

具有高信息冗余的广域后备保护系统

田聪聪, 文明浩

(湖北省电力安全与高效重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

A Wide-Area Backup Protection System With High Information Redundancy

TIAN Congcong, WEN Minghao

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Lab (Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: A centralized wide-area backup protection system for substation, in which the information redundancy is implemented based on direction and distance information, is proposed. By means of incidence matrix the fault tolerance of information is implemented to judge the fault. The architecture and working principle of wide-area backup protection system are presented, and the processing method of redundant information is researched, i.e., according to real-time topology of power network the formation strategy for draft node-branch incidence matrix, direction incidence matrix, direction incidence matrix and composite incidence matrix is drafted. Simulations for different types of faults are performed, and the strategy of the proposed wide-area backup protection system to cope with special circumstances is put forward.

KEY WORDS: wide-area backup protection; topological structure; direction information; distance information; information redundancy; incidence matrix

摘要: 提出一种基于方向信息和距离信息实现信息冗余的变电站集中式广域后备保护系统, 借助关联矩阵实现信息的容错, 完成对故障的判断。介绍了广域后备保护系统的结构与工作原理, 讨论了冗余信息的处理方法, 根据实时电网的拓扑结构, 制定了节点-支路关联矩阵、方向关联矩阵、距离关联矩阵及综合关联矩阵的形成策略。对不同的故障情况进行了仿真分析, 并提出了特殊情况下保护的应对策略。

关键词: 广域后备保护; 拓扑结构; 方向信息; 距离信息; 信息冗余; 关联矩阵

0 引言

互联大电网的发展使现在电网结构日趋复杂,

电网的运行方式复杂多变, 离线的定值计算已无法使传统保护间的配合达到最佳, 保护拒动、误动的可能性大大增加^[1-4], 这就要求从根本上改善传统后备保护原理的不足。

近年来提出的广域后备保护系统, 从电力系统中所有电气量是互相联系的一个整体的角度出发, 依据电网中能反映电网状态的多点信息综合判断电网故障情况, 能有效改善传统后备保护动作配合不足、动作延时长及故障切除范围大的缺点^[5-13]。广域电流差动保护能明显缩短后备保护系统的动作延时^[10-13], 但电流差动保护对 GPS 的同步对时要求高, 尤其多站间信息的同步。基于保护动作信息的广域后备保护, 因逻辑信息指示明确, 且逻辑量的传送通信量小, 因而受到广泛研究。基于距离动作信息的代理(Agent)系统通过一定范围内的 Agent 交换距离动作信息实现故障判断, 使得保护系统具有很好的自检和纠错能力^[14]。基于方向比较原理的广域后备保护可用于分布式结构^[15]和集中式结构^[16-18], 通过一定范围内的 IED 间交换方向信息或利用方向关联矩阵进行故障判断, 并有网络仿真软件(NS2)的仿真和动模试验验证了广域后备保护系统的可行性^[19-20]。

由于集中式保护需要同时搜集广域范围内的多点信息, 这就对信息的可靠性和完整性提出了更高的要求。尽管现有通信技术已经相当完善, 但通信系统仍面临着随机的风险性, 由于保护装置本身的原因或通道及干扰的原因, 信息缺失是广域后备保护系统无法忽视的问题, 因此, 研究广域保护系统中信息的冗余越发重要。

在以上研究的基础上, 鉴于数字化变电站技术日臻完善, 本文在变电站集中式保护基础上, 提出

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837002, 9CB219900)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837002, 9CB219900).

