

# 基于多属性评判和模糊因果网络的 110 kV 变电站故障诊断

林慧, 王予疆, 许辉

(河南省电力公司郑州供电公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 针对 110 kV 变电站故障诊断中非确定性因素较多和在线性要求高的特征, 以实际 110 kV 变电站的保护信息为基础, 根据保护的因果关系将设备分成设备故障、保护动作、开关跳闸或拒跳三类基础相关节点, 结合设备家族缺陷、运行维护评价和状态检修评价三个属性指标, 从而搭建多属性评估模型来确立模糊因果网络 (Fuzzy Cause-Effect Networks, FCE-Nets) 相关节点的因果系数。通过故障量相关函数完善遗漏的保护信息, 提出基于多属性评判和 FCE-Nets 的变电站故障诊断方法。通过实际应用分析, 对比现有方案的故障诊断结果, 验证了此方法的有效性。

**关键词:** 多属性评判; 故障诊断; 因果系数; 故障量相关函数; 模糊因果网络

## Fault diagnosis for 110 kV substation based on multi-attribute evaluation and fuzzy cause-effect networks

LIN Hui, WANG Yu-jiang, XU Hui

(Zhengzhou Power Supply Company of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** To deal with the uncertain factors and high real-time performance, the elements of 110 kV substation is divided into three kinds of basic correlated nodes by the cause-effect relationship between delay protection equipments based on the protection information, the three kinds of basic correlated nodes are component fault, protection action and breaker tripping or refusing to trip. And then multiple attribute evaluation model is established to determine the causality intensity of associated nodes in FCE-Nets. The correlation function of electric parameters in failure is used to improve the missing information and checking mechanism. Finally, a substation fault diagnosis scheme is proposed based on multiple attribute evaluation and FCE-Nets. With the actual substation application analysis, the proposed scheme is compared with the existing method of fault diagnosis and the results verify the effectiveness of the scheme.

**Key words:** multi-attributes evaluation; fault diagnosis; causal coefficient; correlation function of fault; FCE-Nets

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0036-08

## 0 引言

110 kV 变电站故障跳闸伴随着保护装置启动和开关动作, 监控主机将发出大量的告警提示、动作报告和故障录波记录等实时信息。特别是当这些实时信息与保护装置的拒动、误动以及通信传输错误等非确定性因素混合时, 故障判别的难度和耗时将会极大增加<sup>[1]</sup>。为了准确、方便、快捷地诊断出故障类别和不正确动作设备, 需要通过计算机辅助技术进行实时故障诊断。

变电站故障诊断方法大多依据开关的断合信息<sup>[2-3]</sup>, 如专家系统<sup>[4]</sup>, 人工神经网络<sup>[5-6]</sup>, Petri 网<sup>[7]</sup>和因果网络<sup>[8-9]</sup>等。但这些算法缺乏处理非确定性因素和冗余信息所引起故障的能力。在文献<sup>[10]</sup>中, 针对上述传统诊断方法的缺陷, 提出了 FCE-Nets

算法。该方法能够在保护装置误动、拒动等状况下识别出故障设备。但由于仅是利用了调控人员经验或历史故障数据作为确定因果系数的唯一判据, 忽略了其他一些重要的主客观因素, 并且在后备保护开关动作时, 所有馈线电流均为零, 该算法就无法正确提取到状态向量真值因子。

因此针对 110 kV 变电站故障诊断的多个不确定因素, 本文将设备家族缺陷、运行维护评价和状态检修评价作为因果系数评价指标, 建立 110 kV 变电站故障诊断的多属性评判模型; 同时为了完善由于通信错误导致的保护动作信息缺失引起的漏诊误判问题, 通过利用故障量相关函数完善保护信息的校验, 提出基于多属性评判和 FCE-Nets 的变电站故障诊断方案。通过对某实际 110 kV 变电站的工程应用, 表明本方案的有效性。

