

层次化保护控制系统及其网络通信技术研究

张新昌, 张项安

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 新一代智能变电站层次化保护控制系统旨在基于跨间隔、跨变电站信息, 实现最优保护控制策略, 其中, 信息共享和高可靠的通信网络方案是其重要支撑技术。剖析了层次化保护控制系统的体系结构、功能定位, 对层次化保护通信系统的网络流量和网络时延进行分析, 提出了一种应用于新一代智能变电站的优化网络通信方案。它基于网络报文时延可测技术, 克服了目前不同步采样报文不能进行组网传输的限制, 实现了保护装置功能不依赖于全站统一对时, 推进了新一代智能变电站的信息共享和网络传输技术发展。

关键词: 层次化保护控制; 通信系统; 网络流量; 网络时延; 延时可测

Research of hierarchical protection & control system and its communication technology

ZHANG Xin-chang, ZHANG Xiang-an

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The hierarchical protection & control system in new generation smart substation aims at realizing optimal protection & control strategy based on different intervals and different substations. Sharing information and high-reliable network scheme are the important supporting technology. This paper dissects architecture and function location of hierarchical protection & control system, analyzes network flow and time delay in its communication system, and puts forward an optimal network communication scheme in new generation smart substations. This scheme bases on a measurable network message time-delay technology. This technology overcomes the limits that desynchronized message cannot implement networking transfer, makes the protection devices realize protection function independent of uniform time hack, and advances information sharing and network transmission technology of new generation smart substation.

Key words: hierarchical protection & control; communication system; network flow; network time delay; measurable time-delay

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0129-05

0 引言

随着国民经济的持续发展, 电网规模日益扩大, 大容量间歇性清洁能源不断接入电网, 电力系统的复杂性空前提高, 对变电站保护控制系统提出了新的技术挑战。目前, 智能变电站中的继电保护控制系统仍沿用面向间隔的设计思想, 相互割裂和孤立的各类应用子系统不能构成实时的有机统一整体^[1], 无法实现对整个电网更全面更灵活的保护和控制。

随着电网装备制造技术的进步和先进通信技术的引入, 限制变电站保护与控制技术变革的技术瓶颈正逐渐消失。高性能的微处理器、高速通信网络的应用, 为保护、控制设备的模块化设计和功能集成提供了可能^[2-3]; IEC61850标准的应用, 使变电

站内设备之间、变电站之间实现了信息的共享和交互, 因此利用站内其他设备或其他变电站的数据信息提升保护性能成为可能(如广域保护^[4-7]); 新原理、新技术将有效减轻间歇性电源、柔性交流输电等新型一次设备等对继电保护的影响。

本文剖析了新一代智能变电站保护与控制体系-层次化保护控制系统, 以时间域、空间域、功能域相统一的原则实现最优保护控制策略, 提出了一种优化的通信网络方案, 利用网络时延可测技术, 使保护装置可不依赖于对时实现保护功能, 以推进新一代智能变电站的信息共享和网络传输技术发展。

1 层次化保护控制系统

层次化保护控制系统基于全网信息, 通过多原

理、自适应的故障判别方法，实现时间维、空间维和功能维的协调配合，提升继电保护性能和系统安全稳定运行能力^[8]。

1.1 总体架构

层次化保护控制系统从体系架构上划分为就地层、站域层和广域层，如图1所示。三层保护协调配合，构成以就地层保护为基础，站域层保护与广域层保护为补充的多维度层次化继电保护系统。

