

环网分布式母线保护装置就地化实现探讨

周小波¹, 汪思满¹, 吴正学², 唐治国¹, 康丰¹, 张云¹

(1. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力公司
经济技术研究院, 江苏 苏州 215004)

摘要: 针对层次化继电保护控制系统中保护装置就地安放的需求, 目前集中式母线保护直接就地安放存在功耗过大、回路复杂等问题, 提出了基于 HSR 环网的分布式母线保护就地化实现方案。该方案中, 各间隔配置独立的间隔子机, 独立采集各个间隔的采样和开关量数据。通过双重冗余 HSR 环网将子机互联并共享数据, 采用全主式设计方案, 各子机独立逻辑判断, 改进的插值同步技术使得母线保护不依赖于外界对时, 同时增加光旁路设计, 降低了母线保护运维的复杂性。该母线保护样机成功通过专业机构检测和试运行, 验证了该方案的可行性。

关键词: 智能变电站; 就地化; HSR 环网; 分布式母线保护; 全主式; 容错

Local placing implementation research of distributed HSR busbar protection

ZHOU Xiaobo¹, WANG Siman¹, WU Zhengxue², TANG Zhiguo¹, KANG Feng¹, ZHANG Yun¹

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Jiangsu Economic and Technology
Research Institute, State Grid Electric Power Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: According to the requirement of the protection equipment's local placing in the hierarchical relay protection control system and because of the problems, such as large power supply, complex link, etc., the centralized busbar protection cannot be directly placed locally. This paper puts forward a distributed busbar protection locally placing implementation scheme based on HSR ring network. In this scheme, at each interval it locally places the corresponding independent submachine to get the interval's sampling value and digital data. Using dual redundant HSR ring network to interconnect each submachine and share each data, each submachine owns whole busbar protection function and judges independently. The new interpolation synchronization technology makes the busbar protection not rely on the external clock, at the moment the bypass technology designed can reduce the complexity of operation. This busbar protection model machine has been successfully passed the professional institute's test and trial work in the substation, which verify the feasibility of this scheme.

Key words: smart substation; local place; HSR network; distributed busbar protection; whole host mode; fault tolerance

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0104-05

0 引言

常规变电站中保护和监控设备各自组屏、集中布置, 现场走线繁杂且多为电缆硬连线, 带来更多的维护工作量和不可靠因素。目前普遍使用光缆代替电缆, 二次回路得到简化, 但保护装置与过程层设备相距较远, 采用点对点模式时, 光缆数量众多, 由于现场环境、安装等多种因素, 经常出现光纤损耗过大无法正常使用, 甚至在投运前已无备用光缆, 保护可靠性降低。随着二次设备技术进步, 由于二次回路原因造成保护不正确动作变得十分突出^[1-4]。

以继电保护多年成功的理论和实践探索为基础, 国内外众多专家提出: 在智能变电站中构建以就地保护为基础、站域与广域保护协同的层次化继电保护控制系统^[5-6], 其中就地层独立、分散实现其保护功能, 实现可靠、快速切除故障, 如此取消了电缆沟及桥架, 二次设计和施工大大简化, 减少了变电站建筑面积、降低了工程造价, 一二次设备对应性强, 便于维护、检修和巡视^[7]。对于集中式跨间隔保护因功耗、回路复杂、运维不易等原因不利于直接就地安放, 本文以母线保护为例, 提出环网分布式母线保护就地化实现方案。文献[8]提出了分布式母线

保护实现方案, 利用装置内部实现 IEEE1588 的对时方案, 虽然方案不依赖外部时钟, 但依赖于主单元的对时芯片, 且采用主机/子机实现方式, 一旦主机崩溃, 保护功能丧失, 文献[9]方案类似。本文提出的方案是利用母线保护子机就地采集数据, 通过 HSR 环网共享数据, 各子机独立逻辑判断, 高可靠性、独立、分散地实现母线保护功能。本文首先介绍了环网分布式母线保护的整体设计方案, 并就分布式母线保护装置就地化后带来的同步、装置操作、装置检修等一系列问题进行分析并提出解决方案, 最后就环网分布式母线保护就地化发展进行了展望。

