

DOI: 10.7667/PSPC160276

大型城市高压配电网可靠性分析

潘 翀¹, 袁 霞², 唐 伦³

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 结合高压配电网间隔资源优化、网架结构优化等的目标, 完成大型城市高压配电网的可靠性分析。应用 PSASP 与 Matlab, 实现 PSASP 数据库的间接访问, 提高数据接口的读写速度。通过深度优先搜索分析, 构建复杂配电网遍历搜索路径表, 实现对复杂配电网网架结构描述以及能够灵活应用在可靠性分析及网架结构优化中。根据深度遍历搜索路径表, 基于最小割集方法, 实现复杂高压配电网的可靠性分析。最后, 通过对 29 节点算例以及四川某实际复杂高压配电网的分析, 验证上述程序的正确性和有效性。

关键词: 复杂高压配电网; 最小割集法; 深度优先搜索; 可靠性; PSASP

Reliability analysis for high voltage distribution network in big cities

PAN Chong¹, YUAN Xia², TANG Lun³

(1. Chengdu Power Supply Company, State Grid Sichuan Power Supply Company, Chengdu 610041, China;
2. Tianfu Power Supply Company, State Grid Sichuan Power Supply Company, Chengdu 610041, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: The reliability analysis of large urban complex high-voltage distribution network is completed, which combines with the optimization goal of the interval resource optimization and network structure optimization for high voltage distribution network. Using PSASP and Matlab, it can access the PSASP database indirectly and improve the accessing speed of data interface. According to the depth first search, a complex distribution traversal search path table is constructed, which realizes the description of the architecture of complex distribution power grid and can be used in reliability analysis and grid architecture optimization flexibly. According to depth search path table and based on minimal cut-set method, the reliability analysis of complex high-voltage distribution network is achieved. Finally, the 29 node example and the actual complex high-voltage distribution network in Sichuan province are used to verify the correctness and effectiveness of the above program.

Key words: complex distribution network; minimal cut-set method; depth first search; reliability; PSASP

0 引言

供电可靠性目标是高压配电网间隔资源优化的最主要优化目标之一, 也是网架结构优化、检修重构的优化目标之一。在配电网各项应用中具有必不可少的作用, 为实现供电可靠性在复杂配电网中的灵活应用, 并与现有软件结合, 能方便灵活地使用在其他优化目标中。随着国家第三个五年计划的开展, 配电网的可靠性要求也越来越高, 而大部分配电网可靠性分析计算是基于 10 kV 中压配网, 而高压配电网是配电网中的重要组成部分, 对大型城市

复杂高压配电网的分析也是非常有必要的。

配电网可靠性分析方法主要分为模拟法和解析法^[1]。文献[2]根据不同时间尺度和气象灾害条件介绍了一种新型元件故障模型用于对电网可靠性评估。文献[3]利用回路可靠性评估作为输入参数来分析系统中的薄弱点。文献[4]介绍了一种基于进化规划算法的配电网运行方式定制方法, 将经济性作为目标, 可靠性等作为约束条件, 提高配电网运行管理的约束性。

本文根据实际高压配电网弱环网的特点, 结合 PSASP 与 Matlab, 对高压配电网进行深度优先搜索

分析。基于最小割集的方法，实现对复杂高压配电网的可靠性分析。最后，利用某大型城市高压配网的实际数据，验证算法程序的正确性和有效性。

1 复杂配电网拓扑结构分析

1.1 复杂配电网路径搜索的必要性

在大型城市配电网中，网架结构的描述对于网架结构优化、间隔资源优化、检修重构网络、可靠性计算等都具有非常重要的意义。获取配电网的路径搜索表，可以直观地用于求取负荷点的最小割集，且是可靠性评估的关键步骤。对于大规模网络而言，通常难以直观地识别其最小割集，因此需要利用一种适合计算机运算的方法来求取最小割集。采用基于遍历路径表的最小割集求取方法，可避免重复搜索过程，提高可靠性评估的效率。

