

# 利用电气量和时序信息的改进 Petri 网故障诊断模型

钟锦源<sup>1</sup>, 张 岩<sup>1</sup>, 文福拴<sup>1,2</sup>, 杨 明<sup>3</sup>, 张小易<sup>3</sup>, 朱海兵<sup>4</sup>

- (1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 文莱科技大学电机与电子工程系, 文莱斯里巴加湾 BS8675;  
3. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103;  
4. 国网江苏省电力公司电力调度控制中心, 江苏省南京市 210024)

**摘要:** 现有的电力系统故障诊断模型在利用多渠道、多方位的测控信息方面, 大多采用决策级别的信息融合, 在信息冲突或不完整时有可能导致误判; 对时序信息的利用一般局限于对信息的初步筛选, 未能充分利用时标偏差与信息准确程度之间的关联性。在此背景下, 以现有模糊 Petri 网故障诊断模型为基础, 对多源信息进行融合分析, 充分利用设备遥信动作事件的顺序记录(SOE)、由广域测量系统得到的电气量信息以及这些信息所包含的时序特性, 建立了一种考虑时序信息的多源 Petri 网故障诊断模型。所发展的故障诊断模型通过利用时序信息对保护设备动作事件进行置信度评价, 利用多源信息的冗余度对所缺警报信息进行补充并校验所收到的警报信息的正确性, 可以有效提高故障诊断的准确度和可靠性。最后, 采用南方电网和江苏电力系统发生过的实际故障案例对所建立的故障诊断模型进行了验证。

**关键词:** 故障诊断; 时序模糊 Petri 网; 多源信息; 电力系统

## 0 引言

虽然现代电力系统的理论和技术一直在不断发展, 但电力系统故障仍然无法避免。准确而迅速地判断故障元件和故障类型, 辅助调度人员快速处理故障, 可有效缩短事故处理时间, 并防止事故扩大。经过几十年的努力, 国内外已经提出了多种电力系统故障诊断方法, 主要包括基于专家系统<sup>[1]</sup>、解析模型<sup>[2]</sup>、Petri 网模型<sup>[3]</sup>等方法。

基于 Petri 网的电力系统故障诊断方法因其逻辑严密、物理意义清晰、推理过程简单等特点, 在近年来得到了比较广泛的关注, 也取得了一些成果。传统的 Petri 网由库所、变迁、有向弧组成, 用于描述电力元件、继电保护、断路器等之间的逻辑关系。Petri 网模型既可以用直观的图形表示, 也可以采用数学方法分析其性质, 可有效描述和推理故障发生过程。模糊 Petri 网模型对传统 Petri 网模型进行了发展, 以处理不确定性因素。文献[4]给出了电力系统拓扑结构发生变化时 Petri 网模型的快速修正方法, 提出了保护装置动作信息不完备情况下的纠

错算法。文献[5]通过采用对不同情景进行聚类推理, 降低 Petri 网模型的矩阵规模, 加快诊断速度。文献[6]在 Petri 网的推理运算过程中采用模糊加权算法, 利用时序信息过滤错误警报。

就笔者所知, 现有的基于 Petri 网模型的电力系统故障诊断方法尚未能系统地及时序信息, 对时序信息的利用仅限于信息初步筛选阶段。另一方面, Petri 网中库所的初始置信度一般凭经验赋值<sup>[7]</sup>。实际上, 保护装置运行情况统计数据尚比较缺乏, 而且统计数据中一般也不考虑信道堵塞等情况, 这样就很难基于统计数据获得比较准确的库所初始置信度。这是现有的基于 Petri 网模型的电力系统故障诊断方法所存在的两个主要问题。

近年来, 相量测量单元(PMU)和广域测量系统(WAMS)逐步得到应用。和传统远方终端单元(RTU)测量不同的是, 各个 PMU 的测量值利用全球定位系统(GPS)或北斗系统的授时功能, 给以相量形式测量到的各节点或支路的状态打上时标, 可以直观了解电力系统中各个状态量及其之间的关系。以 PMU 为基础的 WAMS 为电力系统安全监视和控制创造了良好条件。文献[8]提出了基于 WAMS 的电力系统故障诊断方法, 构造了识别故障位置的判据, 分析了保护和断路器的误动/拒动情况。文献[9]发展了利用电气量信息的电力系统故

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2015-01-05。

国家科技支撑计划资助项目(2011BAA07B02); 国网江苏省电力公司科技项目(JS2014002)。

障诊断模型。文献[10]利用 PMU 量测到的实时信息,采用模式分类技术和模式识别理论中的线性判别原理来搜索电气量的明显变化情况,在此基础上形成了一种快速故障诊断方法。

由于信息系统建设协调性不好、管理不到位等原因,数据丢失、数据上传速度慢、GPS 对时不准以及误遥信等现象屡见不鲜,导致依托于 WAMS 或数据采集与监控(SCADA)系统的在线故障诊断方法存在较多的误判和漏判,难以满足调度中心对故障诊断结果正确率的要求<sup>[11]</sup>。若能充分利用从综合数据平台获得的各类数据信息的冗余性及相互之间的逻辑关系,则可以对收到的信息的正确性进行校验,并估计缺失的必要信息。电力系统故障时状态量和电气量均会发生变化,状态量的变化信息主要由 SCADA 系统采集,而电气量的变化信息则由动态数据系统,如 WAMS、暂态录波装置等采集得到。状态量和电气量来源于不同的测量装置,综合利用这两类信息,可以在相当程度上解决在线故障诊断系统鲁棒性不强、诊断结果准确率不高的问题。此外,文献[12]采用改进的 D-S 理论对开关量、电气量分析结果进行决策级别的信息融合,以提高故障诊断的准确性,但 D-S 理论在证据冲突或缺失时可能导致错误结果。文献[13]提出了一种基于电气量判据、保护判据和断路器判据并计及它们时序属性的多源信息延时约束加权 Petri 网故障诊断模型,利用了时序信息进行数据筛选,但未能充分利用时标偏差与信息准确程度之间的关联性;电气量判据的引入降低了开关量的权重,在电气量信息不完善时易造成误判。

