

文章编号: 1005-6548(2006)02-0149-05

基于最小割集法的配电网可靠性评估算法*

相晓鹏¹, 邵玉槐²

(1. 运城供电分公司, 山西 运城 044000; 2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

Reliability Evaluation of Distribution Systems Based on the Minimum Cut Sets Method

XIANG Xiao-peng¹, SHAO Yu-huai²

(1. Yuncheng Power Supply Sub-Company, Yuncheng 044000, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

摘要: 提出了1种基于最小割集的配电网可靠性评估实用的算法,并编制了相应的应用程序。该算法考虑了系统运行的实际情况,列举引起负荷点停电事件割集,还考虑了负荷点供电的转移特性,网络元件的计划检修和主动性故障,可使评估过程更加合理和有效。

关键词: 配电网;可靠性评估;最小割集

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A

Abstract: The paper proposes a method for reliability evaluation of distribution systems which takes many real factors into consideration and then programs relevant software. The practical situations of system operations are considered in this paper. Based on the enumeration of the cut sets for the load point interruption, load transition character, maintenance of devices, active failure mode and overload of transmission line are all discussed. The evaluation is more realistic and effective.

Key Words: distribution systems; reliability evaluation; the minimum cut sets

电力用户有着直接的关系。所以在配电网规划与运行管理中要重点考虑保证供电可靠性。

配电网可靠性的研究始于20世纪60年代,在工业发达国家,可靠性评估已成为配电网规划决策中的1项常规性工作。随着我国国民经济的飞速发展,城市用电负荷迅速增长,供需矛盾日益突出,迫切需要对配电网进行科学、合理的规划。在近十年来供电企业创一流的活动,已将配电网可靠性指标列入其技改指标中,并取得了良好的效果。

1 可靠性指标求取方法

主要有统计模拟算法和解析法2大类^[1,2]。统计模拟算法比较直观,便于处理负荷的随机变化特性。但它具有明显的统计性质,且计算时间和计算精度紧密相关,为了获得较高的可靠性指标,往往需要很长的计算时间。解析法的物理概念清晰,模型精度高。但其计算量随系统规模的增大而急剧增大,故只能考虑有限的负荷水平,不宜处理相关事件。

网络法是解析法中最为流行的方法,主要因其简单,且网络模型与配电网的拓扑结构有着自然的相似。传统的配电网可靠性评估方法是故障模式与后果分析法(FMEA),它通过对系统中各元件状态的搜索,列出全部可能的系统状态,然后根据所规定的可靠性判断对系统的所有状态进行检验分

安全可靠的电网是维持国民经济发展和人民生活水平的重要保障。配电网是电力系统中联系电源与用户的1个重要环节,其供电可靠性水平与

* 收稿日期: 2005-12-02 修回日期: 2006-04-17

作者简介: 相晓鹏(1973-),男,山西临猗人,工程师,电力系统及其自动化;
邵玉槐(1951-),女,山西太原人,教授,电气与动力工程。

析,找出故障模式集合,最后在此状态集合的基础上,求得系统的可靠性指标。改进的配电网可靠性评估方法的解析法有递归算法、最小路法、等值法、最小割集法。本文介绍的最小割集法,采用网络基本最小路求取网络最小割集。

2 最小割集的求取

2.1 配电网的连集等效模型

连集是一些元件的集合,当这些元件都工作时,系统才正常工作。保证系统正常运行的元件集合的最小子集合,称为最小连集。在配电网中,最小路被定义为:如果在通道中没有 2 次以上经过同一结点或交叉点,那么,这个两节点之间的通路是最小的。复杂系统的最小连集的判别方法有联络矩阵法,布饵行列法等,但这些方法都不适合程序化。本文利用图论的方法^[3],采用了 1 种适于计算机判别网络全部最小连集的广度优先搜索算法。

用最小连集理论确定系统的可靠性网络模型时,各连集间是并联关系,连集内元件以串联形式联接。图 1 网络模型的最小连集为(A、C)、(B、D)、(A、E、D)、(B、E、C)。