1.2 PSASP 与 Matlab 的数据交互

通过间接访问 PSASP 的数据库，获取大型城市复杂配电网的网架结构数据。PASAP 的数据库间接访问是指根据 PSASP 的运行特点，使 Matlab 与算例文件夹中 Temp 子文件夹中的文件进行交互，从而间接获取了 PSASP 计算数据库中的信息^[5]。Temp 子文件夹中的文件是 PSASP 在计算过程中生成的与本次计算相关的临时文件，这些文件与计算数据库和结果数据库中的数据相对应，只是文件格式不同。LF.L?和 LF.LP?文件均可以用 txt 的格式打开，在 Matlab 中可以直接使用内部函数 load 和 save 完成文件的读写，避免了 Matlab 直接对数据库的繁琐操作，大大提高了数据接口的读写速度。

1.3 构建配电网遍历搜索路径表

根据复杂高压配电网弱环网的特点，采用深度优先遍历算法，完成所有高压配电站(负荷节点)由输电网降压站(电源节点)供电的路径搜索。并结合电网运行的实际情况，提出如下两条搜索禁忌规则^[6]：

- 1) 定义路径由负荷节点为起点、电源节点为终点，路径中间(除起点和终点外)不含电源节点；
- 2) 搜索路径的长度由用户设定，超过设定长度的路径不予采用。

生成遍历搜索表的流程图见图 1。

读取电网基础数据，需要对节点进行编号，生成电网邻接矩阵，为计算方便，节点按照电源节点在前、负荷节点在后的规则编号。在进行搜索之前，规定搜索路径长度。其中，利用深度优先搜索方法完成负荷节点 $LNode_k$ 到电源节点 $SNode_m$ 的路径搜

索，流程如图 2 所示。

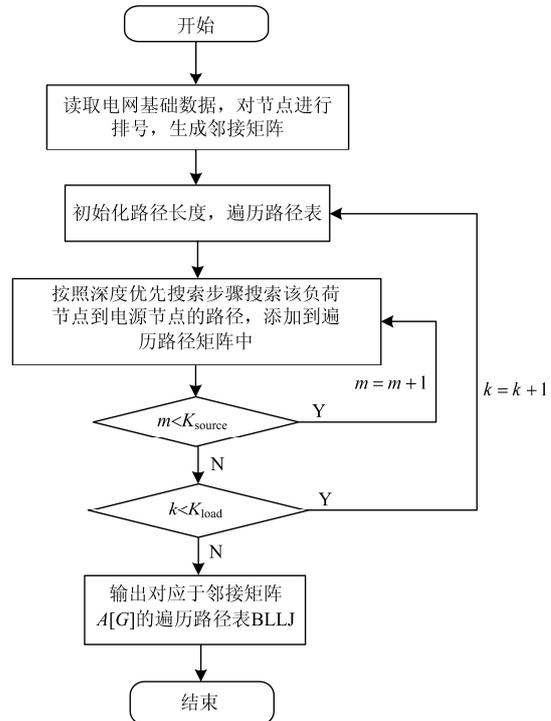


图 1 遍历搜索流程图

Fig. 1 Traversal search flowchart

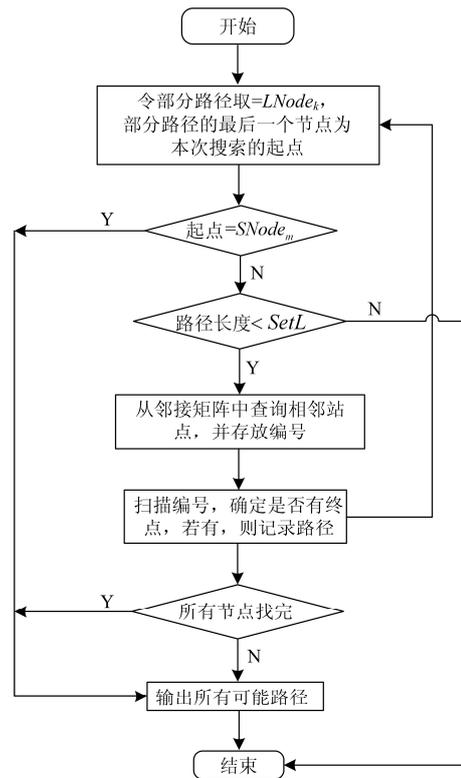


图 2 路径搜索流程

Fig. 2 Path search process

2 含环网的复杂配电网可靠性评估

2.1 可靠性指标

假定 R 为某配电系统所有负荷点的集合, λ_i, r_i, U_i 分别为负荷点 i 的可靠性指标, N_i 为该负荷点的用户数。下边以该系统为例, 列出本文涉及到的几种指标的定义^[7]。