在上述背景下,通过综合利用 WAMS 和 SCADA 系统采集的信息,同时充分考虑信息的时序特性,本文建立了一种考虑时序信息的多源 Petri 网故障诊断模型。当电力系统一次设备发生故障时,WAMS 和 SCADA 系统可对同一事件加以确认,从而提高信息的可信度;通过利用多个量测信息之间的冗余度,可以验证信息的正确性和估计缺失的必要信息。这样,就可以提高故障诊断结果的准确率。此外,所发展的故障诊断模型能够处理复杂故障以及有保护和断路器误动/拒动、警报信息不完整或畸变的情况。

## 1 时序模糊 Petri 网故障诊断模型

### 1.1 总体框架

基于加权模糊时序 Petri 网(weighted temporal fuzzy Petri net, WTFPN)的电力系统故障诊断方法的求解过程包括 4 个层次<sup>[13]</sup>,如图 1 所示。

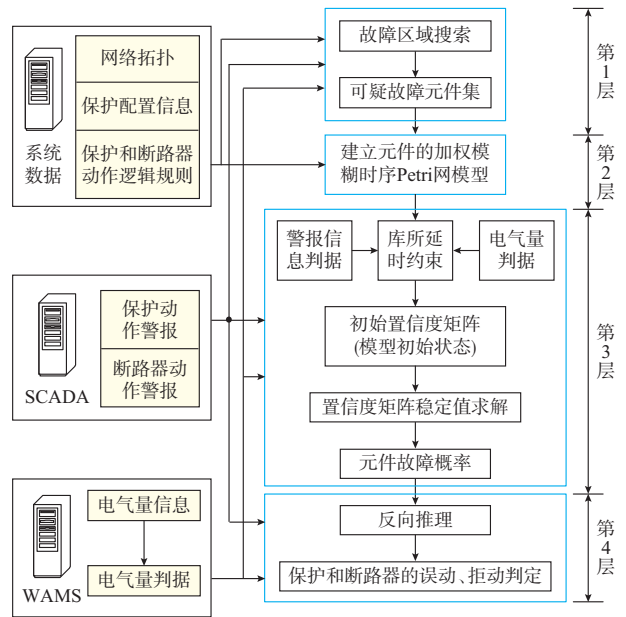


图 1 所提出的故障诊断模型的求解流程  
Fig.1 Solving procedure of proposed fault diagnosis model

在第 1 层中,利用电气量信息和 SCADA 信息,搜索停电元件,构建可疑元件集合,缩小故障诊断范围;在第 2 层中,对每个可疑元件建立加权模糊时序 Petri 网故障诊断模型;在第 3 层中,根据警报信号和电气量的时序信息,进行多源信息融合,计算初始置信度矩阵,并对 Petri 网模型进行求解,获得故障元件概率;在第 4 层中,根据故障诊断结果,对保护和断路器的动作行为进行评价。

### 1.2 数学描述

Petri 网是离散时间动态系统建模和分析的强有力工具,其以描述系统中各元件的关系为基础,用网络来表示系统中同时发生、次序发生的各种活动,可以用加权有向网络来描述。对于电力系统而言,元件、保护和断路器之间的联系可以用图形直观地表示出来,采用矩阵分析方法描述故障过程的网络动态变化,逻辑严密、物理过程清晰、计算过程简单高效。

考虑故障诊断中的不确定因素,根据模糊 Petri 网的定义,结合时序推理,定义加权模糊时序 Petri 网为一个 9 元组:

$$S = \{P, R, I, O, W, M, T_0, \Delta T_0, T_R\} \quad (1)$$

式中: $P = [p_1, p_2, \dots, p_n]$  为  $n$  维库所向量, $n$  为库所数; $R = [r_1, r_2, \dots, r_m]$  为  $m$  维变迁向量,用于表征推理规则, $m$  为变迁数; $I = (\delta_{ij})$  为  $n \times m$  阶的输入矩阵,反映库所  $P$  到变迁  $R$  的映射,当  $p_i$  是  $r_j$  的输入(即存在  $p_i$  到  $r_j$  的有向弧)时  $\delta_{ij} = 1$ ,否则  $\delta_{ij} = 0$ ; $O = (\gamma_{ij})$  为  $m \times n$  阶的输出矩阵,反映变迁  $R$

到库所  $P$  的映射,当  $p_j$  是  $r_i$  的输出(存在  $r_i$  到  $p_j$  的有向弧)时  $\gamma_{ij}=1$ ,否则  $\gamma_{ij}=0$ ;  $W=\text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$  为输入弧的权值矩阵,反映前提条件对规则的影响程度,其取值与库所表征的事件类型相关;  $M=[\alpha(p_1), \alpha(p_2), \dots, \alpha(p_n)]$  为库所置信度向量,  $\alpha(p_i)$  表示库所  $p_i$  的置信度;  $T_0=\text{diag}(t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0n})$  为输入弧的延时约束矩阵,  $t_{0i}$  表示库所  $p_i$  到变迁  $r_j$  的时间距离,根据保护设备的整定时间、断路器的动作延时等获得;  $\Delta T_0=\text{diag}(\Delta t_{01}, \Delta t_{02}, \dots, \Delta t_{0n})$  为输入弧延时约束不确定度矩阵,  $\Delta t_i$  表示时间距离  $t_i$  的不确定度;  $T_R=[t_{R1}, t_{R2}, \dots, t_{Rn}]$  为  $n$  维向量,  $t_{Ri}$  表示电力系统中实际录得的库所发生时间。

