

DOI: 10.7667/PSPC151052

基于负序功率方向比较与聚类算法的改进继电保护算法研究

姜晨, 高亮

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 分析了负序功率方向比较原理和聚类算法及其特点, 提出了将两者有效结合的改进继电保护算法。利用系统广域信息量及实际系统拓扑结构划定相关母线和线路保护的关联域, 建立关联保护的特征向量, 给出系统状态信息矩阵, 由矩阵的输出值进行故障判别。通过典型算例的故障定位及后备保护实现过程和结果, 验证了该算法能够定位故障区域和故障元件。该算法应用于广域后备保护可提高信息冗余度, 增强系统容错性。

关键词: 负序功率方向比较; 聚类分析; 保护 IED; 系统状态信息矩阵; 广域继电保护

Study on an improved relaying protection method based on negative-sequence power direction comparison and cluster algorithm

JIANG Chen, GAO Liang

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: An improved relaying protection algorithm is proposed based on the analysis and combination of the characteristics of negative-sequence power direction comparison theory and cluster algorithm. This improved new algorithm features in forming the related areas of the corresponding bus protection and line protection with wide-area information and the real-time structure of the topology of system, setting characteristic vectors of the related protection, developing state information matrix of the system and locating faults with the output of the matrix. The case of IEEE-39 bus system elaborates processes and results of fault location and back-up protection, which verifies the ability of this improved new algorithm to locate faulty area and faulty component. Meanwhile, this improved new algorithm brings better fault tolerance by improving redundancy of information when applied to wide-area back-up protection.

This work is supported by Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-Connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: negative-sequence power direction comparison; cluster analysis; protection IED; system state information matrix; wide-area relaying protection

0 引言

为了提高继电保护系统的性能, 近年来研究人员提出广域继电保护的概念并做了大量研究^[1-3]。广域继电保护充分利用多点故障信息, 提高了后备保护的整体性能, 起到对后备保护的改善和补充的作用。鉴于上述思想, 故障分量也被应用到广域继电保护中。其中, 工频故障分量(突变量)方向元件能适应线路非全相运行, 它将非全相运行视为非故障状态(电力系统在非全相运行时, 在一般情况下没有危险的大电流或高电压产生)^[4], 在两相运行的负荷

状态下不会动作。两相运行的线路上若再次发生故障, 其故障附加网络是两相运行时的等值网络在故障点叠加一个故障电源, 此时, 判别区内、外短路的判别式依然成立, 突变量方向元件无论使用母线电压还是线路电压, 仍能正确动作^[5]。基于聚类分析的故障诊断方法能够按照故障样本之间的相似性无监督地将同类故障聚为一簇, 当前已成为一类有效的故障诊断策略^[6]。文献[7]提出基于向量相似理论的无功电压分区方法, 核心思想也是在于建立模糊相似矩阵, 利用模糊聚类理论划分电压控制区域。方向比较式保护动作速度快, 选择性好, 灵敏度高, 对通信信息没有同步的要求, 通信短暂中断恢复后仍能正确判别故障, 因此, 方向比较式保护

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)

也是输电线路常用的主保护之一^[8]。文献[9]介绍了一种新型的关联规则数据挖掘算法, 该算法采用模糊 C 均值聚类的方法划分局部特征量区间, 构建一定的候选集, 最后对候选集进行递推和多次检索产生用于归类的关联规则库。文献[10]通过结合 BP 神经网络和遗传算法, 更好地发挥了二者在输电线路覆冰厚度预测方面的优势。类似地, 本文中针对同样应用于输电线路故障定位的负序功率方向比较原理和模糊聚类算法, 提出联合负序功率方向比较与聚类算法的改进方法, 更好地提高了系统的容错能力。

基于负序功率方向比较原理的继电保护算法针对性强, 但却仅限于非对称故障情况, 建立在聚类算法基础上的保护算法虽不受故障类型的限制却偏于笼统, 故障定位不够精确^[11]。实际的电力系统是一个动态的庞大体系, 其中的拓扑辨识更是一个疑难问题。通过支路关联遥测遥信互校能够确定运行状态可疑的支路。通过引入信息矩阵, 利用状态估计节点可以得到电网运行状态^[12]。考虑到变电站系统的实际拓扑结构实时变化的动态性能, 本文采取有效结合上述两种方法的方案, 提出基于负序功率方向比较和聚类算法的改进继电保护算法并将其应用到后备保护中, 不仅能够精准定位故障区域, 更扩大了保护范围, 能够补充主保护的不足, 提高保护算法的性能。

