

全数字化保护系统的主要问题及解决方案

张沛超¹, 高翔², 顾黄晶¹, 霍超¹

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200030;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 分析了全数字化保护系统在可靠性方面存在的问题, 提出利用元件重要度分析方法指导保护系统设计; 分析了全网络化的保护系统在信息安全方面存在的隐患, 提出在保证保护系统实时性和兼容性的前提下, 基于 IEC 62351 安全标准建设系统, 并进行系统化的安全性评测; 分析了全网同步、站内同步以及无同步对不同保护原理的影响, 提出了不同原理的保护在失去同步后保护系统应采取的措施; 比较了简单网络时间协议(SNTP)及 IEEE 1588 2 种时间同步标准, 提出应基于 IEEE 1588 实现过程层的时间同步; 分析了影响全数字化保护系统实时性的主要因素, 提出利用光学互感器, 利用 GOOSE 消息代替保护出口继电器以及利用交换式以太网技术等措施提高系统的实时性。

关键词: 全数字化保护; IEC 61850; 可靠性; 安全性; 同步; 实时性

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0104-04

随着 IEC 61850 标准的颁布以及相关技术的成熟, 保护系统的全数字化是今后必然的发展趋势。与常规保护系统相比, 全数字化保护系统具有一系列显著的优点, 文献[1-6]已作了充分讨论。但全数字化保护系统作为新型保护系统, 现阶段依然存在很多问题, 对此则很少有文献涉及。为此, 从系统可靠性、安全性、时间同步性及实时性等 4 个方面, 对全数字化保护系统目前存在的问题作了较系统的讨论, 并给出了可能的解决方案。

1 全数字化保护系统的结构

全数字化保护系统一般由非常规互感器、合并单元、交换机、网络接口、保护装置、同步时钟源以及电源模块等构成^[7]。在全数字化保护系统中, 互感器、保护及断路器之间复杂的连接导线被光纤代替, 非常规互感器输出由模拟信号变为数字信号, 并通过合并单元以多播方式发布到满足 IEC 61850-9-2 标准的过程总线^[8], 保护等智能电子装置从过程总线获取采样和控制信息。图 1 是在美国 Texas A & M 大学电力系统控制与保护实验室中搭建的一套全数字化线路距离保护系统的结构示意图^[7]。关于全数字化保护系统更多的结构见文献[9]。

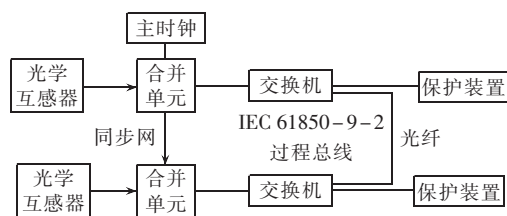


图 1 全数字化保护系统结构

Fig.1 Architecture of all-digital protection system

2 可靠性问题

可靠性是保护系统的首要性能指标。全数字化保护系统的可靠性应至少不低于传统保护系统, 否则, 可靠性的不足将抵消其所有优点。由图 1 可见, 与传统保护系统相比, 全数字化保护系统往往包含更多的电子设备。由可靠性理论可知, 系统中元件的数量对系统的可靠性有很大影响。因此, 电子设备数量多是全数字化保护系统一个潜在的缺陷。

下面是提高全数字化保护系统可靠性的措施。

a. 根据 IEC 61850 的基本思想, 用光缆代替铜缆, 用以太网总线代替二次连接导线, 以大幅度减少系统中元件的数量。

b. 由于全数字化保护系统是网络化的保护系统, 不但可以在系统层面, 而且可以在元件层面实现真正的冗余, 从而提高系统可靠性。

c. 充分利用系统和元件的自检和监视以提高系统可靠性。在全数字化保护系统中, 几乎不再存在未被监视或不具备自检能力的功能单元。

为定量分析全数字化保护系统的可靠性、评估上述措施对保护系统可靠性的改善程度, 应研究并建立全数字化保护的可靠性模型^[9]。对于常规保护系统, 往往只需关注其系统总体可靠性。而对于全数字化保护系统, 由于其包含更多元件, 总体可靠性的指标已不足以全面刻画系统的可靠性。

所以在建立全数字化保护的可靠性模型时, 应深入到元件层面, 将元件重要度分析引入到保护系统中^[9], 其作用在于: 从系统设计角度、元件重要度分析可以发现系统中的薄弱环节, 从而帮助设计人员有针对性地优化系统设计、有效地提高系统的可靠性; 从系统维护角度、元件重要度分析可以指导维护人员

