基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置方案设计

宋锦海，宣筱青，朱开阳，叶振风，李雪明，罗剑波
（国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司，江苏省南京市 210003）

摘要： 针对数字化变电站的一次设备、二次设备的变化，从信息采集方式、控制方式、通信方式等方面说明了数字化变电站安全稳定控制技术与传统变电站的不同，并根据数字化变电站的特点和要求，详细介绍了基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置系统的构架、硬件平台和软件结构，并对稳定控制装置采用的基于现场可编程门阵列（FPGA）的高实时性电气量算法进行了描述。试验结果证明：这种电气量算法的实时性和精度高于传统方法，特别在频率偏离工频时基波有效值计算有明显的精度优势，能够满足数字化变电站安全稳定控制的要求。

关键词： IEC 61850；数字化变电站；安全稳定控制；通用面向对象变电站事件（GOOSE）；快速傅里叶变换（FFT）

0 引言

数字化变电站是以具备数字化接口的一次设备和高速网络通信平台为基础、通过统一的协议标准实现信息共享和互操作、达到继电保护等二次设备网络化和数据管理等自动化的变电站[1-3]。符合 IEC 61850 标准的变电站通信网络和系统、智能化的一次设备、网络化的二次设备、自动化的运行管理系统，是其最主要的技术特征[2,4]。随着智能化开关、电子式电流互感器、电子式电压互感器等技术日趋成熟[5-6]，以及高速通信网络在实时控制系统中的开发应用[7]，数字化变电站将会逐渐推广。随着中国智能电网建设的推进[8-9]，智能变电站将逐渐替代数字化变电站，因此，研究数字化变电站将为智能变电站的建设推广提供基本的技术基础和知识储备。

安全稳定控制装置（系统）是保证电力系统安全稳定运行的第二和第三道防线的重要设备。对于数字化变电站，由于一次设备的智能化，其二次设备系统结构发生了巨大的变化[10]，因此其安全稳定控制装置的构架、控制方式也将不同于传统的安全稳定控制装置，必须在与智能化一次设备接口、装置网络化以及信息化等方面满足数字化变电站的要求。

1 数字化变电站对安全稳定控制技术影响

数字化变电站将变电站分为过程层、间隔层、系统层，并以某个对象元件为单位进行建模，与传统的变电站控制和管理模式有明显不同。首先，过程层与间隔层由以往的电缆连接变成光纤连接，由原先的模拟信号连接变成数字信号交互，由原先的电气串并联方式变成网络方式；其次，间隔层内的设备间通过网络共享输入信号，共同控制智能一次设备；同时具备设备的互换性和互操作性[11]。系统层采用统一的 IEC 61850 制造报文规范（MMS）协议进行组网，分别与间隔层不同设备进行信息交互，这些变化对传统的安全稳定控制技术将产生一系列影响。

1.1 信息采集

安全稳定控制装置的采集信息主要有交流电流、交流电压等模拟量信息，开关、刀闸等位置信号和保护跳闸信号，以及异地的线路、元件等运行信息。数字化变电站采用了电子式互感器，电流、电压信号通过合并单元（MU）直接提供光纤以太网接口的数字信号，满足 IEC 61850-9-1 和 IEC 61850-9-2 标准，这就要求安全稳定控制装置也必须有多个对应的接口；对于开关量信号，目前的数字化变电站多采用增加智能控制单元以实现数字化，即通常所说的智能操作箱，负责接收控制命令并以传统电气接口的方式输出控制信号给一次开关设备，同时，将一次开关设备的当前信号转换成数字信号，按 IEC 61850 的通用面向对象变电站事件（GOOSE）协议输出到过程层网络。通常测控单元和保护装置都是面向单元的，一个装置面对一个元件，而安全稳定控制装置除失步解列装置以外通常面向整个站或某个区域，需要同时采集多个元件的信息，因此其与保护装置和测控装置的数字化变电站应用有很大不同[12-14]。对于数字化信息的断面统一问题[15]、数据同步和数据合法性问题、多口的通信问题，以及大量

收稿日期：2010-03-02；修回日期：2010-04-08。
国家电网公司科技项目“数字化变电站对电网安全稳定控制支撑技术的研究”；已申请国家发明专利（申请号：200910212651.6）。