电力系统中元件的加权模糊时序 Petri 网模型分为母线、变压器、线路 3 类<sup>[14]</sup>。电力系统结构发生变化后,需要重新构建 Petri 网模型。为适应网络拓扑结构变化,可利用拓扑信息先建立母线主保护、后备保护,以及线路主保护、近后备保护、远后备保护的子模型,之后再融合形成综合诊断模型<sup>[6]</sup>。例如:对线路而言,可以首先分别对两侧的保护和断路器进行建模,然后构建线路的综合诊断模型。以图 2 的线路  $L_1$  为例,其加权模糊时序 Petri 网模型如图 3 所示,图中 CB 表示断路器。

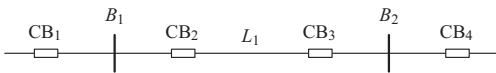


图 2 示例电力系统  
Fig.2 A sample power system

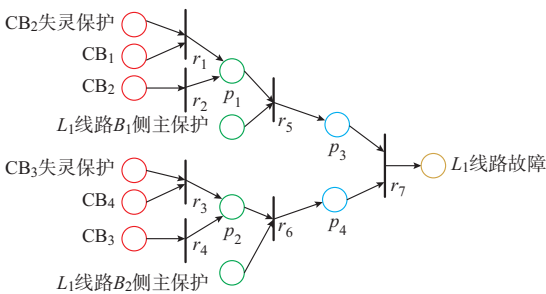


图 3 线路  $L_1$  的加权模糊时序 Petri 网模型  
Fig.3 A sample weighted temporal fuzzy Petri net model of  $L_1$

在图 3 中,  $r_i (i=1, 2, \dots, 7)$  为变迁,  $p_i (i=1, 2, 3, 4)$  为临时库所。

### 1.3 时序推理

文献<sup>[15]</sup>提出了基于时序约束的电力系统警报处理模型,其包括时间点约束和时间距离约束。该时序约束采用时间窗的概念,仅能对警报信息进行时序的简单筛选,初步甄别信息是否为有效信息,未

能充分利用时序约束中蕴含的信息,也无法给出警报信息的置信度。本文对时序推理的时间点与时间距离重新定义如下。

#### 1.3.1 时间点与时间距离

定义确定时间点变量  $t$ , 表示事件发生的时间。由于故障类型、信道堵塞、GPS 时间欠准等原因,使用  $t$  和不确定度  $\Delta t$  共同描述事件发生时间不确定的情况,即事件发生的时间区间  $T(t)$  为  $[t - \Delta t, t + \Delta t]$ 。

定义时间距离为两个时间点之间的时间长度,用  $d_{ij}$  表示  $t_i$  和  $t_j$  之间的确切时间距离,即  $d_{ij} = t_j - t_i$ 。同样,用  $\Delta d$  表示时间长度的不确定度,即  $t_i$  和  $t_j$  之间的时间距离  $D(t_i, t_j)$  为  $[d_{ij} - \Delta d_{ij}, d_{ij} + \Delta d_{ij}]$ 。

时间点可看成是特殊的时间距离,  $T(t)$  的值等于  $t=0$  时刻至事件发生时间的的时间距离  $D(0, t)$ 。时间距离既可以表示两个时间之间的时间约束,也可以描述事件期望状态和实际状态的差异度。

#### 1.3.2 时序推理过程

不确定度  $\Delta t$  和  $\Delta d$  表征了时间点和时间距离的分散性。若有  $q$  个时间距离  $D_1, D_2, \dots, D_q$ , 其中  $D_i = [d_i - \Delta d_i, d_i + \Delta d_i]$ , 则它们的时间距离之和为:

$$d = d_1 + d_2 + \dots + d_q \quad (2)$$

$d$  的不确定度为:

$$\Delta d = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^q \Delta d_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} \Delta d_i \Delta d_j} \quad (3)$$

式中:  $\rho_{ij}$  为不确定度  $\Delta d_i$  和  $\Delta d_j$  之间的相关系数。一般情况下,  $\rho_{ij} = 0$ , 此时式(3)变成:

$$\Delta d = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^q \Delta d_i^2} \quad (4)$$

假设  $t_i$  和  $t_j (t_i \leq t_j)$  分别为事件  $i$  和  $j$  相继发生的时间,  $d_{ij}$  为事件发生时刻的时间距离。当  $q=2$  时, 可把  $T(t)$  的值视为  $t=0$  时刻至事件发生时刻的时间距离  $D(0, t)$ , 即  $\Delta t = \Delta d$ , 则  $\Delta d =$

$$\pm \sqrt{\sum_{i=1}^2 \Delta d_i^2} = \pm \sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2} = \pm \sqrt{\Delta t^2 + \Delta d^2}.$$

关于时间点和时间距离约束的运算定义如下。

前向时序推理,即已知  $t_i$  和  $d_{ij}$ , 找出事件  $i$  的后继事件或制衡事件  $j$ , 以及事件  $j$  的时间区间约束。根据式(2)和式(4), 事件  $j$  的时间约束为:

$$T(t_j) = T(t_i) + D(t_i, t_j) = [t_i + d_{ij} - \sqrt{\Delta t_i^2 + \Delta d_{ij}^2}, t_i + d_{ij} + \sqrt{\Delta t_i^2 + \Delta d_{ij}^2}] \quad (5)$$

