

基于网格平台的广域后备保护专家系统

蔡晓烨, 房鑫炎

(上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 传统的后备保护以单元件的保护为出发点, 缺乏系统全局的观念。介绍了一种网格环境中的广域后备专家系统, 它以保证整个输电线网络的稳定与安全为基础, 从广域角度实现线路保护的目。本文首先讨论了网格技术及其在电力系统继电保护中的应用, 包括网格的基本概念和特点以及网格技术在广域后备保护中的应用前景; 之后介绍了广域后备保护专家系统 (BPES) 的基本算法和系统结构。通过仿真, 验证了其比传统后备保护的优越之处。

关键词: 网格; 广域保护; 后备保护专家系统; 继电保护

Wide area back-up expert system based on grid

CAI Xiao-ye, FANG Xin-yan

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The traditional back-up protection is based on protecting a single equipment and lack of global concept. The paper introduces a wide area back-up protection expert system, which takes the stability and security of the power system as its basis and protects the lines from a wide-area view. The application of grid computing technology in protection system is discussed in this paper, including the basic concept of grid computing and its characteristics as well as its application prospect in wide area back-up protection. The wide area back-up expert system (BPES) is then introduced. By simulations, it can be seen that BPES based on grid has much better performance than traditional back-up protection system.

This project is supported by Grand Project for National Natural Science Foundation of China(No.90612018) and Grand Project of Shanghai Electric Power Company(No.F020303).

Key words: grid computing; wide area protection; back-up expert system; relay protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)08-0001-05

0 引言

目前超高压长距离输电线路的大规模建造, 电力市场机制的逐步引入等给电力系统继电保护提出了更高的要求。社会的进步与发展要求更安全稳定的电力供给, 有时一次小范围的停电都会给国民经济造成重大损失。寻求更安全可靠、能互相配合协作的继电保护系统已成为一个重要研究课题。

传统后备保护在线路主保护拒动时, 需经过几百毫秒甚至几千毫秒的延时, 依靠分段式距离保护或过流保护等措施切除故障。传统后备保护的选择性较差, 动作时需切除一条或多条非故障线路, 在线路负荷较重的情况下会加剧系统的不稳定性, 甚

至引起级联跳闸, 造成电力系统瘫痪。广域后备保护是一个将传统集中式保护系统与计算机网络、智能仪器和通信技术相结合的分布式保护系统。通过网络连接和信息共享机制, 广域保护系统可以获得保护区内各变电站间及调度中心传送的数据和信息, 经过智能设备的分析和推理, 精确定位故障线路, 不经延时即可发送跳闸或闭锁指令, 大大提高了后备保护的可靠性和速动性, 对电网的安全稳定运行具有重要的意义。

网格 (Grid) 一词在 20 世纪 90 年代中期首次被用来描述用于科学和工程分布式计算的基础设施。这种基础设施把计算资源、存储设备、广域网络、仪器等连成有机的整体, 方便用户使用其中的任何资源。近年来, 有关将网格计算引入电力系统的问题吸引了越来越多电力工作者的兴趣, 文献

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助 (90612018); 上海电力公司重大项目主项 (F020303)

[1,2]对电力网格体系的结构和相关技术问题作了很多指导性的分析。在继电保护领域,广域后备保护的应用需要采集广泛地域内的数据和状态量,并实现各个变电站之间的信息交换和共享。此外,电力系统的实时测量和监控需要处理海量数据,对二次设备的硬件提出了更高的要求。网格计算在信息交换、资源共享和提高计算能力等方面为继电保护系统的发展提供了良好的应用平台。

本文首先介绍网格计算的基本概念及其在继电保护系统中的应用前景,之后介绍一种基于动作系数的输电线网络广域后备保护专家系统(Back-up Protection Expert System, BPES),讨论其在网格环境中的结构和功能,并进行仿真。

1 网格计算简介

1.1 网格计算的概念和特点

作为一门新兴的技术,网格计算还没有明确通用的定义。但根据网格的普遍特性可以认为,网格是一个集成的计算与资源环境,它能够充分吸收各种计算资源,并将它们转化成一种随处可得的、可靠的、标准的同时还是经济的计算能力。除了各种类型的计算机,这里的计算资源还包括网络通信能力、数据资料、仪器设备等各种相关资源。而基于网格的问题求解就是网格计算。

网格是一个开放、标准的平台,它将位于不同地理位置的各种类型的资源联系起来成为一个有机整体,向用户群提供安全、透明、高效的服务。由于共享资源的分布性和异构性,用户数量的庞大性,需求种类的多样性,网格系统必须具备如下基本特征:

1) 共享性。资源共享是网格最根本的特征,也是网格平台建立的主要目标。任何符合网格规则的设备资源都可以接入网格,包括超级计算机、贵重仪器、大型存储设备等硬件设施,也包括数据信息、软件工具、人员等实体。网格系统中的多个用户可以共同使用一个资源,一个用户也可以同时使用多个资源;网格中的资源提供者也可以成为其它申请者的使用资源。

2) 虚拟性。由于网格中的资源具有不同的类型、功能和接口,用户的应用系统也各不相同,因而这些资源和用户都要经过虚拟化,即把实际的用户和资源虚拟化为网格用户和资源。用户使用标准、通用、开放的协议和界面访问网格系统,各种共享资源向网格提供简单统一的虚拟化接口。

3) 集成性。网格将各种资源集成为一个有机整体,协调管理分散在各处具有不同功能、管理平

台和应用体系的资源。网格将资源进行无缝连接,成为一个逻辑上的计算平台。各种资源的地理位置、接口差异性对于用户来说都是透明的,不关心的。

1.2 网格计算在广域保护中的应用

高压线路的传统后备保护有三段式相间和接地距离保护、六段式零序电流保护或反时限零序电流保护等。为了保证主保护切除故障时后备保护不动作,一般后备保护都有几百毫秒的延时。过长的延时在有些恶劣情况下会引起级联跳闸,甚至最终造成系统崩溃。

近年来,很多学者开始研究基于网络通信和人工智能技术的广域后备保护。其原理是,在探测到故障后,检查故障切除情况。若主保护拒动,则立即启动广域后备保护系统,精确定位故障线路,发送跳闸命令;若主保护发出了跳闸命令但断路器没有断开,则启动断路器失灵保护并断开合适的母线开关。该过程所要求的时间延迟主要取决于获取相关信息所需要的通信时间,与传统后备保护相比大大缩短了保护的动作时间。

广域后备保护的实现需要保护区内各个变电站之间信息的实时交换,包括网络的拓扑结构、继电器的动作反应、断路器的开关状态等。以信息共享为基本特征的网格技术为其提供了很好的应用平台。在一个保护区内所有的电气信息都是共享的,由网格中间件统一管理协调,各变电站通过开放的通信协议连接到WAN上,经几个毫秒的通信延时,方便地从网格平台调用所需的信息,做出动作决策。在此过程中,保护系统不需要了解所需信息的具体存放位置、管理机制和调用方法等,这些工作全都交给网格去完成,保护系统所要做的只是向网格提交数据调用的申请而已。

另外,广域保护要对大量数据进行分析和处理,并需要智能设备来完成独立自主的推理和决策过程。目前微机保护的数据处理性能受其自身硬件条件的限制,具有采样频率不足、速度提升有限、故障数据长期存储空间不足等局限。网格平台可以向保护系统提供足够可靠的计算、存储和仪器设备等资源。根据调度中心的申请,网格对接入的共享存储空间进行优化配置,来满足大容量的故障信息和数据的长期存放请求;网格的并行计算和分布式计算能力可以快速精确地完成数据的处理和分析推理,加快故障定位和保护动作时间;在事故分析和故障诊断方面,网格系统可以集成不同地域的设备、监控系统、诊断系统和研究人员,彼此进行信息和设备的交流共享,提高故障诊断和分析能力。

2 后备专家系统简介

文献[4]对广域后备保护专家系统 (BPES) 作了十分详细的介绍, 该系统能够根据广域范围内传统保护的动作用反应, 通过推理模块的分析, 精确推断出故障发生的线路或设备, 并发送相应的断路器跳闸或闭锁命令。为了成功地切除故障线路而不引起非故障线路的误动, BPES 需要通过网格平台实现信息交换和资源的协调利用, 获取整个保护区内电网的拓扑结构、保护装置的动作用反应和断路器的闭合开断状态等信息。

2.1 基于动作系数的专家决策系统

动作系数 (AF) 是一个介于-1.0 到+1.0 之间的数值, 其大小表示了包括多个动作单元的保护元件对故障定位过程的贡献。没有动作的保护元件的动作系数定为 0; 若故障发生在某一单独设备的正向, 则 $AF=+1.0$, 故障反向, 则 $AF=-1$; 若故障发生在正向且其保护范围包含了多个子设备时, AF 的数值在 0~+1.0 之间。表 1 列出了某些动作元件的动作系数。

