适应特高压互联电网的 SCS-500E 安全稳定控制平台研制

宋锦海，余文杰，宣筱青，李雪明，姬长安，张长银
（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： SCS-500E 安全稳定控制平台是根据特高压交流同步电网的特点和要求，利用现代电子技术和通信技术研制开发的新一代分层分布式安全稳定控制平台。介绍了该平台的系统构架、硬件组成和软件结构；对其基于现场可编程门阵列（FPGA）的高速同步串行通信和基于本地电气量的无故障跳闸新判据及定值映射管理等特点做了阐述；对 SCS-500E 安全稳定控制平台针对国家特高压线路示范试验工程进行的动模试验和数字仿真试验进行了说明；还介绍了该平台的工程应用情况。

关键词： 安全稳定控制；同步串行通信；无故障跳闸；特高压
中图分类号： TM761；TM712；TM723

0　引言

随着特高压电网的逐步建设，国内电网的结构将发生很大变化[1]，互联电网规模和范围成倍扩大，电网特性也将随之发生变化；电网的稳定问题将更加突出，并制约电网的发展，威胁互联大电网的安全运行。国内外互联电网的运行经验表明，特高压互联电网中发生故障波及面大，会严重影响到多个区域电网，引起连锁反应而导致系统大面积停电的可能性大大增加，由于相继事件导致互联电网失去安全稳定性的概率也大大增加，因此，需要研究适应特高压互联大电网的安全稳定控制通用平台，满足中国现代电网发展的需要。

互联大电网的稳定控制必然是由 2 个或多个区域的稳定控制系统组成，电网的信息量大大增加，光纤主干网通信的实施为实现区域间大容量信息高速、可靠、实时的传送提供了良好条件。实现特高压互联大电网安全稳定的控制，要求稳定控制装置的信息处理能力、快速计算能力、装置之间的信息交换速度以及与其他系统之间的信息交换速度、容量等需大幅度提高，现有的稳定控制设备[2]在通信、处理能力等方面仍然欠缺，不论从速度上还是从容量上，都限制了稳定控制系统性能的发挥，难以满足特高压互联电网稳定控制的要求。

1　SCS-500E 安全稳定控制平台构成

根据特高压互联电网的特点和安全稳定控制的需要——强大的信息处理能力和高速的信息交互能力，SCS-500E 安全稳定控制平台采用了分层分布式系统结构，分为决策层、测控层、信息交互层这 3 个部分。

1.1　SCS-500E 安全稳定控制平台硬件构成

分别对应于决策层、测控层和信息交互层的系统结构，SCS-500E 分布式稳定控制平台硬件组成分为 3 个部分——主控单元、I/O 单元和通信单元。系统结构图如图 1 所示。

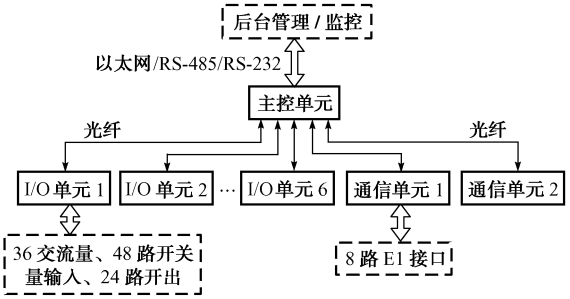

图 1　SCS-500E 系统结构
Fig. 1　System structure of SCS-500E

SCS-500 安全稳定控制平台内部通信采用了基于现场可编程门阵列（FPGA）的自动编组码高速同步串行通信技术，速率可达 32 Mbit/s，根据安全稳定控制装置通信的特点采用了专门的自动编码和组码技术，提高了通信的效率和可靠性，同时保证了实时性。

由于 FPGA 具备可编程和能够进行高速并行运算的特性，它可以为 CPU 定制各种外设。目前，中低端的 FPGA 芯片即能够集成高密度的逻辑单元和大容量的内存单元。在 SCS-500E 安全稳定控制平台中采用了 FPGA 芯片，集成了传输层和链路

收稿日期：2008-07-22；修回日期：2008-12-08。

层通信功能的稳定控制高速通信模块 ACSC，以提高通信速率，实现高速和高可靠性的数据传输。在一块 FPGA 芯片内可以集成多个模块，且能够并行运行，CPU 只要访问不同的内存段即可实现一对多的通信。