的信息提取和处理问题,都是传统的安全稳定控制装置没有遇到的。

1.2 控制出口

数字化变电站的控制信号采用网络方式,在过程层以 GOOSE 协议形成网络方式进行出口控制。传统的安全稳定控制方式采用开关量接点进行点对点控制,每个环节的传输时间相对不变,而 GOOSE 网络的控制方式对于多个轮次的控制特别是加速轮和特殊轮控制输出的实时性将会变得不确定,对于保护装置只有一个控制对象,控制延时问题相对简单。此外,对于现有的运行管理规定,每个控制出口均可通过投退有明显开断的硬件压板方式控制出口的投入和退出,网络方式不能设置硬件压板,而如果设置在智能操作箱的出口上将是面对所有的保护与监控等二次设备,这将是管理方面面临的新问题。

2 基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置

2.1 系统硬件架构

基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置硬件采用模块化设计方式,模块之间采用基于现场可编程门阵列(FPGA)的高速同步串行通信的方式交互信息[16]。装置硬件平台由 5 个功能模块组成,分别为采样值(SV)接收处理模块、决策判断模块、控制信号接口模块、通信模块、后台信息管理模块。系统结构图如图 1 所示。

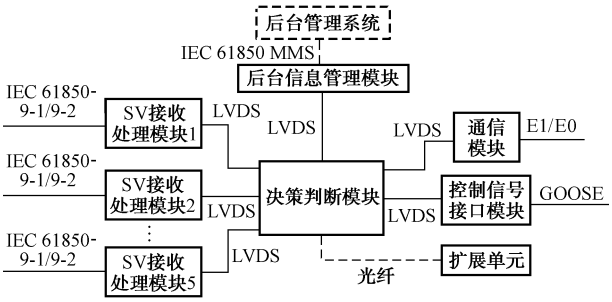

图 1 系统结构
Fig. 1 System frame

SV 接收处理模块主要实现与 MU 的信息交互,获取元件的实时运行信息。通过光纤以太网接口以 IEC 61850-9-1 和 IEC 61850-9-2 协议接收 MU 传送出的信息。由于 MU 采样频率较高,不同 MU 发出的信息时间可能存在差异,因此需要对接收到的 SV 进行转换和处理。安全稳定控制系统面向整站或区域电网,因此是跨间隔设备,一个装置/系统往往要采集和控制数个甚至数十个元件,因此每个 SV 接收处理模块设计可以同时与 4 个 MU 通信接口,每个决策判断模块可以同时挂接 5 个 SV 接收处理模块,单层装置最多可以采集控制 20 个元件;通过光纤还可以级联另外一个决策判断模块,这样 2 层装置最多可以采集控制 40 个元件,基本能满足大型变电站复杂控制的需要。SV 接收处理模块以低电压差分信号(LVDS)方式通过高速同步串行通信接口与决策判断模块交互信息。

决策判断模块为装置的核心模块和神经中枢,负责收集各个 SV 接收处理模块传来的信息,进行综合计算,根据预先设计的控制策略作出相应的判断决策,并通过高速同步串行通信接口将决策结果下发到控制出口模块或通信模块。

控制信号接口模块接收到决策判断模块发出的控制信息后,根据 CID 文件的配置,将控制命令以 GOOSE 方式发送到 GOOSE 网上。此外,控制信号接口模块连接到 GOOSE 网上,可以实时接收 GOOSE 网上的开关量信息,并将开关量信息上传到决策判断模块。

通信模块负责与异地安全稳定控制装置/系统交互信息,获取异地电网运行情况,实现远方切机切负荷。通信模块通过高速同步串行通信接口与决策判断模块进行信息交互,通过 E1(2 048 kbit/s)或 E0(64 kbit/s)等与同步数字体系(SDH)等设备连接,接入通信网络。

