

基于电网关联域信息融合和LSSVM的广域后备保护新算法

借助人工智能技术,提出了一种基于LSSVM的广域后备保护新算法。该算法给出了电网节点关联域的定义和域内信息融合策略,保护系统利用电网节点IED采集相关关联域各元件状态信息并进行信息融合。融合后的信息构成特征向量输入到LSSVM分类器,以识别电网故障关联域节点IED,进而定位故障元件。通过大量实验仿真,证明基于电网关联域信息融合和LSSVM的广域后备保护新算法,准确率高,具有很好的容错性。

吴浩^{1,2} 李群湛¹ 刘炜¹/1.西南交通大学电气工程学院 2.四川理工学院自动化与电子信息学院



吴浩/副教授

关键词/Keywords

广域后备保护 ·
电网节点关联域 ·
信息融合 ·
节点IED ·
LSSVM ·
故障元件定位 ·

传统后备保护主要基于本地测量信息进行整定,整定难度大,相互配合困难,动作时限无法满足大电网的安全稳定控制要求。近年来,随着广域测量技术的快速发展,国内外学者提出了广域后备保护的概念并进行了初步研究^[1-3],以提高传统后备保护的性能。

目前,主要有基于差动原理和基于信息融合原理的广域后备保护研究,其中广域差动原理灵敏度较高、选择性较好,算法简单,但是在广域范围内通信量较大,且对多点数据的同步性要求较高^[4-6]。广域信息融合算法应用了相关矩阵、遗传算法和搜索决策等原理实现故障元件的识别^[7-10],能提高保护的容错性能。有学者还提出了基于比较原理的广域后备保护算法,文献[11]是对电网线路序电流相位和幅值进行比较构成广域后

基金项目资助:人工智能四川省重点实验室(2013RYY01,2012RYY06,2014RYY05,2015RYY01),自贡市科技局项目(2012D08)。

备保护故障线路识别判据,文献[12]给出了广域保护区的综合阻抗定义和计算方法,根据区内外故障时广域综合阻抗的明显区别构成故障识别判据。文献[13]利用电压、电流故障分量在线路一侧的测量值去推算电压故障分量在线路另一侧的推算值,以推算值与测量值的比值构成电网故障元件识别判据。其他还有基于故障关联因子、基于广域故障录波信息、基于数据网和贝叶斯网络等方法进行故障诊断等广域后备保护思想^[14-17]。

本文在上述广域后备保护大量研究的基础上,为了提高广域后备保护的可靠性和冗余性,提出基于电网关联域信息融合和LSSVM的广域后备保护新算法,给出了电网关联域定义,对关联域内部线路IED信息进行融合,利用关联域内节点IED获取融合后的关联域信息构成LSSVM的特征向量,以识别电网故障关联域节点IED,进而定位故障元件。

LSSVM分类原理

最小二乘支持向量机(LSSVM)是Suykens等人提出的一种新型支持向量机方法,主要解决模式分类和函数估计等问题^[18]。为代替传统支持向量机采用的二次规划方法,LSSVM的损失函数采用了最小二乘线性系统,简化了计算的复杂性,加快了运算速度。

求解LSSVM本质上是求解以下优化问题^[18]

$$\min J(w, \xi) = \frac{1}{2} w \cdot w + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (1)$$

$$s.t: y_i = \varphi(x_i) \cdot w + b + \xi_i, \quad i = 1, \dots, l$$

定义相应的Lagrange函数式

$$L(w, b, \xi, a, \gamma) = \frac{1}{2} w \cdot w + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2 - \sum_{i=1}^l a_i [w \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i] \quad (2)$$

利用拉格朗日乘子 $a_i (i = 1, \dots, l)$ 求解优化问题如下

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} w = \sum_{i=1}^l a_i \varphi(x_i) \\ \sum_{i=1}^l a_i = 0, a_i = c \xi_i \end{cases} \quad (4)$$

$$w \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \quad (5)$$

定义核函数 $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)$, $K(x_i, x_j)$ 满足Mercer条件的对称函数。根据式(5), 优化问题转化为求解线性方程

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & K(x_1, x_1) + \frac{1}{c} & \dots & K(x_1, x_l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & K(x_l, x_1) & \dots & K(x_l, x_l) + \frac{1}{c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ a_1 \\ \vdots \\ a_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_l \end{pmatrix} \quad (6)$$

对上述线性方程可由最小二乘法求出回归系数 a_i 和偏差 b , 则LSSVM分类函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^l a_i K(x_i, x_j) + b \quad (7)$$

选择不同的核函数 $K(x_i, x_j)$ 可以得到不同的支持向量机, 本文选择径向基核函数(RBF) $K(x_i, x_j) = \exp(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma^2)$ 构造LSSVM。

关联域信息融合策略

1. 电网节点关联域

电网某个变电站节点上连接的所有线路和该

节点所在母线, 定义为该变电站的节点关联域。其中, 在变电站节点上装设电网节点IED, 在线路两端装设线路IED。如图1所示, 变电站B3所在处安装有电网的一个节点IED_{B3}, 与该变电站节点直接连接的线路有三条, 分别为线路L2、L3和L4。依据本文对电网节点IED关联域的定义, 可知线路L2、L3、L4和母线B3共同构成了节点IED_{B3}的关联域, 如图1虚线①所包含区域, 该节点关联域内部线路IED为IED3、IED4、IED5、IED6、IED7和IED8, 其中IED3、IED6和IED8为关联域①的边界IED。同理可以得到节点IED_{B1}、节点IED_{B2}、节点IED_{B4}和节点IED_{B5}的节点关联域和相应关联域内线路IED。

