

DOI: 10.7667/PSPC171208

# 基于 Dijkstra 算法的广域自适应跳闸策略

赵建文<sup>1</sup>, 张广骁<sup>1</sup>, 童晓阳<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为了减小故障切除范围和实现大规模互联电网的快速自适应跳闸, 提出了一种基于图论搜索技术的广域自适应跳闸策略。从图论角度出发, 构建被保护元件——断路器邻接矩阵和断路器邻接矩阵, 并根据断路器的运行状态修正邻接矩阵。以故障元件或失灵断路器为源点, 通过 Dijkstra 算法得到与源点连接的断路器路径, 最后根据所获取的距离值和路径确定跳闸策略。算例分析表明, 所提方法能够根据电网实时拓扑结构、故障元件位置和断路器状态实现跳闸断路器在线搜索, 跳闸策略能够很好地满足广域保护配合要求。

**关键词:** 跳闸策略; 图论; Dijkstra 算法; 广域保护

## Self-adaptive tripping strategy based on Dijkstra algorithm for wide-area protection

ZHAO Jianwen<sup>1</sup>, ZHANG Guangxiao<sup>1</sup>, TONG Xiaoyang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to minimize the range of fault isolation and achieve the rapid self-adaptive trip of large-scale interconnected power grid, a wide-area self-adaptive tripping strategy based on graph theory search technology is proposed. Starting from the graph theory perspective, the protected element-circuit breaker adjacency matrix and circuit breaker adjacency matrix are set up, and the adjacency matrix is modified based on the operation state of the circuit breaker; with fault element or failure circuit breaker as source point, circuit breaker paths connected with source point is obtained through Dijkstra algorithm. Finally, self-adaptive tripping strategy is established by the distance values and paths. According to the examples analysis, the method proposed can be used to achieve the online search of tripping circuit breaker based on the real-time topological structure of the power grid, fault element position and circuit breaker state, and the tripping strategy can be used to meet the coordination requirements of wide-area protection.

This work is supported by Industry Key Research Foundation of Shaanxi Province (No. 2015GY049).

**Key words:** tripping strategy; graph theory; Dijkstra algorithm; wide-area protection

## 0 引言

坚强智能电网的深入建设<sup>[1]</sup>将加速推动全球能源互联网<sup>[2]</sup>由梦想到现实的转变。由于全球能源互联网跨越时区和地域, 将使电网规模不断扩大, 复杂程度不言而喻。传统继电保护系统越来越难以适应电网的快速发展<sup>[3-4]</sup>, 为解决大电网保护与控制问题, 一种依托先信息通信技术<sup>[5]</sup>的广域保护系统应运而生<sup>[6]</sup>。

广域保护系统识别故障元件后<sup>[7-8]</sup>, 制定合理灵活的跳闸策略尤为重要<sup>[9]</sup>。传统的断路器跳闸方式仅依靠本地信息缺乏相应配合协调, 跳闸逻辑不能

自动适应系统运行方式的变化。为适应大规模互联电网下的智能跳闸要求, 相关学者均着眼于全网信息对广域跳闸策略展开了广泛研究<sup>[10]</sup>。文献[11]提出了一种基于动作因子的断路器顺序跳闸策略。该方法在故障影响范围内, 根据各距离保护元件的动作结果求得动作因子, 然后依据专家系统确定的保护动作可靠性大小制定断路器跳闸次序, 从而保证最小范围内切除故障。传统断路器失灵保护存在拒动和误动风险<sup>[12]</sup>, 文献[13]指出广域保护系统可以方便地解决断路器失灵保护问题, 并给出了跳闸断路器随保护范围自动扩展的拓扑树搜索方法。当系统无法获取某个测量点故障信息时, 为保证发生故障的主保护区能够有选择地切除故障, 文献[14]提出两个主保护区的故障判断与纵续跳闸结合的分布

式智能跳闸策略，即首先切除故障信息缺失处的断路器，然后根据两个主保护区的判断结果跳开内部故障的主保护区。文献[15]根据变压器主保护拒动的各种情况，探讨了 GOOSE 方式的断路器跳闸策略，该方法实现了智能开关与保护装置的协调工作，具有动作速度快、选择性好和自适应能力强的特点。文献[16]在保护分区划定范围内，提出了基于方向权重的跳闸策略，避免了非同步下获取开关信息导致跳闸决策错误的问题，但依托信息量较大。文献[17]提出了适应智能电网的广域跳闸概念并指出具体跳闸策略应考虑变电站主接线形式和系统运行方式变化。在此基础上，文献[18]将 Petri 网模型应用到断路器序列的搜索中，并给出了变电站站内的断路器搜索方法和变电站站间的断路器搜索方法，基于 Petri 网的跳闸策略能够很好地适应变电站站内复杂的接线方式，可以快速实现故障隔离。

