

适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略

尹项根, 汪旻, 张哲

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

Zone-division and Tripping Strategy for Limited Wide Area Protection Adapting to Smart Grid

YIN Xiang-gen, WANG Yang, ZHANG Zhe

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

ABSTRACT: Wide area protection based on multipoint communication becomes one of the hottest researches in power system with the frequent occurrence of blackout accident and the development of smart grid. A cellular-limited wide area protection system of centralized decision by zone-division was presented with the analysis on the development and practical engineering application of wide area protection. The paper discussed the principle and the method of the protection zone-division based on the optimization of communication information, and the tripping strategy based on protection match. The example analysis result proves the feasibility of these conclusions. The research aims to impel wide area protection from conceptual exploration into application, so as to meet the requirement of the development of smart grid with complex structure and operation diversity.

KEY WORDS: intelligent power grid; limited wide area; protected zone division; tripping strategy

摘要: 随着大范围停电事故的频发以及智能电网技术的发展, 基于广域多点信息的广域继电保护成为热点研究问题。基于对广域继电保护技术发展前景与工程实用化要求的分析, 论述一种蜂窝式分区域集中决策有限广域继电保护系统, 并重点研究了基于通信信息优化的保护分区原则和方法, 以及符合保护配合要求的保护跳闸策略。以某电网为例进行实例分析, 验证了上述结论的可行性。此研究旨在促进广域继电保护从原理性探索向应用的转化, 用以应对具有结构与运行多样性的智能电网的发展要求。

关键词: 智能电网; 有限广域; 保护分区; 跳闸策略

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877031)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877031).

0 引言

随着电网的扩大与复杂化, 传统后备保护的整定配合越来越困难, 难以适应电网结构或运行工况的非预设性变化。而近年来以建立高效、安全、环保、灵活应变的电力系统, 关注分布式清洁能源的智能电网的发展, 要求电网具备更复杂的运行多样性^[1-2], 这使得从根本上改善保护适应性和智能化的要求更为迫切。智能的基本特征是信息化、自动化、互动化, 主要依靠信息平台建设和通信技术实现, 因此, 基于广域信息构成的广域继电保护是提高电力系统继电保护尤其是后备保护性能、适应智能电网发展的一条可行研究路径^[3-4]。

目前广域继电保护原理研究与初步探讨取得了较好研究成果, 那么进一步应该研究如何系统地考虑广域继电保护在面对实际电网、解决工程应用方面的技术问题。就重点解决后备保护适应性而言(也是广域继电保护关注的重要研究方向之一), 早在20世纪80年代就开展了相关研究^[5-7], 主要有2种不同的研究思路: 一种长期研究方法是通过跟踪系统运行方式的变化实现全网实时计算, 重新整定保护定值, 但这种在线整定的自适应保护同样难以避免即使在稳定电网系统中都很难处理的后备段整定配合问题, 同时也存在着影响域划分等难题; 广域继电保护的另一种实现方式, 即利用广域电网信息进行故障元件定位, 在相邻保护之间通过简单的时序配合实现正确的保护动作, 能更为有效地解决后备保护遇到的问题, 并且改变了依靠本地或被保护元件的信息的多段式后备保护配合方式, 从根本上避免了过负荷连锁跳闸的发生。目前相关研究

主要集中在根据广域信息确定故障点的原理算法,并讨论相应的系统构成与保护动作分析。如文献[8]提出分布式的基于广域电流差动原理的保护算法,以实现主后备保护功能,但没有讨论近后备问题,对于失效元件引起的后备保护动作研究不够深入。文献[9]提出一种基于智能体的广域电流差动保护系统,但没有讨论包括分布式的保护智能体与基于数据与监控采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)的保护区划分专家系统的系统结构。针对纵联方向比较原理,文献[10]提出分布式智能电子设备(intelligent electronic device, IED)结构,分布式保护结构将使系统结构与通信逻辑较复杂,因此仅依赖 IED 难以灵活实现较大区域内的后备动作策略;文献[11]提出变电站集中模式,弱化 IED 作用,通信与决策过程得到一定简化,但未深入讨论保护动作策略;文献[12]提出以区域调度中心为后备保护系统中心的区域集中模式,但没有讨论该结构下系统区域划分和主站的选择准则。其他研究(如文献[13-14])明确提出了适合工程应用的区域保护概念,但同样没有讨论区域划分与主站选择等关键问题。

