

DOI: 10.7667/PSPC171422

# 基于序电流灰色关联分析与多信息融合的广域后备保护算法

刘建锋<sup>1</sup>, 张科翌<sup>1</sup>, 田权<sup>2</sup>, 黄世龙<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力公司泰顺电力公司, 浙江 泰顺 325500)

**摘要:** 为了提高广域后备保护的容错能力, 在集中分布式分区原则下, 提出了电气量与多信息融合相结合的保护算法。该方法首先对分区内母线按照序电压分布特点排序后找出疑似故障线路。随后区域中心变电站将各个子站的录波数据计算得到疑似故障线路的综合序电流, 之后利用灰色关联分析求得各疑似线路的故障度。同时, 区域中心变电站向子站索取各 IED 回传的保护信息, 计算疑似故障线路的故障度。最后, 将两种故障度加权融合辨别故障位置。仿真算例表明, 将电气量引入能够提高广域后备保护的容错能力, 在复杂工况下也可以准确辨认出故障位置。

**关键词:** 广域后备保护; 灰色关联度; 多信息融合; 容错性

## Wide area backup protection algorithm based on grey correlation analysis of sequence current and multi-information fusion

LIU Jianfeng<sup>1</sup>, ZHANG Kezhao<sup>1</sup>, TIAN Quan<sup>2</sup>, HUANG Shilong<sup>1</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Taishun Electric Power Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Taishun 325500, China)

**Abstract:** In order to improve the fault tolerance ability of Wide-Area Backup Protection (WABP), under the principle of centralized distributed partition, this paper proposes a protection algorithm based on the combination of electrical quantity analysis and multi-information fusion. This method first finds the Suspected Fault Line (SFL) after sorting the bus in the partition according to the characteristics of the sequence voltage distribution. Then the regional center substation will calculate the recorded data from each sub-station to obtain the integrated sequence current of the SFL, and then use the grey correlation analysis to obtain the fault degree of SFL. At the same time, the regional center substation asks the sub-station for the IED return protection information to calculate the SFL fault degree. Finally, the two fault degrees are weighted to identify the fault location. The simulation results show that the introduction of electrical quantity can improve the fault tolerance ability of WABP, and can correctly identify the fault location under complex conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61403246).

**Key words:** WABP; grey correlation analysis; multi-information fusion; fault tolerance

## 0 引言

我国电力工业已经深化发展, 电力系统的结构变得更加复杂, 利用变电站就地信息来判断故障的传统继电保护配置方法所获得的信息有限, 在某些特殊故障情况下难以发挥保护应有的性能。因此, 提出基于 SCADA/WAMS 测量系统数据的广域后备

保护来解决传统继电保护中凸显的问题。目前的研究方向主要有广域后备保护的体系结构<sup>[1]</sup>、具有容错能力的广域后备保护算法<sup>[2]</sup>、保护区域的划分策略<sup>[3]</sup>以及通信传输<sup>[4-5]</sup>等几个方面。

由于广域系统的节点信息在远距离传输中可能会出现错码与丢包的情况, 这会使决策机构出现误判, 这就需要研究具有容错能力的后备保护算法。目前, 通常利用以下两种信息来构建保护算法: 一种是传统的电气量信息; 另一种是基于各个节点 IED 返回的状态信息。传统电气量抗干扰能力强, 而保护元件反馈信息的优势则在于数据传输量少。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61403246); 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室基金项目资助(2015KJ11)

文献[6]利用各变电站 IED 的电流数据,构成基于电流差动原理的保护方法,原理简单,但是测量节点较多,通信上将难以满足时延要求。文献[7]考虑从开关量入手,在文献[8]的基础上加入与研究线路相连线路的远方 IED 所提供的方向信息,从而提高后备保护算法的容错性。

