

基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别

谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为减小电网故障搜索范围, 避免对电网内所有元件依次进行故障判断, 提出了一种基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别方法, 有效地把故障诊断问题局限于一个或多个无源网络中。首先, 针对断路器跳闸引起电网拓扑结构变化这一离散事件的动态过程, 以 Petri 网作为建模工具, 对全部元件赋予颜色属性并允许有向弧上有可变的权, 构建用于电网故障区域搜索的有色自控 Petri 网模型。然后以 NetBeans 为开发环境, 运用 Java 语言编程实现对故障区域的快速搜索。对某 8 节点测试系统的仿真结果表明: 对于电网中存在的单重故障、多重故障以及保护和断路器有不正确动作的复杂故障, 该方法均能快速准确地确定故障区域, 有助于电网故障诊断的后续工作顺利进行。

关键词: 有色自控 Petri 网; 故障区域; 故障诊断; 电力系统; Java

Identification of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets

XIE Min, WU Yaxiong, HUANG Shu, LIU Mingbo

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

Abstract: In order to narrow the searching range of power system failure and avoid fault judgement of all components successively, an identification method of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets is proposed. Through this method, the fault diagnosis problem is limited to one or more passive network. First, a colored self-modifying Petri nets model used to detect the fault area is built based on Petri nets. This model can interpret the power network topology change, a discrete event dynamic process, caused by the breakers trip. All components are assigned with color attributes and the weights of some directed arcs are variable in the model. Then, searching of the fault area is realized by Java in the NetBeans, the developing environment of the software. Simulation results on 8-bus testing system indicate that the proposed method can detect the fault area rapidly and accurately against single fault, multiple fault and the complex fault with malfunctions of several protections and breakers. Furthermore, this method also contributes to smooth subsequent process of power system fault diagnosis.

This work is supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205) and National Natural Science Foundation of China (No. 50907023).

Key words: colored self-modifying Petri nets; fault area; fault diagnosis; power system; Java

中图分类号: TM772

文章编号: 1674-3415(2016)02-0056-09

0 引言

电网故障的快速准确诊断对加快事故处理和恢复电力系统的安全经济运行具有重要的意义^[1-2]。复杂大电网发生故障时, 大量报警信息从本地的信号发生装置向调度中心汇集, 如何帮助运行人员在短

时间内准确识别故障元件是亟待研究的重点问题。利用断路器的动作信息确定故障区域, 减小故障搜索范围后再进行电网故障诊断的后续工作是解决该问题的有效方法之一。

文献[3-4]利用图论中相关知识构建电网拓扑的邻接矩阵, 然后采用广度优先搜索算法遍历该矩阵来确定故障区域, 该方法虽易于理解, 但处理类似高压输电网这种环路较多的拓扑结构图时, 计算过程较为繁琐。文献[5]提出的基于开关变位次序图的

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)(2013CB228205); 国家自然科学基金青年基金项目(50907023)

电网可疑故障元件集识别方法其本质上是一种改进的深度优先搜索算法, 能较好地适用于有汇流母线和无汇流母线的各种接线方式, 然而系统规模的增大在一定程度上将影响该方法的搜索效率。文献[6]提出的基于方程求解算法的电力系统拓扑结构分析方法亦可运用于电网故障区域的搜索过程中, 稀疏技术和分块技术的引入使得搜索效率提高, 但当断路器的动作信息变化时, 需重新修改初始关联矩阵, 适应性有待加强。文献[7]根据邻接矩阵自乘运算直观地确定网络中节点间连通关系, 推导过程清晰明了, 但存储量和计算量随着网络节点数的增多而增大。文献[8]提出的基于面向对象的有色 Petri 网的城市轨道交通牵引供电系统接线分析方法能准确地确定故障区域, 具有一定的可行性, 但并未给出形式化的推理算法。

基于此, 本文提出了一种基于有色自控 Petri 网(Colored Self-modifying Petri Nets, CSPN)的电网故障区域识别方法。首先, 以 Petri 网作为建模工具, 对电网内所有元件赋予颜色属性并在某些变迁的有向弧上引入可变权构成相应控制策略, 建立故障区域搜索的 CSPN 模型, 图形化地描述了断路器跳闸引起电网拓扑结构变化这一离散事件的动态过程, 使复杂的逻辑关系形象化。然后以 NetBeans 为开发环境, 运用 Java 语言编程实现了对故障区域的快速搜索, 能较好地适应断路器实时状态的变化。对某 8 节点测试系统的仿真结果表明: 对于电网中存在的单重故障、多重故障以及保护和断路器有不正确动作的复杂故障, 该方法均能快速准确地确定故障区域, 得到对应的可疑故障元件集, 为电网故障诊断后续工作的顺利进行打下坚实基础。

