

# 基于故障电压比较与多信息融合的广域后备保护算法

李珊, 何怡刚, 项胜, 李得民, 刘茂旭, 章玉珠

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为了提高广域后备保护系统的容错性, 且使其在复杂工况下具有良好的动作性能, 提出一种将故障电压比较和多信息融合相结合的广域后备保护算法。该算法利用本线路和相邻线路的保护动作值加权得到综合值, 由其与故障门槛值的比值计算出对应的故障概率。同时利用相量测量单元(Phasor measurement unit, PMU)测得的线路一侧电压电流推算另一侧电压故障分量, 以推算值与测量值的比值获得 PMU 数据对应的故障概率, 将两种故障概率加权综合识别故障元件。该算法原理简洁, 基于 IEEE 4机8节点系统的算例结果表明, 该算法在高阻接地、非全相运行再故障、故障转换等工况下具有良好的动作性能, 多个保护拒动与误动时均能准确识别故障元件, 有较高的容错性。

**关键词:** 广域后备保护; 故障电压比较; 多信息融合; 相量测量单元; 加权综合

## A wide backup protection algorithm based on fault voltage comparison and multi-information fusion

LI Shan, HE Yigang, XIANG Sheng, LI Demin, LIU Maoxu, ZHANG Yuzhu

(School of Electrical Engineering & Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to improve the fault-tolerance of wide area backup protection and make it has satisfactory performance in complexity operating condition, a wide area protection algorithm combining fault voltage comparison and wide area protection information is proposed. Protection information of the line and the adjacent line are weighed to get the comprehensive value, then the corresponding probability of failure is calculated by the ratio of comprehensive and threshold value. At the same time, measured voltage and current by phasor measurement unit (PMU) from one terminal of transmission line are provided to estimate the voltage fault components of the other terminal. Then the corresponding probability of failure is obtained by the ratio of measured and estimated value, these two probabilities are weighted comprehensive to find the fault component. The principle of this algorithm is simple. The simulation tests based on IEEE 5-generator 8-bus system illustrate the validity under various complex conditions, such as high impedance earth fault, open-phase running of fault again, fault conversion, etc. And it shows the effectiveness and high fault-tolerance capability of the algorithm with the mis-operation and refuse-operation of multiple protections.

This work is supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 50925727).

**Key words:** wide area backup protection; fault voltage comparison; multi-information fusion; phasor measurement unit (PMU); weighted comprehensive

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)22-0092-07

## 0 引言

电网的结构日益复杂, 传统基于本地测量信息的后备保护动作延时长、整定困难, 难以适应电网结构的灵活变化, 而且潮流转移发生时难以区分过

负荷和线路内部故障易导致连锁跳闸事故。近些年, 广域测量技术取得了一定的发展, 广域保护也由此引起电力研究者的普遍关注<sup>[1-4]</sup>。目前高压电网主保护一般采用纵联保护, 整定简单, 动作正确率高、速度快且不受负荷转移的影响, 而广域信息采样要求同步性, 且由于采样装置或传输通道故障等原因易造成保护信息错误或缺失, 因此, 广域保护的研究主要针对后备保护, 致力于提高后备保护的性能<sup>[5-6]</sup>。

利用广域信息准确识别故障元件是目前广域后

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金(50925727); 国防科技计划项目(C1120110004、9140A27020211DZ5102); 教育部科学技术研究重大项目(313018); 安徽省科技计划重点项目(1301022036)