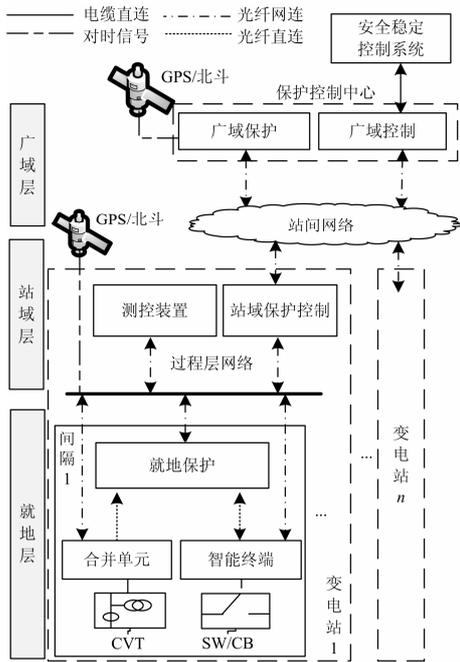


图1 层次化保护控制系统结构图

Fig. 1 Hierarchical protection & control system construction

就地层保护是面向被保护对象分布配置的“贴身防护”，保护功能配置遵循现有的继电保护相关规范，其接入信息仅来自被保护对象所在间隔，强调的是保护相关回路简洁可靠和保护的速动性。

站域保护控制系统配置单套保护的冗余保护、部分公用保护及相邻变电站元件后备保护。它能够充分利用全站信息，快速、可靠判别故障区域，加速后备保护动作，并可不经就地级保护及测控装置直接作用于断路器智能终端。同时，根据电压等级的不同及变电站承担任务的不同，站域保护也配置一些控制功能，包括备用自投、小电流接地选线、低频/低压减负荷等。此外，站域保护还作为广域保护服务子站为广域保护提供站内采样值和开关量信息，并接收、转发广域保护主站发出的控制命令。

广域保护系统包括继电保护和安全自动控制两方面。广域保护基于广域信息实现广域后备保护；接收区域内及同步相量测量单元（PMU）数据，进

行安全稳定评估分析；并依据稳态数据进行潮流分析、切负荷策略制定。

1.2 各层次配合关系

如图2所示，当电力系统发生故障时，就地层保护作为第一时限保护，保护的速动性好，相关联回路少。就地保护整组动作时间一般为0~20 ms。在就地保护工作的同时，站域保护与广域保护同时进入程序判别阶段，如果故障能够成功切除，则站域保护和广域保护自动返回；若就地保护未动作，站域保护基于站域信息的判断实现故障切除。在时间配合上，站域保护处理一般会增加一定延时。若站域保护仍未动作，则由广域保护实现故障切除。广域保护的跳闸延时较站域保护动作时间更长。根据国际大电网会议（CIGRE）的规定，广域控制的时间限定在0.1~100 s的范围内。在极端情况下，如变电站直流消失，站域就地全部失效时，由广域保护通过跳其他变电站实现故障切除。

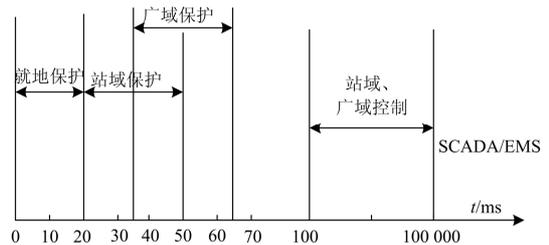


图2 层次化保护与控制系统各层时限配合关系

Fig. 2 Time coordination between the levels in hierarchical protection & control system

2 层次化保护系统通信系统分析

2.1 站域保护

站域保护装置涉及变电站的多个间隔信息，如：各间隔的采样值、GOOSE和对时信息等。因此对过程层通信系统有着较高的要求，包括网络流量、网络延迟。本文以某220 kV典型配置为例进行分析。

(1) 网络流量分析

根据文献[9]所述的计算方法，对于采样值流量，按照20个模拟量通道，以典型的每周波80点采样、每帧1个ASDU进行计算；再加上GOOSE流量最大约为1.2 Mb/s，可以计算出每个间隔流量可达到8.33 Mbps。220 kV侧按9个间隔、110 kV侧13个间隔、35 kV侧3个间隔，共25个计算，可得到总带宽达到208.2 Mbps。若带宽占有率不超过40%，过程层交换机带宽需达到520.5 M。对于220 kV电压等级(含35 kV等级)，可以得到带宽为99.96 Mbps，对于110 kV间隔，总带宽为108.29 Mbps，需要多千兆网口或采用千兆网络。