一个包含有多个继电器的保护策略的 AF 值为所有继电器独立的 AF 值之和, 即

$$AF_{\text{scheme}} = \sum_{i=1}^l AF_{\text{relay}(i)} \quad (1)$$

其中: l 为保护中继电器的数量。

输电线某个终端的 AF 值为位于该终端的所有继电器的 AF 值之和, 即

$$AF_{\text{terminal}} = \sum_{i=1}^k AF_{\text{relay}(i)} \quad (2)$$

其中: k 为输电线终端所包含的所有继电器的数量, 包括主保护和后备保护。

表 1 保护元件的动作系数

Tab.1 Action factor of protection components

保护元件	AF
单元保护的跳闸继电器	1.0
I 段	1.0
II 段	1/2
无偏移 III 段	1/3
有偏移 III 段	1/15
反向功率继电器	-1.0
方向过流继电器 (正向)	1/2
方向接地故障过流继电器 (方向)	1/2
方向过流继电器 (反向)	-1.0
方向接地故障过流继电器 (反向)	-1.0

输电线的 AF 值为所有与其相联的终端的 AF 值之和, 或者为其保护策略的 AF 值之和, 即

$$AF_{\text{line}} = \sum_{i=1}^n AF_{\text{terminal}(i)} \quad (3)$$

$$AF_{\text{line}} = \sum_{i=1}^m AF_{\text{shceme}(i)} \quad (4)$$

其中: n 为与输电线相连的终端数量, m 为包括主后备保护的用来保护线路的保护策略的数目。

BPES 的决策规则分为一级和二级决策。一级决策能够识别内部故障, 它仅利用故障设备上的信息来使适当的断路器跳闸。一级决策不易被错误的信息所影响。这里定义了两条规定来寻找有故障的线路。

规定 1: 如果 $\forall i, AF_{\text{scheme}(i)} \geq 1.0 (i \in [1, 2, 3])$, 对于线路上的所有保护策略, i 是线路保护策略的编号), 那么线路存在故障。

规定 2: 如果 $AF_{\text{terminal}(i)} \geq \frac{1}{3} (i \in [1, 2, 3])$, 对于线路上的所有终端, i 是线路保护策略的编号), 那么线路存在故障。

二级决策的优先级别低于一级决策。只有在专家系统不能作出一级决策时才会采用二级决策。二级决策提出了一个故障影响区域 (FAR) 的概念, 它是由动作的保护继电器的保护范围确定的。二级决策将尽量缩小 FAR。二级决策过程中有三种方法减小 FAR。(1) AF 值为负的线路将被移出 FAR; (2) 若线路没有在动作的第 II 段保护元件的保护范围内, 可以被移出 FAR; (3) 若 FAR 中的线路多于一条, 且这些线路通过中央分段隔离开关在变电站被连接在一起的情况, 那么, 至少有一条线路可以通过打开中央分段隔离开关来移出 FAR。

2.2 网格平台上的 BPES 结构

BPES 有两种运行状态: 正常状态和紧急状态。在正常状态下, BPES 共享网格中的信息资源, 监视电网拓扑、断路器的开断状态和传统保护的动作用情况等。当检测到线路发生故障, BPES 就转入紧急状态, 启动推理过程, 确定故障切除的最佳方案。

通常一个保护区内的 BPES 分成多个分布于各变电站的子 BPES, 每个子 BPES 将自己站内设备的电气量和状态信息接入网格共享系统, 并通过 WAN 从网格中间件调用邻近变电站和调度中心的信息。这样, BPES 可以从广域角度做决策, 确定站内的断路器是否需要跳闸, 是否需要把决策传送给邻近的 BPES 子系统。

基于网格平台的 BPES 结构图如图 1 所示。

图 1 中, BPES 通信和数据采集系统借助站内

LAN 采集设备的数据和状态量,从网络中间件获取邻近变电站的信息。监视系统监视电力设备和整个网络的运行状态。专家决策系统在正常状态下处于非激活状态,只有当监视系统检测出网络状态变化时才被激活,经过一系列规则的推理后精确定位故障设备,确定最优的保护动作方案。跳闸和闭锁系统根据专家决策系统的分析结果对相应的断路器发送跳闸或闭锁指令。