ACSC 的通信协议层结构和功能见表 1。ACSC 和常用几种通信方式的一些关键特性的比较见表 2。

表 1　ACSC 的结构和功能
Table 1　Structure and function of ACSC

ACSC 协议层	对应 OSI	ACSC 所含功能
应用层	应用层，表示层，会话层	实时多点数据采样分析；远程复归；远程切机；系统对时；系统同步采样
传输层	传输层，网络层	提供内存接口（含扩展功能）、控制命令和通信状态、地址传输管理、数据管理、数据地址映射
链路层	链路层	数据分帧传输；循环冗余校验；时钟处理；编码/解码
物理层	物理层	光纤/LVDS 等

表 2　ACSC 和常用通信方式的特性比较
Table 2　Comparison of ACSC with usual communication types

项目	通信介质	接口方式	最高速率/(Mbit·s^{-1})	通信距离	可靠性	实时性	适用环境
ACSC	光纤/LVDS	连续的应用层数据	32.768	<5 m (LVDS) <50 km (光纤直连)	高	高	本地/远程
RS-485	双绞线	字节	0.115 2	<10 km	中	低	本地
CAN	双绞线	字节	2	<10 km	高	高	本地
以太网	双绞线	数据包	100(工业应用)	<2 km (直连)	中	中	本地/远程

SCS-500E 安全稳定控制平台内部将通信信文分为一般信文和紧急信文，这 2 种信文有不同的优先级。正常情况下，安全稳定控制装置内部大部分时间是在传送一般信文，当发生故障和事件时，立即中断当前一般信文的传输，发送紧急信文。

SCS-500E 安全稳定控制平台内部的同步串行通信的物理传送接口分为低电压差分信令传输(LVDS)和光纤传输。在一个机箱内部模件之间的传输采用 LVDS 方式，简化连接方式；机箱之间采用光纤传输，提高通信的抗干扰特性，保证通信的可靠性。

主控单元为系统的枢纽单元，主要功能是分析、决策和输出控制，同时提供系统的人机接口、通信管理等，另外还负责与后台管理系统的通信和在线策略表的刷新。主控单元主要分为决策模块和通信管理模块，决策模块通过光纤与 I/O 单元、通信单元连接。原理框图如图 2 所示。

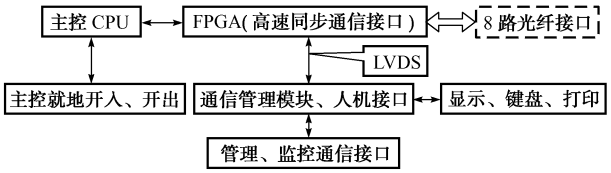

图 2　主控单元原理框图
Fig. 2　Structure of core control unit

I/O 单元是 SCS-500E 安全稳定控制平台采样分析、出口输出的单元。通过光纤与主控单元连接，SCS-500E 安全稳定控制平台采用高速数字信号处理器完成数据的采集、计算、单元故障判断以及与主控单元的信息交互。

通信单元通过光纤接口将传送来的数据转换为 8 路 E1/64 kbit/s 同向接口数据，以便接入同步数字体系(SDH)或者脉冲编码调制(PCM)设备，通过数字通信网络传输到对侧。

1.2　SCS-500E 安全稳定控制平台软件特点

SCS-500E 安全稳定控制平台的软件主要包括主控单元软件、I/O 单元软件、通信单元软件、定值和文件管理软件、故障模拟和仿真软件等几个部分。对于工频量的计算采用了修正的傅里叶算法[3-4]计算采样元件的有效值、功率、频率零序电压和零序电流值，修正傅里叶算法的运用解决了在同步采样时因傅里叶算法栅栏效应和泄漏现象导致较大测量误差的问题。此外，SCS-500E 安全稳定控制平台采用了全新的基于本地电气量的无故障跳闸判据、独特的定值映射管理模式及装置级故障在线仿真等功能设计。

1.2.1　基于本地电气量的无故障跳闸判据[5-6]