跳闸策略是广域保护得以实现的保证。从电网全局角度制定满足广域保护配合要求的自适应跳闸策略时，需要考虑系统运行方式变化以及断路器状态发生改变对跳闸决策的影响，从而确保在各种极端情况下能够在最小范围内用较短延时隔离故障。基于此，本文提出一种基于 Dijkstra 算法的广域自适应跳闸策略。首先构建基于图论的被保护元件—断路器邻接矩阵和断路器邻接矩阵，然后根据断路器状态修正邻接矩阵，以故障元件或失灵断路器为源点，通过求取单源最短路径的 Dijkstra 算法得出与源点相关联的断路器路径，最后按照距离值递增的顺序执行跳闸。

### 1 跳闸策略分析

跳闸策略成功与否取决于故障是否切除和切除范围是否最小<sup>[19]</sup>。故障元件位置、断路器失灵及变电站直流电源消失三种情形下制定的断路器跳闸策略是不同的。因此，根据实际情况制定合理可靠的跳闸决策是十分必要的。

图 1 网络包含了典型接线方式，如单母线接线、双母线接线、双母线单分段接线、3/2 接线。图 1 中，I~V 为变电站；B1~B10 为母线；L1~L7 为线路；编号 1~24 为断路器 CB1~CB24。以图 1 简单电网对上述三种情形下的跳闸策略进行说明。

#### 1) 故障元件识别后的跳闸分析

广域保护系统识别故障元件后，由断路器与故障元件之间的连接关系确定被切除的断路器，即跳开故障元件两端的断路器。例如，线路 L4 故障，需要向 CB6、CB7 和 CB8 发跳闸命令；母线 B2 故障，需要向 CB3 和 CB4 发跳闸命令。

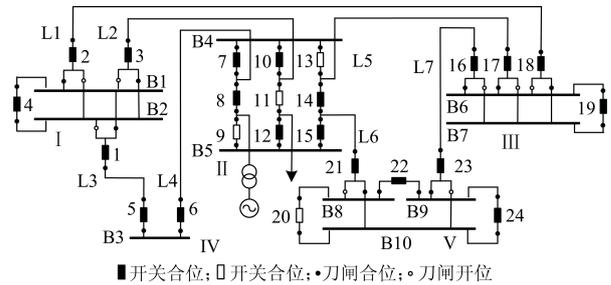


图 1 电网典型接线图  
Fig. 1 Typical connection diagram of power network

#### 2) 断路器失灵的跳闸分析

断路器失灵是指继电保护动作并发出跳闸指令而断路器拒动的一种故障情况。随着电网的广泛互联，常规断路器失灵保护的拒动和误动都将导致严重的电网事故。通常，断路器失灵分为线路故障断路器失灵和母线故障断路器失灵。当线路故障且发生断路器失灵时，需要跳开该失灵断路器所在母线上的所有出线断路器。例如，线路 L4 故障，当 CB6 失灵时，需要向 CB5 发跳闸命令；若母线故障，又分为母联断路器失灵和线路侧断路器失灵。线路侧断路器失灵需要跳开线路对侧断路器。例如，母线 B2 故障，当 CB3 失灵时，需要向 CB10 发跳闸命令；母联断路器失灵则需要跳开两条母线上的所有出线断路器。例如，母线 B2 故障，当 CB3 正常跳闸而母联断路器 CB4 失灵时，需要向 CB1 和 CB2 发跳闸命令。

#### 3) 变电站直流电源消失后的跳闸分析

变电站直流电源消失是变电站运行中的一种严重事故，会造成事故范围扩大和设备严重烧损等问题，十分不利于电网的安全稳定运行<sup>[20]</sup>。当变电站直流电源消失且出线或站内发生故障时，站内断路器不能正常动作，需要跳开与该变电站出线直接相连的对端断路器。例如，变电站 III 直流电源消失，出线或内部故障时，需要向 CB2、CB14 和 CB23 发跳闸命令。