1 负序功率方向比较原理

1.1 负序功率方向判别原理

负序功率方向判别元件利用测量所得负序电气量(电压、电流)间的相位夹角判定负序功率方向。方向保护采集安装点处的电气信息用于相关的处理和运算, 同时每个方向保护元件还需要将信息经广域网共享到关联域内其他保护元件。

方向元件的方向定义为流过保护的负序电流正方向是从母线指向线路。

下面以图 1 为例说明按相位比较原理构成的功率方向元件工作原理。

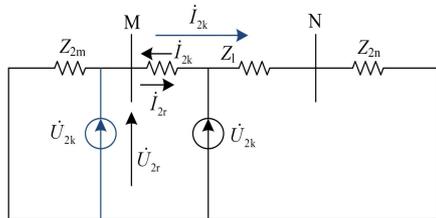


图 1 正(反)方向故障负序等值网络

Fig. 1 Negative sequence equivalent network for positive (negative) directional fault

负序功率表达式如下:

$$P = U_{2r} I_{2r} \cos(\phi_r - \phi_{sen}) \quad (1)$$

a) $P < 0$, 正方向故障, 且负序功率方向为负;

b) $P > 0$, 反方向故障, 且负序功率方向为正。

正方向故障时:

$$\dot{U}_{2r} = (Z_1 + Z_{2n}) \dot{I}_{2r}, \quad 90^\circ < \arg \frac{\dot{U}_{2r}}{\dot{I}_{2r}} < 270^\circ \quad (2)$$

反方向故障时:

$$-90^\circ < \arg \frac{\dot{U}_{2r}}{\dot{I}_{2r}} < +90^\circ \quad (3)$$

式中: \dot{U}_{2r} 和 \dot{I}_{2r} 分别表示短路发生点的负序电压和负序电流; ϕ_r 和 ϕ_{sen} 分别表示负序电压电流间的相位差和方向元件的灵敏角。

由式(2)和式(3)判断故障。

1.2 关联域的划分

关联域划分的原则是方向保护元件必须能够感知关联域内的线路和母线故障, 具体分为下列三部分:

a) 每个保护元件与其所在线路对端保护元件关联;

b) 每个保护元件与其相连母线上直接连接的其他保护元件相关联;

c) 当某个或几个保护元件故障不动作时, 其相连母线上其他保护元件与其线路对端保护元件关联。

以下以图 2 所示典型的 IEEE3 机 9 节点系统为例, 说明保护元件的关联原则。

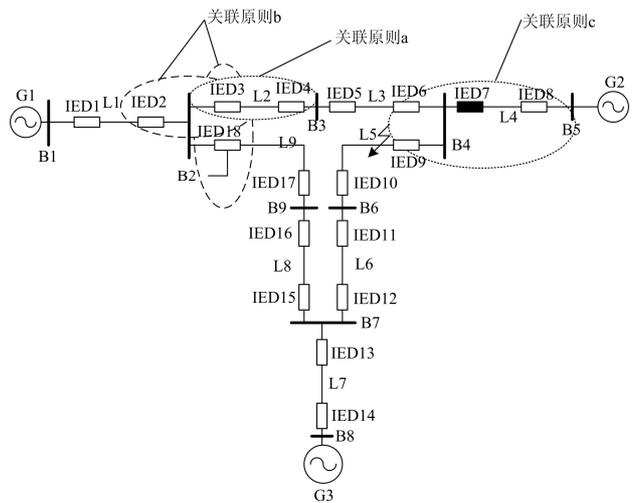


图 2 IEEE 3 机 9 节点系统

Fig. 2 IEEE 3-gen 9-bus system

各方向元件的具体关联元件如表 1 所示。

表 1 各方向元件关联表

Table 1 Related form of each direction component

关联 IED			
目标 IED	关联原则 a	关联原则 b	关联原则 c
IED ₁	IED ₂		IED ₂
IED ₂	IED ₁	IED ₃ IED ₁₈	IED ₁ IED ₃ IED ₁₈
IED ₃	IED ₄	IED ₂ IED ₁₈	IED ₂ IED ₁₈ IED ₄
IED ₄	IED ₃	IED ₅	IED ₃ IED ₅
IED ₅	IED ₆	IED ₄	IED ₄ IED ₆
IED ₆	IED ₅	IED ₇ IED ₉	IED ₇ IED ₉ IED ₅
IED ₇	IED ₈	IED ₆ IED ₉	IED ₆ IED ₉ IED ₈
IED ₈	IED ₇		IED ₇
⋮	⋮	⋮	⋮
IED ₁₈	IED ₁₇	IED ₂ IED ₃	IED ₂ IED ₃ IED ₁₇