1 有色自控 Petri 网

1.1 CSPN 的定义

含有 k 种颜色的简单 CSPN 可定义为一个 6 元组^[9-12]

$$\Sigma=(P, T, F, G, W, M)$$

其中: (P, T, F) 为有向网, 称为 Σ 的基网; $P=\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 是库所结点的有限非空集合, 其作用是存放资源; $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 是变迁结点的有限非空集合, 变迁的触发会引起有关资源数量上的变化; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 是连接库所与变迁的有向弧集; G 表示一个守护函数, 其作用是将每个变迁与值为布尔类型的表达式一一对应; $W: F \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}^k$ 称为权函数, 表示对每条有向弧赋予一个 k 维非负整数向量, 且允许某些变迁的有向弧上的权向量是可变的; $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}^k$ 是 Σ 的标识向量, 每个

库所内的 k 维非负整数向量表示库所中每种颜色的托肯个数, 即意味着向量中的分量及其数值分别代表某种颜色及其托肯个数。

1.2 CSPN 的变迁发射规则

若 $N=(P, T, F)$ 为一个有向网, 对于 $x \in P \cup T$, 称 $\bullet x = \{y | (y, x) \in F\}$ 为 x 的前集或输入集, $x^\bullet = \{z | (x, z) \in F\}$ 为 x 的后集或输出集。

使能规则: 当 $\forall t \in T, \forall p \in \bullet t$, 若式(1)成立, 则变迁 t 是使能的。

$$\{M(p) > 0\} \wedge \{M(p) \geq W(p, t)\} \quad (1)$$

点火规则: 如果变迁 t 在标识 M 下是使能的, 且其守护函数为真(即该使能变迁亦能被激活), 则变迁 t 能触发, 触发后产生一个新的标识 M' 。

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - M(p, t), & \text{若 } p \in \bullet t - t^\bullet \\ M(p) + M(t, p), & \text{若 } p \in t^\bullet - \bullet t \\ M(p) - M(p, t) + M(t, p), & \text{若 } p \in \bullet t \cap t^\bullet \\ M(p), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

图 1 给出了一个简单的 CSPN 的图形表示。该图表示的是一个含有 4 种颜色(红色、黄色、蓝色、绿色)的 CSPN。变迁 t_1 的输入弧上的权用库所名 p_1 表示, 意味着权向量与库所 p_1 的标识向量相同。初始标识 $M_0 = ([1, 2, 3, 4], [0, 0, 0, 0])$, 其表示库所 p_1 中红色、黄色、蓝色和绿色的托肯个数分别为 1、2、3、4, 而库所 p_2 中不含有任何托肯。由式(1)可知变迁 t_1 满足触发条件, 触发后产生的新标识为 $M_1 = ([0, 0, 0, 0], [1, 1, 1, 1])$ 。

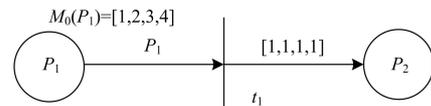


图 1 有色自控 Petri 网系统

Fig. 1 Colored self-modifying Petri net

2 故障区域搜索的 CSPN 模型

电网发生局部故障时, 保护装置和对应断路器会在短时间内相继动作, 将故障元件与供电处隔离, 使故障元件处于孤立的无源网络之中, 这些无源网络即称为故障区域^[13]。本文中考虑的元件集由母线、线路、变压器及发电机组成, 开关集仅由断路器组成, 对电网中所有元件及断路器进行编号, 发生故障时, 基于断路器的动作信息, 以 Petri 网作为建模工具, 对电网内所有元件赋予颜色属性并在某些变迁的有向弧上引入可变权构成相应控制策略, 建立电网故障区域搜索的 CSPN 模型, 进而确定电

网内所有元件被断路器划分所得子系统的个数，无源子系统即为所求故障区域。确定故障区域后，仅需在这些区域中所包含的元件中识别出故障元件，提高了故障诊断效率。

为了更加方便地构建故障区域搜索模型，本文定义了 4 个算子，即，减法算子 \ominus ：表示同维数的两向量相减后，将所得向量中分量值小于 0 的全部置 0，其他分量值保持不变；加法算子 \oplus ：表示同维数的两向量相加后，将所得向量中分量值大于 1 的全部置 1，其他分量值保持不变；F 算子：表示找出 n 维向量中首个数值为 1 的分量，其值保持不变，将其他分量值全部置 0，组成新的向量；G 算子：表示找出 n 维向量中首个数值为 1 的分量，将其置 0，其他分量值保持不变，组成新的向量。例如： $[0, 1, 1] \ominus [1, 0, 1] = [0, 1, 0]$ ； $[1, 0, 0] \oplus [1, 0, 1] = [1, 0, 1]$ ； $F([0, 1, 1]) = [0, 1, 0]$ ； $G([0, 1, 1]) = [0, 0, 1]$ 。

