

带有复杂分支子馈线的配电系统可靠性评估

夏 岩¹, 刘明波¹, 邱朝明²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 广州电力工业局, 广东省广州市 510600)

摘要: 采用网络等值法对带有复杂分支子馈线的配电系统进行可靠性评估, 并提出一种基于新的分层结构的等值算法。该算法通过将网络元件和分支子馈线组合成节点和线路2种集合元件, 根据配电网实际拓扑结构, 采用层状的数据结构描述节点集合元件和线路集合元件之间的拓扑关系, 从而避免直接描述网络元件之间的复杂关系。并采用宽度优先搜索算法对其进行顺向和逆向遍历求解系统的可靠性指标。实例计算验证了该算法的有效性。

关键词: 配电系统; 可靠性评估; 网络等值; 数据结构

中图分类号: TM732; TM727.2

0 引言

配电系统是将电能分配到各个负荷侧的最终环节, 其供电可靠性与用户有着最直接的关系。各种统计显示, 配电系统引起的故障约占用户停电事故的80%, 因此在配电系统的规划和运行中, 对其进行可靠性评估是十分必要的。

根据各预想事故对负荷点供电连续性影响的不同, 文献[1]将其分为全部失去连续性和部分失去连续性。其中全部失去连续性事件对配电系统可靠性起决定性作用, 本文将着重讨论这一问题。故障模式后果分析法^[2,3]是最常用的求解可靠性问题的方法, 适用于简单的辐射状配电系统, 然而, 当系统拓扑结构变得较为复杂、元件数目增多时, 该方法的分析过程就会变得十分复杂。文献[4]采用求解最小路, 并将非最小路上元件故障的影响折算到对应的最小路上的方法对系统进行可靠性评估。但是, 对于带有分支子馈线的复杂系统, 非最小路上元件故障的等效也较为复杂, 其评估效果并不十分理想。

对此, 文献[5]提出网络等值法, 计算过程相对于采用求解最小路的方法有了较大的简化, 其基本思想是将复杂的网络拓扑结构转化为容易求解的简单网络结构, 具体的实现是通过对分支子馈线向上和向下两步等效来完成。该方案的关键点在于用合适的数据结构描述网络的拓扑结构。文献[6]用二叉树的结构来描述整个配电网的结构, 通过对二叉树的递归遍历实现可靠性评估。但是, 上述方法都尚未涉及如何较好地表述主馈线及分支子馈线上诸多元件之间繁杂拓扑关系的问题。本文将网络元件和

分支子馈线分类组合成节点和线路两种集合元件, 采取分层结构描述它们之间的拓扑关系, 通过对各层集合元件的宽度优先搜索, 使网络结构得到简化。在搜索过程中, 计算出负荷点可靠性指标, 实现对配电系统的可靠性评估。

1 配电系统可靠性评估指标

本文采用的配电系统可靠性指标^[2,3]分为负荷点可靠性指标及系统可靠性指标两类。

1.1 负荷点可靠性指标

该指标包括各负荷点的平均年停运率 λ_s (单位为次/年)、平均年停运时间 u_s (单位为h/年) 及平均停运持续时间 r_s (单位为h/次)。可按下列各式进行计算:

$$\lambda_s = \sum_{i \in E} (\lambda_i + \lambda'_i) \quad (1)$$

$$u_s = \sum_{i \in E} (\lambda_i r_i + \lambda'_i r'_i) \quad (2)$$

$$r_s = \frac{u_s}{\lambda_s} \quad (3)$$

其中, λ_i 和 λ'_i 分别为第 i 个元件的年平均故障率和年平均计划检修率, 单位为次/年; r_i 和 r'_i 分别为第 i 个元件的平均故障修复时间和平均计划检修时间, 单位为h/次; E 代表由网络元件构成的集合。