SCS-500E 安全稳定控制平台采用基于本地电气量计算测量阻抗的无故障跳闸新判据，利用安装处的测量阻抗值在线路无故障跳闸时与潮流转移时具有明显差异的机理，解决了传统无故障跳闸判据不能保证正确区分潮流转移与无故障跳闸的缺陷。新的无故障跳闸判据可以描述如下[6]：

条件 1：扰动前 200 ms 的线路功率 $|P_{-0.2s}| \geqslant$ 定值 P_{s1}。

条件 2：扰动中前后 20 ms 的线路电流有效值变化量为：

$$|\Delta I| = |I_k - I_{k-0.02s}| \geqslant I_s(\text{定值})$$

条件 3：扰动后有两相电流有效值 $I \leqslant 2\% I_n$，I_n 为线路额定电流。

条件 4：扰动后线路功率 $|P_t|<P_{s2}$（定值）。

条件 5：扰动后有两相电流有效值 $I\leqslant I_{s1}$（定值），I_{s1}稍大于线路的充电电流。

条件 6：扰动后测量阻抗及功率因数等于线路开路时的数值。

条件 7：装置启动后同时满足条件 1～条件 3 这 3 个条件，经延时 T_{s1}后则判为本侧无故障跳闸。装置启动后同时满足条件 1、条件 2、条件 4～条件 6 这 5 个条件，经延时 T_{s1}后则判为对侧无故障跳闸。

本侧无故障跳闸后装置安装处的电流接近为 0；对侧无故障跳闸后装置测量阻抗是一个定值，其相位接近于 90°；潮流转移后测量阻抗随两侧电压的不同而不同，但与无故障跳闸后的测量阻抗相比有明显不同。

1.2.2 定值映射管理

SCS-500E 安全稳定控制平台内部采用了全新的定值管理和映射模式，简化了用户对定值的管理，同时加强了定值修改管理，每次定值修改都被记录。

定值不再区分主控单元定值和 I/O 单元定值，而是由主控单元统一管理，所有的定值都存储在主控单元中，主控单元和 I/O 单元的映射对应关系也存储在主控单元中，主控单元通过定值映射关系实时向 I/O 单元发送相应的定值。元件被旁代时，根据旁代压板的情况，主控单元向被旁代元件发送约定好的无效编码，同时向旁路发送被旁代元件的定值（旁路的电压互感器/电流互感器定值不变）。采用定值映射的优点是用户只需设置和管理一套装置定值，同一电压等级的元件只需同一组定值；同时避免元件在被旁代时，同一个元件在一个装置中可能存在 2 套相同定值（即某个元件在本身所属的从单元中有自己的定值，在旁路单元处理机中还有一套重复的定值）的情况。降低了定值管理的复杂性和出错概率及定值管理人员的劳动强度。

1.2.3 装置级故障在线仿真

SCS-500E 安全稳定控制平台故障仿真软件可以仿真常见的多种故障类型，可单独对各个元件分别进行设置和仿真，模拟设定的故障类型，SCS-500E 安全稳定控制平台接收到相应的仿真设定和数据后自动模拟故障类型进行故障仿真，验证该平台的逻辑和其他功能，无须外接其他任何设备。

SCS-500E 安全稳定控制平台可以在后台调试 PC 机上通过以太网传输模拟的数据仿真电网各种故障，方便进行装置策略和功能的验证。数据仿真软件可以在 PC 机上直接填写被模拟元件的电压、电流、频率、功率、异常字和故障类型、开入等，也可按照类似 BPA 格式填写好数据形成一个文件作为数据仿真的数据源。数据源填写后使用 PC 机通过百兆以太网直接发送给稳定控制装置进行电网各种故障状态下的数据仿真。

2 SCS-500E 安全稳定控制平台典型配置

一个典型的 SCS-500E 安全稳定控制平台的硬件由主控单元、若干个 I/O 单元和若干个通信单元组成。I/O 单元和通信单元的个数根据每个稳定控制工程接入的模拟量数目和通道的复杂程度而定。主控单元总共有 8 个方向的光纤接口与 I/O 单元及通信单元连接，每个光纤接口都可任意配置成连接 I/O 单元或连接通信单元。每个 I/O 单元可以采集和控制 6 个元件的相关信息。