后台信息管理模块实现后台 MMS 通信、CID 文件解析、人机接口等功能,通过高速同步串行通信接口与决策判断模块进行通信。

2.2 系统软件方案

对于电网安全稳定控制装置,要求电网发生异常时尽可能快地采取措施保证电网稳定,因此对软件的效率和实时性要求很高。传统的变电站信息量均为模拟量,装置本身直接对模拟量进行采样和转换,而对于数字化变电站,二次信息均为满足 IEC 61850 等特定协议的数字化信息,要通过以太网接口接收和发送,因而对软件要求更高。对于以太网通信,采用操作系统可大大降低软件的复杂程度,提高软件的可靠性。对于目前广泛应用的操作系统 Linux,由于其源代码完全开放,软件人员可以跟踪修改系统,以保证系统的实时性,本方案将以太网通信的响应采用硬件中断方式,并在操作系统内核态完成协议解析,因此,本平台的 IEC 61850-9-1、IEC 61850-9-2 和 GOOSE 部分采用 Linux 操作系统,其高实时性要求能够得到满足。系统软件整体逻辑框图如图 2 所示。

每个 SV 接收处理模块要接收处理 4 个元件的实时信息,如果完全依靠一个嵌入式 CPU 去实现非常困难,多个 CPU 协调处理会使系统非常复杂,

成本和可靠性也将大大增加。本系统采用硬件实现核心计算的方案，在 FPGA 芯片上用超高速集成电路硬件描述语言(VHDL)实现电气量计算，实时计算元件的有效值、频率等参数。采用 32 点快速傅里叶变换(FFT)计算，单个元件的电气量(三相电压、三相电流、零序电压、零序电流)FPGA 计算时间最快小于 30 μs。SV 接收处理模块的软件框图如图 3 所示。

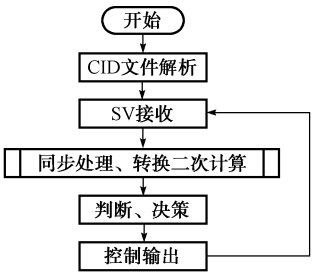

图 2　系统软件逻辑框图
Fig. 2　Logical structure of system software

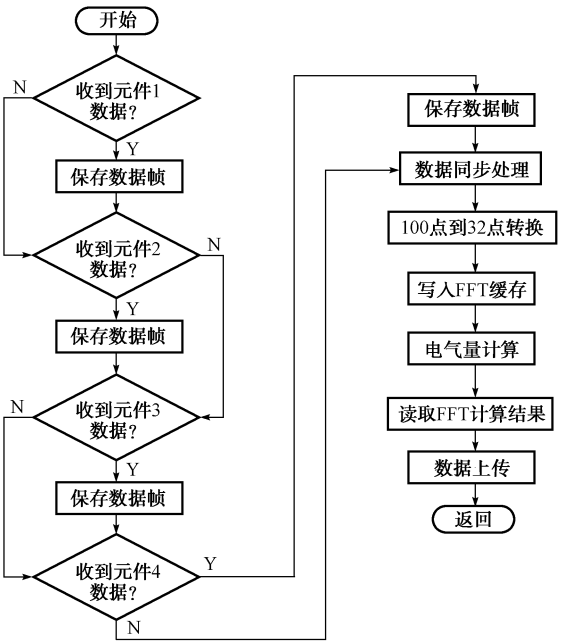

图 3　SV 接收处理模块软件框图
Fig. 3　Software flow chart of SV module

3　基于 FPGA 的电气量计算

FPGA 由于其并行执行的架构，在数字信号高速处理方面很有优势，因此基于 FPGA 硬件方式实现离散傅里叶算法时往往选择全并行 FFT。在电力系统应用方面，国内部分高校开展了基于 FPGA 实现电气量 FFT 计算的仿真研究[17-18]，结果表明这种方法在计算速度和资源占用方面均比传统的软件算法有明显优势，因此在基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置中采用了基于 FPGA 的电气量计算模块，用于多条电力线路或元件的电气量实时计算。

基于 FPGA 的电气量计算模块主要由以下几个部分组成：CPU 接口单元、时钟逻辑单元、命令/状态寄存器、系统控制器、智能 FFT 处理单元(FFT_LINE)、坐标旋转计算机单元(CORDIC)。其组成结构见图 4。

