

基于广域状态信息和模糊 C 均值聚类的电网故障区域判别

吴浩^{1,2}, 李群湛¹, 易东¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川理工学院 自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000)

摘要: 结合电网广域状态信息, 提出一种基于模糊 C 均值(FCM)聚类的电网故障区域判别新方法。该方法利用线路智能电子装置(IED)采集相应保护的動作信息、方向元件状态信息、断路器状态信息等, 并以电网各线路 IED 状态信息作为 FCM 的聚类对象。给出电网关联 IED 的定义, 利用故障判别算法把故障元件关联 IED 归为一类, 同方向区外故障 IED 归为一类。大量仿真表明, 该方法容错性能好, 运行速度快, 判别准确率高, 即使部分信息不准确, 也能正确判断故障区域。

关键词: 电力系统; 广域状态信息; 模糊 C 均值聚类; 线路 IED; 故障区域判别; 故障分析

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.007

0 引言

随着智能电网建设的推进, 电网规模的扩大, 电力系统安全可靠运行对国民经济及社会稳定越显重要。而传统的后备保护由于定值和相互配合等原因, 在复杂大电网运行中误动或拒动的可能性极大增加。目前国内外广泛开展的广域后备保护研究, 是基于广域测量系统, 挖掘反映电网运行状态的广域信息, 综合判断电网故障情况, 构造新型后备保护, 以便克服传统后备保护动作延时长、配合复杂及故障切除范围大等缺点。对广域后备保护而言, 电网故障区域判别是其中重要的研究内容^[1-3]。

文献[4]利用广域测量系统的实时量测信息和相电流突变量启动故障元件定位算法, 将启动时刻前 2 个周期的电压值和启动时刻后 N 个周期的电压值组成样本 (N 小于故障切除时的周期数), 应用模糊 C 均值(FCM)聚类分析算法进行迭代计算得到最优分类, 从而定位出故障元件和故障区域。

文献[5]将 PMU 提供的实时电流信息(包括零序电流和负序电流)引入到故障判别中, 采用聚类分析理论对 PMU 实时采集到的不同周期的电流信息构成的样本进行分类, 以便实现故障区域的判别。文献[4-5]所提出的 2 种方法均是应用聚类算法进行故障判别, 但在广域信息的边界划分、构成方式和冗余机制等问题上还有待进一步研究, 同时由于所需的实时电压、电流数据量较为庞大, 算法的数据处理速度也不是很理想。

文献[6]采用遗传算法融合本站和相邻变电站

的保护动作信息, 实现电网故障元件定位。由于需要各变电站之间交换故障判断结果信息, 且遗传算法不能很好地满足后备保护对时限的要求, 因此需进一步研究满足保护要求的快速算法。

文献[7]提出了一种基于贝叶斯网的电网故障诊断算法, 以传统保护动作信号作为证据, 依据各保护的保护区, 建立电网故障诊断模型。其他的研究如基于遗传信息融合技术判断故障元件^[8]、基于多源信息的电网故障诊断等电网故障区域判别新原理^[9-10], 均是利用电网广域信息来判别故障区域, 能较好地克服信息缺失或信息错误带来的影响, 但在提高容错性和准确性方面还需要进一步研究, 同时以上文献对电网多区域同时故障和不同运行方式下的故障判别分析还不够充分。

为了增强故障判别的容错能力, 提高定位的准确性, 验证电网多区域同时故障和不同运行方式下的故障区域判别, 本文在大量研究的基础上, 提出了依据电网广域状态信息, 通过 FCM 进行聚类分析的电网故障判别新方法。

1 FCM 聚类分析

FCM 聚类方法是基于目标函数的模糊划分范畴, 借助隶属度的函数值来确定每个数据点归于某个类别组的程度。FCM 把 l 个向量 $\mathbf{x}_q = [x_{q1}, \dots, x_{qp}]$ ($q=1, 2, \dots, l$) 分为 c 个类别组, 并求出每个类别组的聚类中心, 使得非相似性指标的目标函数达到最小^[11-13]。FCM 利用模糊划分, 使每个元素的隶属度用 0~1 间的值来表示, 一个数据集的隶属度的和总为 1:

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1 \quad \forall j=1, \dots, l \quad (1)$$

FCM 的目标函数为:

$$J(\mathbf{U}, \mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^l u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (2)$$

其中, u_{ij} 为数据集的隶属度, 取值为 0~1 之间; \mathbf{c}_i

收稿日期: 2012-10-08; 修回日期: 2013-05-04

基金项目: 人工智能四川省重点实验室项目(2010RY005, 2011RZY02, 2011RYY08); 四川省教育厅项目(11ZB100)