(2) 网络时延分析

根据文献[10]所述的计算方法, 以图3所示的交换机配置方案, 间隔交换机采用百兆光口, 主干交换机采用千兆光口, 考虑最极端的情况, 站域保护装置连接的间隔数为25个来计算网络时延。

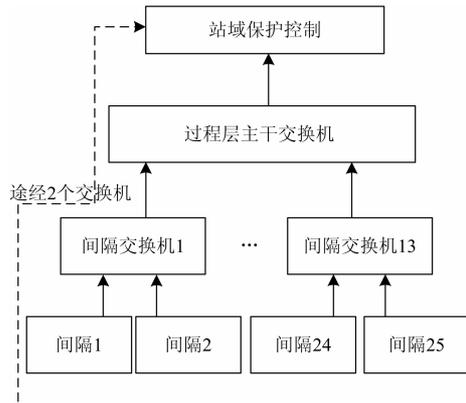


图3 某220 kV变电站站域保护典型网络组成示意图

Fig. 3 Typical network of substation-area protection in certain 220 kV substation

一个IEC 61850-9-2 SV采样数据帧的最好和最坏情况下延时、抖动分别是27.992 μs 、71.24 μs 和43 μs ；一个GOOSE数据帧的最好和最坏情况延时、抖动分别是22.448 μs 、48.56 μs 和26 μs 。文献[11]规定微波通道（光纤通道参照执行）传输主保护信息时传输时延应不大于5 ms。对于保护装置来讲, 这样的延时和抖动在可接受的范围内。

因此, 从网络流量分析和网络时延分析两方面确定: 对于一个典型的220 kV的变电站, 站域保护按全站配置或按照电压等级配置均可; 但对于电压等级较高或者间隔较多的变电站来说, 可采用按电压等级配置站域保护的方式, 以保证充分的网络带宽。且在两种情况下, 百兆口都难以满足数据传输的要求, 均应采用千兆口以满足全站数据采集的需求。同时, 由于就地保护已经备有主后备功能完善的保护, 因此站域保护只需单配即可。

2.2 广域保护

广域保护装置涉及多个变电站的信息, 如: 参与广域差动的各间隔的采样值、GOOSE 和对时信息等。因此对广域通信系统有着更高的要求。按照本文的层次化保护系统方案, 广域保护通过站域保护间接接收采样值信息, 且站域保护将站内数据打包以24点上送到广域网络。本文仍然从网络流量与网络延迟两方面进行分析。它们与广域保护监管范

围大小直接相关。本文以图4所示的区域范围为例进行分析。

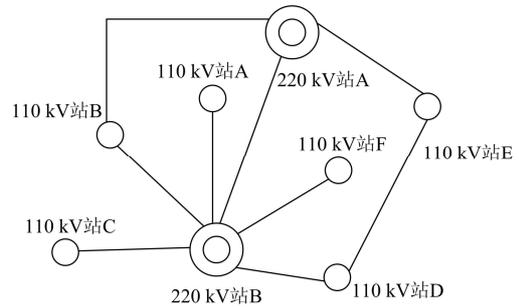


图4 某区域电网结构图

Fig. 4 Certain power network construction figure

(1) 网络流量分析

广域保护实现基于差动原理和方向比较原理的站与站之间的后备保护。因此, 它只需要接入差动区域内各个变电站与其他变电站相连间隔的信息形成广域保护的信息来源。

接入广域网络的间隔数量= 220 kV站A 3个间隔+220 kV站B 6个间隔+110 kV站A 1个间隔+110 kV站B 2个间隔+110 kV站C 1个间隔+110 kV站D 2个间隔+110 kV站E 2个间隔+110 kV站F 1个间隔=18个。按上节描述的计算方法, 每个间隔的采样值流量 $S=223\text{字节}\times 8\text{ bit/字节}\times 50\text{周波/s}\times 24\text{帧/周波}=2.14\text{ Mbps}$ 。GOOSE流量最大约为1.2 Mb/s。每个间隔的总流量为3.34 Mbps。按照18个间隔计算, 广域网络的总流量可达到60.12 Mbps。