1) 用户平均停电时间

用户平均停电时间(Average interruption hours of customer, AIHC)表示用户在给定时间区间内的平均停电时数, AIHC 等于用户停电持续时间的总和与总用户数的比值。通常给定时间区间为 1 年, 则 AIHC 用 $h/(\text{户} \cdot \text{a})$ 表示。

$$AIHC = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad (1)$$

2) 供电可用率

供电可用率(或称为供电可靠率)(Service availability, SA)表示在给定时间区间内用户用电需求得到满足的时间百分比, SA 等于实际供电总时户数除以要求供电总时户数。

$$SA = \frac{\sum_{i \in R} 8760 N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i} \quad (2)$$

3) 供电用户平均停电次数

供电用户平均停电次数(Average interruption times of customer, AITC)表示供电用户在给定时间区间内的平均停电次数, AITC 等于用户停电次数除以总用户数, 通常用次/(\text{户} \cdot \text{a})表示。

$$AITC = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad (3)$$

2.2 评估算法

最小割集法^[8]是一种网络法。网络法是假定系统中的每一个元件为两状态模型(即只有运行和停运两种状态), 根据系统的运行方式及各元件的失效模式绘出系统的逻辑图, 然后通过最基本的串并联关系, 用元件的可靠性参数计算出整个网络系统的可靠性指标的方法。其计算过程主要分成以下两个步骤:

1) 求取失效模式;

2) 绘出系统的失效模式, 利用串并联公式计算出系统可靠性指标。

求取负荷点最小割集获得负荷点的失效模式。对于配电系统的可靠性评估, 由于三重及以上

的故障概率极低, 一般计算到二阶最小割集便可以满足工程精度的要求。对于每一个负荷点, 求出其最小一阶、二阶割集以后, 将二阶割集中的两个元件视为并联关系, 所有割集之间视为近似的串联关系, 取各割集元件的永久性故障率和修复时间, 用可靠性计算的串并联公式(4)~(6), 可计算出该负荷点的可靠性指标。

串联系统可靠性计算公式为

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4)$$

$$U_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad (5)$$

$$r_s = \frac{\lambda_s}{U_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i} \quad (6)$$

式中: λ_i, r_i 分别为单个元件(或系统)故障率、修复时间; λ_s, U_s, r_s 分别为系统的故障率、平均故障时间、修复时间; n 为串联系统的元件个数。

二阶并联系统可靠性计算公式:

$$\lambda_{pp} = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad (7)$$

$$U_{pp} = \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2 \quad (8)$$

$$r_{pp} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{\lambda_{pp}}{U_{pp}} \quad (9)$$

在求出配电网中每一个负荷点的可靠性指标后, 通过式(1)~式(3), 便可以计算出系统的可靠性指标^[9]。

由以上分析可知, 求取负荷点的最小割集是可靠性评估的关键步骤。对于大规模复杂网络而言, 通常难以直观地识别其最小割集, 因此需要利用一种适合计算机运算的方法来求取最小割集。本文采用一种基于遍历路径表的最小割集求取方法, 可避免重复搜索过程, 提高可靠性评估的效率。

由上文可知, 遍历路径表是表示每个负荷点由电源点直接供电的供电路径表。在系统工程中, 连集是指这样一些元件的集合, 只有当这些元件都正常工作时, 系统才能正常工作。能够保证系统正常运行的元件的最小集合, 称为最小连集。因此, 对于配电系统中的一个负荷点而言, 从一个电源点到这个负荷点的一条供电路径就是一个最小连集。于是可以根据遍历路径表建立起负荷点的每个最小连集与网络中所有元件的“连集-元件”关联关系, 构成一个连集矩阵。