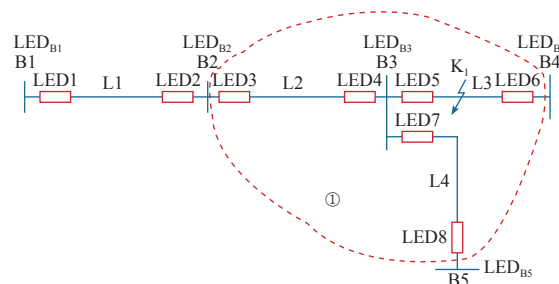


图1 电网节点关联域分析

本文提出的广域后备保护算法, 使用线路IED采集相应线路端的元件状态信息, 电网关联域节点IED采集节点所在关联域的线路IED信息并进行融合。

2. 线路IED状态信息

广域后备保护算法中的电网关联域信息融合, 需要利用电网节点关联域内线路IED状态信息, 主要包括故障时关联域内线路方向元件信息、距离I、II段与距离III段测量元件信息、线路就地主保护和断路器状态信息等。根据文献[19], 定义关联域内线路IED采集的各元件状态信息如表1所示。

本文所用到的状态信息均为“0”、“1”态, 因此可以运用逻辑运算方法对信息进行融合。

3. 关联域信息融合

本文提出的广域后备保护算法, 使用线路IED采集相应线路端的元件状态信息, 电网节点IED采集节点所在关联域内线路IED信息并进行融合。设

表1 元件状态信息定义

元件对象	元件动作状态信息	
	0	1
线路就地主保护	线路主保护未动作、拒动作或该信息丢失	线路主保护动作
线路方向元件	方向元件未动作、拒动作或该信息丢失或反方向	正方向
线路距离 I 段	距离I段未动作、拒动作或该信息丢失	距离I段动作
线路距离 II 段	距离II段未动作、拒动作或该信息丢失	距离II段动作
线路距离 III 段	距离III段未动作、拒动作或该信息丢失	距离III段动作
线路断路器	断路器未动作、拒动作或该信息丢失	断路器动作

定关联域内编号为*i*的线路IED_{*i*}采集相应线路端的方向元件动作信息 F_i 、线路距离 I 段测量信息 Z_i^I 、距离 II 段测量信息 Z_i^{II} 、距离 III 段测量信息 Z_i^{III} 、线路就地主保护动作信息 P_i 和断路器动作信息 Q_i 。线路IED_{*i*}采集的信息上传到关联域节点IED，节点IED内对采集到的相应域内元件状态信息应用本文提出的信息融合策略进行信息融合，以构成LSSVM模型的输入向量。

电网节点关联域信息融合的目的是利用关联域内各元件状态信息的相互联系，去纠正可能的信息缺失或错误。将电网节点关联域内各种主保护信息、线路断路器动作信息、距离元件信息及方向元件信息以一定的融合策略分类进行信息融合，形成LSSVM模型的输入向量，以便提高算法对故障定位的冗余性和可靠性。下文以图1节点IED_{B3}所在关联域①为例具体说明信息融合状态表达式。

(1) 关联域内线路方向元件的信息融合

令 F_i 为关联域内编号为*i*的线路IED_{*i*}采集到的域内线路端方向元件状态信息。

分别对关联域内每条线路两端的方向元件信息做“与”运算进行融合，图1关联域①中： $F_{L2}=F_3 \cdot F_4$ ，线路L2两端方向元件信息融合； $F_{L3}=F_5 \cdot F_6$ ，线路L3两端方向元件信息融合； $F_{L4}=F_7 \cdot F_8$ ，线路L4两端方向元件信息融合。

LSSVM网络输出值与对应的节点IED故障类

如表2所示。

对关联域边界端的方向元件信息做“与”运算进行融合，图1关联域①中： $F_{bj}=F_3 \cdot F_6 \cdot F_8$ 。

关联域内线路两端和边界端的方向元件信息融合结果再作逻辑“或”运算进行融合，得到关联域节点IED的域内方向信息。即关联域①线路方向元件的信息融合状态表达式为

$$O_{B3}=F_{L2}+F_{L3}+F_{L4}+F_{bj} \quad (8)$$

(2) 关联域内距离 I、III 段测量元件信息融合
令 Z_i^I 、 Z_i^{III} 为关联域内编号为*i*的线路IED_{*i*}采集到的域内线路端距离 I、III 段测量元件状态信息。

关联域内各条线路距离 I、III 段测量信息的融合，是将关联域内相应线路边界IED中的距离 III 段测量信息与该关联域内其他线路所有距离 I 段测量信息的“或”运算结果相“与”。图1关联域①中： $Z_{L2-I-III}=Z_3^{III} \cdot (Z_5^I+Z_6^I+Z_7^I+Z_8^I)$ ； $Z_{L3-I-III}=Z_6^{III} \cdot (Z_3^I+Z_4^I+Z_7^I+Z_8^I)$ ； $Z_{L4-I-III}=Z_8^{III} \cdot (Z_3^I+Z_4^I+Z_5^I+Z_6^I)$ 。

对关联域内各条线路距离 I、III 段测量信息的融合结果再求“或”运算，得到关联域节点IED的距离 I、III 段测量综合信息。即关联域①距离 I、III 段测量综合信息融合状态表达式为

$$Z_{B3I-III}=Z_{L2I-III}+Z_{L3I-III}+Z_{L4I-III} \quad (9)$$

(3) 关联域内距离 II、III 段测量元件信息融合
令 Z_i^{II} 、 Z_i^{III} 为关联域内编号为*i*的线路IED_{*i*}采集到的关联域线路端距离 II、III 段测量元件状态信息。

