

一种配电网拓扑分析方法及其在可靠性评估中的应用

徐珍霞, 顾洁

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 配电网实际上也是一种图。该文提出一种配电系统拓扑分析的方法, 首先确定图的节点的形成, 就可以用邻接矩阵很方便地描述配电网。并且为了降低枚举数量, 采用这种方法及数据结构中的深度搜索方法对故障后果影响相同的设备进行了合并, 然后对于合并后的最小隔离块设定可靠性参数, 从而大大降低了常规可靠性计算方法中的设备数, 最后通过上海市某小区配电网的实际算例计算, 证明了该文介绍的配网拓扑分析方法适用于对复杂配电网供电可靠性进行定量评估。

关键词: 配电网; 拓扑分析; 可靠性评估; 隔离块

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2005)19-0041-04

0 引言

配电系统处于电力系统末端, 直接与用户相连接, 是电力系统中向用户供给电能和分配电能的重要环节。相对于发电及输电系统的可靠性研究, 配电环节的可靠性研究一直处于较弱的水平, 而复杂配网的可靠性评估更是一个薄弱环节。深入开展配电网供电可靠性的研究具有非常重要的意义。

传统的配电网可靠性评估方法是故障模式与后果分析法 (Failure - Mode - and - Effect Analysis), 这种方法原理简单、清晰, 模型准确, 但是, 它的计算量随元件数目的增长成指数增长, 当配电网的结构比较复杂、元件数目及操作方式增多时, 系统故障模式急剧增加, 计算将变得冗长繁琐。尽管配电系统可靠性评估的最小路径法、网络可靠性等值法等已经提出并具有相对的优越性, 但网络等值法会带来计算精度上的近似, 最小路很难进行负荷转移路径的搜寻。

常规的故障遍历法就是采用基于预想事故后果分析法的方法, 以每一台设备为对象, 分析各种可能故障事件及其后果, 然后根据得到的预想事故集进行配电网可靠性指标的计算。但是实际评估过程中需要模拟大量的枚举故障, 而每次模拟故障后又都需要进行相应的负荷转移分析, 因此, 非常需要有一种能够降低设备枚举数量从而快速而有效地进行故障后果分析的方法。

为此, 本文提出了一种配电网的拓扑方法, 并且为了降低枚举数量, 对一些相互间没有明显断开点 (实际上配电网电气设备间的断开点为柱上开关) 的设备进行合并, 这样可以大大降低设备数

量, 对于合并后的设备集合称为最小隔离块。因为块内设备的故障后果都是相同的, 所以用隔离块进行预想事故分析不会带来精度上的近似。

1 配电网拓扑分析方法

图和图算法在当今的计算机应用中颇为常见, 配电网实际上也是一种图。图由顶点和边组成, 每条边对应两个顶点, 如果图中的两个顶点 v_i 和 v_j 之间存在一条边, 则这两个顶点就是邻接的。因此, 只要确定了图中的顶点, 然后用邻接矩阵就可以很方便地描述配电网。若设邻接矩阵为 D , 则:

$$D_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{存在从顶点 } v_i \text{ 到 } v_j \text{ 的弧} \\ 0 & \text{不存在从顶点 } v_i \text{ 到 } v_j \text{ 的弧} \end{cases}$$

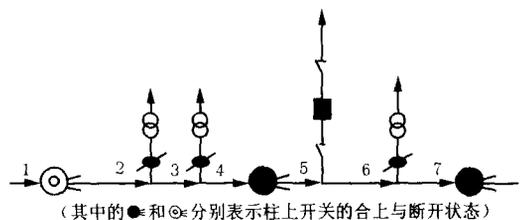


图 1 上海市某小区配电网的部分示意图

Fig 1 A part of distribution network of Shanghai certain area

在配电网的拓扑分析中, 最关键的问题就是保证节点的形成。节点形成的原则如下:

- 1) 跟开关功能类似的所有设备都称为一个开关节点, 包含断路器、联络开关、分段开关、熔断器等。
- 2) 变电站按母线的数目或分段的数目形成相应的电源节点。除此外, 开关站或类似的设备都形成电源节点。
- 3) 所有的配变、负荷母线都形成相应的用户节

