

DOI: 10.7667/PSPC151181

基于模型与模糊 Petri 网融合的高铁牵引变压器故障诊断

戴晨曦, 刘志刚, 胡轲琰, 高松

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对基于模型诊断方法(Model-based Diagnosis, MBD)存在的处理不确定性和组件间的关联关系方面的问题, 基于互补融合的思想, 将模糊 Petri 网与 MBD 有机结合在一起, 提出了一种高速铁路牵引变压器外部故障和内部故障诊断的新方法。建立牵引变压器结构和功能的两层模型, 通过离线搜索最小冲突候选集和在线识别最小冲突集, 实现牵引变压器的外部故障诊断。对于内部故障的诊断, 采用 MBD 进行牵引变压器故障元件定位, 利用模糊 Petri 网进行区域知识表示, 推理实现内部故障类型诊断。以武广高速三相 V/x 接线牵引变压器故障数据为实例进行分析, 诊断结果验证了 MBD 与模糊 Petri 网融合的牵引变压器故障诊断方法的可行性和有效性。

关键词: 基于模型诊断; 模糊 Petri 网; 牵引变压器; 故障诊断; 高速铁路

Fault diagnosis for traction transformer of high speed railway on the integration of model-based diagnosis and fuzzy Petri nets

DAI Chenxi, LIU Zhigang, HU Keting, GAO Song

(School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The problem with regard to the uncertainty and the relationship between the components exists in the model-based diagnosis method. Aiming at this issue, based on the idea of complementary integration, this paper proposes a method of mode-based diagnosis combining with fuzzy Petri Nets to diagnose traction transformer. For the external faults of the traction transformer, the model-based method is directly implemented to build a two-layer model based on the structure and function using voltage and current as variables. The minimal conflict set candidates and the minimal conflict sets are introduced by offline search and on-line recognition to realize the diagnosis. For the internal faults of the traction transformer, the model-based method is implemented to obtain the fault component localization and the fuzzy Petri Nets is used to realize the regional modeling and diagnostic reasoning. By diagnosing the three-phase V/x connected traction transformer faults of Wuhan-Guangzhou High-Speed Railway, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134205, No. U1434203, and No. 51377136).

Key words: model-based diagnosis; fuzzy Petri nets; traction transformer; fault diagnosis; high-speed railway

0 引言

牵引变压器的安全稳定运行直接关系整个牵引供电系统的可靠运行, 因而必须重视牵引变压器相关故障的预防和诊断。变压器故障诊断方法总体来说可分为数据驱动的方法和基于模型的方法, 数据驱动的方法需要先验信息, 常用的数据驱动方法如

神经网络^[1]、专家系统^[2]、模糊理论^[3]均是通过利用先验信息对故障特征信号进行处理实现诊断。人工神经网络使用的前提是能提供大量有代表性的样本用于学习, 其次它不具备知识解释能力, 专家系统知识规则的建立和维护比较困难, 模糊理论在建立准确的模糊集的隶属度函数方面存在问题。牵引变压器负荷具有极度不稳定、谐波含量大等特点, 运行环境比一般电力负荷恶劣的多, 因此要求牵引变压器过负荷和抗短路冲击的能力要强, 这也就使得在实际运行中与一般电力变压器相比牵引变压器有

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1134205, U1434203, 51377136)

其特殊性。受负载特性和接线方式的影响, 牵引变压器结构、运行环境更复杂, 存在诸多复杂的故障情况, 这就造成得到的故障信息和检测信息不完备, 故障诊断难度增大, 使得上述方法在诊断能力、适应度和知识获取方面不能到达理想效果。