## 1 因果网络故障诊断原理

CE-Nets 包括三种基础相关节点: 设备故障、保护动作以及开关跳闸或拒跳。其中若两个节点相关时, 存在如图 1 所示的基本关联: 主保护、因果和后备保护。

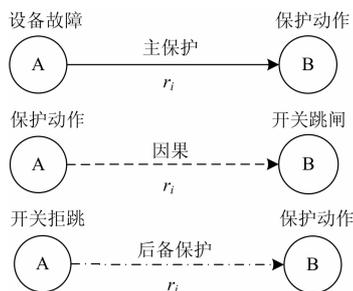


图 1 基本关联

Fig. 1 Basic relation

在 CE-Nets 中可以用二进制矩阵来表示系统中全部基础相关节点的正向关联 ( $r_i$  为因果系数, 当  $r_i=0$  时, 表示节点无关联度, 当  $r_i=1$  时, 则表示相关节点存在如图 1 所示的正向关联)。而故障告警信息到故障原因产生的逆向关联则可以用二进制矩阵的转置来表示, 由此种逆向推理的性质可以快速诊断系统的故障。

本文通过故障模型来阐释 CE-Nets 在变电站故障诊断中的应用。根据图 2 所示, 系统中继电保护装置包括基本的过流保护(OI)和主变后备保护(TOI)。若馈线 E1 发生设备故障, 保护 OI1 将正确动作使开关 DL1 跳闸, 若 DL1 因机械或电气故障拒动, 则近后备的开关失灵, 保护 OI3 将使开关 DL3 跳闸。由此可以得出图 3 中所示的变电站 CE-Nets 网络。图中虚线部分表示的是馈线 E1 上所有的正向保护关联。如果将所有可能引发故障的设备作为故障基础相关节点, 便可得到基于 CE-Nets 的变电站模型。

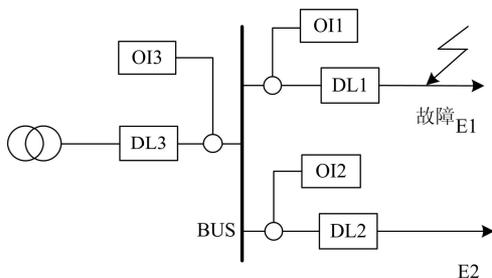
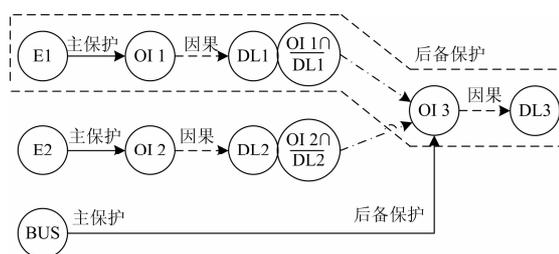


图 2 故障模型

Fig. 2 Model of fault



注:  $OI1 \cap \overline{DL1}$  表示 OI1 动作而 DL1 拒动;  $OI2 \cap \overline{DL2}$ : 表示 OI2 动作而 DL2 拒动。

图 3 基于 CE-Nets 的变电站模型

Fig. 3 Model of based CE-Nets in substation

## 2 因果系数模糊多属性评判模型

考虑到变电站设备的使用年限和性能差异, 因果系数  $r_i$  并不总是确定的 0/1。保护动作时, 如果信息传输失败, 相应的开关不一定跳闸, 为此引入模糊数来表征事件发生的可能性。通过对变电站故障关联因素的分析可知, 因果系数主要受三个因素的影响, 即同一制造商同一型号不同系列的设备发生故障的统计数据、变电站人员的运行维护评价记录和设备状态监测的评价报告记录。通过以上分析评价数据作为因果系数的校正参数, 由此可以建立多属性的因果系数评判模型, 所以选取指标: 1) 设备家族缺陷数据; 2) 运行维护评价数据; 3) 状态检修评价数据。