关联域内各条线路距离 II、III 段测量信息的融合，是将关联域内相应线路边界IED中的距离 III 段测量信息与域内其他线路所有距离 II 段测量信息的逻辑“或”运算结果相“与”。图1关联域①中： $Z_{L2-II-III}=Z_3^{III} \cdot (Z_5^{II}+Z_6^{II}+Z_7^{II}+Z_8^{II})$ ； $Z_{L3-II-III}=Z_6^{III} \cdot (Z_3^{II}+Z_4^{II}+Z_7^{II}+Z_8^{II})$ ； $Z_{L4-II-III}=Z_8^{III} \cdot (Z_3^{II}+Z_4^{II}+Z_5^{II}+Z_6^{II})$ 。

对关联域内各条线路距离 II、III 段测量信息的融合结果再求“或”运算，得到关联域节点IED的距离 II、III 段测量综合信息。即关联域①距离 II、III 段测量综合信息融合状态表达式为

$$Z_{B3II-III}=Z_{L2II-III}+Z_{L3II-III}+Z_{L4II-III} \quad (10)$$

(4) 关联域内距离 I、II 段测量元件信息融合

令 Z_i^I 、 Z_i^{II} 为关联域内编号为 i 的线路IED采集到的域内线路端距离 I、II 段测量元件状态信息。

关联域内各条线路距离 I、II 段测量信息的融合,是将关联域内每条线路两端的距离 I、II 段测量元件信息各自做逻辑“与”运算后再求“或”。图1关联域①中: $Z_{L2-I-II} = (Z_3^I \cdot Z_4^I) + (Z_3^{II} \cdot Z_4^{II})$; $Z_{L3-I-II} = (Z_5^I \cdot Z_6^I) + (Z_5^{II} \cdot Z_6^{II})$; $Z_{L4-I-II} = (Z_7^I \cdot Z_8^I) + (Z_7^{II} \cdot Z_8^{II})$ 。

对关联域内各条线路距离 I、II 段测量信息的融合结果再求“或”运算,得到关联域节点IED的域内距离 I、II 段综合状态信息,即关联域①线路距离 I、II 段测量元件综合信息融合状态表达式为

$$Z_{B3-I-II} = Z_{L2-I-II} + Z_{L3-I-II} + Z_{L4-I-II} \quad (11)$$

(5) 关联域内线路主保护和断路器状态信息融合

令 P_i 、 Q_i 为关联域内编号为 i 的线路IED采集到的域内线路端主保护和相应断路器状态信息。

关联域内各条线路主保护和断路器状态信息的融合,是将关联域内每条线路一端的主保护和另一端的断路器状态信息做逻辑“或”运算后再求“与”。图1关联域①中: $P_{L2-P-Q} = (P_3 + Q_4) \cdot (Q_3 + P_4)$; $P_{L3-P-Q} = (P_5 + Q_6) \cdot (Q_5 + P_6)$; $P_{L4-P-Q} = (P_7 + Q_8) \cdot (Q_7 + P_8)$ 。

对关联域内各条线路主保护和断路器状态信息的融合结果再求“或”运算,得到关联域节点IED的域内线路主保护和断路器综合状态信息,即关联域①线路主保护和断路器信息融合状态表达式为

$$P_{B3-P-Q} = P_{L2-P-Q} + P_{L3-P-Q} + P_{L4-P-Q} \quad (12)$$

基于LSSVM的广域后备保护故障定位

对基于LSSVM的广域后备保护故障定位网络,以电网关联域节点IED采集的信息构成LSSVM网络的输入向量,上述给出了关联域内各元件信息融合的分析,关联域节点IED最终采集的信息量为融合后的线路方向元件信息、距离 I、II 段与距离 III 段测量元件信息、线路就地主保护和断路器状态信息。为了能定位关联域母线故

障,本文节点IED还需要采集关联域节点所在母线主保护的動作信息 B_{Bk} 。

$$B_{Bk} = \begin{cases} 1 & \text{母线主保护动作} \\ 0 & \text{母线主保护未动、拒动或信息丢失} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{即电网第 } k \text{ 个关联域节点 IED}_{Bk} \text{ 的状态向量为} \\ \text{IED}_{Bk} = \begin{pmatrix} O_{Bk} & Z_{Bk-I-III} & Z_{Bk-II-III} & Z_{Bk-I-II} & Z_{Bk-P-Q} & B_{Bk} \end{pmatrix} \quad (14)$$

考虑电网关联域域内故障、域外故障及电网正常运行时节点IED可能采集到的状态向量来构造故障定位网络训练样本矩阵,以便训练LSSVM网络。

LSSVM网络将输入的电网关联域节点样本矩阵分为3类,即线路故障关联域节点IED类、母线故障关联域节点IED类和非故障关联域节点IED类。在电网可能的运行工况下,广域后备保护依据关联域节点IED采集到的状态信息向量形成电网关联域节点IED样本矩阵 D 。

$$D = \begin{pmatrix} \text{IED}_{B1} \\ \text{IED}_{B2} \\ \vdots \\ \text{IED}_{Bk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} O_{B1} & Z_{B1-I-III} & Z_{B1-II-III} & Z_{B1-I-II} & P_{B1-P-Q} & B_{B1} \\ O_{B2} & Z_{B2-I-III} & Z_{B2-II-III} & Z_{B2-I-II} & P_{B2-P-Q} & B_{B2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ O_{Bk} & Z_{Bk-I-III} & Z_{Bk-II-III} & Z_{Bk-I-II} & P_{Bk-P-Q} & B_{Bk} \end{pmatrix} \quad (15)$$

矩阵 D 中各元素对应的是关联域节点IED采集得到的域内各元件状态融合信息,通过广域后备保护系统实时采集获得。将该矩阵送入训练好的LSSVM网络进行故障定位,得到相应输出类别节点IED。若某一个节点IED归为母线故障关联域节点IED类,则该节点IED所在母线判定为故障母线;若关联域节点IED归为线路故障关联域节点IED类,则两个相邻的线路故障关联域节点IED所关联的线路判定为故障线路;若某个线路故障关联域节点IED无相邻节点,则该节点所在关联域判定为疑似故障域。