基于模型诊断(Model-based Diagnosis, MBD)最早是在 20 世纪 70 年代由部分国外学者提出的, 建模思想是根据系统各组成元件的结构功能建立元件及元件间的网络拓扑模型, 是利用系统的“深知识”进行建模^[4-5]。模型相关知识可根据对象原理直接获得, 省略了知识的积累过程, 克服了传统人工智能技术的不足, 同时系统建模和系统诊断是完全独立分开进行的, 这就使得基于模型方法具有很高的独立性和可移植性。目前, MBD 在电力系统中的应用也日益增多, 如: 文献[6]将 MBD 应用于电网故障分析, 并在此基础上制定了电网中断路器、输电线、母线等的建模规则; 文献[7]将 MBD 应用于配电网线路的建模实现了对配电网的故障诊断; 文献[2]采用 MBD 方法对牵引变压器进行建模实现故障诊断。Petri 网^[8-9]是以图形方式进行知识表示的计算机系统模型, 其适于描述异步并发现象, 是对并行及并发系统实现行为分析的有效工具, 广泛应用于各种建模诊断推理中。如文献[8]先采用粗糙集理论决策约简实现变压器故障特征的压缩, 再对约简知识建立 Petri 网模型, 优化了网络结构提高了诊断效率。模糊 Petri 网由于加入了模糊因素, 能有效描述和分析不确定问题, 克服了传统 Petri 网在处理模糊命题上的缺陷, 在变压器故障诊断中能以图形化的方法实现知识表示和诊断推理^[10-11]。文献[11]直接采用模糊 petri 网建模对变压器进行故障诊断, 诊断过程简单易行。将模糊 Petri 网与 MBD 相结合可以弥补其独立性和移植性不佳的问题, 利用两者在建模中的各自优点能有效实现牵引变压器故障诊断。

本文提出将 MBD 与模糊 Petri 网的融合故障诊断方法应用于高速铁路牵引变压器故障诊断, 主要包括对外部故障和内部故障的分别诊断。对于外部故障直接采用 MBD, 通过两层建模获得冲突集^[12]、碰集^[13]、候选诊断, 最后得到诊断结果; 对于内部故障, 由于 MBD 对内部模型建立关联关系存在不足, 基于互补融合的思想, 将 MBD 与模糊 Petri 网有机结合, 先利用 MBD 实现故障定位, 然后通过模糊 Petri 网区域建模推理得到诊断结果, 最后以一台实际的三相 V/x 接线牵引变压器为诊断实例来验证和分析论文提出的这种应用方案的效果。

1 MBD 和模糊 Petri 网的知识简约

1.1 MBD 的原理简介

MBD 诊断方法的基本思想如图 1 所示, 利用系统构成元件、元件功能及元件间的相互联系建立系统模型, 实现对系统结构和功能的描述。其诊断原理是根据实际观测与系统预测是否有差异判断故障与否, 能够发现初始设计者不能预见的故障。

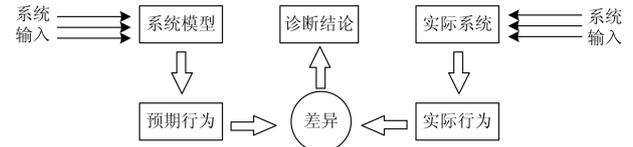


图 1 MBD 的基本思想

Fig. 1 Basic idea of model-based diagnosis

MBD 方法的基本概念^[12-14]:

(1) 诊断系统: 采用一个三元组 $\{SD; OBS; COMP\}$ 来表示诊断系统, 其中 SD 表示系统的模型描述, OBS 表示系统的观测值, COMP 表示组成系统的元件集合。

(2) 冲突集及最小冲突集: 冲突集是系统的元件集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 且必须满足 $SD \cup OBS \cup \{\neg AB(c_1), \neg AB(c_2), \dots, AB(c_n)\}$ 不一致。 $\neg AB(c_n)$ 表示元件正常, $AB(c_n)$ 则表示元件故障。一个冲突集要为最小冲突集必须满足它的任意非空真子集都不是冲突集。

(3) 碰集及最小碰集: 设 C 是一个集合簇, C 的碰集是满足 $H \subseteq \bigcup_{S \in C} S$ 和 $\forall S \in C, H \cap S \neq \emptyset$ 的集合 H 。所有冲突集并集的子集构成碰集, 它与任一冲突集均有交集。一个碰集要为最小碰集必须满足它的任意非空真子集都不是碰集。

(4) 解析冗余关系: 解析冗余关系是利用系统可观测变量构造的描述系统模型的约束方程。在给定任一组观测值后该方程即能被求解, 记为 $\gamma=0$, γ 为残差。

(5) 诊断: 系统的诊断 Δ 可分为一致性诊断和溯因诊断。确定 Δ 是系统的一个诊断必须满足它是系统所有最小冲突集的最小碰集。最后通过求解最小碰集获得最终诊断。