根据割集的定义可知,如果连集矩阵 T 中存在全为 1 的列,则表与该列号对应的元件和所有的供电路径都相关联,即该元件失效就会引起负荷点的供电中断,因此这个元件必然是负荷点的最小一阶割集;同理,若连集矩阵中任意两列元素逻辑相加可以得到全为 1 的列,就表示若编号与这两个列号相对应的元件同时失效将导致所有供电路径失效,故这两个元件就组成负荷点的最小二阶割集。以此类推,将连集矩阵中任意 n 列作逻辑相加运算,如果能得到一个全为 1 的列,那么这 n 列对应的元件就构成一个最小 n 阶割集。但应满足低阶最小割集不包含于高阶最小割集,

在实际可靠性计算中,因为三阶及其以上的元件同时故障概率极小,一般取最小一阶和二阶割集便可满足工程所需精度。由上可知,求取最小二阶割集需要将连集矩阵中任意两列进行逻辑加运算,设电网元件个数为 N 时,需要进行 $C_N^2 = N(N-1)/2$ 次逻辑加运算,当 N 较大时,将使运算量很大。而实际配电网中与某负荷点供电路径相关联的元件只占有所有元件中很小的比重,因此形成的连集矩阵 T 存在大量的全为 0 的列,因此本文在计算过程中先将连集矩阵中全为 0 的列删除,再在余下的列中进行组合计算,这大大减少不必要的运算量,提高了运算速度。