1 环网分布式母线保护就地化方案

1.1 层次化保护系统

层次化保护既坚持了就地保护的独立性和可靠性, 又充分利用可共享的数据信息和网络通信技术, 强调了与安全稳定控制功能的协调配合, 提升了保护控制系统的总体性能, 其系统结构如图 1 所示。图 1 中母线就地保护面向间隔布置子机, 每个子机与相应间隔设备直接光纤或电缆连接, 子机之间通过 HSR 环网组成一个可靠的双备份网络, 各子机独立采集并将数据共享, 全主式保护配置方案, 各间隔子机逻辑判断及出口独立, 配有光旁回路, 可实现单间隔检修时单间隔子机配合其他智能设备做验证试验, 减少了母线保护因检修而退出的时间。

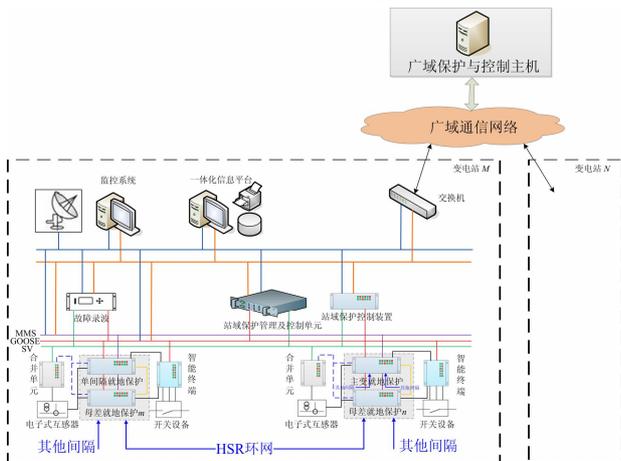


图 1 层次化保护系统结构图

Fig. 1 Hierarchical protection control system

环网分布式母线保护解决了集中式母线保护装置直接就地化带来的功耗过大、装置接线复杂、装置调试与检修不便等问题, 而且增加了冗余容错, 提高了可靠性, 是跨间隔保护就地化的发展方向^[4]。

1.2 环网分布式母线保护就地化实现方案

考虑保护装置的可靠性以及运维的便利, 环网分布式母线保护架构设计如图 2 所示, 各间隔均有两条路径将数据分享给其他子机, 保证了网络单点通信故障时不闭锁保护, 整个分布式母线保护跟监控系统、故障录波器(网络分析仪)等均有主备两条物理通道, 保证单间隔退出时保护的完整性。

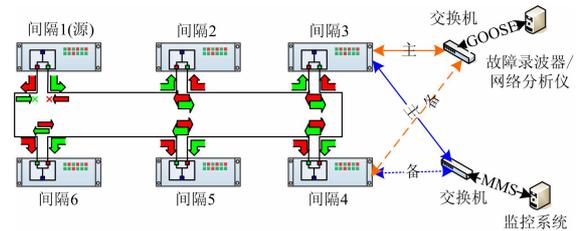


图 2 环网分布式母线保护架构示意图

Fig. 2 Distributed HSR busbar protection architecture diagram

单间隔装置硬件架构如图 3 所示, 子机采用 4U 半层机箱, 背插式设计, 数据流通过内部总线交互, 各模块协同工作。机箱主要包括模拟量模块(接单间隔模拟量)、监控模块、开入开出模块(用于传统继电器出口、信号、检修等)、CPU 模块、电源模块。应就地化要求, 机箱不配置液晶, 仅设计 LED 实时显示装置的状态, 为满足现场需要, 在隔刀因回路或本身故障无法接入装置时, 可强制隔刀保证保护正常运行。其他辅助功能包括: 动态显示间隔地址信息、显示通信口状态监视信息等。

