

基于递归算法的复杂辐射状配电网可靠性计算

郭飞¹, 陈炳华², 相中华³

(1. 宁夏电力公司超高压电网运行分公司, 宁夏 银川 750011; 2. 国网运行有限公司三门峡超高压管理处, 河南 三门峡 472000; 3. 宁夏电力公司石嘴山供电局, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 提出了一种将递归算法和等值法结合的复杂辐射状配电网的可靠性评估算法。该算法针对配电网结构的递归性特点, 首先将配电网分层处理, 采取左子女—右兄弟的二叉树表示方法将网络分层存储为树型数据结构形式, 然后通过对树的递归遍历将配电网的子馈线进行合理的可靠性等效, 简化为一个形式简单的网络。在遍历过程中递归调用可靠性计算公式, 最终得到整个配电网的负荷点可靠性指标和系统可靠性指标。实例计算验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 可靠性; 递归算法

Computation of reliability in radial distribution network based on recursive algorithm

GUO Fei¹, CHEN Bing-hua², XIANG Zhong-hua³

(1. EHV Grid Operation Branch, Ningxia Electric Company, Yinchuan 750011, China; 2. Sanmenxia EHV Operation Branch, State Grid Operation Company, Sanmenxia 472000, China; 3. Shizuishan Electric Power Supply Bureau, Ningxia Electric Company, Shizuishan 753000, China)

Abstract: This paper proposes an algorithm to evaluate the reliability of complex radial distribution network by compounding recursive algorithm and method of equivalents. According to the recursiveness of distribution network, this new algorithm first disposes the distribution network and stores the data in the form of a left-child and right-sibling binary tree, then makes reasonable equivalents of reliability for the distribution network subfeeders based on the recursive traversal of the tree, and thus simplifies the distribution network in form. During the ergodic process, reliability indices for all the individual load points and for the system are obtained by recursively applying computational formula to reliability. The effectiveness of this approach is proved by examples.

Key words: distribution network; reliability; recursive algorithm

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0051-05

0 引言

传统的配电网可靠性评估方法为故障模式与后果分析法, 即 FMEA 法^[1-2] (Failure Mode and Effect Analysis Method), 这种方法通过对系统中的所有状态的搜索, 列出全部可能的系统状态, 然后根据所规定的可靠性判据对系统的所有状态进行检验分析, 找出系统的故障模式集合, 最后在此状态集合的基础上, 求得系统的可靠性指标。FMEA 法原理简单、清晰、模型准确, 已广泛用于发、输电系统的可靠性评估。但是, 它的计算量随着元件数目的增加呈指数增长, 所以, 当配电网结构比较复杂, 元件数目增多时, 系统故障模式急剧增加, 计算将变得冗长繁琐。因此, 用 FMEA 法直接对一个复杂的辐射形配电网进行评估是很困难的。

最小路法是近几年提出的一种配电网可靠性评估新方法, 该算法同时考虑了最小路上的元件和

非最小路上的元件故障对负荷点可靠性指标的影响, 并能指出网络的最薄弱环节, 计算效率与 FMEA 法相比有较大的提高。但是对于由主馈线和副馈线组成的相对复杂的配电系统, 最小路法虽然能够准确的计算, 但它对我们并不需要着重关心的负荷点指标也做了大量的计算, 耗费了不必要的时间^[3-4]。

本文针对配电网辐射性的特点, 利用图论中树的概念, 采用广度优先搜索策略, 将配电网分层存储为树型数据结构形式, 然后通过对树的递归遍历将配电网的子馈线进行合理的可靠性等效, 简化为一个形式简单的网络, 在遍历过程中递归调用可靠性计算公式, 最终得到整个配电网的负荷点可靠性指标, 进而得到系统可靠性指标。

