

基于改进Petri网模型的变电站二次设备故障快速定位

方勇, 李东璐, 侯梦龙, 刘冠杰, 刘欣

(南方电网调峰调频发电有限公司运行分公司, 广东 清远 513207)

摘要:快速、可靠地定位变电站二次设备故障是确保变电站稳定、安全运行的基础。但是由于变电站二次设备故障信号具有较强的不确定性和随机波动,因此,提出一种基于改进Petri网模型的变电站二次设备故障快速定位方法。引入设备故障时间约束特性以及虚拟有向弧,构建改进模糊Petri网模型。通过确定变迁发射规则和优化变迁参数,结合电流、电压判据,可以判断二次设备故障发生的位置。测试结果表明,该方法的设备故障定位误差低于0.025%,所需时间均在1.2s以内,能精准地获取故障位置。

关键词:改进Petri网模型;变电站;二次设备;故障快速定位;时间约束特性;推理规则

中图分类号:TP183 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)04-0107-05

Fast Fault Location of Secondary Equipment in Substation Based on Improved Petri Net Model

FANG Yong, LI Dong-lu, HOU Meng-long, LIU Guan-jie, LIU Xin

(CSGES Operation Management Branch Company, Qingyuan 513207 China)

Abstract: Quickly and reliably locating secondary equipment faults in a substation is the foundation for ensuring stable and safe operation of the substation. However, due to the strong uncertainty and random fluctuations of substation secondary equipment fault signals, this paper proposes a fast fault location method for substation secondary equipment based on an improved Petri net model. An improved fuzzy Petri net model is constructed by introducing the time constraint characteristics of equipment failures and virtual directed arcs. By determining transition emission rules and optimizing transition parameters, combined with current and voltage criteria, the location of secondary equipment faults can be determined. The test results show that the equipment fault location error of this method is less than 0.025%, and the required time is within 1.2 s. This method can accurately obtain the fault location.

Keywords: improved Petri net model; substation; secondary equipment; quick fault location; time constraint characteristics; inference rule

0 引言

变电站属于电力系统中的一种,用于电压和电流之间的转换。作为电能接收和发送的主要场所,变电站可分为多个等级,最常见的即为电压等级划分,分别为一~四类变电站^[1-2]。变电站由一次和二次设备组成。二次设备可对一次设备完成监控和数据测量,二次设备可对一次设备实现保护功能。常见的二次设备^[3]有继电保护装置、自动装置、测量装置、直流设备等^[4-5]。二次设备在使用过程中,常见的二次设备故障包含直流电压越限、直流接地、电回路断开、触电安装位置错误、互感器电流过高或电压过高、高频通道异常、保护插件损坏等,这些设备一旦发生故障,则导致无法对一次设备的运行进行保护和监视等,会增加变电站的运行风险^[6]。因此,完成二次设备故障的诊断和定位,是保证变电站安全运行的基础。

任博^[7]等人为实现二次设备的故障定位,以二次设备的故障特征为依据,通过深度学习实现故障定位,但是该方法在应用过程中,如果发生多故障时,其定位结果仍旧存在偏差。张宸滔^[8]等人针对二次设备故障定位需求,通过变电站的配置文件制作图数据库,依据该图库分析二次设备之间的关联,并将设备的信息表征结果输入神经网络中,实现故障定位,但是该方法在应用时,如果设备的信息发生丢失,则故障定位精度降低。Mansour^[9]等人为实现变电站设备故障检测,通过卷积神经网络(CNN)分析网络的断路器来训练电压和功率值,从而使网络存在缺陷,再运用故障定位将网络基于模糊干扰的故障定位系统进行,但是,变电站设备故障信号具有较强不确定性,导致故障定位存在偏差,应用效果不理想。

Petri网模型^[10]是一种能够描述离散并行系统的模型,该模型在表示过程中,表达方式有两种,分别为数学表达和图形表达,其具有较好的描述手段和分析能力。

*基金项目:电网的科技项目清蓄项目(02910020220301030200016)

