

一种基于模型的配电网故障诊断搜索算法

胡 非^{1,2}, 刘志刚¹, 何士玉¹, 杨红梅¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 湖北省黄石供电公司, 湖北 黄石 435000)

摘要: 提出用二进制编码逻辑运算求解最小碰集的算法, 该算法将求解最小碰集问题映射到 0/1 整数规划问题, 即首先对系统进行建模仿真, 得到最小冲突集簇, 然后求出系统的所有候选碰集, 对系统中每个元件进行二进制编码, 最后采用自底向上的搜索方法, 进行搜索确认, 在确认的过程中, 使用二进制代码的逻辑“或”运算。将该算法分别从最小冲突集数和最小冲突集簇中所含的总元件数这两方面与其他的最小碰集算法进行比较。实验结果表明, 这 2 种因素对二进制编码算法的时间效率影响较小。最后, 以一个实际配电网诊断为例, 将所得的最小冲突集簇分别用该算法和其他的最小碰集算法计算, 计算结果更加充分地说明了该算法的优越性。

关键词: 电力系统; 配电; 故障分析; 最小碰集; 搜索算法

中图分类号: TM 711.2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.015

0 引言

现代电力系统中, 电力系统中的大部分故障来源于配电网, 配电网故障诊断是从技术上提高配电网安全可靠运行的重要手段。近年来, 许多学者将人工智能的理论和方法用于配电网故障诊断, 如蚁群算法^[1]、遗传算法^[2]、协同进化算法^[3]、粒子群算法^[4]和专家系统^[5-7]等, 其中, 专家系统在配电网故障诊断系统中应用最为广泛。

为了克服传统专家系统的缺陷, 从 20 世纪 70 年代起, Reiter 等国外学者^[8-11]提出用基于模型诊断 (MBD) 方法来开发故障诊断系统。现在, MBD 已经成为人工智能领域的一个研究热点, 已应用于医疗、经济、航天、电路诊断等诸多领域, 但在电网系统故障诊断中的应用研究还处于起步阶段。

在 MBD 方法中, 由最小冲突集求解最小碰集的过程是一个 NP-Hard 问题。目前, 许多学者都对计算最小碰集的算法进行了研究和改进, 主要有: HS-TREE^[12], HS-DAG^[13], HST-TREE^[14], BHS-TREE^[15], 布尔代数算法^[16], 逻辑数组算法^[17], 遗传算法^[18], 粒子群算法^[19]等。在以上这些方法中, 主要缺点集中表现在:

- a. 需要进行剪枝, 可能会丢失正确解^[12];
- b. 所建立的树或者图, 数据结构复杂而且计算

量大^[12-14];

- c. 要求求出所有的碰集再化简^[15-17];

- d. 所得到的结果不能保证全是最小碰集^[18-19]。

这些缺点的存在使得程序难以编制, 而且在处理复杂系统诊断问题时, 例如配电网故障诊断, 最小冲突集簇元件总数与最小冲突集中元件数对其算法效率影响比较大, 导致算法效率不高。

本文针对上述算法产生的缺点, 提出使用二进制编码逻辑运算的方法计算最小碰集, 以满足模型故障诊断中对配电网系统诊断解的计算, 该方法的主要优点是:

- a. 对每个元件进行二进制编码, 有 2 个好处, 一是算法的整个运算过程, 只有 0/1 组成的字符串进行单一的逻辑“或”运算, 易于程序的编制和实现, 二是该算法的复杂度只与最小冲突集簇中所包含的元件数有关, 与最小冲突集个数及最小冲突集中元件个数无关, 促使该算法诊断元件数的能力大幅增强;

- b. 在搜索过程中, 采用自底向上的宽度优先类搜索算法, 明显地降低了算法的时域复杂度, 效率更高。

1 相关定义与定理

下面介绍一些 MBD 的概念和定理^[12]。

定义 1 被诊断系统。一个被诊断系统用一个三元组 {系统的模型描述 (SD, the system description); 系统的观测值 (OBS, observation); 组成系统的元件集合 (COMPS, the system components)} 来表示。

定义 2 冲突集。系统 (SD, OBS, COMPS) 的一个冲突集是一个元件集 $\{c_1, \dots, c_k\} \subseteq \text{COMPS}$, 它使得 $\text{SD} \cup \text{OBS} \cup \{\neg \text{AB}(c_1), \dots, \neg \text{AB}(c_k)\}$ 是不可满足的。一个冲突集是最小冲突集当且仅当它的任何一个真