点。

4) T节点和因同条线路不同型号形成的分节点(这两种节点称为结点)。

对于图 1 所示的配电网,按照节点形成的原则,可以等效成以顶点和边表示的图 2。

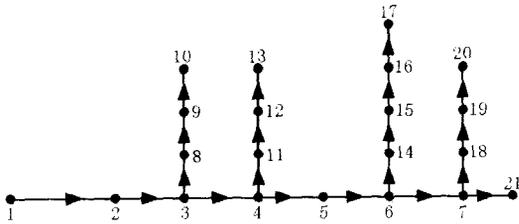


图 2 配网图及其节点编号

Fig 2 Certain distribution system and the serial number of its vertex

根据图 2,就可以用邻接矩阵来描述这个配电网:

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | ... |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | ... |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | ... |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | ... |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

此外,由于研究配电网的可靠性,主要关心各设备(包括断路器、隔离开关、熔断器、变压器等)及线路的故障情况以及其组合故障,因此,必须对各节点的性质予以标识。利用如下的节点性质矩阵 X 表示(1:断路器;2:隔离开关;3:熔断器;4:变压器;5:柱上开关;0:其他)。

$$X = [0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 3 \ 4 \ 0 \ 3 \ 4 \ 0 \ 2 \ 3 \ 2 \ 0 \ 3 \ 4 \ 0 \ 5]$$

但是,随着节点数的增多,邻接矩阵的维数会相应增加,带来许多不便之处。在一般的图论里,经常讨论的是给定结构的网络,并不关心各节点的状态。但是,对于配电网来说,柱上开关的状态标识着相邻设备是否电气相连,随着柱上开关分合状态的变化,配电网的结构也会发生根本的变化,因此,配电网实际上是一种变结构网络。

可以对配电网按照柱上开关的位置进行适当的合并,这样可以大大降低节点数量,对于合并后的设

备集合称为最小隔离块。本文就采用深度优先搜索 DFS (Depth_First Search)方法进行各种最小隔离区的划分。下面以图 1、2 所示的配电网为例来说明最小隔离区的确定方法。

以线路 3 为例,从线路 3 的两侧遍历至节点 2 和 5 为止,此时访问到的节点 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 组成一个最小隔离块。同理可以进行其余隔离块的划分。最后形成的简化接线图如图 3。

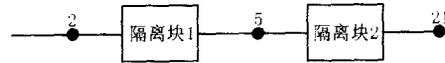


图 3 隔离后的接线图

Fig 3 Distribution network after separation

我们可以很明显的看到,采用这种配电网的拓扑分析方法以后,大大降低了配电网的规模,从而大大降低了进行配电网可靠性计算时故障的枚举,相对于传统的以单个设备为对象分析各种可能故障事件及其后果的可靠性算法,这种方法能够更加快速而有效地进行故障后果分析,提高了可靠性计算的速度。

2 配电网最小隔离块、柱上开关和配置熔丝用户变的参数设定

为了快速准确地进行预想事故的模拟,对配电网的可靠性评估思路为:首先对于配电网进行拓扑分析,接着进行最小隔离块的划分简化,然后以最小隔离块为对象,分别分析块内设备计划检修、块内设备突发故障、块外设备突发故障等三种情况对该隔离块的影响,最后通过形成的故障事故集进行配电网可靠性指标的计算。

对配电网进行了隔离块的划分后,接线图简化成只有隔离块和柱上开关,然后就可以进行对隔离块和柱上开关的参数设定。但在实际情况下,由于有的用户变配置了保险熔丝(如图 2 中的节点 8, 11 和 18),这种用户变突发故障不会导致整个隔离块的停电,所以要将其从最小隔离块中剔除,单独进行参数设定。

配置熔丝用户变的参数:计划检修的故障率_{计划}(次/年)、每次检修平均停电持续时间_{计划}(小时/次)、突发故障的故障率_{故障}(次/年)、每次故障平均停电持续时间_{故障}(小时/次)。而上述的参数取决于参数收集,由用户在参数对话框中输入。