### 2.1 多属性评判矩阵

设备家族缺陷  $e_1$ , 运行维护评价  $e_2$ , 状态检修评价  $e_3$  组成影响因果系数值的评判指标属性集:

$$E = \{ e_1, e_2, e_3 \}$$

设备家族缺陷  $e_1$  的评判指标值可通过对同一制造商同一型号不同系列的设备发生故障次数进行统计获得。第  $j$  个因果系数的  $e_1$  指标评判值可由式 (2) 计算。

$$e_1 = \frac{N_{jr}}{N_j} \quad (1)$$

式中:  $N_j$  为因果关联节点的家族设备发生故障次数;  $N_{jr}$  为故障中正确动作的次数。

运行维护评价  $e_2$  指标的评价项目为日常巡视检查; 状态检修评价  $e_3$  指标的评价项目包括设备老化, 红外测试和局部放电测试,  $e_2$  和  $e_3$  评判指标由对评价项目打分获得<sup>[11]</sup>, 二者的建议权重见表 1、表 2。

表 1  $e_2$  的建议权重

| 测试项目 | 状态判据             | 权重系数 | 优劣程度 |
|------|------------------|------|------|
| 日常巡视 | 设备内部有异响 $v_{12}$ | 0.5  | 见表 3 |
|      | 设备内部有异味 $v_{22}$ | 0.5  |      |

表 2  $e_3$  的建议权重

| 测试项目 | 设备老化 $v_{13}$ | 红外测试 $v_{23}$ | 局部放电测试 $v_{33}$ |
|------|---------------|---------------|-----------------|
| 权重   | 0.3           | 0.3           | 0.4             |

表 2 中所涉及测试项目的状态量判据见文献 [11], 本文不再赘述。表 3 为根据设备测试项目状态与影响设备安全可靠运行的程度作为优劣程度的分值。

表 3 状态分类建议值

| 设备状态   | 正常 $s_1$ | 注意 $s_2$ | 异常 $s_3$ | 严重 $s_4$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 分值 $S$ | 0.25     | 0.5      | 0.75     | 1        |

故可知

$$e_2 = v_{12}S_i + v_{22}S_i \quad (2)$$

$$e_3 = v_{13}S_i + v_{23}S_i + v_{33}S_i$$

其中,  $s_i (i=1,2,3,4)$  为状态分类的建议得分值。最终形成  $n$  个因果系数的评判矩阵

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & & z_{2n} \\ z_{31} & \cdots & z_{3n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $z_{ij} (i=1,2,3; j=1,2,\dots,n)$  表示第  $j$  个因果系数的第  $i$  个属性  $e_i$  的评判值。

## 2.2 模糊多属性评判方法

为了满足评判结果的客观性和可靠性, 合理地确定多属性评判体系中各评判属性的权重非常重要。权重合理性直接影响着 CE-Nets 模型的准确性。设备家族缺陷  $e_1$ , 运行维护评价  $e_2$ , 状态检修评价  $e_3$  三个属性在评判体系中的权重可以采用层次分析法 [12-14] 来确定, 方法如下。

1) 基于评判体系中各评判属性间的强弱关系来构造正互反矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $n$  指多元评判属性的个数;  $a_{ij}$  指第  $i$  个属性与第  $j$  个属性的重要性比值, 其值采用文献 [15] 中的指数标度(见表 4)。

表 4 判断标度及定义

| 标度      | 定义   | 标度      | 定义   |
|---------|------|---------|------|
| 1       | 同等重要 | 3       | 明显重要 |
| 1.316 1 | 稍微重要 | 5.196 6 | 强烈重要 |
| 1.732 1 | 重要   | 9       | 极端重要 |

### 2) 求权重向量 $\omega$

依次求出矩阵  $\mathbf{A}$  各行之积  $m_i (i=1,2,\dots,n)$ , 再计算  $m_i$  的  $n$  次方根即为

$$\omega'_i = \sqrt[n]{m_i} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (5)$$