合理地分配系统维修资源,建立优化的维护计划。

3 安全性问题

全数字化保护系统是完全网络化的保护系统,其基于的通信标准是公开化的 IEC 61850 标准,这些都大大增加了系统遭受网络攻击的风险。但“不公开即安全”已不能成为一种安全策略的选择。IEC 61850 自身未对信息的安全问题进行规定。为了有效地适应电力系统信息安全防护的要求,IEC 组织 TC57WG15 工作组在完成了 IEC 60870-5、IEC 60870-6、IEC 61850 等标准编制的基础上,开展了安全标准 IEC 62351 的制定。IEC 62351 标准和其他 TC 57 的标准对应关系见图 2^[10]。

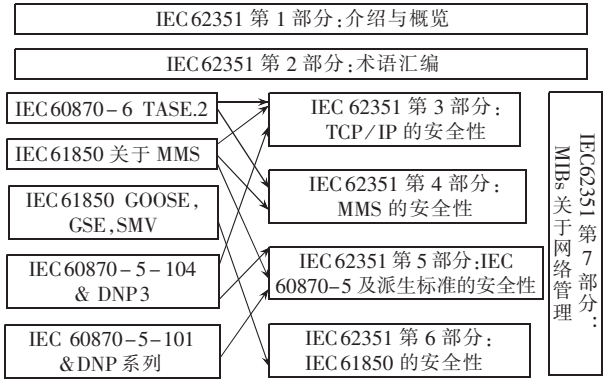


图 2 IEC 62351 与 TC57 其他标准的对应关系
Fig.2 The relationship between IEC 62351 and other standards of TC57

在实施全数字化保护系统的安全性时,应注意下面 4 个原则。

- a. 标准化。在系统层面应满足文献[11]中的指导原则;在通信规约层面应满足 IEC 62351 标准;应用安全技术后,系统应能通过 IEC 61850 一致性要求;在安全技术的选择上,应采用主流的、成熟的技术。例如,通过安全证书技术防止欺骗,通过 TLS 加密防止重放攻击、防止窃听等。
- b. 兼容性。由于并非所有系统需要同时进行安全升级,故采用安全技术和未采用安全技术的协议栈应能共存,允许采取安全措施和未采取安全措施的系统同时应用。
- c. 实时性。对于在过程层传输的 GOOSE 和采样信息,必须满足 4 ms 响应时间的要求。这样,在现有条件下,数据加密就不能被采用,数据认证是唯一可被选用的方法。应建立应用测试平台,对采用和不采用安全技术的设备和系统的运行效率(包括 CPU 负载、网络带宽占用等)进行定量评测。
- d. 系统性。应按照 5 级安全措施(数据安全、应用程序安全、用户安全、系统安全以及网络安全),建立一套完整的、统一的安全处理策略;应建立信息安全攻防与评测平台,进行系统化的安全性评测。

4 时间同步问题

与常规互感器输出的模拟信号有所不同,由合并

单元输出的数字采样信号中必须含有时间信息。在图 1 所示的距离保护系统中,各合并单元输出的电压、电流信号必须严格同步,否则将直接影响保护动作的正确性。因此,同步时钟是全数字化保护系统中的关键元件。然而,并非所有保护对时间同步性都有相同要求。根据保护对同步需求的不同,可将保护分为 3 类:第 1 类保护的正确动作仅依赖于输入信号幅值,它不要求信号在时间上的同步,例如过流保护、低压保护等;第 2 类保护的正确动作同时需要信号相位和幅值,但所需信号来自同一变电站,所以只要保证站内同步即可,比较典型的是距离保护和变压器差动保护;第 3 类保护的正确动作也同时需要信号相位和幅值,但是所需信号来自不同变电站,所以只有在全网同步情况下才能保证保护的正确动作,这类保护包括线路差动保护和检同期操作等。

当全数字化保护系统的主时钟(time master)失去 GPS 信号后,利用其内部时钟,在短时间内它仍能输出满足同步要求的采样信号。此时,上述 3 类保护应采取不同的措施:第 1 类保护仍能维持正确的动作状态;第 3 类保护应在短暂延时后被闭锁,延时的时间取决于主时钟内部时钟的精度;而第 2 类保护应作进一步讨论。若保护所需的电压、电流信号均来自同一合并单元,或虽来自不同合并单元,但各合并单元采用同一主时钟,则保护可以继续运行;否则,应在短暂延时后被闭锁。此后,只有检测到同步信号恢复,保护才能投入运行。

IEC 61850 对时间同步的要求分为 $T_1 \sim T_5$,共 5 级^[12]。其中,合并单元输出的采样信号应达到 T_4 级别^[13],即 $\pm 4 \mu s$ 。IEC 61850 推荐采用简单网络时间协议 SNTP(Simple Network Time Protocol)实现不同设备间的采样同步。SNTP 采用的是软件同步方案,虽然 GPS 的同步精度可达到 $\pm 1 \mu s$,但由于受到网络延时不确定性的制约,在实际中很难确保 $\pm 4 \mu s$ 的同步精度。表 1 简要列出了影响网络延时的因素。