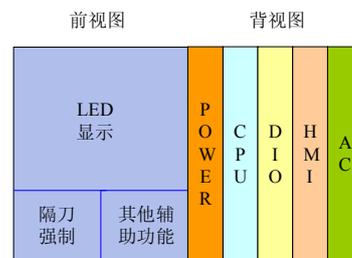


图 3 环网分布式母线保护单间隔子机机箱结构示意图

Fig. 3 Bay submachine structure diagram of distributed HSR busbar protection

2 就地化实现关键技术及创新点

为了实现环网分布式母线保护装置就地安放的高可靠性和易用性, 在方案设计时基于目前成熟稳定的技术, 并吸收 HSR 环网等成熟新技术应用到变电站领域, 解决了很多关键技术问题。

2.1 丰富接口

为了满足多种现场需求, 采样可接模拟量, 也

可接入 SV 61850-9-2 报文(以下简称 SV 9-2), 开关量可以通过 DIO 模块接入, 也可接入 GOOSE, 提供的接口如表 1 所示。

表 1 环网分布式母线保护子机接口

序号	接口名称	用途
1	3 路交流电流/ 12 路交流电压	间隔子机仅接交流/电压子机最大 可接 4 段母线电压
2	9 路 DI	检修开入等
3	8 路 DO	跳闸及信号出口
4	2 路环网接口	接 HSR 环网
5	3 路光纤接口	接入 SV、GOOSE
6	1 路调试口	装置调试用

2.2 HSR 环网

HSR(高可用性无缝冗余环网), 环网接口采用千兆口, 可保证环网中最大可接入 36 个间隔子机时数据延时仍在容忍范围内, 此网络拓扑结构的优势就是数据备份, 每个节点分别向 2 个端口发送其数据包, 分别在 2 个端口收别的间隔子机发送的数据包, 因数据包是双份, 需有丢弃数据包策略, 这样就阻止了网络风暴的发生, 具体逻辑如图 4 所示。

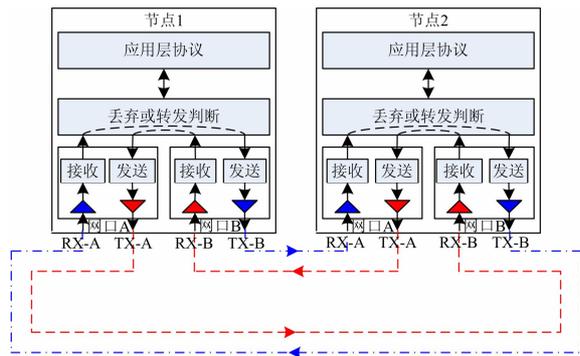


图 4 HSR 环网数据包交换示意图

Fig. 4 HSR network data package exchange diagram

当环网中某个子机的环网接口因光功率不足、光纤损耗过大等原因导致数据链路中断, 对于 HSR 环网却只是中断了其中一条数据交互路径, 只要其他接口仍正常工作, 母线保护就不受影响, 但对于普通的星型等拓扑结构, 数据会中断, 闭锁保护。当环网出现异常时, 装置实时检测, 并将告警信息上送监控系统供运行人员检查。

2.3 全主式设计

每个间隔子机独立工作并进行对等通信, 接收其他间隔子机的流量和开关量信息, 单间隔的动作行为不会影响其他间隔, 此设计多重冗余, 极大提高了可靠性。为降低相互通信带来的高流量, 在

设计内部规约时采用 SV 9-2 的基本结构, 在其中加入私有定义内容, 如此环网中流通的报文可简单分为修改的 SV 9-2 报文和内部管理报文, 而由于千兆口的应用, 传输延时等都降低到保护可靠工作范围。相比于常用于分布母线保护的无主实现方式来说, 全主式可基本兼容目前集中式算法, 减小了算法的开发工作量, 同时多重冗余可靠性得到提高, 随着千兆光口的普及以及技术稳定, 全主设计是未来分布式母线保护实现的发展方向。