广域继电保护的研究应该面对实际电网与工程化应用,讨论系统结构、保护分区与跳闸策略等问题,并考虑以特高压电网为骨干网架、各级电网协调统一,分布式电源灵活接入等特点。保护系统还要具备应对更为复杂且灵活的系统运行方式的能力,以适应智能电网的发展。适应智能电网的广域继电保护系统还具备几个有限性:1) 主要考虑加强电网“第一道防线”性能,广域保护承担任务的有限;2) 继电保护功能与范围所确定的采集与被保护对象相关联的信息范围是有限的;3) 全电网的广域分区由各个有限区域共同组成。在这种背景下,构建包括分布式 IED、变电站集中或区域集中等不同模式的有限广域继电保护系统(简称有限广域系统)成为实现有效广域继电保护的可行方法。

本文在描述有限广域继电保护系统的一种分区域集中决策构成方案的基础上,结合广域继电保护在实际领域的应用特性,论述了该模式下的保护系统结构、保护分区原则及根据实际现场接线的跳闸策略等方面的问题。

1 分区域集中决策的保护系统

1.1 系统总体介绍

单个有限广域继电保护系统的结构如图 1 所

示。在构建包含广域范围内全部变电站的广域继电保护的过程中,实现这种广域范围内的信息交换是不必要的^[13-14]。在充分利用有限范围的信息的基础上,提高电力系统继电保护的水平,是广域保护系统的发展趋势。有限广域信息的应用势必会影响电网保护结构,而建立在区域集中基础上的分区域集中决策的系统结构更加适合大电网通过有限划分之后的格局;同时这种基于局部集中的分布式终端结构也为今后电网分区域的安全稳定计算提供了基础。

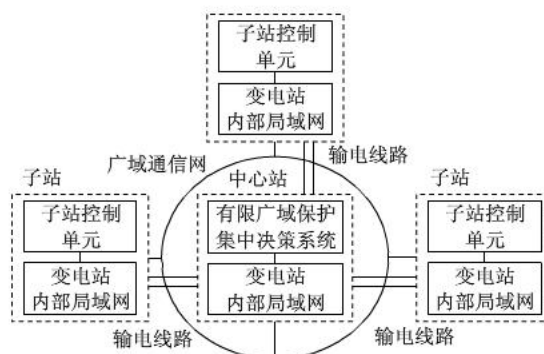


图1 单个有限广域继电保护系统结构

Fig. 1 Structure of single limited wide area protection

分区域集中决策的有限广域系统将广域电网视为由若干个有限区域共同组成,在每个有限区域内以某个变电站为中心,称该站为该有限广域系统的中心站,除中心站外的其他变电站称为该系统的子站。各变电站采集本站内所有 IED 测量信息与相关设备状态信息,子站仅与所属区域中心站进行通信并接受其远程控制。每个中心站设置有限广域集中决策模块,其主要任务有:通过采集本区域内全部变电站信息准确判断故障元件;制定动作策略并将指令发送至各子站。各子站根据接到的指令结合自身运行方式与主接线方式来形成完整后备保护。

利用广域信息(包括站内就地信息)的最主要目的在于改善后备保护,解决整定配合难题,但丰富信息的利用,也能够为改进主保护性能起到一定的作用;同时,在那些没有配置双重化主保护的系统,当主保护检修或故障退出时,将具有绝对选择性、动作速度较快的广域继电保护作为备用主保护投入也是一种可行的处理方法。为解决远后备保护的失配问题,要求获取与保护对象相关联的有限广域的信息,后备保护范围又确定了所需信息范围。由于控制范围扩大,这些局部集中的单元决策点能制定并执行更快速、有针对性的后备动作策略,提高应对复杂的现场接线的能力。

1.2 构建系统的重要环节

通信系统是保障广域继电保护性能的基础,它约束保护与控制范围。随着相量测量单元(phase measurement unit, PMU)、广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的发展,结合基于IEC 61850的数字化变电站的逐步普及,以全站信息为整体的同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)环网传输模式成为信息传输的发展趋势。文献[9]理论上验证了利用SDH环网实现广域差动保护的性能,仿真通信延时最高仅为24 ms。

有限系统拟采集的电网信息量已经能够满足目前比较成熟的广域电流差动、基于纵联比较原理的广域继电保护等算法的需要,而利用区域信息的集中,提高算法性能,对基于冗余信息量故障决策的智能保护算法或信息融合技术进行研究^[14],进一步提高系统对于坏数据的抗干扰能力与容错性^[15],成为研究的重点。决策单元采用多种不同原理的保护双重化配置后能有效保证故障判别的可靠性。

