

# 基于分区域广域继电保护系统的故障识别算法

金恩淑<sup>1</sup>, 汪有成<sup>1</sup>, 陈喜峰<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 河南省电力公司许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 随着电网的日趋扩大化与复杂化, 基于广域多点信息的广域继电保护系统在向工程实际化转变的过程中越来越受到通信水平的制约。基于广域继电保护系统有限性的思想, 对复杂结构的电网进行有序的区域划分, 并将故障的识别与保护的动作在各个区域内完成, 减小了对通信系统的压力。针对已划分的保护区域, 提出了基于故障方向信息比较原理的区域故障识别算法, 利用故障时方向元件判别的故障方向, 经简单的运算, 判断故障的位置。以 IEEE10 机 39 节点系统为例, 对保护区域进行了划分, 并对其中一个保护区域内的故障情况进行了仿真验证, 其结果验证了故障识别算法的可行性。

**关键词:** 广域继电保护; 通信量; 区域划分; 故障识别

## Fault identification algorithm based on zone-division wide area protection system

JIN En-shu<sup>1</sup>, WANG You-cheng<sup>1</sup>, CHEN Xi-feng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Xuchang Power Supply Company, Henan Electric Power Company, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** As the grid becomes more magnified and complicated, wide area relaying protection system based on wide area multi-point information is bound increasingly by the communication level in the process of conversion to engineering practice. Based on the thinking of limitedness of wide area relaying protection system, the grid with complex structure is divided orderly, and fault identification and protection action are executed in each region, reducing the pressure of the communication system. By protected area, a regional fault identification algorithm based on fault direction information comparison is proposed. When a fault occurred, it can make use of the fault direction information to judge fault position. Protected area is divided in IEEE10-machine 39-bus system, and taking one fault protected area as the example for simulation, the results show the feasibility of the fault identification algorithm.

**Key words:** wide area relaying protection; communication volume; region division; fault identification

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0068-06

## 0 引言

继电保护作为电网安全的重要防线, 其动作的可靠性和速动性直接影响着电网的安全运行。传统的高压电网保护系统主要以原理简单的纵联保护作为线路或母线的主保护, 但其并不具备后备保护功能, 而通过离线整定与动作时间配合的后备保护在配置方式上也随着电网结构的日趋扩大化、复杂化, 暴露出越来越多的缺陷, 保护误动、拒动的可能性大大增加, 给继电保护带来了巨大的挑战<sup>[1-3]</sup>。

随着广域测量技术 (Wide Area Measurement System, WAMS) 和通信技术的发展, 基于电网多点信息的广域继电保护系统为解决传统保护配置方式存在的不足提供了新的思路<sup>[4]</sup>。国际大电网会议 (CIGRE) 对广域保护分两方面进行了描述: 一是

基于广域信息的电网安全稳定控制研究; 另一方面是利用广域信息改进和提高传统继电保护的性能。针对于后者, 国内外学者进行了大量的研究, 并取得了丰硕的成果, 为广域继电保护的发展奠定了理论基础<sup>[5-7]</sup>。

目前, 对广域继电保护系统的研究主要集中在利用广域信息来提高后备保护的性, 或将电力系统主保护进行拓展, 把如纵联保护、距离保护等传统的主保护算法延伸到广域后备保护系统中, 并利用广域继电保护系统冗余信息来提高后备保护动作的可靠性<sup>[8-10]</sup>。为了加强电网“第一道防线”的性能, 更有效地实现对广域信息的利用, 近几年, 有限广域继电保护系统的概念被不断提出, 并得到了很好的发展, 其从宏观上对广域继电保护系统的保护区域进行了划分, 不仅降低了大系统内通信传输

的压力, 同时也促进了广域继电保护从理性探索向工程应用性转化<sup>[11-12]</sup>。

本文从降低网络通信量的角度出发, 将复杂的大电网进行了有序的划分, 使对数据的采集、处理以及故障的判别、保护的動作等均在該划分的区域内完成, 降低了因盲目的信息交换给通信系统造成的压力。针对区域内发生的故障, 提出了一种基于故障方向信息比较原理的区域故障识别算法, 该算法通信量小, 原理简单, 既能够用于线路或母线快速動作的主保护, 同时在智能电子设备(IED)故障、保护设备通信中断等情况下, 还能兼顾后备保护功能。IEEE10 机 39 节点系统仿真结果验证了本文提出的区域划分原则及区域故障识别算法的有效性。

