

DOI: 10.7667/PSPC160328

基于区域多信息融合的广域后备保护算法

孔德洪, 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对广域保护通信流量大、容错性低等问题, 提出了一种基于区域多信息融合的广域后备保护算法。首先, 对保护系统进行区域划分, 并根据故障电流的分布特性进行故障区域搜索, 以减少广域保护的通信流量。其次, 对故障区域内的保护动作信息进行归一化处理, 并计算线路故障证据的基本概率赋值。最后, 采用改进的 D-S 证据理论进行证据融合, 进而识别故障线路。基于 PSCAD 搭建 IEEE 39 节点系统进行仿真验证, 结果表明该算法能有效识别各类型故障, 具有广域通信量小, 信息容错性高等良好性能。

关键词: 广域后备保护; 区域划分; 故障电流分布特性; D-S 证据理论

An algorithm of wide area protection based on regional multi information fusion

KONG Dehong, LÜ Feipeng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the phenomena such as heavy communication traffic and low fault tolerance of wide area protection, a wide-area backup protection algorithm is proposed based on regional multi information fusion. Firstly, the protection system is divided into several regions, and the fault area search is carried out according to the distribution characteristics of the fault current, which can reduce the communication traffic in wide area protection. Then, the protection action information of the fault area is normalized to calculate the basic probability assignment of the line fault evidence. Finally, the actual fault line is identified by the improved D-S evidence theory. An IEEE-39 bus model is constructed by PSCAD, the results show that the proposed algorithm can effectively recognize various types of faults, and has good performance of small wide area communication traffic and high fault tolerance.

Key words: wide area backup protection; region division; fault current distribution characteristics; D-S evidence theory

0 引言

继电保护作为电力系统“三道防线”中的第一道防线, 承担着保证电力系统安全和稳定运行的重要责任^[1]。随着电力需求的增加, 电力系统逐渐逼近其极限运行状态, 发生故障的可能性增大, 继电保护承担的责任更加重大。然而基于就地信息的传统后备保护通过逐级配合进行定值整定, 保护动作延时太长, 整定配合困难, 在潮流转移时容易误动作^[2-3], 已不能适应大规模互联电网的发展要求^[4]。近年来, 广域测量技术(Wide Area Measurement System, WAMS)的发展及其在电网中的应用^[5-6]使基于广域多信息融合的广域后备保护成为研究热点。

广域后备保护具有多信息故障识别的优势, 但信息并不是越多越好。电网发生故障后, 过多的无用信息不仅对故障识别毫无意义, 反而会加重决策

中心的负担。此外, 限于通信网络的发展, 利用全网的信息进行决策的思路从工程技术上难以实现, 从理论角度考虑也无必要。根据有限广域后备保护思想^[7], 对广域后备保护的研究涉及两个方面内容: 一是保护系统分区; 二是故障识别算法。

文献[8]根据故障电压分布的特点, 提出了一种基于故障电压分布的广域后备保护算法, 并对降低广域通信量的方法进行了探讨。文献[9]提出了一种变电站集中式后备保护方法, 该方法利用本站的电气信息辅以相邻变电站的状态信息进行故障识别。由于广域后备保护利用信息数量多, 在测量、通信等环节难免出现信息错误, 因此文献[10-12]利用多信息融合技术对广域信息进行融合, 在部分信息出错的情况下也能正确识别故障, 保护具有一定的容错性。文献[13-14]展开了广域后备保护系统分区问题的研究。文献[13]对广域后备保护系统的分区原

则、中心站选取、分区边界交互方式等问题进行研究,提出了一种广域大电网类蜂窝结构的分区方法。文献[14]根据分区评价指标提出了一种基于二层搜索分区的保护区域划分算法。