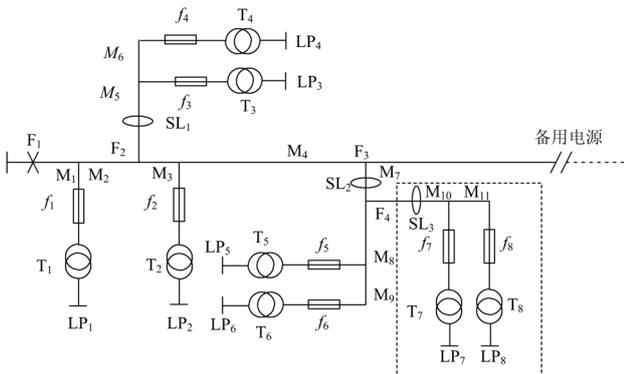
1 配电网的可靠性等值

实际的配电系统往往由主馈线和副馈线构成, 对这种结构比较复杂的配电网, 可以利用可靠性等

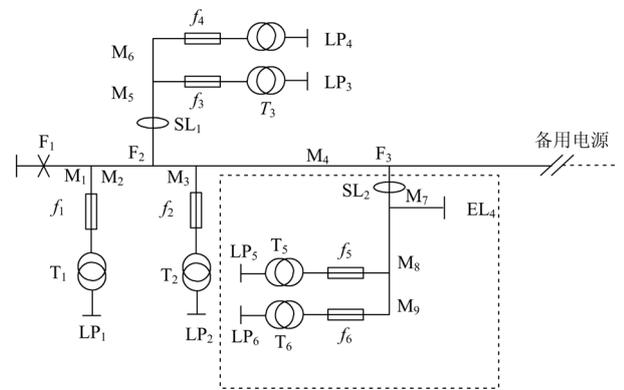
值的方法将其等值为简单的辐射形配电网，从而简化计算^[5]。等效过程包括向上等效过程和向下等效过程两个步骤。

1.1 向上等效过程

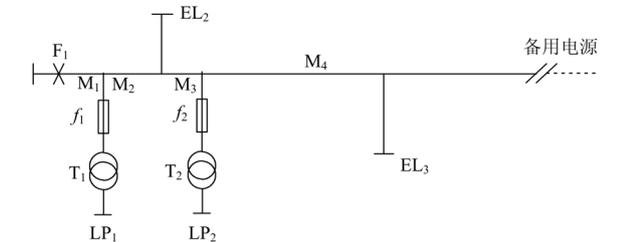
按系统的馈线对其进行分层处理，每一条馈线及该馈线所连接的各种元件（包括隔离开关、分段断路器、熔断器、分支线等）均属同一层。每一层都可以等值为一条相应的等效分支线，这样从最末层开始向上逐层等值，最后一个复杂的含有多条馈线的配电网就等值为一个简单的辐射形网络。



(a) 网络初始结构图



(b) 等值变换后的结构图



(c) 最终的网络等值接线图

图中： SL_i 为等效串联元件； EL_i 为等效分支线； F_i 为馈线； M_i 为各馈线的主干线； LP_i 为负荷点； T_i 为变压器； f_i 为熔断器

图 1 配电系统的可靠性等值示意图

Fig.1 Equivalent chart of distribution network reliability

如图 1 (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 4 对馈线 3 的影响与一条等效分支线对馈线 3 的影响相似。所以，可以用一条等效分支线 EL_4 来等值馈线 4，等效分支线的故障率和停运时间包含了第 4 层也就是馈线 4 上所有元件故障的影响。

1.2 向下等效过程

馈线 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 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网计算，从而简化了计算。在图 1 中，第 1 层元件故障对第 2 层负荷点的影响等值为馈线 2 上的一个串联元件 SL_1 （如果同一层内有多个并列的馈线时，也应将它们元件故障的影响计入），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网，可以方便地计算出馈线 2 上各负荷点的指标。用同样的方法，可以计算出馈线 3 上的等值串联元件 SL_2 ，从而求出馈线 3 上各负荷点的指标，最后获得整个系统的可靠性指标。

2 配电网供电可靠性的递归算法

2.1 基本原理

针对配电网辐射状的结构特点，将配电网的结构用树型数据结构表示，可用树的递归遍历来实现上述配电网的等值过程。

树型结构是一类非常重要的非线性数据结构，是以分支关系定义的层次结构，其定义是一个递归的定义。配电网的基本结构是树状的，由主馈线和副馈线分层构成，是一种递归结构，两者有着天然的相似。递归算法针对这一特点，首先将配电网采用左子女一右兄弟的二叉树表示方法分层存储为树型数据结构形式，然后通过对树的递归遍历将配电网的子馈线进行合理的可靠性等效，简化为一个形式简单的网络。

图 1 所示的网络结构，可用图 2(a)的树状数据结构表示。图中 S 节点表示整个系统电源； M_n 节点表示为各馈线的主干线 n ，每个节点存储了该线路上的所有元件（如有断路器、熔断器、隔离开关等）信息，则上一节的等效过程可用树的后序递归遍历和前序递归遍历实现。从图中可以看出图 1 所示的配电网被分成了 4 层：第一层为电源点 S ；第二层为电源点与备用电源间的主馈线 M_1 、 M_2 、