备保护的研究核心之一。广域后备保护一般采用两类信息构建故障识别判据：一类是保护动作信息；另一类是电流、电压等可直接测得的电气量信息<sup>[7]</sup>。文献[8]提出了利用方向比较原理构建故障识别判据的广域保护算法，对同步采样无严格要求且原理简单，但在非全相运行、高阻接地、故障转换等工况下方向元件易拒动或误动。文献[9]提出同时利用传统保护元件的信息以及PMU测得的正序电压幅值和电流相角差计算故障概率以此识别故障元件。该算法利用两种数据源的信息识别故障元件，容错性较高，但在发生高阻接地故障时，可能会有多个保护元件拒动或误动，且此时正序电流相角差较小，正序电压幅值变化也较小。文献[10]提出广域电流差动保护算法，原理简单，但对信息采样的同步性要求非常高，且广域范围内采集的电流数目较多，多点电流测量误差易导致较大不平衡电流。文献[11]提出了利用故障电压比值构建故障识别判据的广域保护算法，该算法原理简洁，对采样数据的同步性要求较低，且在电网高阻接地、故障转换、非全相运行等工况下具有良好的动作性能，但容错性不高。

为了克服现有问题，本文将故障电压比较和多信息融合相结合进行广域后备保护的在线故障检测，既具备保护在复杂工况下能可靠动作的优点，又充分利用了保护元件的动作信息，提高了保护的容错性。本文算法引入了故障电压比较的方法，提高了保护在高阻接地、非全相运行再故障等复杂工况下的动作性能，并重新设定了利用传统保护动作信息判别故障的门槛值，提高了保护的容错性。本文具体分析发生了高阻接地和非全相运行再故障等工况下各保护可能的拒动与误动情况。算例结果表明：本文算法在发生非全相运行再故障、高阻接地、转换性故障等复杂故障时，能可靠判别故障线路，在单个IED和两个IED信息全部缺失或错误时，仍可准确判别故障线路，容错性较高。

## 1 基于故障电压比较和多信息融合算法的基本原理

### 1.1 故障电压比较算法原理

定义某条线路mn两端故障电压比值 $K_m = |\dot{U}'_m / \dot{U}_m|$ ， $K_n = |\dot{U}'_n / \dot{U}_n|$ ，且取 $K_{\max} = \max(K_m, K_n)$ 。式中： $\dot{U}_m$ 、 $\dot{U}'_m$ 分别为线路m端测得的故障电压分量和由n端测得的电压、电流计算得到的m端电压推算值； $\dot{U}_n$ 、 $\dot{U}'_n$ 分别为n端测得的故障电压分量和由m端测得的电压、电流计算得到的n端电压推算值。当线路区外发生故障时，线路两端电压推算值

与测量值相等，即 $K_{\max} = \max(K_m, K_n) = 1$ 。当线路区内发生故障时， $K_m$ 、 $K_n$ 均大于1，且与过渡电阻无关<sup>[11]</sup>，此时 $K_{\max} = \max(K_m, K_n) > 1$ 。

(1) 零、负序分量是工频故障分量，电网中不对称故障发生时持续存在；正序突变量是故障暂态分量，故障时均会出现，但存在时间较短。因此，针对实际电网中较常发生的不对称短路，利用线路两侧的零、负序电压比值系数构成故障线路识别判据：

$$K_{\max 0-2} = \max(K_{m0}, K_{n0}, K_{m2}, K_{n2}) \geq K_{\text{set}} \quad (1)$$

式中， $K_{\text{set}}$ 为整定值，考虑到电压、电流的测量误差和电网运行方式切换导致电压电流暂态变化的影响，取为1.2。

针对三相对称短路，利用正序电压突变量和电压大幅降低的特征共同构成故障线路识别判据，如式(2)。

$$\begin{cases} K_{\max 1} = \max(K_{m1}, K_{n1}) \geq K_{\text{set}} \\ \left( |\dot{U}'_{m1}| \leq K_L U_N \right) \cup \left( |\dot{U}'_{n1}| \leq K_L U_N \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\dot{U}'_{m1}$ 、 $\dot{U}'_{n1}$ 为m侧和n侧的正序电压； $U_N$ 为线路的额定电压； $K_L$ 为正序低压启动值，对称短路时正序电压会大幅降低，参考文献[12]取50%。

