\} \quad (6)$$

无备用电源时,由 FMEA 法知识可知,负荷点 a_{10} 的等效故障率 λ_{10} 、等效故障修复时间 r_{10} 的计算公式如下:

$$\lambda_{10} = \sum_{l_m \in L} f(l_m) \lambda_{lm} + \lambda_{10}' \quad (7)$$

$$r_{10} = \frac{S_{10}}{\lambda_{10}} \quad (8)$$

式中:

$$S_{10} = \sum_{l_m \in L_{10}} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{fix}}(l_m) + \sum_{l_m \in L-L_{10}} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{cut}}(l_m) + \lambda_{10}' r_{10}'$$

$f(l_m)$ 为馈线段 l_m 的长度; λ_{lm} 为馈线段 l_m 的故障率; λ_{10}' 为负荷点 a_{10} 分支线的等效故障率,分支线为连接馈线和负荷点的架空线或电缆线; $r_{\text{fix}}(l_m)$ 为馈线段 l_m 的等效故障修复时间; $r_{\text{cut}}(l_m)$ 为馈线段 l_m 发生故障后的隔离时间; r_{10}' 为负荷点 a_{10} 分支线的等效故障修复时间。

由此,可以推得无备用电源时,同类负荷点中任一负荷点 a_i 的等效故障率 λ_i 、等效故障修复时间 r_i 的计算公式如下:

$$\lambda_i = \sum_{l_m \in L} f(l_m) \lambda_{lm} + \lambda_i' \quad (9)$$

$$r_i = \frac{S_i}{\lambda_i} \quad (10)$$

式中:

$$S_i = \sum_{l_m \in L_i} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{fix}}(l_m) + \sum_{l_m \in L-L_i} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{cut}}(l_m) + \lambda_i' r_i'$$

λ_i' 为负荷点 a_i 分支线的等效故障率; r_i' 为负荷点 a_i 分支线的等效故障修复时间。

有备用电源时,对同类负荷点中任一负荷点 a_i ,在已知其主供电电源馈线段行向量及对应的集合 L_i 基础上,还可以找到它由备用电源供电时的最小路馈线,该最小路馈线上的各馈线段可以构成一个类似表 1 的负荷点 a_i 的备用电源馈线段行向量。备用电源馈线段行向量中各元素构成一个新的馈线段集合 L_i' 。

仍以图 2 中 a_{10} 为例,其备用电源馈线段行向量见表 3,集合 L_{10}' 见式(11)。

表 3 a_{10} 备用电源馈线段行向量表Table 3 The a_{10} feeder sections vector for alternative supplier

a_{10}	l_6	l_7	l_{10}	l_{11}	l_{12}
----------	-------	-------	----------	----------	----------

$$L_{10}' = \{l_6, l_7, l_{10}, l_{11}, l_{12}\} \quad (11)$$

由 FMEA 法知识可知,有备用电源时, a_{10} 的等效故障率 λ_{10} 的计算公式依然为式(7)。令:

$$L_{\text{fix}} = L_{10} \cap L_{10}' = \{l_6, l_7, l_{10}, l_{11}, l_{12}\} \quad (12)$$

$$L_{\text{cut}} = L - L_{10} = \{l_3, l_4, l_8, l_9\} \quad (13)$$

$$L_{\text{AS}} = L_{10} - L_{\text{fix}} = \{l_1, l_2, l_5\} \quad (14)$$

则等效故障修复时间 r_{10} 的计算公式如下:

$$r_{10} = \frac{S_{10}'}{\lambda_{10}} \quad (15)$$

式中:

$$S_{10}' = \sum_{l_m \in L_{\text{fix}}} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{fix}}(l_m) + \sum_{l_m \in L_{\text{cut}}} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{cut}}(l_m) + \sum_{l_m \in L_{\text{AS}}} f(l_m) \lambda_{lm} (r_{\text{AS}} + r_{\text{cut}}(l_m)) + \lambda_{10}' r_{10}'$$

r_{AS} 为备用电源合闸时间。

可以推得有备用电源时,同类负荷点中任一负荷点 a_i 等效故障率 λ_i 的计算公式如式(9)。令:

$$L_{\text{fix}} = L_i \cap L_i' \quad (16)$$

$$L_{\text{cut}} = L - L_i \quad (17)$$

$$L_{\text{AS}} = L_i - L_{\text{fix}} \quad (18)$$

则等效故障修复时间 r_i 的计算公式如下:

$$r_i = \frac{S_i'}{\lambda_i} \quad (19)$$

式中:

$$S_i' = \sum_{l_m \in L_{\text{fix}}} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{fix}}(l_m) + \sum_{l_m \in L_{\text{cut}}} f(l_m) \lambda_{lm} r_{\text{cut}}(l_m) + \sum_{l_m \in L_{\text{AS}}} f(l_m) \lambda_{lm} (r_{\text{AS}} + r_{\text{cut}}(l_m)) + \lambda_i' r_i'$$

从式(9)、式(10)、式(19)来看,计算中关心的是馈线段所属集合,而不是馈线段之间的连接关系。在生成馈线段行向量时也不用考虑馈线段之间的连接关系,这就简化了计算,也易于编程实现。但在生成主供电电源馈线段行向量及备用电源馈线段行向量时依然要了解网络的拓扑结构,工作量较大。为此,本文在借鉴文献[9]思想的基础上给出一个快速生成所需行向量的方法,可以在一定程度上简化生成行向量的工作。