收稿日期: 2012-04-09; 修回日期: 2012-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1134205, 51007074); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NECT-08-0825); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (SWJTU11CX141)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (U1134205, 51007074), Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (NECT-08-0825) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (SWJTU11CX141)

子集都不是冲突集。其中,一元谓词 AB 意味着“abnormal”, $AB(c_1)$ 表示元件 c_1 异常, $\neg AB(c_1)$ 表示元件 c_1 正常。

定义 3 碰集。设 C 是一个冲突集合簇, C 的碰集是一个集合 H , H 满足 2 个条件: $H \subseteq \bigcup_{S \in C} S$; $\forall S \in C, H \cap S \neq \emptyset$ 。一个碰集是最小碰集当且仅当它的任何一个真子集都不是碰集。

定义 4 碰集环境。设元件集合 $COMPS = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 中有 n 个元件,非空集合 $E \subseteq COMPS$,则称 E 为碰集环境,显然,系统中的碰集环境的个数为 $2^n - 1$ (n 表示系统中元件的个数)。

定义 5 候选碰集。如果 E 是某系统的碰集环境,则称 E 为一个候选碰集。例如,某系统有元件集合 $\{A, B\}$,则该系统的候选碰集有 $\{A\}$ 、 $\{B\}$ 、 $\{A, B\}$ 。

定理 1 Δ 是 $(SD, OBS, COMPS)$ 的一个极小诊断,当且仅当 Δ 是 $(SD, OBS, COMPS)$ 的最小冲突集的最小碰集。

2 算法描述

设有冲突集合簇 $CS = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_m\}, k = 1, \dots, m$ 。

步骤 1 求出 CS 中的全部元件,记 $\bigcup CS = \{C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup \dots \cup C_m\} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$,系统中有 n 个元件。如果冲突簇中含有超集,先要进行超集删除处理。

步骤 2 对系统的每个元件进行二进制编码并得到一个碰集评判代码。

a. 冲突集合簇 $CS = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_m\}$,用一维数组 $B[m]$ 存储集合簇 CS 中各冲突集元素,即有 $B[m] = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_m\}$,其中, $B[1] = C_1, B[2] = C_2, \dots, B[m] = C_m$ 。对于元件 $c_i (1 \leq i \leq m)$,如果 $c_i \in C_i (1 \leq i \leq m)$,则用 1 表示;如果 $c_i \notin C_i$,则用 0 表示;将二进制码 0 或 1 存入 C_i 在数组 $B[m]$ 中所在的位置,此时的每个元件都会用一个由 m 个二进制代码组成的字符串表示。

b. 冲突集合簇 $CS = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_m\}$,其碰集评判代码为 $11 \dots 1$ (m 个 1)。

步骤 3 求出所有的碰集环境,即候选碰集,对于有 n 个元件的系统,则有 $2^n - 1$ 个候选碰集,并对每个候选碰集进行封装,便于第 5 步的搜索。

步骤 4 对每个候选碰集,确认彼此之间的父子关系。如果集合 $A \subseteq B$,则称 A 是 B 的子候选碰集, B 是 A 的父候选碰集,显然,对于一个集合而言,可能有 3 种情况:

- a. 可能有多个父候选碰集或多个子候选碰集;
- b. 可能同时存在父候选碰集和子候选碰集;
- c. 可能只存在父候选碰集或子候选碰集。

步骤 5 采用自底向上的宽度优先类搜索算法进

行搜索,采用“边搜索,边计算,边判断,边确认”的策略,先对子候选碰集进行判断,将子候选碰集中的每个元件的二进制代码进行“或”运算,如果运算结果和评判代码一致,就可判断该子候选碰集为碰集,则此时就不需要对其父候选碰集进行判断,否则,需要对其父候选碰集进行判断。此步骤结束以后,就得到所有的最小碰集,而且不会产生最小碰集超集,也不会漏掉最小碰集。