1.2 系统可靠性指标

为评估整个系统的可靠程度, 采用系统平均停电频率 F_{SAIFI} (单位为次/(年·户))、系统平均停电持续时间 T_{SAIDI} (单位为h/(年·户))、用户平均停电持续时间 T_{CAIDI} (单位为h/(年·户))、平均供电可用率 P_{ASAI} 及平均供电不可用率 P_{ASUI} 等系统的可靠性指标, 并由下列各式计算:

$$F_{SAIFI} = \frac{\sum_i \lambda_{si} N_i}{\sum_i N_i} \quad (4)$$

$$T_{SAIDI} = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i N_i} \quad (5)$$

$$T_{CAIDI} = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i \lambda_{si} N_i} \quad (6)$$

$$P_{ASAI} = \frac{8\,760 \sum_i N_i - \sum_i N_i U_i}{8\,760 \sum_i N_i} \quad (7)$$

$$P_{ASUI} = 1 - P_{ASAI} \quad (8)$$

其中, λ_{si} , U_i 和 N_i 分别为负荷点 i 的平均年停运率、平均停运时间和所带负荷数目。

2 配电网络结构的拓扑描述

2.1 配电系统元件的分类组合

配电系统的典型接线方式如图 1 所示。在进行可靠性计算之前,需要对配电系统中众多元件的运行特性及其相互作用关系进行考虑,过程十分复杂。为了简化这一步工作,可以根据系统中各组成元件的功能及位置的异同,将其组合成以下两类集合元件(如图 1 所示):

a. 节点元件:一端与负荷点相连,另一端连接在主馈线上。一般由架空线路、电缆、断路器(或隔离开关及熔断器等元件)、配电变压器等元件组成。

b. 线路元件:在主馈线上,位于 2 个相邻节点元件之间的所有线路及其他元件组成的集合,并且线路集合元件不与负荷点直接相连。它主要由断路器、隔离开关、电缆线路及架空线路等元件组成。

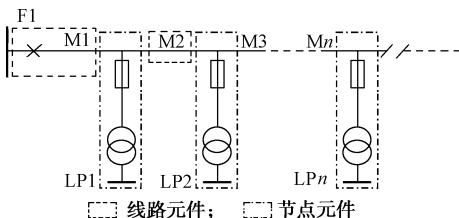


图 1 配电系统的典型接线图

Fig. 1 Typical connection diagram of distribution networks

经过上述对配电系统各元件进行分类组合,可用图 2 所示集合元件之间的串联逻辑关系来简化图 1 所示配电系统中各元件之间的拓扑关系,然后根据式(1)至式(3)对其进行负荷点的可靠性计算。

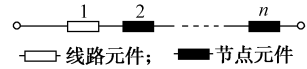


图 2 集合元件之间的逻辑关系

Fig. 2 Logical relation of the aggregated components

2.2 配电网络拓扑结构的简化

图 1 仅仅反映了单个简单的辐射网络结构,但对于带有如图 3 虚线框 1 和框 2 所示复杂分支子馈线(本文今后提到的分支子馈线均指这种)的配电系统,还需要将 2.1 节中对简单的配电网络元件的分类组合方法做进一步推广。所谓复杂,一方面是指分支子馈线的结构较复杂;另一方面,是指分支子馈线数目较多。在此,我们采取对网络进行等值的方法^[5]来解决带有复杂分支子馈线的配电系统的简化问题,其目的是将具有复杂结构的配电网络经过等效化简后分解为若干个简单的网络。在等效过程中,本文针对馈线提出分层的概念。例如从馈线 m 来看,连接于 m 上的若干条分支子馈线均为 m 的下一层, m 即为这些分支子馈线的上一层,同时这些子馈线为同一层的不同成员。

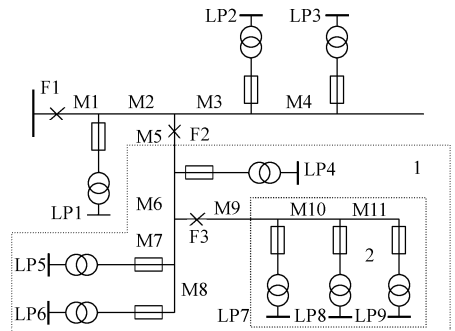


图 3 带有复杂分支子馈线的的配电系统

Fig. 3 Distribution networks with lateral feeders

等效过程包括 2 个基本步骤:向上等效和向下等效。

向上等效过程即为将复杂分支子馈线等效为上一层的节点元件的过程。例如在图 3 中,就是将虚线框 2 中的子馈线 F3 等效为虚线框 1 中的子馈线 F2 上的节点元件,然后再将虚线框 1 中的子馈线 F2 等效为主馈线 F1 上的节点元件。因此,图 3 所示的配电系统的馈线 F1 部分就可完全等效为如图 2 所示的集合元件之间的串联逻辑关系。