经过上述分析得知，为适应变电站内部接线方式且在最小范围内切除故障，首先需要搜索相关联的断路器，然后完成相应断路器跳闸策略。因此，广域自适应跳闸策略应充分利用广域保护系统获取和处理信息的能力，对实时网络拓扑、故障元件位置和断路器实际状态进行识别和监测，并根据保护状态与失效元件的信息，在最小范围内用较短延时隔离故障。

## 2 基于图论的网络拓扑模型构建

### 2.1 电网图论模型的分块表示

图论在电力系统领域中扮演着重要角色，它提



1) 将顶点集合  $V$  分成已求得最短路径的顶点集合  $S$  和尚未确定最短路径的顶点集合  $T$ , 距离值数组  $D$  存储从源点到其他顶点当前的路径长度,  $P$  数组记录当前路径, 根据第 2 节图论理论建立邻接矩阵  $W$ ;

2) 初始化,  $S = \{\text{源点}s\}$ ,  $T = \{\text{剩余顶点}t\}$ ,  $D=W(s,:)$ ,  $P$  数组记录当前路径;

3) 从距离值数组  $D[t]$  中查找距离源点最近的顶点  $k$ , 将其从集合  $T$  加入集合  $S$ ;

4) 以  $k$  为中间点, 若源点到  $T$  中顶点经过顶点  $k$  后比原来不经过顶点  $k$  短, 则修改距离值, 即  $D[t]=\min\{D[t], D[k]+W(k, t)\}$ , 并修改  $P[t]$  中路径;

5) 重复步骤 3) 和 4), 直到集合  $T$  中的剩余顶点全部加入到集合  $S$  中。

### 3.2 广域自适应跳闸策略

#### 1) 邻接矩阵修正

断路器状态经常随系统运行方式变化, 故障切除也会使断路器分合状态发生变化。因此, 需要实时监测断路器状态, 根据断路器状态更新邻接矩阵。

矩阵  $C$  中元素修正原则:

$$c_{mn}' = \begin{cases} c_{mn} & \text{断路器闭合状态} \\ \infty & \text{断路器断开状态} \end{cases} \quad (8)$$

矩阵  $A$  中元素修正原则:

$$a_{ij}' = \begin{cases} a_{ij} & \text{断路器闭合状态} \\ 0 & \text{若 } i=j \\ \infty & \text{断路器断开状态} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)和式(9)中:  $c_{mn}$ 、 $a_{ij}$  为不考虑断路器状态仅根据物理连接关系确定的元素;  $c_{mn}'$ 、 $a_{ij}'$  为根据实时断路器状态修正的元素。

若识别出某变电站的直流电源消失, 则修正该变电站内部断路器之间的元素。

$$a_{ij}' = \begin{cases} a_{ij} & \text{其他} \\ 0 & \text{若站内顶点 } i \text{ 与 } j \text{ 直接相连} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 下标  $i$ 、 $j$  取值为该直流电源消失的变电站的断路器编号。 $a_{ij}'$  为不考虑直流电源消失状态仅根据物理连接关系确定的元素;  $a_{ij}'$  为根据直流电源消失修正的元素。其中,  $a_{ij}' = 0$  表示直流电源消失变电站内第  $i$  个断路器与第  $j$  个断路器直接相连。

#### 2) 路径 $P$ 与距离值 $D$

Dijkstra 算法得出, 距离值  $D$  和路径  $P$  可以确定连接源点的断路器。其中, 数组  $P$  记录源点到跳闸断路器的路径, 数组  $P$  的路径终点为跳闸断路器。距离值  $D$  含义如下:

$$D = \begin{cases} 0 & \text{源点} \\ 1 & \text{与源点直接相连} \\ 2 & \text{与源点次相连} \\ \dots & \text{以此类推} \\ \infty & \text{与源点无联系} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, 距离值大小表征跳闸断路器与源点的连接次序。因此, 按照距离值递增的顺序执行跳闸策略可以保证最小范围内切除故障。Dijkstra 算法是一种按照路径长度递增次序搜索各顶点到源点最短路径的方法, 故可以根据算法本身特点通过设置距离值门槛, 减小跳闸断路器搜索范围。