算法主要流程如图 1 所示。

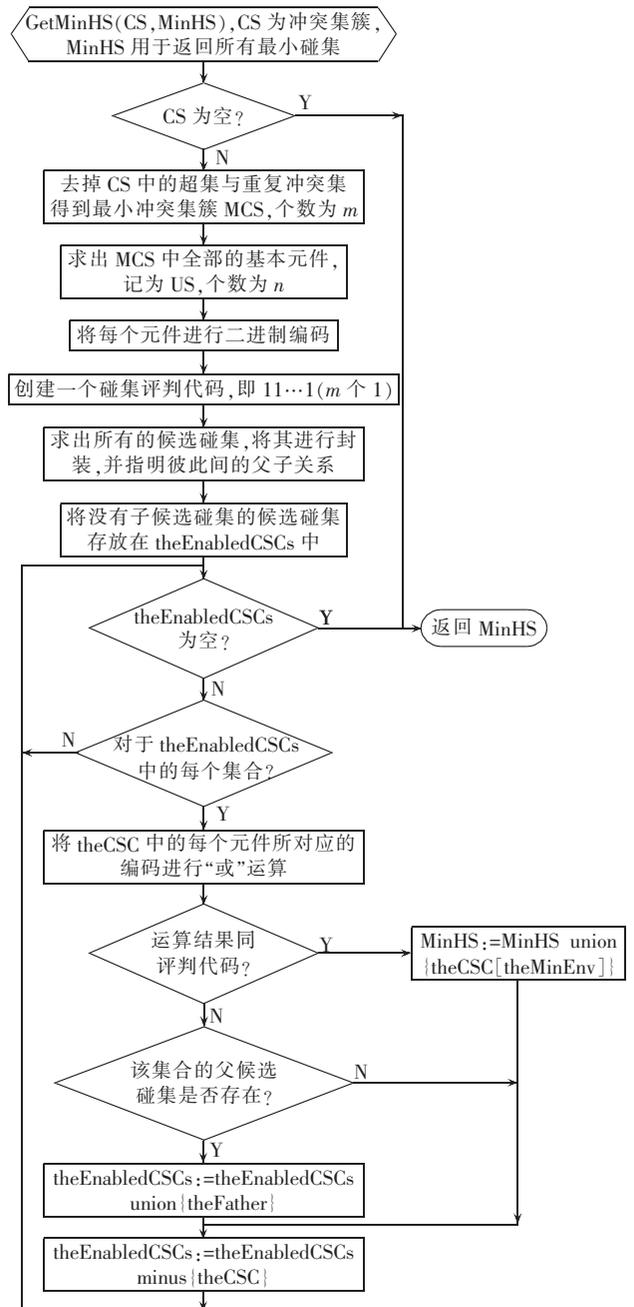


图 1 程序流程图

Fig.1 Flowchart of program

3 算法的实时性

求最小碰集时,影响其算法效率的有 2 个因素,

分别为最小冲突集数和最小冲突集簇中所含的总元件数。因此,本文将二进制编码算法分别从这两方面与 HS-TREE^[12]、BHS-TREE^[15]、逻辑数组算法^[17]进行比较,在 PC 机上(Celeron 2 GHz,1 GB,Windows XP)用 MAPLE 12 仿真,得出下列 2 种情况的时间效率图。

a. 整个最小冲突集簇含 $M=30$ 个元件,最小冲突集数不变, $n=9$,取 $(1,2,\dots,m)$, $(2,3,\dots,m+1),\dots$, $(n,n+1,\dots,n+m+1)$; $m=5\sim 9$,得到最小冲突集元件数时间效率图,如图 2 所示。

b. 当 $n=9$ 时,整个最小冲突集簇中所含元件数 $M=26\sim 30$;得到最小冲突集簇元件数时间效率图,如图 3 所示。

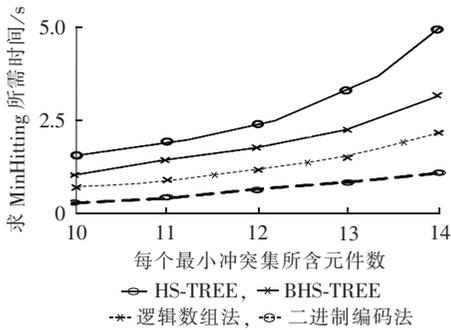


图 2 每个最小冲突集元件数个数不同时间效率图
Fig.2 Curves of time needed vs. element number of each minimal conflict set for different algorithms