1.2 模糊 Petri 网的理论构造

一个模糊 Petri 网结构可用一个八元组表示: $FPN = (P, T, K, \alpha, \beta, I, O, U)$ 。其中, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所节点的有限集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为变迁节点的有限集合; $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ 为库所初始托肯的有限集合; $\alpha \subseteq (P \times T)$ 和 $\beta \subseteq (T \times P)$ 分别表示库所到变迁和变迁到库所的有向弧; I 和 O 分别表示变迁到

库所的输入函数和库所到变迁的输出函数； U 是规则的置信因子， $U \in [0,1]$ 。

对于一个具有 m 个库所 n 个变迁的模糊 Petri 网模型可定义其输入输出映射矩阵和连接非连接输入映射矩阵,四个矩阵均为 m 行 n 列的二进制矩阵。 $D^+=[d_{ij}^+]$ 表示从变迁 T_j 到库所 P_i 间是否存在一条有向弧,有则 $d_{ij}^+=1$,无则为 0; $D^-=[d_{ij}^-]$ 表示库所 P_i 到变迁 T_j 间是否存在一条有向弧,有则 $d_{ij}^-=1$,无则为 0; $D_c^=[(d_c^-)_{ij}]$ 表示模糊 Petri 网中各连接变迁,即是将输入映射矩阵中非连接变迁元素用 0 替换得到的矩阵; $D_a^=[(d_a^-)_{ij}]$ 表示模糊 Petri 网各非连接变迁,即是将输入映射矩阵中连接变迁元素用 0 替换得到的矩阵。

2 MBD 和模糊 Petri 网融合的牵引变压器故障诊断

牵引变压器的复杂结构不可避免地使其故障种类繁多,一般可以根据不同的分类标准得到不同的分类。本文按照变压器的结构将故障分为两类:一类为铁芯短路、匝地短路等不能通过直接观察建立量测量关系的内部故障;另一类为相间短路、单相接地短路等通过观测量测量可进行判断的外部故障。MBD 以电流、电压互感器量测量为变量,对模型等效电路进行分析获得其表征关系式,建立牵引变压器的结构抽象模型,通过逻辑运算实现最小冲突集、碰集的计算,最终得到诊断结果,这种基于系统“深知识”的建模方法能够很容易判断出系统是否发生故障。对于牵引变压器的外部故障,MBD 不仅可以通过一致性诊断判断故障发生与否,还能通过溯因诊断确定故障类型。对于牵引变压器的内部故障,由于其建模基础为利用量测量建立描述变压器正常或故障行为的等式,因而只能通过一致性诊断判断故障发生与否,无法利用溯因诊断确定故障类型。模糊 Petri 网能以图形化的方式实现知识表示,因而能根据已有知识规则建立牵引变压器内部故障模型,由于 MBD 的一致性诊断过程能实现故障定位缩小故障范围,模糊 Petri 网只需对局部区域进行建模,这就降低了模型完备性和复杂性对模糊 Petri 网建模精度的影响,提高了诊断准确性。因此,本文将 MBD 与模糊 Petri 网融合进行牵引变压器故障诊断,诊断流程如图 2 所示,其中虚线框表示 MBD 进行外部故障诊断,整体框图表示对内部故障进行诊断。

本文采用 MBD 方法对实际高铁 V/x 接线牵引变压器建立两层抽象模型,第一层为实现一致性诊断判断系统正常与否的小元件正常模型,第二层为

实现溯因诊断确定故障类型的大元件模型,其中包含小元件与小元件间的故障行为。针对牵引变压器外部故障直接利用 MBD 方法进行故障诊断,针对内部故障采用 MBD 与模糊 Petri 网结合进行故障诊断,具体诊断实现过程见 3、4 小节。