M_3 、 M_4 ；第三层为 M_5 、 M_6 和 M_7 、 M_8 、 M_9 ；第四层为 M_{10} 、 M_{11} 。

后序遍历二叉树算法的框架是：后序遍历左子树 (L)；后序遍历右子树 (R)；访问根节点 (V)。对图 2 (a) 所示的树的后序递归遍历的顺序为：(1) M_6 、 M_5 ，可以得到等效线路 EL_2 ；(2) M_{11} 、 M_{10} 同上可以得到等效线路 EL_4 ；(3) M_9 、 M_8 、 M_7 ，得到等效线路 EL_3 。该顺序与向上等效过程一致，得到一个形如图 1 (c) 的等值简化网络，树形图如图 2 (b)。图中 \hat{M}_2 、 \hat{M}_4 为存储了等效线路信息后的节点。

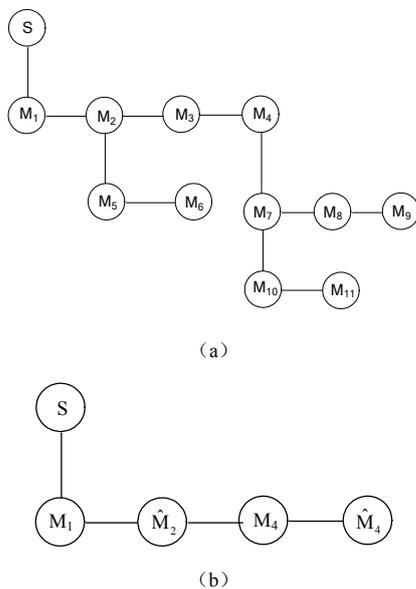


图 2 树型图

Fig.2 Graph in tree-shape

一般前序遍历二叉树算法的框架是：访问根节点 (V)；前序遍历左子树 (L)；前序遍历右子树 (R)。本文中为了实现对配电网的逐层遍历，采取如下的前序遍历二叉树框架：访问根节点 (V)；前序遍历右子树 (R)；前序遍历左子树 (L)。对图 2 (a) 所示的树的前序递归遍历的顺序为： M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 、 M_6 、 M_7 、 M_8 、 M_9 、 M_{10} 、 M_{11} ，该顺序与向下等效过程一致。遍历计算过程中如果节点与负荷点直接相连，则根据简化后网络的网络连接关系计算负荷点的可靠性指标；如果节点为存储了等效线路信息后的节点，则根据简化后网络的网络连接关系计算出表示上层馈线对下层负荷点可靠性指标的影响的等值串联元件 SL_i ，以便代入下层负荷点可靠性指标的计算。计算出整个系统的负荷点指标后，最后通过各负荷点指标求出整个系统的可靠性指标。

2.2 实际情况的影响

若系统无备用电源，树中的每个节点发生故障或检修，均会引起负荷点的停运。所以，参与计算的为元件停运率（即故障率与计划检修率之和）和停运时间。如果系统有备用电源，如图 2 (a) 所示的树中电源点与备用电源间的主馈线 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 ，且主馈线上装有分段装置（隔离开关或分段断路器），那么分段装置前的元件发生故障引起的后段负荷点停运时间为 $\max\{S, T\}$ ，其中 S 为分段装置的操作时间， T 为备用电源的倒闸操作时间。并且，前段元件的检修不会引起后段负荷点的停运。而隔离开关或分段断路器后的元件发生故障所引起的前段负荷点停运时间为隔离开关或分段断路器的操作时间 S ，并且后段元件的检修不会引起前段负荷点的停运。对于分支线，如果其首端装有熔断器，那么分支线上的元件发生故障，熔断器熔断，故障不影响其他分支线。

3 算例

本文以文献[6-7]提供的输电系统中的母线 2 的配电网为算例，应用所提出等值法与可靠性递归算法相结合的方法对其进行可靠性评估计算。该输电系统有 43 条 35 kV 线路，33 个母线节点，发电机 5 台，总负荷 220 MW。取其母线 2 作为本文的算例，如图 3 所示。

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。

应用上述的配电网可靠性的计算方法，对图 3 中配电网系统假设其接线方式为主馈线有隔离开关，有分支线保护，有备用电源，变压器无备用。进行可靠性分析后各负荷点可靠性评价指标结果如表 1 所示，系统可靠性评价指标如表 2 所示。