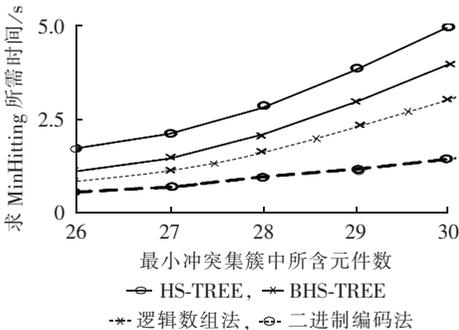


图 3 最小冲突集元件总数不同时间效率图
Fig.3 Curves of time needed vs. elements number of minimal conflict sets

可见,比较文献[12]、[15]、[17]中的算法,本文提出的算法特点很明显:算法时间效率与冲突集簇所含元件数及最小冲突集中所含的元件个数有关,这 2 种因素对二进制编码算法的时间效率影响较小。若综合上述 2 种因素,比较文献[12]、[15]、[17]中的算法,二进制编码算法在时间效率上优势非常明显。

4 配电网故障诊断

图 4 为某 10 kV 配电网子网,它是具有 7 个节点的辐射型配电网,其中系统等效是指除了这 7 个节点外的完整配电网,它的作用相当于电源,给这 7

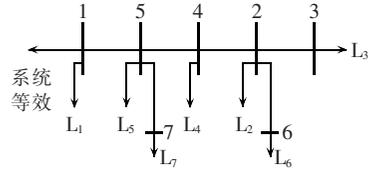


图 4 某 10 kV 配电网子网
Fig.4 A 10 kV distribution subnet

个节点供电,从节点 1 到节点 7 都布置了相应的信息采集装置。记 B3_A 为节点 3 的 A 相母线,L57_B 为节点 5 和节点 7 之间的 B 相输电线,其他母线和线路的编号类似。

假设在该配电网中,线路 L23_A 发生短路接地和线路 L57_B 发生短路接地故障。采用文献[20]中的方法对该配网进行建模仿真,可得到最小冲突集 $MinCs = \{\{B3_A, L23_A\}, \{B7_B, L57_B\}\}$ 。

对于冲突集簇 MinCs,采用二进制编码法计算最小碰集,具体过程如下。

步骤 1 求出冲突集簇 MinCs 中的全部元件为 $\cup MCS = \{C_1 \cup C_2\} = \{B3_A, L23_A, B7_B, L57_B\}$ 。

步骤 2 候选碰集有 $\{B3_A\}$ 、 $\{L23_A\}$ 、 \dots 、 $\{B3_A, L23_A, B7_B, L57_B\}$ 等 15 个。

步骤 3 确认候选碰集彼此间的父子关系,比如, $\{B3_A\} \subseteq \{B3_A, L23_A\}$,则 $\{B3_A\}$ 是 $\{B3_A, L23_A\}$ 的子候选碰集, $\{B3_A, L23_A\}$ 是 $\{B3_A\}$ 的父候选碰集。

步骤 4 元件的二进制代码 B3_A 为 10,L23_A 为 10,B7_B 为 01,L57_B 为 01;碰集评判代码为 11。

步骤 5 自底向上进行搜索确认。先从元件最少的候选碰集进行判断,即从含有单个元件的候选碰集开始判断,显然,在此例中单元元件的二进制代码均不与碰集评判标准一致,故单元元件候选碰集都不可能成为最小碰集。再从双元件的候选碰集进行判断,例如候选碰集 $\{L23_A, L57_B\}$,元件 L23_A 的代码 10,元件 L57_B 的代码 01,将这 2 个元件的代码进行“或”运算,得 11,正好与评判代码一致,说明集合 $\{L23_A, L57_B\}$ 为碰集,即为该配电网的一个候选诊断,不需要对其父候选碰集 $\{B3_A, L23_A, L57_B\}$ 、 $\{B7_B, L23_A, L57_B\}$ 、 $\{B3_A, B7_B, L23_A, L57_B\}$ 等进行判断。如此进行下去,直至找出所有最小碰集。最后,得到 4 个最小碰集,即 4 个候选诊断,为: $MinHs = \{\{B3_A, B7_B\}, \{B3_A, L57_B\}, \{B7_B, L23_A\}, \{L23_A, L57_B\}\}$ 。

将本例所得的最小冲突集簇,用其他的最小碰集算法计算,花费时间如表 1 所示。

由此表进一步可以看出,二进制编码法较文献[12]、[15]、[17]中的最小碰集算法效率更高,有较好的实时性。

表 1 各种最小碰集算法所需时间

Tab.1 Time needed by different algorithms

碰集算法	时间/s
HS-TREE ^[12]	0.092
BHS-TREE ^[15]	0.048
逻辑数组算法 ^[17]	0.032
二进制编组法	0.015