(2) 网络时延分析

由于站域保护送出的数据已根据广域时钟系统的时间将采样信息打上时间标签, 然后通过广域通信网络转发至广域保护系统。因此, 在计算网络时延时只需要计算从站域保护装置—广域保护装置之间的网络时延。此时, 以平均传输100 km, 经过一级交换机设备计算。同样按照参考文献[10]所述的计算方法, 可得网络延迟, 计算结果满足广域保护对延时的技术要求。

综上所述, 从网络流量分析和网络时延分析两方面确定: 按照每个间隔3.34 Mbps流量分析, 广域保护宜采用千兆网络。同时, 由于广域保护控制系统的网络时延主要体现在各变电站信息的远距离传输上, 在选择广域保护控制系统的配置地点时应考虑全局物理距离最近的变电站或调控中心。

3 网络报文时延可测技术及应用

站域保护、广域保护需要采集多个间隔甚至整个变电站模拟量和相关开关量信息, 宜采用网采网

跳的实现方案。常见的同步解决方案是，跨间隔保护依赖于统一的外部时钟来保证采样数据的同步性，当失去外部时钟时，跨间隔保护将退出运行甚至误动，这也是网采方案被质疑的重要原因。

根据交换机的存储转发特性，报文进入交换网络由交换机根据资源情况进行随机交换，交换路径随时可能发生变化，物理资源的竞争增加了报文在交换网络中时延的不确定性，难以满足同步的要求。如果交换机可以测量传输延时并将此延时发送给保护装置，保护装置再基于该延时通过软件重新采样来实现各路模拟量的同步，就可以实现保护装置不依赖于对时实现装置同步的目标。

3.1 交换延时的计算方法

本文提出一种传输延时可测的技术，可准确获得交换机的延时，并写入SV报文，站域保护、广域保护可进行读取并补偿。以图3所示的间隔1的数据到达站域保护为例说明该技术的具体实现方式，如图5所示。

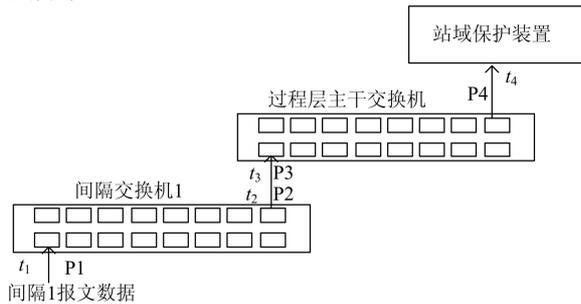


图5 传输延时可测技术实现示例
Fig. 5 Example of measurable time-delay technology

交换机拥有硬件接收时间戳记录模块、硬件发送时间戳记录模块和驻留时间计算模块，用于记录报文接收和发送时的时间点和报文在当前交换机的驻留时间。

当间隔1的报文第一比特进入间隔交换机1的P1端口时，交换机的硬件接收时间戳记录模块记录下此时的时间 t_1 ，然后硬件发送时间戳记录模块记录下此比特离开间隔交换机1的P2端口时的时间 t_2 ，驻留时间计算模块求得此时的驻留时间 $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ ，并写入该报文中；同理，可得到该报文在过程层主干交换机中的驻留时间 $\Delta t_2 = t_4 - t_3$ ，并将其与在间隔交换机1中的驻留时间 Δt_1 叠加得到当前报文总传输时延 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ 。此时终端的保护装置可解析报文，从而得到网络总时延，并根据此时延计算出采样报文的原始时刻，然后通过重采样进行同步。多级交换机级联情况如上述步骤依次叠加报文在新交换机的驻留时间值并转发，直到报文到达保护或测控装置。