收稿日期:2023-11-24

变电站内所有二次设备故障发生的过程,则属于一个典型的并列、次序的动态过程。因此,为保证变电站二次设备故障的精准定位,文中提出基于改进Petri网模型的变电站二次设备故障快速定位方法,该方法采用Petri网模型构建故障定位模型,可以精准、清晰模拟故障过程,可靠地完成复杂情况下的故障定位。

1 变电站二次设备故障快速定位

1.1 改进Petri网模型构建

1.1.1 故障时间约束特性

本文在进行变电站二次设备故障快速定位时,为保证定位结果的精准性^[11],文中引入时间约束和虚拟有向弧,对Petri网模型进行改进,提升模型的容错性能。

变电站二次设备故障事件记录主要有直流设备、变压器等设备发生故障 $C=[c_1, c_2, \dots, c_N]$,其中 N 为该类事件的数量;由设备导致的保护装置发生动作形成的动作信息,其集合用 $A=[a_1, a_2, \dots, a_M]$ 表示,其中, M 表示预警信息数量。

变电站二次设备故障定位则是依据 C 和 A 的动作时间、时间约束关联确定设备故障;其中,需要对海量的 A 进行初步筛选,将其中时序存在差异的信息删除,该筛选通过二元时间约束完成。

1.1.2 改进模糊Petri网模型

充分结合 C 和 A 之间的时间约束特性,采用6元组对该模型进行定义,其表达式为:

$$S_{IFPN} = [P, T, W, O, \alpha, T_0] \quad (1)$$

式中: S_{IFPN} 表示基网; $P=[p_1, p_2, \dots, p_n]$ 表示节点集合,其主要作用是存放二次设备运行数据资源。 $T=[t_1, t_2, \dots, t_m]$ 表示有限结合,对应变迁节点,其主要作用是完成两个库所之间状态转换。 $W=[W_{ij}], W_{ij} \in [0, 1]$ 表示有向弧权重; $O=[o_{ij}], o_{ij} \in [0, 1]$ 表示有向弧置信度; $\alpha=[\alpha_{p1}, \alpha_{p2}, \dots, \alpha_{pn}]$ 表示库所的置信度矩阵; $T_0=[T_1, T_2, \dots, T_k]$ 表示起始库所的时间矩阵。

1.1.3 改进模糊Petri网模型的变迁发射规则

如果变迁 t 对应的输入和输出两个集合分别用 $I(t)=[p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}]$ 和 $O(t)=[p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{on}]$ 表示, $[w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}]$ 表示 $I(t)$ 对应的权重,则 $O(t)$ 对应的输出阈值和置信度分别用 $[\lambda_{o1}, \lambda_{o2}, \dots, \lambda_{on}]$ 和 $[\mu_{o1}, \mu_{o2}, \dots, \mu_{on}]$ 表示。

(1) 使能规则:如果 $\forall t \in T, \forall p_i \in I(t)$,为保证 t 是使能,则公式(2)成立:

$$\left[\alpha(p_{ij}) > 0 \right] \wedge \left[\sum_{j=1}^m \alpha(p_{ij}) w_{ij} > \min w_{i1} \right] \quad (2)$$

式中: $j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n$ 。

(2) 点火规则:使能的 t 发射后,获取 $O(t)$ 中心的可信度,其获取公式为:

$$\alpha(p_{oi}) = \begin{cases} \mu_{oi} \sum_{j=1}^m (p_{ij}) w_{ij}, & \sum_{j=1}^m \alpha(p_{ij}) w_{ij} > \lambda_{oi} \\ 0, & \sum_{j=1}^m \alpha(p_{ij}) w_{ij} < \lambda_{oi} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_{oi} 表示第 i 个输出库所;当输出库所 $O(t)$ 中含有多个输入变迁 t 时,并且这些 t 均为使能情况,则 $O(t)$ 的最终可信度采用该公式计算结果的最大值表示。