本文结合电气量与 IED 反馈的保护元件信息的优点,通过故障录波引入疑似故障线路的序电流作为电气量依据,并且联合保护元件状态量的多信息融合算法来寻找分区内故障线路。近年来,灰色关联度在变压器故障识别中应用广泛,可以用于确定波形之间的相似程度,但在电力系统中的应用还不多见。当电网发生故障后,故障线路的综合序电流会有明显的跃升,与正常线路的波形相比会有较大差异。并且故障前后各线路序电流自身在幅值变化上差别,因此可以从时间上和波形之间得到两种灰色关联度。计算故障度后,与多信息融合得到的故障度加权相加,与门槛值比较后判断线路是否发生故障,从而提高广域后备保护的 protection 性能。通过仿真算例表明,基于灰色关联分析与 IED 信息融合的算法能够提高后备保护的容错性,并且可以准确判断故障位置。

## 1 序电流灰色关联分析算法的基本原理

### 1.1 灰色关联度的计算

灰色关联分析的基本思想是根据曲线几何形状的相似程度来判断不同序列之间的联系是否紧密<sup>[9]</sup>。设参考波形序列为

$$X_0 = \{x_0(t) | t = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (1)$$

式中:  $t$  代表的是各个时间点;  $n$  是观测波形序列的长度;  $x_0(t)$  是  $t$  时刻的波形幅值。

那么在同一观测时段  $n$  内的比较波形可以设为

$$X_i = \{x_i(t) | t = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

式中,  $i$  代表的是比较波形的序号。参考波形序列与比较波形序列  $i$  在时间点  $t$  处的关联系数如下:

$$\gamma(X_0(t), X_i(t)) = \frac{\min_i \min_t |x_0(t) - x_i(t)| + \xi \max_i \max_t |x_0(t) - x_i(t)}{|x_0(t) - x_i(t)| + \xi \max_i \max_t |x_0(t) - x_i(t)} \quad (3)$$

式中,  $\xi$  称为分辨系数, 本文取为 0.5。

而在整个研究时段内的所有时间点对应关联系数的平均数就是参考波形与比较波形之间的灰色关联度, 见式(4)。

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \gamma(x_0(t), x_i(t)) \quad (4)$$

### 1.2 综合序电流的计算

图 1 是某线路的简单示意图。设  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_0$  为线路 L1 左侧测量得到的正、负、零序电流,  $I'_1$ 、 $I'_2$ 、 $I'_0$  为线路 L1 右侧测得的各序电流。设  $I_S$  为线路 L1 两侧序电流幅值差的绝对值, 当图 1 中  $k_1$  处发生故障时, 线路 L1 的  $I_S$  在幅值上一般要大于非故障线路的  $I_S$ , 由于三种序电流在不同类型故障发生时各有不同的特征, 因此设综合序电流如式(5), 来表征故障时序电流的特征。

$$I_z = \sqrt{I_{S1}^2 + I_{S2}^2 + I_{S0}^2} \quad (5)$$

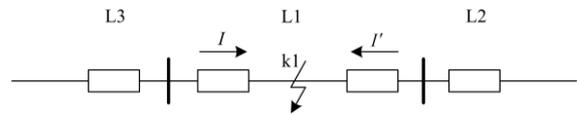


图 1 简单线路故障示意图

Fig. 1 Diagram of simple line fault

### 1.3 疑似故障线路的确定

另需说明的是, 本文算法是基于集中分布式分区原则<sup>[10]</sup>改进的, 因此没有必要对网络内所有线路进行比较。而疑似故障线路可以利用分区内的母线序电压分布特点排序以及启动元件启动情况进行确定。中心变电站可以对分区内启动后备保护的母线正、负、零序电压幅值分别从大到小进行排序, 然后分别选取正序最小的两条母线和负(零)序电压最大的两条母线, 归纳整理后, 可以将连接任意两条母线之间的线路作为疑似故障线路。参考线路的选取可以是与疑似故障线路相隔一个电气距离的某一线路, 这里的电气距离指的是相邻母线间的线路。