2.2 配电网的割集等效模型

配电系统的故障模式直接与系统的最小割集相关联。最小割集是一些元件的集合,当它们失效时,必然会导致系统失效。最小割集法是将计算的状态限制在最小割集内,而不须计算系统的全部状态,从而大大节省了计算量。每个割集中的元件存在并联关系,近似认为系统的失效度可以简化为各个最小割集不可靠度地总和。用最小割集理论确定与复杂网络等效的可靠性模型。以图 1 为例,可得到该网络模型的最小割集为(A、B)、(C、D)、(A、D、E)、(B、C、E)。

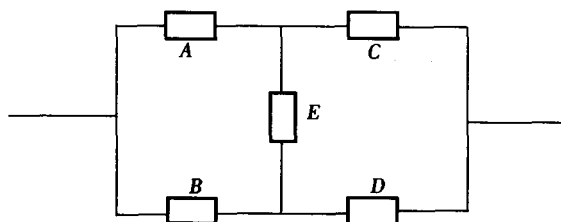


图 1 网络模型图

2.3 复杂网络的等效转换

复杂的系统的最小割集用直观识别非常困难。为便于计算程序的实现,本文采用由最小路求取最小割集的方法。以图 1 为例,首先,搜索从负荷点

到电源点之间的所有最小路,通过最小路中节点信息倒出元件信息,并建立连集矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 10100 \\ 01101 \\ 01010 \\ 10011 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其序列号为网络的支路序号,其行数为网络的最小连集数。每一行为 1 个最小连集,“1”表示该序列号的支路在此连集中,“0”表示该序列号的支路不在此连集中。然后,由连集矩阵倒出最小割集。对连集矩阵中任意 2 个列向量,如果进行逻辑加运算,得到的是单位列向量,则这 2 列所对应的 2 个支路上的元件组成了该系统网络的二阶割集。当这 2 个支路上的元件故障时,即系统发生故障。同理可得到系统的多阶割集,但要注意,在生成某一阶割集时,必须实时检查是否包含低一阶的割集,若包含,应及时删除,不参与以后的计算,这样可以避免生成大量的中间数据。根据网络的最小连集矩阵,可得到网络的最小割集矩阵

$$C = \begin{bmatrix} 11000 \\ 00110 \\ 10011 \\ 01101 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据以上的步骤得到的最小割集的阶数达到网络的元件数。但由于在配电系统中,低阶割集支配了系统的可靠性指标,故本文在求最小割集时只求到二阶^[4]。根据最小割集的定义,显然若系统失效,每个割集中的所有元件必须失效。所以,每个割集中的元件存在并联关系,割集中元件的失效概率可以用并联系统的原理进行“合并”。另外,任意割集失效时,系统就会发生故障,所以割集与割集之间存在串联关系。

虽然系统的最小割集是串联形式连接的,但因为 1 个元件可以在多个割集中出现,割集之间并不相互独立,精确计算非常费时和烦琐。为了克服这一困难,可以利用下面近似方法求解,将会大大提高计算速度。对于元件高可靠度的系统,带来的误差可忽略不计或在允许范围之内。

第一种近似认为系统的失效度 Q_s 可以简化成各个最小割集不可靠度的总和,即

$$Q_s = \sum_{i=1}^N P(c_i)。$$

尽管割集事件间并不相互独立,但仍可近似认

为串联原理公式可以适用于割集的合并。

第二种近似是忽略阶数超过某一定值的割集(割集的阶等于割集中的元件数)。这种近似认为高阶割集发生的概率远小于低阶割集,当然这种近似的条件是元件的可靠度较高且比较平均(一般电力系统可以达到要求)。于是,在实际应用中,可只计及一阶和二阶故障割集,而忽略三阶以上的。

基于这2个近似,计算配电系统负荷的可靠性时,可应用以下串、并系统公式进行割级合并。

$$\begin{aligned} \text{并系统} & \begin{cases} \lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2), \\ r_s = r_1 r_2 / (r_1 + r_2), \\ U_s = \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2; \end{cases} \\ \text{串系统} & \begin{cases} \lambda_s = \lambda_1 \lambda_2, \\ r_s = (\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2) / (\lambda_1 + \lambda_2), \\ U_s = \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2. \end{cases} \end{aligned}$$

2.4 计入计划检修

计划检修有利于降低元件故障率,提高元件的平均无故障时间 MTBF。但检修时元件处于不可用状态,必然会对系统供电可靠性造成影响。

在电力系统中,一般不会安排2个并联关系的元件同时进行检修,但常会将2、3个串联的元件同时停运(如某1回线进行停电检修时,会将出线断路器、负荷开关等一并检修),此时检修时间应是每个元件检修时间的总和。另外,当某1元件发生强迫停运(故障)时,检修工作应是对故障元件进行修复,而原准备计划检修的元件将会推迟进行。