文献[14-15]提出了用于拓扑分析的有色 Petri 网模型，并通过仿真计算验证了该模型的有效性。然而，该模型还存在以下不足：首先，文中并未明确给出该有色 Petri 网模型的变迁发射规则；其次，由 Petri 网系统的最初定义可知，变迁的触发仅会引起相应库所中存放的资源数量的变化，因此文中认为变迁的发生可以改变令牌的颜色亦有违背 Petri 网定义之嫌；最后，文中针对 Petri 网运行过程中存在冲突的情况，并未给出实际的外加控制装置框图。本文参照利用 Petri 网对柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)建模的思路^[16]，把电网中的元件类比于 FMS 中需要加工的工件，对上述模型进行相应改进，建立了如图 2 所示的电网故障区域搜索的 CSPN 模型。该 CSPN 模型含有 $M+1$ 种颜色，前 M 种颜色按照元件编号从小到大的顺序与电网内所有元件依次对应，称为元件色，剩余的那种颜色称为控制色，库所和各有向弧上的标注都是 $M+1$ 维向量。该 CSPN 模型中的变迁类似于 FMS 中的加工设备，库所 P_1 、 CB_0 、 CB_{N+3} 类似于 FMS 中的存储仓库，库所 P_0 类似于 FMS 中的物流系统。下文将从库所、变迁、初始标识及外部控制四个方面详细介绍该 CSPN 模型。

1) 库所

库所 P_0 对应着等待传送的元件，每个元件以着不同颜色的托肯区分；根据库所 CB_0 的当前标识可以得到在特定条件下划分出的子系统；库所 P_1 的作用是回收传送带上未进入过渡库所中的元件；库所 $CB_1 \sim CB_N$ 与电网中 N 个断路器依次对应，若库所中含有托肯，表示该库所对应的断路器是闭合的，托

肯的颜色与断路器首尾相连的元件相对应，若库所中没有托肯，表示该库所对应的断路器是断开的；库所 CB_{N+1} 是一个过渡库所，为子系统的划分做准备；库所 CB_{N+2} 是一个控制库所，与子系统传送带的启停开关相对应；库所 CB_{N+3} 对应着搜索结束后所得子系统的个数。

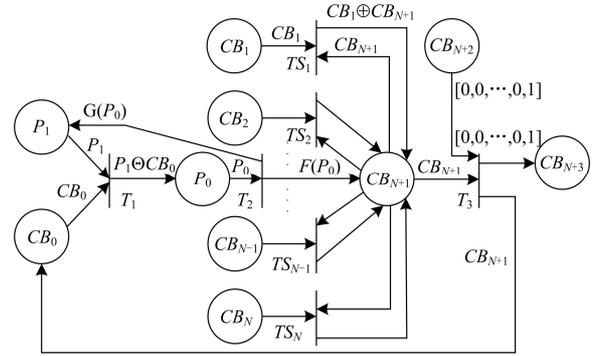


图 2 故障区域搜索的 CSPN 模型

Fig. 2 CSPN model used to detect fault area

2) 变迁

模型中共含有 4 类变迁： T_1 、 T_2 、 TS 及 T_3 。变迁 T_1 的作用是将已划分好的子系统中的元件从库所 P_1 中剔除，其守护函数恒为真；变迁 T_2 的作用是从放入传送带上的元件中选出编号最小的元件作为搜索起始点，并送至过渡库所，其余元件送回库所 P_1 ，其守护函数恒为真；变迁 TS 的作用是找出故障后电网中连接在一起的元件，当变迁 TS 的全部输入库所中含有相同颜色的托肯时，其守护函数才为真；变迁 T_3 的作用是记录已经划分好的子系统，其守护函数恒为真。本文将库所名或库所名通过算子计算所得向量作为部分有向弧上可变的权向量。变迁 T_1 的输入弧上的权向量分别为 P_1 和 CB_0 ，其输出弧上的权向量为 $P_1 \ominus CB_0$ ；变迁 T_2 的输入弧上的权向量为 P_0 ，其输出弧上的权向量分别为 $F(P_0)$ 和 $G(P_0)$ ；变迁 TS_i 的输入弧上的权向量分别为 CB_i 和 CB_{N+1} ，其输出弧上的权向量为 $CB_i \oplus CB_{N+1}$ ($i=2, 3, \dots, N$)；变迁 T_3 的输入弧上的权向量分别为 CB_{N+1} 和 $[0, 0, \dots, 0, 1]$ ，其输出弧上的权向量为 $[0, 0, \dots, 0, 1]$ 。

3) 库所的初始标识

搜索开始前，基于断路器的动作信息，对模型中相关库所赋予着色托肯。 $M_0(P_0)=[1, 1, \dots, 1, 0]$ ，表示将电网中全部元件放上传送带，当 $1 \leq i < N$ ，若断路器 CB_i 闭合，则对库所 CB_i 赋予两个着色托肯，这两种颜色分别对应着断路器 CB_i 始端及终端的元件，例如： $M_0(CB_i)=[1, 1, 0, \dots, 0]$ ，其表示闭合断路器 CB_i 与电网中编号为 1 和 2 的两个元件相连，

而其他库所和跳闸断路器对应的库所中均无任何托肯, 用 $\mathbf{0}([0, 0, \dots, 0])$ 表示。当该 CSPN 模型运行至无任何变迁还能触发时, 即已无任何元件等待传送, 搜索结束。