一种具有多级信息冗余的广域后备保护算法。由网络的拓扑结构实时形成保护系统的节点-支路关联矩阵,在系统故障时,借助系统保护范围内冗余的方向信息及距离信息形成方向关联矩阵及距离关联矩阵,由此形成的综合关联矩阵能很好地提高保护故障判断的可靠性与准确性。算法需要的信息量少,原理简单。仿真分析表明,该算法有很高的信息冗余来适应信息缺失的情况,极大地提高了广域后备保护系统的性能。

1 广域后备保护系统结构

本文提出的广域后备保护系统在结构上采用变电站集中式,其保护系统装设于变电站,通过搜集所在变电站及相邻变电站保护装置内广域保护系统功能模块的信息,准确判断故障元件,见图 1。

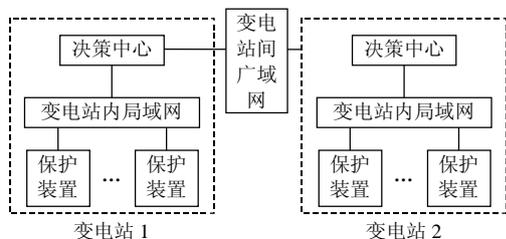


图 1 广域后备保护系统结构

Fig. 1 Structure of wide-area backup protection system

广域后备保护系统的保护范围为变电站内所有母线和出线。为提高信息的冗余以准确判断故障元件,被保护系统范围内的每套保护装置内均装设一个广域保护系统功能模块,判断保护安装处的故障方向,采集断路器实时状态信息。线路保护装置中的广域保护系统功能模块还能获取本保护装置内距离元件 I、II 段的判断信息。

在系统故障时,广域后备保护系统基于本变电站及相邻变电站的故障方向信息及距离信息实现对故障元件的判断,若根据实时故障信息判断出故障存在,立即向故障元件的断路器发跳闸命令,因广域后备保护系统需要借助通信网络传输故障信息,其动作延时一般长于主保护。

考虑到集中式结构对广域保护决策系统有较高的依赖性,为了提高后备保护系统的可靠性,在广域后备保护系统中,保留不依赖于通信网络的传统的后备保护,整定时不需要严格的配合,这样可以防止广域后备保护系统出现缺陷而让全站失去后备保护。对于重要的变电站,可考虑站内广域后备保护系统双重化配置。

2 故障定位原理

2.1 冗余方向信息的处理

由于该后备保护系统利用的是传统保护装置内广域保护系统功能模块内的信息,线路、母线及变压器保护装置内的方向元件是互相独立的,如在图 2 中,线路 L_1 的方向元件为线路 L_1 保护装置内方向元件 1 和 2,母线 B_2 的方向元件为母线 B_2 保护装置内方向元件 2、3 及 5,断路器 2 处对应 2 个独立的方向元件,又由于母线 B_2 保护装置内方向元件 2 和线路 L_1 保护装置内方向元件 2 的电压电流来自同一位置处但不同的电压互感器和电流互感器(暂不考虑保护的双重化配置问题),两者对故障的感受是相同的,故可以断路器处 2 个独立的方向元件信息(1—正方向故障,-1—反方向故障,0—其他)综合判断该断路器处的方向信息。

当 2 个方向元件的判断信息相同时,断路器处的方向信息即为 2 方向元件的判断信息;当其中一个方向元件的判断信息缺失时,断路器处的方向信息以另一个方向元件的判断信息为准;当 2 个方向元件的判断信息冲突时,认为该断路器处的方向信息错误,判断为 0。

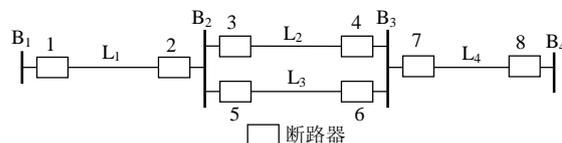


图 2 冗余方向信息处理示例

Fig. 2 Schematic diagram of redundancy direction information processing

文中规定方向元件的方向以指向被保护元件为正。为增强方向元件判断的可靠性,方向元件可同时采用多种原理的算法,各种算法的综合判断结果作为方向元件的判断结果。假设方向元件有零序方向元件、负序方向元件和工频变化量方向元件,广域后备保护系统根据各种方向元件的综合判断结果,最终确定方向元件的判断结果。