因此,对二阶停运割集中2个元件,认为可考虑的停运状态重叠就只有:①1元件计划检修(M)与另1元件的强迫停运(F);②1元件的强迫停运(F)与另1元件的强迫停运(F)。对状态②的可靠性指标可根据“网络简化”计算得到。对状态①可利用类似的简化方法得到。即参照式(3)进行计算:

$$\begin{cases} \lambda_{pm} = \lambda''_1 \lambda_2 r''_1 + \lambda''_2 \lambda_1 r''_2, \\ U_{pm} = (\lambda''_1 \lambda_2 r''_1 r''_1 r_2) / (r''_1 + r_2) + \\ \quad (\lambda''_2 \lambda_1 r''_2 r_1 r''_2) / (r_1 + r''_2), \\ r_{pm} = U_{pm} / \lambda_{pm}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ_{pm} 为强迫停运与计划检修相重叠时负荷点的停运率; U_{pm} 为强迫停运与计划检修相重叠时负荷点的年停运时间; r_{pm} 为强迫停运与计划检修相重叠时负荷点的停运持续时间; λ''_1 为元件 i 的检

修停运率; r''_1 为元件 i 的检修停运时间; λ_1 为元件 i 的故障停运率; r_1 为元件 i 的故障停运时间。

对于三阶以上的重叠停运状态不予考虑。

2.5 停电的恢复与备用路径

由于电力系统负荷一旦失去供电将遭受损失,电力部门给它们供电时提供多电源和多个供电路径。为避免电磁环网,正常运行时又是单电源、单回路或辐射式的。这样,对于电力负荷就存在正常供电电源和备用电源、正常供电路径和负荷转移路径。电力系统中任意线路、母线或断路器等设备发生故障时,运行人员通过断路器、隔离开关的切换操作,隔离故障元件,将停运负荷转移到其它非故障区域或限制在最小范围内。

基于以上思想,本文在进行配电系统可靠性评估时,将负荷点的供电路径归纳为故障路径(路径中割集事件的发生造成该负荷点的停电)和备用路径(路径中割集事件的发生造成该负荷点的转移路径切断)。当电力网络中存在允许切换的条件,故障发生后,负荷点的指标取决于下面的操作过程。

2.5.1 故障割集不能隔离

如果故障割集事件发生且与备用割集为同1元件或元件集合,则负荷点的故障路径和备用路径全部断开,负荷点在这些元件得到修复或更换前仍处于断电状态。停电指标为:

$$\begin{cases} \lambda = \text{割集的计算故障率}, \\ r = \text{割集的修复(或更换时间)}, \\ U = \lambda \times r. \end{cases} \quad (4)$$

2.5.2 故障割集可以隔离

在实际运行中,该负荷点的故障割集不包含在备用割集里,负荷点经过切换后,就可以恢复供电状态。停电指标为:

$$\begin{cases} \lambda = \text{割集的计算故障率}, \\ r = \text{割集元件发生故障到负荷被切换到} \\ \quad \text{备用路径的时间}, \\ U = \lambda \times r. \end{cases} \quad (5)$$

可见,备用路径的效果是影响负荷点故障发生后的恢复时间。这个时间不仅仅是各元件的合闸“瞬间”时间,还包括判断故障、确定供电方案和操作准备时间。根据经验,大约为1h。一般来讲,负荷转移的时间远小于故障元件的修复时间。这样负荷点的停电时间大为缩短,提高了供电可靠性。

3 软件设计总体规划

3.1 软件运行平台

程序采用面向对象的可视化编程工具 Visual C++ 6.0 进行编制,以便处理较复杂的数据结构;借助于面向对象的优点规范代码,产生兼容性较强,速度较快的可执行文件;充分利用可视化的优点,设计出了人机对话较友好的程序输入输出界面。使程序不但具备了 1 套完整的算法,同时具有了较大的通用性和实用性。为了对结果的保存和减少用户信息的输入量,软件使用 Microsoft Access 建立了数据库,包括参数录入表,计算结果存储表以及系统指标表。并注册为 ODBC 数据源,借助于 ODBC 开放式访问机制进行控制。