在以上研究的基础上,本文对保护分区方法以及区域信息融合方法等问题开展研究,提出了一种区域信息融合的广域后备保护算法。算法以最短通信时间为目标进行保护系统分区,以改进 D-S 证据融合理论进行区域信息融合,进而识别故障元件。最后基于 IEEE39 节点系统进行仿真,验证了算法的有效性。

1 广域后备保护系统结构

广域后备保护根据其决策中心位置的不同,一般可分为集中式、分布式和区域集中式 3 种结构^[15-16]。集中式结构的决策中心位于一个变电站,其优点是广域通信量较小,获取到的冗余信息多,但是一个决策中心计算负担大,且存在单点失效风险。分布式结构的决策中心分散在系统智能电子设备(Intelligent Electronic Device, IED)上,计算负担小,不存在单点失效风险,但是整个网络通信量大,单个决策中心所利用的信息量少,不利于决策。区域集中式结构结合集中式和分布式结构的优点,首先把电网划分成多个区域,每个区域进行集中决策。单个区域集中式结构如图 1 所示,在每个变电站都设置一个变电站信息处理单元(Substation Unit, SU),实现站内 IED 信息的集合和一些简单处理,每个区域设置一个区域决策中心(Regional Centralized Decision Center, RCDC),实现故障识别和动作策略制定。本文提出的算法采用的是区域集中式系统结构。

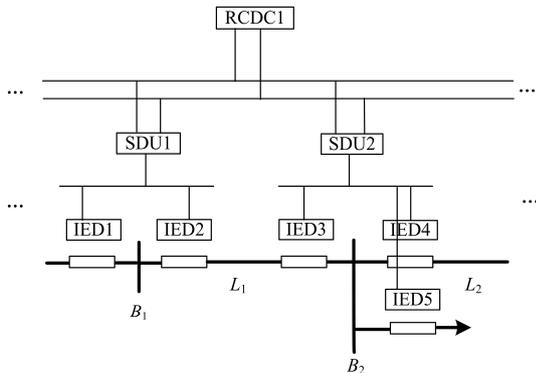


图 1 区域集中式系统结构

Fig. 1 Structure of regional centralized wide area protection

2 广域后备保护分区

区域集中式结构的保护系统其决策中心根据本区域的电气信息进行故障识别与动作决策,因此首

先需要对大电网进行分区。电网分区主要包括区域中心站的选取以及区域边界交互方式的选择。

2.1 中心站选取原则

中心站的选取需要考虑地理因素、通信因素以及经济因素,可人为指定重要的变电站或者发电厂作为中心站。考虑到决策中心的重要性,防止出现单点失效风险,决策中心需要双重化配置,可选取区域内的一个子站作为备用中心站。不同中心站尽量不要直接相邻,否则交互区域过大,造成信息的冗余和资源的浪费。中心站与子站间的通信时效性要高,即各子站信息传递到中心站的延时要短,以便决策中心及时进行决策。此外,中心站需要保证与其余子站通信的可靠性高,不会因一两条通信线路的故障导致中心站与子站隔离。

现有文献提出了点交互、变电站交互、线路交互和多单元交互 4 种区域边界交互方式,如图 2 所示。图 2(a)中交互处变电站得不到有效保护,图 2(b)线路发生故障时相邻变电站无法实现远后备功能。图 2(c)线路交互方式就不存在以上两个问题,远后备同时由交互的两个区域实现。图 2(d)虽然也不存在交互区失去远后备的情况,但是交互元件过多,增加不必要的通信流量。因此本文对于区域交互采用线路交互方式。