对向量  $\omega'_i$  进行归一化得

$$\omega_i = \frac{\omega'_i}{\sum_{i=1}^n \omega'_i} \quad (6)$$

由此可得三个属性的权重向量为

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]$$

### 3) 一致性检验

判别矩阵  $\mathbf{A}$  的不一致性程度由式(7)确定。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI} \quad (7)$$

式中:  $CR$  为一致性比率;  $CI$  为一致性指标;  $RI$  为随机一致性指标(见表 5);  $\lambda_{\max}$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征值;  $n$  为矩阵阶数。当  $CR < 0.1$  时, 矩阵  $\mathbf{A}$  具有满意的一致性, 权重分配较合理; 否则, 可通过文献 [16] 所述判断矩阵一致性调整方法对正互反矩阵进行一致性修正。

表 5  $n$  阶随机一致性指标

| $n$ | $RI$ | $n$ | $RI$ | $n$ | $RI$ |
|-----|------|-----|------|-----|------|
| 1   | 0    | 3   | 0.58 | 5   | 1.12 |
| 2   | 0    | 4   | 0.94 | 6   | 1.24 |

### 4) 求因果系数

根据式(8)对权重值和模糊评判矩阵做变换, 得到待求的因果系数( $u_n$  为第  $n$  个待求因果系数, 其值在 0~1 之间)。

$$r = \omega \cdot \mathbf{Z} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) \cdot \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & & z_{2n} \\ z_{31} & \cdots & z_{3n} \end{bmatrix} = [r_1, r_2, \dots, r_n] \quad (8)$$

### 3 FCE-Nets 故障诊断

为了真实反映变电站各设备间的相关程度, 本文利用多属性评判模型得到图 3 所示的 CE-Nets 基础相关节点间的因果系数值, 建立变电站的模糊因果网络(FCE-Nets), 其结构如图 4 所示。

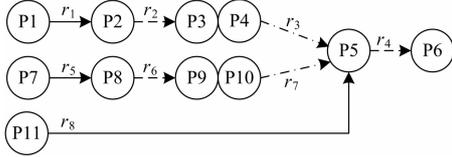


图 4 基于 FCE-Nets 的变电站基础相关节点关联图  
Fig. 4 Graph of basic correlated nodes based FCE-Nets in substation

FCE-Nets 中各基础相关节点的定义如表 6 所示。根据图 4 所示的 FCE-Nets 可得到模糊因果系数的规则矩阵  $\mathbf{R}$ 。若  $P_i$  和  $P_j$  存在图 1 所定义的关联时, 则  $R(i, j) = r_n$ , 表示  $P_i$  是  $P_j$  发生的原因且因果系数为  $r_n$ ; 当无关联度时,  $R(i, j) = 0$ 。通过上述定义可构造规则矩阵  $\mathbf{R}$  如式(9)。

$$\mathbf{R} = \begin{matrix} & \begin{matrix} P1 & P2 & P3 & P4 & P5 & P6 & P7 & P8 & P9 & P10 & P11 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \\ P6 \\ P7 \\ P8 \\ P9 \\ P10 \\ P11 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_7 & r_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_6 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

表 6 基础相关节点定义

Table 6 Specification of basic correlated nodes

| 节点 | 定义             | 节点  | 定义             |
|----|----------------|-----|----------------|
| P1 | E1 馈线故障        | P7  | E2 馈线故障        |
| P2 | OI1 动作         | P8  | OI2 动作         |
| P3 | DL1 跳闸         | P9  | DL2 跳闸         |
| P4 | OI1 动作且 DL1 拒动 | P10 | OI2 动作且 DL2 拒动 |
| P5 | OI3 动作         | P11 | 母线故障           |
| P6 | DL3 跳闸         |     |                |