Project supported by Artificial Intelligence of Key Laboratory of Sichuan Province (2010RY005, 2011RZY02, 2011RYY08) and Sichuan Provincial Department of Education (11ZB100)

为类别组 i 的聚类中心; $d_{ij} = \|c_i - x_j\|$ 为第 j 个数据点与第 i 个聚类中心间的欧几里得距离; 控制模糊度的加权指数 $m \in [1, \infty)$ 。

FCM 聚类法的聚类准则是求式(2)的最小值, 为此构造新的目标函数为:

$$J(U, c_1, \dots, c_c, \lambda) = J(U, c_1, \dots, c_c) + \sum_{j=1}^l \lambda_j \left(\sum_{i=1}^c u_{ij} - 1 \right) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^l u_{ij}^m d_{ij}^2 + \sum_{j=1}^l \lambda_j \left(\sum_{i=1}^c u_{ij} - 1 \right) \quad (3)$$

其中, $\lambda_j (j=1, 2, \dots, l)$ 为拉格朗日乘子, $U = [u_{ij}]$ 为隶属度矩阵。

对式(3)输入变量求偏导, 则得到式(2)的最小值条件^[13-15]:

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^l u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^l u_{ij}^m} \quad i=1, 2, \dots, c \quad (4)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad i=1, 2, \dots, c \quad (5)$$

FCM 聚类算法是一个简单的迭代过程, 具体运行步骤如下:

- a. 设置算法停止阈值 ε 、聚类类别数 c , 设置迭代计数器 $t=0$;
- b. 用随机数 $a \in (0, 1)$ 初始化隶属度矩阵 U , 使其满足式(1)的约束条件;
- c. 通过式(4)计算聚类中心 $c_i (i=1, 2, \dots, c)$;
- d. 通过式(2)计算目标函数, 若 $|J(t) - J(t-1)| < \varepsilon$, 则聚类终止;
- e. 重新计算隶属度矩阵 U , 返回步骤 c^[12-16]。

2 基于 FCM 的电网故障区域判别

2.1 聚类对象分析

在电网线路传统保护装置内增加智能电子装置 IED(Intelligent Electronic Device), 采集相应保护的動作信息、方向元件状态信息、断路器状态信息等, 并通过变电站站内局域网将这些信息上传到广域网中心站决策系统, 利用故障判别算法, 可以识别电网故障元件关联 IED, 进而实现电网故障区域判别。

所谓电网关联 IED 定义如下。

a. 线路关联 IED: 线路两端保护安装处所装 IED, 该类 IED 相互关联, 关联对应线路。

b. 母线关联 IED: 与该母线直接相连的所有线路近母线端 IED, 该类 IED 相互关联, 关联对应母线。

根据以上定义可知, 图 1 中 IED₁ 的关联母线为 B₁, IED₂、IED₃、IED₅ 的关联母线为 B₂, IED₄、IED₆ 的关联母线为 B₃; IED₁、IED₂ 的关联线路为 L₁, IED₃、IED₄ 的关联线路为 L₂, IED₅、IED₆ 的关联线路为 L₃。

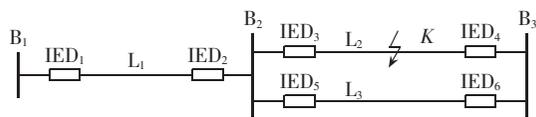


图 1 IED 关联元件分析

Fig.1 Analysis of IED-associated element

为了利用线路 IED 状态信息进行故障判别, 本文定义线路 IED 状态信息向量为:

$$\delta_{\text{IED}_i} = [a_{i1} \ a_{i2} \ a_{i3} \ a_{i4} \ a_{i5} \ a_{i6}] \quad (6)$$

$$a_{i1} = \begin{cases} 1 & \text{线路主保护动作} \\ -1 & \text{线路主保护不动作} \\ 0 & \text{线路主保护失效} \end{cases}$$

$$a_{i2} = \begin{cases} 1 & \text{正方向} \\ -1 & \text{反方向} \\ 0 & \text{方向元件失效} \end{cases}$$

$$a_{i3} = \begin{cases} 1 & \text{距离 I 段动作} \\ -1 & \text{距离 I 段不动作} \\ 0 & \text{距离 I 段失效} \end{cases}$$

$$a_{i4} = \begin{cases} 1 & \text{距离 II 段动作} \\ -1 & \text{距离 II 段不动作} \\ 0 & \text{距离 II 段失效} \end{cases}$$

$$a_{i5} = \begin{cases} 1 & \text{断路器动作} \\ -1 & \text{断路器不动作} \\ 0 & \text{断路器失效} \end{cases}$$

$$a_{i6} = \begin{cases} 1 & \text{母线主保护动作} \\ -1 & \text{母线主保护不动作} \\ 0 & \text{母线主保护失效} \end{cases}$$