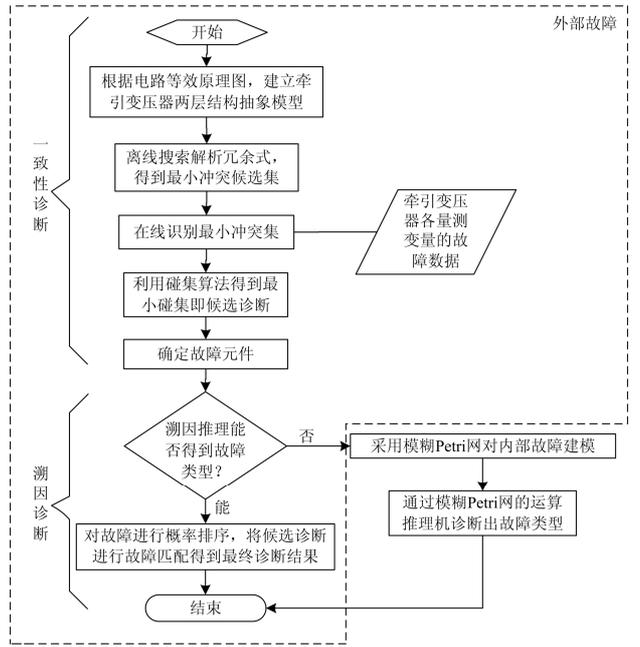


图 2 MBD 与模糊 Petri 网融合的牵引变压器故障诊断流程
Fig. 2 Flow chart of fault diagnosis for traction transformer on the basis of model-based diagnosis and fuzzy Petri nets

3 MBD 的牵引变压器外部故障

3.1 牵引变压器外部故障诊断方案

由于监控牵引变压器运行的各电流、电压互感器的位置一般是固定的,本文借鉴文献[2]中的方法,将 MBD 理论应用于牵引变压器的故障诊断,其诊断过程主要为四步:系统建模、冲突识别、候选产生、诊断鉴别。具体诊断方案如图 2 所示。

(1) 系统建模:将牵引变压器各进出线电压电流作为系统模型变量,根据模型原理建立牵引变压器的结构和功能模型。建模思路采用分层结构抽象模型,对牵引变压器建立两层模型结构,第一层为小元件的正常模型,第二层为大元件模型,描述小元件和小元件间的故障行为。

(2) 冲突识别:对正常牵引变压器的模型进行离线搜索得到正常运行下的解析冗余关系,此即得到最小冲突候选集,解析冗余关系是由电流、电压互感器所测得相关状态信息建立的数学关系式。故障发生后,将电流、电压互感器测得的牵引变压器故障电流电压带入相关解析冗余式检验其是否满足等式关系,若不满足,则由上述最小冲突候选集得到

一个最小冲突集, 此即在线诊断过程。

(3) 候选产生: 利用人工智能领域中的碰集计算方法如各种逻辑运算法求取最小冲突集的最小碰集, 得到所有的最小候选诊断。

(4) 将候选诊断代入元件的故障约束中进行故障匹配, 根据经验考虑元件的故障概率, 最终确定故障元件及故障类型。

3.2 建模验证

3.2.1 系统整体描述

图 3 为武广高铁线某牵引变电所三相 V/x 接线的牵引变压器原理图, 它实质上是由两台单相 3 绕组变压器(用 T1 和 T2 表示)组合而成的变压器。图中 A、B、C、T、F、N 分别代表电力系统三相电路和变压器次边所接的接触网、正馈线出线端、接地端。

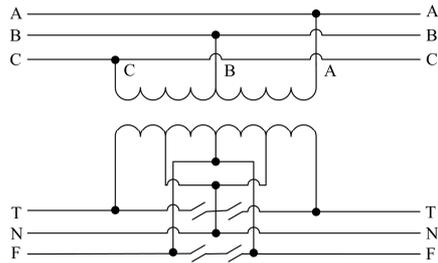


图 3 高速铁路 V/x 接线牵引变压器原理图
Fig. 3 V/x wiring principle diagram of traction transformer in high speed railway

3.2.2 抽象系统元件

牵引变压器建模的基础即是对系统元件进行抽象, 考虑该牵引变压器系统主要由进出线、绕组和铁芯组成。系统中的电流、电压互感器主要用于提供系统状态信息, 这里不考虑电流、电压互感器的故障, 基于此可认为测量得到的数据都是正确的。该牵引变压器的抽象元件如下:

$$\{T_{11}, T_{21}, T_1, T_{12}, T_{22}, T_{12}, T_{21}\}$$

其中 T_{11} , T_{21} 分别表示两个单相变压器的一次侧, 是独立的小元件模型; T_1 表示 V/x 接线的三相牵引变压器一次侧, 是大元件模型, T_{11} , T_{21} 为其内部小元件。 T_{12} , T_{22} 分别表示两个单相变压器的二次侧, 是独立的小元件模型; T_{12} , T_{21} 为单相变压器二次侧的大元件模型, 相应的其内部小元件为 T_{12} , T_{22} 。