2.2 冗余距离信息的处理

线路两端保护装置内的距离 I 段、II 段信息具有互补性,在某种意义上,同一保护装置内的距离信息也具有互补性,为了充分利用信息的冗余性,将同一保护装置内的距离 I、II 信息值(1—判断故障,0—判断无故障)之和作为保护对应断路器处的距离信息值。如在图 2 中,线路 L_1 的保护 2 出口故障,断路器 1 处的距离信息值为 1,断路器 2 处的

距离信息值为 2。

线路两端距离信息的冗余处理将在算法部分考虑。采用线路保护装置已有的距离 I、II 段判断信息, 信息来源简单可靠, 且广域后备保护系统利用该信息时, 通信系统只需传输距离元件判断的逻辑信号, 通信负担轻, 有利于提高广域后备保护系统的性能。

3 故障定位算法

3.1 节点-支路关联矩阵

广域后备保护系统可以根据断路器状态信息实时修改其存储的电网拓扑结构信息。根据网络拓朴理论, 对于任意的拓朴网络, 都可以用节点-支路关联矩阵来描述其拓朴结构, 对于一个电力系统主接线图, 也可把它抽象为一个拓朴图来描述^[21-22], 如图 2 所示的主接线, 把一次设备作为拓朴图的节点, 开关元件(即断路器)作为拓朴图的支路, 节点-支路关联矩阵 $A=[a_{ij}]$ 每个元素表示意义如下: a_{ij} 表示节点 i 与支路 j 的关联值(联通性), 当节点 i 与支路 j 相联时 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。

图 2 中所有断路器均处于闭合时状态时, 变电站 2 内节点-支路关联矩阵(称为原始节点-支路关联矩阵)为

$$A_0 = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

该关联矩阵为 $m \times n$ 维矩阵, 其中 m 为广域后备保护系统保护范围内的一次设备数目, n 为广域后备保护系统保护范围内的断路器数目。

3.2 方向及距离关联矩阵

系统发生故障后, 广域后备保护系统获取到本站和相邻站的方向元件信息与距离元件信息后, 先对这些初始的信息进行冗余处理, 经冗余处理后的方向信息和距离信息为节点-支路关联矩阵进行赋值, 形成方向关联矩阵及距离关联矩阵。

广域后备保护系统形成方向关联矩阵时, 将断路器处相对于一次设备的方向信息值赋给节点-支路关联矩阵中该一次设备对应行中相应的位置, 其余的位置赋值为 0。如图 2 所示, 出线 L_1 故障时, 变电站 2 内广域后备保护系统形成的方向关联矩阵为

$$A_f = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

同理, 在形成距离关联矩阵时, 与线路相联的断路器处距离信息值赋给节点-支路关联矩阵中该线路对应行中相应的位置, 其余位置均赋值为 0。如图 2 示例图中出线 L_1 保护 2 出口故障, 变电站 2 内广域后备保护系统形成的距离关联矩阵为

$$A_d = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

3.3 故障定位判据

方向关联矩阵与距离关联矩阵形成以后, 为了利用方向信息和距离信息的冗余来提高广域后备保护系统的容错性与可靠性, 在故障判断时, 由方向关联矩阵 A_f 与距离关联矩阵 A_d 对应元素相加形成综合关联矩阵, 使得与一次设备关联的断路器对应的故障信息值为方向信息值和距离信息值之和。仍以图 2 为例, 出线 L_1 保护 2 出口故障时, 变电站 2 内广域后备保护系统形成的综合关联矩阵为

$$A = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

广域后备保护系统在形成综合关联矩阵后, 依据综合关联矩阵中的信息判断系统保护范围内一次设备的故障情况。一次设备为故障元件的判据为

$$F_{\text{out}}(i) \geq F_{\text{set}}(i) \quad (5)$$

式中 $F_{\text{out}}(i)$ 为一次设备故障综合值, 即系统故障时一次设备相联的所有断路器对应故障信息值之和, 可用式(6)计算, 其中 n 为系统保护范围内断路器个数, A_{ij} 为关联矩阵第 i 行第 j 列的元素值。

$$F_{\text{out}}(i) = \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad (6)$$