故障定位流程如图2所示。

算例仿真

为验证基于关联域信息融合和LSSVM的广域后备保护故障定位算法的正确性,本文以IEEE-3机9节点系统为例进行仿真分析,电路如图3

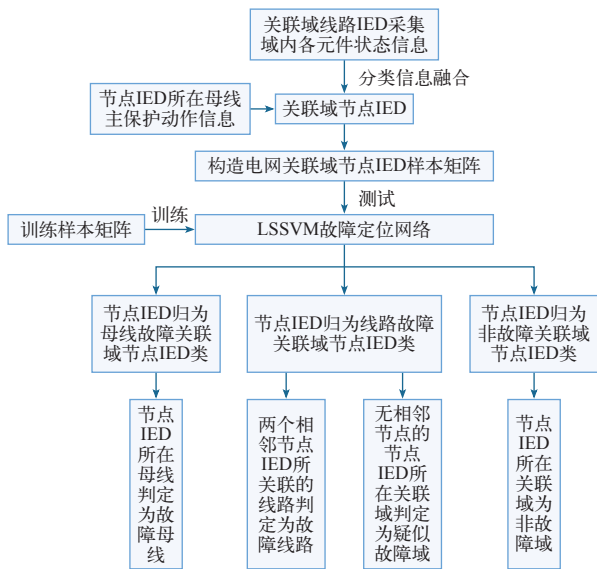


图2 广域后备保护LSSVM网络故障定位

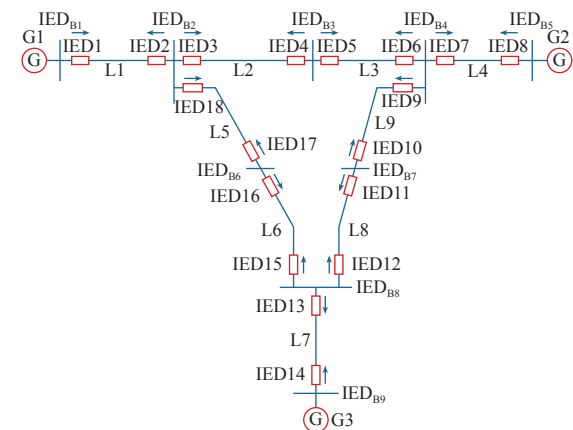


图3 IEEE3机9节点系统

所示。

1. 网络训练样本矩阵

以关联域节点IED最终采集的母线主保护动作信息、融合后的域内线路各元件状态信息为特征值，考虑各种运行工况下关联域节点可能得到的状态向量，构造LSSVM网络的训练样本矩阵。

在图3电路中，节点关联域内线路故障时，按照本文提出的信息融合策略，无论节点连接多少条线路，若所有信息准确，则关联域方向元件信息融合后为1，距离Ⅰ、Ⅲ段综合信息融合后为1，距离Ⅱ、Ⅲ段综合信息融合后为1，距离Ⅰ、Ⅱ段综合信息融合后为1，线路就地主保护和相应断路器信息融合后为1，节点所在母线主保护信息为0，故节点IED状态向量为： $IED_{LF}=[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0]$ 。

节点关联域内无故障时，则关联域内方向元件信息融合后为0，距离Ⅰ、Ⅲ段综合信息融合后为0，距离Ⅱ、Ⅲ段综合信息融合后为0，距离Ⅰ、Ⅱ段综合信息融合后为0，线路就地主保护和相应断路器信息融合后为0，节点所在母线主保护信息为0，故节点IED状态向量为： $IED_{TR}=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 。

关联域内节点所在母线故障时，关联域内方向元件信息融合后为1，距离Ⅰ、Ⅲ段综合信息融合为0，距离Ⅱ、Ⅲ段综合信息融合后为1，距离Ⅰ、Ⅱ段综合信息融合后为0，线路就地主保护和相应断路器信息融合后为0，节点所在母线主保护信息为1，故此时节点IED状态向量为： $IED_{BF}=[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$ 。

故可得LSSVM网络的训练样本矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} IED_{TR} \\ IED_{LF} \\ IED_{BF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

LSSVM网络目标向量 $G=[1\ 2\ 3]$ 。

表2 LSSVM网络输出值与对应的节点IED故障类

LSSVM网络输出值	对应节点IED故障类
1	非故障关联域节点IED类
2	线路故障关联域节点IED类
3	母线故障关联域节点IED类

2. 基于LSSVM的广域后备保护故障定位仿真

为了验证电网在各种运行工况下LSSVM网络定位故障元件的性能，选择几种典型故障进行故障定位分析，同时考虑关联域节点IED采集的状态信息部分丢失、部分错误等情况下LSSVM的定位能力。

(1) 线路L2故障

线路L2故障时，IEEE 3机9节点系统中，节点IEDB2采集所在关联域内线路IED1、IED2、IED3、IED4、IED17和IED18上传的元件状态信息并进行分类融合，其中域内线路方向元件的信息融合状态为

$$\begin{aligned} O_{B2} &= F_1 \cdot F_2 + F_3 \cdot F_4 + F_{17} \cdot F_{18} + F_1 \cdot F_4 \cdot F_{17} \\ &= 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

域内线路距离Ⅰ、Ⅲ段测量信息融合状态为

$$\begin{aligned}
Z_{B2I-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^I + Z_4^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + \\
&\quad Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_3^I + Z_4^I) \\
&= 1 \cdot (1+1+0+0) + 1 \cdot (0+0+0+0) + 1 \cdot (0+0+1+1) \\
&= 1
\end{aligned}$$