3.2.3 系统元件建模

根据图 3 所示可得图 4(以 T1 为例)中所示的该牵引变压器的单相变压器等效电路图。其中 Z_{ab} 为原边绕组等效短路阻抗, Z_m 为折算到原边的 T 绕组的短路阻抗, Z_n 为折算到原边的 F 绕组短路阻抗, Y_m 为折算到原边的等效励磁导纳。假设上述变压器

是理想变压器且变比为 220 kV/27.5 kV, 其等效电路参数如表 1。

表 1 单相牵引变压器等效电路参数值

Table 1 Parameter value of equivalent circuit of single-phase traction transformer in high speed railway

名称	Z_{ab}/Ω	Z_m/Ω	Z_n/Ω	$Y_m/(10^{-7}S)$
T1	3.524+j101.64	5.506+j101.64	14.094+j101.64	4.959-j25.826
T2	4.659+j127.05	7.280+j127.05	18.034+j127.05	4.339-j20.661

该单相变压器的观测变量为 $\{V_A, V_B, V_{AB}, V_T, V_F, V_{TF}, I_A, I_B, I_T, I_F, I_N\}$, 其中变量的下标表示相应连接线的电压、电流。

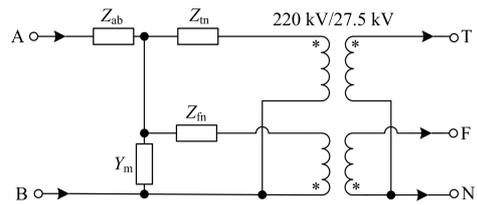


图 4 高速铁路单相变压器等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of single-phase traction transformer in high speed railway

对该单相变压器等效电路采用基尔霍夫定律建立的模型关系式如式(1)和式(2), 此为变压器第一层模型中的正常模型关系, 第二层中的故障模型则根据不同故障类型分别表示。

$$\begin{cases} I_A + I_B = 0 \\ I_T + I_F + I_N = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_A = \frac{I_T}{k} - \frac{I_F}{k} + \left(\frac{I_T}{k} \cdot Z_m + k \cdot V_m\right) \cdot Y_m \\ V_{AB} = I_A \cdot Z_{ab} - \frac{I_F}{k} \cdot Z_n + k \cdot V_{FN} \\ V_{TF} = V_{TN} - V_{FN} \end{cases} \quad (2)$$

3.2.4 系统解析冗余关系与最小冲突候选集

监控设备布置的固定性使得相应的解析冗余关系可通过得到的牵引变压器监控信息产生。采用文献[15]中的搜索算法, 离线搜索得到系统正常模型的解析冗余关系, 进而可得到相应的最小冲突候选集。对该牵引变压器进行离线搜索可得到 10 个解析冗余及对应的最小冲突候选集。如解析冗余关系 $I_{11_A} + I_{11_B} = 0$ 对应的最小冲突候选集即为 $\{T_{11}\}$ 。

3.2.5 系统在线诊断

假设该牵引变压器 T1 出线端 A 相接地短路, 表 2 所示为仿真得到在此情况下的电流电压互感器测量值, V_{11_A} 表示第一个单相变压器的一次侧 A 相电压, 其余测量值命名方法相同。

表 2 故障情况下牵引变压器各互感器测量值
Table 2 Measured values of all transformers during fault condition in traction substation

测量值	幅值	相角
V_{11_A}	0	0
V_{11_B}	2.1943×10^5	-120.01
V_{21_C}	2.1939×10^5	119.99
V_{11_AB}	2.1943×10^5	59.99
V_{21_BC}	3.8003×10^5	-90.01
V_{12_TN}	2.7389×10^4	59.81
V_{12_FN}	2.7391×10^4	-120.18
V_{22_TN}	4.7436×10^4	-90.19
V_{22_FN}	4.7438×10^4	89.81
I_A	3.4750×10^4	-81.87
I_B	7.5558	-63.30
I_C	4.9463	127.59
I_{12_T}	1.2685	14.74
I_{12_F}	2.3166	-165.15
I_{12_N}	1.0481	14.99
I_{22_T}	2.1970	-135.27
I_{22_N}	1.8152	-135.01
I_{22_F}	4.0121	44.85