本文将结合有限广域系统结构,在讨论保护原理研究与相关系统设计之前,先重点讨论保护分区与跳闸策略两问题。

2 保护分区与电网图论分析

2.1 中心站、子站的选取与有限广域半径

图论作为分析复杂工程的有力工具已在电力系统相关领域有广泛应用,应用于有限广域系统能够为系统实现保护分区与保护区动作范围选择等决策时提供理论依据与数学描述^[16]。

1) 中心站、子站的选取。将被保护电网按照拓扑疏密程度粗略区分成若干拓扑局部密集的区域电网。利用电网的图论描述,考查局部区域的邻接矩阵及相关推算,优先选取相邻节点多、路径关联密集的变电站作为中心站。当电网拓扑较简单时,一种快速确定中心站的思路是:选取电压等级相对较高的重要变电站,因为这类变电站往往就是这个局部电网的联络线集合点;同时按照局部区域的邻接矩阵及相关运算与约定的有限广域半径,就可以搜寻到属于辐射范围的子站。

2) 有限广域半径的确定。定义有限广域半径 R 为中心站距离最远子站的最短逻辑路径,1个逻辑路径代表直接联接于2个变电站的距离。在决定 R 的过程中考虑2点影响。一是基于通信信息优化的区域划分对 R 有明确界定,优化主要考虑:实现准确故障识别与对信息范围、类型的要求;容错技术

对信息冗余的要求;保证系统运行效率对信息维度的要求;确保区内、跨区域信息交换对信息质量的要求。一般描述为: $R \leq N$, $N=1$ 时,表现为变电站集中模式,分区过程简单,子站归属清晰; $N \geq 2$ 时,表现为区域调度中心模式,分区过程相对复杂,子站选取标准与结论也是通用的。二是根据保护配合要求对区域进行划分。远后备保护需要由故障元件的相邻元件保护动作实现,以中心站为核心 $R=2$ 范围内的电气信息能够作为中心站相关联元件故障的远后备保护,所以 R 能够根据当前通信能力与期望的系统控制范围自定义,为便于讨论且较全面地反映实际工况下保护的分区过程,暂定 $R \leq 2$ 作为有限广域分区标准。 $R \leq 2$ 限制了系统规模,信息维度有限,通信性能得到保障^[13],相关研究结果验证了 $R \leq 2$ 能够满足故障定位与信息冗余的要求^[7-11]。

2.2 保护分区原则与方法

1) 从预先选取的中心站开始,根据网络拓扑辐射关系,按照既定的区域半径($R \leq 2$),即选取与中心站相邻子站与次相邻子站作为有限广域子站,中心站与子站共同组成一个有限广域系统。

2) 从已经组成的有限广域系统边界开始,在未分区网络中再次进行中心站选取,向外搜索并组成其他的有限广域系统。适当控制辐射半径,保证每个元件都有明确的所属系统,根据地理形势与尽量平均分配的原则,形成不规则蜂窝式的网络结构。

3) 称归属相邻有限广域系统的子站为边界子站。边界子站的信息向其所属的所有中心站反馈,并接受这些中心站的调度。若两中心站也存在输电线路联接,则互相视对方为各自的边界子站。

4) 在中心站的搜寻过程中,当重叠子站的标记逻辑路径不同时,该子站归属于逻辑路径较短的系统内,并选取其中某站作为边界子站。子站与其相邻子站标记的逻辑路径相同时,选择逻辑路径短的作为边界子站。