反向时序推理用于找出事件的前驱时间, 以及

前驱事件的时间区间约束。同理,事件  $i$  的时间点约束  $T(t_i)$  为:

$$T(t_i) = T(t_j) - D(t_i, t_j) = [t_j - d_{ij} - \sqrt{\Delta t_j^2 + \Delta d_{ij}^2}, t_j - d_{ij} + \sqrt{\Delta t_j^2 + \Delta d_{ij}^2}] \quad (6)$$

时序特征是电力系统警报信息及状态量的重要属性,反映了保护装置的选择性和时间特性。电力系统发生故障时,会引起电压降低、电流增加等电气量变化。故障元件上的保护装置根据所设定的整定值与时限特性,对相应的断路器发出变位跳闸指令,切断故障元件,隔离故障。

本文充分挖掘电气量信息及保护和断路器的时序特征,采用高斯函数,结合时序推理,获得警报信息的置信度。

#### 1.4 运行求解

假设  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  均为  $h \times n$  阶矩阵,而  $\mathbf{D}$  为  $h \times q$  阶矩阵, $\mathbf{E}$  为  $q \times n$  阶矩阵, $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$  为  $h \times 1$  阶矩阵,定义如下矩阵运算:①若  $\mathbf{C} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{B}$ ,则  $c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$ ;②若  $\mathbf{C} = \mathbf{D} \otimes \mathbf{E}$ ,则  $c_{ij} = \max_{1 \leq k \leq q} (d_{ik} e_{kj})$ ;③若  $\mathbf{F} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}}$ ,则  $f_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_{ij}}$ ;④若  $\mathbf{F} = \mathbf{G} + \mathbf{H}$ ,则

$$f_i = g_i + h_i, \text{多个} + \text{可简写为} \sum; \text{⑤若 } \mathbf{F} = \sqrt{\mathbf{G}} \text{ 或 } \mathbf{F} = \mathbf{G}^{\wedge 2}, \text{则矩阵中相同位置的元素做开方或平方运算,即 } f_i = \sqrt{g_i} \text{ 或 } f_i = g_i^2.$$

电力系统中不同警报信息在时序和事件逻辑上均为单向因果关系,因此现有的加权模糊 Petri 网故障诊断模型均采用树状结构<sup>[3-6,13]</sup>。可以采用加权模糊 Petri 网推理获得一个稳定的网络状态,即库所置信度矩阵  $\mathbf{M}$  的值不再随迭代进行而变化的状态。根据 1.2 节中的时序推理规则,库所  $p_i$  的时间约束可表示为  $[t_i - \Delta t_i, t_i + \Delta t_i]$ ,多次迭代后时序约束也趋于稳定,不再变化。这样,库所  $p_i$  的时间约束可用时间点矩阵  $\mathbf{T} = [t_1, t_2, \dots, t_n]$  和不确定度矩阵  $\Delta \mathbf{T} = [\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n]$  来描述:

$$\mathbf{T} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\mathbf{IO})^i \mathbf{T}_0 \mathbf{IO}}{\mathbf{I}} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} (\mathbf{IO})^i \mathbf{T}_0 \mathbf{IO}}{\mathbf{I}} \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{T} = \pm \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{(\mathbf{IO})^i \Delta \mathbf{T}_0 \mathbf{IO}}{\mathbf{I}} \right)^{\wedge 2}} \quad (8)$$

假设第  $k$  次迭代得到置信度矩阵  $\mathbf{M}^{(k)}$ ,则第  $k+1$  次置信度矩阵  $\mathbf{M}^{(k+1)}$  为:

$$\mathbf{M}^{(k+1)} = (\mathbf{M}^{(k)} (\mathbf{WI}) \otimes \mathbf{O}) \oplus \mathbf{M}^{(k)} \quad (9)$$

若  $\mathbf{M}^{(k+1)} = \mathbf{M}^{(k)}$ ,则 Petri 网的置信度矩阵是

稳定的,求解结束,此时  $\alpha_{\mathbf{M}^{(k)}}(p_n)$  即为可疑元件故障概率。

## 2 加权模糊 Petri 网在电力系统故障诊断中的应用

当电力系统发生局部故障时,保护装置将动作,跳开相关断路器;可利用 GPS 高精度的授时功能形成统一时标基准的事件顺序记录(sequence of event, SOE)信息,上传至服务器。

PMU 可以直接测量母线电压和支路电流向量,并可计算获得测量点的功率、相位、功角等信息。利用 GPS 高精度的授时功能统一给定标,保证全网数据的同步性,从而准确表征同一时刻下系统的实际情况。

本文综合利用 WAMS 和 SCADA 系统采集的信息。在采用模糊 Petri 网模型求解前,把 SOE 信息、电气量特征的时序信息通过时序推理运算、高斯函数转换成事件的初始置信度,这样可以明显提高一次设备发生故障时所采用的目标或事件信息的可靠性,进而提高故障诊断结果的准确率。

### 2.1 基于状态量的加权模糊 Petri 网故障诊断

现有故障诊断方法利用时序推理获得时间窗口,以删除不合理的警报信息,并基于经验给定初始置信度矩阵,利用式(9)迭代求解库所置信度矩阵以获取其稳定值,从而获得元件故障概率。为提高 Petri 网的容错能力,对未发生的事件也需要采用较高的置信度,这样就自然影响故障诊断结果的准确性。为衡量警报信息的可信度,这里引入统计理论中的置信区间概念,对初始置信度的赋值按下述方法进行改进。