## 1 广域继电保护系统的结构

广域继电保护系统通常采用集中式和分布式两种结构形式<sup>[13]</sup>。集中式结构形式主要由控制决策中心和分散在各条线路的 IED 组成, IED 负责采集各安装点的电气信息, 通过网络上传给控制中心, 由控制中心对数据进行分析处理, 判断出故障位置, 并发送控制命令。分布式结构形式则将数据的采集、分析以及故障判别后的决策控制均交由 IED 来完成, 每个 IED 是一个相对独立的个体, 且可以在特定的区域内共享其他 IED 的信息。本文根据区域划分原则的特点和故障识别算法的需要, 采用的是将两种结构形式进行简单的结合, 即分布式集中决策的结构形式, 其结构如图 1 所示。

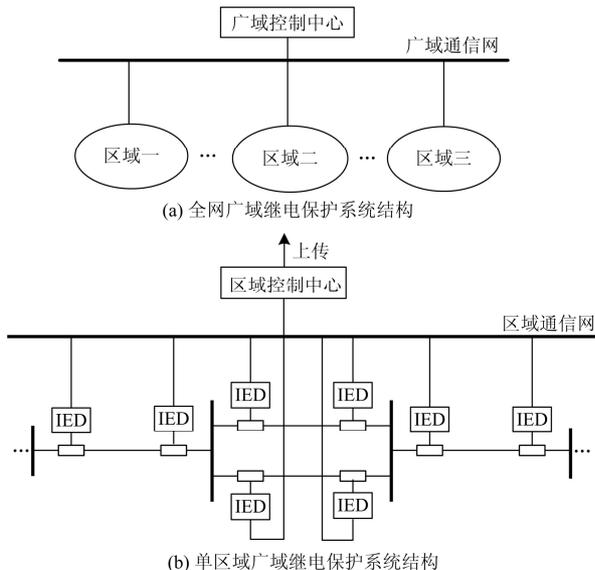


图 1 分布式集中决策广域继电保护系统结构

Fig. 1 Wide-area relaying protection system structure with distributed centralized decision

图1(a)为全网广域继电保护系统结构, 其将复杂的大电网划分成若干个小的区域, IED 将采集的故障信息并处理后的故障方向信息上传给区域控制中心, 控制中心利用故障方向信息, 结合故障识别算法, 确定故障位置, 并向各个 IED 发出動作信号, 同时将处理的结果上传给广域控制中心, 用于实现对全网的优化控制, 如图 1(b)。由于本文采用的是分布式集中决策的广域继电保护系统结构, 既实现了分布式结构形式中电气信息就地处理的优点, 同时又保留了集中式结构形式全局最优控制的特点, 奠定了电网安全稳定的运行结构基础。

## 2 广域继电保护系统的区域划分方法

广域继电保护系统的分区是近年来广域继电保护领域研究的热点<sup>[14]</sup>, 很多学者做了大量的研究。文献[15]在广域继电保护有限性概念的基础上给出了其具体的分区原则和方法, 并运用图论的知识将其用矩阵的形式表示出来。本文在此基础上, 结合自身故障识别算法的特点, 采用了一种新的区域划分方法。

### 2.1 中心站的选取

中心站为区域的控制中心 (Region Control Center, RCC) 所在的位置, 分散安装在各条线路的 IED 将采集并处理后的故障信息上传给 RCC, 由 RCC 对故障进行识别处理, 并发送决策命令, 同时将处理的结果上传给广域控制中心 (Wide-area Control Center, WCC) 进行广域集中控制。

中心站的选取要考虑到诸多因素, 如其与各个节点间的关系、所在位置的地理环境及通信环境、气候类型等。因此中心站的选取一般遵循以下原则:

(1) 良好的外部环境, 要有利于工作人员对其进行维护和检修; (2) 中心站应尽量为重要的变电站或控制中心, 并且其要与区域内其他变电站或输电线路有紧密的电气联系; (3) 中心站之间尽量避免过于靠近, 防止区域之间的过度互交而造成信息的冗余及资源浪费; (4) 可以有相邻变电站或发电厂做其备用中心站。

### 2.2 保护区域划分方法

保护区域的划分要尽量考虑实际电网的情况, 原则上一般以中心站为中心, 保护范围能够延续到下一条线路的末端, 这样能够满足传统继电保护对近后备及远后备保护的要求, 可以很好地实现与传统保护的配合。但在实际电网区域划分时, 保护范围的半径可以有一定的裕度, 并且要将不符合分区原则的一些边界节点包含在分区内, 尽量做到可靠性与经济性相统一。

在区域互交的问题上, 总结现有的区域互交方法, 并结合自身故障识别算法特点, 采用了如图 2 所示的区域互交方法, 其中, L2 为互交区域。若 L2 故障时, 区域 1 及区域 2 的中心站均向保护 3 及保护 4 发动作信号, 切除故障线路; 对保护 3(断路器 3)拒动的情况将在下文给出详细的论述。

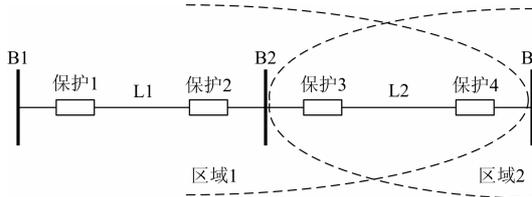


图 2 区域互交方法示意图  
Fig. 2 Region interactive method diagram

为了更加清晰地阐释广域继电保护系统中心站的选取和区域划分方法, 以图 3 所示的 11 节点系统为例进行具体分析。图中 B6 母线及 B9 母线为中心站, 以 B6 母线为中心, 保护区应延伸到下一条线路末端, 形成保护区 1。同理, 中心站 2 也按相同的方法形成保护区 2, 在区域 2 中, B3 母线为其边界节点, 因此应包含在该区内。B7 母线及 B8 母线相连的公共线路为两区域的互交区域。

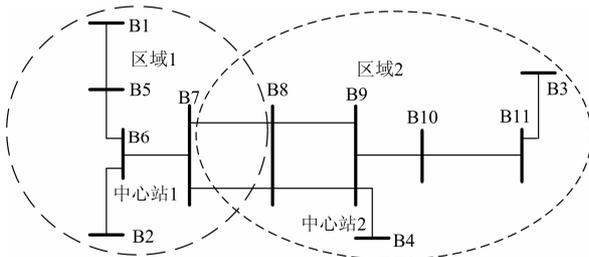


图 3 区域划分示意图  
Fig. 3 Division area diagram

利用上述的区域划分方法, 不仅可以很好地反映故障情况, 而且方法简单、方便, 减少了不必要的冗余信息。实际电网是在不断发展和扩大的, 如将保护区划分应用到实际电网中, 还需要考虑如调度、通信条件等众多的限制情况。因此保护区的划分要不断地满足实际系统的规划设计, 才能更具有实际的应用价值。

### 3 基于故障方向信息的区域故障识别算法

#### 3.1 区域保护关联矩阵的形成

考虑到广域继电保护系统中的每一个保护装置既要能够感知其所在线路的故障, 同时又可以反映其背后母线的故障, 因此有必要对各个保护与线路

及母线的关联情况进行阐述。以图 4 所示的区域电网结构为例, 图中数字 1, 2, ..., 8 为 IED 的编号。需要指出, 这里的 IED 负责采集安装点处的电气信息, 并对数据进行必要的运算和处理, 且 IED 所在的位置亦为保护及方向元件所在的位置。

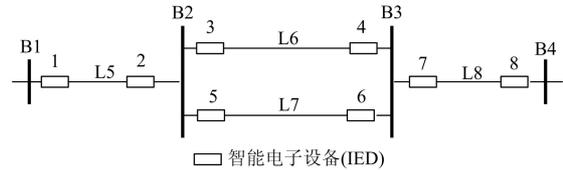


图 4 区域电网结构  
Fig. 4 Region grid structure

由图 4 可知, 每个 IED 都分别与其所在线路及背后母线相连, 而与其他线路及母线并无连接。规定 IED 与线路或母线直接相连用“1”表示, 不相连用“0”表示, 则 IED-母线/线路关联矩阵  $A$  可表示为

$$A = \begin{matrix} & \text{IED1} \sim \text{IED8} & \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} \text{B1} \\ \text{B2} \\ \text{B3} \\ \text{B4} \\ \text{L5} \\ \text{L6} \\ \text{L7} \\ \text{L8} \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