表 1 网络延时
Tab.1 Network delays

延时类型	计算公式	举例
传输延时	传输距离/(光速*0.75)	300 m 的传输距离约导致 1 μs 的延时
序列化延时	数据包大小/传输率	100 M 网络传输 64 Byte 约需 5 μs 的延时
处理延时	数据包通过网络设备时,均需要一定的处理时间	

与 SNTP 相比,IEEE 1588 标准^[14]采用软硬件结合的方式,可以实现亚微秒级的网络同步精度,更适合于过程层。但要实现该同步协议,交换机必须支持 IEEE 1588,这无疑会增加系统造价。而若系统中同时存在 2 种同步标准,又将带来兼容性和互操作性问题,并增加系统的复杂度。如何解决这些问题,尚需作大量技术论证和实践验证。

5 实时性问题

动作时间是保护系统的重要性能指标。首先分析常规保护和全数字化保护系统在处理时间上的差

异^[15]。图 3 为保护系统的处理时间图,图中 t_D 为数据处理时间(含低通滤波、采样保持、A/D 转换等); t_P 为保护算法处理时间(含保护测量、动作判断时间等); t_O 为保护出口时间(含出口继电器动作时间); t_B 为断路器动作时间; $t_{NIC1,2}$ 为网络接口卡处理时间; t_{LAN} 为网络传输时间。

由图 3 可见,常规保护系统的动作时间为

$$t_{sys1} = t_D + t_P + t_O + t_B \quad (1)$$

而全数字化保护系统的动作时间为

$$t_{sys2} = t_D + t_P + t_O + t_B + t_{NIC1} + t_{LAN} + t_{NIC2} \quad (2)$$

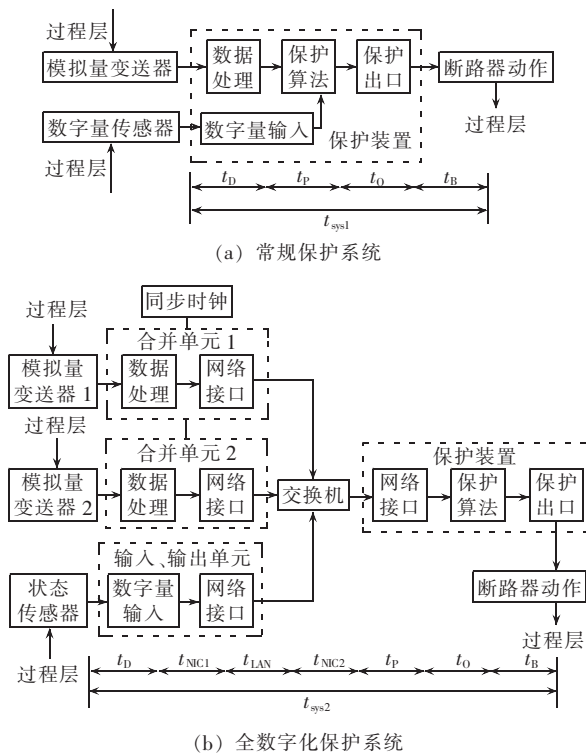


图 3 保护系统的处理时间

Fig.3 Processing time of protection system

显然,全数字化保护系统增加了额外的处理时间,即 t_{NIC1} 、 t_{NIC2} 和 t_{LAN} ,这些网络延时将对全数字化保护系统的速动性产生不利影响。不过,这种网络延时只会影响保护的出口时间,一般不会造成保护的误动或拒动。这是由于在合并单元将采样值以多播方式发送到过程总线之前,已经打上了时标。即使从各合并单元到达保护的网路延时不同也不会导致保护误动或拒动。因此,从性质上这与前节所述的合并单元间失去同步是不同的。

下面是提高全数字化保护系统实时性的方法。

a. 采用基于 Faraday 效应的光学电流互感器^[1-4]。由于光学互感器从原理上不存在饱和问题,可以减小保护算法处理时间 t_P ,从而加快保护动作。

b. 利用 GOOSE 消息代替常规保护系统的出口继电器硬件,减少 t_O ,从而加快保护动作。

c. 采用交换式以太网技术^[16],从本质上为通信的确定性提供了保证;采用 IEEE 802.1p 排队特性,使得具有高优先级的数据帧(如采样数据以及 GOOSE