3.2 面向对象的软件分析与设计

本软件开发过程中把软件设计分为:①设计问题域部分。②设计人机交换部分。③设计任务管理部分。④设计数据管理部分。

在软件设计初期进行了完善的规划,大大加快了开发的过程和开发效率,并达到了预定的要求。

3.3 可靠性评估流程

所设计的程序流程见图 2。用最小割集法进行可靠性评估所用到的基本数据有:①元件的故障率(λ);②元件平均修复时间(r);③元件年停运时间(U);④元件的主动故障率;⑤元件的拒动率。

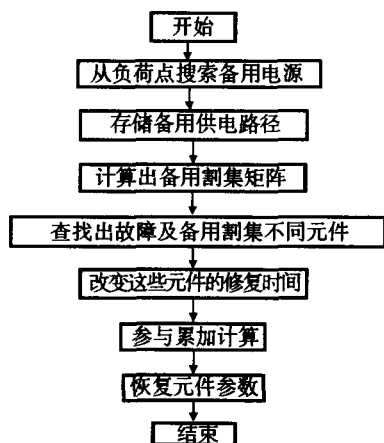


图 2 配电网可靠性评估的原理流程图

3.4 用 IEEE 的 RBTS—母线测试系统验证

本文用文献[7]测试系统(RBTS)-4 提供的母线系统来验证所提出的算法。通过计算可知各负荷点的故障事件主要由 2 部分组成,第一部分为各馈线与分支线(变压器)的故障时间;第二部分为变电站的一、二阶停运事件。出于考虑到了“T”接关系,从结果可以看出每一条馈线所带负荷点指标几乎相等。同时,显然有配电变压器的分支负荷点的

故障停运时间又比没有变压器的分支负荷点长得多。为了便于进行对比分析,现将 6 种情况下的系统指标列出如表 1 所示。

表 1 不同情况下系统指标统计表

| 接线方式 | SAIFI/次·(户×年) ⁻¹ | SAIDI/h·(户×年) ⁻¹ | CAIDI/h·(户×年) ⁻¹ | ASAI |
|------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 1 | 0.305 5 | 3.470 3 | 11.358 0 | 0.999 639 |
| 2 | 0.305 5 | 4.446 3 | 14.552 8 | 0.999 462 |
| 3 | 0.305 5 | 2.625 9 | 2.048 7 | 0.999 928 |
| 4 | 0.689 2 | 3.854 0 | 5.591 5 | 0.999 560 |
| 5 | 0.689 2 | 24.711 3 | 35.851 8 | 0.997 179 |
| 6 | 0.688 1 | 10.880 4 | 15.811 6 | 0.9987 58 |
| 接线方式 | AENS/kWh·(户×年) ⁻¹ | ENS/kWh·a ⁻¹ | ASUI | |
| 1 | 11.524 1 | 52 538.63 | 0.000 3961 | |
| 2 | 15.610 0 | 72 310.29 | 0.000 5076 | |
| 3 | 250 357 | 12 538.88 | 0.000 0715 | |
| 4 | 11.290 6 | 58 840.98 | 0.000 4399 | |
| 5 | 79.362 0 | 361 811 | 0.002 8209 | |
| 6 | 0.041 5 | 198.409 8 | 0.001 242 | |

表 1 中接线方式为:①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;②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;③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;④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;⑤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;⑥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。

验证的结果表明,本系统用于对配电网可靠性进行评估,可得到以下可靠性指标:各负荷点及系统的平均停运率、平均停运持续时间、年平均停运时间;系统供电可靠性指标 ASAI;系统平均断电频率 SAIFI、平均断电持续时间 SAIDI;用户平均断电持续时间 CAIDI;供电不可靠率 ASUI;系统的电量不足期望值 ENS、平均电量不足 AENS。

系统可根据各元件对可靠性指标的贡献和影响,指出网络的最薄弱环节,为采取相应的增强措施提供有益的参考。同时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,计划检修、备用电源的影响等。

3.5 影响可靠性的要素分析

由以上的系统指标计算可看出,在配电网中,系统的各种情况和因素对系统的可靠性影响是不一样的,可靠性研究所考虑的形式和深度对评估结果也是有差异的。对系统可靠性的影响主要有以下几方面:①设备可靠性。②主动性故障。③故障阶数。④负荷转移特性。⑤网络拓扑。其中网络拓扑是影响系统可靠性的重要因素。