典型的 I/O 单元有 4 种配置：

1）3U3I 模式：可以采集 6 个元件（三相电压和三相电流）。

2）4U32I 模式：可以采集 16 个元件（2 段母线的线电压和 32 个相电流）。

3）6U30I 模式：可以采集 10 个元件（2 段母线的相电压和 30 个相电流）。

4）24U12I 模式：可以采集 4 段母线（12 个电压）和 12 个元件的单相电压和单相电流。

第 1 种 3U3I 模式接入全相的电压和电流，一般用于110 kV以上电压等级的元件，一个 I/O 单元可以接入 6 回全相的 220 kV 以上的元件；第 2 种和第 3 种模式一般用于接入 110 kV 电压等级的元件，至于采用哪一种模式需要看现场接线和安控系统设计的复杂程度。第 4 种模式特用来接入 4 段母线（220 kV或 110 kV）和 12 回 10 kV 元件。I/O 单元的 4 种模式可以灵活组合，匹配电力系统安控系统的各种情况。

每个通信单元可以有 8 个方向的 2 Mbit/s 通道，可以满足常见的安控系统通信要求。500 kV 以上电压等级的稳定控制系统接入装置的元件很少超过 12 回，与其他站的通信也只有两三个通道，500 kV以上稳定控制系统典型的配置是变电站的出线故障，根据策略表切除几个电厂的机组以满足系统的暂态稳定要求。例如，安徽的西通道稳定控制系统工程，其配置了 1 个主控单元，2 个第 1 种模式的 I/O 单元和 1 个通信单元，它的功能是根据官山变电站的 2 条出线跳闸故障切除永丰电厂的机组。220 kV稳定控制系统的典型配置是系统的元件过载和系统的低频低压故障切除 110 kV 和 10 kV等级的负荷出线，需要接入 220 kV 的线路和主变用于判断过载功能，220 kV 母线用于判断低频

低压功能，110 kV 和 10 kV 元件用于统计实时的可切负荷，通常需要 1 个主控单元、3 个～5 个 I/O 单元和 1 个通信单元。其中 I/O 单元的类型可能有多种组成。

3　SCS-500E 安全稳定控制平台试验及应用

针对国家示范试验工程——晋东南—荆门的特高压线路，进行了动模试验和实时数字仿真试验。根据特高压试验系统原型，如图 3 所示，当线路发生故障时（单相瞬时故障、单相永久故障、相间故障、三相短路故障、无故障跳闸等），在动模试验和实时数字仿真试验情况下，装置均能可靠判断出故障，区分出故障类型；并根据故障前断面功率查询策略表，做出准确的切机策略。同时，基于本地电气量的无故障跳新判据在 2 种试验中均能可靠区分潮流转移和真正的无故障跳闸。

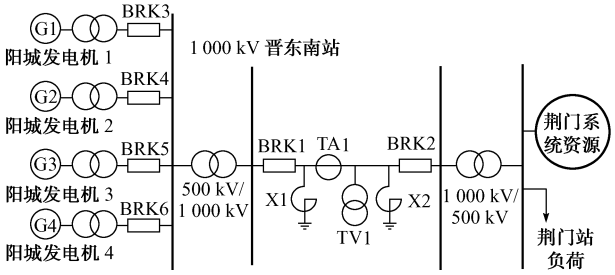

图 3　1 000 kV 特高压试验系统原型
Fig. 3　Prototype of 1 000 kV UHV AC test system

SCS-500E 安全稳定控制平台已经在华东电网的 500 kV 官山变、铜陵永丰电厂以及广东电网的 220 kV 珠海拱北变、江门水口变投入运行。下面以珠海拱北站为例介绍 SCS-500E 安全稳定控制平台的实际应用。

珠海拱北 220 kV 稳控执行站共接入 220 kV 线路 8 回（预留 3 回）、主变变高 4 台（已有 3 台、预留 1 台）、110 kV 线路 12 回、10 kV 单元 6 个（变低 4 个、预留 2 个）；通信接口需要与 2 个子站通信，每个子站有 A 和 B 这 2 套独立系统，总共 4 个通信通道。根据上述需求，配置了一个主控单元，4 个第 1 种 I/O 单元，1 个第 4 种 I/O 单元，1 个通信单元。其系统结构如图 4 所示。