1.2 变迁参数优化

改进模糊Petri网模型中,每一个 t 均代表一个层次,为保证模型对于二次设备故障的定位精准性,文中采用BP神经网络对 t 的相关参数进行优化。以 n 个 t 为例,依据其对应的输出库所,构建误差代价函数 E ,其计算公式为:

$$E = 2^{-1} \sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^n [M_i(p_{oi}) - M_i^E(p_{oi})]^2 \quad (4)$$

式中: $M_i(p_{oi})$ 和 $M_i^E(p_{oi})$ 均表示 p_{oi} 的托肯值,前者对应实际结果,后者对应期望结果。

在每一个层次上进行一阶梯度的求导,其计算公式为:

$$\frac{dE}{dw_{ij}} = \delta \times d \frac{M(p_{oi})}{dw_{ij}} \quad (5)$$

$$\frac{dE}{d\lambda_i} = \delta \times d \frac{M(p_{oi})}{d\lambda_i} \quad (6)$$

$$\frac{dE}{d\mu_i} = \delta \times d \frac{M(p_{oi})}{d\mu_i} \quad (7)$$

式中: δ 表示动量项; λ_i 和 μ_i 分别表示 t_i 对应输出库所的输出阈值和置信度。

依据上述公式完成一阶梯度求解后,调整 t_i 的相关参数,其调整增量计算公式为:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \eta \frac{dE}{dw_{ij}} \quad (8)$$

$$\lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) - \eta \frac{dE}{d\lambda_i} \quad (9)$$

$$\mu_i(k+1) = \mu_i(k) - \eta \frac{dE}{d\mu_i} \quad (10)$$

式中: η 表示学习率。

1.3 二次设备故障定位的实现

依据上述内容完成Petri网模型改进后,再依据改进的模型构建通用的二次设备故障定位Petri网模型,用该模型进行二次设备故障定位,该模型能够对变电站覆盖的各个区段均构建故障定位模型,例如变压器故障定位模型、继电器故障定位模型等。各个区段的Petri网模型原理均为一致,并且结构的相似程度较高,二次设备总体

故障定位则是结合各个区段的Petri网模型完成。该通用模型的结构如图1所示。

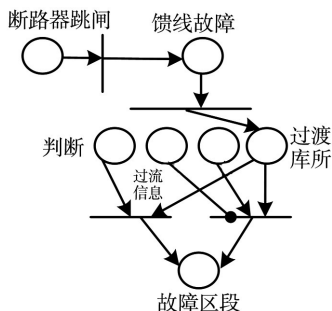


图1 通用二次设备故障定位Petri网模型

变电站二次设备在故障发生后,变电站的数据采集系统^[12-14]获取所有终端单元节点获取的二次设备的运行状态信息,因此,变电站的故障定位数据库属于静态和动态相关联的数据库。采用该模型在进行故障定位时,需设定二次设备故障定位判据,详情如下:

判据1:电流判据:

如果变电站所覆盖区域的电网呈现辐射状网、树状网以及处于开环状态的环状网结构,某个二次设备发生故障后,故障范围则为电源侧至负荷后方的最后一个终端之间。

判据2:电压判据:

当二次设备发生故障后,电压幅值从电源点至故障范围入端处,呈现渐降分布特征,并且输入端电压与各个节点电压几乎一致。

判据1和判据2之间呈现互补状态,若二次设备的电压发生瞬时或者持续性的异常,而并未向判据2分配托肯,此时判据失效。

改进模糊Petri网模型在进行二次设备故障定位时,为了精准、快速地将故障定位结果显示出来,采用推理规则对故障定位判据进行推理。该规则在进行推理过程中,定义4个算子完成,分别为矩阵乘法、加法算子、直乘算子、乘法算子,依次分别用 \cdot 、 \oplus 、 \odot 、 \otimes 表示。