#### 3) 跳闸优先级设置

保证断路器可靠跳闸, 设置动作时限使距离源点最近的断路器优先跳闸。

$$t_n = (D - 1) \times \Delta t \quad (12)$$

式中:  $t_n$  为  $D = n$  时的断路器动作时间;  $\Delta t$  为确保跳闸动作可靠性增加的延时。

#### 4) 跳闸策略

整个广域自适应跳闸的运行流程如图 2 所示。概括来说, 广域保护系统首先需要搜索故障元件两端的断路器, 根据 2.2 节建立的被保护元件—断路器邻接矩阵, 按式(8)修正式(2)中的邻接矩阵  $W_1$ , 然后跳开距离值  $D=1$  的路径  $P$  的终点断路器。当断路器失灵时, 根据 2.3 节建立的断路器邻接矩阵, 按式(9)修正式(5)中的邻接矩阵  $W_2$ , 再以距离值递

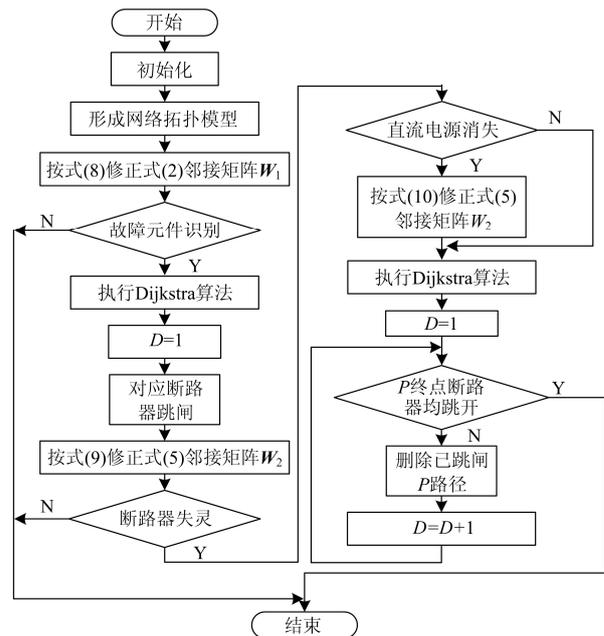


图 2 运行流程图

Fig. 2 Flow chart of operation



当  $D=1$  时, 数组  $P$  的路径终点为断路器 CB19, 它与失灵断路器 CB18 直接相连。因此, 断路器 CB18 失灵后, 应该跳开断路器 CB19。若断路器 CB19 发生连续失灵, 则从  $D=2$  的路径中查找出经过断路器 CB19 的路径终点断路器为 CB16 和 CB17。若 CB16 又发生断路器失灵, 则从  $D=3$  的路径中查找出路径  $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23$  中经过未跳闸的断路器 CB16, 而路径  $18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14$  中包含已经跳闸的断路器 CB17, 故 CB23 跳闸而 CB14 仍保持闭合状态。因此, 该跳闸断路器搜索方法能够一次性判断出后续跳闸的断路器。

表 3 源点 CB18 到其他顶点的距离值和路径

Table 3 Distance values and paths from source CB18 to other vertices

$D$	$P$
0	$18 \rightarrow 18$ ;
1	$18 \rightarrow 19$ ;
2	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 16$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 17$ ;
3	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23$ ;
4	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 15$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 21$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23 \rightarrow 22$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23 \rightarrow 24$ ;
5	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 12$ ;
$\infty$	$18 \rightarrow 1$ ; $18 \rightarrow 2$ ; $18 \rightarrow 3$ ; $18 \rightarrow 4$ ; $18 \rightarrow 5$ ; $18 \rightarrow 6$ ; $18 \rightarrow 7$ ; $18 \rightarrow 8$ ; $18 \rightarrow 9$ ; $18 \rightarrow 10$ ; $18 \rightarrow 11$ ; $18 \rightarrow 13$ ; $18 \rightarrow 20$

由表 3 可以看出, 若不设置距离值门槛, 则 Dijkstra 算法可以求取所有断路器顶点到源点的路径。当距离值为 1 的断路器已经可靠跳闸时, 距离值为 2、3、4、5 和  $\infty$  的跳闸路径显然没有起到作用, 故应根据实际跳闸要求设定距离值门槛缩小搜索范围。为起到跳闸断路器的后备作用, 距离值门槛可设定为 3~5。这样既可以加快跳闸断路器搜索速度又能够提高跳闸的可靠性。随着电网规模的扩大, 距离值门槛设定产生的作用将会更加凸显出来。此外, 母线故障时又发生断路器失灵的处理过程同上, 此处不再赘述。