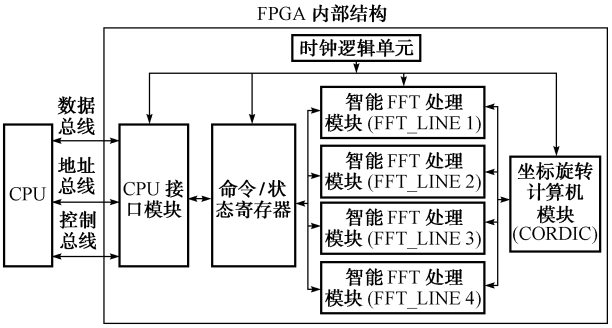

图 4　基于 FPGA 的电气量计算模块结构
Fig. 4　Structrue of electric parameter calculation module based on FPGA

与 CPU 接口部分可以看做 CPU 的外设，CPU 可以同访问普通静态随机存取存储器(SRAM)一样的模式访问 FPGA 模块。CPU 只需向 FPGA 内部写入各相电压、电流当前的采样值，然后启动计算，FPGA 会实时计算出各电气量有效值和三相电压相角，通过 2 次相位差可以计算出相应的频率，根据计算出的频率修正有效值。采用基于 FPGA 的电气量计算模块测量的有效值和频率精度分别如表 1、表 2 所示。结果表明，有效值和频率的精度均满足 Q/GDW 421—2010《电网安全稳定自动装置技术规范》的要求。

表 1　有效值测量精度
Table 1　Measuring precision of root mean square

有效值/V		精度/(%)	有效值/V		精度/(%)
输入	实测		输入	实测	
10.00	9.98	0.2	45.00	44.93	0.20
20.00	19.96	0.2	50.00	49.96	0.08
30.00	29.96	0.1	55.00	54.96	0.07
35.00	34.92	0.2	65.00	64.92	0.10
40.00	39.95	0.1	70.00	69.94	0.09

表 2　频率测量精度
Table 2　Measuring precision of frequency

Hz

输入频率	实测频率	误差	输入频率	实测频率	误差
46	46.001	0.001	51	51.001	0.001
47	47.003	0.003	52	51.998	0.002
48	48.001	0.001	53	52.992	0.008
49	48.998	0.002	54	53.999	0.001
50	50.001	0.001	55	54.997	0.003

4 结语

基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置已经通过了电力工业电力系统自动化设备检验测试中心的检验和动模试验,即将投入现场试运行。基于 FPGA 的电气量算法和高速通信信息处理方法需要在实际运行中进一步验证。此外,对于智能电网的高级应用功能,如紧急控制与校正控制的协调控制[19]已经展开了研究,基于信息平台的安全稳定协调控制技术将会在智能电网中得到应用,基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置为这些新技术的应用提供了可靠的技术和设备支持。

参 考 文 献

[1] 张沛超,高翔. 数字化变电站系统结构. 电网技术,2006,30(24):73-77.
ZHANG Peichao, GAO Xiang. System architecture of digitized substation. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.

[2] 朱大新. 数字式变电站综合自动化系统的发展. 电工技术杂志,2001(4): 20-22.
ZHU Daxin. The development of integrated automation system of digital transformer station. Electro Technical Journal, 2001(4): 20-22.

[3] 邱智勇,陈建民,朱炳铨. 基于 IEC 61850 标准的 500 kV 三层结构数字化变电站建设. 电力系统自动化,2009,33(12):103-107.
QIU Zhiyong, CHEN Jianmin, ZHU Bingquan. Practice of building 500 kV three-level digital substation based on IEC 61850. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 103-107.

[4] 高翔,张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术. 电网技术,2006,30(23):67-71.
GAO Xiang, ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.

[5] 宋军强,周彪,杨煜普. 新型光学电压互感器及其信号处理的原理与算法. 电力系统自动化, 2002,26(13):52-55.
SONG Junqiang, ZHOU Biao, YANG Yupu. A new electro-optic transformer and its signal processing algorithm and implementation. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 52-55.

[6] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用. 电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
LI Jiuhu, ZHENG Yuping, GU Shidong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 94-98.

[7] 赵金荣,王海峰. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统的实现. 电力系统自动化,2004,28(11):79-82.
ZHAO Jinrong, WANG Haifeng. Implementation of substation automation system based on the embedded Ethernet technique. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 79-82.

[8] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考. 电力系统自动化,2009,33(9):1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.