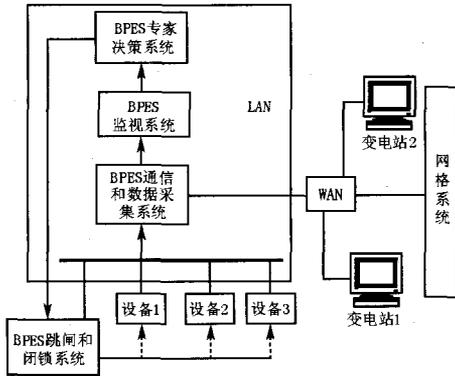


图 1 基于网格平台的 BPES 结构

Fig.1 Architecture of BPES based on grid

3 仿真

利用 ATP 对一个 500 kV 系统模型进行仿真,系统简化图见图 2。对线路 L4-6 在距离母线 6 约 15 km 处发生金属性和 20 Ω 过渡电阻 B 相接地故障的情况仿真。使用 Matlab 编制数据处理和距离保护判据的程序,获得在上述情况下继电器的动作情况。通过比较传统后备保护和广域 BPES 的动作特性,验证了网格环境中 BPES 的优越性。

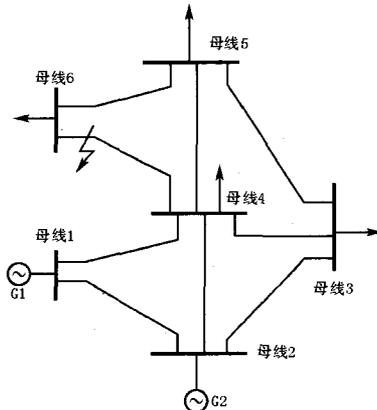


图 2 500 kV 系统模型简化图

Fig.2 Schematic diagram of 500 kV AC system

考虑传统后备保护采用三段式距离保护方案,以方向阻抗继电器作为 II 段和无偏移 III 段距离保护,以带偏移特性的阻抗继电器作为有偏移 III 段

距离保护,功率阻抗继电器作为方向保护。仿真结果如下:

1) 线路 L4-6 B 相金属性接地

当线路 L4-6 的 B 相发生金属性接地故障且其两端的主保护拒动时,系统中各线路两端后备保护动作情况见表 2。其中,Z2、Z3、Z3p 和 Z4 分别表示距离 II 段、无偏移 III 段、有偏移 III 段距离保护和反向功率方向保护。标号小的母线为终端 1,标号大的母线为终端 2。根据表 1 和公式 (3),得到各条线路继电器的动作系数 AF。

表 2 基于 BPES 的动作继电器及其 AF 值

Tab.2 Operated relays and AF based on BPES

线路	终端 1 保护动作情况 (AF)	终端 2 保护动作情况 (AF)	AF(III 段无偏移 III 段有偏移)
L1-2	0	0	0
L1-4	0	Z4 (-1)	-1
L2-3	Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	Z4 (-1)	-2/3 -14/15
L2-4	Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	Z4 (-1)	-2/3 -14/15
L3-4	0	Z4 (-1)	-1
L3-5	0	Z4 (-1)	-1
L4-5	Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	Z4 (-1)	-2/3 -14/15
L4-6	Z2 (1/2)、Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	Z2 (1/2)、Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	5/3 17/15
L5-6	Z2 (1/2)、Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	Z3p (1/15)、Z4 (-1)	-1/6 -11/30

由表 2 可以看到,当所有线路的后备保护配置 II 段和 III 段距离保护,故障线路 L4-6 两端的 II 段和 III 段距离保护动作。在传统后备保护中,由其 II 段保护经过延时后断开线路。当 L4-6 位于母线 6 处的保护拒动时,L5-6 位于母线 5 处的 II 段保护动作跳闸,这会造成非故障线路 L5-6 断开。若 L4-6 两侧的 II 段保护完全拒动,则因为 L2-3、L2-4、L4-5、L4-6、L5-6 的无偏移或有偏移 III 段都检测到了故障,可能会引起大面积保护的联跳,给系统稳定性造成很坏的影响。

运用 BPES 的广域后备保护可以很好的防止上述保护的误动作情况。根据表 2 列出的动作系数,BPES 的决策有以下几种情况:

(1) 由于线路 L4-6 两个终端的 AF 值都大于 1/3,所以应用一级决策的规定 2 即可马上判断为线路 L4-6 上发生故障,做出如下决策:线路 L4-6 两端的断路器跳闸,同时向同样检测到故障的 L2-3、L2-4、L4-5、L5-6 线路的后备保护发送闭锁命令;判定故障线路 L4-6 两端的主保护拒动。