其中, a_{i1} 为 IED _{i} 线路就地主保护动作信息, a_{i2} 为 IED _{i} 方向元件状态信息, a_{i3} 为 IED _{i} 就地距离 I 段动作信息, a_{i4} 为 IED _{i} 就地距离 II 段动作信息, a_{i5} 为 IED _{i} 断路器动作信息, a_{i6} 为 IED _{i} 关联母线主保护动作信息。

定义中保护测量元件有动作、不动作和失效 3 种状态。其中动作是指保护测量元件采集故障电气量进行分析判断, 当故障量满足动作条件时, 动作发信; 不动作是指保护测量元件判断故障量不满足动作条件时, 不动作发信; 失效是指因为通信通道故障、信息采集失败或状态信息丢失等情况造成的信息判断失效^[6]。

由图 1 所示电路, 可得故障线路 IED 的状态向量。例如线路 L₂ 中 K 点短路时, 故障线路 L₂ 关联 IED 为 IED₃、IED₄, 在信息准确的情况下, $\delta_{\text{IED}_3} = \delta_{\text{IED}_4} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1]$, 而非故障元件关联 IED (IED₁、IED₂、IED₅、IED₆) 的状态信息分别为: $\delta_{\text{IED}_1} = \delta_{\text{IED}_5} = [-1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]$, $\delta_{\text{IED}_2} = \delta_{\text{IED}_6} = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]$, 可见故障元件关联 IED 的状态向量完全一样, 而非故障元件关联 IED 和所有非故障元件关联 IED 的状态向

量差别却非常大,因此故障元件关联 IED 会且仅会被分为同一类。若电网中有 n 个线路 IED,则可构造该电网广域状态信息矩阵 $A(n \times 6)$ 。

$$A = \begin{bmatrix} \delta_{IED1} \\ \delta_{IED2} \\ \vdots \\ \delta_{IEDn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & a_{n5} & a_{n6} \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵 A 的行向量对应相应编号的 IED 状态信息,即 FCM 的分类对象。

2.2 基于 FCM 的电网故障区域判别实现

将矩阵 A 作为 FCM 的输入,由 FCM 对电网的非故障区域 IED 和故障区域 IED 进行聚类。在 FCM 聚类过程中,FCM 的隶属度函数值确定各个 IED 的具体归类类别,若某个 IED 在相应组别中隶属度函数值最大,则该 IED 归类于对应的组别。为了提高方案的容错性,使得在较多状态信息不准确的情况下能正确判断故障区域,在大量仿真实验研究的基础上,本文把聚类线路 IED 样本分成 3 类:故障元件关联 IED 类;正方向受区外故障影响 IED 类;反方向受区外故障影响 IED 类。

基于故障区域最小原则,选择聚类结果中 IED 个数最少的类别作为故障元件关联 IED 类。在该类中,判定相互关联的 IED 所关联的元件为电网故障元件。FCM 故障判别算法流程如图 2 所示。

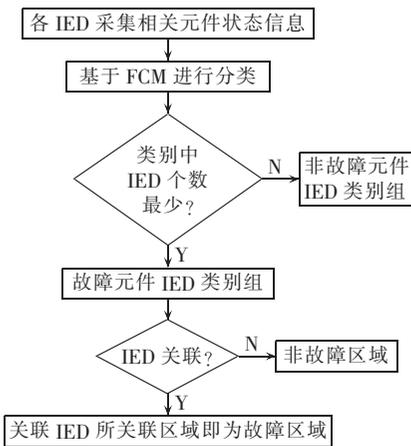


图 2 基于 FCM 的故障区域判别流程

Fig.2 Flowchart of faulty area identification based on FCM

3 算例分析

为了验证本文方法的有效性,以 IEEE 3 机 9 节点系统为例,对所给出的故障判别方法进行仿真分析,仿真工具选择 MATLABR2007a,电路如图 3 所示。仿真过程中选择几种典型故障情况进行聚类判别分析,同时考虑 IED 状态信息部分失效、部分错误和某些 IED 信息全部失效或全部错误的情况,以验证方案的容错性。