4) 外部控制

在某些情况下, $TS_1 \sim TS_N$ 及 T_3 中可能有多个变迁同时满足触发条件, 但在实际运行过程中只允许一个变迁能真正触发。为了解决这种冲突, 本文从外部环境对其施加控制来确定变迁触发的优先级。以变迁 $TS_1 \sim TS_3$ 同时满足触发条件的情况为例, 为保证下标小的变迁能优先触发, 引入了如图 3 所示的外部控制装置。在图 3 中, 与控制库所 K_1 、 K_2 及 K_3 相连的有向弧上的权向量均为 $[0, 0, \dots, 0, 1]$, 其他库所、变迁的定义及有向弧上权向量的取值与图 2 中的相同, 不再详述。冲突发生时, 仅在库所 K_1 中赋予一个着控制色的托肯, 库所 K_2 和库所 K_3 中无任何颜色的托肯, 根据式(1)和式(2)可知此时只有变迁 TS_1 满足触发条件, 变迁 TS_1 触发后, 库所 K_1 中着控制色的托肯消失, 库所 K_2 中新增了一个着控制色的托肯, 接着变迁 TS_2 、 TS_3 按照先后顺序依次触发。即引入外部控制装置后, 变迁 $TS_1 \sim TS_3$ 的有效冲突已经消失, 外部控制装置保证了变迁 $TS_1 \sim TS_3$ 依次分享库所 CB_{N+1} 中的公共资源。此外, 在变迁 TS_3 触发前, 由变迁 TS_1 或 TS_2 的触发所引起的库所 CB_{N+1} 标识向量的更新可能会致使新的 TS 类变迁与变迁 TS_3 同时满足触发条件, 此时也可引入相关控制库所以保证新的 TS 类变迁滞后变迁 TS_3 触发。变迁 TS_3 触发后, 再引入类似图 3 所示的外部控制结构以保证新的 TS 类变迁依次触发, 以此类推, 直到找出与作为当前搜索起始点的元件相连接的所有元件。紧接着对控制库所 CB_{N+2} 赋予一个着控制色的托肯, 进而保证了 TS 类变迁优先变迁 T_3 触发。

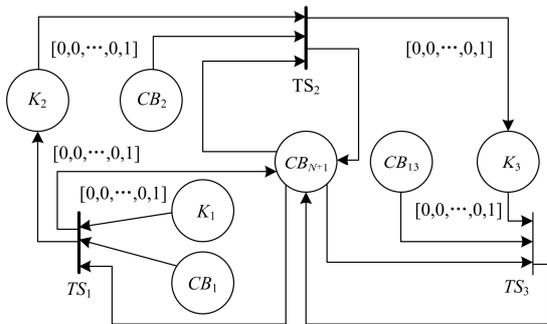


图 3 CSPN 的外部控制装置示意图

Fig. 3 Diagram of CSPN's external control device

3 故障区域搜索过程

基于 CSPN 的电网故障区域搜索, 实质上是在选择某个元件作为初始搜索起始点后, 反复遍历模型中所有变迁以便找出连通的子系统的过程, 直至无任何变迁还能触发, 搜索结束。以图 4 所示的单机无穷大系统为例, 并对图中元件进行编号, 详细解释电网故障区域的搜索过程。在本文中, 线路的上方或者左方定义为线路的送端(S 端), 而线路的下方或者右方定义为线路的受端(R 端), 母线只设有主保护, 变压器和线路都设有主保护和 2 个后备保护, 用 m 、 p 和 s 分别表示主保护、近后备保护和远后备保护。

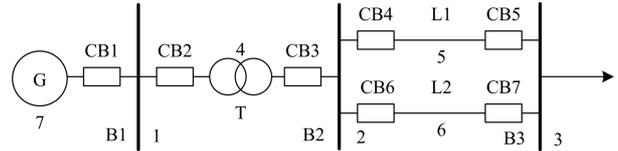


图 4 单机无穷大系统

Fig. 4 Single machine infinite bus system

假设监控中心监测到如下报警信息: 保护装置 L_{1Sm} 、 L_{1Rm} 动作, 断路器 CB_4 、 CB_5 跳闸。该系统对应的故障区域搜索的 CSPN 模型包含 P_0 、 P_1 及 $CB_0 \sim CB_{10}$ 共 13 个库所, 含有 7 种元件色和 1 种控制色。电网故障区域搜索的具体步骤如下:

1) 基于断路器的动作信息, 将所有元件存放在库所 P_0 中, 对模型中相关库所赋予初始托肯值。 $\mathbf{M}_0(P_0)=[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]$, $\mathbf{M}_0(CB_1)=[1, 0, 0, 0, 0, 1, 0]$, $\mathbf{M}_0(CB_2)=[1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]$, $\mathbf{M}_0(CB_3)=[0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0]$, $\mathbf{M}_0(CB_6)=[0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0]$, $\mathbf{M}_0(CB_7)=[0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]$, 其他库所中均无任何托肯。