推理规则的详细推理过程,如下所述:

输入: P, T, W, O, α, T_0 ,将其定位为一个维度为 $m \times n$ 矩阵,一个维度为 m 的向量用 M_0 表示。

输出:改进模糊Petri网模型最终状态,即为故障定位结果。

步骤1:设迭代次数为1;

步骤2:对各个变迁 t 的等效输入置信度,其计算公式为:

$$F_k = (W \cdot O)^T \cdot \alpha_{k-1} + (W \cdot T_0)^T \cdot (1 - \alpha_{k-1}) \quad (11)$$

步骤3:求解输出使能矩阵 E_k ,该矩阵可完成使能变迁输出弧的标识; F_k 和输出库阈值的对比结果用 Y_k 表示,

其计算公式为:

$$Y_k = \left[(F_k)^T, (F_k)^T, \dots, (F_k)^T \right]^{T^T} \cdot O - \lambda \quad (12)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

E_k 的表达式为:

$$E_k = (e_{ij}^k)_{m \times n} \quad (13)$$

步骤4:如果式(13)不是为零矩阵,则采用式(14)计算输出库的支持程度,其计算公式为:

$$V_k = E_k \cdot U \quad (14)$$

式中: U 表示输出函数。

如果式(13)是为零矩阵,则转至步骤6;

步骤5:计算新的表示向量 M_k ,其计算公式为:

$$M_k = M_{k-1} \oplus (V_k \otimes F_k) \quad (15)$$

如果 $M_k = M_{k-1}$,则转至步骤6;反之回转至步骤2;

步骤6:推理结果,输出结果。

2 验证分析

为验证本文方法的应用效果,本文选择110 kV的某变电站部分网络作为实例分析对象,该网络中包含4个变压器(T1~T4)、6条母线(A1~A6)、20个保护装置(B1~B20)以及37条连接馈线(L1~L37),其结构如图2所示。

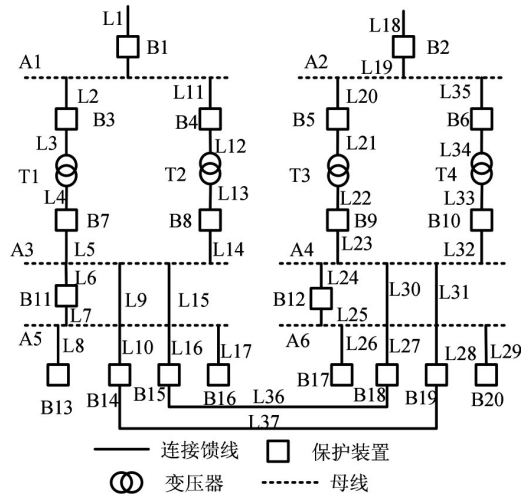


图2 变电站部分网络结构

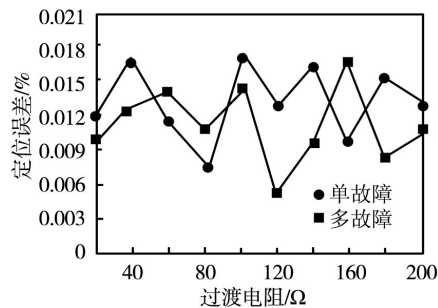


图3 单故障和多故障的相对定位误差测试结果

为验证本文方法对变电站二次设备故障的定位性能,

采用相对定位误差作为评价指标,测试本文方法在不同过渡电阻下,对于单故障和多故障的定位性能,测试结果如图3所示。

依据图3测试结果可知:本文方法应用后,在单故障和多故障两种情况下,随着过渡电阻的逐渐增加,本文方法均可有效完成设备故障定位,并且相对定位误差结果均低于0.025%,应用性能较好。

为验证本文方法在进行变电站二次设备故障定位时的效率,是否能够满足快速定位需求,采用定位时间作为衡量标准,获取本文方法在不同故障数量情况下,完成故障定位所需时间,应用规定标准低于1.2 s,测试结果如图4所示。