5) 主站决策模块能够对所处不同电压等级网络进行故障判别,不考虑跨变压器配合,在同电压等级环网下做出动作决策;同时,在划分过程中发电厂的处理方式与变电站一致。

6) 当保护范围涵盖被保护的广域电网,所有元件存在确定的所属有限广域系统时,保护分区结束。

实际电网是逐渐发展建设的过程,在工程应用背景下讨论保护分区,还需要考虑系统规划、调度、

运行方式、保护、通信等设计和运行人员的经验对保护分区的特定要求,如在建或将来规划的变电站等,并对保护分区结果进行适当调整,使其更具有工程应用价值。

2.3 基于图论的有限广域电网拓扑识别

实际拓扑分析是一个多次连通性复杂分析过程,包括网络拓扑分析与场站拓扑分析两部分。此处重点关注利用图论的网络拓扑分析进行保护分区,尤其在电网结构遭受较大改变,甚至是遭遇极端灾害时的网架结构(大规模的)不规则改变,对现有保护系统造成严重破坏时,结合上述技术迅速重新组成电网的有限广域系统,恢复紧急状态下的电网保护。为简化分析,假设场站内部具有连通性,将图论的基本元素与电力系统概念作如下定义:顶点映射已经具备连通性的变电站(发电厂);边映射场站间的联接关系,由输电线及点线路两端断路器的集合来表述,边存在的条件是,存在输电线路且两端断路器处于闭合状态。中心站将根据获取子站的断路器(刀闸)状态信息,以修正各自拓扑结构。

2.4 电网分区举例

以 IEEE 11 节点网络作简单分析,如图 2 所示。

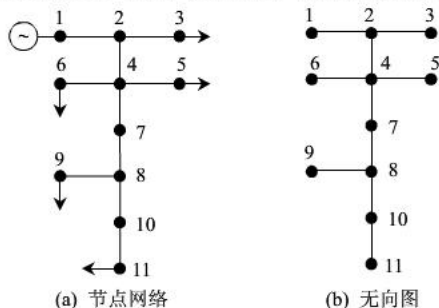


图2 IEEE 11 节点网络与对应无向图

Fig. 2 Eleven-node system structure and undirected graph

定义该无向图的邻接矩阵为 D_1 , 次邻接矩阵为

$$D_2。D_{1ij} = \begin{cases} 1, \text{节点} i \text{邻接节点} j \\ 0, \text{节点} i \text{不邻接节点} j \end{cases}, D_2 = (D_1)^2。$$

若有矩阵 E 表示某有限保护系统所包含的变

电站, $E_{ik} = \begin{cases} 1, \text{该系统包含变电站} k \\ 0, \text{该系统不包含变电站} k \end{cases}$, 则 $D_1 \cap E$

表示某有限保护系统变电站间邻接关系, $D_2 \cap E$ 则表示次邻接关系。矩阵能够帮助系统快速确定初始邻接关系,并为决策提供必要拓扑信息。

统计每个节点的直接邻接节点集合为 $\{1,3,1,4,1,1,2,3,1,2,1\}$, 包含次邻接节点集合为 $\{3,6,3,7,4,4,7,5,3,4,2\}$ 。保护分区实际比较灵活,这里参考集合

关系提出一种分区结果:优先考虑从直接邻接节点较多的 2, 4, 8 中选取一个节点作为中心站。由于该电网简单,可选取集合最多的节点 4 首先作为中心站,然后尽量在以节点 4 为中心,半径 $\geq R$ 的范围内中选取一个中心站,以求能够覆盖与尽量平均分配本网络,参考集合关系,节点 8 符合要求。根据邻接关系,设定有限广域系统 1 $\{4: 1,2,3,5,6,7\}$, 系统 2 $\{8: 7,9,10; 11\}$, 其中节点 7 为边界子站。当节点 3 因故退出(如节点 2,3 间线路故障被切除),中心站将根据获取节点 3 的断路器(刀闸)断开状态信息,不符合边存在的条件,此中心站主动将节点 3 除去以修正拓扑。

3 有限广域系统跳闸策略

3.1 故障模式识别

后备保护实际是针对失效元件的处理,跳闸策略是根据故障元件与失效元件的信息,在保护配合要求界定的区域内,制定的缩小失效元件引起停电范围的保护动作方式。

系统中的任何子站(中心站)根据后备保护配合的要求,依靠区域半径 $R=2$ 范围内的动作配合,能够实现包括远后备的保护功能。故障模式识别就是配合子站的筛选过程,主要有以下 3 种:

1) 模式 1。故障发生在一般子站(包括中心站)外,如线路故障。由所属有限广域系统的中心站进行处理,根据系统的邻接矩阵,将与故障元件相邻的子站选定为近后备站,与近后备站相邻(故障元件次相邻)的子站选定为远后备站。如图 2 中心站 4 与子站 2 之间线路故障, $\{2,4\}$ 作近后备站, $\{1,3,5,6,7\}$ 作远后备站。