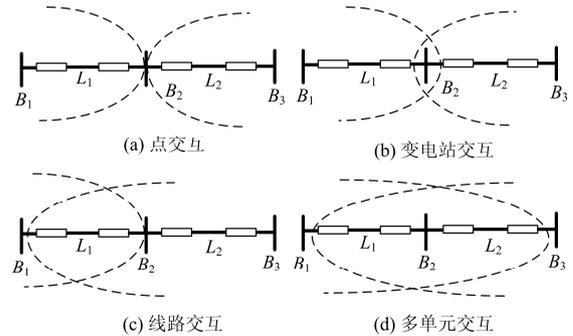


图 2 交互分区

Fig. 2 Interactive division area

2.2 分区实现算法

广域后备保护需要改善传统保护因逐级配合导致延时过长的问题,因此子站与中心站间的通信实时性应该作为分区的一个重要指标。中心站选取在与区域内各子站通信延时尽可能短的变电站,有利于故障的快速切除和提高通信的可靠性。任意两个变电站之间的通信延时可表达为^[17]

$$T = T_s + T_B + T_p + T_R \quad (1)$$

式中: T_s 为发送时延; T_B 为数据包的间隔时延; T_p 为通信通道传播时延; T_R 为路由排队时延。以上 4 个延时中,通道的长短以及路由排队延对通信延

时影响最大^[18]。由于数据在电站间传输时路由通常选取最短路径发送,因此本文以站间最短距离为指标,用经典 Dijkstra 算法得各站间的最短路径通信时间矩阵 T_{sp} 为

$$T_{sp} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{n1} & \cdots & \cdots & T_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据木桶效应可知,区域信息融合通信实时性由区域中所有子站到中心站通信时间最长的时间决定,即

$$T_{i\max} = \max\{T_{i1}, \dots, T_{in}\} \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

分区过程分为初次分区和分区融合两个步骤。

1) 初次分区。子站与中心站的通信时间主要受通信路径的长度影响,因此把到各子站最短路径之和最小的子站设置为中心站;然后根据中心站不相邻原则,从电网拓扑结构中删除中心站以及和中心站相邻的子站,得到剩余的联通图。继续把剩余联通图中到各子站最短路径之和最小的子站设置为中心站,重复此过程即可确定所有中心站。中心站选定后,距离中心站拓扑距离小于 2 的变电站和线路划分到一个区域,并对边界线路进行边界交互校验以完成保护系统初次分区。

2) 分区融合。初次分区完成后,从最小的分区开始进行拆分和融合。根据到其余中心站通信时间最短的原则,拆分区内的变电站,融合到其余分区中去。融合后,新加入变电站的分区是否满足约束条件 $T_{i\max} < T_{set}$,若满足则说明融合有效,若不满足则取消融合,重新对剩余最小的分区进行拆分和融合。

3 DS 证据理论及其改进模型

3.1 DS 证据理论概要

证据理论是由 Dempster 提出,并由 Shafer 加以扩充和发展,可以处理由不知道所引起的不确定性。设 Θ 为互不相容元素组成的论域集合,称为辨识框架,本文辨识框架内的元素,即为待确定的故障线路 L_i ,若函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ (2^Θ 为辨识框架内所有子集)满足下列条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

则 $\forall A \in \Theta$,称 $m(A)$ 为命题 A 的基本概率赋值 (Basic Probability Assignment, BPA),表示对命题 A 的精确信任程度。如果 $m(A) > 0$,则称 A 为焦点。定

义函数 $BEL(2^\Theta \rightarrow [0,1])$

$$BEL(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (\forall A \subset \Theta) \quad (5)$$

称该函数是 Θ 上的信任函数。信任函数是证据理论中的一个重要概念,证据理论以信任函数而不是概率作为度量。

设 m_1, m_2, \dots, m_n 为 2^Θ 上的 n 组相互独立的证据,基于 Dempster 合成规则进行融合可得

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1-K} \sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_j) & A \neq \emptyset \\ 0 & A = \emptyset \end{cases} \quad (6)$$

式中 $K = \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_j)$ 为证据冲突因子,反映了证

据间冲突程度, $1-K$ 称为归一化因子,可以减弱两个信息源信息的冲突性。需要注意的是,当且仅当归一化因子不为 0 时才能进行信任度赋值。若证据冲突因子为 1 时,所有证据都互不相容,进行信息融合已经毫无意义。