隔离块的可靠性参数:块内设备计划检修导致隔离块的故障率 $F_{计划}$ (次/年)、每次检修平均停电

持续时间 $T_{\text{计划}}$ (小时/次);块内设备突发故障导致隔离块的故障率 $F_{\text{故障}}$ (次/年)、每次故障平均停电持续时间 $T_{\text{故障}}$ (小时/次);块外设备突发故障导致隔离块的故障率 $F_{\text{故障}}$ (次/年)、每次故障平均停电持续时间 $T_{\text{故障}}$ (小时/次)。上述参数的计算方法如下:

设定 N 为隔离块内的设备数, M 为发生突发故障影响该隔离块的其他隔离块的数目。

$$F_{\text{计划}} = \sum_{i=1}^N \text{计划}_i \quad T_{\text{计划}} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{计划}_i \cdot \text{计划}_i}{\sum_{i=1}^N \text{计划}_i} \quad (1)$$

$$F_{\text{故障}} = \sum_{i=1}^N \text{故障}_i \quad T_{\text{故障}} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{故障}_i \cdot \text{故障}_i}{\sum_{i=1}^N \text{故障}_i} \quad (2)$$

$$F_{\text{故障}} = \sum_{i=1}^M F_{\text{故障}_i} \quad T_{\text{故障}} = \frac{\sum_{i=1}^M F_{\text{故障}_i} \cdot T_{\text{切换}_i}}{\sum_{i=1}^M F_{\text{故障}_i}} \quad (3)$$

因为对于该隔离块有影响的其他隔离块发生突发故障后,该隔离块可以通过操作柱上开关先行恢复送电,不需等到发生突发故障的隔离块故障修复。所以式(3)中的 $T_{\text{切换}}$ 即为操作柱上开关先行恢复需要的时间。如果考虑电网投入配电自动化设备及其可靠动作概率(设定配电自动化设备可靠动作概率为 P_r ,动作时间为 $T_{\text{自动}}$),则式(3)中的 $T_{\text{故障}}$ 可以改写为:

$$T_{\text{故障}} = \frac{\sum_{i=1}^M F_{\text{故障}_i} T_{\text{切换}_i} (1 - P_r) + F_{\text{故障}_i} T_{\text{自动}_i} P_r}{\sum_{i=1}^M F_{\text{故障}_i}} \quad (4)$$

3 配电网可靠性指标的计算

本文计算的可靠性指标包括系统平均停电频率指标 $SAIFI$ 、系统平均停电持续时间指标 $SADT$ 、用户平均停电持续时间指标 $CADI$ 、平均供电可靠率指标 $ASAI$ 、系统总的电量不足指标 ENS 、平均电量不足指标 $AENS$ 。

3.1 算例分析

应用上述的配电网拓扑分析方法对上海市某小区的 10 kV 配电网(如图 4 所示)进行可靠性分析计算。该小区拥有 2 条电源进线(馈线 F1 带有 11 个负荷点,馈线 F2 带有 7 个负荷点),18 台 10 kV/0.4 kV 用户变压器,3 台柱上开关。电网分析计算中所需要的电气设备参数均为该电网近 3 年的实际统计数据。