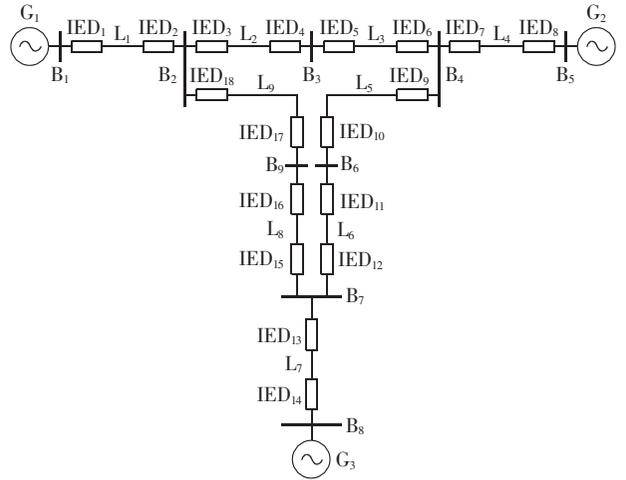


图 3 IEEE 3 机 9 节点系统

Fig.3 IEEE 3-generator 9-bus system

3.1 电网线路故障判别

以线路 L_5 为例,研究算法在信息准确和不准确情况下对电网线路故障的判别结果。

3.1.1 IED 状态信息均准确

线路 L_5 发生故障时,电网广域状态信息矩阵如式(8)所示。

$$A = \begin{bmatrix} \delta_{IED1} \\ \delta_{IED2} \\ \delta_{IED3} \\ \delta_{IED4} \\ \delta_{IED5} \\ \delta_{IED6} \\ \delta_{IED7} \\ \delta_{IED8} \\ \delta_{IED9} \\ \delta_{IED10} \\ \delta_{IED11} \\ \delta_{IED12} \\ \delta_{IED13} \\ \delta_{IED14} \\ \delta_{IED15} \\ \delta_{IED16} \\ \delta_{IED17} \\ \delta_{IED18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

FCM 以该矩阵行向量为对象进行聚类分析,样本特征值维数 $h=6$,数据样本个数 $n=18$,初始化聚类类别数 $c=3$,选择迭代次数为 300,设定 FCM 目标函数终止容限为 $\varepsilon=1 \times 10^{-7}$,调用 FCM 函数运行得到聚类中心、隶属度函数值和相应的聚类类别情况见表 1—3。

FCM 聚类分析的结果,将 18 个 IED 元件状态信息分成了 3 个类别组,按照本文给出的算法,寻找 IED 个数最少的类别组作为故障元件类别组,如表 3 所示,取类别组 2;在该故障组别中再去寻找故障元件

表 1 线路 L_5 故障时聚类中心值Tab.1 Clustering center value when L_5 is faulty

聚类中心值		
类别组 1	类别组 2	类别组 3
-1	0.9882	-1
0.9917	0.9882	-1
-1	0.9882	-1
-0.9917	1	-0.9717
-1	0.9882	-1
-1	-1	-1

表 2 线路 L_5 故障时各 IED 隶属度Tab.2 Membership degree of different IEDs when L_5 is faulty

IED 编号	隶属度			分类结果
	类别组 1	类别组 2	类别组 3	
IED ₁	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₂	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₃	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₄	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₅	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₆	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₇	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₈	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₉	0.0059	0.9889	0.0053	2
IED ₁₀	0.0059	0.9889	0.0053	2
IED ₁₁	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₁₂	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₁₃	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₁₄	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₁₅	0.0139	0.0062	0.9799	3
IED ₁₆	0.9913	0.0029	0.0058	1
IED ₁₇	0.3188	0.2258	0.4554	3
IED ₁₈	0.9913	0.0029	0.0058	1

表 3 线路 L_5 故障时 FCM 分类情况Tab.3 FCM classification when L_5 is faulty

类别组 1	类别组 2	类别组 3
IED ₁	IED ₉	IED ₂
IED ₃	IED ₁₀	IED ₄
IED ₅		IED ₆
IED ₈		IED ₇
IED ₁₂		IED ₁₁
IED ₁₄		IED ₁₃
IED ₁₆		IED ₁₅
IED ₁₈		IED ₁₇

关联 IED。

故障元件类别组 2 中包含了 IED₉ 和 IED₁₀，而这 2 个 IED 恰好关联线路 L_5 ，因此可确定故障元件为线路 L_5 ，类别组 1 是正方向受区外故障影响 IED 类，类别组 2 是反方向受区外故障影响 IED 类。