当各证据间冲突不大时,利用式(6)可以很容易对证据进行融合,但是当证据间冲突激烈时,利用式(6)会得出反直观结果。此外,当任意证据分配给某一命题为 0 的概率赋值,此证据会否定其他所有支持该命题的证据,出现“一票否决”的现象,因此需要根据冲突信息对证据理论进行改进。

3.2 DS 证据理论改进模型

为了克服 Dempster 合成规则不能处理高度冲突信息的缺陷,首先根据证据 i 与系统的冲突程度,对证据作预处理。定义证据 i 与证据系统的冲突程度为

$$\begin{cases} c_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} \\ c_{ij} = \sum_{A_k \cap B_k = \emptyset} m_i(A_k) \times m_j(B_k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_k, B_k 为辨识框架 Θ 内的不同元素; c_{ij} 表示证据 i 与证据 j 之间的冲突程度,规定证据对自身冲突程度为 0,即 $c_{ii} = 0$ 。

证据 i 与证据系统的冲突程度 c_i 可以反映证据 i 的不确定程度, c_i 的值越大说明证据 i 包含的不确定信息越多。定义模糊可靠因子以反映证据的可靠程度。

$$\omega_i = 1 - 0.5 \times \left(\frac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \right)^2 \quad (8)$$

式中, c_{\max} 和 c_{\min} 分别为系统对不同证据支持程度的最大值和最小值。证据 i 与系统的冲突越小说明

证据包含的不确定信息越少, 相应的可靠性因子也越大, 即证据越可靠。特别地, 冲突程度为 0 的证据包含不确定因素最小, 证据的可靠度为 1。

利用模糊集合理论确定了不同证据的可靠性后, 即可根据证据源的折扣理论基本信度赋值进行重新分配。设 A_1, A_2, \dots, A_n 为辨识框架 Θ 内焦元, 则经过折扣后的信度赋值为

$$\begin{cases} m'_i(A_j) = \omega_i \times m_i(A_j) & j=1, 2, \dots, k \\ m'_i(U) = (1 - \omega_i) + \omega_i \times m_i(U) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $U=A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_k$, 表示鉴别框内完全不确定项。Dempster 不能处理高冲突证据的一个重要原因即是合成规则对不确定信息的完全抛弃, 而引入不确定项后, 把冲突信息赋给不确定项, 克服了 Dempster 不能处理高冲突证据的缺陷。

4 基于区域信息融合的广域后备保护算法

4.1 疑似故障线路搜索

为了减少广域通信流量以及决策中心的计算量, 根据故障时故障电流的分布特性对疑似故障线路进行筛选。电网发生故障后, 其故障电流的分布特性如图 3 所示。图中 ΔU_f 、 ΔI_L 分别表示电压和电流的故障分量。

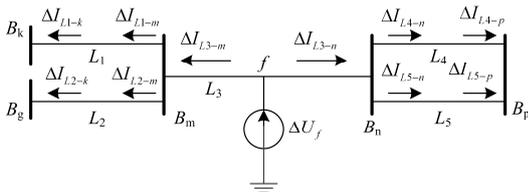


图 3 故障电流分布特性

Fig. 3 Characteristics of fault current distribution

实际电网各变电站支路较多, 电网发生故障后, 距离故障点越近的线路故障电流越大, 互感器检测到的故障电流最大值位于实际故障线路两端, 即 ΔI_{L3-m} 或者 ΔI_{L3-n} 。当故障线路附近的变电站成串联连接时, 最大故障电流可能分布在几条线路上, 但其中必然包含实际故障线路。因此可根据电流故障分量进行排序, 并将排序前 3 条线路确定为疑似故障线路。