(2) 利用故障电压比值判断相应的线路故障概率。由PMU测得的数据计算各线路的电压比值系数最大值 $K_{\max}$ ，对其作如下处理，获得对应的线路故障概率 $P_1$ 。令 $y = K_{\max} / 1.2$ ，则 $P_1$ 取值如式(3)所示。

$$P_1 = \begin{cases} 1 & y \geq 1.4 \\ 0.95 & 1.2 \leq y < 1.4 \\ 0.85 & 1 \leq y < 1.2 \\ 0.35 & 0.83 \leq y < 1 \\ 0.05 & y < 0.83 \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 基于保护元件信息的故障检测原理

本文算法综合考虑了本线路保护元件和相邻线路保护元件对本线路故障判别的影响程度。本文引入了两个相关系数：本线路相关系数 $L_{AF}$ 和相邻线路相关系数 $A_{AF}$ 。

$L_{AF}$ 反映了本线路保护信息对该线路故障的综合判断。

$$L_{AF} = 0.6(A + A') + 0.6(B_1 + B'_1) + 0.3(B_{II} + B'_{II}) + 0.2(B_{III0} + B'_{III0}) + 0.3(C + C') \quad (4)$$

式中： $A$ 、 $B_1$ 、 $B_{II}$ 、 $B_{III0}$ 、 $C$ 分别为本线路一侧的主保护信息，距离I、II、III段保护信息，方向元件信息； $A'$ 、 $B'_1$ 、 $B'_{II}$ 、 $B'_{III0}$ 、 $C'$ 分别为本线路

另一侧的主保护信息, 距离 I、II、III 段保护信息, 方向元件信息。

$A_{AF}$  反映了相邻线路的保护信息对该线路故障的综合判断。

$$A_{AF} = 0.2 \sum_{i=1}^{N_n} B_{IIIi} + \sum_{i=1}^{N_n} (-0.2C_{IN} + 0.2C_{IF}) \quad (5)$$

式中:  $B_{IIIi}$  为相邻线路  $i$  远离本线路那侧的距离保护 III 段信息;  $C_{IN}$ 、 $C_{IF}$  分别为相邻线路近侧和远侧的方向信息, 其值可取 +1, 0, -1;  $N_n$  表示本线路相邻线路的个数;  $i$  表示其他相邻线路序号。

根据主保护、距离 I、II、III 段和方向元件这五种保护对故障判断的影响程度, 其权值参考文献 [13] 取为 0.6、0.6、0.3、0.2、0.3。考虑到出现相邻线路方向元件误动或拒动个数较多的情况时, 正常线路可能会误判为故障, 因此适当降低相邻线路方向元件信息对本线路故障判断的权值, 设为 0.2。

(1) 计算线路的故障判断综合值和故障门槛值线路的故障判断综合值为

$$F_{out.Li} = L_{AF.Li} + A_{AF.Li} \quad (6)$$

参照文献 [14-15], 故障门槛值  $F_{set}$  可经过如下计算获得: 线路首端 IED 失效, 若首端发生故障,  $L_{AF} = 0.6 \times 1 + 0.6 \times 0 + 0.3 \times 1 + 0.2 \times 1 + 0.3 \times 1 = 1.4$ , 若末端发生故障,  $L_{AF} = 0.6 \times 1 + 0.6 \times 1 + 0.3 \times 1 + 0.2 \times 1 + 0.3 \times 1 = 2$ ; 相邻线路近侧 IED 失效时,  $A_{set} = \sum_{i=1}^{N_n} 0.2C_{iF} + 0.2 \sum_{i=1}^{N_n} B_{IIIi}$ ,  $F_{set} = \frac{1}{2}(1.4 + 2) + \sum_{i=1}^{N_n} (0.2C_{iF} + 0.2B_{IIIi})$ 。

(2) 计算传统保护信息判断线路故障的概率

故障时, 由实时得到的各线路保护信息计算故障判断综合值  $F_{out}$ , 并对其作如下处理获得故障确认比值  $x$ , 令  $x = F_{out}/F_{set}$ 。