#### 3.2 故障识别

本文利用故障方向的信息对故障进行识别, 与其他诸如故障距离信息、故障电流电压等故障信息相比, 故障方向具有信息传输信息量小、便于利用等优点。方向元件采用基于负序、零序及正序故障分量的方向元件, 其特点为故障电流均由故障点流向系统, 其中负序、零序方向元件可以反映各种不对称故障, 且不受过渡电阻及系统振荡影响; 而基于正序故障分量的方向元件可以有效地反映对称故障, 且不受负荷变化的影响, 考虑到其可能在系统振荡时存在误动的情况, 因此在每个 IED 中均装设有正序故障分量方向元件振荡闭锁元件, 用于在系统振荡时对正序故障分量方向元件进行有效闭锁。若规定电流的正方向为由母线流向线路, 则每个 IED 输出的值为

$$D(i) = \begin{cases} 1, & \text{方向元件 } i \text{ 判断故障方向为正} \\ -1, & \text{方向元件 } i \text{ 判断故障方向为负} \\ 0, & \text{方向元件 } i \text{ 无输出} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 当图 3 所示的系统中某处发生故

障时, 各个 IED 输出的故障方向信息可由方向矩阵  $D$  表示。

$$D=(D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4 \ D_5 \ D_6 \ D_7 \ D_8)^T \quad (3)$$

设故障判别矩阵  $F$  为

$$F = A \cdot D \quad (4)$$

且规定矩阵  $F$  第  $1 \sim m$  行所对应母线  $B_1 \sim B_m$ , 第  $m+1 \sim n$  行对应线路  $L_{m+1} \sim L_n$ 。

### 3.2.1 母线故障判别原则

由式(2)可知, 母线故障时, 与母线相连的 IED 判断故障方向为正, 且输出“1”, 因此得出故障母线故障时的判别原则为

$$F_{out}(i) = B_{sum} \quad (5)$$

其中:  $F_{out}(i)$  为故障判别矩阵  $F$  第  $i$  行对应的元素, 亦为母线  $i$  故障时的判别结果, 且  $i \in [1, m]$ ;  $B_{sum}$  为母线  $i$  进出线条数之和。

### 3.2.2 线路故障判别原则

由式(2)可知, 线路故障时, 线路两端的 IED 判断故障方向为负, 且输出“-1”, 因此得出线路故障时的判别原则为

$$F_{out}(i) = -2 \quad (6)$$

其中,  $F_{out}(i)$  为线路  $i$  故障时的判别结果, 且  $i \in [m+1, n]$ 。

## 3.3 特殊情况处理

广域继电保护系统的故障识别是由通信系统、智能电子设备、方向元件等多个环节统一配合协调来实现的。很多情况下都认为通信及 IED 是正常工作的, 但在实际现场运行时, 难免会存在因其中的某一环节的不正常工作导致故障误判的情况, 因此有必要对一些特殊的情况加以考虑。

### (1) IED 故障

IED 故障分两种情况, 一种为 IED 可以完成算法, 且正确接收到动作指令, 但未将动作信号下发给所对应的断路器; 另一种为 IED 本身无法完成算法, 导致其无法向区域内发送故障信息。针对前一种情况, 可以将算法进行适当调整, 令相邻的 IED 向其所对应的断路器发送动作信号; 针对后一种情况, 可能由于直流电源故障所致, 在此种情况下可以加入电流 I、II 或距离 I、II 等故障信息来区别故障为线路故障或母线故障, 并由区域控制中心向相应的保护发出跳闸信号, 切除故障。若经特殊处理后区域控制中心仍无法判断出故障, 则应退出该保护算法, 由系统配备的其他保护算法来切除故障。