2 聚类理论

2.1 聚类算法

模式识别技术是一种通过反映事物的特征向量对样本集进行分类的技术，主要分为两步：构造模式向量，提取反映事物特性的向量；模式识别，将待识别的模式向量与描述模式的特征集进行匹配^[13]。聚类算法也是一种对样本特征分析分类的技术，是建立在聚类分析原则上的，它把一个没有类别标记的样本按照某种准则划分成若干个子集，计算出每一个样本对象属于某一类的隶属度^[14-15]。

聚类分析的样本是由 PMU(同步相量测量单元)得到的实时故障电气量，为便于操作，相关研究人员提出将样本细分成以下四类：故障元件类；受故障影响很明显的元件类；受故障影响不明显的元件类；基本不受故障影响的元件类^[16]。根据调用聚类算法求得的隶属度确定各个保护元件的具体归类类别。按照某个保护元件在相应组别中隶属度函数值最大的原则将其归类于对应的组别。

2.2 聚类算法中的电网关联保护元件

电网关联保护元件定义如下：

a) 线路关联保护：线路两端保护元件相互关联，并关联对应线路。

b) 母线关联保护：与该母线直接相连的所有线路近母线端保护相互关联，并关联对应母线。

上述的这种关联保护元件定义与基于负序功率方向比较原理的保护关联定义相同。为了将抽象的关联保护元件聚类具体化，本文采用保护元件状态向量进行表示，定义状态向量为

$$\delta_{IEDi} = [\partial_{i1} \partial_{i2} \partial_{i3} \partial_{i4} \partial_{i5} \dots]$$

其中，保护元件状态向量中的各元素定义如下：

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

$$\partial_{i2} = \begin{cases} 1, & \text{故障方向正方向} \\ -1, & \text{故障方向反方向} \\ 0, & \text{未检测到故障} \end{cases}$$

$$\partial_{i3} = \begin{cases} 1, & \text{断路器动作} \\ -1, & \text{断路器不动作} \\ 0, & \text{断路器失效} \end{cases}$$

$$\partial_{i4} = \begin{cases} 1, & \text{母线主保护动作} \\ -1, & \text{母线主保护不动作} \\ 0, & \text{母线主保护失效} \end{cases}$$

$$\partial_{i5} = \begin{cases} 1, & \text{距离I段动作} \\ -1, & \text{距离I段不动作} \\ 0, & \text{距离I段失效} \end{cases}$$

该定义将保护元件采集到的故障电气量分为三种状态：动作、不动作、失效。由图 2 所示系统结构可得故障线路保护的状态向量，例如，线路 L₅ 处 K 点短路时，故障线路 L₅ 关联保护元件为 IED₉ 和 IED₁₀，信息准确时， $\delta_{IED9} = \delta_{IED10} = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1]$ ，而非故障关联保护元件(IED₅、IED₆、IED₇、IED₈)的状态信息分别是： $\delta_{IED5} = \delta_{IED8} = [-1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1]$ ， $\delta_{IED6} = \delta_{IED7} = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]$ ，显然，故障元件关联保护的状态向量完全一致，并且与非故障元件关联保护的状态向量差别悬殊，所以故障元件关联保护只会被归为同一类。基于此可得出该电网的状态信息矩阵 **A** 如下：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \delta_{IED1} \\ \delta_{IED2} \\ \vdots \\ \delta_{IEDn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial_{11} & \partial_{12} & \dots & \dots & \partial_{1n} \\ \partial_{21} & \partial_{22} & \dots & \dots & \partial_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial_{n1} & \partial_{n2} & \dots & \dots & \partial_{nn} \end{bmatrix}$$