为了实现基于 FCE-Nets 的变电站故障诊断, 需要定义以下向量和矩阵运算<sup>[17]</sup>。

#### 1) 状态向量 $\mathbf{T}$

$$T(i) = \begin{cases} \lambda_i, & \text{当 } C_i \text{ 为真时} \\ 0, & \text{反之} \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $T(i)$  表示表 6 中定义的基础相关节点的状态; 模糊因子  $\lambda_i$  表征该状态的真值程度, 其取值 0~1 之间模糊数。

#### 2) 故障设备向量 $\mathbf{F}$

$$F(i) = \begin{cases} 1, & \text{当 } C_i \in \text{故障区域节点时} \\ 0, & \text{反之} \end{cases} \quad (11)$$

#### 3) 后备保护向量 $\mathbf{B}$

$$B(i) = \begin{cases} 1, & \text{当 } C_i \in \text{断路器 CB} \\ & \text{的后备保护时} \\ 0, & \text{反之} \end{cases} \quad (12)$$

#### 4) 模糊最小运算 $\wedge$

该运算是取两个列向量对应元素值的较小值如式(13)。

$$\begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.7 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Min}(0.8, 0.1) \\ \text{Min}(0.7, 0.2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

#### 5) 模糊乘运算 $\otimes$

该运算是同矩阵运算中的乘法相似, 但是做取小和取大值的运算, 如式(14)。

$$\begin{bmatrix} 0.8 & 0.3 \\ 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Max}(\text{Min}(0.8, 0.7), \text{Min}(0.3, 0.4)) \\ \text{Max}(\text{Min}(0.6, 0.7), \text{Min}(0.5, 0.4)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

在利用 FCE-Nets 进行变电站故障诊断中,  $k \times k$  阶规则矩阵  $\mathbf{R}$  根据  $k$  个存在因果关系的基础相关节点来构造。状态向量  $\mathbf{T}$  根据开关跳闸和以及保护动作等故障信息来构造。然后根据式(15)计算转换向量  $\mathbf{TV}$ 。

$$\mathbf{TV} \equiv \mathbf{R}^T \otimes \mathbf{T} \quad (15)$$

为了确定有无设备失灵的情况, 根据  $\mathbf{TV}$  与  $\mathbf{T}$  的对比结果可知, 两者相等时, 变电站没有设备失灵的情况。反之, 存在设备失灵, 在待选故障设备集中将此基础相关节点删除, 即可得到故障设备信息向量, 根据式(17)计算故障设备信息向量。

$$\mathbf{T}^* \equiv \mathbf{TV} - [\mathbf{R}^T \otimes (\mathbf{B} \wedge \mathbf{T})] \quad (16)$$

为了使得故障诊断更加准确快速, 必须完善后备保护开关动作时的保护信息校核方法, 以克服保护信息缺失导致的故障漏诊现象。本文通过变电站中合并单元(Merging Unit, MU)将故障前电气量信

息通过站内 (Generic Object Oriented Substation Event, Goose)网络传递至 CPU, 依据高斯隶属型函数, 可以得到故障量相关函数  $\rho(I_i)$ , 如图 5 所示, 状态向量  $T(i)$  的模糊系数为

$$\lambda_i = \rho(I_i) = \begin{cases} 1, & I \geq I_b \\ \frac{-(I_i - I_b)^2}{2\sigma_i^2}, & 0 \leq I < I_b \end{cases}, \sigma_i = \frac{I_b - I_{ia}}{3} \quad (17)$$

式中,  $I_{ia}$  和  $I_{ib}$  分别为三段式过流保护整定值。

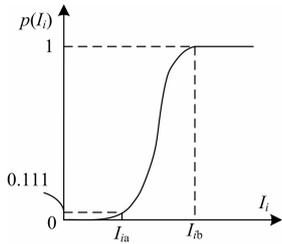


图 5 故障量相关函数

Fig. 5 The correlated function of fault

如图 6 诊断流程所示, 该算法通过利用开关跳闸信号、保护动作等信息建立所需状态向量  $T$ 、 $B$ 、 $F$ , 再根据式(16)计算不含设备失灵的故障设备信息向量  $T^*$ 。通过式(14)进行  $T^*$  与  $F$  的模糊最小运算, 则最后故障诊断结果中凡是数值超过阈值  $\lambda_i$  的基础相关节点即为故障设备。