3.1.2 非故障线路任意 1 个 IED 状态信息全部失效

线路 L_5 发生故障，非故障线路任意 1 个 IED 状态信息全部失效时（例如 IED₅）可得该电网广域状态信息矩阵如式(9)所示。

FCM 以该矩阵行向量为对象进行聚类分析，函数设定值不变，因篇幅所限，后面不再列出隶属度函

数和聚类中心值，调用 FCM 函数运行得到的聚类类别情况结果见表 4。

$$A = \begin{matrix} \delta_{\text{IED1}} \\ \delta_{\text{IED2}} \\ \delta_{\text{IED3}} \\ \delta_{\text{IED4}} \\ \delta_{\text{IED5}} \\ \delta_{\text{IED6}} \\ \delta_{\text{IED7}} \\ \delta_{\text{IED8}} \\ \delta_{\text{IED9}} \\ \delta_{\text{IED10}} \\ \delta_{\text{IED11}} \\ \delta_{\text{IED12}} \\ \delta_{\text{IED13}} \\ \delta_{\text{IED14}} \\ \delta_{\text{IED15}} \\ \delta_{\text{IED16}} \\ \delta_{\text{IED17}} \\ \delta_{\text{IED18}} \end{matrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

表 4 非故障线路任意 1 个 IED 信息全部失效时 FCM 分类情况

Tab.4 FCM classification when all information of any IED of non-faulty line is invalid

类别组 1	类别组 2	类别组 3
IED ₂	IED ₅	IED ₁
IED ₄	IED ₉	IED ₃
IED ₆	IED ₁₀	IED ₈
IED ₇		IED ₁₂
IED ₁₁		IED ₁₄
IED ₁₃		IED ₁₆
IED ₁₅		
IED ₁₇		
IED ₁₈		

依据前文分析可见类别组 2 中 IED 数目最少，只包含了 IED₅、IED₉ 和 IED₁₀，因此可确定类别组 2 为故障元件类别组。在该类别组中 3 个 IED 只有 IED₉ 和 IED₁₀ 是线路 L_5 的关联 IED，IED₅ 不与其他任何一个 IED 关联，因此可确定故障元件为线路 L_5 ，且 IED₅ 是非故障元件 IED。

3.2 电网母线故障判别

以母线 B_2 为例，研究算法在信息准确和不准确情况下对电网母线故障的判别结果。

3.2.1 IED 信息均准确

母线 B_2 发生故障，所有 IED 信息均准确时可得该电网广域状态信息矩阵如式(10)所示。

FCM 以该矩阵行向量为对象进行聚类分析，函数设定值不变，调用 FCM 函数运行得到聚类类别结果见表 5。

依据故障区域最小原则，可见类别组 3 中 IED 数目最少，只包含了 IED₂、IED₃ 和 IED₁₈，可确定类别组

$$A = \begin{matrix} \delta_{IED1} \\ \delta_{IED2} \\ \delta_{IED3} \\ \delta_{IED4} \\ \delta_{IED5} \\ \delta_{IED6} \\ \delta_{IED7} \\ \delta_{IED8} \\ \delta_{IED9} \\ \delta_{IED10} \\ \delta_{IED11} \\ \delta_{IED12} \\ \delta_{IED13} \\ \delta_{IED14} \\ \delta_{IED15} \\ \delta_{IED16} \\ \delta_{IED17} \\ \delta_{IED18} \end{matrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

表 5 母线 B₂ 故障时 FCM 分类情况

Tab.5 FCM classification when B₂ is faulty

类别组 1	类别组 2	类别组 3
IED ₁	IED ₅	IED ₂
IED ₄	IED ₇	IED ₃
IED ₆	IED ₉	IED ₁₈
IED ₈	IED ₁₁	
IED ₁₀	IED ₁₃	
IED ₁₂	IED ₁₆	
IED ₁₄		
IED ₁₅		
IED ₁₇		