3 馈线段行向量的快速生成

对任意一个已知结构的配电网,首先按定义 1、定义 2 将其馈线段分级,然后将各级馈线段编号按图 3 所示方法记录。

图 3 中, $L1[i]$, $L2[i]$, $L3[i]$ 分别表示 1 级、2 级、3 级馈线段编号。1 级馈线段编号表中各元素

为 1 级馈线中各馈线段的编号。2 级馈线段编号表中第 1 个元素为 1 级、2 级馈线连接处 1 级馈线段的编号,其余元素为该 2 级中各馈线段编号。3 级馈线段编号表中第 1 个元素为 2 级、3 级馈线连接处 2 级馈线段的编号,其余元素为该 3 级中各馈线段编号。各级馈线段编号的前后次序以正常情况下功率流向为准。网络中含有多级馈线时,存储的方法以此类推。

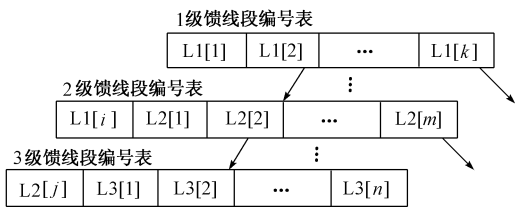


图 3 馈线段存储示意图

Fig. 3 Sketch map for storing feeder sections

将馈线段编号按图 3 所示的格式保存。生成各负荷点馈线段行向量时只需找到与负荷点分支线连接的馈线段编号,再按图 3 逐级倒推即可生成各负荷点的馈线段行向量。

以图 2 为例,在采用分法 1 时馈线段存储情况见图 4。

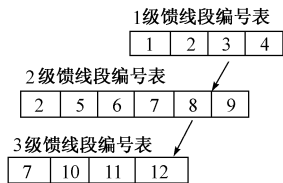


图 4 图 2 所示配电网馈线段存储示意图

Fig. 4 Sketch map of storing distribution system's feeder sections shown in Fig. 2

以图 2 中负荷点 a_{10} 为例,其分支线连接的馈线段编号为 12,从图 4 可得:

$$L_{10} = \{l_{12}, l_{11}, l_{10}, l_7, l_6, l_5, l_2, l_1\} \quad (20)$$

利用上述方法可以在一定程度上减少分析网络拓扑所带来的工作,也易于计算机编程实现。

4 算例

利用上面所介绍的方法,对文献[8]中的算例进行了计算,结果与用 FMEA 法计算出的结果一致。这里以 IEEE RBTS bus3 的 F1,F2 两条馈线为例进行可靠性计算。F1,F2 两条馈线的连接如图 5 所示,所有参数均与文献[3,4]中的参数一致。馈线类型选择为文献[3]中的 Line。

利用向量法对文献[4]中所记载的 1,3,8 负荷点进行了可靠性计算。按表 1 构造向量后生成的各集合见式(21)~式(24),结果见表 4。为与文献[3,

4]中的计算参数保持一致,式(19)中备用电源送电的时间改为合闸时间。可以发现,计算结果与文献[4]中的结果完全一致。

$$L = \{3, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18\} \quad (21)$$

$$L_1 = \{3, 6, 8, 10, 12\}, L_1' = \{\} \quad (22)$$

$$L_3 = \{6, 8, 10, 12\}, L_3' = \{3\} \quad (23)$$

$$L_8 = \{14, 16, 18\}, L_8' = \{\} \quad (24)$$

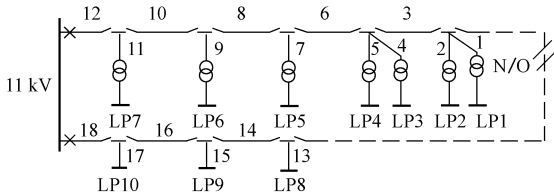


图 5 IEEE RBTS bus3 F1,F2 连接示意图

Fig. 5 Connection diagram of distribution system for IEEE RBTS bus3 F1, F2

表 4 计算参数对照表
Table 4 Results after calculation

负荷点	$\lambda/(\text{次} \cdot \text{年}^{-1})$	r/h	$u/(\text{h} \cdot \text{年}^{-1})$
1	0.301	11.435	3.442
1[3]	0.301	11.440	3.440
3	0.314	11.169	3.507
3[3]	0.314	11.170	3.510
8	0.221	1.941	0.429
8[3]	0.221	1.940	0.430

5 结语

以上讨论及算例表明,本文提出的向量法对复杂配电网的可靠性参数计算是有效的。在主供电电源馈线段行向量、备用电源馈线段行向量建立后,可靠性参数的计算无需再考虑配电网结构,计算中无需考虑拓扑结构,大大简化了评估人员的工作。向量法所得结果和利用 FMEA 法所得结果一致,但向量法计算过程更加简单,可方便地计算有子馈线、备用电源的复杂网络,处理配电网的能力大大提高。这是比 FMEA 法及其他许多方法相对优越之处。

参考文献

- 1 陈文高(Chen Wengao). 配电系统可靠性实用基础(Practical Basic of Distribution Networks Reliability). 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998
- 2 Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power Systems. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1988
- 3 Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A Reliability Test System for Educational Purposes-basic Distribution System Data and Results. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813~820
- 4 Billinton R, Jonnavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670~1676
- 5 Billinton R, Wang P. Reliability-network-equivalent Approach to

- 支岗印(1962—),男,高级工程师,研究方向为城市电网安全运行、规划及优化。