域内线路距离 II、III 段测量信息融合状态为

$$\begin{aligned}
Z_{B2II-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^{II} + Z_4^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + \\
&\quad Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_3^{II} + Z_4^{II}) \\
&= 1 \cdot (1+1+0+0) + 1 \cdot (0+0+0+0) + 1 \cdot (0+0+1+1) \\
&= 1
\end{aligned}$$

域内线路距离 I、II 段测量信息融合状态为

$$\begin{aligned}
Z_{B2I-II} &= (Z_1^I \cdot Z_2^I) + (Z_1^{II} \cdot Z_2^{II}) + (Z_3^I \cdot Z_4^I) + (Z_3^{II} \cdot Z_4^{II}) + \\
&\quad (Z_{17}^I \cdot Z_{18}^I) + (Z_{17}^{II} \cdot Z_{18}^{II}) \\
&= (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) + (1 \cdot 1) + (1 \cdot 1) + (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) \\
&= 1
\end{aligned}$$

域内线路主保护和断路器状态信息融合状态为

$$\begin{aligned}
Z_{B2P-Q} &= (P_1 + Q_2) \cdot (Q_1 + P_2) + (P_3 + Q_4) \cdot (Q_3 + P_4) + \\
&\quad (P_{17} + Q_{18}) \cdot (Q_{17} + P_{18}) \\
&= (0+0) \cdot (0+0) + (1+1) \cdot (1+1) + (0+0) \cdot (0+0) \\
&= 1
\end{aligned}$$

同时节点 IED_{B2} 还采集所在母线主保护的動作状态 B_{B2} = 0, 所以可得 L2 线路故障时电网关联域节点 IED_{B2} 的状态信息向量为

$$\begin{aligned}
\text{IED}_{B2} &= \begin{pmatrix} O_{B2} & Z_{B2I-III} & Z_{B2II-III} & Z_{B2I-II} & Z_{B2P-Q} & B_{B2} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

同理可推导电网其他关联域节点 IED 状态信息向量, 则此种故障条件下的电网关联域节点 IED 样本矩阵 **D** 为

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \text{IED}_{B1} \\ \text{IED}_{B2} \\ \text{IED}_{B3} \\ \text{IED}_{B4} \\ \text{IED}_{B5} \\ \text{IED}_{B6} \\ \text{IED}_{B7} \\ \text{IED}_{B8} \\ \text{IED}_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

所有元件状态信息准确。将此样本矩阵 **D** 作为 LSSVM 故障定位网络输入, 仿真结果见图 4 所示。

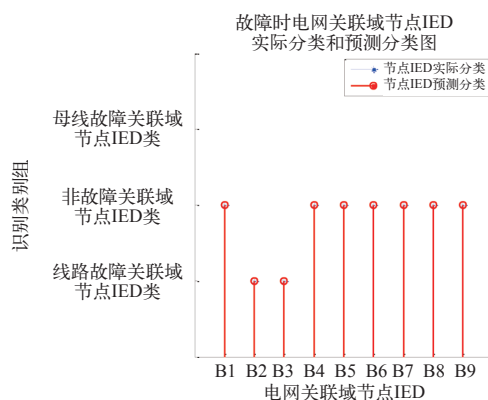


图4 信息准确时关联域节点 IED 分类结果图

由分类结果图 4 可知, 电网关联域节点 IED_{B2} 和 IED_{B3} 被 LSSVM 网络识别为线路故障关联域节点 IED 类, 而节点 IED_{B2} 和 IED_{B3} 相邻, 且关联线路 L2, 由图 3 所示故障定位算法可确定故障线路为 L2。

若故障线路某个 IED 信息全部丢失。假设 IED4 信息全部丢失, 则线路 IED 信息丢失前

$$\text{IED}_4 = \begin{pmatrix} F_4 & Z_4^I & Z_4^{II} & Z_4^{III} & P_4 & Q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

信息丢失后

$$\text{IED}_4 = \begin{pmatrix} F_4 & Z_4^I & Z_4^{II} & Z_4^{III} & P_4 & Q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

按照前文融合方法对关联域内信息进行融合

$$\begin{aligned}
O_{B2} &= F_1 \cdot F_2 + F_3 \cdot F_4 + F_{17} \cdot F_{18} + F_1 \cdot F_4 \cdot F_{17} \\
&= 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 \cdot 1 = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{B2I-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^I + Z_4^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + \\
&\quad Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_3^I + Z_4^I) \\
&= 1 \cdot (1+0+0+0) + 0 \cdot (0+0+0+0) + 1 \cdot (0+0+1+0) \\
&= 1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{B2II-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^{II} + Z_4^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + \\
&\quad Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_3^{II} + Z_4^{II}) \\
&= 1 \cdot (1+0+0+0) + 0 \cdot (0+0+0+0) + 1 \cdot (0+0+1+0) \\
&= 1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{B2I-II} &= (Z_1^I \cdot Z_2^I) + (Z_1^{II} \cdot Z_2^{II}) + (Z_3^I \cdot Z_4^I) + (Z_3^{II} \cdot Z_4^{II}) + \\
&\quad (Z_{17}^I \cdot Z_{18}^I) + (Z_{17}^{II} \cdot Z_{18}^{II}) \\
&= (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) + (1 \cdot 0) + (1 \cdot 0) + (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) \\
&= 0
\end{aligned}$$

$$Z_{B2P-Q} = (P_1 + Q_2) \cdot (Q_1 + P_2) + (P_3 + Q_4) \cdot (Q_3 + P_4) +$$

$$\begin{aligned} & (P_{17} + Q_{18}) \cdot (Q_{17} + P_{18}) \\ &= (0+0) \cdot (0+0) + (1+0) \cdot (1+0) + (0+0) \cdot (0+0) \\ &= 1 \end{aligned}$$

此时电网关联域节点IED_{B2}的状态信息向量为

$$\begin{aligned} \text{IED}_{B2} &= \begin{pmatrix} O_{B2} & Z_{B2-I-III} & Z_{B2-II-III} & Z_{B2-I-II} & Z_{B2-P-Q} & B_{B2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