本文的计算结果与文献[6-7]结果完全一致，说明本方法是正确的。并且，采用本文算法比采用故障遍历算法^[3]同等条件下运算效率提高了 17%。

对图 3 所示的配电网，改变其网络结构，各种接线方式的特征如表 3 所示。对系统可靠性指标进行计算，计算结果如表 4 所示。

表中各项指标同表 4。

表中接线方式 1 的可靠性最差，因为它没有任何提高可靠性的技术措施。

接线方式 5 与之相比增加了主馈线隔离开关，使得电源点与隔离开关点之间的负荷仅经过开关的开断时间即恢复供电，因此系统停电时间 SAIDI 大大减少。

接线方式 3 在接线方式 5 的基础上增加了备用电源, 此时当隔离开关后发生故障, 隔离开关即跳开, 隔离前后两段, 投入备用电源。此时仅发生故障段所连接负荷经历的停电时间为线路段修复时间, 其它负荷点的断电时间仅为倒闸操作时间。因此系统的可用率提高了 0.066 2 个百分点。

表 1 母线 2 各负荷点的可靠性评价指标
Tab.1 Load point reliability indices for bus 2

馈线	负荷点	λ (次/年)	r (小时/次)	U (小时/年)
1	1	0.153	31.859 61	4.874 52
	2	0.161	31.767 2	5.114 52
	3	0.161	31.791 43	5.118 42
	4	0.153	31.885 1	4.878 42
	5	0.161	31.815 65	5.122 32
	6	0.159	31.838 49	5.062 32
	7	0.161	30.834 78	4.964 4
2	8	0.086	22.473 49	1.932 72
	9	0.086	20.637 21	1.774 8
3	10	0.155	31.487 61	4.880 58
	11	0.161	31.791 43	5.118 42
	12	0.163	31.769 45	5.178 42
	13	0.161	30.477 14	4.906 82
	14	0.163	30.471 29	4.966 82
4	15	0.155	31.559 74	4.891 76
	16	0.161	31.767 2	5.114 52
	17	0.155	31.835 61	4.934 52
	18	0.155	31.514 45	4.884 74
	19	0.163	31.440 12	5.124 74
	20	0.163	31.464 05	5.128 64
	21	0.161	30.501 37	4.910 72
	22	0.163	30.495 21	4.970 72

表 2 母线 2 的可靠性数据
Tab.2 System indices for bus 2

馈线	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ASUI	EENS	AENS
F1	0.158	5.04	31.79	0.999 425	0.000 575	18 295	28.06
F2	0.086	1.85	21.56	0.999 788	0.000 212	3 974	1 987
F3	0.160	5.05	31.68	0.999 423	0.000 577	15 489	24.51
F4	0.158	4.98	31.58	0.999 431	0.000 569	16 986	27.31
SYS	0.159	5.02	31.68	0.999 427	0.000 573	54 744	28.69

SAIF 为统平均断电频率, 次/年; SAIDI 为系统平均停电时间, 小时/户年; CAIDI 为用户平均停电持续时间指标, 小时/户年; ASAI 为平均供电可用

率; ASUI 为平均供电不可用率; EENS 为电量不足期望值, 千瓦时/年; AENS 为平均电量不足, 千瓦时/年。

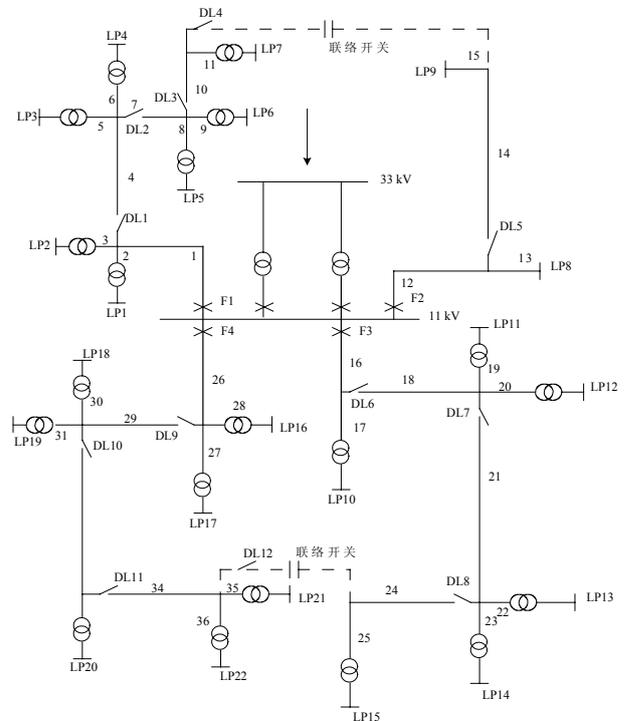


图 3 母线 2 的配电网络图

Fig.3 Distribution network for bus 2

接线方式 2、4 与前面提到的三种接线方式相比较增加了分支线保护, 使得分支线上的故障不至于影响到其它分支线上的负荷点, 大大降低了系统的断电频率。接线方式 4 与接线方式 6 比较增加了变压器的备用, 系统停电时间大大降低。主要原因是变压器的维修时间长, 因此变压器的备用将系统的可用率提高了 0.325 个百分点。