### 4.3 变电站直流电源消失后的跳闸断路器搜索

#### 1) 未检测到变电站直流电源消失

若线路 L1 故障且未检测到变电站 III 直流电源消失, 则直流电消失侧  $D=0$ 、 $D=1$  和  $D=2$  的路径终点断路器均不能正常跳闸, 这个终点断路器对应变电站 III 内断路器 CB16、CB17、CB18 和 CB19。此时, 接着从  $D=3$  的路径中查找跳闸断路器, 得出与变电站 III 直接相连的断路器 CB14 和 CB23, 由式(12)可知, 经过  $2\Delta t$  延时后断开该断路器。因此, 可以通过增加动作时限并按照接连发生断路器失灵故障的处理方式搜索变电站直流电源消失情况下的跳闸断路器。

#### 2) 已经检测到直流电源消失的变电站

若线路 L1 故障且检测到变电站 III 直流电源消失, 则按照式(10)修正变电站 III 内部仅根据断路器之间的物理连接情况确定的值。即矩阵  $A$  中元素  $a_{16,17}$ ,  $a_{16,19}$ ,  $a_{17,16}$ ,  $a_{17,19}$ ,  $a_{18,19}$ ,  $a_{19,16}$ ,  $a_{19,17}$ ,  $a_{19,18}$  的值由 1 修正为 0。再按照 Dijkstra 算法求取距离值和路径, 如表 4 所示。

当  $D=1$  时, 数组  $P$  记录的路径终点断路器为 CB14 和 CB23, 由式(12)得知, 当识别出变电站 III 直流电源消失时, 可立即跳开 CB14 和 CB23。由此看出, 识别出变电站直流电源消失的跳闸处理方式与将其视为连续断路器失灵的跳闸处理方式相比, 断路器动作切除速度更加迅速。

表 4 变电站 III 直流电源消失时源点 CB18 到其他顶点的距离值和路径

Table 4 Distance values and paths from source CB18 to other vertices when substation's DC power loss at III

$D$	$P$
0	$18 \rightarrow 18$ ; $18 \rightarrow 19$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 17$ ;
1	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23$ ;
2	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 15$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 21$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23 \rightarrow 22$ ; $18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 23 \rightarrow 24$ ;
3	$18 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 12$ ;
$\infty$	$18 \rightarrow 1$ ; $18 \rightarrow 2$ ; $18 \rightarrow 3$ ; $18 \rightarrow 4$ ; $18 \rightarrow 5$ ; $18 \rightarrow 6$ ; $18 \rightarrow 7$ ; $18 \rightarrow 8$ ; $18 \rightarrow 9$ ; $18 \rightarrow 10$ ; $18 \rightarrow 11$ ; $18 \rightarrow 13$ ; $18 \rightarrow 20$

### 4.4 与预设逻辑的传统跳闸策略对比分析

对于断路器失灵、变电站直流电源消失等极端情况下的跳闸策略, 采用预先设置逻辑的传统跳闸方式进行解决势必增加投资且灵活性较差。在系统运行方式变化时, 采用人工倒换出口压板的方式难以快速做出相应调整。电网接线形式复杂时, 又会给现场操作人员的工作带来一定困难。

在系统运行方式变化时, 新提出的基于 Dijkstra 算法的跳闸策略能自适应并有效跳闸; 而预设逻辑的传统跳闸方式会失效。以断路器 CB23 由与母线 B9 连接转变为与母线 B10 相连接为例, 预设逻辑的传统跳闸方式若未能及时人工倒换出口压板则跳闸断路器仍为 CB22、CB23 和 CB24。而本文提出的基于 Dijkstra 算法的断路器搜索方法需要跳开的断路器是 CB22 和 CB24。故预设逻辑的传统跳闸方式错误的切除了断路器 CB23。这是因为传统预设逻辑的跳闸方式不能对系统运行方式的变化快速做出调整, 而基于 Dijkstra 算法的跳闸策略在应对系统非预设的变化时, 通过实时监测断路器状态, 修正邻接矩阵, 以保证正确切除故障, 因而本文所提方法具有很好的自适应能力。