当故障线路IED4信息全部丢失，节点ID_{B3}获取的信息会受到丢失信息的影响。按照信息融合算法进行融合后，节点IED_{B3}的状态信息向量为

$$\begin{aligned} \text{IED}_{B3} &= \begin{pmatrix} O_{B3} & Z_{B3-I-III} & Z_{B3-II-III} & Z_{B3-I-II} & Z_{B3-P-Q} & B_{B3} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

同理推算可得其他节点IED状态信息向量，得到此种条件下的电网关联域节点IED样本矩阵 D 为

$$D = \begin{pmatrix} \text{IED}_{B1} \\ \text{IED}_{B2} \\ \text{IED}_{B3} \\ \text{IED}_{B4} \\ \text{IED}_{B5} \\ \text{IED}_{B6} \\ \text{IED}_{B7} \\ \text{IED}_{B8} \\ \text{IED}_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

仿真结果见图5所示，LSSVM定位网络仍能正确识别电网关联域节点IED_{B2}和IED_{B3}为线路故障关联域节点IED类，仍可正确判定故障线路为L2。

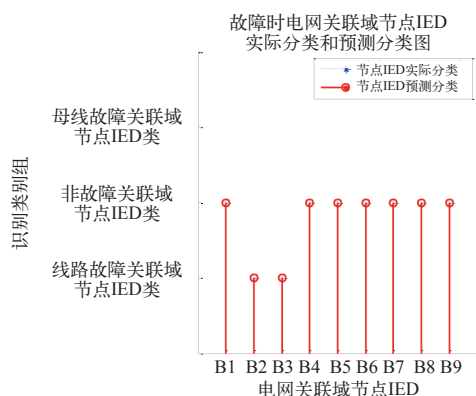


图5 故障线路某个IED信息全部丢失时关联域节点IED分类结果图

若域内一个故障线路IED和一个非故障线路IED信息全部丢失。假设IED1、IED3信息全部丢

失，则

$$\begin{aligned} O_{B2} &= F_1 \cdot F_2 + F_3 \cdot F_4 + F_{17} \cdot F_{18} + F_1 \cdot F_4 \cdot F_{17} \\ &= 0 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \cdot 1 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-I-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^I + Z_4^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + \\ & Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_3^I + Z_4^I) \\ &= 0 \cdot (0+1+0+0) + 1 \cdot (0+0+0+0) + 1 \cdot (0+0+0+1) \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-II-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^{II} + Z_4^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + \\ & Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_3^{II} + Z_4^{II}) \\ &= 0 \cdot (0+1+0+0) + 1 \cdot (0+0+0+0) + 1 \cdot (0+0+0+1) \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-I-II} &= (Z_1^I \cdot Z_2^I) + (Z_1^{II} \cdot Z_2^{II}) + (Z_3^I \cdot Z_4^I) + (Z_3^{II} \cdot Z_4^{II}) + \\ & (Z_{17}^I \cdot Z_{18}^I) + (Z_{17}^{II} \cdot Z_{18}^{II}) \\ &= (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) + (0 \cdot 1) + (0 \cdot 1) + (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-P-Q} &= (P_1 + Q_2) \cdot (Q_1 + P_2) + (P_3 + Q_4) \cdot (Q_3 + P_4) + \\ & (P_{17} + Q_{18}) \cdot (Q_{17} + P_{18}) \\ &= (0+0) \cdot (0+0) + (0+1) \cdot (0+1) + (0+0) \cdot (0+0) \\ &= 1 \end{aligned}$$

此时电网关联域节点IED_{B2}的状态信息向量为

$$\begin{aligned} \text{IED}_{B2} &= \begin{pmatrix} O_{B2} & Z_{B2-I-III} & Z_{B2-II-III} & Z_{B2-I-II} & Z_{B2-P-Q} & B_{B2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

同理推算可得其他节点IED状态信息向量，得到此种条件下的电网关联域节点IED样本矩阵 D 为

$$D = \begin{pmatrix} \text{IED}_{B1} \\ \text{IED}_{B2} \\ \text{IED}_{B3} \\ \text{IED}_{B4} \\ \text{IED}_{B5} \\ \text{IED}_{B6} \\ \text{IED}_{B7} \\ \text{IED}_{B8} \\ \text{IED}_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

仿真结果与故障线路某个IED信息全部丢失的情况一样，仍能正确识别故障类IED，进而正确定位故障线路。

故障线路某个IED信息全部错误。由于本文对元件状态信息只取了“1”、“0”两个状态，如

果某个故障线路IED信息全部错误，例如线路IED4信息正确时为

$$\text{IED}_4 = \begin{pmatrix} F_4 & Z_4^I & Z_4^{II} & Z_4^{III} & P_4 & Q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

信息全部错误后为

$$\text{IED}_4 = \begin{pmatrix} F_4 & Z_4^I & Z_4^{II} & Z_4^{III} & P_4 & Q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则和故障线路IED信息全部丢失情况一样，不影响故障定位性能。

域内非故障线路某个IED信息全部错误。以非故障线路IED17为例，线路IED17信息正确时为

$$\text{IED}_{17} = \begin{pmatrix} F_{17} & Z_{17}^I & Z_{17}^{II} & Z_{17}^{III} & P_{17} & Q_{17} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