从表中可以看出对同一网络, 不同的接线方式下, 其系统可靠性指标有很大的不同。对可靠性较差的网络, 可以采取一定的增强措施, 如加装主馈线隔离开关、加分支线保护、增加备用电源等方式来增加其运行灵活性, 从而提高其可靠性指标。

4 结论

1) 本文针对配电网辐射性的特点, 利用图论中树的概念, 采用广度优先搜索策略, 将配电网分层存储为树型数据结构形式, 然后通过对树的递归遍历将配电网的子馈线进行合理的可靠性等效, 简化为一个形式简单的网络, 在遍历过程中递归调用可靠性计算公式, 最终得到整个配电网的负荷点可靠性指标, 进而得到系统可靠性指标。经过实例验证,

该方法是有用的。

2) 该方法考虑了配电系统的各种实际情况,如分支线保护、隔离开关、分段断路器的配置等的影响。

3) 本文采用树的递归遍历,计算更加简洁,大

大节约了计算时间。同时本文采用左子女-右兄弟的二叉树以馈线的主干线为结点处理配电网,比以馈线为结点^[8]处理配电网的递归算法更能反映负荷点间的联络关系,更符合实际情况,数据处理也更简单。

表 3 各种接线方式的特征

Tab.3 Characters of different connections

接线方式编号	特 征
1	主馈线无隔离开关,无分支线保护,无备用电源,变压器无备用
2	主馈线无隔离开关,有分支线保护,无备用电源,变压器无备用
3	主馈线有隔离开关,无分支线保护,有备用电源,变压器无备用
4	主馈线有隔离开关,有分支线保护,有备用电源,变压器有备用
5	主馈线有隔离开关,无分支线保护,无备用电源,变压器无备用
6	主馈线有隔离开关,有分支线保护,有备用电源,变压器无备用

表 4 不同接线方式下的系统可靠性数据

Tab.4 System indices for different cases

接线方式	1	2	3	4	5	6
SAIFI	0.409	0.159	0.409	0.159	0.409	0.159
SAIDI	29.26	7.30	9.04	2.17	13.10	5.02
CAIDI	71.52	46.07	22.09	13.69	32.03	31.68
ASAI	0.996 660	0.999 166	0.998 968	0.999 752	0.998 504	0.999 427
EENS	305 626	79 905	92 999	25 753	198 790	54 744
AENS	160.2	41.88	48.74	13.50	104.2	28.69

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
GUO Yong-ji. Principle of Power System Reliability and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [2] 陈礼义, 尚学军. 配电网的发展和改造[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 61-65.
CHEN Li-yi, SHANG Xue-jun. Development and Improvement of Distribution Network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(4): 61-65.
- [3] 李志民, 李卫星, 刘迎春. 辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 53-56.
LI Zhi-min, LI Wei-xing, LIU Ying-chun. Fault-Traversal Algorithm of Radial Distribution System Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 53-56.
- [4] 杨文字, 余健明, 同向前. 基于最小割集的配电系统可靠性评估算法[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(4): 387-391.
YANG Wen-yu, YU Jian-ming, TONG Xiang-qian. Reliability Assessment Algorithm of Power Distribution-System based on Minimal Cut Sets[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(4):

- 387-391.
- [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 Zhao-hong, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Reliability Evaluation Complicated of Distribution Systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(8): 9-13.
- [6] Allan R N, Billinton R. A Reliability Test System for Educational Purposes Basic System Data and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-821.
- [7] Billinton R A. Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996.
- [8] 张焰, 黎晓刚. 配电网供电可靠性的递归算法[J]. 华东电力, 2000(11): 7-9,60.
ZHANG Yan, LI Xiao-gang. Recursive Algorithm for Power Supply Reliability of Distribution Network[J]. East China Electric Power, 2000(11): 7-9,60.

收稿日期: 2009-04-13; 修回日期: 2009-05-18

作者简介:

郭飞(1981-), 男, 工学硕士, 从事电力系统运行与规划方面的研究; E-mail:afeier81@163.com

陈炳华(1981-), 男, 助理工程师, 从事变电运行工作。