对  $x$  作如下处理获得利用线路保护元件信息判断线路故障的概率  $P_{II}$ 。

$$P_{II} = \begin{cases} 1 & x > 1 \\ x & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

### 1.3 综合两种方法得到最终的线路故障概率

利用故障电压比较和多信息融合获得两种故障检测概率, 将它们加权后获得线路综合的故障概率, 两种概率的权值均取 0.5, 即

$$P = 0.5P_I + 0.5P_{II} \quad (8)$$

判定线路故障的判据为: 若线路的综合故障概率  $P$  大于 0.8, 该线路直接判定为故障线路; 若某线路的  $P$  满足  $0.7 < P < 0.8$  且其两侧主保护均未动

作, 也判定为该线路故障。

### 1.4 本文广域后备保护算法启用原则

本文广域后备保护算法作为主保护的后备, 其启用原则为: 若线路一侧主保护满足跳闸条件发出跳闸信号, 经短时延时后接收到线路另一侧主保护发出的跳闸信号, 此时主保护正确动作隔离故障线路后, 广域后备保护无需启动; 若主保护仅有一侧动作, 或两侧主保护都未动作但两侧的距离保护信息和方向元件信息等指示本线路出现故障时, 启动本文广域后备保护。

## 2 传统保护在复杂工况下的动作性能

### (1) 高阻接地时各保护的動作性能

传统主保护一般采用纵联差动电流保护, 而根据利用电流的不同, 分为稳态量电流差动保护和故障分量电流差动保护等不同类型的。对于稳态量电流差动保护, 当线路内部发生大过渡电阻接地短路时, 故障电流分量很小, 此时故障电流与负荷电流大小相差不大, 但负荷电流具有穿越性, 对线路两侧全电流的相位和大小影响较大, 保护的灵敏度会相应下降, 所以其耐受过渡电阻能力有限。故障分量电流差动保护基本不受负荷电流的影响, 高阻接地短路时灵敏度较高, 但由于其短时性开放的特点, 一段时间后该保护将停止工作退出运行, 此时保护任务将由稳态量电流差动保护单独承担。所以主保护性能主要由稳态量电流差动保护决定。因此当重负荷情况下发生高阻接地时, 主保护很可能会拒动。

高阻接地时, 接地距离保护计算的故障阻抗由实际存在的故障阻抗和附加阻抗两部分组成。若附加阻抗是感性阻抗, 测量阻抗会变大, 区内故障时距离保护很可能会拒动; 若附加阻抗是容性阻抗, 测量阻抗会变小, 距离保护很可能会误动。因此, 高阻接地时很可能出现距离保护误动或拒动的情况。

对于方向元件, 发生不对称高阻接地故障时, 零、负序电压值可能小于启动门槛值, 导致方向元件拒动。

### (2) 非全相运行时各保护的動作性能

非全相运行时出现的零、负序电流具有穿越性, 此时零、负序电流差动保护(主保护)不会误动。非全相运行对基于工频变化量的距离保护无影响, 不会导致其拒动或误动。对于零、负序方向元件, 非全相运行时退出运行, 因此非全相运行再故障时, 方向元件会拒动。

(3) 电压互感器二次回路断线时各保护的動作性能

电压互感器(PT)二次回路断线时,保护原理与电压有关的元件动作性能都会受到影响。PT 二次回路断线时,主保护(零、负序电流差动保护)能正常工作。对于距离保护,PT 二次回路断线时,过负荷的情况下距离保护就可能出现误动。距离保护一般都配置 PT 断线闭锁功能,检测到 PT 断线时,距离保护退出工作,因此 PT 断线后线路出现故障时距离保护会拒动。