若期望事件发生的时间区间为  $T(t) = [t - \Delta t, t + \Delta t]$ ,实际录得事件发生时间为  $t_i$ 。采用下述高斯函数进行处理:

$$\alpha(t_i) = A e^{-\frac{(t_i - t)^2}{(2\Delta t)^2}} \quad (10)$$

式中: $A$  为系统的可靠性系数; $\alpha(t_i)$  为该实际录得事件的初始置信度。

该函数符合故障检测的推理规则,当  $t_i \in [t - \Delta t, t + \Delta t]$  时,说明事件在期望发生的时间区间内发生,得到较高的输出概率  $\alpha(t_i)$ ,该信息置信度较高;当  $t_i \notin [t - \Delta t, t + \Delta t]$  时,置信度  $\alpha(t_i)$  较低。 $t_i$  与  $T(t)$  的时间距离越大,该事件的置信度  $\alpha(t_i)$  就越低。若未录得相应事件的遥测信息或观测到相应的电气量特征,则可认为事件发生在  $t_i$  趋向于无穷大时刻, $\alpha(t_i)$  趋近于 0。

### 2.2 基于电气量的加权模糊 Petri 网故障诊断

与状态量不同,电气量信息无法直接应用于

Petri 网模型。本文提取相关库所对应事件的特征信息,构造电气量判据,利用加权模糊 Petri 网模型进行故障诊断。

### 2.2.1 设备故障的电气量特征

当母线  $M$  正常运行时,连接在母线上的元件所流入母线的电流之和为 0;当母线发生故障时,其值为故障点的短路电流。规定电流正方向为从母线流向线路,令  $\dot{I}_k = \left| \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \right|$ ,  $N$  为与母线相连的线路、变压器出口总数,  $\dot{I}_i$  为母线流向线路  $i$  的电流。则有<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} \dot{I}_k < \dot{I}_{\text{set}} & \text{母线正常运行} \\ \dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}} & \text{母线故障} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\dot{I}_{\text{set}}$  为事先设定的接近于 0 的电流阈值,可取母线纵联保护启动元件的电流阈值。

对于输电线路,给定  $\dot{I}_m$  和  $\dot{I}_n$  为从母线流向线路的电流,令  $\dot{I}_k = |\dot{I}_m + \dot{I}_n|$ , 则有式(12)成立,此时  $\dot{I}_{\text{set}}$  可取该线路纵联保护启动元件的电流阈值。

$$\begin{cases} \dot{I}_k < \dot{I}_{\text{set}} & \text{母线正常运行或线路外部故障} \\ \dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}} & \text{线路内部故障} \end{cases} \quad (12)$$

对于长距离高压输电线,因线路分布电容电流大和短路电流中非周期分量等原因,在外部短路时,可能引起不平衡电流较大,导致  $\dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}}$ , 进而错误识别线路故障。为此,引入制动分量  $K_1$  ( $|\dot{I}_m - \dot{I}_n|$ ), 对可能发生的不平衡电流进行修正:

$$\dot{I}_k = |\dot{I}_m + \dot{I}_n| - K_1 (|\dot{I}_m - \dot{I}_n|) \quad (13)$$

式中:  $K_1$  为制动系数,  $0 < K_1 < 1$ 。在线路内部故障时,  $\dot{I}_m = \dot{I}_n$ , 制动分量为最小值,式(13)与  $\dot{I}_k = |\dot{I}_m + \dot{I}_n|$  等价;在线路外部故障时,  $\dot{I}_m = -\dot{I}_n$ ,  $|\dot{I}_m - \dot{I}_n|$  为外部短路电流的 2 倍。制动分量可以有效降低不平衡电流对  $\dot{I}_k = |\dot{I}_m + \dot{I}_n|$  所表示的判据的影响,有助于对线路故障进行准确识别。

### 2.2.2 断路器动作的电气量特征

电力系统发生故障后,相关的断路器是否动作可通过相连电气设备的电气量判定。

线路故障导致断路器跳开时,断路器的变位操作能够使从线路量测到的电流值降至接近于 0。母线故障时,线路出口的电流值将视母线电气接线情况恢复正常负荷时的电流值或降至接近于 0,远小于故障时的电流。

断路器失灵保护是指当故障线路的继电保护动作发出跳闸脉冲后,断路器拒绝动作时,以较短时限

切除同一变电站或发电厂内其他相关断路器,将故障部分隔离,缩小停电范围的一种近后备保护。断路器失灵保护的电气量特征为:线路出口处的电流未在整定时间内恢复正常值或降至 0。

### 2.2.3 保护设备的动作判据

线路与母线主保护的逻辑为:当所保护的元件故障,且检测到设备的电气量信息与设备故障的电气量特征吻合,则主保护应该动作。考虑到可能发生扰动的情况,若从某一帧(不妨记为第  $i$  帧,第  $i$  帧的时间点记录为  $t_i$ )起连续 3 帧观测到  $\dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}}$ , 考虑到 PMU 量测的数据是根据之前一个周期的采样数据计算而得,记母线故障的时间为  $t_{i-1}$ 。母线故障后,经过整定时间  $\Delta T_{\text{mr}}$ ,主保护应该动作。建立 0-1 判据如下:

$$s_i = \begin{cases} 1 & \dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}} \\ 0 & \dot{I}_k < \dot{I}_{\text{set}} \end{cases} \quad (14)$$

用  $\cup$ ,  $\cap$  和  $\neg$  分别表示逻辑“或”运算、逻辑“与”运算和逻辑“非”运算,则主保护的逻辑判据可表示为:

$$s_m = s_i \cap s_{i+1} \cap s_{i+2} \quad (15)$$

线路或母线近后备保护的逻辑为:所对应的主保护期望动作,但在主保护动作时间内未跳开相应的断路器,故障特征持续未消除时,近后备保护应该动作。若连续  $n_c$  帧观测到  $\dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}}$ , 则近后备保护动作。这样,近后备保护动作的识别判据为:

$$s_p = \bigcap_{j=i}^{i+n_c-1} s_j \quad (16)$$

可根据近后备保护整定时间确定  $n_c$ ,  $n_c \approx T_{\text{pr}} f_{\text{PMU}}$ , 其中  $T_{\text{pr}}$  为近后备保护的整定时间,  $f_{\text{PMU}}$  为 WAMS 数据上报频率。