3 为故障元件类别组,在该类别组中 3 个 IED 是母线 B₂ 的关联 IED,因此可确定故障元件为母线 B₂。

3.2.2 非故障线路任意 1 个 IED 信息全部错误

母线 B₂ 发生故障,非故障线路任意 1 个 IED 状态信息全部错误(如 IED₁₀)时,该电网广域状态信息矩阵如式(11)所示。

FCM 以该矩阵行向量为对象进行聚类分析,函数设定值不变,调用 FCM 函数运行得到聚类类别结果如表 6 所示。

依据前文分析可见类别组 1 中 IED 数目最少,只包含了 IED₂、IED₃、IED₁₀ 和 IED₁₈,因而可确定为故障类别组,在该类别组中 4 个 IED 只有 IED₂、IED₃

$$A = \begin{matrix} \delta_{IED1} \\ \delta_{IED2} \\ \delta_{IED3} \\ \delta_{IED4} \\ \delta_{IED5} \\ \delta_{IED6} \\ \delta_{IED7} \\ \delta_{IED8} \\ \delta_{IED9} \\ \delta_{IED10} \\ \delta_{IED11} \\ \delta_{IED12} \\ \delta_{IED13} \\ \delta_{IED14} \\ \delta_{IED15} \\ \delta_{IED16} \\ \delta_{IED17} \\ \delta_{IED18} \end{matrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

表 6 非故障线路任意 1 个 IED 信息全部错误时 FCM 分类情况

Tab.6 FCM classification when all information of any IED of non-faulty line is wrong

类别组 1	类别组 2	类别组 3
IED ₂	IED ₁	IED ₅
IED ₃	IED ₄	IED ₇
IED ₁₀	IED ₆	IED ₉
IED ₁₈	IED ₈	IED ₁₁
	IED ₁₂	IED ₁₃
	IED ₁₄	IED ₁₆
	IED ₁₅	
	IED ₁₇	

和 IED₁₈ 是母线 B₂ 的关联 IED,IED₁₀ 不与其他任何一个 IED 关联,因此可确定故障元件为母线 B₂,且 IED₁₀ 是非故障元件 IED。

3.3 其他故障情况下的聚类分析

为了验证基于 FCM 的电网故障区域判别系统的准确性和容错性,本文进一步分析了 IED 各种状态信息缺失或错误时的聚类结果,及电网多点同时故障和在不同拓扑结构运行下的故障区域判别情况。比如随机 2 条线路同时故障、某一母线和某一条线路同时故障、某一电源或线路未投入等情况下的故障判别。

具体聚类分析结果见表 7 和表 8。实验证明基于 FCM 的电网故障区域判别方法在较多的状态信

表 7 电网不同运行方式下基于 FCM 的电网故障区域判别系统仿真分析

Tab.7 Simulative analysis of grid faulty area identification system based on FCM,for different operating modes

故障线路	电网 IED 元件状态信息	聚类故障组别 IED	FCM 聚类分析结果	故障元件
L ₂ 未投入运行,B ₇ 故障	所有 IED 元件状态信息均准确	IED ₁₂ IED ₁₃ IED ₁₅	IED ₁₂ 、IED ₁₃ 和 IED ₁₅ 关联 母线 B ₇	B ₇
L ₂ 未投入运行,L ₇ 故障	所有 IED 元件状态信息均准确	IED ₁₃ IED ₁₄	IED ₁₃ 、IED ₁₄ 关联线路 L ₇	L ₇
L ₅ 未投入运行,L ₂ 、 L ₈ 故障	所有 IED 元件状态信息均准确	IED ₃ IED ₄ IED ₁₅ IED ₁₆	该类别组 IED ₃ 、IED ₄ 关联 线路 L ₂ 、IED ₁₅ 和 IED ₁₆ 关联线路 L ₈	L ₂ 、L ₈
电源 G ₁ 未投入,L ₃ 、 L ₆ 故障	所有 IED 元件状态信息均准确	IED ₅ IED ₆ IED ₁₁ IED ₁₂	该类别组 IED ₅ 、IED ₆ 关联 线路 L ₃ 、IED ₁₁ 和 IED ₁₂ 关联线路 L ₆	L ₃ 、L ₆

表 8 不同故障情况下基于 FCM 的电网故障区域判别系统仿真分析

Tab.8 Simulative analysis of grid faulty area identification system based on FCM, for different faults