$F_{\text{set}}(i)$ 为一次设备对应的故障门槛值。故障门槛

值取决于与一次设备相联的断路器对应的信息量，对于普通两端线路，线路两侧的断路器对应的信息量分别为 3(方向信息，距离 I、II 段信息)，线路对应的总的信息量为 6，故其故障阈值应为 3，也即单侧断路器的信息量；母线的故障阈值由其相联的断路器数量而定。

3.4 特殊情况的处理

若广域后备保护决策中心依据以上算法判断不出故障，且同时存在断路器处方向信息值为零的情况，为了提高判断的准确性，决策中心将采取策略重新判断一次。决策中心寻找方向信息缺失断路器支路两 endpoint 所连的其余所有支路，以这些支路方向信息判断断路器支路两 endpoint 组成区域的故障情况，若判断出故障，即可确定故障存在这两 endpoint 一次设备(一条线路与一个母线)之中。在综合关联矩阵中，若线路 endpoint 不满足故障判据式而母线 endpoint 对应的断路器信息(不包括方向信息值为 0 的断路器)值之和为 $n-1$ (n 为母线 endpoint 相联的支路数)，即可确定母线故障。这种处理方法可以解决母线故障时相联断路器处方向信息值有为 0 的情况而使决策中心失去判断故障能力的问题。经特殊情况处理以后，如决策中心仍无法判断出故障，则认为广域后备保护系统无法解决当前系统发生的问题，闭锁广域后备保护系统，由传统的后备保护延时配合切除故障。

4 算例分析

文章以图 3 的 5 节点系统图进行仿真验证。图中数字 1~12 表示保护装置对应的方向元件编号，对于线路还表示对应的距离元件编号，与断路器一一对应。L₁—L₆ 表示输电线路，B₁—B₅ 表示母线，对应于其所在的变电站。G₁ 和 G₂ 为 220kV 三相电源。对该系统以 PSCAD 搭建数学模型，用 C 语言编写保护程序，为了简化编程，保护装置仅配置了方向保护与距离保护，以保护判断的逻辑值作为广域后备保护决策中心判断的输入值。以变电站 2 内的广域后备保护系统为例进行仿真分析。

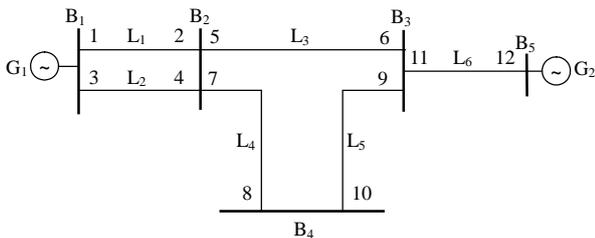


图 3 5 节点系统

Fig. 3 Five-node power system

情况 1: 线路 L₁ 保护 2 出口故障，所有信息正确且完整，决策中心形成的方向关联矩阵与距离关联矩阵及综合关联矩阵如式(7)–(9)所示，各一次设备的故障综合值和故障阈值如式(10)(11)所示。决策中心经故障判据式(5)判断线路 L₁ 故障。

$$A_f = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{断路器} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

$$A_d = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{断路器} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{断路器} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_{out}(L_1) = 5 \\ F_{out}(L_2) = 1 \\ F_{out}(L_3) = 1 \\ F_{out}(L_4) = 1 \\ F_{out}(B_2) = 2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_{set}(L_1) = 3 \\ F_{set}(L_2) = 3 \\ F_{set}(L_3) = 3 \\ F_{set}(L_4) = 3 \\ F_{set}(B_2) = 4 \end{cases} \quad (11)$$