2) 由 CSPN 的变迁发射规则可知变迁 T_2 满足触发条件, 变迁的触发引起相关库所中托肯数量的变化, $\mathbf{M}_1(P_0)=\mathbf{0}$, $\mathbf{M}_1(CB_8)=[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$, $\mathbf{M}_1(P_1)=[0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]$ 。

3) 变迁 TS_1 、 TS_2 同时满足触发条件, 引入类似图 3 所示的外部控制结构来确保 TS_1 优先 TS_2 触发, 两个变迁触发后, $\mathbf{M}_3(CB_1)=\mathbf{0}$, $\mathbf{M}_3(CB_2)=\mathbf{0}$, $\mathbf{M}_3(CB_8)=[1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$, 使得变迁 TS_3 满足触发条件, TS_3 触发后, $\mathbf{M}_4(CB_3)=\mathbf{0}$, $\mathbf{M}_4(CB_8)=[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$, 紧接着变迁 TS_6 又可以触发, TS_6 触发后, $\mathbf{M}_5(CB_6)=\mathbf{0}$, $\mathbf{M}_5(CB_8)=[1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0]$, 随后变迁 TS_7 触发, 此时, $\mathbf{M}_6(CB_7)=\mathbf{0}$, $\mathbf{M}_6(CB_8)=[1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0]$, 至此, 已找出与作为初始搜索起始点的母线 B_1 相连通的所有元件, 对控制库所 CB_9

赋予一个着控制色的托肯, $M_6(CB_9)=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]$ 。

4) 变迁 T_3 满足触发条件, T_3 触发后, $M_7(CB_8)=O$, $M_7(CB_9)=O$, $M_7(CB_{10})=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]$, $M_7(CB_0)=[1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0]$, 库所 P_1 中的托肯数量一直未变, $M_7(P_1)=[0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]$ 。考虑到库所 CB_0 与划分好的子系统相对应, 把其标识向量 $[1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0]$ 存储在矩阵 D 的第一行中。

5) 变迁 T_1 满足触发条件, T_1 触发后, $M_8(CB_0)=O$, $M_8(P_1)=O$, $M_8(P_0)=[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]$ 。

6) 变迁 T_2 满足触发条件, T_2 触发后, $M_9(P_0)=O$, $M_9(P_1)=O$, $M_9(CB_8)=[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]$ 。

7) 变迁 $TS_1 \sim TS_7$ 均不满足触发条件, 表示此时作为搜索起始点的线路 L_1 本身构成孤立子系统, 对控制库所 CB_9 再次赋予一个着控制色的托肯, $M_9(CB_9)=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]$ 。

8) 变迁 T_3 满足触发条件, T_3 触发后, $M_{10}(CB_8)=O$, $M_{10}(CB_9)=O$, $M_{10}(CB_{10})=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2]$, $M_{10}(CB_0)=[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]$, 同理, 把库所 CB_0 的标识向量 $[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]$ 存储在矩阵 D 的第二行中。

9) 此时, $M_{10}(P_1)=O$, $M_{10}(CB_0)=[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]$, 变迁 T_1 及其他变迁均不满足触发条件, 搜索结束。库所 CB_{10} 中有 2 个着控制色的托肯, 表示最后得到了两个子系统, 根据矩阵 D 中各行向量取值可知, 2 个子系统分别为 $D_1=\{B_1, B_2, B_3, T, L_2, G\}$, $D_2=\{L_1\}$, 子系统 D_1 中含有元件 G , 是有源子系统, 而子系统 D_2 为无源子系统, 独自构成故障区域, 即线路 L_1 为故障元件。

综上所述, 基于 CSPN 的电网故障区域识别方法的实施流程如图 5 所示。

4 仿真验证

图 6 所示的某局部电网共有 32 个元件、保护装置和断路器的数量分别为 84、40, 元件编号均在图中已标注, 本文以 NetBeans 为开发环境, 运用 Java 语言编程设计了一个可运用于该电网故障区域搜索的应用程序, 算例的具体数据与文献[17]相同。

4.1 主界面

电网故障区域搜索主界面如图 7 所示, 正常状态下, 电网内全部元件投入运行, 选中“全选”, 即主界面中勾选所有断路器, 表示所有断路器均闭合, 当局部故障时, 根据监控中心收集到的报警信息, 不勾选跳闸的断路器, 同时在“报警信息”栏