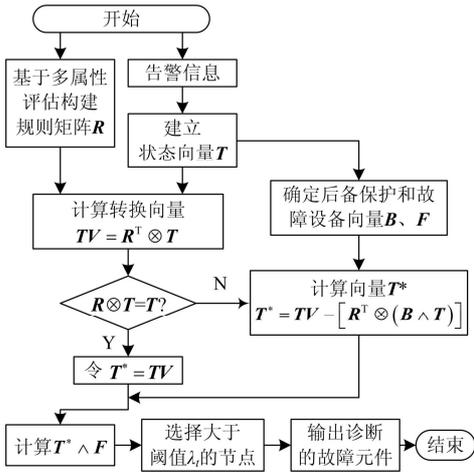


图 6 基于多属性评估的变电站故障诊断流程

Fig. 6 Flow chart of fault diagnosis for substation based on multi-attribute evaluation

#### 4 算例分析

以某 110 kV 变电站的故障为例, 如图 7 采用单母分段的主接线。其中 5 回 10 kV 馈线均配备过流保护 OI(包括 OI-A, OI-B, OI-C)以及主变低压侧后

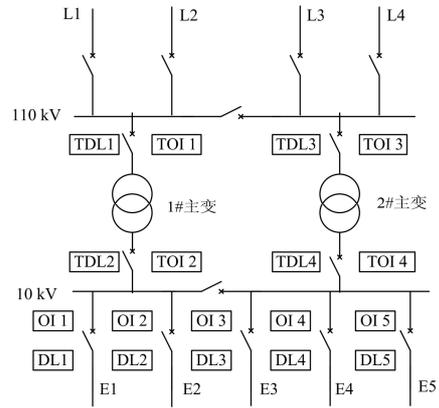


图 7 主接线图

Fig. 7 Main electric diagram

备保护 TOI。

算例中 2#主变检修故 110 kV 母联闭合、10 kV 分段开关闭合。在 E1 馈线间隔发生三相短路接地以及在 E5 馈线间隔发生相间短路, 保护过流元件 OI1-A、OI1-B、OI1-C 和 OI5-A、OI5-C 将分别动作, 结果 DL5 开关正确动作, 而开关 DL1 由于设备故障导致失灵没有正确动作, 因此主变低压侧后备保护 TOI1 保护延时动作, 跳开主变低压侧进线开关 TDL2 从而将故障点隔离。具体故障信息见表 7。

表 7 故障信息

Table 7 Information of faults

|        |  |
|--------|--|
| 保护动作信号 | OI1-A, OI1-B, OI1-C, OI5-A, OI5-C,<br>TOI2-A, TOI2-B, TOI2-C |
| 开关跳闸信号 | DL5, TDL2  |
| 失灵设备   | DL1  |
| 缺失信息   | OI1-A, OI1-C   |

结合变电站故障诊断的工程实际, 设备家族缺陷  $e_1$ , 运行维护评价  $e_2$ , 状态检修评价  $e_3$  这三个评判因素的重要性强弱关系依次为  $e_1 > e_2 > e_3$ , 且存在明显强度差。故正互反矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1.7321 & 3 \\ 0.5773 & 1 & 1.3161 \\ 1/3 & 0.7598 & 1 \end{bmatrix}$$

根据式(6)、式(7)得  $\omega_1 = 0.5297$ 、 $\omega_2 = 0.2758$  和  $\omega_3 = 0.1945$ , 且有  $\lambda_{\max} = 3.0084$ , 而  $n = 3$  时  $RI = 0.58$ 。则由式(8)得

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0042}{0.58} = 0.0072 < 0.1$$