向下等效过程是针对求解各分支子馈线上负荷点的可靠性指标的。其做法是将上一层馈线对所求解的子馈线可靠性的影响等效为该子馈线上的一个附加的串联元件,例如图 3 中的主馈线 F1 对虚线框 1 中的子馈线 F2 的影响可以在 F2 上附加一个串联元件来等效。馈线 F2 对其子馈线 F3 的影响可

以在 F3 上附加一个串联元件来等效,此时对于分支子馈线 F2,F3 就分别等效为如图 2 所示的集合元件之间的串联逻辑关系。

3 配电网拓扑结构数据表述及计算步骤

经过对配电网拓扑结构等值化简,将各不同层次子馈线(或主馈线)上的元件对所研究的子馈线(或主馈线)上的可靠性指标产生的影响等效为该层次的串联元件后,该层各负荷点的可靠性指标计算就转化为对各串联集合元件的处理。

3.1 集合元件链接规则

对每一层中的两类集合元件可以分别建立如图 4 所示的链表结构,该层所带分支子馈线等效为节点元件,例如图 4 中 N_2 即为子馈线 F2 等效后的节点元件。链接规则是以该层功率输入点为链表的起始点,将集合元件顺次与其前一个同类集合元件建立链接关系,分别形成线路集合元件和节点集合元件 2 个链表结构,则两种集合元件数量相等,且一一对应,其关联关系可由各自在链表中的位置反映。对于与多条分支子馈线相连接的节点,可采取增加串联虚拟线路和虚拟节点的方法来解决,每个分支子馈线分别连接到各个虚拟节点上,等效为节点集合元件,并令虚拟线路长度为 0,仅起到连接多个节点元件的作用。

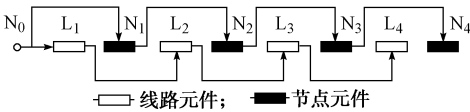


图 4 图 3 所示的配电网中的第 1 层等效后的集合元件编号

Fig. 4 The numbering of the aggregated components in the first layer of the distribution network shown in Fig. 3

3.2 数据结构

配合本文的算法和分层规则,我们建立如下节点集合元件和线路集合元件的数据结构,使配电网的分层更加清晰,并且能够更方便地进行配电网可靠性指标的计算。

a. 节点集合元件的存储信息主要包括 3 类数据:①拓扑位置:记录该节点集合元件的父节点及其祖先节点编号,亦即记录了该节点集合元件在整个网络中的位置及所属层次,用来标示在向上及向下等效过程中的等效位置;②基本信息:记录与该节点集合元件相关的结构参数,如在节点编号、节点名称、节点类型及其所包括的具体的配电网元件等;③节点集合元件的可靠性参数:记录该节点集合元件所包括的具体配电网元件的可靠性参数以及如熔

断器、配电变压器等元件的可靠性参数。

b. 与节点集合元件的存储信息相似,线路集合元件的存储信息也包括 3 类数据:①拓扑位置:记录该线路集合元件的父节点及其祖先节点编号,也就是记录该线路集合元件在整个网络中的位置及所属层次,用来标示在向上及向下等效过程中的等效位置;②基本信息:记录与该线路集合元件相关的结构参数,如线路编号、线路名称、线路类型及其所包括的具体的配电网元件等;③线路集合元件的可靠性参数:记录该线路集合元件所包括的具体配电网元件的可靠性参数,如线路长度及隔离开关等元件的可靠性参数。