### 1.4 灰色关联度序列的构造

当分区内发生故障后, 中心变电站按照序电压排序找出疑似故障线路, 分别计算各线路的综合序电流作为波形序列  $X_i$ 。设某一区域中有 4 条线路分别为 L1、L2、L3、L4, 其中 L2 发生故障时, 这 4 条线路的综合序电流的变化情况如图 2 所示, 且图 2 中的黑色虚线代表的是故障线路 L2, 其余颜色为 3 条正常线路。从图中可以发现, L2 的综合序电流的幅值在故障前后会明显阶跃, L1、L3、L4 与其相比只有小的波动。因此, L1、L3、L4 在故障前后相对于 L2 在幅值上更加接近, 而非故障线路综合序电流之间的联系也更为紧密。那么就能利用灰色关联分析对  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  进行分析, 找出联系不为紧密的故障线路 L2。

由于所研究的范畴是后备保护, 因此可以借助分区内疑似故障线路两侧变电站录波仪同步数据(采样频率为 10 kHz)来得到波形序列, 利用文献[11]

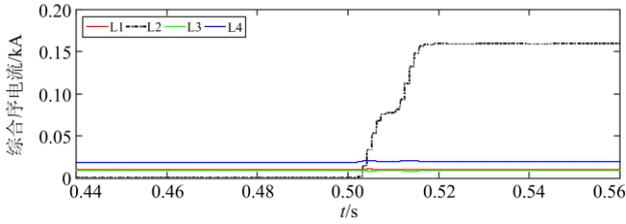


图2 正常线路与故障线路的综合序电流波形序列曲线

Fig. 2 Sequence curve of integrated sequence current of normal line and fault line

求得故障时刻 $t_i$ , 然后分别截取故障前后各 3 个周波的波形来研究。对于疑似故障线路中任意一条线路 L, 将故障前的波形 $x_i(t)(t=t_i-nT, n=3,2,1)$ 作为参考波形序列, 而故障点之后的 3 个周期波形作为比较序列<sup>[12]</sup>。最后利用式(3)、式(4)从时间的角度得到综合序电流波形的灰色关联度 $\gamma_1$ 。

通过观察式(3)和式(4)可以发现, 由波形序列不相似(点与点之间的距离大)的点得到的关联系数 $\gamma(x_0(t), x_i(t))$ 数量越多, 则经式(4)计算后得到的相关度就越小。为了更好地体现综合序电流在正常线路与故障线路之间的差异, 在几条疑似线路与参考线路之间进行关联度分析时, 可以采用故障前 1 个周波的波形序列及故障后 3 个周波的波形序列进行研究。若故障时刻是 0.5 s, 即研究波形时间为 0.48~0.56 s。利用 1.1 节的公式, 经过计算可以得到线路综合序电流之间的灰色关联度 $\gamma_2$ 。

### 1.5 利用灰色关联度计算波形相似度与故障度

经过 1.3 节的计算后, 分别得到灰色关联度 $\gamma_1$ 与 $\gamma_2$ , 通过大量的仿真计算表明,  $\gamma_1$ 与 $\gamma_2$ 相比,  $\gamma_1$ 所示正常线路的相关度的联系要紧密一些, 辨别能力也更加优秀。因此,  $\gamma_1$ 的权重设置比 $\gamma_2$ 高, 线路 Li 波形相似度的计算公式为

$$\tau_i = \frac{3\gamma_1 + \gamma_2}{4} \quad (6)$$

同时, 经多次仿真计算, 故障度 $P_1$ 的计算公式如下处理:

$$P_1 = \frac{1}{\tau_i} - 1 \quad (7)$$

当 $P_1$ 大于 1 时, 令其等于 1。

## 2 基于保护元件状态信息的检测算法

### 2.1 基于保护元件信息的保护算法

根据文献[13], 在考虑本线路的保护元件信息的同时还可以引入相邻线路保护元件信息, 以增强算法在疑似故障线路间故障定位能力。本文将本线路保护元件信息评定系数记作 $C_{OS}$ , 相邻线路保护元