信息全部错误后为

$$\text{IED}_{17} = \begin{pmatrix} F_{17} & Z_{17}^I & Z_{17}^{II} & Z_{17}^{III} & P_{17} & Q_{17} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} O_{B2} &= F_1 \cdot F_2 + F_3 \cdot F_4 + F_{17} \cdot F_{18} + F_1 \cdot F_4 \cdot F_{17} \\ &= 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 0 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-I-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^I + Z_4^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_{17}^I + Z_{18}^I) + \\ &\quad Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^I + Z_2^I + Z_3^I + Z_4^I) \\ &= 1 \cdot (1+1+1+0) + 1 \cdot (0+0+1+0) + 0 \cdot (0+0+1+1) \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-II-III} &= Z_1^{III} \cdot (Z_3^{II} + Z_4^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + Z_4^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_{17}^{II} + Z_{18}^{II}) + \\ &\quad Z_{17}^{III} \cdot (Z_1^{II} + Z_2^{II} + Z_3^{II} + Z_4^{II}) \\ &= 1 \cdot (1+1+1+0) + 1 \cdot (0+0+1+0) + 0 \cdot (0+0+1+1) \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-I-II} &= (Z_1^I \cdot Z_2^I) + (Z_1^{II} \cdot Z_2^{II}) + (Z_3^I \cdot Z_4^I) + (Z_3^{II} \cdot Z_4^{II}) + \\ &\quad (Z_{17}^I \cdot Z_{18}^I) + (Z_{17}^{II} \cdot Z_{18}^{II}) \\ &= (0 \cdot 0) + (0 \cdot 0) + (1 \cdot 1) + (1 \cdot 1) + (1 \cdot 0) + (1 \cdot 0) \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{B2-P-Q} &= (P_1 + Q_2) \cdot (Q_1 + P_2) + (P_3 + Q_4) \cdot (Q_3 + P_4) + \\ &\quad (P_{17} + Q_{18}) \cdot (Q_{17} + P_{18}) \\ &= (0+0) \cdot (0+0) + (1+1) \cdot (1+1) + (1+0) \cdot (1+0) \\ &= 1 \end{aligned}$$

最终可得L2线路故障时电网关联域节点IED_{B2}的状态信息向量为

$$\begin{aligned} \text{IED}_{B2} &= \begin{pmatrix} O_{B2} & Z_{B2-I-III} & Z_{B2-II-III} & Z_{B2-I-II} & Z_{B2-P-Q} & B_{B2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

当域内非故障线路IED17信息全部错误，节点IED_{B6}获取的信息会受到错误信息影响。按照信息融合算法进行融合后，节点IED_{B6}的状态信息向量为

$$\begin{aligned} \text{IED}_{B6} &= \begin{pmatrix} O_{B6} & Z_{B6-I-III} & Z_{B6-II-III} & Z_{B6-I-II} & Z_{B6-P-Q} & B_{B6} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

同理可推得其他关联域节点IED的状态向量，矩阵D为

$$D = \begin{pmatrix} \text{IED}_{B1} \\ \text{IED}_{B2} \\ \text{IED}_{B3} \\ \text{IED}_{B4} \\ \text{IED}_{B5} \\ \text{IED}_{B6} \\ \text{IED}_{B7} \\ \text{IED}_{B8} \\ \text{IED}_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

仿真结果如图6所示。LSSVM网络仍能正确识别电网关联域节点IED_{B2}和IED_{B3}为线路故障关联域节点IED类，仍可正确判定故障线路为L2。即当域内非故障线路某个IED信息全部错误时，与所有元件信息准确时一样，不影响网络的故障定位。

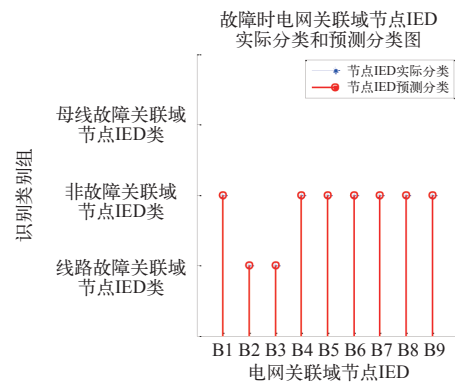


图6 非故障线路某个IED信息全部错误时关联域节点IED分类结果图

(2) 线路L5和L4同时故障

线路L5和L4同时故障时，按照前文信息融合策略可得电网各个关联域节点IED状态信息向量，此种故障条件下的电网关联域节点IED样本矩阵D为

$$D = \begin{pmatrix} IED_{B1} \\ IED_{B2} \\ IED_{B3} \\ IED_{B4} \\ IED_{B5} \\ IED_{B6} \\ IED_{B7} \\ IED_{B8} \\ IED_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

仿真结果如图7所示。LSSVM识别网络能正确识别电网关联域节点IED_{B2}、IED_{B4}、IED_{B5}和IED_{B6}为线路故障关联域节点IED类，这4个节点IED中，IED_{B2}和IED_{B6}相邻，关联线路L5，IED_{B4}和IED_{B5}相邻，关联线路L4，故可定位故障线路为L4和L5。

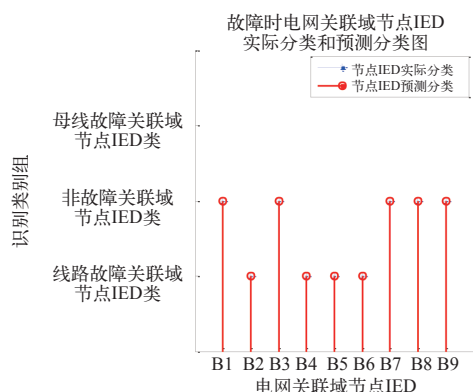


图7 线路L5和L4同时故障时关联域节点IED分类结果图

(3) 线路L8和母线B3、母线B6同时故障

线路L8和母线B3、母线B6同时故障时，按照前文的信息融合策略可得电网各个关联域节点IED状态信息向量，此种故障条件下的电网关联域节点IED样本矩阵 D 为

$$D = \begin{pmatrix} IED_{B1} \\ IED_{B2} \\ IED_{B3} \\ IED_{B4} \\ IED_{B5} \\ IED_{B6} \\ IED_{B7} \\ IED_{B8} \\ IED_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