情况 2: 线路 L₁ 保护 2 出口故障。线路 L₁ 保护装置内方向元件 2 与母线 B₂ 保护装置方向元件 2 的判断信息冲突(其一方向元件错误或信息传输过程中发生错误)时，经决策中心信息融合处理，断路器 2 处的方向信息为 0，此时综合关联矩阵及一次设备的故障综合值如式(12)(13)所示，决策中心经故障判据式(5)判断线路 L₁ 故障。

$$A = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \left[\begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ B_2 \end{matrix} \right] & \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

$$\begin{cases} F_{out}(L_1) = 4 \\ F_{out}(L_2) = 1 \\ F_{out}(L_3) = 1 \\ F_{out}(L_4) = 1 \\ F_{out}(B_2) = 2 \end{cases} \quad (13)$$

情况 3: 线路 L₁ 保护 2 出口故障, 线路 L₁ 保护装置距离元件 2 的程序故障或信息传输中丢失, 综合关联矩阵和一次设备的故障综合值如式(14)(15)所示, 决策中心经故障判据式(5)判断线路 L₁ 故障。

$$A = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \left[\begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ B_2 \end{matrix} \right] & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F_{out}(L_1) = 3 \\ F_{out}(L_2) = 1 \\ F_{out}(L_3) = 1 \\ F_{out}(L_4) = 1 \\ F_{out}(B_2) = 2 \end{cases} \quad (15)$$

情况 4: 母线 B₂ 故障, 断路器 2 处方向信息值为 0, 广域后备保护决策中心依据判据没有判断出故障时, 根据网络的拓扑结构(如图 4 所示), 依据断路器 1、4、5 和 7 处的方向信息判断 L₁ 与 B₂ 构成的区域故障, 然后由综合关联矩阵式(16)得出, F_{out}(L₁)=2≤3, 线路 L₁ 非故障, F_{out}(B₂)=3=4-1, 母线 B₂ 故障。

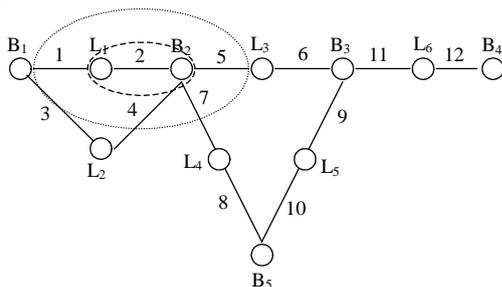


图 4 5 节点系统网络拓扑
Fig. 4 Network topology of five-node power system

$$A = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix}}^{\text{断路器}} \\ \left[\begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ B_2 \end{matrix} \right] & \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (16)$$

其他情况的仿真分析:

1) 线路 L₁ 断路器 1 处的保护装置因互感器故障或通信故障(站间通信中断或通信堵塞)而失效造成断路器 1 处的信息缺失时, 只要故障点在断路器 2 处保护装置的 I 段保护范围内, 决策中心即可判断出故障。

2) 母线 B₂ 保护装置失效造成装置内的信息全部缺失时, 可以借助线路 L₁、L₂、L₃ 及 L₄ 线路保护装置内方向元件 2、4、5 和 7 的方向信息判断母线 B₂ 的故障情况。

3) 断路器 5 处方向信息和距离信息相冲突时, 即方向信息值为-1 而距离信息值为 1 或 2, 若广域后备保护判断母线 B₂ 和线路 L₃ 同为故障, 通过采取先切除线路、一定延时之后再切除母线的策略减少误切除母线对电网的影响; 若广域后备保护判断线路 L₁ 和线路 L₃ 同为故障, 不排除双重故障的情况, 只有将 2 条线路同时切除。