件对本线路故障的评定系数记作 $C_{BS}$ 。

故障评定系数 $C_{OS}$ 是对本线路保护元件状态信息的一个权加值, 它代表本线路保护元件状态信息对该线路故障程度的评定。

$$C_{OS} = \alpha(M + M') + \alpha_1(D_I + D'_I) + \alpha_2(D_{II} + D'_{II}) + \alpha_3(D_{III} + D'_{III}) + F \quad (8)$$

式中:  $M$ 、 $D_I$ 、 $D_{II}$ 、 $D_{III}$  分别是本线路一侧的主保护信息、距离 I 段、距离 II 段与距离 III 段的动作信息;  $M'$ 、 $D'_I$ 、 $D'_{II}$ 、 $D'_{III}$  是线路另一侧的元件信息;  $\alpha$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别是主保护、距离 I 段、距离 II 段与距离 III 段的权值。当主保护发出动作信号时, 根据其保护范围可以确定故障在本线路的概率很大, 所以  $\alpha$ 、 $\alpha_1$  设为 1。由于距离保护 II 段与距离保护 III 段的保护范围超出本线路, 根据文献[14]引入故障贡献度的概念, 认为线路距离保护 II 段与 III 段对判断本线路和相邻线路故障评定的贡献度应该按照其整定阻抗落在相应线路的比例(即保护范围)来确定。考虑到分支系数的影响, 并简化计算, 在权值(即贡献度) $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  的确定上, 本文假设距离保护 II 段在考虑分支系数后可以延伸至下一级线路的 30% 处, 距离保护 III 段可延伸至下一级线路的 100%, 因此对本线路的权值分别为 0.77 与 0.5。F 代表的是线路两侧方向元件的综合判断值, 在此规定正方向是从母线指向线路, 其值为

$$F = \begin{cases} 0.5 & (1,1) \\ 0.25 & (1,0), (0,1) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

在式(9)中, 只有当本线路两侧 IED 反馈的方向元件信息都为 1, 即正向, 或者一方为正方向另一方失效(为零)时才能对本线路的故障判断做出贡献, 否则贡献值为 0。

相邻线路对本侧故障评定系数 $C_{BS}$ 是相邻线路 IED 反馈的线路远方距离 II 段、距离 III 段以及方向元件信息的一个加权值。加入距离 II 段, 是因为相邻线路远侧的距离 II 段保护范围可以延伸到本线路, 并可以对本线路故障判断做出贡献, 如式(10)所示。

$$C_{BS} = a \times D'_{II} + b \times D'_{III} + c \times F' \quad (10)$$

式中:  $D'_{II}$ 、 $D'_{III}$  分别是相邻线路远侧 IED 返回的距离 II 段与距离 III 段状态信息;  $a$  和  $b$  分别是对应的权值, 按照之前的取值方法应取为 0.23 与 0.5;  $F'$  为相邻线路两侧方向元件的信息综合值, 其取值与  $F$  相同, 但是取值条件有所改变, 如式(11)所示。因为相邻线路方向元件动作时并不一定能够直接判断本线路出现故障, 所以  $F'$  的权值  $c$  取为 0.2。

$$F' = \begin{cases} 0.5 & (-1,1) \\ 0.25 & (-1,0), (0,1) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中，括号中的值分别代表近侧与远侧方向元件的状态值。

### 2.2 故障门槛值的整定与故障度

线路故障判断的综合系数为

$$C_{out} = C_{OS} + C_{BS} \quad (12)$$

故障门槛值的整定参照参考文献[15],  $C_{set}$  按照如下思路来整定: 设相邻线路的数量为  $n$ , 若线路首端 IED 失效, 主保护拒动且相邻线路近侧 IED 失效时, 分别计算线路在首端、末端和线路 50% 处三点分别发生故障时  $C_{OS}$  与  $C_{BS}$  的平均值之和。经过计算后门槛值的表达式为

$$C_{set} = 2.19 + 0.63n \quad (13)$$

得到门槛值后, 故障度  $P_{II}$  可以按照  $C_{out}/C_{set}$  来计算, 其值超出 1, 则按照 1 来计算。

## 3 后备保护算法的实现

### 3.1 算法启用原则

本文后备保护算法的启用原则如下所述。

(1) 当线路两侧的主保护检测到故障并且都正确动作或者系统处于非全相运行状态时, 本文后备保护不启动;