2.4 采样同步技术

采样同步技术是分布式母线保护实现的关键技术, 智能站中常用的同步方式有两种, 一种是点对点插值同步; 另一种是组网序号同步。对于插值同步, 需要延时可测, 而序号同步则要保证合并单元同步可靠。环网分布式母线保护的各个子机充当每个间隔的合并单元(80 点采样), 如果采用组网序号同步, 则每个子机都需接 B 码对时(或 1588 网络精确对时), 但考虑到现场实现的难度, 我们对传统的插值同步技术进行改进, 将合并单元额定延时处理为固定延时加可测的变化延时(数据通过网络交换所致), 再进行插值同步, 此时保护收到的数据仍然是同步的。为了保证同步的精度, 环网接口带宽千兆, 通信接口采用 Serdes 接口, 总延时和延时抖动都降到了很低的程度, 同步精度达 10 μs。

为了测得 SV 报文网络传输延时, 在报文中增加“传输延时修正域”字段, 在经过每个节点时实时修正, 延时通过式(1)估计得到。

$$\tau_{mn} = \sum_{i=n+1}^m \tau_{\text{link}_{in}} + \sum_{i=n}^m \tau_{\text{stay}_i} \quad (m > n) \quad (1)$$

式中: $\tau_{\text{link}_{in}}$ 是节点 i 和节点 n 之间的传输链路延时, 借鉴 IEEE1588 协议的 Peer-Delay-Request 和 Peer-Delay-Respond 报文, 计算节点之间的链路延时; τ_{stay_i} 是节点 i 内停留延时估算, 物理层传输抖动在几个 ns 之内, 按 36 节点计算, 总误差小于 1 μs。

2.5 定值同步及装置对时技术

为实现环网分布式母线保护每个间隔子机独立进行逻辑计算, 定值的同步是必不可少的, 对于运行、调试人员, 虽然分布式母线保护由多子机组成, 但意义上还是一个母线保护装置, 所以在整定定值或升级程序时, 应只需在一个子机处更新定值或程序, 为此装置设计了同步策略, 定义了用于同步的管理报文, 并分如下步骤有序进行定值同步:

- 1) 源端发送定值同步命令;

2) 传输定值文件到其他目标子机, 并写入各子机定值内存缓冲;

3) 定值同步更新。

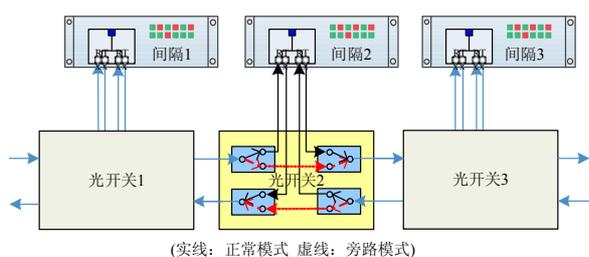
程序升级或配置修改均可采用上述类似设计, 达到同步更新, 可软件重启无需重新上电。

为了各个子机间的步调一致, 需要对各个子机进行同步对时, 目前装置对时是接在监控模块上, 为了保证通信的可靠性, 分布式母线保护装置中同时有 2 个子机配有监控模块, 分别接主钟(GPS 卫星对时)对时, 2 个带监控模块节点为内部主时钟, 互为备用, 对时报文在环网内周期传递, 对时误差小于 1 ms。

2.6 光旁路技术

为解决单间隔检修或退出不影响母线保护的问题, 引入光旁路技术, 主要使用到光开关(Optical Switch), 是指具有光路倒换功能装置, 通常用于网络的故障恢复。

在环网中相邻的三个间隔, 如果间隔 2 需要检修或因故障退出, 此时就需要把这个节点从环网中旁路掉, 保持环网的正常双向通信。光开关有 2 种运行模式, 如图 5 中光开关 2 内部实线所示, 此时运行于正常模式, 间隔 2 仍跟环网其他子机有通信; 当运行于旁路模式时, 如光开关 2 内部虚线所示, 此时内部光回路切换, 光开关 1 和开关 3 形成直接通路, 如此实现单间隔隔离, 对于增加新间隔时也通过此旁路开关实现。



(实线: 正常模式 虚线: 旁路模式)

图 5 光开关接线示意图

Fig. 5 Optical switch connection diagram

2.7 容错设计

为了提高保护装置的可靠性, 很多环节加入容错设计, 具体有如下几方面:

1) 采样由 FPGA 直接采集, 当某间隔 CPU 异常复位等导致该间隔保护异常退出时, 不影响采样数据的发送, 其他间隔采样正常, 整体保护仍正常工作;