[9] 姚建国,严胜,杨胜春,等. 中国特色智能调度的实践与展望. 电力系统自动化,2009,33(17):16-20.
YAO Jianguo, YAN Sheng, YANG Shengchun, et al. Practice and prospects of intelligent dispatch with Chinese characteristics. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 16-20.

[10] 吴在军,胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统. 电网技术,2003,27(10):61-65.
WU Zaijun, HU Minqiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65.

[11] 何世恩,刘峻. IEC 61850 数字化变电站对继电保护专业的影响. 电力系统保护与控制,2009,37(3):1-4.
HE Shien, LIU Jun. Impacts of IEC 61850 digital substation on relaying protection. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 1-4.

[12] 王丽华,江涛,盛晓红,等. 基于 IEC 61850 标准的保护功能建模分析. 电力系统自动化,2007,31(2): 55-59.
WANG Lihua, JIANG Tao, SHENG Xiaohong, et al. Analysis on protection function modeling based on IEC 61850 standard. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 55-59.

[13] 操丰梅,宋小舟,秦应力. 基于数字化变电站过程层的分布式母线保护的研制. 电力系统自动化,2008,32(4):69-72.
CAO Fengmei, SONG Xiaozhou, QIN Yingli. Research on distributed busbar protection on digital substation process level. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 69-72.

[14] 黎强,李延新. 基于数字化变电站的系统保护装置设计. 电力系统自动化,2009,33(18):77-80.
LI Qiang, LI Yanxin. Design of system protecting devices based on digital substation. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 77-80.

[15] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法. 电力系统自动化,2004,28(11): 57-61.
YIN Zhiliang, LIU Wanshun, YANG Qixun, et al. New method implementing the synchronization merging unit according to the IEC 61850 standard. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.

[16] 宋锦海,余文杰,宣筱青,等. 适应特高压互联电网的 SCS-500E 安全稳定控制平台研制. 电力系统自动化,2009,33(5):91-95.
SONG Jinhai, YU Wenjie, XUAN Xiaoqing, et al. Development of SCS-500E security and stability control platform adaptable to ultra high voltage interconnected power grid. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 91-95.

[17] 李全利,李静. 基于 FPGA 的 FFT 算法研究. 自动化技术与应用,2007,26(10):32-35.
LI Quanli, LI Jing. FPGA-based FFT algorithm. Techniques of Automation & Applications, 2007, 26(10): 32-35.

(下转第 80 页 continued on page 80)

(上接第 75 页　continued from page 75)

[18] 王林泉,皮亦鸣,陈晓宁,等.基于 FPGA 的超高速 FFT 硬件实现.电子科技大学学报,2005,34(2):152-155.
WANG Linquan, PI Yiming, CHEN Xiaoning, et al. Realization of high-speed FFT by FPGA. Journal of UEST of China, 2005, 34(2): 152-155.

[19] 薛禹胜,王达,WU Q H,等.关于紧急控制与校正控制优化和协调的评述.电力系统自动化,2009,33(12):1-7.
XUE Yusheng, WANG Da, WU Q H, et al. A review on optimization and coordination of emergency control and correction control. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 1-7.

宋锦海(1973—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化及安全稳定控制。E-mail: songjinhai@sgepri.sgcc.com.cn

宣筱青(1979—),男,工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定控制。

朱开阳(1979—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定控制。

Design of Security and Stability Control Device Based on IEC 61850

SONG Jinhai, XUAN Xiaoqing, ZHU Kaiyang, YE Zhenfeng, LI Xueming, LUO Jianbo
(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Based on the characteristics of digital substation equipments, the security and stability control technology implemented in digital substations is compared with that implemented in conventional substations in aspects such as information acquisition method, control mode and means of communication. A security and stability control device based on the IEC 61850 standard is developed according to the requirements of digital substations. The system architecture, hardware platform and software structure of the device are introduced. The field programmable gate array (FPGA) based algorithm for computing electric quantities in real-time is described. Experimental results show that the real-time performance and computation accuracy are superior to those of conventional methods. The advantage of computation accuracy is more evident under the condition when the system frequency deviates from the fundamental frequency of 50 Hz.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: IEC 61850; digital substation; security and stability control; genetic object oriented substation event (GOOSE); fast Fourier transform (FFT)