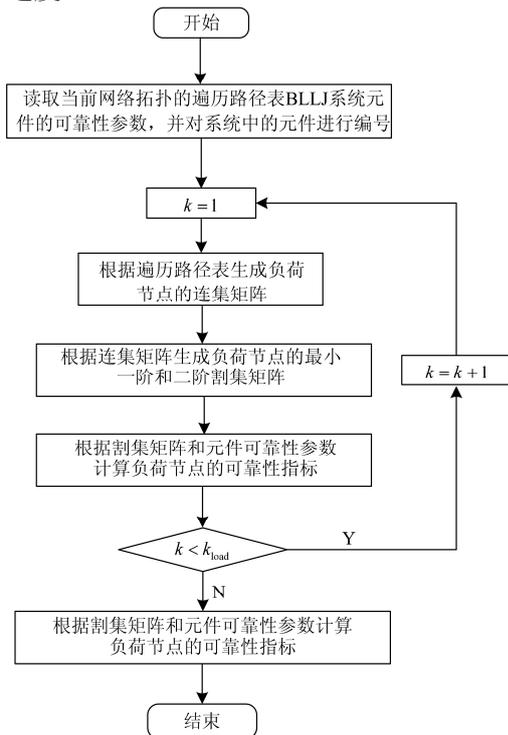


图 3 基于最小割集法的可靠性程序流程图

Fig. 3 Flowchart of reliability program based on the minimal cut sets

3 算例

3.1 某城市 29 节点高压配电网

以某小型城市 29 节点高压配电网^[10]说明前两节算法,其拓扑结构为图 4 所示。

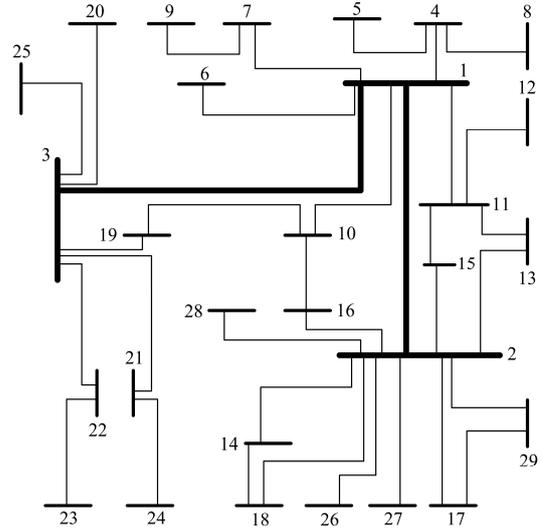


图 4 某城市 29 节点高压配电网拓扑结构

Fig. 4 29 node high voltage distribution network topology of a city

该高压配电网含有 330 kV 和 110 kV 两个电压等级的变电站,共有 29 个节点,其中有 3 个电源点(将 330 kV 变电站高压母线视为电源点)、26 个负荷节点(将 110 kV 变电站视为负荷节点)。按照电源节点在前、负荷节点在后的顺序对所有站点进行统一编号,即 1~3 号节点为电源节点,4~29 号节点为负荷节点。电源节点之间通过联络线(图中的粗线)相连,负荷节点与电源节点之间、负荷节点之间通过 110 kV 馈线相连(图中的细线)。其中 10 号和 19 号节点、10 号和 16 号节点、14 号和 18 号节点、17 号和 29 号节点、11 号和 15 号节点、13 号和 2 号节点之间设有解环点,其间的线路可以通过解环点的开闭来进行投切,从而改变系统的运行方式,以满足系统线路检修、负荷增长等需求。系统的线路编号及可靠性参数、阻抗参数和负荷点的负载情况等详细数据参见文献[10]。由于本文仅研究网架结构对可靠性的影响及算法程序的应用,故元件可靠性参数设定为已知量,算例中假定每条线路的可靠性参数均取 $\lambda=0.1$ 次/a, $r=2$ h/次。

下面以系统合环运行和解环运行两种情况为例进行可靠性计算分析。

1) 合环运行情况

合环情况下假定所有解环点都闭合, 即所有的备用线路均投运, 整个高压配电网中含有多个高低压电磁环网。全网共 26 个负荷点共有 44 条供电路径。基于 BLLJ_all 生成每个负荷节点的最小一阶和二阶割集因篇幅限制不在文中列出。由此计算出负荷点的可靠性指标。计算结果表明, 在解环点全部合环运行的方式下, 全网中可靠性最低的是负荷节点 5, 8, 9, 23, 24 等 5 个站, 其故障率为 0.2 次/年, 修复时间为 2 h/次, 平均故障时间为 0.4 h/a。分析可知, 这些站点均是系统由电源点向负荷节点串联供电链条的末端站, 串供链条中任何一条线路故障均会导致负荷点断电, 反映在其割集中则是这些负荷节点均有两个最小一阶割集, 表明两条线路中的任意一条失效均可以导致负荷停电。

而系统中可靠性最高的负荷节点是 10、11 两个站, 其故障率可约为 0 次/年, 平均故障时间为 0 h/a。分析可知, 这是由于 10 号站点分别通过 3 条不同的供电路径从系统中 3 个电源点受电、11 号站点通过 3 条供电路径从电源点 1、2 受电, 且系统中任意两条线路同时故障均不会切断站点 10 和 11 的所有供电路径而导致其中断供电, 故其可靠性很高, 在仅考虑 $N-1$ 和 $N-2$ 的工程精度情况(不考虑三阶及以上同时故障的小概率事件)下, 其的供电可靠性是 100%。

根据计算结果, 全网所有负荷节点按照可靠性指标可划分为 5 个等级, 每个等级的负荷节点及其代表节点的割集表 1 所示。

表 1 合环运行方式下负荷节点按照故障率分类结果

Table 1 Classification results in accordance with the failure rate of the load node under rings operating mode

(单位: 次/a)					
可靠性等级	包含节点	代表节点编号	故障率	一阶割集	二阶割集
第 1 级	10,11	10	0	\square	\square
第 2 级	13,15,16,19	13	0.04	\square	{7,28}
第 3 级	14,17,18,29	14	0.08	\square	{8,12},{8,30}
第 4 级	4,6,7,12,20,21,22,25,26,27,28	4	0.1	{2}	\square
第 5 级	5,8,9,23,24	5	0.2	{2},{23}	\square

由上表可知, 可靠性等级最高的 10, 11 节点最小一阶和二阶割集均为空集; 处于第二等级的 13, 15, 16, 19 节点有一个最小二阶割集, 对应一种 $N-2$ 故障失效模式; 处于第三等级的 14, 17, 18, 29 节点有两个最小二阶割集, 对应两种 $N-2$ 故障失效模式; 节点 4 等大多数负荷节点(共 11 个)可靠性指标均位于第 4 等级, 具有一个最小一阶割集, 对应一种 $N-1$ 故障模式, 这是由于大多数负荷节点均通过线路直接与电源节点相连, 若此供电线路故障, 即会导致负荷点停电; 而节点 5 等第 5 等级的节点是处于串供链的末端, 导致其可靠性最低。

在合环运行方式下, 系统层面的可靠性指标计算结果如表 2 所示。

表 2 合环运行方式下系统层面的可靠性指标
Table 2 System level reliability under close loop operation mode