其中，矩阵 **A** 的行向量表示相应编号的保护元件状态信息。

3 联合负序功率方向比较与聚类算法的改进法

3.1 改进法可行性分析

由上述针对负序功率方向比较原理和聚类算法的分析可得出二者在下列几个方面的相似点与不同点。相似点: (1)均建立在故障分量的基础上; (2)均有相关的关联域和样本分类定义, 并且在一定程度上是一致的; (3)解决问题均是进行故障定位。不同点: (1)模糊分类算法主要针对原发性故障, 对潮流转移时后备保护误动而引发的连锁跳闸事故的研究欠缺。(2)PMU 受到通信系统的限制, 对采样的同步性要求极高。(3)利用 PMU 的聚类算法的分类数是聚类分析的关键, 需要由电力系统实际应用情况来决定, 受系统运行影响大。(4)负序功率方向比较仅在关联域内交互, 没有最大化利用广域信息。(5)负序功率方向比较受非对称故障限制, 且负序电流启动受振荡中频率偏移的影响。(6)单一的利用负序功率方向判别, 在缺少多个故障元件的输出结果时, 广域继电保护系统将闭锁, 不对故障元件进行判断, 此时算法便失去有效性。

综合考虑上述因素, 结合负序功率方向比较原理与聚类算法可以改进上述问题。

广域继电保护的核心思想在于利用电网中的广域同步测量信息, 通过多信息融合计算识别故障元件, 但多信息融合并不代表全电网信息融合, 也不代表信息越多越好。随着电力系统的不断发展和电压等级的提高, 当系统中出现故障时, 会产生相当数量的电气变化量, 然而并不是所有这些电气变化量都是最关键的有效数据。此时, 将范围锁定在关联保护 IED 之间的数据, 能大大减少工作量, 避免不必要的数据分析^[17]。结合负序功率方向比较原理与聚类算法能够对上述两种原理进行优势互补。基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法既能够作系统故障后母线和线路的主保护, 又可以在主保护拒动时, 兼顾后备保护的功能。模糊分类利用广域信息, 适应不同运行方式, 增强了故障判别的容错能力。

3.2 结合负序功率方向比较与聚类算法的系统状态信息矩阵

建立结合负序功率方向的聚类关联保护元件的状态向量矩阵, 增加原始矩阵 A 的维度, 如:

$$\delta_{i6} = \begin{cases} 1, & \text{距离 II 段动作} \\ -1, & \text{距离 II 段不动作} \\ 0, & \text{距离 II 段失效} \end{cases}$$

$$\delta_{i7} = \begin{cases} -1, & \text{负序功率方向为正} \\ 1, & \text{负序功率方向为负} \\ 0, & \text{没有负序功率} \end{cases}$$

当系统的拓扑结构或运行方式发生改变时(如一次设备的投/退及故障引起的开关跳闸, 或负荷与发电机出力发生变化), 由关联保护向量构成的系统状态信息矩阵必须要与之相适应, 能够计及设备投退的在线自适应整定^[18]。对此, 做出修改原则: 系统拓扑结构发生改变时, 调整原始系统状态信息矩阵。按照一次设备退出运行或增加, 相应地将一次设备对应的行向量或退出运行的方向元件对应的列从状态信息矩阵中删除或增加到矩阵中。改变的同时更新矩阵元素位置索引。