对于零、负序方向元件,PT 单相断线时,若发生相间故障和非断线相的单相故障,方向元件可准确动作,若发生断线相的单相故障,方向元件可能出现误动;PT 两相断线时,若断线两相发生相间故障,方向元件失效,其余两相故障和非断线单相故障时,方向元件可准确动作,若出现断线相发生单相故障的情况,方向元件可能误动;PT 三相断线时,方向元件失效。因此 PT 断线时,方向元件可能误动或拒动。

### 3 算例分析

为验证本文算法在复杂工况下的动作性能和容错性,以 IEEE 4 机 8 节点系统为例进行分析,如图 1 所示。图 1 中数字 1~20 为 IED 编号。

线路 L1~L10 的故障门槛值如表 1 所示。

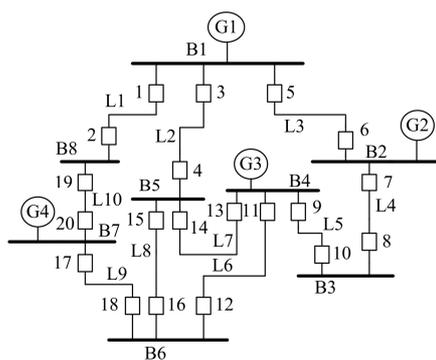


图 1 IEEE 4 机 8 节点系统图

Fig. 1 IEEE 4-generator 8-bus system

表 1 各线路的故障门槛值

Table 1 Fault threshold value of each line

| 线路 | 故障门槛值 | 线路  | 故障门槛值 |
|----|-------|-----|-------|
| L1 | 2.9   | L6  | 3.3   |
| L2 | 3.3   | L7  | 3.3   |
| L3 | 2.9   | L8  | 3.3   |
| L4 | 2.5   | L9  | 2.9   |
| L5 | 2.9   | L10 | 2.5   |

#### 3.1 复杂故障时保护的故障识别能力检验

利用 PSCAD/EMTDC 搭建图 1 所示系统,检

测本文故障识别算法在复杂故障下的动作性能。

##### (1) 高阻接地时的故障识别

在线路 L3 靠近 B1 的 20%~100%处设置故障点进行高阻接地仿真,故障类型为 A 相接地,仿真结果如表 2 所示。

表 2 单相接地故障时  $K_{\max 0-2}$  的计算结果

Table 2 Results of  $K_{\max 0-2}$  for single-phase to ground faults

| 过渡电阻/ $\Omega$ | 动作值   |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
|                | 20%   | 50%   | 80%   | 100%  |
| 0              | 4.732 | 2.506 | 3.278 | 5.433 |
| 100            | 4.731 | 2.504 | 3.276 | 5.432 |
| 200            | 4.733 | 2.506 | 3.274 | 5.431 |
| 300            | 4.732 | 2.505 | 3.277 | 5.432 |

设置 L3 靠近 B1 的 100%处发生 A 相高阻接地故障,过渡电阻值为 300  $\Omega$ ,若极端情况下导致 L3 上两侧主保护、方向元件都拒动,IED5 的距离保护 I、II 段拒动,L4 上的 IED8 的距离 I 段误动,L5 上 IED9 的距离 III 段误动。此时 L3、L4 的故障判别结果如表 3 所示。

表 3 L3 100%处高阻接地时判断结果

Table 3 Judgment results of 100% when L3 high resistance grounding fault

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_l$ | $P_{II}$ | $P$  |
|----|----------|----------|-------|----------|------|
| L3 | 1.3      | 0.2      | 1     | 0.52     | 0.76 |
| L4 | 1.1      | 0.4      | 0.35  | 0.6      | 0.48 |

L3 综合故障概率满足  $0.7 < P < 0.8$ ,且其两侧主保护未动作;L4 故障概率小于 0.7;可准确判断出线路 L3 故障,不会因高阻接地造成的多保护拒动或误动而导致误判,若仅采用多信息融合的算法进行判断,则 L3、L4 都判断为正常,会导致误判。