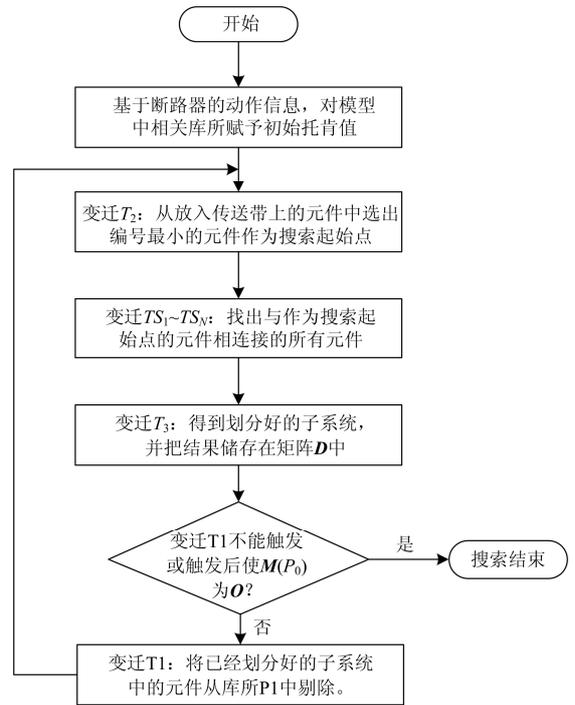


图 5 算法流程框图

Fig. 5 Flow diagram of the algorithm

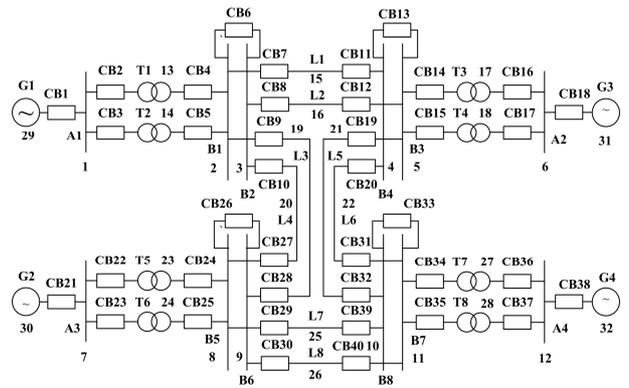


图 6 某局部电力系统示意图

Fig. 6 Diagram of a power system

中给出相应报警提示, 接着单击“搜索”对电网故障区域进行搜索, “搜索结果”栏中将显示所有有源区域、故障区域及子系统总数, 将所有故障区域中的元件组合即可得到可疑故障元件集。

4.2 算例分析

算例 1: 单重故障。监控中心监测到如下报警信息: 保护装置 B_{1m} 、 L_{2Rs} 和 L_{4Rs} 动作, 断路器 CB_4 、 CB_5 、 CB_7 、 CB_9 、 CB_{12} 和 CB_{27} 跳闸, 即为图 7 所示主界面中描述的故障情况。

基于本文所提方法构建的故障区域搜索的 CSPN 模型包含 P_0 、 P_1 及 $CB_0 \sim CB_{43}$ 共 46 个库所,

续表 1

步	含托肯的库所	库所 CB_{41} 的标识向量	使能变迁	激活变迁	触发变迁
12	$P_1, CB_{11,13-26,28-41,43}$	[0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{11,13-26,28-40}$	无	无
13	$P_1, CB_{11,13-26,28-43}$	[0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{11,13-26,28-40}, T_3$	T_3	T_3
14	$P_1, CB_{0,11,13-26,28-40,43}$	[0 0]	T_1	T_1	T_1
15	$P_0, CB_{11,13-26,28-40,43}$	[0 0]	T_2	T_2	T_2
16	$P_1, CB_{11,13-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 0]	$TS_{11,13-26,28-40}$	$TS_{11,13,20}$	TS_{11}
17	$P_1, CB_{13-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 0]	$TS_{13-26,28-40}$	$TS_{13,20}$	TS_{13}
18	$P_1, CB_{14-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 1 0]	$TS_{14-26,28-40}$	$TS_{14-15,19-20}$	TS_{20}
19	$P_1, CB_{14-19,21-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 1 0]	$TS_{14-19,21-26,28-40}$	$TS_{14-15,19,31}$	TS_{14}
20	$P_1, CB_{15-19,21-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{15-19,21-26,28-40}$	$TS_{15-16,19,31}$	TS_{15}
21	$P_1, CB_{16-19,21-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{16-19,21-26,28-40}$	$TS_{16-17,19,31}$	TS_{19}
22	$P_1, CB_{16-18,21-26,28-41,43}$	[0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{16-18,21-26,28-40}$	$TS_{16-17,31-32}$	TS_{31}
23	$P_1, CB_{16-18,21-26,28-30,32-41,43}$	[0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{16-18,21-26,28-30,32-40}$	$TS_{16-17,32-35,40}$	TS_{16}
24	$P_1, CB_{17-18,21-26,28-30,32-41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{17-18,21-26,28-30,32-40}$	$TS_{17-18,32-35,40}$	TS_{17}
25	$P_1, CB_{18,21-26,28-30,32-41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{18,21-26,28-30,32-40}$	$TS_{18,32-35,40}$	TS_{32}
26	$P_1, CB_{18,21-26,28-30,33-41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{18,21-26,28-30,33-40}$	$TS_{18,33-35,39-40}$	TS_{33}
27	$P_1, CB_{18,21-26,28-30,34-41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	$TS_{18,21-26,28-30,34-40}$	$TS_{18,34-35,39-40}$	TS_{34}
28	$P_1, CB_{18,21-26,28-30,35-41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]	$TS_{18,21-26,28-30,35-40}$	$TS_{18,35-36,39-40}$	TS_{35}
29	$P_1, CB_{18,21-26,28-30,36-41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0]	$TS_{18,21-26,28-30,36-40}$	$TS_{18,36-37,39-40}$	TS_{40}
30	$P_1, CB_{18,21-26,28-30,36-39,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0]	$TS_{18,21-26,28-30,36-39}$	$TS_{18,30,36-37,39}$	TS_{18}
31	$P_1, CB_{21-26,28-30,36-39,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-26,28-30,36-39}$	$TS_{30,36-37,39}$	TS_{30}
32	$P_1, CB_{21-26,28-29,36-39,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-26,28-29,36-39}$	$TS_{26,28,36-37,39}$	TS_{36}
33	$P_1, CB_{21-26,28-29,37-39,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-26,28-29,37-39}$	$TS_{26,28,37-39}$	TS_{37}
34	$P_1, CB_{21-26,28-29,38-39,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-26,28-29,38-39}$	$TS_{26,28,38-39}$	TS_{39}
35	$P_1, CB_{21-26,28-29,38,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-26,28-29,38}$	$TS_{26,28-29,38}$	TS_{26}
36	$P_1, CB_{21-25,28-29,38,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-25,28-29,38}$	$TS_{24-25,28-29,38}$	TS_{28}
37	$P_1, CB_{21-25,29,38,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-25,29,38}$	$TS_{24-25,29,38}$	TS_{29}
38	$P_1, CB_{21-25,38,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0]	$TS_{21-25,38}$	$TS_{24-25,38}$	TS_{38}
39	$P_1, CB_{21-25,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0]	TS_{21-25}	TS_{24-25}	TS_{24}
40	$P_1, CB_{21-23,25,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0]	$TS_{21-23,25}$	$TS_{22,25}$	TS_{25}
41	$P_1, CB_{21-23,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 0]	TS_{21-23}	TS_{22-23}	TS_{22}
42	$P_1, CB_{21,23,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 0]	$TS_{21,23}$	$TS_{21,23}$	TS_{23}
43	$P_1, CB_{21,41,43}$	[0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 0]	TS_{21}	TS_{21}	TS_{21}
44	$P_1, CB_{41,43}$	[0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0]	无	无	无
45	P_1, CB_{41-43}	[0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0]	T_3	T_3	T_3
46	$P_1, CB_{0,43}$	[0 0]	T_1	T_1	T_1
47	CB_{43}	[0 0]	无	无	无