2) 根据告警类型及对装置的影响程度, 自适应闭锁及开放保护;

3) 基于环网数据共享, 间隔之间相互共享其内

部信息, 设计了基于多 Agent 的容错判据, 提高了保护的可靠性。

2.8 就地化设计

为实现一次设备复杂的电磁环境, 分阶段将母线保护就地安放, 如表 2 所示。因光口数量及插件个数远远小于集中式母线保护, 低功耗满足就地化要求。目前仍需放置于预置设备舱, 采用通用接口跟外回路相连, 待技术成熟后, 可直接就地安放于一次设备旁。

表 2 分布式母线保护分阶段就地安放

阶段	内容	备注
1	有防护	放置于预制仓
2	有防护	子机与间隔保护有机结合
3	无防护	IP66 防护等级; EMC 满足; 航空端子等通用接口; 强化散热设计; 低功耗设计
4	集成于一次设备	融合于一次设备

3 结论

综上所述, 利用 HSR 环网技术实现的分布式母线保护采用千兆网口保证通信的低延时, 改进的插值同步技术使得母线保护不依赖于外界时钟, 在设计时使用全主式实现方案, 在软硬件上进行多重冗余与容错, 提高了保护的可靠性。光旁路回路设计, 保证了单间隔检修退出, 环网物理上可维持双向通信的完整性, 降低了维护的难度。就地安放时, 因户外较为恶劣的环境, 包括潮湿、高温、电磁干扰、化学腐蚀等, 保护装置目前仍需放置于预制仓中, 后期进一步设计无防护的就地化一体化机箱, 保护装置可直接就地安放。我公司已成功研制环网分布式母线保护装置, 通过专业检测机构检测, 并成功试运行。

参考文献

- [1] 赵自刚, 朱辉. 2000 年度河北南网 220 kV 及以上系统继电保护缺陷统计分析[J]. 继电器, 2002, 30(7): 17-22. ZHAO Zigang, ZHU Hui. The statistics and analysis of relay protection defect around 220 kV and over in Southern Hebei Electric Network[J]. Relay, 2002, 30(7): 17-22.
- [2] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18. WANG Zengping, JIANG Xianguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [3] 朱林, 段献忠, 苏盛, 等. 基于证据理论的数字化变电

- 站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.
- ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [4] 朱林, 陈金富, 段献忠. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.
- ZHU Lin, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.
- [5] 李俊刚, 张爱民, 彭华夏, 等. 区域层次化保护系统研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 34-40.
- LI Jungang, ZHANG Aimin, PENG Huaxia, et al. Research and design of zone area hierarchical protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 34-40.
- [6] 邓烽, 王海燕. 层次化保护系统: 中国, 20121028944.2 [P]. 2012-11-07.
- DENG Feng, WANG Haiyan. Hierarchical protection system: China, 20121028944.2[P]. 2012-11-07.
- [7] 陈萍, 张继军, 郭文钟, 等. 数字化变电站中保护下放问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 98-100.
- CHEN Ping, ZHANG Jijun, GUO Wenzhong, et al. The problem discussion about relay protection local place in the smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 98-100.
- [8] 刘伟, 倪传坤, 杨恢宏, 等. 智能变电站分布式母线保护实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 139-141, 146.
- LIU Wei, NI Chuankun, YANG Huihong, et al. Implementation of distributed busbar protection applied to smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 139-141, 146.
- [9] 王攀峰, 张克元, 文明浩, 等. 应用于数字化变电站的分布式母线保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 68-71.
- WANG Panfeng, ZHANG Keyuan, WEN Minghao, et al. The research of distributed busbar protection applied in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 68-71.
-
- 收稿日期: 2014-05-27; 修回日期: 2014-08-22
- 作者简介:
- 周小波(1986-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为母线保护的研究与开发; E-mail: xiaobo-zhou@sac-china.com
- 汪思满(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为母线保护的研究与设计;
- 吴正学(1976-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电网建设管理工作。
- (编辑 葛艳娜)