##### (2) 非全相运行再故障的故障识别

设置 L3 两侧 A 相断路器 0.3s 时断开,0.5s 时发生 B 相接地短路。由仿真结果表明,0.3s 后  $K_{\max 0-2}$  的值出现短暂小幅度的抖动很快又恢复到 1.0 并保持稳定,此时保护不会误动;0.5s 发生 B 相接地故障,故障点设置在靠近 B1 侧 20%、50%、80%、100%处时的  $K_{\max 0-2}$  的值分别为:4.506、2.789、3.189、5.278。非全相运行时,零、负序方向元件会停止工作退出运行,因此非全相运行再故障时方向元件会拒动,以 L3 的 50%处发生故障为例进行故障判别,此时 L3 的故障判别结果如表 4 所示。

故障判断结果表明本算法可正确识别非全相

运行线路再故障。

表 4 非全相运行再故障时判断结果

Table 4 Judgment results for faults under open phase state

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_1$ | $P_{II}$ | $P$ |
|----|----------|----------|-------|----------|-----|
| L3 | 3.4      | 0.6      | 1     | 1        | 1   |

### (3) 转换性故障的故障识别

设置 0.5 s 时 L2 发生 A 相接地短路, 0.1 s 后故障转移至 L3 上即 L3 上靠近 B1 的 80% 处发生 B 相接地短路。仿真结果表明, 当线路外部发生故障时, L3 的  $K_{\max 0-2}$  值保持在 1.0 左右, 而当故障转换至 L3 后,  $K_{\max 0-2}$  值迅速上升, 最后稳定于 2.678。此时 L3 的故障判别结果见表 5。

表 5 转换性故障判断结果

Table 5 Judgment results for conversion faults

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_1$ | $P_{II}$ | $P$ |
|----|----------|----------|-------|----------|-----|
| L3 | 3.4      | 1.8      | 1     | 1        | 1   |

L3 故障概率大于 0.8, 即可判定此时 L3 发生故障。结果表明当线路外部发生故障时保护不会误判, 而当故障由外部转移至线路内部时算法能准确判别故障线路。

### (4) PT 二次回路断线的故障识别

设置 L3 靠近 B1 的 50% 处发生 A 相故障, 且故障发生时 L3 靠近 B1 侧的传统保护装置的 PT 二次回路发生 A 相断线。利用 PMU 测量并计算得到的  $K_{\max 0-2} = 2.506$ ; 此种情况下主保护正常工作, 靠近 B1 侧的距离保护退出运行, 即距离保护 I、II、III 段拒动, 情况严重时靠近 B1 侧的方向元件误动。此时故障判别结果见表 6。

表 6 PT 二次回路断线时判断结果

Table 6 Judgment results for PT secondary circuit open

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_1$ | $P_{II}$ | $P$ |
|----|----------|----------|-------|----------|-----|
| L3 | 2.3      | 1.8      | 1     | 1        | 1   |

L3 故障概率大于 0.8, 即可判定此时 L3 发生故障。结果表明 PT 二次回路断线时本文算法能正确识别故障元件。

## 3.2 IED 信息全部缺失

IED 内信息全部缺失, 且 PMU 测量及计算存在误差即对于故障线路  $P_1 = 0.95$ , 对于非故障线路  $P_1 = 0.35$ 。对于 1 个 IED 信息全部缺失的情况, 根据本算法原理即可看出可准确判断出故障线路。对于两个 IED 信息全部缺失可分以下两种情况分析。

(1) 故障线路一侧 IED 和非故障线路一侧 IED 内信息都缺失

设置 L3 中间处发生 A 相故障, IED5 和 IED4 的保护信息全部缺失, 此时 L3 及其相邻线路的故障判断结果如表 7 所示。

表 7 L3 及其相邻线路的判断结果

Table 7 Judgment results of L3 and its adjacent lines

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_1$ | $P_{II}$ | $P$   |
|----|----------|----------|-------|----------|-------|
| L1 | 0.2      | 1        | 0.35  | 0.41     | 0.38  |
| L2 | -0.3     | 1.8      | 0.35  | 0.45     | 0.4   |
| L3 | 2        | 1.4      | 0.95  | 1        | 0.975 |
| L4 | 0.2      | 0.2      | 0.35  | 0.16     | 0.26  |