(2) 若分区内某条线路两侧 IED 反馈状态信息中主保护有一侧拒动或两侧都拒动, 同时线路距离保护信息和方向元件信息也指示出可能有故障, 则分区内主变电站启动本文后备保护算法;

(3) 故障发生在边界线路上时, 若边界线路主保护拒动, 则将该线路相连 2 个分区作为一个分区来判断。

### 3.2 综合故障度的融合

按照 1.4 节与 2.2 节可以分别得到两种故障度, 因为电气量与 0\1\1 信息量相比有抗干扰和准确度高的优点, 因此对于波形相似故障度适当地提高一些权重, 融合公式如下:

$$P = 0.6P_I + 0.4P_{II} \quad (14)$$

经过多次仿真实验计算, 若某疑似故障线路经式(14)得到的  $P > 0.8$ , 则可以确定为故障线路。

保护算法的流程图见图 3。

## 4 算例分析

为了验证本文提出的后备保护算法的保护性能和容错能力, 利用 PSCAD/EMTDC 搭建了如图 4 所示的 IEEE10 机 39 节点系统进行计算。黑色虚线

内为研究分区, 电压等级为 220 kV, 其中 B4 是区域中心变电站, 作为算法的决策中心, 区域内其他母线都作为子站。分别在 f1、f2 处设置故障, 其中 f1 为靠近 B4 的 20% 处, f2 为线路 L1 的中点处。