线路或母线远后备保护的逻辑为:所对应的主保护及近后备保护期望动作,但在主保护及近后备保护动作时间内相应的断路器未跳开,故障特征持续未消除,此时远后备保护应该动作。如果连续  $n_y$  帧观测到  $\dot{I}_k \geq \dot{I}_{\text{set}}$ , 则可判断远后备保护动作。这样,远后备保护的逻辑判据可表示为:

$$s_p = \bigcap_{j=i}^{i+n_y-1} s_j \quad (17)$$

可根据近后备保护的整定时间确定  $n_y$ ,  $n_y \approx T_{\text{sr}} f_{\text{PMU}}$ , 其中  $T_{\text{sr}}$  为远后备保护的整定时间。

### 2.2.4 断路器及断路器失灵保护动作判据

断路器收到跳闸指令并有效动作后,相连设备的电气量将发生显著变化,线路出口的电流测量值降至接近于 0 或恢复正常的电流值,远小于故障时的电流测量值。采用电流作为判据,假设断路器任意一端录得的电流测量值  $\dot{I}_k$  分别为  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$ , 可

建立如下 0-1 判据,其中  $\dot{I}_{set}$  可取该断路器失灵保护启动元件的电流阈值。

$$s_k = \begin{cases} 0 & \dot{I}_k \geq \dot{I}_{set} \\ 1 & \dot{I}_k < \dot{I}_{set} \end{cases} \quad (18)$$

当任意一相发生变位操作时,即可判断断路器动作。记  $s_i$  为  $t_i$  时刻断路器状态,可用于判断断路器是否存在分闸操作,相应的判据为:

$$s_i = s_A \cup s_B \cup s_C = \begin{cases} 1 & \text{断路器存在分闸操作} \\ 0 & \text{断路器处于闭合状态} \end{cases} \quad (19)$$

对于有扰动的情况,当从某一帧(不妨记为第  $i$  帧)起连续 3 帧观测得  $s_i = 1$ ,且该帧之前 3 帧  $s_i = 0$ ,记录断路器分闸操作时刻为  $t_i$ 。则断路器的动作判据为:

$$s_b = \bar{s}_{i-3} \cap \bar{s}_{i-2} \cap \bar{s}_{i-1} \cap s_i \cap s_{i+1} \cap s_{i+2} \quad (20)$$

$s_b = 1$  即表示断路器由闭合状态切至分闸状态。

对于 220~500 kV 架空线路,由于线间距离大,大量运行经验表明绝大多数故障都是单相接地短路。在这种情况下,为了提高供电可靠性,一般采用跳开单相断路器,单相重合闸不成功时再跳开三相的方式。如果线路发生的是单相瞬时性故障,则单相重合闸成功,三相恢复正常运行。断路器失灵保护的电气量特征为:线路出口处的电流未在整定时间内恢复正常值或降至 0。考虑到单相重合闸的情况,应同时考虑可能发生三相跳闸时断路器失灵和单相跳闸时断路器失灵的情况。用  $f_i$  表示  $t_i$  时刻断路器状态,以判断其是否拒动,相应判据为:

$$f_i = (\bar{s}_A \cap \bar{s}_B \cap \bar{s}_C) \cup (s_A \cap \bar{s}_B \cap \bar{s}_C) \cup (\bar{s}_A \cap s_B \cap \bar{s}_C) \cup (\bar{s}_A \cap \bar{s}_B \cap s_C) = \begin{cases} 1 & \text{断路器存在拒动操作} \\ 0 & \text{断路器分闸成功} \end{cases} \quad (21)$$

当三相断路器均断开或者单相断路器跳闸成功时, $f_i = 0$ ;否则,断路器为拒动情况, $f_i = 1$ 。考虑到三相分闸时间可能存在一定偏差等因素,若记录到断路器动作  $s_b = 1$ ,且连续  $n_r$  帧  $f_i = 1$ ,则可判定断路器拒动,并触发断路器拒动保护动作。拒动保护的判据可表示为:

$$s' = s_b \cap \left( \bigcap_{j=i}^{i+n_r-1} f_j \right) = \begin{cases} 1 & \text{断路器存在拒动} \\ 0 & \text{断路器工作正常} \end{cases} \quad (22)$$

可根据断路器失灵保护的整定时间确定  $n_r$ ,  $n_r \approx T_{br} f_{PMU}$ ,其中  $T_{br}$  为断路器失灵保护的整定时间,一般为继电保护整定时间加两倍断路器熄弧时间。

### 2.2.5 电气量判据置信度

PMU 数据能够实时上传至服务器,这样就可

以通过实时电流电压信息监控到系统发生的稳态数据变化。与 RTU 的事件发送机制不同,PMU 传送的数据量更大且连续。而且,若信道发生堵塞或 PMU 故障,系统能够立刻发现并做出响应。这是传统遥测信息无法做到的。

PMU 数据采集及上传速率为 100 帧/s,这样利用电气量数据形成判据时,时间点的精度比 SOE 信息低,因此在利用式(10)计算置信度时,库所初始置信度就不如遥测信息高。

这样,在实际应用时,WAMS 的可靠性系数  $A_{PMU}$  可取比 SCADA 系统的可靠性系数  $A_{SOE}$  更高的值,以充分利用电气量信息。