3.3 后备保护故障的判别

故障判别及后备保护流程如图 3 所示。

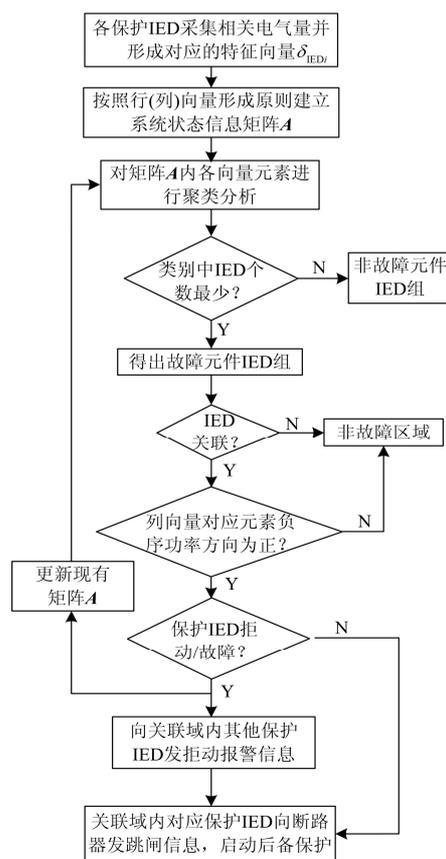


图 3 改进法的故障判别与后备保护流程图

Fig. 3 Improved fault identification and back-up protection flow chart

3.3.1 线路 L₅ 发生单相接地时的系统状态分析

保护装置的信息采集准确度以及聚类结果对系统的继电保护具有重要作用, 因此对各个保护元件

动作情况的分析十分重要。为了更好地加以阐述，以图 2 系统为例，分析在 L₅ 线路 K 处发生单相接地故障时各个保护元件的动作情况以及后备保护的实现过程。

首先，建立系统状态信息矩阵 A 如下：

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

其次，对状态信息矩阵的各向量元素进行聚类如表 2 所示。

表 2 各方向元件聚类情况表

Table 2 Cluster results of each direction component

线路	IED	负序功率方向	(IED ₉ /IED ₁₀ 拒动时) 后备 IED 动作
L ₁	IED ₁ IED ₂	-/+	0/0
L ₂	IED ₃ IED ₄	-/+	0/0
L ₃	IED ₅ IED ₆	-/+	0/1
L ₄	IED ₇ IED ₈	+/-	1/0
L ₅	IED ₉ IED ₁₀	-/-	1/1
L ₆	IED ₁₁ IED ₁₂	+/-	1/0
L ₇	IED ₁₃ IED ₁₄	+/-	0/0
L ₈	IED ₁₅ IED ₁₆	+/-	0/0
L ₉	IED ₁₇ IED ₁₈	+/-	0/0

其中，“+”表示负序功率方向为正，“-”表示负序功率方向为负，“1”表示后备保护动作，“0”表示后备保护不动作。

按照改进算法可将表 2 进一步归类，具体分类结果如表 3 所示。

表 3 改进算法下的各方向元件聚类结果表

Table 3 Cluster result of each direction component in the improved algorithm

第一类	第二类	第三类
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 ₁₃		IED ₁₄
IED ₁₆		IED ₁₅
IED ₁₈		IED ₁₇

基于故障区域最小的原则，由表 3 可知，此时故障元件为线路 L₅，并在 IED₉ 和 IED₁₀ 之间，由此实现了精确的故障定位。

3.3.2 保护装置工作异常情况下的后备保护分析

(1) 线路(L₅)故障情况下：当 IED₉ 拒动或故障时，此时拒动保护的向量特征为零向量，即系统状态信息矩阵 A 对应的行向量变成零向量，更新矩阵 A 。经计算，此时矩阵 A 的秩保持不变。可见，系统状态信息矩阵的秩，也就是其分类结果不会因为矩阵中保护特征向量的维度的增加或减少而发生变化，相反，它只会遵循定义好的结合负序功率方向和聚类的保护关联原则，与具体故障下系统拓扑动态相关，不会因某个保护元件拒动或故障而不同。按照关联保护原则，此时 IED₉ 将会把拒动信息发送给关联域内其他保护元件，即 IED₆、IED₇、IED₁₀。由 IED₆、IED₇ 向相应的断路器发出跳闸信号，实现对 IED₉ 拒动时的后备保护功能。更严重的情况即当 IED₉ 拒动或故障时 IED₆/IED₇ 也发生拒动或故障，这时，由关联原则 3，IED₉ 将会把拒动信息发送给关联域内的 IED₅/IED₈ 实现后续的断路器跳闸，完成此种情况下的后备保护功能。

(2) 母线(B₄)故障情况下：此时得到系统新的状态信息矩阵 A ，且

$$\delta_{IED5} = \delta_{IED8} = \delta_{IED10} = [-1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1]$$

$$\delta_{IED6} = \delta_{IED7} = \delta_{IED9} = [-1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1]$$

由聚类可知，此时所有保护被归为四类，具体分类结果如表 4 所示。

表 4 母线故障时保护元件聚类情况表

Table 4 Protection IED cluster result for bus fault

第一类	第二类	第三类	第四类
IED ₁	IED ₅	IED ₆	IED ₂
IED ₃	IED ₈	IED ₇	IED ₄
IED ₁₂	IED ₁₀	IED ₉	IED ₁₁
IED ₁₄			IED ₁₃
IED ₁₆			IED ₁₅
IED ₁₈			IED ₁₇

在母线 B₄ 故障的同时, 若同一类别中的 IED₉(或 IED₆/ IED₇)发生拒动或故障, IED₁₀(或 IED₅/ IED₈)按照关联原则 1 将跳闸信息传送给相应断路器实现后备保护。此时, 虽然第二类和第三类分类的保护数目相同, 但是, 观察测量到的负序功率方向可知, IED₅、IED₈、IED₁₀ 中的 $\partial_{i7} = 1$, 而只有 IED₆、IED₇、IED₉ 中的 $\partial_{i7} = -1$, 即故障位于 IED₅、IED₈、IED₁₀ 的正方向, 位于 IED₆、IED₇、IED₉ 的反方向, 因此定位故障为母线 B₄ 故障, 此时可由线路 L₃、L₄、L₅ 的距离 II 段保护动作。