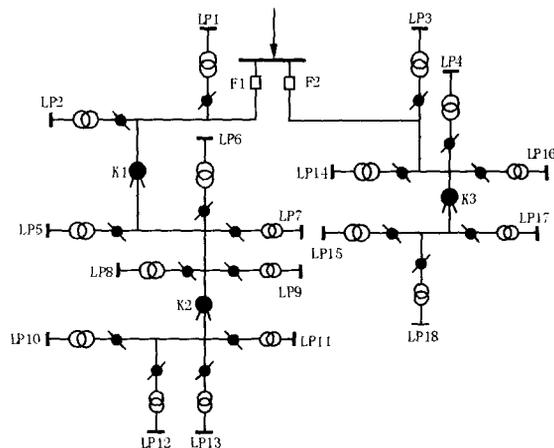


图 4 上海某小区的实际配电网图

Fig 4 Actual distribution network of a certain area of Shanghai

上述配电网的可靠性指标的计算列于表 1。

- 1)按图 4 所示进行可靠性计算;
- 2)柱上开关 K2 由关闭转为分开状态;
- 3)柱上开关 K1 由关闭转为分开状态。

表 1 配电网供电可靠性指标计算结果

Tab 1 Results of distribution reliability evaluation

| 计算情况 | $SAIFI/$ 次·(户·年) ⁻¹ | $SADT/$ 小时·(户·年) ⁻¹ | $CADI/$ 小时·(停电户·年) ⁻¹ | $ASAI/$ (%) | $ENS/$ MWh·年 ⁻¹ | $AENS/$ MWh·(年·户) ⁻¹ |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| (1) | 1.478 200 | 6.541 378 | 4.425 233 | 99.925 327 | 76.534 122 | 4.251 896 |
| (2) | 1.476 080 | 6.381 378 | 4.323 193 | 99.927 153 | 74.662 122 | 4.147 896 |
| (3) | 1.437 920 | 3.501 378 | 2.435 030 | 99.960 030 | 40.966 120 | 2.275 896 |

从表 1 我们可以看出,随着柱上开关状态的改变,系统的可靠性也发生相应的改变。情况 1)时,系统供电可靠率最低;当柱上开关 K2 打开时,系统电源进线仍然为两条,但是负荷却减少了,从而系统的可靠率升高,系统平均停电时间等指标相应减小;

情况 3)时,柱上开关 K1 打开时,系统所要供给的负荷进一步减少,可靠性进一步提高。从表 1 的比较可以看出,这种配电系统可靠性计算方法的合理性。

从计算时间上来看,传统的故障遍历算法与以上的配电网可靠性计算方法对比,列于表 2。

表 2 两种方法的计算时间比较

Tab 2 Comparison of computing time of the two methods

| 方法 | 传统方法 | 本文方法 |
|----------|---------|---------|
| 计算时间 /ms | 0.015 4 | 0.013 2 |

可以看出,本文方法所占用的 CPU 时间比传统的故障遍历算法缩短了,由于所计算的系统规模不大,所以,可以预见:对于大规模、结构复杂的配电网,应用本文方法进行评估将更有效地提高计算效率,节约计算时间。

4 结论

1) 本文介绍了一种配电网的拓扑分析方法,其中最关键的是节点的形成:把跟开关功能类似的所有设备都称为一个开关节点,包含断路器、联络开关、分段开关、熔断器等;变电站按母线的数目或分段的数目形成相应的电源节点。除此外,开关站或类似的设备都形成电源节点;所有的配变、负荷母线都形成相应的用户节点;T节点和因同条线路不同型号形成的分节点。

2) 对故障后果影响相同的设备利用深度优先搜索的方法进行了合并,形成最小隔离块。实际情况下,以柱上开关为块与块之间的分割点。

3) 利用上述的配网拓扑分析方法,可以进行配网可靠性的计算,并通过实际算例证明了这种拓扑分析方法用于计算配网可靠性的可行性和合理性。

4) 和传统的故障遍历算法相比较,可以看出,利用本文的配电网拓扑分析方法,还可以提高计算效率。

参考文献:

- [1] Goel L, OU Yan Radial Distribution System Reliability Worth Evaluation Utilizing the Monte Carlo Simulation Technique[J]. Computers and Electrical Engineering, 2001, 27(3): 273-285.
- [2] Billinton R, Wang P. Reliability Network Equivalent Approach to Distribution System Reliability Evaluation[J]. Proc IEE Gener, Transm and Distrib, 1998, 145(2): 149-153.
- [3] 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,2000,24(8):9-13.
BEI Chao-hong, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Reliability Evaluation of Complicated Distribution Systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 24(8): 9-13.
- [4] 李卫星,李志民,刘迎春.复杂辐射状配电系统的可靠性评估[J].中国电机工程学报,2003,23(3):69-73,79.
LI Wei-xing, LI Zhi-min, LIU Ying-chun. Evaluation of Complex Radial Distribution System Reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 69-73, 79.
- [5] Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power Systems[M]. New York: Plenum Press, 1996.
- [6] 严蔚敏,吴伟民.数据结构(C语言版)[M].北京:清华大学出版社,1997.
YAN Weimin, WU Weimin. Data Structure (C Language) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [7] 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 and Application of Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [8] 郑勇,周步祥,贺琦.基于GIS的配电网拓扑分析方法[J].继电器,2004,32(14):25-28.
ZHENG Yong, ZHOU Bu-xiang, HE Qi. Topology Analyzing Method and Application for Distribution Network Based on GIS[J]. Relay, 2004, 32(14): 25-28.
- [9] 周羽生,周有庆,戴正志.基于FTU的配电网故障区段判断算法[J].电力自动化设备,2000,20(4):25-27.
ZHOU Yu-sheng, ZHOU You-qing, DAI Zheng-zhi. Algorithm for Fault Selection Judgement in Power Distribution [J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 25-27.