3.3 网络拓扑结构的分层表示

根据上述对集合元件的编号规则及其数据结构,配电网的拓扑结构如图 5 所示(箭头的指向表示上一层与下一层的父子关系,亦即指出了等效的相对位置)。

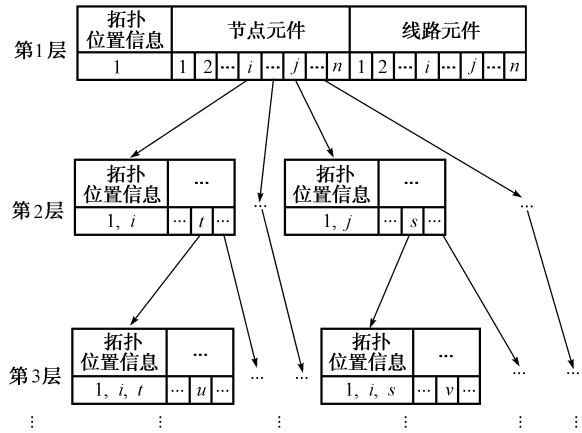


图 5 配电网拓扑结构的分层表示

Fig. 5 Hierarchical representation of topology structure for the distribution networks

3.4 宽度优先搜索法

根据上述配电网拓扑结构表示方法,可以方便地用宽度优先搜索法^[7]对网络的各个集合元件实现按层的顺向(自上而下)和逆向(自下而上)遍历。

宽度优先搜索法是一种从图中某一个顶点出发识别所有可到达顶点的方法。这种搜索方法可以借助队列来实现。将图 5 中各层的成员看做本搜索方法中的各个顶点。其顺向遍历的实现即是以第 1 层成员开始,向下层进行搜索;而逆层遍历则从一个与最后一层所有成员邻接的虚拟顶点开始,逐渐向上层进行搜索。

3.5 配电系统可靠性的计算步骤

综上所述,计算配电系统可靠性的分层等效算法的主要步骤可总结如下:

a. 以主馈线和分支子馈线为基本单位对配电网进行分层划分,对各层线路集合元件和节点集合元件分别进行编号,并按 3.2 节介绍的数据结构完成整个计算数据的输入。再将当前层设为最末层。

b. 判断当前层是否是最上一层,若是,则转入步骤 d。

c. 计算当前层对其上一层馈线可靠性指标的影响,并将该影响等效为上一层的节点集合元件的可靠性参数,然后再将其上一层设为当前层,转入步骤 b。

d. 根据式(1)至式(3)求出当前层所有负荷点(包括由下层等效上来的节点集合元件)的可靠性指标,再加上其上一层对本层的附加等效串联元件的可靠性参数(若本层为最上层,则不存在该附加等效串联元件),即为本层各负荷点实际的可靠性指标。

e. 判断本层是否为最末层,若是,则转入步骤 g;否则,转入下一步。

f. 将步骤 d 计算出的由其下层分支子馈线等效上来的节点集合元件所对应的负荷点可靠性指标等效为该下层分支子馈线的附加等效串联元件的可靠性参数,并将下一层改设为当前层,转入步骤 d。

g. 根据以上步骤计算出的所有负荷点的可靠性指标,计算出整个配电系统的可靠性指标 F_{SAIFI} , T_{SAIDI} , T_{CAIDI} , P_{ASUI} 及 P_{ASAI} 。结束计算。

4 算例

本文选择 RBTS 母线 6 的配电系统^[8]作为试验系统,其接线如图 6 所示。

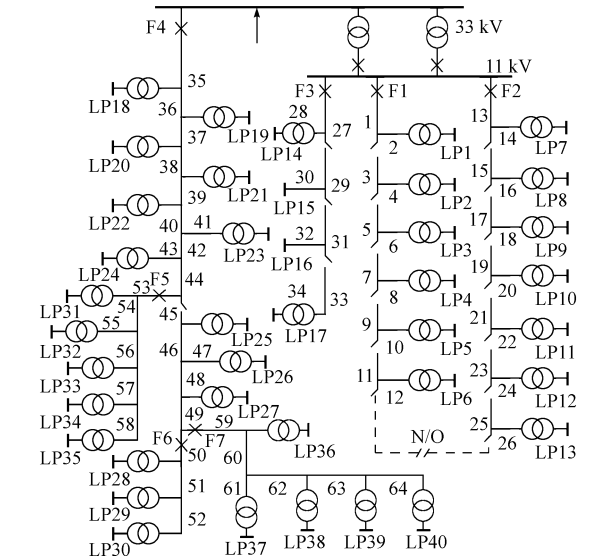


图 6 RBTS 母线 6 的配电系统接线图
Fig. 6 Connection diagram of the distribution system for RBTS bus 6