因此, 权重向量  $\omega = [0.5297, 0.2758, 0.1945]$  的取值是合理的。

图 8 和表 8 分别给出了基于 FCE-Nets 的变电站基础相关节点关联图及其定义。



表 14  $T^* \wedge F$  向量

Table 14 Entries of  $T^* \wedge F$  vector

| [i] | 数值   | [i]  | 数值 | [i]  | 数值   |
|-----|------|------|----|------|------|
| [1] | 0.91 | [9]  | 0  | [17] | 0    |
| [2] | 0    | [10] | 0  | [18] | 0    |
| [3] | 0    | [11] | 0  | [19] | 0.82 |
| [4] | 0    | [12] | 0  | [20] | 0    |
| [5] | 0    | [13] | 0  | [21] | 0    |
| [6] | 0    | [14] | 0  | [22] | 0    |
| [7] | 0    | [15] | 0  | [23] | 0    |
| [8] | 0    | [16] | 0  |      |      |

当采用没有基于保护信息校核方法的 FCE-Nets 算法时, 由于通信故障无法采集到 OI1-A 和 OI1-C 的保护信息, OI1 保护根本就不会启动, 从而导致状态向量中  $T [2]=0$ 。这种情况下, 最终的故障诊断结果只有馈线 E5 故障, 而将馈线 E1 故障遗漏。

当采用没有基于保护信息校核方法的 FCE-Nets 算法时, 由于通信故障无法采集到 OI1-A 和 OI1-C 的保护信息, OI1 保护根本就不会启动, 从而导致状态向量中  $T [2]=0$ 。这种情况下, 最终的故障诊断结果只有馈线 E5 故障, 而将馈线 E1 故障遗漏。

通过与文献[11]中仅依靠历史故障数据作为因果系数的单属性 FCE-Nets 计算结果(见表15)对比分析可知, 当历史故障数据的因果系数较低时(特别是变电站运行初期), 单属性 FCE-Nets 方案可能出现漏诊现象。本文方法将设备家族缺陷、运行维护评价和状态检修评价作为因果系数的评判依据, 综合考虑设备之间的性能差异, 因此故障诊断结果的准确性不仅高于现有方法, 且在判断阈值过高时, 本文方法还可有效避免漏诊和误判, 确保了变电站故障诊断的准确性。

表 15 单属性 FCE-Nets 的  $T^* \wedge F$  向量

Table 15 Entries of  $T^* \wedge F$  vector based on single-attribute FCE-Nets

| [i] | 数值   | [i]  | 数值 | [i]  | 数值   |
|-----|------|------|----|------|------|
| [1] | 0.60 | [9]  | 0  | [17] | 0    |
| [2] | 0    | [10] | 0  | [18] | 0    |
| [3] | 0    | [11] | 0  | [19] | 0.75 |
| [4] | 0    | [12] | 0  | [20] | 0    |
| [5] | 0    | [13] | 0  | [21] | 0    |
| [6] | 0    | [14] | 0  | [22] | 0    |
| [7] | 0    | [15] | 0  | [23] | 0    |
| [8] | 0    | [16] | 0  |      |      |