由故障判断结果可知线路 L3 的故障概率大于 0.8, 线路 L1、L2、L4 的故障概率都小于 0.7, 据此可判断故障线路为 L3。

### (2) 故障线路两侧 IED 信息都缺失

设置 L3 中间处发生 A 相故障, IED5 和 IED6 的保护信息全部缺失, 此时 L3 及其相邻线路的故障判断结果如表 8 所示。

表 8 L3 及其相邻线路的判断结果

Table 8 Judgment results of L3 and its adjacent lines

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_1$ | $P_{II}$ | $P$  |
|----|----------|----------|-------|----------|------|
| L1 | 0.2      | 1        | 0.35  | 0.4      | 0.38 |
| L2 | 0.2      | 1.4      | 0.35  | 0.48     | 0.42 |
| L3 | 0        | 1.8      | 0.95  | 0.62     | 0.79 |
| L4 | 0.2      | 0.4      | 0.35  | 0.24     | 0.30 |

由于 L3 的故障概率  $P$  满足  $0.7 < P < 0.8$ , 且其两侧主保护未动作, 而 L1、L2、L4 的故障概率都小于 0.7, 因此可判定故障线路为 L3。

## 3.3 IED 信息全部错误

IED 内信息全部错误, PMU 测量及计算存在误差, 即对于故障线路  $P_1 = 0.95$ , 非故障线路  $P_1 = 0.35$ 。

### (1) 故障线路一侧 IED 内信息全部错误

设置 L3 靠近 B1 的出口处发生 A 相故障, IED5 内信息全部错误, 此种情况下 IED5 的五种保护动作值如下所示: 0(拒动), 0(拒动), 0(拒动), 0(拒动), -1(误动)。此时 L3 及其相邻线路的故障判断结果见表 9。

表 9 L3 及其相邻线路的判断结果

Table 9 Judgment results of L3 and its adjacent lines

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_1$ | $P_{II}$ | $P$  |
|----|----------|----------|-------|----------|------|
| L1 | 0.5      | 1.6      | 0.35  | 0.72     | 0.54 |
| L2 | 0.5      | 2        | 0.35  | 0.75     | 0.55 |
| L3 | 1.1      | 1.8      | 0.95  | 1        | 0.98 |
| L4 | 0.2      | 0        | 0.35  | 0.08     | 0.22 |

L3 的故障概率  $P > 0.8$ ; L1、L2、L4 的故障概率都小于 0.7; 据此可判断故障线路为 L3。此种情况下若仅采用多信息融合的算法进行判断, 会将正常线路误判为故障。

#### (2) 非故障线路一侧 IED 内信息全部错误

设置 L3 靠近 B1 的出口处发生 A 相故障, L2 上的 IED4 内信息全部错误, 此种情况下 IED4 的 5 种保护动作值如下: 1(误动), 1(误动), 0(拒动), 0(拒动), -1(误动)。此时 L3 及其相邻线路的故障判断结果见表 10。

表 10 L3 及其相邻线路的判断结果

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_I$ | $P_{II}$ | $P$  |
|----|----------|----------|-------|----------|------|
| L1 | 0.5      | 0.6      | 0.35  | 0.38     | 0.37 |
| L2 | 0.6      | 1.6      | 0.35  | 0.67     | 0.51 |
| L3 | 3.4      | 1.2      | 0.95  | 1        | 0.98 |
| L4 | 0.2      | 0.6      | 0.35  | 0.32     | 0.34 |