SA(%)	AIHC/ (h/($\text{户}^2 \cdot \text{a}$))	AITC/(次/($\text{户} \cdot \text{a}$))
99.9979	0.312	0.172

2) 解环运行情况

在解环运行情况下, 假定系统中所有的开环点均开断, 即所有备用线路均不投入运行, 所有负荷点均为辐射型供电, 运行网架中不存在电磁环网。

全网所有负荷点共有 26 条供电路径, 即每个负荷点仅有一条供电路径, 比合环运行方式下减少了 18 条。同理计算出各负荷节点其可靠性指标。由结果可知, 解环运行方式下, 负荷节点按照故障率可分为 2 个等级, 如表 3 所示。

表 3 解环运行方式下负荷节点按照故障率分类结果(标准同合环方式)

Table 3 Classification results in accordance with the failure rate of the load node under network open loop mode

(单位: 次/a)					
可靠性等级	包含节点	代表节点	故障率	一阶割集	二阶割集
第 4 级	4,6,7,10,11,14~22,25~29	10	0.1	{5}	\square
第 5 级	5,8,9,23,24,12,13	5	0.2	{2},{23}	\square

可见, 由于解环运行方式下系统中无电磁环网存在, 负荷节点均为辐射型供电方式, 供电结构比合环运行方式下简单, 故电网中节点分类比合环运行方式少, 系统中负荷节点的整体可靠性水平有所降低(合环运行方式下可靠性等级为第 1 至第 3 等级

的节点均降为第 4 或第 5 等级)。

表 3 中两类节点分别对应直接与电源点相连的节点和间接与电源点相连的节点。直接与电源点相连的节点存在一种 N-1 故障模式, 可靠性相对较高(为第 4 级), 间接与电源点相连的节点处于串供链的末端(本算例中串供链最长只有两个站), 存在两种 N-1 故障模式, 可靠性相对较低(为第 5 级)。

解环运行方式与合环运行方式下的系统层面可靠性指标对比如表 4 所示。

表 4 解环运行方式与合环运行方式下系统层面的可靠性指标对比

Table 4 System level reliability under network open loop mode and close loop mode

可靠性指标	SA(%)	AIHC(h/(户·a))	AITC(次/(户·a))
合环方式	99.9979	0.312	0.172
解环方式	99.9971	0.440	0.220

综上所述, 虽然解环运行方式运行结构简单, 但是无论从负荷点的层面还是系统层面, 其电网的可靠性水平都有明显降低。

3.2 四川某城市实际电网的可靠性评估

本节在前述基础上将本文算法应用于四川某城市的实际高压配电网可靠性计算中。算例中该城市高压配电网的物理参数从四川省电网的 PSASP 数据包中获取, 对算例数据进行简要处理, 然后对全拓扑结构和初始方式下的电网拓扑结构和可靠性进行了分析。经过数据筛选整理, 可得该城市的高压配电网的全拓扑结构如图 5 所示。

该城市的高压配电网共含有 250 个站点, 其中 220 kV 变电站 54 个, 110 kV 变电站 196 个, 共有 110 kV 输电线路 383 条, 大部分 110 kV 站点均有 2~5 条备用供电路径。在初始方式下, 投运的 110 kV 线路共有 323 条, 大部分 110 kV 变电站由 220 kV 变电站辐射型供电, 但也有相当数量的 110 kV 变电站实际运行时与附近的 220 kV 变电站构成高低压电磁环网运行。基于深度优先搜索的方法可以找出每个 110 kV 负荷站点由 220 kV 变电站供电的遍历路径表。经计算, 全拓扑情况下的遍历路径表为一