将表 2 中量测变量代入所得解析冗余关系约束中, 表 3 为各解析冗余关系的残差。实际操作中由于变比的存在变压器模型精度会受到影响, 通过将正常情况下的互感器测量值代入解析冗余关系, 对残差较大的解析冗余关系进行修正, 本文的处理方式是将此类解析冗余关系的残差均乘 10^{-5} , 改善了模型精度对推理诊断的干扰。

表 3 各解析冗余关系的残差值

Table 3 Residual values of analytical redundancy relation

最小冲突候选集	绝对残差	最大项值	相对残差
MinCSC1	1.200×10^{-9}	2.856×10^0	4.202×10^{-10}
MinCSC2	2.236×10^{-9}	4.946×10^0	4.521×10^{-10}
MinCSC3	1.258×10^{-4}	2.317×10^0	5.429×10^{-5}
MinCSC4	1.2887×10^{-4}	4.012×10^0	4.704×10^{-5}
MinCSC5	4.780×10^0	5.478×10^4	8.726×10^{-5}
MinCSC6	1.950×10^{-5}	9.487×10^4	2.055×10^{-10}
MinCSC7	5.763×10^1	5.659×10^6	1.018×10^0
MinCSC8	8.012×10^1	7.841×10^6	1.018×10^{-5}
MinCSC9	6.494×10^2	2.194×10^5	2.959×10^{-3}
MinCSC10	1.101×10^3	3.800×10^5	2.896×10^{-3}

本文的允许相对残差设置为 0.3, 表 3 所示相对残差大于 0.3 的最小冲突候选集为 {MinCSC7}, 其对应的故障元件为 {T₁₁} , 由于只有一个最小冲突候选集此即为最小碰集。

3.2.6 故障匹配

为了迅速诊断出故障元件的故障类型, 一般可

根据经验假设各种故障的发生概率, 本文中将断线故障发生的概率设置为 0.2, 接地故障发生的概率设置为 0.4, 短路故障发生的概率设置为 0.6。在 MBD 的溯因推理中根据故障概率大小优先进行故障匹配。最终得到的诊断结果为 $\{[T_{11}, \{groundA\}]\}$, 推理诊断结果与所设故障仿真一致为第一个单相变压器一次侧 A 相接地故障。

4 MBD 与模糊 Petri 网融合的牵引变压器内部故障诊断

4.1 牵引变压器内部故障诊断方案

针对牵引变压器中诸如线圈接地一类无法建立确定模型关系的内部故障, 先采用 MBD 方法对系统进行一致性诊断实现故障元件定位, 具体实现步骤为: (1) 采用 MBD 方法对变压器建立两层抽象模型; (2) 离线搜索变压器的所有解析冗余式得到最小冲突候选集; (3) 代入故障数据在线识别出最小冲突集; (4) 利用碰集算法得到最小碰集; (5) 根据最小碰集得到的候选诊断确定故障元件。溯因判断无法确定故障类型后对故障元件进行模糊 Petri 网知识表示, 建立相应的故障推理框图。由于故障元件已定, 只需建立区域模糊 Petri 网模型, 最大限度降低了规则完备性对建模精度的影响, 同时也降低了模型复杂性, 通过简单矩阵计算即可诊断出最终结果, 此过程可分为两步: (6) 采用模糊 Petri 网对牵引变压器内部故障建模; (7) 通过模糊 Petri 网的运算推理机得到诊断结果即确定出故障元件的故障类型, 诊断流程图如图 2 所示。

4.2 建模验证

4.2.1 MBD 与模糊 Petri 网的融合故障诊断建模

武广高铁线某牵引变电所牵引变压器第一个单相变压器二次侧发生铁芯段间短路故障后检测到的信息: 介质损耗测试正常, 铁芯无接地电流、铁芯段间电阻近似为 0, 三比值法分析为过热故障。

根据上述故障诊断步骤, 将故障后的牵引变压器各电流、电压互感器状态信息代入上一节 MBD 建模得到的各最小冲突候选集的解析冗余关系约束中, 对应的解析冗余式为 $I_{12_T} + I_{12_F} + I_{12_N} = 0$, 通过在线识别得到最小冲突候选集为 {MinCSC3}, 故障元件为 {T₁₂} 即第一个单相牵引变压器的二次侧, 继续进行溯因推理, 故障匹配不成功说明此故障为内部故障, 不能通过 MBD 的溯因推理求得, 采用模糊 Petri 网对该故障元件建立内部故障诊断模型。