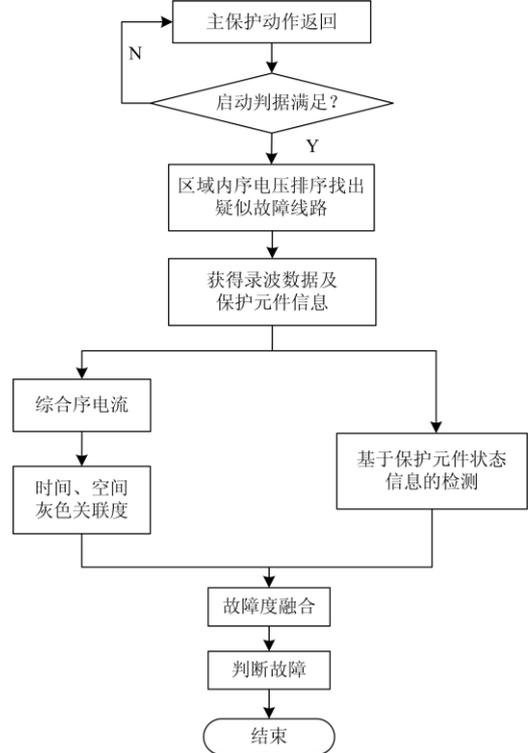


图 3 广域保护算法流程图

Fig. 3 Flow chart of wide area protection algorithm

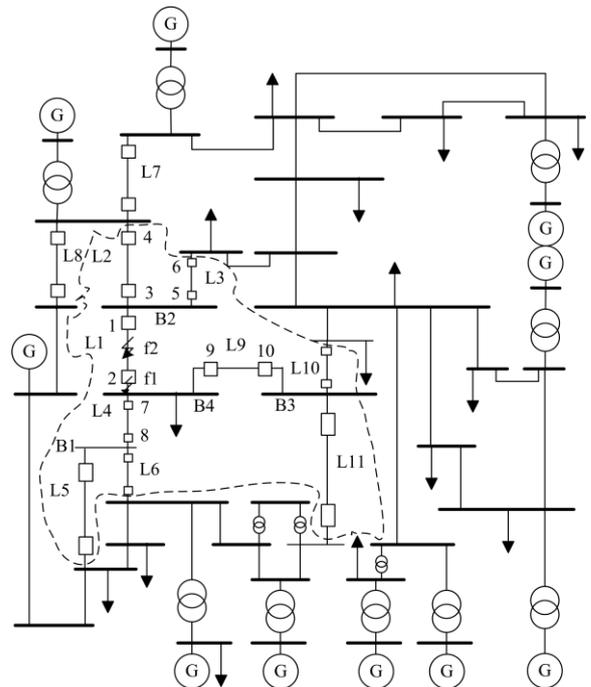


图 4 IEEE10 机 39 节点示意图

Fig. 4 IEEE10-generator 39-bus diagram

4.1 复杂故障时保护性能的检验

(1) 高阻接地时的保护性能

在线路 L1 的中点 f2 处设置 A 相高阻接地来进行仿真, 过渡电阻值分别为 0 Ω、100 Ω、300 Ω 时, 线路 L1 两侧主保护拒动、方向元件拒动, IED1 的距离保护 I 段失效, IED2 中的距离保护 I、II 段失效, 相邻线路 L2 上远方距离保护 I 段误动。此时, 按照 1.3 节的方法对序电压进行排序, 选出不同过渡电阻情况下正序、负序、零序电压序列中排在前两位的母线, 归纳出疑似故障线路, 并选择灰色关联算法的参考线路为 L4, 此时疑似故障线路的选择情况和相似度的判断结果如表 1、表 2 所示。

表 1 高阻接地时疑似故障线路选择结果  
Table 1 Suspected fault line selection results under high resistance grounding fault

过渡电阻/Ω	前两位母线归纳	疑似故障线路
0	B2、B4	L1
100	B2、B3、B4	L1、L9
300	B2、B3、B4	L1、L9

表 2 不同过渡电阻下的波形相似度计算

Table 2 Calculation of waveform similarity under different transition resistors

过渡电阻/Ω	线路	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\tau$
0	L1	0.431	0.559	0.463
	L9	0.994	0.991	0.993
100	L1	0.423	0.574	0.461
	L9	0.994	0.991	0.993
300	L1	0.422	0.548	0.454
	L9	0.995	0.90	0.971

由表 1 可以看出在不同过渡电阻故障情况下, 疑似故障线路能够正确包含实际故障线路并且在数量上少于分区内线路总数。

在得到相似度后, 利用式(7)联合第 2 节算法与式(13)以及式(14)计算故障度, 如表 3 所示。

表 3 不同过渡电阻下的故障度

Table 3 Fault degree under different transition resistance

过渡电阻/Ω	线路	$P_I$	$C_{OS}$	$C_{BS}$	$P_{II}$	$P$
0	L1	1	1.77	2.4	0.89	0.956
	L9	0.01	0.5	0.8	0.28	0.286
100	L1	1	1.77	2.4	0.89	0.956
	L9	0.01	0.5	0.8	0.28	0.286
300	L1	1	1.77	2.4	0.89	0.956
	L9	0.03	0.5	0.8	0.28	0.130

从表 3 可以得到, 本算法在不同过渡电阻的高阻接地情况下可以正确识别出故障线路为 L1, 不会导致误判, 且结果有一定的灵敏度。

(2) 非全相运行再故障时的保护性能

在线路 L1 上设置 A 相 0.3 s 时两侧断路器断开,

0.5 s 时在线路 f2 处分别发生 C 相金属性接地、BC 相间、BCG 相间接地故障。由于非全相运行时并不满足后备保护启动条件, 因此后备保护在系统非全相运行时不会启动。系统非全相运行时方向元件会自动退出运行, 所以在非全相运行再故障时, 线路 L1 上的方向元件会发生拒动现象。若此时 B 相或 C 相中某一侧主保护拒动, 距离 I、II、III 段有故障反馈信息, 本文后备保护启动。