4.2 基于区域信息的保护 BPA 赋值

4.2.1 保护信息的基本概率分配函数

区域信息融合可用的证据包括: ①主保护: 电流差动或者纵联距离保护; ②后备保护: 距离保护 I 段和 II 段。对于高压输电线路, 主保护一般要求双重化配置。以值“1”表示保护动作, 值“0”表示保护未动作。对于主保护和距离保护 I 段的保护

范围都为本线路的全长, 因此如果主保护或者距离保护 I 段动作, 相应线路的 BPA 赋值 1。距离保护 II 段的保护范围伸长到下一级线路中, 因此距离保护 II 段动作不能直接为本线路故障的 BPA 赋值 1。设距离保护 I 段和 II 段的保护范围分别为 P_{L1-1} 和 P_{L1-2} , 则为本线路故障 BPA 赋值为 $x=(1-P_{L1-1})/(P_{L1-2}-P_{L1-1})$, 相邻线路故障的 BPA 值为 $1-x$ 。因此距离保护 II 段根据其动作情况, BPA 分配如表 1 所示。

表 1 距离保护 II 段的 BPA 值

	本线的概率分配		邻线的概率分配	
	故障	正常	故障	正常
动作	x	$1-x$	$1-x$	x
未动作	0	1	0	1

4.2.2 区域证据归一化

电网中同时发生两点故障的概率很低, 而两个故障都由后备保护切除的概率更低。因此, 可假设同一时刻只有一个故障发生。现有的信息融合方法把各个保护看成不同的个体, 对各个保护单独赋值, 忽视了保护系统其他保护的動作情况。为了防止为误动作的保护赋过大的证据 BPA 值, 对保护区域内同一类型的保护动作证据归一化处理, 以减轻保护误动作影响, 避免出现故障线路误判断, 以图 4 进行说明。

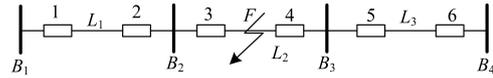


图 4 简单示例

Fig. 4 A simple example

如图 4, 当线路 L_2 发生故障后, 正常情况下保护 3 和保护 4 动作, 保护动作向量表示为 $\mathbf{P}=[0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$, 此时线路 L_i 故障的 BPA 值为

$$m(L_i) = \frac{p_m + p_n}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (10)$$

式中, p_m, p_n 分别表示线路 L_i 两端保护动作情况。容易计算得 $m(L_1)=m(L_3)=0$, $m(L_2)=1$; 当保护 2 误动作时, $m(L_1)=0.33$, $m(L_2)=0.67$ 。此时故障线路 L_2 的 BPA 赋值较大, 但是非故障线路 BPA 赋值却依然很小; 当线路 L_1 上保护 1 和 2 都误动作时, $m(L_1)=0.5$, $m(L_2)=0.5$, 此时针对于这个证据, 并不能确定线路 L_1 和 L_2 故障情况, 但是可根据其他证据的動作情况进行故障识别。因此把区域内同一种保护动作情况进行归一化处理作为证据, 可以有效抑制线路保护误动作时的导致融合结果出错的现