该系统有 4 条主馈线(F1,F2,F3 和 F4),而主馈线 F4 带有 3 条分支子馈线(F5,F6 和 F7)。各元件的可靠性参数全部引自文献[8,9],各断路器的可靠动作概率为 80%,配电变压器可替换。以主馈线 F4 为研究对象,包括 30 条线路、23 个负荷点、23 个熔断器、23 个配电变压器、4 个断路器及 1 个隔离开关,共计 81 个元件。按照 3.2 节介绍的数据结构,主馈线 F4 的网络结构可分为 2 层:第 1 层即为 F4 的主馈线部分;第 2 层则包括 F5,F6 和 F7 这 3 条子馈线。应用 3.5 节提出的宽度优先搜索算法,对主馈线 F4 及其分支子馈线进行逆向和顺向的遍历搜索,对它的 3 条子馈线进行向上和向下等效,等效结果如表 1 所示。

表 1 各子馈线在宽度优先搜索后的等效结果
Table 1 Equivalent results of lateral feeders after breadth-first search

子 馈 线	逆向等效			顺向等效		
	$\lambda_{qe}/$ (次· 年 ⁻¹)	$r_{qe}/$ (h· 次 ⁻¹)	$u_{qe}/$ (h· 年 ⁻¹)	$\lambda_{qe}/$ (次· 年 ⁻¹)	$r_{qe}/$ (h· 次 ⁻¹)	$u_{qe}/$ (h· 年 ⁻¹)
F5	0.864 5	5.0	4.322 5	2.770 3	4.0	10.965 5
F6	0.552 5	5.0	2.762 5	3.019 9	5.0	15.099 5
F7	0.838 5	5.0	4.192 5	2.791 1	5.0	13.955 5

在得到这些等效结果之后,由主馈线 F4 及其分支子馈线构成的网络被等效成 4 个独立的简单网络。主馈线 F4 包括节点集合元件和线路集合元件各 13 个,其中分支子馈线 F5,F6 和 F7 等效上来的节点集合元件,以及虚拟线路和虚拟节点各 1 个(用来处理分支子馈线 F6 和 F7 连到同一节点的情况)。分支子馈线 F5,F6 和 F7 包括的节点集合元件数目分别为 5 个、3 个、5 个,它们的线路集合元件数目分别与其各自所包括的节点集合元件数目相同。此外,每个分支子馈线上还分别附加 1 个由主馈线 F4 等效下来的串联元件。4 个简单网络中的集合元件总数为 55 个,可见在进行计算时需要考虑的元件数比等效前减少了。由于将原网络等效成了 4 个相互独立的简单网络,使得对其中每一部分的计算量都有所降低。随着网络规模的增大以及元件数量的增加,这样等效带来的好处将更为显著。表 2 列出了馈线 F4 上部分具有代表性的负荷点的可靠性指标。

在主馈线 F4 无备用电源,即文献[5]所指的第 1 种情况下,图 6 配电系统的系统可靠性指标计算结果列于表 3 中,在相同条件下与文献[5]的计算结果相一致。

表 2 主馈线 F4 及其分支子馈线上的
典型负荷点的可靠性指标
Table 2 Reliability indexes at typical load points
of the feeder F4 and its lateral feeders

负荷点编号	$\lambda_{si}/(\text{次} \cdot \text{年}^{-1})$	$r_{si}/(\text{h} \cdot \text{次}^{-1})$	$u_{si}/(\text{h} \cdot \text{年}^{-1})$
LP20	3.476 9	4.191 5	14.573 5
LP25	3.476 9	5.021 6	17.459 5
LP30	3.587 4	5.020 9	18.012 0
LP35	3.649 8	4.229 8	15.437 9
LP40	3.644 6	5.020 6	18.298 0