故障元件	电网 IED 元件状态信息	聚类故障组别 IED	FCM 聚类分析结果	故障元件
L ₅	电网所有断路器和母线主保护状态信息全部失效,其他 IED 元件状态信息均准确	IED ₉ IED ₁₀	IED ₉ 和 IED ₁₀ 关联线路 L ₅	L ₅
	其他元件状态信息均准确,故障线路任意 1 个 IED 全部失效	IED ₉ IED ₁₀	IED ₉ 和 IED ₁₀ 关联线路 L ₅	L ₅
	其他元件状态信息均准确,故障线路 2 个 IED 全部失效	IED ₉ IED ₁₀	IED ₉ 和 IED ₁₀ 关联线路 L ₅	L ₅
	其他元件状态信息均准确,故障线路某一个关联 IED 信息全部失效,非故障线路关联 IED ₄ 信息全部失效,其他 IED 中任意 3 个元件状态失效	IED ₄ IED ₉ IED ₁₀	仅 IED ₉ 和 IED ₁₀ 为线路 L ₅ 关联 IED; IED ₄ 不与该类中其他 IED 关联,为非故障线路 IED	L ₅
	其他元件状态信息均准确,非故障线路 IED ₁₆ 内元件状态信息全部错误	IED ₉ IED ₁₀ IED ₁₆	仅 IED ₉ 和 IED ₁₀ 为线路 L ₅ 关联 IED; IED ₁₆ 不与该类中其他 IED 关联,为非故障线路 IED	L ₅
	其他元件状态信息均准确,故障线路 IED ₉ 内元件状态信息全部错误	IED ₁₀	该类中仅有 IED ₁₀ ,既与线路 L ₅ 关联,又与母线 B ₆ 关联,故只能判断大概故障区域,不能准确定位	L ₅ 或 B ₆
B ₂	其他元件状态信息均准确,任意 4 个 IED 的断路器信息失效	IED ₂ IED ₃ IED ₁₈	IED ₂ 、IED ₃ 和 IED ₁₈ 关联母线 B ₂	B ₂
	其他元件状态信息均准确,任意 1 个关联 IED 母线主保护状态信息失效	IED ₂ IED ₃ IED ₁₈	IED ₂ 、IED ₃ 和 IED ₁₈ 关联母线 B ₂	B ₂
	其他元件状态信息均准确,任意 2 个关联 IED 母线主保护状态信息失效	IED ₁ IED ₄ IED ₁₇	IED ₁ 、IED ₄ 和 IED ₁₇ 彼此非关联,不能确定故障元件	只能给出大概故障区域
	母线主保护和断路器状态信息均准确,其他元件状态信息任意 6 个失效	IED ₂ IED ₃ IED ₁₈	IED ₂ 、IED ₃ 和 IED ₁₈ 关联母线 B ₂	B ₂
	非故障线路任意 1 个 IED 状态信息全部错误,如 IED ₁₀ 状态信息全部错误	IED ₂ IED ₃ IED ₁₀ IED ₁₈	IED ₂ 、IED ₃ 和 IED ₁₈ 关联母线 B ₂ ; IED ₁₀ 与其他任意 IED 非关联,为非故障元件关联 IED	B ₂
	故障元件关联 IED ₂ 状态信息全部错误	IED ₁ IED ₂ IED ₄ IED ₁₇	IED ₁ 和 IED ₂ 关联线路 L ₁ ,其他非关联	L ₁ (误判)
	故障元件关联 IED ₂ 状态信息全部失效	IED ₂ IED ₃ IED ₁₈	IED ₂ 、IED ₃ 和 IED ₁₈ 关联母线 B ₂	B ₂
非故障线路任意 1 个关联 IED 状态信息全部失效	IED ₂ IED ₃ IED ₁₈	IED ₂ 、IED ₃ 和 IED ₁₈ 关联母线 B ₂	B ₂	
L ₉ 、L ₂ 同时故障	所有 IED 元件状态信息均准确	IED ₃ IED ₄ IED ₁₇ IED ₁₈	该类组 IED ₃ 、IED ₄ 关联线路 L ₂ , IED ₁₇ 和 IED ₁₈ 关联线路 L ₉	L ₂ 、L ₉
B ₆ 、L ₁ 故障	所有 IED 元件状态信息均准确	IED ₁ IED ₂	IED ₁ 、IED ₂ 关联线路 L ₁	L ₁ (只能判别一个故障区域)

息缺失或错误情况下依然能够准确判断故障区域,而电网运行方式和拓扑结构的变化对故障区域的判断基本没有影响。

4 结论

本文提出一种基于广域状态信息和 FCM 的电网故障区域判别新方法,对线路 IED 状态信息进行 FCM 聚类分析,依据电网故障区域最小原则,确定 IED 数目最少的类别组为故障类别组,在该类别组中寻找关联 IED,就能实现故障区域的判定。该算法简单可靠,利用数据较少,对数据的预处理要求低,提高了系统判别速度和准确性。

实验仿真证明所提方法在多种信息失效或错误情况下都能正确判别故障区域,具有很高的容错能力;在电网多点同时故障或电网运行方式改变时,仍能进行准确的故障区域判定。本文从利用广域状