### (2) 某断路器拒动

在传统继电保护系统中, 对断路器拒动都是通过保护阈值整定和动作延时配合来实现其后备保护功能。在广域继电保护系统中, 由于信息的交互和共享已经变得可能, 因此在某断路器拒动时, IED 可以根据其返回的拒动信息向其相邻的其他 IED 或断路器发送动作信号, 实现在其拒动时的后备保护功能。

## 4 算例分析

### 4.1 保护区域的划分及中心站选取

本文以 IEEE10 机 39 节点电网模型为例, 对文中提出的区域划分原则及中心站的选取进行仿真验证, 根据区域划分的原则, 将该系统分成六个区域, 中心站分别位于母线 B16、B26、B2、B6、B13、B22 所在的位置且站与站之间相对分散, 如图 5 所示。

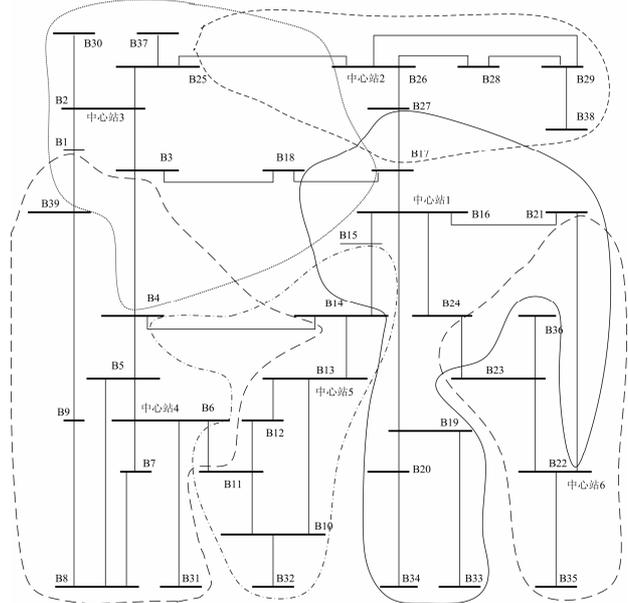


图 5 IEEE 10 机 39 节点系统保护分区

Fig. 5 Division area of IEEE 10-machine 39-bus system

在区域划分的过程中原则上是坚持以中心站为中心, 区域半径延伸到下一条线路末端, 但在划分过程中要考虑实际的情况, 其区域半径可以有一定的裕度, 如以中心站 1 为中心的区域划分过程中, 母线 B34 原则上不在其区域范围内, 但考虑到其为边界母线, 因此也将 B34 划分在区域 1 内。

### 4.2 故障识别

根据图 5 所示的系统, 将区域 5 作为故障判别算法的仿真系统, 母线及线路经重新排序后如图 6 所示, 图中虚线表示的母线为区域范围外的母线, 线路 L9、L12、L13 为区域互交区域。

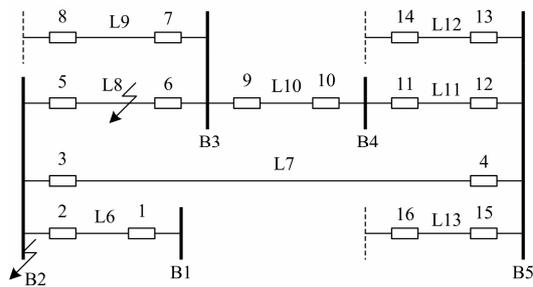


图 6 区域仿真系统

Fig. 6 Region simulation system

根据式(1)可得图 6 的 IED-线路/母线的关联矩阵  $A$  为

$$A = \begin{matrix} & \overbrace{\text{IED1} \sim \text{IED16}} & & \\ \begin{matrix} \text{IED1} \\ \text{IED2} \\ \text{IED3} \\ \text{IED4} \\ \text{IED5} \\ \text{IED6} \\ \text{IED7} \\ \text{IED8} \\ \text{IED9} \\ \text{IED10} \\ \text{IED11} \\ \text{IED12} \\ \text{IED13} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} & \begin{matrix} \text{B1} \\ \text{B2} \\ \text{B3} \\ \text{B4} \\ \text{B5} \\ \text{L6} \\ \text{L7} \\ \text{L8} \\ \text{L9} \\ \text{L10} \\ \text{L11} \\ \text{L12} \\ \text{L13} \end{matrix} \end{matrix} \quad (7)$$