(2) 若线路 L4-6 靠近母线 6 处的保护完全拒

动, 即母线 6 处的终端 AF 值为 0, 则一级决策未能实现, 需要由二级决策来判定故障线路。此时, L4-6 的 AF 值为 $0+1/2+1/3=5/6$ (有偏移 III 段), 或 $0+1/2+1/15=17/30$ (无偏移 III 段), 为正值, 而其它所有线路的 AF 为负值, 根据二级决策中将 AF 为负值的线路移出 FAR 的原则, 仍然判定故障线路为 L4-6。

(3) 若 L4-6 靠近母线 6 处的保护完全拒动且 L5-6 的 II 段和方向元件都不动作, 需要由二级决策来判定故障, 此时 L4-6 与 L5-6 的 AF 值都为正值。但 L4-6 的位于母线 4 处 II 段保护动作, 根据二级决策中的原则, 若线路没有在动作的第 II 段保护元件的保护范围内, 那么此线路不存在故障, 此时仍可以得出故障线路为 L4-6 的结论。

(4) 需要注意的是, 若仅有线路 L5-6 的方向元件拒动, 则可能导致多个断路器跳闸。

2) 线路 L46 B 相经 20Ω 过渡电阻接地

当线路 L4-6 的 B 相经 20Ω 过渡电阻接地且其两端的主保护拒动时, 分析各条线路的保护动作情况和动作系数, 见表 3。

表 3 基于 BPES 的动作继电器及其 AF 值 (20Ω)

Tab. Operated relays and AF based on BPES (20Ω)

线路	终端 1 保护动作情况 (AF)	终端 2 保护动作情况 (AF)	AF (III 段无 偏移 III 段有偏 移)
L1-2	0	0	0
L1-4	0	Z4 (-1)	-1
L2-3	0	Z4 (-1)	-1
L2-4	0	Z4 (-1)	-1
L3-4	0	Z4 (-1)	-1
L3-5	0	Z4 (-1)	-1
L4-5	Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	Z4 (-1)	-2/3 -14/15
L4-6	Z3 (1/3)、Z3p (1/15)	0	1/3 1/15
L5-6	0	Z3p (1/15)、Z4 (-1)	0 -14/15

可以看到, L4-6 经 20Ω 电阻接地短路时, 只有 L4-5、L4-6 和 L5-6 的 III 段距离保护检测到故障。若方向元件投入使用, 则只有 L4-6 的 AF 值大于零, 可以通过二级决策正确判定故障线路。若方向元件都不动作, 则会有与传统后备保护相同的故障切除策略, 即 L4-5、L4-6 和 L5-6 的 III 段后备保护分别动作, 造成多个断路器跳闸。所不同的是, BPES 发送跳闸命令前的延时要比传统后备保护小得多, 减少了系统运行于故障状态的时间。

4 结束语

本文提出了基于网络平台的广域后备专家系统, 介绍了网格技术以及网格在广域后备保护中的应用。同时介绍了 BPES, 即在发达的通信网络和网格技术的基础上, 利用电力系统广域范围内的信息, 通过基于动作系数算法的 BPES 推理系统, 得到最佳的故障切除方案。通过仿真分析, 可以看到 BPES 具有比较理想的后备保护性能。需要注意的是, BPES 可以利用网格的信息共享资源提高继电保护安全性和可靠性, 但其对通信系统的性能提出了很高的要求。网格计算环境需要将原先的局域网扩展到广域网, 势必造成通信速度有所下降, 所以必须权衡现今各种通信介质和通信结构的优缺点, 研究当出现通信延时过长、阻塞甚至通信失败等状况下的处理方案。

参考文献

- [1] 张伟, 沈沉, 卢强. 电力网格体系初探 (一) [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (22): 1-4.
ZHANG Wei, SHEN Chen, LU Qiang. Framework of the Power Grid System (Part One)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (22): 1-4.
- [2] 张伟, 沈沉, 卢强. 电力网格体系初探 (二) [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (23): 1-5.
ZHANG Wei, SHEN Chen, LU Qiang. Framework of the Power Grid System (Part Two)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (23): 1-5.
- [3] 徐志伟, 等. 网格计算技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
XU Zhi-wei. Grid Computing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [4] Tan J C, Crossley P A, Kirschen Jgoody D. An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000.
- [5] 罗承廉. 继电保护及自动化新原理新技术研究及应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
LUO Cheng-lian. Research and Application of New Principles and Technologies of Protection and Automation[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005.

收稿日期: 2006-11-21; 修回日期: 2006-12-20

作者简介:

蔡晓烨 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要方向为电力系统继电保护方向; E-mail: connie4@citiz.net

房鑫炎 (1963-), 男, 副教授, 从事电力系统继电保护研究及教学工作。