态信息和提高容错能力角度对电网故障区域判断进行了探讨,为电网故障判定提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):125-130.
HE Zhiqin,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. Overview of power system wide area protection [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):125-130.
- [2] 张保会,周良才. 变电站集中式后备保护[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):1-5.
ZHANG Baohui,ZHOU Liangcai. Centralized substation backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(6):1-5.
- [3] 徐天奇,尹项根,游大海,等. 广域保护系统功能与可行结构分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(3):93-97.
XU Tianqi,YIN Xianggen,YOU Dahai,et al. Analysis on functionality and feasible structure of wide area protection system

- [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 93-97.
- [4] 徐岩, 刘金生, 张亚刚, 等. 基于模糊聚类理论的电网故障元件定位[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 188-193.
XU Yan, LIU Jinsheng, ZHANG Yagang, et al. Location of faulty power network component based on fuzzy cluster analysis [J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 188-193.
- [5] 徐岩, 刘金生, 张亚刚, 等. 聚类算法在电网故障元件定位应用中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 13-18.
XU Yan, LIU Jinsheng, ZHANG Yagang, et al. Study of application of hierarchical cluster analysis in power net fault location [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 13-18.
- [6] 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): 83-90.
TIAN Congcong, WEN Minghao, LIU Hang, et al. Wide-area backup protection system based on information fusion with adjacent substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 83-90.
- [7] 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.
ZHOU Shu, WANG Xiaoru, QIAN Qingquan. Fault diagnosis approach based on Bayesian networks for wide area backup protection of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 44-48.
- [8] 汪旻, 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.
WANG Yang, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Wide area protection based on genetic information fusion technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [9] 王波, 周昱勇. 基于 PMU 的多端输电线路故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 32-35, 39.
WANG Bo, ZHOU Yuyong. A novel PMU-based fault location algorithm for multi-terminal transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 32-35, 39.
- [10] 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.
ZHANG Baohui, ZHOU Liangcai, WANG Chenggen, et al. Wide area backup protection algorithm with fault-tolerance performance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 66-71.
- [11] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [12] 陈凯, 朱杰, 王豪行. 复杂系统故障诊断中的模糊聚类方法[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(6): 61-64.
CHEN Kai, ZHU Jie, WANG Haoxing. Fuzzy clustering for complicated system diagnosis [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1998, 32(6): 61-64.
- [13] 钱政, 黄兰, 严璋, 等. 集成模糊数学与范例推理的变压器故障诊断方法[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 24-27.
QIAN Zheng, HUANG Lan, YAN Zhang, et al. A fault diagnosis method for power transformer integrating fuzzy theory with case-based reasoning [J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 24-27.
- [14] 雷浩轶, 刘念, 崔东君, 等. 基于 GA 与 PSO 混合优化 FCM 聚类的变压器故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 52-56.
LEI Haoxia, LIU Nian, CUI Dongjun, et al. Transformer fault diagnosis based on optimized FCM clustering by hybrid GA and PSO [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 52-56.
- [15] 陈舵, 崔杜武, 李雪, 等. 加权模糊聚类及其在电力变压器故障诊断中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(2): 182-186.
CHEN Duo, CUI Duwu, LI Xue, et al. A weighted fuzzy clustering algorithm and its application to fault diagnosis of power transformer [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(2): 182-186.
- [16] 黄友锐. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

作者简介:

吴 浩(1980-), 男, 四川南充人, 博士研究生, 从事变电站自动化系统及继电保护方面的研究(E-mail: wuhao801212@163.com);

李群湛(1957-), 男, 河北元氏人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统自动化、电能质量等;

易 东(1971-), 男, 四川三台人, 讲师, 从事电力系统综合自动化方面的研究。

Faulty region identification based on wide-area state information and fuzzy C-means clustering

WU Hao^{1,2}, LI Qunzhan¹, YI Dong¹

(1. Electrical Engineering Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Combined with the wide-area state information of power grid, a method of faulty region identification based on FCM (Fuzzy C-Means) clustering is proposed, which uses the line IEDs (Intelligent Electronic Devices) to acquire the information of corresponding protection action, direction component state and circuit breaker state. It takes the information as the object of FCM clustering, gives the definition of grid-associated IED, and applies the fault discrimination algorithm to classify the IEDs associated with faulty component and the IEDs associated with external fault at same direction. Simulations show that, the proposed method, with better fault-tolerant performance, faster operation speed and higher accuracy of discrimination, can correctly identify the faulty area even when partial state information is inaccurate.

Key words: electric power systems; wide-area state information; fuzzy C-means clustering; line IED; faulty area identification; failure analysis