## 5 结论

本文提出一种基于多属性评判和 FCE-Nets 的 110 kV 变电站故障诊断方案。通过算例分析可知,

采用多属性评判确定因果系数的 FCE-Nets 算法不仅能够对变电站进行快速准确的故障诊断, 同时其准确性也明显高于现有算法。本文所提方案可靠有效, 简单易行, 具有较高的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 苏宏升, 李群湛. 基于粗糙集理论和神经网络模型的变电站故障诊断方法[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 66-70.  
SU Hong-sheng, LI Qun-zhan. Substation fault diagnosis method based on rough set theory and neural network model[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 66-70.
- [2] 张志毅, 袁荣湘, 杨同忠, 等. 基于粗糙集和小生境遗传算法的电网故障诊断规则提取[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 158-163.  
ZHANG Zhi-yi, YUAN Rong-xiang, YANG Tong-zhong, et al. A rule extraction for power system fault diagnosis based on the combination of rough sets and niche genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 158-163.
- [3] 尹金良, 朱永利, 俞国勤, 等. 基于高斯过程分类器的主变故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.  
YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Fault diagnosis of transformers based on gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.
- [4] 郑维明, 张沛超, 王锡生. 数字化变电站中闭锁逻辑自动生成专家系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 125-129.  
ZHENG Wei-ming, ZHANG Pei-chao, WANG Xi-sheng. An expert system of automatic interlocking schemes generation for digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 125-129.
- [5] 杜林, 李欣, 王丽蓉, 等. 电力系统暂时过电压多级支持向量机分层识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 26-31.  
DU Lin, LI Xin, WANG Li-rong, et al. Temporary over voltage layered pattern identification based on multistage support vector machine in power system[J]. Power System Protection and control, 2012, 40(4): 26-31.
- [6] SUN Y, JIANG H, WANG D. Fault synthetic recognition for an EHV transmission line using a group of neural networks with a time-space property[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution, 1998, 145(3): 265-270.

- [7] 王增平, 王雪. 基于  $k$  可加模糊测度的主变励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 45-48.  
WANG Zeng-ping, WANG Xue. Transformer inrush current identification based on  $k$ -order additive fuzzy measures[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 45-48.
- [8] CHEN W H, LIU C W, TSAI M S. On-line fault diagnosis of distribution substations using hybrid cause-effect network and fuzzy rule-based method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 710-717.
- [9] CHEN W H, LIU C W, TSAI M S. Fast fault section estimation in distribution substations using matrix-based cause-effect networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 522-527.
- [10] CHEN W H. Fault section estimation using fuzzy matrix-based reasoning methods[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 205-213.
- [11] 李刚, 朱革兰. 配网开关柜状态检测与评价实施方式的探讨[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 133-138.  
LI Gang, ZHU Ge-lan. Study on the implementation of switchgear status detection and evaluation for distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 133-138.
- [12] 雷刚, 顾伟, 袁晓冬. 考虑系统与敏感负荷兼容性的电压暂降指标[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 132-138.  
LEI Gang, GU Wei, YUAN Xiao-dong. A voltage sag index considering compatibility between system and sensitive equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 132-138.
- [13] 吕跃进, 张维. 指数标度在 AHP 标度系统中的重要作用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(5): 452-456.  
LÜ Yue-jin, ZHANG Wei. Kernel function of index scale in AHP scale system[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(5): 452-456.
- [14] 马存宝, 张彦辉, 史浩山, 等. 基于模糊多属性评判方法的因果强度求解算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 257-260.  
MA Cun-bao, ZHANG Yan-hui, SHI Hao-shan, et al. Causal strength solving algorithm based on fuzzy multi-attribute evaluation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 257-260.
- [15] 骆思佳, 廖瑞金, 王有元, 等. 带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 106-110.  
LUO Si-jia, LIAO Rui-jin, WANG You-yuan, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power transformer condition with variable weights[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 106-110.
- [16] 华中生, 吴云燕, 徐晓燕. 一种 AHP 判断矩阵一致性调整的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(1): 38-40.  
HUA Zhong-sheng, WU Yun-yan, XU Xiao-yan. A new method of consistency regulation for the AHP judgment matrix[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(1): 38-40.
- [17] 徐国钧, 刘永胜, 华靓, 等. 基于模糊因果网络的智能变电站故障诊断应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 93-98.  
XU Guo-jun, LIU Yong-sheng, HUA Liang, et al. Application of smart substation fault diagnosis based on fuzzy cause-effect networks[J]. Power System Protection and control, 2013, 41(8): 93-98.

---

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-06-14

作者简介:

林 慧 (1971-), 女, 高级工程师, 从事电力系统管理工作;

王予疆 (1987-), 男, 助理工程师, 从事电力系统运行与控制工作。E-mail: wyj1762@163.com