### 2.3 多源信息融合的加权模糊 Petri 网故障诊断

从时间角度来讲,SOE 信息和 PMU 信息在秒级时间内即可上送,都能够满足在线故障诊断要求。现有的多种故障诊断算法对数据可靠性要求高,在实际电力系统中的应用效果不太理想,因为实际故障时的数据与理想情况下有差别,主要体现在数据不可靠。故障时可能存在数据丢失、上传速度慢以及正常运行时存在误遥信等情况<sup>[11]</sup>。前已述及,同时利用 WAMS 和 SCADA 系统上传的数据,可以有效提高数据冗余度;两套系统的数据互为补充,对收到的信息的正确性进行校验,可以提高对坏数据的正确辨识率,降低数据不完整或有错误时可能引起的故障诊断错误的概率。

通过综合考虑 WAMS 和 SCADA 系统的数据,可确定库所  $p_i$  的初始置信度为:

$$\alpha(p_i) = 1 - (1 - \alpha_{PMU}(t_i))(1 - \alpha_{SOE}(t_i)) \quad (23)$$

当 WAMS 发生故障或部分变电站未布置 PMU 导致电气量信息缺乏时, $\alpha_{PMU}(t_i) = 0$ ,  $\alpha(p_i) = \alpha_{SOE}(t_i)$ ,库所置信度即为 SCADA 系统收集信息的置信度  $\alpha_{SOE}(t_i)$ 。当电气量信息缺失时,本文所构造的故障诊断模型不需要修改就自动退化为利用时序信息和开关量信息的 Petri 网故障诊断模型。当 SCADA 系统发生故障时, $\alpha_{SOE}(t_i) = 0$ ,  $\alpha(p_i) = \alpha_{PMU}(t_i)$ ,库所置信度即为 WAMS 系统收集信息的置信度  $\alpha_{PMU}(t_i)$ 。当这两个系统均正常运行时,库所置信度比两个系统单独工作时更高。

在利用电气量和时序信息的改进 Petri 网故障诊断模型中,确定元件故障置信度的主要步骤如下。

- 1) 采用式(10)求取开关量和电气量判据的初始置信度。
- 2) 采用式(23)求取库所初始置信度  $\alpha(p_i)$ 。
- 3) 初始置信度矩阵为  $\mathbf{M}^{(0)} = [\alpha(p_1), \alpha(p_2), \dots, \alpha(p_n)]$ ,利用式(9)即可求解 Petri 网模型,从而求得可疑元件的故障置信度。

### 3 算例分析

对南方电网和江苏电力系统发生过的实际故障案例进行测试,以验证本文所提出的模型与方法的可行性和有效性。故障发生时的变电站的电气接线、调度中心接收到的警报信息、录得的电气量信息见附录。附录中同时给出了算例的诊断过程。

在南方电网的故障案例(附录 A)中,可疑故障元件包括变电 1 和变电 2 间的线路、变电 2 的母线。仅利用 SOE 信息的情况下,由于故障发生时刻变电 1 侧 SOE 信息缺失严重,断路器信息均未上传,线路故障置信度仅为 0.57。在仅利用电气量信息时,线路故障置信度为 0.90。综合考虑 SOE 及电气量信息,线路故障置信度为 0.96。由此可见,多源信息对误报及漏报信息能够进行有效校验和校正,提高故障诊断的准确度。母线的故障置信度为 0.42,和文献[13]相比(其中获得的母线故障置信度为 0.46),母线故障置信度降低,表明本文方法同时能够有效降低非故障元件的故障置信度,诊断结果更加准确。

在江苏电力系统的故障案例(附录 B)中,由于雾霾天气,B 变电的一次设备绝缘水平下降,造成多次污闪,故障点依次为  $K_1$  至  $K_7$ 。该事故涉及的故障元件较多,故障发生时刻也比较密集。采用本文发展的故障诊断模型和文献[6]中的方法分别进行诊断,获得的故障点  $K_1$  至  $K_7$  和 BCⅢ线的故障置信度的结果如表 1 所示。

表 1 采用本文方法与文献[6]中的方法获得的故障诊断结果比较

Table 1 Comparisons of fault diagnosis results between the proposed method and the method in reference [6]

故障点	故障置信度			故障时刻
	文献[6]	本文(仅利用开关量)	本文(含电气量信息)	
$K_1$	0.88	0.86	0.98	06:07:19.43
$K_2$	0.88	0.88	0.99	06:21:32.11
$K_3$	0.88	0.89	0.99	06:21:32.14
$K_4$	0.88	0.84	0.98	06:21:32.17
$K_5$	0.77	0.81	0.94	06:21:32.24
$K_6$	0.88	0.87	0.99	06:21:32.29
$K_7$	0.88	0.84	0.98	06:21:32.30
BCⅢ线 (无故障点)	0.20	0.12	0.12	

从表 1 中列出的诊断结果可以看出,本文模型综合利用电气量和开关量信息进行故障诊断,准确率高、容错性好。在 WAMS 发生故障或变电站未布置 PMU 导致电气量信息缺乏时,由于本文模型利用了开关量信息及其时序特性,仍能得到正确的故障诊断结果。利用时标偏差与信息准确程度之间

的关联性对库所赋予初始置信度,如此求得的故障元件的故障置信度更符合实际情况,非故障元件的故障置信度则相当低,这样故障诊断的准确性就高。

### 4 结语

本文在传统模糊 Petri 网故障诊断模型的基础上,综合利用了设备遥信动作的 SOE 信息、基于 WAMS 的电气量信息,以及这些信息所包含的时序特性,提高了信息冗余度,在此基础上发展了一种考虑时序信息的多源 Petri 网故障诊断模型。通过对实际系统发生的故障案例的诊断表明,所提出的方法能够有效处理保护/断路器误动/拒动,以及警报信息错误与不完备情况,具有较高的容错性。与现有的基于 Petri 网的电力系统故障诊断模型相比,本文所提出的方法充分考虑了警报信息的时标偏差与信息准确程度之间的关联性,更准确地描述了故障元件的故障置信度,提高了故障诊断结果的准确率和可靠性,且在单一信息源情况下也具有更高的容错性。诊断过程均采用矩阵运算,物理意义清晰,计算速度快,可用于大规模复杂电力系统的在线故障诊断。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