4.3 算法对比分析

针对本文 4.2 节中的算例 1, 分别采用广度搜索法^[3]、邻接矩阵法^[7]和本文所提方法进行故障区域搜索, 重复测试 100 次的总耗时情况如表 2 所示。上述算法均是在主频为 2.6 GHz 双核处理器、内存容量为 2 GB 的 PC 机上采用 Java 语言编程实现。

表 2 三种搜索方法的比较

Table 2 Comparison among three searching methods

算例	故障区域搜索方法		
	广度搜索法/ms	邻接矩阵法/ms	本文方法/ms
算例 1	328	816	195

由表 2 可知: 邻接矩阵法消耗的时间最多, 一方面矩阵的自乘运算量较大, 另一方面搜索过程中的数据存储空间较大, 影响了运算效率; 广度搜索法压缩了数据存储空间, 其运算效率优于邻接矩阵法, 但对类似图 6 所示的环网的适应性较差; 本文所提方法进一步减少数据存储空间, 仅需知道库所 P_0 、 $CB_1 \sim CB_N$ 的初始标识即可运行 CSPN, 主要计算量为矩阵的加减运算及简单的逻辑判断, 其运算效率最高。

当断路器状态发生变化时: 邻接矩阵法需要重新生产邻接矩阵, 算法的适应性较差; 广度搜索法

存储拓扑信息的数据结构也要进行较大修改, 适应性也有待提高; 而本文所提方法仅需更新 CSPN 模型中与相关断路器对应的库所的初始标识向量, 适应性强且操作简单。此外, 基于 CSPN 的图形化表示方法使复杂的逻辑关系更加形象化, 且能直观地描述系统的动态特性。

5 结论

1) 本文提出的基于 CSPN 的电网故障区域识别方法可以图形化地描述电网的动态特性, 原理简单且思路清晰, 能快速准确地确定故障区域, 有助于电网故障诊断的后续工作顺利进行。

2) 以 NetBeans 为开发环境, 运用 Java 语言编程开发了电网故障区域搜索软件系统, 该系统能较好地适应断路器实时状态的变化。

3) 针对断路器的动作信息丢失的情况, 本文提出的方法可能无法获得电网故障区域, 进一步研究工作中将尝试在模型的建立过程中结合广域测量系统提供的电气信息来完善电网故障区域识别方法。