2) 模式 2。故障发生在一般子站(包括中心站)内,如母线故障。由所属有限广域系统的中心站进行处理,故障元件所属子站选定为近后备站,与近后备站相邻的子站选定为远后备站。如图 2 所示,子站 10 母线故障, $\{10\}$ 作近后备站, $\{8,11\}$ 作远后备站。

3) 模式 3。故障发生在边界子站范围(无论站内外)。处理过程与模式 1, 2 类似,只是边界子站范围内故障,同属多个有限区域保护,需由多方中心站复合控制下形成后备保护。站外故障时,故障元件所在有限广域内,与故障元件相邻的子站选定为近后备站,与近后备站相邻的子站选定为远后备站;另外,由边界子站隶属的其他中心站确定对侧方向的远后备站。站内故障时,处理方式类似。如

图2 边界子站7 母线故障, {7}作近后备站, {4,8}作远后备站。

边界子站站内、外故障在识别处理上是有区别的。站内故障时(包括同属于两系统的边界子站间输电线路故障), 所属全部中心站都能发现故障元件; 而站外故障时, 只有故障元件所属的有限广域系统能识别故障, 这时需要依靠边界子站向其他有隶属关系的中心站发送出现故障的警报, 然后由该中心站做出相应决策。

3.2 系统运行流程

1) 中心站有限广域集中决策模块感知故障并判断出故障元件, 根据故障元件所处位置识别故障模式。

2) 中心站集中决策模块根据故障模式选择合适的子站以实现后备保护策略, 即时发送后备保护指令给相应子站(包括中心站)。后备保护指令包括近后备指令与远后备指令。

3) 子站判断若满足后备保护启动条件, 则自动根据本站运行方式、接线方式形成后备动作策略。同时监控故障元件主保护动作与断路器状态: 若满足动作条件, 则后备保护正确动作出口; 若满足返回条件, 则自动解除命令, 恢复正常运行状态并反馈给中心站。运行流程如图3所示。

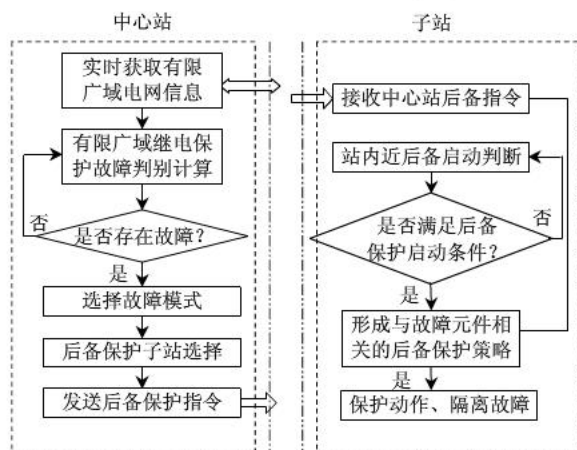


图3 运行流程图

Fig. 3 Flow chart of operation

变电站近后备保护启动条件是中心站通知(防止主保护失效情况下)或子站监测到本站有主保护动作。变电站近后备保护动作条件: (处于近后备启动状态) $\cap$ (检测到本站对应故障元件的主保护或断路器未动作) $\cap$ (就地存在故障电气量)。

变电站远后备保护启动条件由中心站通知。变电站远后备保护动作条件: (处于远后备启动状态) $\cap$

(等待时间超过近后备动作最大延时) $\cap$ (就地存在故障电气量)。

变电站后备保护返回条件: 中心站判别故障已经被隔离或消除, 向子站发送保护返回指令。

3.3 变电站不同主接线下跳闸策略

断路器失灵保护动作造成的经济损失比远后备保护动作小, 结合失灵保护考虑有限广域系统的跳闸策略具有实际意义。对于未装设失灵保护的子站, 当发生断路器失灵时缩小远后备保护的动作时间和切除范围; 对于装设失灵保护的子站, 利用有限广域信息与判断来提高断路器失灵保护的灵敏性与可靠性。将断路器失灵处理纳入后备保护整体中来以实现近后备的保护称为智能失灵保护, 其主要任务是: 利用集中策略的判别结论进行故障元件相关的主保护、断路器识别; 利用场站拓扑分析, 搜索相关断路器的相邻所有断路器; 监测保护动作信息、断路器状态信息、必要就地故障电气信息; 判断是否存在失效元件, 若存在, 则随即跳开事先选取的对应断路器。下文分析3种主要主接线方式下根据故障模式与后备指令的跳闸策略。

单母线(或单母线分段)接线方式:

1) 模式1(模式2)+近后备指令。搜索故障元件所属本站的断路器, 作为一级近后备的动作元件; 启动智能失灵保护形成二级近后备跳闸。

2) 模式1(模式2)+远后备指令。搜索故障元件与本站联接线路的所属本站断路器作为远后备的动作元件。

3) 模式3下的执行与上述情况一致, 只是有某侧远后备策略由外区域中心站处理。

双母线是220 kV及以上变电站较常用的主接线方式, 各种模式的近后备、远后备策略与单母线情况一致, 但略为复杂。如模式1+近后备指令: 搜索故障元件所属本站的断路器, 作为一级近后备的动作元件; 同时以上述单个断路器为目标, 启动智能失灵保护, 搜索与其联接在同一条母线上的相邻所有断路器(包括母联断路器、分段断路器), 形成二级近后备跳闸集。当带有旁路母线时, 专用旁路断路器视为出线断路器, 跳闸处理与正常双母线运行一致。

选取双母线单分段接线方式作简单说明, 如图4所示, 假定初始运行方式是双母线同时投入, T1、L1接于母线I, T2、L3接于母线II, L2、L4接于母线III。

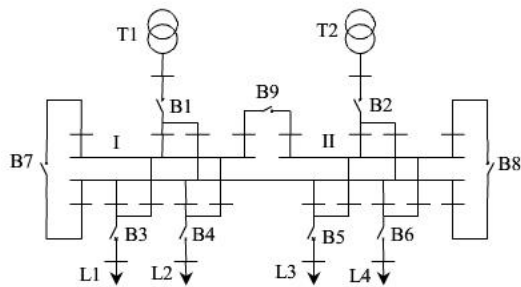


图4 双母线单分段接线

Fig. 4 Sectionalized double bus configuration

若 L2 线路故障, 该站属于模式 1+近后备, 则 {B4} 作为一级近后备, {B6, B7, B8} 作为二级近后备。若母线 I 故障, 该站属于模式 2+近后备, 则 {B1, B3, B7, B9} 作为一级近后备, 站内失灵依据上述 4 个断路器状态制定失灵对策作为二级近后备。若故障发生在相邻变电站, 经由 L2 联接, 该站属于远后备站, {B4} 为远后备。

对于一个半断路器接线方式, 正常运行时 2 组母线和所有断路器都投入工作, 各种模式的近后备、远后备策略与单母线情况一致。但如果发生联络断路器失灵, 同串两侧联接母线的断路器都跳开, 此时故障并没有被彻底隔离, 通过联络线延伸至下一段。若下一段是出线段, 此时由本站对下一级变电站发远跳命令; 若下一段是电源进线, 则跳本站相关变压器侧断路器。

4 实例分析

按照保护分区原则对鄂东地区 220 及 500 kV 电网做有限广域系统划分, 由于在同电压等级环网下做出动作决策, 实例中仅考虑 220 kV 输电网络。

先以凤凰山、磁湖 2 座直接邻接联络线较多的 500 kV 变电站为中心站, 并定义为系统 1 (中心站为凤凰山) 和系统 2 (中心站为磁湖)。在剩余区域再次选取中心站, 争取用最少的有限区域全部涵盖, 形成系统 1~6: 与系统 1 邻接的系统 3 (中心站为咸宁); 与系统 1 邻接的系统 4 (中心站为北洋); 与系统 3 邻接的系统 5 (中心站为郎家); 与系统 3 邻接的系统 6 (中心站为蕲春)。大吉到石板路的输电线路由鄂西地区的系统辐射涵盖; 自此鄂东地区保护分区完成。如图 5 所示, 节点命名由站名与所属系统编号组成, 若属于边界子站则被标记多个系统编号。

以系统 3 的茶庵站为例进行故障分析, 假设茶庵站 220 kV 主接线、初始运行方式如图 4 所示, 线路 L4 为到塘角镇的输电线路, 其邻接矩阵为

{咸宁 塘角镇 汪庄余 吴田 茶庵 蒲圻 鹿门}						
0	1	1	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0
1	1	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0