象, 提高保护的容错性能。

4.3 广域后备保护方案

本文的辨识框架 Θ 中包含 3 个元素, 即为 3 条疑似故障线路。算法的流程如图 5 所示, 主要包含以下步骤。

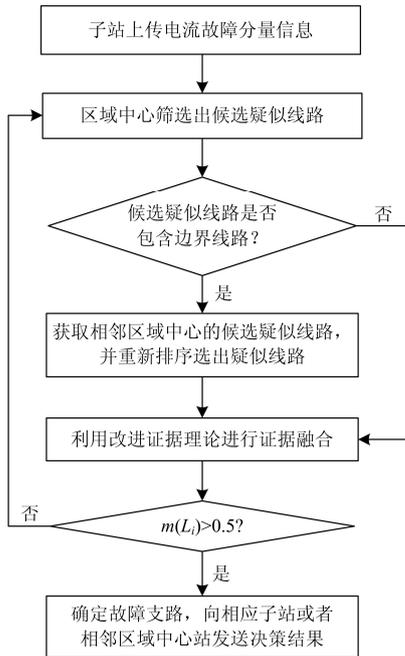


图 5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flow

1) 首先根据中心站选取原则和区域边界交互原则对广域保护系统分区。

2) 各个分区进行疑似故障线路搜索。各个区域的决策中心对子站上传的故障电流信息进行排序, 并选取故障电流分量最大的 3 条线路为本区域内的疑似故障线路。当某个区域疑似故障线路包含边界线路时, 两区域中心进行通信, 并从交互的两个区域内选出故障电流分量最大的 3 条线路为疑似故障线路。

3) 区域中心站利用改进 DS 证据理论进行故障识别。当故障线路处于本区域时, 向相应线路发送跳闸指令, 当故障线路不处于本区域时, 把故障识别结果发送到相邻区域中心站。

5 算例仿真

5.1 广域保护分区

为了验证分区算法的有效性, 以 IEEE39 节点系统进行分区测试, 算法用 Matlab 编程实现。为了简化分区计算, 省略发电机和负荷, 并假设通信时间的约束条件为中心站到子站最短通信路径的最大值不超过 5 个拓扑距离。通过初次分区和分区融合

两个步骤完成分区, 结果如图 6 所示。图 6 中带▲的变电站即为区域中心站。从图 6 可以看出, 中心站到各子站的最短通信路径中最大的路径长度为 3, 满足约束条件。

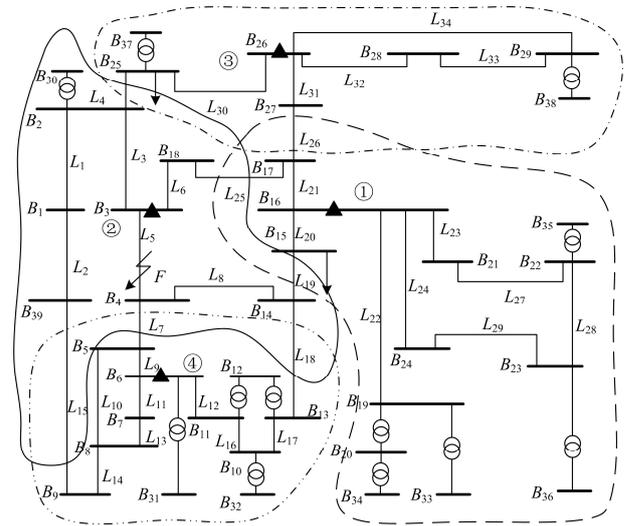


图 6 IEEE39 节点模型分区结果

Fig. 6 Division result of IEEE39 node model

5.2 基于区域信息融合的容错性分析

每条线路保护设置情况为: 主保护两套, 距离保护 I 段, 距离保护 II 段。故障线路为 L_5 , 故障位于母线 B_4 侧全长的 20% 处。此时疑似故障线路 L_5 , L_7 , L_9 是由分区 2 和分区 4 共同确定。

1) 保护拒动时算法性能

保护区内随机产生 1~6 个保护拒动, 故障信任度计算结果如表 2 所示。

表 2 保护拒动时算法性能

Table 2 Performance of algorithms when protection rejection

线路	1~6 保护拒动时信任度					
	1	2	3	4	5	6
L_5	1.000	1.000	0.987	0.922	0.810	0.633
L_7	0.000	0.000	0.002	0.011	0.019	0.024
L_9	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
U	0.000	0.000	0.011	0.067	0.170	0.341

从表 2 可以看出: 当保护区内发生 1~6 个保护拒动时, 线路 L_5 故障信任度大于 0.5, 算法依然可以正确识别故障线路; 当发生 7~8 个保护拒动时, 由于拒动保护太多, 不确定项 U 的值大于 0.5, 说明根据已有证据已经不能判断故障线路。特别是当全部 8 个保护都拒动时, 所有线路故障的信任度都为 0。同时从表 2 可以看出, 随着保护拒动数目的增多, 非故障线路的信任度一直很小, 不确定项的