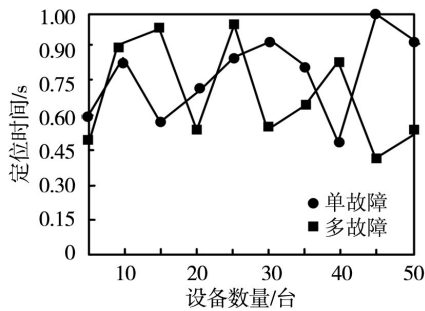


图4 故障定位所需时间测试结果

依据图4测试结果可知:本文方法应用后,可在不同的故障设备数量下,快速完成变电站二次设备故障定位,定位所需时间均在1.2 s以内,满足应用规定标准。因此,本文所提方法具有较好的应用效果,可快速完成故障设备定位,及时掌握设备的运行状态,极大程度提升变电站的运行安全。

为验证本文方法对变电站二次故障的定位效果,获取本文方法应用后,由于篇幅有限,实验对象中各个设备的故障定位结果仅随机呈现其中10个设备或者区段的故障定位结果,如表1所示。

表1 变电站二次故障的定位效果

设备名称	置信度	定位结果
A1	0.893	正常
L5	0.404	B7拒动
L9	0.466	B7误动
B3	0.869	正常
L14	0.418	B8拒动且时序不一致
B7	0.369	B7误动
B11	0.503	漏报
L22	0.884	正常
B14	0.368	B14异常,L10异常
T3	0.433	B5误动

依据表1测试结果可知:本文方法应用后,能够可靠

计算出可疑的故障设备或者区段,并且获取该设备或者区段的置信度结果,以此精准完成变电站二次设备故障定位,并且定位结果和实际故障结果一致;除此之外,可呈现故障的详情。因此,本文方法应用效果良好,满足变电站二次设备故障定位的应用需求。

为进一步验证本文方法对于变电站二次设备故障定位的应用效果,获取二次设备电流越限信号发生不同程度畸变时,本文方法应用后,对于单故障和多故障的定位结果,如表2所示。

表2 单故障和多故障的定位结果

信号畸变程度/%	单故障		多故障	
	实际结果	定位结果	实际结果	定位结果
5	B7	B7	B3~B7	B3~B7
10	L6	L6	L23~L32	L23~L32
15	B11	B11	L6~L7	L6~L7
20	A2	A2	B12~B17	B12~B17
25	L28	L28	B8~L16	B8~L16
30	B14	B14	L8~L17	L8~L17
35	L23	L23	B6~B10	B6~B10
40	B17	B17	L13~B18	L13~B18
45	L17	L17	T3~L23	T3~L23
50	L10	L10	B12~B9	B12~B9

依据表2测试结果可知:二次设备电流信号发生不同程度的畸变后,采用本文方法进行设备的故障定位,定位结果的可靠性较高,能够完成单故障和多故障的位置和区段。由于本文方法在进行故障定位时,结合两种判据进行故障定位判断,因此,可保证故障定位结果的可靠性。

3 结束语

变电站二次设备的运行状态直接决定对于一次设备的监测和保护效果,因此,及时、高效地确定二次设备故障情况和位置,可极大程度提升变电站的运行安全性。因此,本文提出基于改进模糊Petri网模型的变电站二次设备故障快速定位方法。对该方法进行测试后得出:本文所提方法具有较好的应用性能,能够快速、精准完成故障设备位置或者区段的定位,并且定位结果与实际结果吻合程度较高,也满足了变电站二次设备故障定位需求。

参考文献:

[1] 王鸣誉,徐岩,范文,等.基于H-mine算法的变电站二次系统故障关联分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(5):36-44.
[2] 梁文武,朱维钧,李辉,等.基于粗糙集的智能变电站保护设备仿生故障诊断方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):132-140.

(下转第115页)