### 参考文献

- [1] JUNG J W, LIU C C, HONG M G, et al. Multiple hypotheses and their credibility in on-line fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 225-230.
- [2] WEN Fushuan, CHANG C S. Tabu search approach to alarm processing in power systems[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(1): 31-38.
- [3] CALDERARO V, HADJICOSTIS C N, PICCOLO A, et al. Failure identification in smart grids based on Petri net modeling [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4613-4623.
- [4] 杨健维,何正友.基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化,2011,35(15):46-51.  
YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [5] LUO X, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fuzzy section estimation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [6] 张岩,张勇,文福拴,等.容纳时序约束的改进模糊 Petri 网故障诊断模型[J].电力系统自动化,2014,38(5):66-72.  
ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Power system fault diagnosis with an enhanced fuzzy Petri net accommodating temporal constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 66-72.
- [7] 周玉兰,王玉玲,赵曼勇,等.2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J].电网技术,2005,29(16):42-48.  
ZHOU Yulan, WANG Yuling, ZHAO Manyong, et al.

- Statistics of operation situation of protective relays and automation devices of power systems in China in 2004[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 42-48.
- [8] 周子冠,白晓民,李文锋,等.基于广域测量系统的电网故障在线智能化诊断与分析方法[J].中国电机工程学报,2009,29(13): 1-7.
- ZHOU Ziguan, BAI Xiaomin, LI Wenfeng, et al. A novel smart on-line fault diagnosis and analysis approach of power grid based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 1-7.
- [9] 董明,张勇,张岩,等.含电气量信息的电力系统故障诊断解析模型[J].电力系统自动化,2013,37(6):55-62.
- DONG Ming, ZHANG Yong, ZHANG Yan, et al. An analytic model for power system fault diagnosis employing electrical data [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 55-62.
- [10] ZHANG Y G, WANG Z P, ZHANG J F, et al. Fault localization in electrical power systems: a pattern recognition approach[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(3): 791-798.
- [11] 闪鑫,赵家庆,张剑,等.基于三态数据的电网在线综合故障诊断[J].电力系统自动化,2012,36(23):78-81.
- SHAN Xin, ZHAO Jiaqing, ZHANG Jian, et al. On-line comprehensive fault diagnosis of power grid based on three-state data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 78-81.
- [12] 彭明伟.多数据源信息融合的电网故障诊断方法研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [13] 吴文可,文福拴,薛禹胜,等.基于多源信息的延时约束加权模糊 Petri 网故障诊断模型[J].电力系统自动化,2013,37(24): 43-53.
- WU Wenke, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. A weighted fuzzy Petri net based model with time-delay constraints for power system fault diagnosis employing information from multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 43-53.
- [14] HUANGY C, HUANG C M, LIAO C C, et al. A new intelligent fast Petri-net model for fault section estimation of distribution systems[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Power System Technology, December 4-7, 2000, Perth, Australia: 217-222.
- [15] 郭文鑫,文福拴,廖志伟,等.基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J].电力系统自动化,2009,33(21): 36-42.
- GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. An analytic model for power system on-line alarm processing based on temporal constraint network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 36-42.
- 
- 钟锦源(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统故障诊断和系统恢复。E-mail: gmzjy1989@126.com
- 张岩(1990—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统故障诊断和系统恢复。E-mail: zhangyan\_1990@126.com
- 文福拴(1965—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

(编辑 章黎)

## An Improved Petri Net Model for Power System Fault Diagnosis Employing Electrical Data and Temporal Constraints

ZHONG Jinyuan<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, WEN Fushuan<sup>1,2</sup>, YANG Ming<sup>3</sup>, ZHANG Xiaoyi<sup>3</sup>, ZHU Haibing<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Electrical & Electronic Engineering, Institut Teknologi Brunei, Bandar Seri Begawan BS8675, Brunei;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211103, China;

4. Power Dispatch and Control Center of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The existing power system fault diagnosis models employing multi-faceted monitoring and control information mostly implement information fusion in the decision-making level, and may lead to false diagnosis results when the received information is conflict or incomplete. The temporal information of alarms is only employed for preliminary screening, and the relevance between timestamps and information accuracy is not fully taken into consideration. Given this background, based on existing fuzzy Petri net models for power system fault diagnosis, an improved model for this purpose is presented employing electrical data and temporal constraints, and could accommodate the sequence of events (SOE) information from supervisory control and data acquisition (SCADA), electric parameters as well as their temporal features from the wide area measurement system (WAMS). In the proposed fault diagnosis model, a multi-source information fusion technique is employed to integrate, analyze and process information from multiple sources. The confidence levels of events are evaluated by the relevant temporal information. The redundancy of multiple sources of information is used to verify the correctness of the received information and to estimate some important but missed information, and hence the accuracy and reliability of fault diagnosis results could be significantly improved. Finally, actual fault scenarios from South China power system and Jiangsu power system are served for demonstrating the presented fault diagnosis model.

This work is jointly supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2011BAA07B02) and State Grid Jiangsu Electric Power Company (No. JS2014002).

**Key words:** fault diagnosis; temporal fuzzy Petri net (TFPN); multiple sources of information; power systems