L3 的故障概率大于 0.8, 可直接判定线路 L3 故障; 线路 L1、L2、L4 的故障概率  $P$  都小于 0.7, 可判定为非故障线路。

#### (3) 故障线路一侧 IED 和非故障线路一侧 IED 信息全部错误

设置 L3 靠近 B1 的出口处发生 A 相故障, L3 上的 IED5 信息全部错误, 此时五种保护动作值如下: 0(拒动), 0(拒动), 0(拒动), 0(拒动), -1(误动), L2 上的 IED4 信息全部错误, 其 5 种保护动作值如下所示: 1(误动), 1(误动), 0(拒动), 0(拒动), -1(误动)。此时 L3 及其相邻线路的故障判别结果见表 11。

表 11 L3 及其相邻线路的判断结果

| 线路 | $L_{AF}$ | $A_{AF}$ | $P_I$ | $P_{II}$ | $P$  |
|----|----------|----------|-------|----------|------|
| L1 | 0.5      | 1        | 0.35  | 0.52     | 0.44 |
| L2 | 0.6      | 2        | 0.35  | 0.78     | 0.56 |
| L3 | 1.1      | 1.2      | 0.95  | 0.79     | 0.87 |
| L4 | 0.2      | 0        | 0.35  | 0.08     | 0.22 |

L3 的故障概率大于 0.8, 其余线路的故障概率小于 0.7, 由此可判定 L3 为故障线路。此种情况下若仅采用多信息融合的算法进行判断, 会将正常线路误判为故障。

## 4 结论

本文提出一种将故障电压比较和多信息融合相结合判断故障元件的广域后备保护算法, 分别利用

PMU 数据和保护动作信息求取各自的故障概率, 再通过加权综合得到元件的综合故障概率, 最后根据判据识别故障元件。该算法引入了故障电压比较的方法, 提高了保护在高阻接地、非全相运行再故障等复杂工况下的动作性能, 同时充分利用了传统保护信息, 提高了保护的容错性。在 IEEE 4 机 8 节点系统上的多组案例试验结果表明, 该算法在高阻接地、非全相运行再故障、故障转换等工况下具有良好的动作性能, 在单个 IED 和两个 IED 信息全部缺失或错误时, 仍可准确判别出故障线路, 容错性较高。

## 参考文献

- [1] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 32-38.  
XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38.
- [2] 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): 7-12, 30.  
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12, 30.
- [3] 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.  
WU Hao, LI Qunzhan, XIA Yankun, et al. Fault identification for wide area backup protection based on probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 43-49.
- [4] 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.
- [5] 金恩淑, 汪有成, 陈喜峰. 基于分区域广域继电保护系统的故障识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 68-73.  
JIN Enshu, WANG Youcheng, CHEN Xifeng. Fault identification algorithm based on zone-division wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 68-73.
- [6] 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.
- [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): 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.
- [8] 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): 77-81.  
YANG Zengli, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 77-81.
- [9] 童晓阳, 王睿, 孙明蔚. 基于保护元件与 PMU 数据多源的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 11-16.  
TONG Xiaoyang, WANG Rui, SUN Mingwei. Wide-area backup protection algorithm based on multi-source data of protection elements and phasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 11-16.
- [10] 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.
- [11] 汪华, 张哲, 尹项根, 等. 基于故障电压分布的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 48-52.  
WANG Hua, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A wide area back-up protection algorithm based on fault voltage distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 48-52.
- [12] 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.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [13] TAN J C, CROSSLEY P A, MCLAREN P G, et al. Application of a wide area backup protection expert system to prevent cascading outages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 375-380.
- [14] 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.
- [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: 2015-02-05; 修回日期: 2015-05-18

作者简介:

李 珊(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为广域继电保护; E-mail: 15856985950@163.com

何怡刚(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂电网状态监测与健康诊断, 自动测试与诊断装备, 智能电网, 智能与实时信息处理等。

(编辑 魏小丽)