(3) B2 故障时, 若其他元件的状态信息均准确, 而任意两个关联保护的母线主保护状态信息失效(假设 IED₃、IED₁₈), 此时聚类的结果是 IED₁、IED₄、IED₁₇ 为聚类故障组别, 但这三个保护元件彼此非关联, 所以并不能确定具体的故障元件而只能大概给出故障区域。考虑了负序功率方向以后, $\delta_{\text{IED3}} = \delta_{\text{IED18}} = [-1 \ -1 \ 1 \ 0 \ -1 \ -1 \ -1]$, $\delta_{\text{IED2}} = [-1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1]$, 由此可定位母线 B2 发生故障。

4 总结

提出结合负序功率方向比较与聚类原理的后备保护新算法, 应用了模糊分类与负序功率方向各自的优势, 不仅可以弥补非对称故障情况下故障判别的局限性, 而且在某些特殊故障情况时(如母线故障的同时又有保护元件发生拒动或故障), 通过负序功率方向比较能够提高故障元件定位的唯一性, 并且判断的结果还可以互为验证, 增强了整体系统的故障定位精确性。

参考文献

[1] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 87-93.
YANG Zengli, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22):

87-93.
[2] 金恩淑, 汪有成, 王红艳, 等. 基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 1-6.
JIN Enshu, WANG Youcheng, WANG Hongyan, et al. A wide-area relaying protection algorithm based on negative sequence power direction comparison principle[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 1-6.
[3] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 95-103.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on system architecture and fault identification of zone-division wide-area protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 95-103.
[4] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 136-139.
[5] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
[6] 张孝远, 张新萍, 苏保平. 基于最小最大核 K 均值聚类算法的水电机组振动故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 27-34.
ZHANG Xiaoyuan, ZHANG Xinping, SU Baoping. Vibrant fault diagnosis for hydro-turbine generating unit using minmax kernel K-means clustering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 27-34.
[7] 李昌超, 鲁宝春, 陈凤英, 等. 基于向量相似度的无功电压分区方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 14-18.
LI Changchao, LU Baochun, CHEN Fengying, et al. Reactive power voltage control partitioning based on vector similarity[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 14-18.
[8] 丁伟, 何奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.
DING Wei, HE Benteng, WANG Huifang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.
[9] 郑文栋, 黄成军, 杨宁, 等. 基于新型关联规则算法的开关柜局放程度分类研究[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 23-28.
ZHENG Wendong, HUANG Chengjun, YANG Ning, et al.

- Classification of partial discharge level in switchgear cabinet based on the improved association rules mining algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 23-28.
- [10] 郑振华, 刘建生. 遗传算法与 BP 神经网络相结合的输电线路覆冰厚度预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 27-31.
ZHENG Zhenhua, LIU Jiansheng. Prediction method of ice thickness on transmission lines based on the combination of GA and BP neural network[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 27-31.
- [11] 吴浩, 李群湛, 易东. 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[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 39-45.
WU HAO, LI Qunzhan, YI Dong. Faulty region identification based on wide-area state information and fuzzy C-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 39-45.
- [12] 姬源, 杨欣, 王燕, 等. 基于支路等值的拓扑辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 129-134.
JI Yuan, YANG Xin, WANG Yan, et al. A topology estimation method based on branch equivalence[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 129-134.
- [13] 马斌, 张丽艳. 一种基于径向基神经网络的短期风电功率直接预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 78-82.
MA Bin, ZHANG Liyan. Short-term wind power direct forecasting based on RBF neural network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 78-82.
- [14] 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: 50-61.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] THOMAS M S, KOTHARI D P, et al. Automated substation event analysis using IED data[C] // IEEE Conference of Power and Energy Society General Meeting, San Diego, July, 2012: 1-11.
- [18] 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): 125-128.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Overview of power system wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 125-128.

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2015-09-18

作者简介:

姜晨(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为继电保护与智能变电站技术研究; E-mail: 1306276241@qq.com

高亮(1960-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、智能变电站应用技术研究。

(编辑 魏小丽)