仿真结果如图8所示。LSSVM识别网络能正

确识别电网关联域节点IED的类别，其中，IED_{B3}和IED_{B6}归为母线故障关联域节点IED类，IED_{B7}和IED_{B8}归为线路故障关联域节点IED类，根据本文提出的算法，可定位电网中B3、B6母线和线路L8故障。

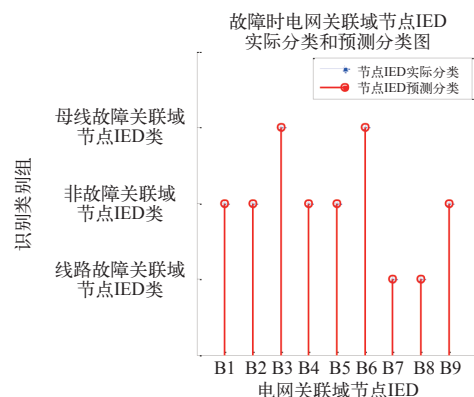


图8 线路L8和母线B3、B6同时故障时关联域节点IED分类结果图

(4) 电源G1和线路L3未投入运行，线路L6和母线B4同时故障

线路L6和母线B4同时故障时，按照前文的信息融合策略可得电网各个关联域节点IED状态信息向量，此种故障条件下的电网关联域节点IED样本矩阵 D 为

$$D = \begin{pmatrix} IED_{B1} \\ IED_{B2} \\ IED_{B3} \\ IED_{B4} \\ IED_{B5} \\ IED_{B6} \\ IED_{B7} \\ IED_{B8} \\ IED_{B9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

仿真结果如图9所示。LSSVM识别网络能正确识别电网关联域节点IED的类别，其中，IED_{B4}归为母线故障关联域节点IED类，IED_{B6}和IED_{B8}归为线路故障关联域节点IED类，根据本文提出的算法，可知电网中B4母线和线路L6故障。

结束语

本文所研究的广域后备保护新算法，为了

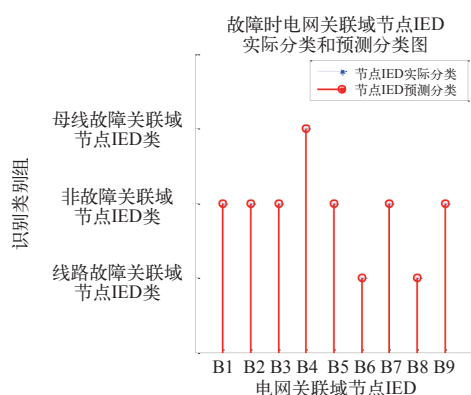


图9 线路L6和母线B4同时故障时关联域节点IED分类结果图

提高容错性，对关联域内相关状态信息进行了融合，建立样本矩阵，利用LSSVM网络进行训练和测试。同时文章还对电网多点故障及运行方式改变等情况下的故障定位进行了仿真分析。

实验证明，基于关联域信息融合和LSSVM的广域后备保护算法，在IED多种信息错误或失效的情况下，能正确定位电网故障元件。即使在电网2个或多个元件同时故障或系统运行方式变化的情况下，该算法仍能对故障元件进行定位。

参考文献

[1] 易俊,周孝信.电力系统广域保护与控制技术[J].电网技术,2006,30(8):7-14.

[2] 何志勤,张哲,尹项根,等.集中决策式广域后备保护的分区模型与优化算法[J].电工技术学报,2014,29(4):212-219.

[3] 赵曼勇,周红阳,陈朝晖.基于IEC61850的广域一体化保护方案[J].电力系统自动化,2010,34(6):58-60.

[4] 张兆云,陈卫,张哲,等.一种广域差动保护实现方法[J].电工技术学报,2014,29(2):297-303.

[5] 王阳光,尹项根,游大海,等.遵循IEC 61850标准的广域电流差动保护IED[J].电力系统自动化,2008,32(2):53-57.

[6] 丛伟,潘贞存,赵建国,等.基于电流差动原理的广域继电保护系统[J].电网技术,2006,30(5):91-95.

[7] 王睿,王晓茹,黄飞,等.基于相关矩阵的电网

广域后备保护算法[J].电力系统自动化,2013,37(4):70-74.

[8] 田聪聪,文明浩,刘航,等.基于相邻变电站信息融合的广域后备保护系统[J].电力系统自动化,2012,36(15).

[9] 张保会,周良才,汪成根,等.具有容错性能的广域后备保护算法[J].电力系统自动化,2010,34(5):66-71.

[10] 汪旸,尹项根,张哲.基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J].电工技术学报,2010,25(8):174-179.

[11] 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.

[12] 李振兴,尹项根,张哲,等.基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J].电工技术学报,2012,27(8):179-185.

[13] 何志勤,张哲,尹项根,等.基于故障电压比较的广域后备保护新算法[J].电工技术学报,2012(7):274-283.

[14] 马静,李金龙,王增平,等.基于故障关联因子的新型广域后备保护[J].中国电机工程学报,2010,30(31):100-107.

[15] 李乃永,梁军,李磊,等.基于广域故障录波信息的调度端电网故障诊断系统[J].电力系统自动化,2014,38(16):100-104.

[16] 苗世洪,刘沛,林湘宁,等.基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J].电力系统自动化,2008,32(10):32-36.

[17] 周曙,王晓茹,钱清泉.电力系统广域后备保护中的贝叶斯网故障诊断方法[J].电力系统自动化,2010,34(4):44-48.

[18] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3):293-300.

[19] 吴浩,李群湛,夏焰坤,等.基于概率神经网络的广域后备保护故障判别研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(7):43-49.

(收稿日期:2015-03-29) EA