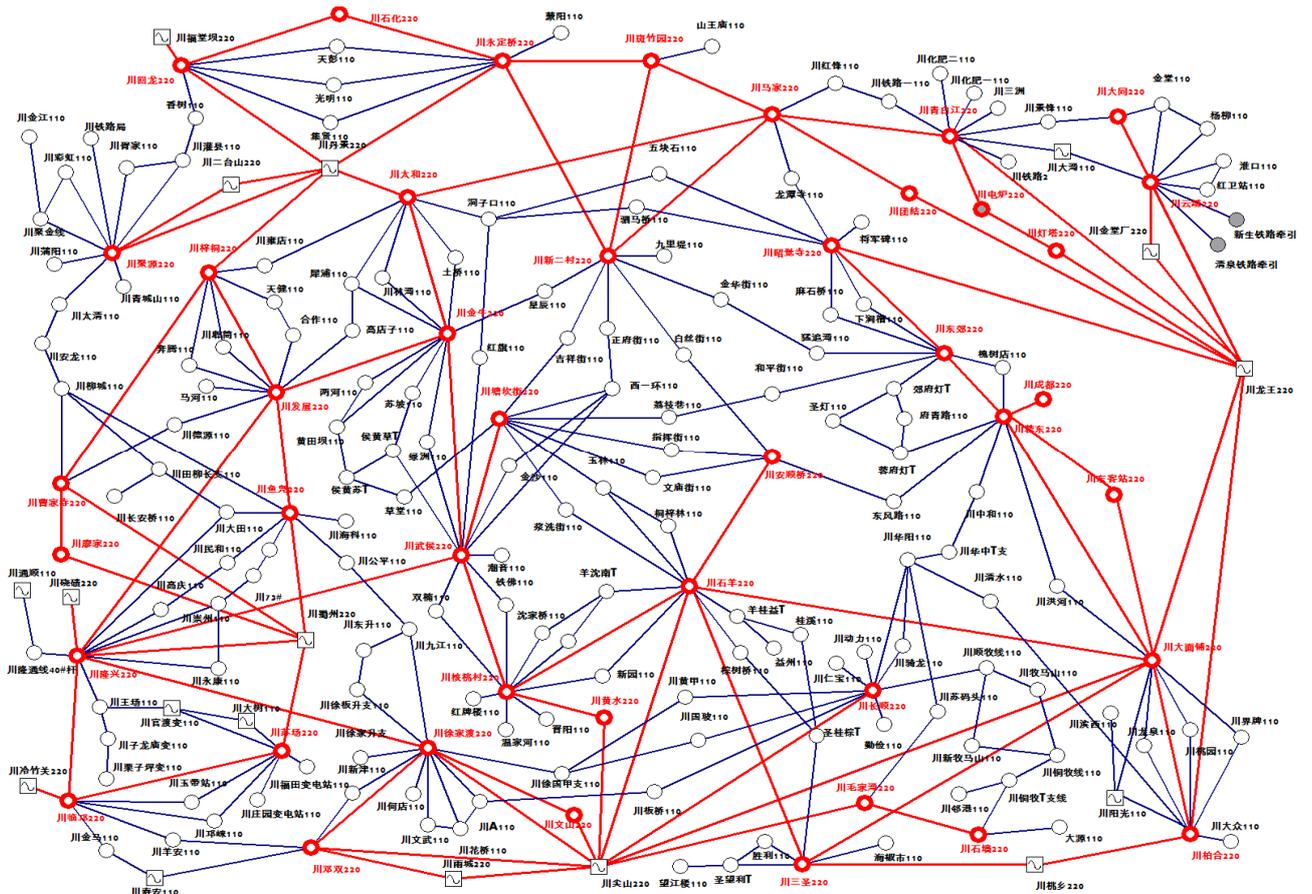


图 5 某城市高压配电网 220 kV 与 110 kV 站点的连接关系

Fig. 5 High voltage distribution network connection between 220 kV and 110 kV sites of a city

个 360×6 的矩阵, 全网共有 360 条不同的供电路径, 最长的供电路径链含有 6 个变电站, 其中每个 110 kV 站点的可选路径数的分布情况如表 5 所示。由表 5 可见, 全网共有 124 个 110 kV 站点拥有 2~5 条备选供电路径, 约占 110 kV 变电站总数的 63%, 这充分保证了配电网运行方式的灵活性。

表 5 某城市高压配电网全拓扑结构下 110 kV 站点
可选路径数分布情况

Table 5 110 kV distribution station optional path number under
the full high voltage distribution grid topology of a city