5 结论

基于方向信息和距离信息的变电站集中式广域后备保护系统根据冗余的广域信息针对不同的故障情况完成故障判断。借助实时的电网拓扑结构形成各种关联矩阵, 本文从提高信息冗余的角度探讨了如何利用方向信息和距离信息的冗余提高广域后备保护的容错性。

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 Jianbo. Statistics and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 60-62(in Chinese).
[2] 高翔, 庄侃沁, 孙勇. 西欧电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 25-31.
Gao Xiang, Zhuang Kanqin, Sun Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTR grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31(in Chinese).
[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 Weifang, Sun Huadong, Tang Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in brazil power grid on November 10, 2009[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5(in Chinese).
- [4] 曹国臣. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51-56.
Cao Guochen. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 51-56(in Chinese).
- [5] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 31(8): 7-12.
Yi Jun, Zhou Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12(in Chinese).
- [6] 肖健, 文福拴. 广域保护及其应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 22-35.
Xiao Jian, Wen Fushuan. Wide-area protection and its applications [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2008, 20(2): 22-35(in Chinese).
- [7] 陈德树. 大电网安全保护技术初探[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 14-17.
Chen Deshu. Preliminary research on security protection technology of large-scale power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 14-17(in Chinese).
- [8] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防护能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
Zhang Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6(in Chinese).
- [9] 蔡运清, 汪磊, Kip Morison, 等. 广域保护(稳控)技术的现状及展望[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 21-25.
Cai Yunqing, Wang Lei, Kip Morison, et al. Current status and prospect of wide-area protection (dynamic stability control) technologies[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 21-25.
- [10] 苏盛, 段献忠, 曾祥君, 等. 基于多 Agent 的广域电流差动保护系统[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 15-19.
Su Sheng, Duan Xianzhong, Zeng Xiangjun, et al. A multi-agent based wide-area current differential protection system[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 15-19(in Chinese).
- [11] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 遵循 IEC 61850 标准的广域电流差动保护 IED[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 53-57.
Wang Yangguang, Yin Xianggen, You Dahai, et al. Development of wide area current differential protection IED conforming with IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 53-57(in Chinese).
- [12] 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.
Cong Wei, Pan Zhencun, Zhao Jianguo, et al. A wide area protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 91-95(in Chinese).
- [13] 陈振宇, 王钢, 李海锋, 等. 基于智能多代理技术的广域电网协调保护系统[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 42-45.
Chen Zhenyu, Wang Gang, Li Haifeng, et al. A MAS-based coordinated protection system for wide area power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 42-45(in Chinese).
- [14] 童晓阳, 王晓茹, 汤俊. 电网广域后备保护代理的结构和工作机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 91-98.
Tong Xiaoyang, Wang Xiaoru, Tang Jun. Study on the structure and working mechanisms of wide-area backup protection agents for power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 91-98.
- [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(in Chinese).
- [16] 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): 87-94.
Yang Zengli, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 87-94(in Chinese).
- [17] 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 (in Chinese).
- [18] 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(in Chinese).
- [19] 王冬青, 苗世洪, 林湘宁, 等. 基于光纤网的后备保护系统的研制[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 21-25.
Wang Dongqing, Miao Shihong, Lin Xiangning, et al. Development of a novel backup protection system based on optic-fiber network[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 21-25 (in Chinese).
- [20] 苗世洪, 刘沛, 林湘宁, 等. 基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 32-36.
Miao Shihong, Liu Pei, Lin Xiangning, et al. A new type of backup protective system in wide area network based on data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 32-36(in Chinese).
- [21] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-12.
Wang Xiangzhong, Li Xiaolan. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-12(in Chinese).
- [22] 郭志忠. 电力网络解析论[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 30-35.



田聪

收稿日期: 2011-02-14。

作者简介:

田聪(1986), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制, E-mail: tiancong528@126.com;

文明浩(1973), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制, E-mail: swenmh@263.net.

(责任编辑 李兰欣)