5 结论

本文将求解最小碰集问题映射到二进制数 0/1 逻辑“或”关系求解问题上,使得数据结构更为简单,实现算法与程序的一致。先求出系统的所有候选碰集,对系统中每个元件进行二进制编码,然后采用自底向上的搜索方法,进行搜索确认,在确认的过程中,使用二进制代码的逻辑“或”运算。算法易于编程实现,而且该算法在时间与空间复杂性上都表现出了较优的性能。通过实验仿真,与其他算法进行比较,说明该算法具有良好的实时性,最后,以一个实际配电网诊断为例,更加充分地证明了二进制编码算法在处理复杂系统问题上的优越性,实现了在很短的时间内找到全部的最小碰集的目的。本文提出的算法可以为基于模型故障诊断中最小碰集的计算,尤其是复杂系统故障诊断(如配电网)提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] 赵强,敬东,李正. 蚁群算法在配电网规划中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(2):52-54.
ZHAO Qiang,JING Dong,LI Zheng. Application of ant colony algorithm for distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(2):52-54.
- [2] 孙国强,卫志农,唐利锋,等. 多目标配电网故障定位的 Pareto 进化算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):57-61.
SUN Guoqiang,WEI Zhinong,TANG Lifeng,et al. Pareto evolutionary algorithm for multiobjective fault location of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):57-61.
- [3] 欧帝宏,陈皓勇,荆朝霞. 基于协同进化算法的配电网重构方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):108-113.
OU Dihong,CHEN Haoyong,JING Zhaoxia. Distribution network reconfiguration based on co-evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):108-113.
- [4] 徐茹枝,王宇飞. 粒子群优化的支持向量回归机计算配电网理论线损方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):86-89.
XU Ruzhi,WANG Yufei. Theoretical line loss calculation based on SVR and PSO for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):86-89.
- [5] 杨成峰,乐秀璠. 配电网故障恢复专家系统的一种实现[J]. 电力自动化设备,2001,21(11):28-31.
YANG Chengfeng,LE Xiufan. An implementation of service restoration expert system for power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(11):28-31.
- [6] 李季,王淬寒,孙雅明. 配电网倒闸操作票专家系统[J]. 电力自动化设备,2001,21(8):26-28.
LI Ji,WANG Cuihan,SUN Yaming. An operation scheduling expert system of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(8):26-28.
- [7] 赵冬梅,郭锐,徐开理,等. 电网故障诊断专家系统的一种实现[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):33-36.
ZHAO Dongmei,GUO Rui,XU Kaili,et al. An implementation method for power system fault diagnosis expert system[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(4):33-36.
- [8] DAVIS R. Diagnostic reasoning based on structure and behavior[J]. Artificial Intelligence,1984,24(1-3):347-410.
- [9] REITER R. A theory of diagnosis from first principles[J]. Artificial Intelligence,1987,32(1):57-95.
- [10] de KLEER J,WILLIAMS B C. Diagnosing multiple faults[J]. Artificial Intelligence,1987,32(1):97-130.
- [11] de KLEER J,MACKWORTH A K,REITER R. Characterizing diagnosis and systems[J]. Artificial Intelligence,1992,56(2-3):197-222.
- [12] REITER R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial Intelligence,1987,32(1):57-95.
- [13] GREINER R. A correction to the algorithm in Reiter's theory of diagnosis[J]. Artificial Intelligence,1989,41(1):79-88.
- [14] WOTAWA F. A variant of reiter's hitting set algorithm[J]. Information Processing Letters,2001,79(1):45-51.
- [15] 姜云飞,林笠. 用对分-HS 树计算最小碰集[J]. 软件学报,2002,13(12):2267-2274.
JIANG Yunfei,LIN Li. Computing minimal hitting set with BHS-tree[J]. Journal of Software,2002,13(12):2267-2274.
- [16] 姜云飞,林笠. 用布尔代数计算最小碰集[J]. 计算机学报,2003,26(8):920-924.
JIANG Yunfei,LIN Li. The computation of hitting sets with Boolean formulas[J]. Chinese Journal of Computers,2003,26(8):920-924.
- [17] 林笠. 基于模型诊断中的用逻辑数组计算最小碰集[J]. 暨南大学学报,2002,23(1):24-27.
LIN Li. Computing minimal hitting sets with logic array in model-based diagnosis[J]. Journal of Jinan University,2002,23(1):24-27.
- [18] 张楠,孙吉贵,赵祥福,等. 求极小碰集的遗传算法[J]. 广西师范大学学报,2006,24(4):62-65.
ZHANG Nan,SUN Jigui,ZHAO Xiangfu,et al. Computing minimal hitting sets with genetic algorithm[J]. Journal of Guangxi Normal University,2006,24(4):62-65.
- [19] 蒋荣华,天书林,龙兵. 基于 DPSO 最小碰集算法的掩盖故障识别[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(4):997-1001.
JIANG Ronghua,TIAN Shulin,LONG Bing. Minimal hitting sets algorithm of identifying masking false failure sets based on DPSO [J]. Systems Engineering and Electronics,2009,31(4):997-1001.
- [20] 刘志刚,钟炜,邓云川,等. 牵引变电站故障的基于模型诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(34):36-41.
LIU Zhigang,ZHONG Wei,DENG Yunchuan,et al. Electric railway substation diagnosis with model-based method[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(34):36-41.