根据文献[8]的方法对变压器故障样本集进行

决策表约简得到如图 5 所示牵引变压器内部故障整体模型, 根据检测信息本次建模不需要考虑前四种故障情况, 只需建立一个用 12 个库所, 7 个变迁表示的模糊 Petri 网牵引变压器内部故障模型。

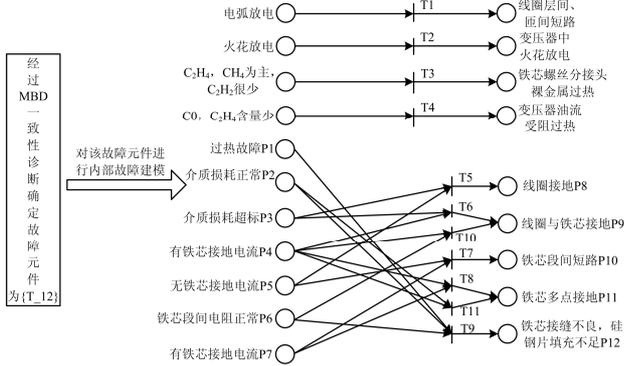


图 5 MBD 与模糊 Petri 网融合的内部故障模型

Fig. 5 Integration of MBD with fuzzy Petri nets model of the internal fault

4.2.2 模糊 Petri 网内部故障推理验证过程

在模糊 Petri 网的推理中, 首先根据系统中的相关信息获得初始托肯矩阵, 然后根据公式(3)计算系统状态。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_i &= [M_1(i), M_2(i), \dots, M_m(i)]^T \\ \mathbf{M}_{i+1} &= [\mathbf{D}^+ \cdot (\mathbf{D}_c^{-T} \otimes \mathbf{M}_i) \triangleright U] \vee \mathbf{M}_i \end{aligned} \quad (3)$$

\mathbf{M}_i 表示经过 i 步后系统各库所的状态, 它是一个前向推理过程, 式(3)中各运算符功能如下:

\vee : $x \vee y = z$, x, y, z 均为 n 维向量

$$c_i = \max(a_i, b_i) \quad (4)$$

\otimes : $X \otimes Y = Z$, $X \in B^{m \times n}$, $Y \in B^{n \times l}$, 令 $Z = X \times Y$, 则有

$$X \otimes Y = f(X \cdot Y) = \begin{bmatrix} f(z_{1l}) \\ f(z_{2l}) \\ \vdots \\ f(z_{ml}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$f(z_{il}) = \frac{z_{il}}{X_i}$, 其中 $X_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}$

$$\triangleright: X \triangleright Y = Z = \begin{bmatrix} z_{1l} \\ z_{2l} \\ \vdots \\ z_{ml} \end{bmatrix}, z_{il} = \begin{cases} z_{il}, & z_{il} \geq y_{il} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

用式(3)反复迭代, 直至 $\mathbf{M}_{i+1} = \mathbf{M}_i$, 即没有变迁可被点火也即点火结束, 以 \mathbf{M}_i 中托肯的变化作为最终结论。

根据所给牵引变电所牵引变压器故障后检测得

到的信息, 根据模糊 Petri 网对其输入输出映射矩阵和连接非连接输入映射矩阵的定义, 由图 6 可得输入映射矩阵 \mathbf{D}^- 、输出映射矩阵 \mathbf{D}^+ 、连接输入映射矩阵 \mathbf{D}_c^- 、非连接输入映射矩阵 \mathbf{D}_d^- 如下:

$$\mathbf{D}^- = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{D}_c^- = \mathbf{D}^-$, $\mathbf{D}_d^- = 0$ 。将检测得到的故障信息对应到 12 个库所, 确定出库所的初始托肯情况, 由所给故障测试信息, 可得初始托肯矩阵 $\mathbf{M}_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 规则置信度由实际经验可得 $\mathbf{U} = [0.85 \ 0.86 \ 0.93 \ 0.8 \ 0.82 \ 0.86 \ 0.8]^T$, 将以上矩阵、向量代入式(3)得 $\mathbf{M}_1 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0.93 \ 0 \ 0]^T$, 再以 \mathbf{M}_1 作为下一次迭代的初始托肯矩阵代入式(3)得 $\mathbf{M}_2 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0.93 \ 0 \ 0]^T$, $\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_2$, 迭代结束, 得到最终诊断结果为第一个单相牵引变压器二次侧铁芯段间短路, 与实际故障情况一致。