情况 1: 线路 L8 故障, 若系统内所有的信息均能正确获得, 由式(2)~式(4)可得到该系统的故障方向矩阵  $D$  及故障判别矩阵  $F$  分别为

$$D = \overbrace{(-1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1)^T}^{\text{IED1} \sim \text{IED16}} \quad (8)$$

$$F = \overbrace{(-1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T}^{\text{B1} \sim \text{B5}, \text{L6} \sim \text{L13}} \quad (9)$$

根据式(9)可知,  $F_{\text{out}}(\text{L8}) = -2$ , 满足式(6)线路故障的判别条件, 判断线路 L8 故障。

情况 2: 母线 B2 故障, 若系统内所有的信息均能正确获得, 则

$$D = \overbrace{(-1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1)^T}^{\text{IED1} \sim \text{IED16}} \quad (10)$$

$$F = \overbrace{(-1 \ 3 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T}^{\text{B1} \sim \text{B5}, \text{L6} \sim \text{L13}} \quad (11)$$

由式(11)可知,  $F_{\text{out}}(\text{B2}) = 3$ , 满足式(5)母线故障的判别条件, 判断为母线 B2 故障。

## 5 结论

针对广域继电保护系统中存在着通信量大、信

息冗余等问题, 本文在广域继电保护系统有限性的思想上, 将复杂的大电网系统进行有序的分區, 有利于广域继电保护系统由理论研究向工程实际转化。针对划分的区域, 提出了基于区域内故障方向信息的广域继电保护故障识别算法, 其具有原理简单、通信量小等优点, 而且在 IED 故障情况下仍能有效地判断出故障的位置。以 IEEE10 机 39 节点系统为例, 对区域划分方法进行了实际阐述, 并选取其中一个保护区对故障识别算法进行了仿真, 进一步验证了该算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 屈靖, 郭剑波. “九五”期间我国电网事故统计分析[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 60-62.  
QU Jing, GUO Jian-bo. Statistic and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 60-62.
- [2] 高翔, 庄坎沁, 孙勇. 西电电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 25-31.  
GAO Xiang, ZHUANG Kan-qin, SUN Yong. Lessons and edlightenment from blackout occurred in UCTR grid on November 4, 2006[J]. Power System Techology, 2007, 31(1): 25-31.
- [3] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11.10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.  
LIN Wei-fang, SUN Hua-dong, TANG Yong, et al. Analaysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on Novemrber 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [4] NOVOSEL D, BARTOK G, HENNEBERG G et al. IEEE PSRC report on performance of relaying during wide-area stressed conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 3-16.
- [5] 丁伟, 何本腾, 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 Ben-teng, WANG Hui-fang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.
- [6] 刘春生, 周步祥, 林楠, 等. 广域保护研究现状及发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 147-150.  
LIU Chun-sheng, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-150.

- [7] 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): 179-186.  
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [8] 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 Zhen-cun, ZHAO Jian-guo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.
- [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.  
ZHANG Bao-hui, ZHOU Liang-cai, WANG Cheng-gen, et al. Wide area backup protection algorithm with fault-tolerance performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 66-71.
- [10] 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, 27(7): 274-283.  
HE Zhi-qin, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. A novel wide area backup protection algorithm based on fault voltage comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 274-283.
- [11] 尹项根, 汪旸, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.  
YIN Xiang-gen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [12] 汪旸, 尹项根, 张哲, 等. 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 Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [13] 徐天齐, 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 Tian-qi, YIN Xiang-gen, YOU Da-hai, et al. Analysis on functionality and feasible structure of wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 93-97.
- [14] 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 Zhen-xing, YIN Xiang-gen, 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.
- [15] 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): 48-52.  
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Zone division and implementation on limited wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 48-52.

收稿日期: 2013-08-05; 修回日期: 2013-09-18

作者简介:

金恩淑(1972-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: jes222@yahoo.cn

汪有成(1988-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事广域继电保护的研究。E-mail: youcheng1988@sina.cn