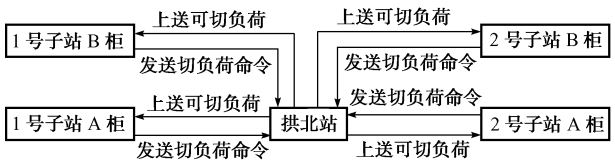

图 4　珠海拱北站系统结构
Fig. 4　System structure of Gongbei Zhuhai Station

珠海拱北站的本体功能是判断 220 kV 线路和主变的过载以及母线的低频低压故障，切除相应的 110 kV 和 10 kV 的负荷线路，同时接收 2 个子站的切负荷命令，并将执行情况上报。切除的线路有 3 个切负荷排序表，每个排序表对应各自的功能，分别是远方切负荷命令排序表、过载排序表和低频低压排序表。

4　结语

SCS-500E 安全稳定控制平台为提高大型互联电网安全稳定性电网输电能力提供了一套可行的稳定控制方案；为国内特高压互联电网提供了一套可供推广的、具有自主知识产权的大型互联电网安全稳定控制平台，该系统既可以用于 1 000 kV 特高压线路，也可以用于 110 kV 等级含 10 kV 元件的场合，可节省电网一次设备的投资，减少电网的运行费用，避免大电网稳定破坏事故的发生，减轻事故发生的后果。基于高速同步通信技术和高速信息处理技术的平台将为实现在线优化和更新控制策略提供必要的技术条件，对实现协调防御控制[7-9]提供可靠的运行平台。

参 考 文 献

[1] 周勤勇，赵良，郭强. 区域电网 2020 目标网架稳定研究. 中国电力，2005，38(5).
ZHOU Qinyong, ZHAO liang, GUO Qiang. Research on safety and stability of regional power grids in 2020. Electric Power, 2005, 38(5).

[2] 宋锦海，李雪明，姬长安，等. 安全稳定控制装置的发展现状及展望. 电力系统自动化，2005，29(23)：91-96.
SONG Jinhai, LI Xueming, JI Changan, et al. Current situation and development prospect of security and stability control equipment. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 91-96.

[3] 王茂海，孙元章. 基于 DFT 的电力系统向量及功率测量新算法. 电力系统自动化，2005，29(2)：20-24.
WANG Maohai, SUN Yuanzhang. A DFT-based method for phasor and power measurement in power systems. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24.

[4] WANG Maohai, SUN Yuanzhang. A practical method to improve phasor and power measurement accuracy of DET algorithm. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1054-1062.

[5] 方勇杰，徐海波. 基于本地电气量的无故障跳闸新判据. 电力系统自动化，2008，32(3)：33-35，65.
FANG Yongjie, XU Haibo. A new method of identifying non-fault line tripping based on local electrical measurements, Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 33-35, 65.

[6] 徐海波，方勇杰，李雪明. 基于本地电气量的无故障跳闸新判据

的实验验证.电力系统自动化,2008,32(10):42-44,75.
XU Haibo, FANG Yongjie. Test validation of the new method of identifying non-fault line tripping based on local electrical measurements. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 42-44, 75.

[7] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一).电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part Ⅰ. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.

[8] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二).电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part Ⅱ. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.

[9] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(三).电力系统自动化,2006,30(3):1-10,106.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part Ⅲ. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10, 106.

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@nari-china.com

余文杰(1976—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定控制。

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

Development of SCS-500E Security and Stability Control Platform Adaptable to Ultra High Voltage Interconnected Power Grid

SONG Jinhai, YU Wenjie, XUAN Xiaoqing, LI Xueming, JI Chang'an, ZHANG Changyin
(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: According to the characteristics and requirements of the UHV power grid, as well as the development of modern electronic technology and communication technology, SCS-500E security and stability control system is designed. The general platform structure of hardware and software of the SCS-500E security and stability control system is introduced. Some techniques, such as, the characteristics of SCS-500E—high-speed communication based on FPGA, criterion of non-fault line tripping based on local electrical measurements and management of set-value mapped, are described. The digital and physical simulation for the national model UHV AC project with SCS-500E system is presented. The applications of the SCS-500E system on field projects are also included.

Key words: security and stability control; synchronous serial communication; non-fault tripping; UHV