5 结论

本文将 MBD 与模糊 Petri 网融合的故障诊断方法应用于高速铁路牵引变压器故障诊断, 实现了外部和内部故障的分别诊断, 具体如下:

(1) 提出一种 MBD 与模糊 Petri 网融合的牵引变压器故障诊断方法, 弥补了 MBD 在处理牵引变压器内部关联关系方面的不足, 对 MBD 在变压器故障诊断中的应用实现了进一步探索。

(2) 建立了牵引变压器正常与故障情况下的两层抽象模型, 通过 MBD 的一致性推理与溯因推理实现外部故障的有效诊断。

(3) 融合 MBD 与模糊 Petri 网各自特点, 利用 MBD 的一致性推理实现故障定位, 然后采用模糊 Petri 网进行知识表示及诊断推理, 对故障实现了清晰直观的诊断。

(4) 本文方法可作为实际高速铁路牵引供电系统故障诊断中牵引变压器的诊断方案, 进一步可研究该方法对系统中其他部分诊断的可行性, 为整个高速铁路牵引供电系统的有效诊断提供一条新的思路。

参考文献

[1] 石鑫, 朱永利, 王刘旺, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, WANG Liuwang, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.

[2] 高松, 刘志刚, 徐建芳, 等. 基于模型诊断和专家系统的牵引变压器的故障诊断研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7): 42-49.
GAO Song, LIU Zhigang, XU Jianfang, et al. Research on fault diagnosis for traction transformer on the basis of model-based diagnosis and expert system[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 42-49.

[3] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.

[4] RANDALL D. Diagnostic reasoning based on structure and behavior[J]. Artificial Intelligence, 1984, 24(1-3): 347-410.

[5] 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.

[6] TRAVE-MASSUYES L, MILINE R. Gas-turbine condition monitoring using qualitative model-based diagnosis[J]. IEEE Expert, 1997, 12(3): 1-24.

[7] 胡非, 刘志刚, 范福强, 等. 配电网线路故障诊断的基于模型诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 56-60.
HU Fei, LIU Zhigang, FAN Fuqiang, et al. Distribution network line fault diagnosis with model-based method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 56-60.

[8] 王楠, 律方成, 刘云鹏, 等. 基于决策表约简的变压器故障诊断 Petri 网络模型及其应用研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 88-93.
WANG Nan, LÜ Fangcheng, LIU Yunpeng, et al. Study on application of Petri nets model of transformer fault diagnosis based on decision table reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 88-93.

[9] 谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 等. 基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 56-64.
XIE Min, WU Yaxiong, HUANG Shu, et al. Identification of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 56-64.

[10] XU Luo, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 29(21): 52-56.

[11] 王建元, 纪延超. 模糊 Petri 网络知识表示方法及其在变压器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 121-125.
WANG Jianyuan, JI Yanchao. Application of fuzzy Petri nets knowledge representation in electric power transformer fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 121-125.

[12] ZHAO Xiangfu, OUYANG Dantong. A method of combing SE-tree to compute all minimal hitting sets[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(2): 169-174.

[13] 胡非, 刘志刚, 何士玉, 等. 一种基于模型的配电网故障诊断搜索算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 81-90.
HU Fei, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Model-based search algorithm of fault diagnosis for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 81-90.

[14] RAYMOND R. A theory of diagnosis from first principles[J]. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57-95.

[15] CORDIER M O, DAGUE P. Conflicts versus analytical redundancy relations: a comparative analysis of the model based diagnosis approach from the artificial intelligence and automatic control perspectives[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2004, 34(5): 2163-2177.

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2016-02-10

作者简介:

戴晨曦(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为基于模型诊断在电力系统故障诊断中的应用; E-mail: sakuro106@126.com

刘志刚(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为轨道交通电气化、自动化技术, 现代信号处理在电力系统中的应用; E-mail: liuzg_cd@126.com

胡轲珽(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为基于模型诊断在牵引供电系统故障诊断中的应用。E-mail: qianyingyueju@gmail.com

(编辑 张爱琴)