当线路 L1 非全相运行后, 线路两侧母线正序电压幅值将会明显下降, 负序和零序电压幅值将会明显上升, 单相接地故障后故障线路两侧母线序电压与其他母线的区别将依旧存在, 经仿真实验, 可以得到疑似故障线路为 L1, 并选参考线路为 L4; 当发生 BC 相间短路或 BCG 相间接地短路时, 与非全相运行线路无关的母线负序电压可能会超过非全相运行线路相连母线, 选择范围将会扩大, 经仿真计算, 疑似故障线路变为 L1、L4、L9, 并选 L2 为参考线路。三种情况下的波形相似度与故障度分别如表 4、表 5 所示。

表 4 非全相运行再故障时的波形相似度

Table 4 Waveform similarity for faults under open phase state

再故障类型	线路	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\tau$
CG	L1	0.421	0.567	0.458
	L1	0.410	0.560	0.448
BC	L4	0.970	0.927	0.959
	L9	0.941	0.935	0.940
BCG	L1	0.406	0.556	0.444
	L4	0.958	0.936	0.953
	L9	0.945	0.936	0.943

从表 5 得到 L1 非全相运行后再故障时, 本算法可以识别出故障线路为 L1, 并且故障线路与非故障线路故障度之间的差别很大。

表 5 非全相运行再故障时的故障度

Table 5 Fault degree for faults under open phase state

再故障类型	线路	$P_I$	$C_{OS}$	$C_{BS}$	$P_{II}$	$P$
CG	L1	1	3.54	2.4	1	1
	L1	1	3.54	2.4	1	1
BC	L4	0.04	0.5	1.53	0.431	0.196
	L9	0.06	0.5	1.53	0.431	0.208
BCG	L1	1	3.54	2.4	1	1
	L4	0.05	0.5	1.53	0.431	0.202
	L9	0.06	0.5	1.53	0.431	0.208

4.2 保护的容错性分析

(1) IED 信息全部消失

分别设 IED1 与 IED8 内的信息全部消失, IED1 与 IED2 内的信息全部消失两种情况, 并且录波数

据在网络传输过程中都有 5% 的掉包率, 且都在 f1 处发生 A 相金属性接地故障。此时测得疑似故障线路为 L1 与 L9, 参考线路选为 L4。经仿真计算, 波形相似度分别为 0.459 与 0.982, 故障度如表 6 所示。

表 6 IED 信息全部消失时的故障度

	线路	$P_I$	$C_{OS}$	$C_{BS}$	$P_{II}$	$P$
IED1、8 信息	L1	0.95	2.52	2.08	0.977	0.961
全部消失	L9	0.02	1.27	0.3	0.28	0.124
IED1、2 信息	L1	0.95	0	2.86	0.607	0.813
全部消失	L9	0.02	1.27	0.25	0.28	0.124

从表 6 可以看出, 若仅使用 IED 信息量进行故障判断时, 在 IED1、2 信息全部消失的情况下故障度仅为 0.607, 将会导致误判; 在加入序电流波形相似度算法后故障度数值上升为 0.813, 满足门槛要求, 可以准确判断故障线路 L1。

## (2) IED 信息全部错误

分别设 IED2 内的信息全部错误, IED2 与 IED4 内的信息全部错误两种情况, 并且录波数据在传递过程中都有 5% 的掉包率, 且都在 f1 处发生单相接地故障 AG。此时测得疑似故障线路依旧为 L1 与 L9, 参考线路选为 L4。经仿真计算, 波形相似度亦分别为 0.459 与 0.982, 故障判断情况如表 7。从表中可以看出, 本文算法在单个或是两个 IED 信息全部错误的情况下也能正确判断故障线路, 在容错性方面有一定的价值。