从表 1 中可看出,与方式 2 相比,方式 3 的分支线装有熔断器,减少了保护区内的故障对保护区外负荷点的影响,使系统的可靠性指标有显著提高。方式 6 主馈线有隔离开关,使电源点与隔离开关的负荷恢复供电时间仅为开关操作时间,因此,系统每次停电持续时间 CAIDI 大为减少,提高了供电可靠性;方式 4 不仅主馈线有隔离开关,且增加了备用电源,可将隔离开关前故障隔离,投入备用电源可使隔离开关后线路恢复供电,提高了线路后段的可靠性。以上分析表明:增加隔离开关,可以增加隔离开关前负荷点的可靠性;增加熔断器可以减少保护区内的故障对保护区外负荷点的影响;增加备用电源可以提高线路后段的可靠性。因此改善网络结构,可提高系统可靠性。

4 结束语

电力系统的可靠性是电力系统规划和运行的重要内容,是当今电力学术界的研究热点,各种研究方法和成果层出不穷,考虑的网络因素也各有特色。笔者认为大多数的区别在于如何模拟和划分故障模式上。本文在前人研究成果的基础上采用了适用于配电和子输电系统的 1 种新方法,编制了计算程序。利用 IEEE 的 RBTS4 系统验证了其有

效性。得到了如下结论:

a. 采用的方法将影响负荷点供电的路径归纳为正常运行供电路径和备用电源路径,得到的可靠性主要指标同时考虑了配电系统的分支保护、隔离开关、断路器、计划检修、备用电源的影响。

b. 应用该方法可对任何市区配电网进行可靠性评估。通过对故障影响范围搜索,能找到系统的薄弱环节,为采取增强措施提供参考。考虑到了负荷的恢复过程,及网络的约束条件,使评估结果更加全面和符合系统运行的实际情况。

参考文献:

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用(上)[M]. 北京:清华大学出版社,1986:52-61.
- [2] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用(下)[M]. 北京:清华大学出版社,1986:91-103.
- [3] 陈树柏. 网络图论及应用[M]. 北京:科学技术出版社,1982:48-53.
- [4] 王锡凡,王秀丽,别朝红. 电力市场条件下电力系统可靠性问题[J]. 电力系统自动化,2000,4:42-44.
- [5] R. Billinton, M. S. Grover. Quantitive Evaluation of Permanent and Distribution Systems. IEEE Trans. on Power Appratus and Systems, 1975,94(5):733-741.
- [6] R. Billinton, M. S. Grover. Reliability Assessment of Transmission and Distribution Schems. IEEE Trans. on Power Appratus and Systems, 1975,94(5):724-732.
- [7] R. N. Allan, R. Billinton, etc. A Reliability Test System For educational propose-Data and Results. IEEE Transaction on Power System, 1991,6(2):813-820.
- [8] 谢开贵,周平,周家启. 基于故障扩散地复杂中压配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统自动化,2001,25(4):45-48.

[责任编辑:王 琨]

(上接第 148 页) K_i 、 K_i^* 较大时积分作用太弱,以至不能减小稳态误差, K_p^* 较小时起动电流较大。

经调试,取 $K_p = 96$ 、 $K_i = 25$ 、 $K_p^* = 90$ 、 $K_i^* = 15$ 时,系统有良好的动静态特性。

4 结束语

从以上仿真过程可见,采用 Matlab 环境下的 Simulink 电力仿真工具,可以快速地完成 1 个电动机控制系统的建模、仿真。且仿真直观、方便、灵活、可信度高。对于开发和研究交流传动系统有着十分重要的意义,为系统从设计到实现提供了 1 条捷径。

参考文献:

- [1] 王宏宇,胡丹,车畅. 异步电动机矢量控制系统 Simulink 仿真[J]. 四川工业学院学报,2004,23(3):66-68.
- [2] 吴晓帆,罗平. 基于 MATLAB 环境下交流电动机矢量控制变频调速系统的仿真[J]. 电工技术杂志,2002(8):17-19.
- [3] 周渊深. 交流调速系统与 MATLAB 仿真[M]. 北京:中国电力出版社,2003:226-227.
- [4] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003:198-208.

[责任编辑:王 琨]