作者简介:

胡非(1985-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为配电网故障诊断(E-mail:hf_19851005@163.com);

(下转第 90 页 continued on page 90)

- Systems, 2009, 33(9): 32-36.
- [8] 谢开贵, 易武, 夏天, 等. 面向开关的配电网可靠性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 40-44.
XIE Kaigui, YI Wu, XIA Tian, et al. Switch-oriented reliability evaluation algorithm for electrical distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 40-44.
- [9] 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 38-43.
WANG Xudong, LIN Jikeng. Reliability evaluation based on network simplification for the distribution system with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 38-43.
- [10] 陈海焱, 陈金富, 杨雄平, 等. 配电网中计及短路电流约束的分布式发电规划[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 16-21.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, YANG Xiongping, et al. Planning for distributed generation in distributed network with short-circuit current constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 16-21.
- [11] 卢志刚, 董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 89-92.
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Service restoration strategy for the distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 89-92.

作者简介:

邱生敏(1985-), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划和可靠性、电力系统稳定和控制(E-mail: qiuscut@163.com);

管霖(1970-), 女, 湖北孝感人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统规划和可靠性、电力系统稳定和控制、人工智能等。

Simplification of distribution network planning and its reliability evaluation algorithm

QIU Shengmin, GUAN Lin

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The load and length of distribution feeder are simplified by assumptions and the main line and branch are defined. With the consideration of feeder transformer capacity constraint, the calculation method of load transfer rate is proposed. The feeder is divided into main line, branch and distribution transformer, and the reliability indices of distribution feeder are then deduced, based on which the system reliability indices are formed. Error analysis is carried out for the network assumptions and the data structure needed for the reliability evaluation of distribution network planning is analyzed. An example shows that the proposed assumptions and algorithm are effective and feasible.

Key words: electric power distribution; reliability; error analysis; distribution network planning; main line; branch line; load transfer rate

(上接第 84 页 continued from page 84)

刘志刚(1975-), 男, 河南巩义人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事现代信号处理技术在电力系统信号处理中的应用、智能监控和现代轨道交通技术的研究工作(E-mail: liuzg_cd@126.com);

何士玉(1986-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障诊断(E-mail: zjyi@163.com);

杨红梅(1987-), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障诊断。

Model-based search algorithm of fault diagnosis for distribution system

HU Fei^{1,2}, LIU Zhigang¹, HE Shiyu¹, YANG Hongmei¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Huangshi Power Supply Company, Huangshi 435000, China)

Abstract: An algorithm of logical operations based on binary codes is applied in the calculation of the minimal hitting sets, which maps the minimal hitting sets problem to the 0/1 integer programming problem. The system is modeled and simulated to find out the minimal conflict sets and its entire candidate hitting sets are computed and confirmed by the bottom-up search algorithm, which defines each system element with binary codes and operates logical "or". The comparison of the minimal conflict sets number and the contained elements number among different algorithms shows that the proposed algorithm is hardly affected. The calculation results of minimal conflict sets by different algorithms for an actual distribution network demonstrate the superiority of the proposed algorithm.

Key words: electric power systems; electric power distribution; failure analysis; minimal hitting set; search algorithm