收稿日期: 2005-01-19; 修回日期: 2005-02-28

作者简介:

徐珍霞(1980-),女,硕士研究生,研究方向主要为电力系统优化规划;E-mail: xu_zhenxia@sjtu.edu.cn

顾洁(1971-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事电力系统规划、电力系统负荷预测和电力市场等领域的科研和教学工作。

A topology analyzing method for distribution network and its application in distribution system reliability evaluation

XU Zhen-xia, GU Jie

(Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

(下转第 55 页 continued on page 55)

- 馆, 2003.
TAO Fei, WANG Xian-li Tutorial of Future Economics [M]. Beijing: Commercial Press, 2003.
- [3] 郁洪良. 金融期权与实物期权——比较和应用 [M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2003.
YU Hong-liang Comparison and Application: Financial Option and Real Option [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2003.
- [4] 黎灿兵, 康重庆, 夏清, 等. 发电权交易及其机理分析 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 13-18.
LI Can-bing, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al Generation Rights Trade and Its Mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 13-18.
- [5] 黄永皓, 江健健, 孟远景, 等. 电能平衡与辅助服务的辅助手段——期权 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 11-15.
HUANG Yong-hao, JIANG Jian-jian, MENG Yuan-jing, et al Options: a Complementary Mechanism for Energy Balance and Ancillary Service [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 11-15.
- [6] 张少华, 李渝曾, 王长军, 等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 28-32.
ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng, WANG Chang-jun, et al Combining Option Theory with Modeling for Bilateral Optional Electricity Forward Contracts [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 28-32.
- [7] 郭金, 谭忠富. 金融输电权和输电期权在输电阻塞管理中应用 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 61-64.
GUO Jin, TAN Zhong-fu Application of FTR and TO in Transmission Congestion Management [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2004, 24(6): 61-64.
- [8] 祁达才, 夏清, 卢强, 等. 电能交易与输电权统一的拍卖模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 11-15.
QI Da-cai, XIA Qing, LU Qiang, et al Auction Models of Electricity Trade Considering Transmission Rights [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 11-15.

收稿日期: 2005-02-02; 修回日期: 2005-04-27

作者简介:

罗朝春 (1972 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场与调度自动化; Email: lclcc8787@sina.com

吴军 (1977 -), 男, 博士研究生, 主要从事电力市场与电力系统稳定控制研究;

涂光瑜 (1941 -), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统运行与控制研究。

Analysis and application on option trade mode of electricity market

LUO Chao-chun, WU Jun, TU Guang-yu, LUO Yi

(College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Under the environment of electricity market, the over fluctuation of electricity price could threaten the market stability and system security, so it takes on more value of the designing and application of multi-trade modes based on option theory. The precondition and principal part of option and option trade in electricity market is expatiated in this paper, the classification and relationship among those option trades are declaimed, the applications of option tools in electricity market is also enumerated. How the option tools of generation right and purchase right decrease loss and increase income for power plants and electricity consumers are analyzed, which shows great means and important effects of option tools for electricity market.

Key words: electricity market; electricity option; option trade

(上接第 44 页 continued from page 44)

Abstract: Distribution system is also a kind of graph. In this paper, a topology analyzing method for distribution network is presented that is describing of distribution network in the form of adjacency matrix after forming vertex. And in order to reduce the amount of enumerating, by this means and the depth-first search in data structure, the equipment whose effect caused by default are same are incorporated, then initializing the reliability parameter of the separate unit. This algorithm mostly reduces the amount of the equipment of usual reliability evaluation. In the end, an actual example of Shanghai verifies that the algorithm is applicable to evaluate the complex radial distribution system.

Key words: distribution system; topology analyzing method; reliability evaluation; separate unit