## 5 结语

合理可靠的跳闸策略是广域保护得以实现的保障。为了适应大规模互联电网下的智能跳闸要求,文中将实际电网结构抽象成图论模型,进而将跳闸断路器搜索问题转换为 Dijkstra 算法求解图论模型的单源最短路径问题。该跳闸断路器搜索方法对现场主接线方式及运行方式变化有很好的适应性,能够根据故障元件位置、断路器失灵和变电站直流电源消失判断出跳闸路径,按照距离值递增的顺序执行跳闸可以满足广域保护最小范围内切除故障的要求,通过设定距离值门槛既缩小了断路器搜索范围,又有助于提高跳闸可靠性。基于 Dijkstra 算法的广域自适应跳闸策略方法简单,能够很好地发挥智能电网数字化、信息化的优势,为设计和优化智能电网的网跳模式提供参考。该新方法工程化的设计与应用是下一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.  
LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110.
- [3] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [4] HE Jinghan, LIU Liu, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [5] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.  
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [6] 白加林, 高昌培, 王宇恩, 等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 157-162.  
BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. Research and application of wide-area intelligent protection and control system based on the shared data source[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 157-162.
- [7] MALLIKARJUNA B, VARMA P V V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 229-244. DOI: 10.1186/s41601-017-0053-1.
- [8] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [9] GIOVANINI R, HOPKINSON K, COURRY D V, et al. A primary and backup cooperative protection system based on wide area agents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1222-1230.
- [10] 王松, 裘愉涛, 侯伟宏, 等. 智能变电站继电保护 GOOSE 网络跳闸探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 140-144.  
WANG Song, QIU Yutao, HOU Weihong, et al. Discussion of GOOSE network trip mode for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 140-144.
- [11] TAN J C, CROSSLEY P A, MCLAREN P G, et al. Sequential tripping strategy for a transmission network back-up protection expert system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 68-74.
- [12] 万洛飞, 李志坚, 宋斌, 等. 一种基于拖尾电流识别的失灵保护实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 89-94.  
WAN Luofei, LI Zhijian, SONG Bin, et al. Implement method of breaker failure protection based on subsidence current blocking[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 89-94.
- [13] 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 protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 91-95, 110.
- [14] 李丰, 王来军, 文明浩, 等. 广域后备保护智能跳闸策略研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 84-87, 92.  
LI Feng, WANG Laijun, WEN Minghao, et al. Intelligent trip strategy for wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 84-87, 92.

[15] 王来军, 文明浩, 李丰, 等. GOOSE 方式变压器后备保护探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 84-88.  
WANG Laijun, WEN Minghao, LI Feng, et al. A discussion on transformer back-up protection based on goose network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 84-88.

[16] 马静, 裴迅, 马伟, 等. 基于方向权重的广域后备保护跳闸策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 107-114.  
MA Jing, PEI Xun, MA Wei, et al. Tripping strategy based on directional weight for wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 107-114.

[17] 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 Xianggen, 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.

[18] 周良才, 张保会, 薄志谦. 广域后备保护系统的自适应跳闸策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 55-60, 65.  
ZHOU Liangcai, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. Self-adaptive tripping strategy of wide area backup protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 55-60, 65.

[19] 金能, 李正天, 林湘宁, 等. 应对全站采样信息缺失的应急保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2203-2215.  
JIN Neng, LI Zhengtian, LIN Xiangning, et al. Emergency protection system dealing with sampling information loss within a whole substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2203-2215.

[20] 戴光武, 谢华, 徐晓春, 等. 基于区域电网信息的变电站二次直流失电保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 117-121.  
DAI Guangwu, XIE Hua, XU Xiaochun, et al. Protection system of substation's secondary DC power loss based on regional power grid information[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 117-121.

[21] BARBEHENN M. A note on the complexity of Dijkstra's algorithm for graphs with weighted vertices[J]. IEEE Transactions on Computers, 1998, 47(2): 263-266.

收稿日期: 2017-08-11; 修回日期: 2018-01-18

作者简介:

赵建文(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力网安全运行; E-mail: xkdzhaojw@163.com

张广骁(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为广域后备保护; E-mail: wylbzgx@163.com

童晓阳(1970—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电网故障诊断、广域后备保护、智能变电站、信息技术及其在电力系统中的应用。E-mail: xytong@swjtu.cn

(编辑 葛艳娜)