消息)获得更快的响应速度。以上技术使得网络总延时可被控制在 IEC 61850 规定的范围内,即小于 3 ms。

6 结语

笔者从可靠性、安全性、时间同步性以及实时性等 4 个方面,较系统地阐述了全数字化保护系统目前存在的问题,并结合现有的技术水平,提出了相应的解决方案。全数字化保护系统是一项全新的技术,在现阶段,对其问题与缺点的认识与对其优点的认识同等重要。希望此文能对全数字化保护系统的研发与实用化有积极的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 曾庆禹. 电力系统数字光电量测系统的原理及技术[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 1-5.
ZENG Qing-yu. Principle and technology of digital electro-optic measurement for power system [J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 1-5.
- [2] 曾庆禹. 电力系统数字光电量测系统的应用及效益分析[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 6-9, 19.
ZENG Qing-yu. Application of digital electro-optical measurement technology in power system and analysis of its benefit [J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 6-9, 19.
- [3] 刘青, 王增平, 徐岩, 等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 11-14.
LIU Qing, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. Research on the influence of optical current transducer on protective relaying system [J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 11-14.
- [4] 滕林, 刘万顺, 李贵存, 等. 光学电流传感器及其在继电保护中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 31-33.
TENG Lin, LIU Wan-shun, LI Gui-cun, et al. Optical current transducer and its application in protective relaying [J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 31-33.
- [5] 门石, 张振华. 新型电流电压传感技术的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.
MEN Shi, ZHANG Zhen-hua. The research of new type current and voltage sensor technology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.
- [6] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71, 87.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation [J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71, 87.
- [7] ZHANG Pei-chao, PORTILLO L, KEZUNOVIC M. Compatibility and interoperability evaluation for all-digital protection system through automatic application test [C] // IEEE PES General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2006: 649-654.
- [8] IEC. IEC 61850 Communication networks and systems in substation - part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)-sampled analogue values over ISO 8802-3 [S]. [S.l.]: IEC, 2005.
- [9] ZHANG Pei-chao, PORTILLO L, KEZUNOVIC M. Reliability and component importance analysis of all-digital protection systems [C] // IEEE 2006 PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA: IEEE, 2006: 1380-1387.
- [10] IEC. IEC 62351 Data and communication security [S]. [S.l.]: IEC, 2006.

- [11] 国家电力监管委员会. 电力二次系统安全防护规定[S]. 北京: [出版者不详], 2005.
- [12] IEC. IEC 61850. Communication networks and systems in substation-part 5: communication requirements for functions and device models[S]. [S. l.]: IEC, 2005.
- [13] UCA International Users Group. Implementation guideline for digital interface to instrument transformers using IEC 61850-9-2 [EB/OL]. [2005-10-10]. <http://www.ucainternational.org>.
- [14] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEEE 1588 实现变电站过程总线采样值同步新技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 60-63.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. A new IEEE 1588 based technology for realizing the sampled values synchronization on the substation process bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 60-63.
- [15] APOSTOLOV A, VANDIVER B. Functional testing of IEC 61850 based IEDs and systems[C]//Power Systems Conference and Exposition. New York, USA: IEEE, 2004: 640-645.
- [16] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. System architecture of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.
- (责任编辑: 李 玲)

作者简介:

张沛超(1970-), 男, 江苏连云港人, 副教授, 博士, 主要研究方向为专家系统在电力系统中的应用及电网调度自动化技术(**E-mail**: pczhang@sjtu.edu.cn);

高翔(1962-), 男, 上海人, 高级工程师, 硕士, 从事电网继电保护与自动化运行与管理工作的(**E-mail**: gao_x@ec.sp.com.cn);

顾黄晶(1982-), 女, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: ducky2001@sjtu.edu.cn)。

Main issues of all-digital protection system and solutions

ZHANG Pei-chao¹, GAO Xiang², GU Huang-jing¹, HUO Chao¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The reliability issues of all-digital protection system are analyzed and the component importance analysis is introduced to guide protection system design. The information security issues of protection system on network are analyzed and it is suggested to set up protection system based on IEC 62351, with the precondition of ensured system speediness and compatibility, and systematically evaluate its security. The impacts of inter-substation synch, intra-substation synch and synch loss on different protection principles are analyzed respectively. Measures which should be taken during synch loss are proposed for protections based on different principles. Two synchronization standards of SNTP (Simple Network Time Protocol) and IEEE 1588 are compared and it is suggested to apply IEEE 1588 at process level. The main factors that affect the speediness of all-digital protection system are illustrated. It is suggested to adopt the optical transducer, the GOOSE message instead of output relay and the switching Ethernet technology to improve system speediness.

Key words: all-digital protection; IEC 61850; reliability; security; synchronization; real-time