表 3 RBTS 母线 6 配电系统的系统可靠性指标的结果比较
Table 3 The comparison of system indexes of the
distribution network for RBTS bus 6

数据来源	F_{SAIFI}	T_{SAIDI}	T_{CAIDI}	P_{ASAI}	P_{ASUI}
文献[5]结果	1.636 5	6.969 5	4.258 8	0.999 2	0.000 8
本文结果	1.636 5	6.969 9	4.259 1	0.999 2	0.000 8

5 结论

对于带有复杂分支子馈线的配电系统,其可靠性计算的复杂性主要集中在对网络拓扑结构的描述方面。本文通过对配电网元件的分类,将其组合成节点和线路两种集合元件,并在此基础上建立分层的数据结构描述网络中的集合元件之间的拓扑关系,从而避免了直接表示网络元件之间的拓扑关系。采用宽度优先搜索算法可以实现对各层的顺向和逆向遍历,将复杂配电网经等效化简后分解为若干个简单网络。通过对 RBTS 算例的计算,验证了本算法的有效性。因此,本文提出的分层等效算法可以适用于具有复杂分支子馈线和元件数目众多的配电网的可靠性计算。

参考文献

1 郭永基,杨刚,鲁宗相 (Guo Yongji, Yang Gang, Lu Zongxiang). 部分失去连续性对配电系统可靠性的影响 (Influence of Partial Loss of Continuity on Distribution System

Reliability), 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua Univ. (Sci & Tech)), 1999, 39(1): 16~18
2 Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power Systems. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1984
3 Billinton R, Allan R N. Reliability Assessment of Large Electric Power Systems. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1988
4 别朝红,王锡凡(Bie Zhaohong, Wang Xifan). 配电系统的可靠性分析(Reliability Analysis of Distribution Networks). 中国电力(Electric Power), 1997, 30(5): 10~13
5 Billinton R, Wang P. Reliability-network-equivalent Approach to Distribution System Reliability Evaluation. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1998, 145(2): 149~153
6 黎晓刚,张焰(Li Xiaogang, Zhang Yan). 配电网供电可靠性的递归算法(A Recursive Algorithms of Reliability Assessment for Distribution Networks). 见:第十五届全国高校电力系统及其自动化专业学术年会论文集(In: Proceedings 15th CUS-EPISA). 武汉(Wuhan): 1999. 47~51
7 Sartaj Sahni. 数据结构、算法与应用——C++语言描述(Data Structure, Algorithms and Applications in C++). 汪诗林,孙晓东,蒋艳凰,等译(Wang Shilin, Sun Xiaodong, Jiang Yanhuang, et al trans). 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 2000. 365~403
8 Billinton R, Jonnavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670~1676
9 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

夏岩(1977—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与计算。E-mail: shinesscut@263.net
刘明波(1964—),男,博士,教授,主要研究方向为电网无功优化调度及最优潮流计算、电力系统电压稳定性分析、地理信息系统及配电网自动化技术。E-mial: epmbliu@scut.edu.cn
邱朝明(1974—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与计算。

RELIABILITY ASSESSMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS
WITH COMPLEX SUBFEEDERS

Xia Yan¹, Liu Mingbo¹, Qiu Zhaoming²
(1. South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China)
(2. Guangzhou Electrical Power Bureau, Guangzhou, 510600, China)

Abstract: This paper presents an application of network-equivalent-based approach to reliability assessment of distribution systems with feeders of complex subfeeders, and an equivalent algorithm is proposed based on a novel topological representation with hierarchical structure. This algorithm classifies all the components and lateral feeders in the network into node-type and line-type aggregated components. In accordance with physical topology structure of distribution system, the topological relationship of the network can be represented by hierarchical structure of the aggregated components to avoid direct description of complex relationship between components in the network. The reliability indexes are computed by forward and backward search of all the aggregated components according to breadth-first search method. Furthermore, the proposed method has been validated on a test system.

Key words: distribution system; reliability assessment; network equivalence; data structure