参考文献

- [1] 边莉, 边晨源. 电网故障诊断的智能方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 146-153.
BIAN Li, BIAN Chenyuan. Review on intelligence fault diagnosis in power networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 146-153.
- [2] 熊国江, 石东源. 电网故障诊断改进解析模型及其自适应生物地理学优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 205-211.
XIANG Guojiang, SHI Dongyuan. An improved analytic model for fault diagnosis of power grids and its self-adaptive biogeography-based optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 205-211.
- [3] 史述红, 杨宛辉, 王克文. 城市 110 kV 电网故障元件的快速识别[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 37-40.
SHI Shuhong, YANG Wanhui, WANG Kewen. Identification of faulty components in 110 kV urban power networks[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 37-40.
- [4] 孙伟, 李林川, 卢庆聪, 等. 基于停电区域的电力系统故障诊断的一种新模型[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 30-34.
SUN Wei, LI Linchuan, LU Qingcong, et al. A new method for power system fault diagnosis based on power supply interrupted region[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 30-34.
- [5] 梅念, 石东源, 杨雄平, 等. 基于开关变位信息的电网可疑故障元件集识别方法[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 80-84.
MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Xiongpeng, et al. An identification method of suspicious faulty device aggregate for power systems based on position change information of breakers[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 80-84.
- [6] 姚余斌, 王丹, 吴志良, 等. 方程求解法网络拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 79-83.
YAO Yubin, WANG Dan, WU Zhiliang, et al. Network topology analysis by solving equations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 79-83.
- [7] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-13.
WANG Xiangzhong, LI Xiaolan. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-13.
- [8] 王磊, 李耀华, 刘志刚. 基于 OOCNP 结线分析和反向推理的城市轨道交通牵引供电系统故障诊断方法[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 52-58.
WANG Lei, LI Yaohua, LIU Zhigang. Fault diagnosis method for the traction power supply system of urban rail transit based on OOCNP topology analysis and backward reasoning[J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 52-58.
- [9] 曾庆锋, 何正友, 杨健维. 基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 5-11.
ZENG Qingfeng, HE Zhengyou, YANG Jianwei. Fault diagnosis model of electric power systems based on coloured Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 5-11.
- [10] 时谊, 余维, 张丹, 等. 基于有色 Petri 网的变电站监控数据版本控制建模与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 98-104.
SHI Yi, SHE Wei, ZHANG Dan, et al. Modeling and research on substation SCADA data versions control based on colored Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 98-104.
- [11] 程学珍, 陈强, 于永进, 等. 基于最大似然译码字的 Petri 网电网故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 46-52.
CHENG Xuezhen, CHEN Qiang, YU Yongjin, et al. A fault diagnosis approach of power networks based on maximum likelihood decoding petri net models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 46-52.

- 46-52.
- [12] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 181-187.
- [13] 文福拴, 钱源平, 韩祯祥, 等. 利用保护和断路器信息的电力系统故障诊断与不可观测的保护的的状态识别的模型与 Tabu 搜索方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5): 1-8.
WEN Fushuan, QIAN Yuanping, HAN Zhenxiang, et al. A Tabu search based approach to fault section estimation and state identification of unobserved protective relays in power systems using information from protective relays and circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(5): 1-8.
- [14] 赖晓平, 周鸿兴, 王良. 电力系统结线分析的有色 Petri 网方法[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(5): 726-731.
LAI Xiaoping, ZHOU Hongxing, WANG Liang. A coloured Petri net based algorithm for the topology analysis of Power networks[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(5): 726-731.
- [15] 赖晓平, 周鸿兴. 电力系统网络拓扑分析的有色 Petri 网模型[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 5-10.
LAI Xiaoping, ZHOU Hongxing. Coloured Petri-net models for topology analysis of power networks[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 5-10.
- [16] 郝东, 蒋昌俊, 林琳. 基于 Petri 网与 GA 算法的 FMS 调度优化[J]. 计算机学报, 2005, 28(2): 201-208.
HAO Dong, JIANG Changjun, LIN Lin. Petri net based modeling and GA based scheduling for FMS[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(2): 201-208.
- [17] 谢红涛, 童晓阳. 基于分层模糊 Petri 网的电网故障综合诊断方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 246-252.
XIE Hongtao, TONG Xiaoyang. A method of synthetical fault diagnosis for power system based on fuzzy hierarchical petri net[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 246-252.
- [18] 王磊, 陈青, 李天友, 等. 停电区域边界断路器信息缺失时的电网故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 127-134.
WANG Lei, CHEN Qing, LI Tianyou, et al. Power system fault diagnosis considering absence of alarm messages of circuit breakers on the border of outage area[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 127-134.
- [19] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [20] 李珊, 何怡刚, 项胜, 等. 基于故障电压比较与多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 92-98.
LI Shan, HE Yigang, XIANG Sheng, et al. A wide backup protection algorithm based on fault voltage comparison and multi-information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 92-98.

收稿日期: 2015-04-09; 修回日期: 2015-05-08

作者简介:

谢敏(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制;

吴亚雄(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与故障诊断; E-mail: jxpxlxwyx@163.com

黄庶(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制。

(编辑 葛艳娜)