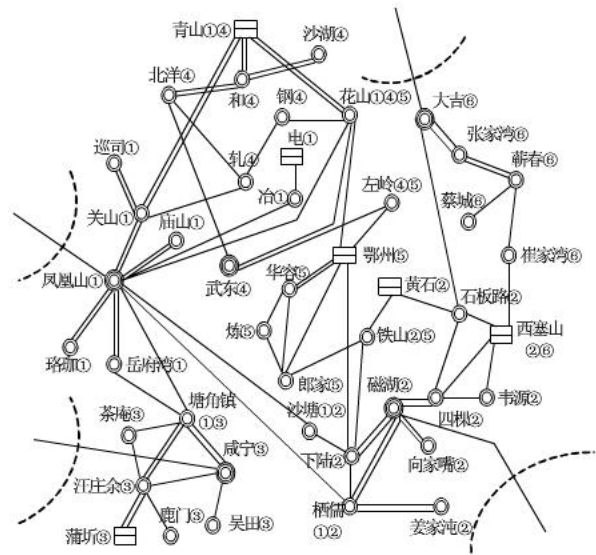


图5 鄂东地区 220 kV 电网

Fig. 5 220 kV eastern Hubei province power grid

母线 II 故障: 茶庵为近后备站, {B2, B5, B8, B9} 为一级近后备, 站内失灵依据上述 4 个断路器状态制定失灵对策作为二级近后备; 塘角镇、汪庄余为远后备站。

线路 L4 故障: 茶庵、塘角镇为近后备站, {B6} 作为一级近后备; {B4, B7, B8} 为二级近后备; 汪庄余、咸宁为远后备站。由于塘角镇站是边界子站, 凤凰山系统接到塘角镇站的故障警报后, 确定岳府湾、凤凰山为远后备站。

5 结论

电网的扩大与复杂化, 以及智能电网的建设, 要求电力系统继电保护尤其是后备保护具备更好的适应性。本文结合工程应用与应对全网适应性的要求, 构造一种分区域集中决策的有限广域继电保护系统, 并研究其保护分区与跳闸策略等相关技术。

1) 构造由多个独立的有限广域系统互相邻接共同组成被保护电网的保护系统的不规则蜂窝式系统结构, 并提出基于通信信息优化的保护分区原则和方法, 较好适应了实际电网复杂的环网结构, 具备应对电网发生非预设变化的自适应能力。

2) 系统研究了有限广域继电保护结合现场接线的跳闸策略。由保护配合要求界定的配合子站选取思想, 保证了子站间清晰的后备保护职责。利用系统邻接矩阵, 能快速准确地识别与选取配合子站。

参考文献

- [1] 张保会. 加强继电保护于紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[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).
- [2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
Xiao Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4(in Chinese).
- [3] 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): 7-14
Yi Jun, Zhou Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-14(in Chinese).
- [4] Ramaswami R, Damborg M, Venkata S. Coordination of directional overcurrent relays in transmission systems: a subsystem approach [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, 5(1): 64-70.
- [5] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51-56.
Cao Guochen, Cai Guowei, Wang Haijun. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 51-56(in Chinese).
- [6] Serizawa Y, Myoujin M, Kitamura K, et al. Wide-area current differential backup protection employing broadband communications and time transfer systems[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1046-1052.
- [7] 王慧芳, 何奔腾. 输电线路集合保护及其实现[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 49-53.
Wang Hui Fang, He Benteng. Transmission line aggregate protection and its implementation[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 49-53(in Chinese).
- [8] 从伟, 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): 91-96.
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): 91-96(in Chinese).
- [9] 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).
- [10] 从伟, 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).
- [11] 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): 87-93.
Yang Zengli, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 87-93(in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 吴科成, 林湘宁, 鲁文军, 等. 分层式电网区域保护系统的原理和实现[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 72-77.
Wu Kecheng, Lin Xiangning, Lu Wenjun, et al. Principle and realization of the hierarchical region protection system for power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 72-77(in Chinese).
- [14] 汪旸, 尹项根, 赵逸君, 等. 基于遗传算法的区域电网智能保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 40-45.
Wang Yang, Yin Xianggen, Zhao Yijun, et al. Regional power network intelligent protection based on genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 40-45(in Chinese).
- [15] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10.
Xue Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts, part II: reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10(in Chinese).
- [16] 陈树柏. 网络图论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 58-60.
Chen Shubai. Graph theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 1982: 58-60(in Chinese).



尹项根

收稿日期: 2009-09-12.

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护、变电站自动化及安全稳定控制, xgyin@mail.hust.edu.cn;

汪旸(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制、电力系统人工智能技术;

张哲(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护及自动控制。

(责任编辑 刘浩芳)