信任度值不断增加, 因此算法不会产生误判现象。

2) 保护误动时算法性能

保护区内随机产生 1~12 个保护误动作, 故障信任度计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看出: 当保护区内随机发生 1-10 个保护误动作时, 可以正确

识别故障线路; 当发生 11-12 个保护误动时, 由于误动作保护的干扰, 线路 L_5 的故障信任度已经降到 0.5 左右, 不能识别出故障线路, 但是非故障线路的故障信任度依然不到 0.3, 不会出现故障线路误判的现象, 因此所提算法具有良好的防误动性能。

表 3 保护误动时算法性能

Table 3 Performance of algorithms when protection malfunction

线路	1~12 个保护误动作时线路故障的信任度											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_5	1.000	0.999	0.976	0.934	0.870	0.806	0.729	0.665	0.600	0.555	0.508	0.464
L_7	0.000	0.000	0.013	0.031	0.063	0.091	0.127	0.158	0.191	0.211	0.240	0.265
L_9	0.000	0.000	0.006	0.023	0.046	0.074	0.109	0.136	0.169	0.202	0.226	0.253
U	0.000	0.000	0.005	0.013	0.021	0.029	0.036	0.042	0.040	0.032	0.027	0.019

6 结论

本文针对广域保护通信流量大、容错性不高等问题, 在有限广域保护分区思想的基础上, 研究了广域保护分区和故障识别问题。

1) 提出了通过初次分区和分区融合两个步骤完成区域划分的方法。首先通过最短距离进行中心搜索, 并结合区域边界线路交互原则完成初次分区; 初次分区完成后, 在满足通信约束条件下对包含变电站数目少的分区进行拆分融合, 最终完成区域划分。

2) 利用改进 DS 证据理论, 对归一化后的区域内故障线路 BPA 值进行融合, 在保护误动或者拒动的情况下依然能正确识别故障线路, 算法容错性高。

参考文献

- [1] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25. DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [2] 徐岩, 韩平. 防止距离III段保护因过负荷误动方法的分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 1-7. XU Yan, HAN Ping. Analysis and improvement for the scheme to prevent zone III distance protection from incorrect operation caused by non-fault overload[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 1-7.
- [3] 谷松林. 基于广域保护系统的距离后备保护整定方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 40-47. GU Songlin. A distance backup protection setting scheme based on wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 40-47.
- [4] 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. 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.
- [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] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80. DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80.
- [7] 尹项根, 汪旻, 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.
- [8] 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.
- [9] 田聪聪, 文明浩, 刘航, 等. 基于相邻变电站信息融合的广域后备保护系统[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 83-90. TIAN Congcong, WEN Minghao, LIU Hang, et al.

- Wide-area backup protection system based on information fusion with adjacent substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 83-90.
- [10] 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.
- [11] 汪旻, 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 Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [12] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于多信息融合的广域继电保护新算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 14-18.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection algorithm based on multi-information fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 14-18.
- [13] 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.
- [14] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 集中决策式广域后备保护的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 based on centralized decision-making mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 212-219.
- [15] 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): 112-122.
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): 112-122.
- [16] 徐天奇, 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 Tianqi, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Analysis on functionality and feasible structure of wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 93-97.
- [17] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 基于证据理论融合的广域后备保护新方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 246-255.
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A new algorithm of wide area backup protection based on evidence theory fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 246-255.
- [18] STAHLHUT J W, BROWNE T J, HEYDT G T, et al. Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signal[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 84-91.

收稿日期: 2016-03-11; 修回日期: 2016-04-22

作者简介:

孔德洪(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 504296972@qq.com

吕飞鹏(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统。E-mail: fp.lu@tom.com

(编辑 姜新丽)