可选路径数	5 条	4 条	3 条	2 条	1 条
满足条件的 站点个数	6	14	32	72	72

根据路径搜索可得, 初始运行方式下, 有 268 条供电路径启用, 另外 92 条供电路径处于备用状态。其中, 有 220 kV 站点的枢纽电源点发出的供电路径较多, 如徐家渡 220 kV 站出发的供电路径有 25 条, 长顺等 220 kV 站出发的供电路径均超过 10 条; 而花桥、文武 110 kV 变电站等 84 个 110 kV 站点启用了两条或以上的备选供电路径, 使得初始运行方式下, 110 kV 站点和 220 kV 站点之间构成多个电磁环网, 而非完全是辐射型拓扑结构。

根据某城市高压配电网全拓扑结构和初始运行拓扑结构的遍历路径表, 可以直接求出相应网架的连集矩阵和最小一阶、二阶割集, 在给定元件的可靠性参数下即可计算出不同网架结构下的系统供电可靠性指标。

由于原数据中缺少元件的可靠性参数, 本文假定每条线路的可靠性参数均取 $\lambda=0.1$ 次/(km·a), $r=2$ h/次, 并假定各个负荷点的用户数相同。计算可得, 全拓扑结构和初始拓扑结构的可靠性指标如表 6 所示。

表 6 某城市高压配电网全拓扑结构和初始运行
拓扑的可靠性指标

Table 6 Reliability index under the high voltage distribution
network full topology and initial run topology of a city

可靠性指标	SA(%)	AHIC/(h/(户·a))	AITC/(次/(户·a))
全拓扑结构	99.952 07	4.1990	3.9363
初始运行拓扑	99.951 31	4.2648	3.9594

在大型城市复杂配电网中, 全拓扑结构的可靠性明显高于初始运行的拓扑结构。可以将该结果用于以提高可靠性为目标的重构优化或间隔资源优化等方面的约束条件。

4 结论

本文从三个方面提出将最小割集方法应用到城市复杂高压配电网的可靠性分析中。将 PSASP 与 Matlab 结合, 利用 PSASP 中已有数据包, 实现复杂配电网数据的灵活应用。实现复杂配电网的遍历搜索表的生成, 可用于网架结构分析和可靠性分析。利用遍历搜索表, 从连集矩阵到割集矩阵, 最后实现可靠性计算。完成接口程序, 深度遍历搜索程序以及可靠性程序的编写, 利用 29 节点以及四川某城市实际高压配电网的算例分析, 验证该程序的可行性和有效性。

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.
- [2] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [3] 肖雅元, 张磊, 罗毅, 等. 基于回路可靠性贡献指标的电网薄弱点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 54-59.
XIAO Yayuan, ZHANG Lei, LUO Yi, et al. Grid weak point analysis based on loop contribution index of the reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 54-59.
- [4] 李瑾, 李善波, 欧阳金鑫, 等. 基于进化规划算法的配电网运行方式定制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 48-53.
LI Jin, LI Shanbo, OUYANG Jinxin, et al. A decision method of operation mode for distribution network based on evolutionary programming algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 48-53.
- [5] 王武双, 王晓茹, 黄飞, 等. 电力系统仿真软件 PSASP 接口研究与应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 113-117.
WANG Wushuang, WANG Xiaoru, HUANG Fei, et al. Development and application of interface for power

- system analysis software Package[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 113-117.
- [6] 阿里 A. 乔杜里, 唐 O. 科瓦尔. 配电系统可靠性实践方法及应用[M]. 王守相, 等译. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [7] 陶华, 杨震, 张民, 等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 120-124.
- TAO Hua, YANG Zhen, ZHANG Min, et al. A depth-first search algorithm based implementation approach of spanning tree in power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 120-124.
- [8] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 52-58.
- WANG Xiuli, LUO Sha, XIE Shaoyu, et al. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 52-58.
- [9] 杨文宇, 余健明, 同向前. 基于最小割集的配电网可靠性评估算法[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(4): 149-153.
- YANG Wenyu, YU Jianming, TONG Xiangqian. Reliability assessment algorithm of power distribution system based on minimal cut sets[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(4): 149-153.
- [10] 王维超, 张明, 胡堃. 电力系统运行方式[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
-
- 收稿日期: 2016-03-06; 修回日期: 2016-06-03
- 作者简介:
- 潘 翀(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划与运行;
- 袁 霞(1991-), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向电力系统规划与运行; E-mail: yuanx1991@163.com
- 唐 伦(1988-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行控制与优化。
- (编辑 姜新丽)