3.2 交换延时的标记位置

智能变电站采样值报文采用以太网帧格式承载，交换延时的标记位置有两种方案，如图6所示。

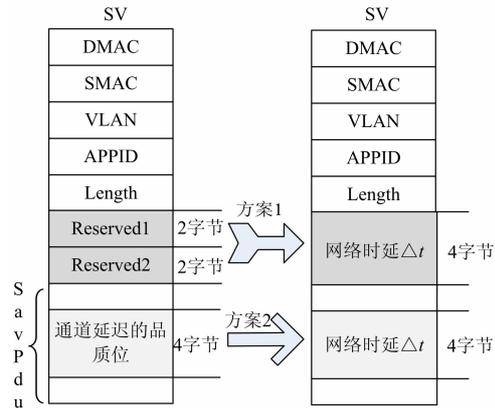


图6 9-2报文中交换延时标记位置示意图
Fig. 6 Exchange time delay mark position in 9-2 message

(1) 采样值报文的保留字段（方案1）

根据最新发布第二版 IEC61850 协议规定，在报文中，SV 和 GOOSE 报文以太网帧格式有 4 个字节的保留字段，分别为 Reserved1 和 Reserved2，其中保留位 1 (Reserved 1) 0 字节的第 8 个比特已经被定义，本方案使用了其余 31 个保留位之中的 30 个，因此可在不影响规范中定义的功能的基础上，使用该保留字段存储报文网络传输时延数值。存储方法是将 Δt 值转换为二进制数值，由最低位向最高位依次写入传输时延数值，如图7所示。该方案所存储的延时数值位置相对固定，交换机无需对整帧报文解码，资源开销小，不影响交换机的性能指标，但未来可能会与 IEC62351 标准的使用产生冲突。

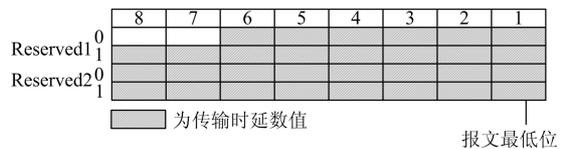


图7 9-2报文中保留字段使用示意图
Fig. 7 Sketch map of using reserved field in 9-2 message

(2) 通道延时的品质位（方案2）

如图6所示，在报文中 SavPdu 中有 4 个字节的通道延迟品质位。本方案将延时值报文按照相同的方式写入报文中。但由于采样值不固定，导致延时数值的位置不固定，交换机需要对每个报文解码，资源开销大，但可通过改善交换机的性能来满足对时精度 $10 \mu s$ 的要求。

本文推荐方案 2，它具有更好的灵活性，且不会与 IEC62351 标准的使用产生冲突。

4 结语

本文剖析了层次化保护控制系统的体系结构、各层功能定位和配合关系,对层次化保护通信系统的网络流量和网络时延进行了分析,提出了一种应用于新一代智能变电站的网络通信方案,该方案基于网络报文时延可测交换技术,实现了保护装置可不依赖于对时实现保护功能,推进了新一代智能变电站的信息共享和网络传输技术发展。

参考文献

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
LIU Zhen-ya. The smart grid technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 吴国旻, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 15-18.
WU Guo-yang, WANG Qing-ping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 15-18.
- [3] 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 Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.
- [4] 杨春生, 周步祥, 林楠, 等. 广域保护研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 147-150.
YANG Chun-sheng, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-150.
- [5] 殷玮珺, 袁丁, 李俊刚, 等. 基于 SDH 网络的广域保护系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 120-127.
YIN Wei-jun, YUAN Ding, LI Jun-gang, et al. Research on wide-area protection system based on SDH network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 120-127.
- [6] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.
XIONG Xiao-ping, TAN Jian-cheng, LIN Xiang-ning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.
- [7] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [8] 宋璇坤, 李颖超, 李军, 等. 新一代智能变电站层次化保护系统[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 24-29.
SONG Xuan-kun, LI Ying-chao, LI Jun, et al. Hierarchical protection & control system for new generation smart substation[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 24-29.
- [9] 陈波. 500 kV变电站二次系统智能化设计关键问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
CHEN Bo. Research on the key issues of secondary system design for 500kV smart substations[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [10] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.
HUANG Can, XIAO Chi-fu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.
- [11] DL/T 5062-1996 微波电路传输继电保护信息设计技术规定[S].
DL/T 5062-1996 design technical rules for transmission of protection information on radio link system[S].

收稿日期: 2013-12-27

作者简介:

张新昌(1962-), 男, 高级工程师, 研究方向为智能变电站及电力系统继电保护等; E-mail: yyh6006@163.com

张项安(1968-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统负荷建模及电网规划等。