表 7 IED 信息全部错误时的故障度

	线路	$P_I$	$C_{OS}$	$C_{BS}$	$P_{II}$	$P$
IED2 信息	L1	0.95	3.27	2.40	1	0.970
全部错误	L9	0.02	0.50	0.80	0.276	0.122
IED2、4 信息	L1	0.95	3.27	2.03	1	0.970
全部错误	L9	0.02	0.5	0.8	0.276	0.124

## 5 结论

本文提出了一种结合电气量与保护元件动作量信息融合的广域后备保护方法。该方法在得到疑似故障线路后, 首先分别利用故障录波和各变电站 IED 信息计算得到两种故障度, 然后进行加权融合得到综合故障度, 最后根据各自线路的综合故障度与门槛值进行比较得到最后的判定结果。该算法在 IED 信息融合的基础上联合综合序电流相似度, 利用电气量相似度来提高后备保护算法的容错性, 同时提高了后备保护的动作性能。从 IEEE10 机 39 节点测试系统上得到的仿真结果表明, 该算法在复杂

工况下有良好的动作性能与灵敏度。在容错性试验中, 即便故障线路两侧 IED 信息全部消失, 基于 IED 信息量算法失效, 由暂态量算法也能提高综合故障度, 得到正确结果, 有较高的容错性。

## 参考文献

- [1] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-123.  
LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-123.
- [2] 韩旭彬, 王玉财, 吕飞鹏, 等. 基于故障关联系数的广域后备保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 48-54.  
HAN Xubin, WANG Yucai, LÜ Feipeng, et al. A new algorithm of wide area backup protection based on fault correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 48-54.
- [3] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 集中决策式广域后备保护分区模型与优化算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 212-219.  
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Partition model and optimization algorithm for wide-area backup protection base on centralized decision-making mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 212-219.
- [4] 潘天亮, 蔡泽祥, 席禹, 等. 基于 OPNET 的广域测量系统仿真与通信延时性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 51-57.  
PAN Tianliang, CAI Zexiang, XI Yu, et al. Simulation of WAMS and performance analysis of communication delay based on OPNET[J]. Power System Protection and Control, 2017, 29(4): 51-57.
- [5] 李振兴, 张腾飞, 王欣, 等. 基考虑时延与流量均衡性的广域保护通信迂回路径重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 130-136.  
LI Zhenxing, ZHANG Tengfei, WANG Xin, et al. Circuitous communication channel reconstruction of wide area protection considering delay and balance of flow[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 130-136.
- [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, 110.  
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo, et al. A wide

- area protection relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 91-95, 110.
- [7] 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.
- [8] 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): 69-74.  
WANG Rui, WANG Xiaoru, HUANG Fei, et al. Wide area backup protection algorithm for power grid based on correlation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 69-74.
- [9] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [10] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 48-51.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of zone division on limited wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 48-51.
- [11] 崔艳, 刘志刚, 戴晨曦. HF-EMD 频率选取原则及在暂态扰动检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 47-53.  
CUI Yan, LIU Zhigang, DAI Chenxi. Frequency selection principle of HF-EMD and its application in transient disturbance detection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 47-53.
- [12] 韩迎春, 童晓阳. 利用时空电气量基于灰色关联度的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 581-587.  
HAN Yingchun, TONG Xiaoyang. The power system fault diagnosis method based on gray relational degree using space time electric quantity[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 581-587.
- [13] 李珊, 何怡刚, 项胜, 等. 基于故障电压比较与多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 92-98.  
LI Shan, HE Yigang, XIANG Sheng, et al. A wide backup protection algorithm based on fault voltage comparison and multi-information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 92-98.
- [14] MA Jing, LIU Chang, THORP J S. A wide-area backup protection algorithm based on distance protection fitting factor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2196-2205.
- [15] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-14.  
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.

收稿日期: 2017-09-21; 修回日期: 2017-12-12

作者简介:

刘建锋(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光电互感器、数字化变电站智能装置及电力系统通信; E-mail: bansen@sina.com

张科墨(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为广域继电保护。E-mail: 593294573@qq.com

(编辑 姜新丽)