

# 暂态稳定控制系统的静态测试方法

屈万一,袁荣湘,刘启胜

(武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072)

**摘要:** 以一个基于“在线预决策,实时匹配”的暂态稳定控制系统为例,利用电网的实际运行数据,采用“白盒法”、“黑盒法”测试了软件的各个组成部分。通过测试程序、实验电路对该系统的运行可靠性,数据采集的正确率、速度和误差,暂态稳定分析软件包的正确性,模块间的通讯能力等进行了测试,获得了关于该系统的大量数据,为该系统的进一步动态模拟实验和最终投入运行打下了坚实的基础。

**关键词:** 电力系统; 暂态稳定控制系统; 静态测试

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)08-0022-04

## 1 引言

电网发生稳定破坏事故,可能导致电网瓦解,造成巨大的经济损失和不良社会影响。随着现代电力系统规模的日益庞大,电力市场环境的逐步形成,大电网的稳定问题(尤其是暂态稳定问题)变得更加复杂。开发和研制针对系统的暂态稳定控制装置显得尤其重要,国内外已经有一些成果及其实际应用例子<sup>[1-4]</sup>。

暂态稳定控制系统主要有3种控制方案:“离线预决策,实施匹配”方案离线计算量大,对电网变化的适应性差,对预料之外的运行情况无法适应,并存在失配、过切的情况。“在线实时分析决策”方案对计算速度的要求在目前和将来一段时间内还无法达到。目前,具有较好应用前景的是“在线预决策,实时匹配”的方案。

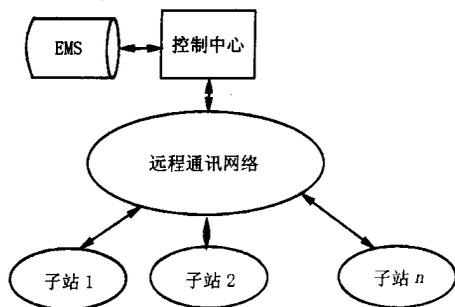


图1 暂态稳定控制系统的基本框图

Fig. 1 Sketch of the TSC system

“在线预决策,实时匹配”暂态稳定控制系统的主要框架如图1所示,系统由一个控制中心和若干个区域子站构成,区域子站包括前置机和工作站两部分。前置机采集本地实时运行数据(电压、电流、继电器及开关状态等)并由通信接口传送至工作站,

工作站将这些数据处理后,由远程通信网络上传至控制中心,控制中心利用所有子站的准实时数据和EMS的数据进行暂态稳定计算,制定准实时控制措施,并下传到每个区域子站的工作站,由工作站刷新本地准实时控制措施。在发生故障时,由故障所在区域的工作站根据前置机采集到的开关变位信号,查询匹配的准实时控制措施并依此发出切机、切负荷、投制动电阻的命令。如果远程通信网络故障,控制中心和工作站之间无法可靠联系,工作站将搜索匹配的历史对策表或执行规定的离线控制措施,以保证系统不会失去暂态稳定。整个系统由全球定位系统(GPS)提供精确授时,以保证数据的同步性。为了提高整个系统的可靠性,控制中心应具有双机热备份和实时切换功能,根据开发系统的要求,控制中心可以具有更强大的功能,如各种数据库(实时数据库、图形数据库、历史数据库)的保存、查询、更新,报表的生成以及系统的在线升级更新等。

由于在整个系统开发的各个阶段,特别是在软件开发过程中,都不可避免地遗留下许多错误和缺陷,如果不及时找出这些错误和缺陷,并将其改正,这个产品就可能留下隐患或不能使用。并且,由于暂态稳定控制系统结构复杂,软硬件接口多,需要用到大量的电力系统实时运行数据,因此,首先必须充分结合现场的特点,在实验室进行全面的静态测试并及时改正出现的问题,然后进行动态模拟实验,最后才能到现场进行安装调试和运行。

这种专业性很强的测试与普通的软件测试并不完全相同,因此不可能完全采用“软件工程”的测试方法来进行,而只能结合“软件工程”的基本要求和电力系统的特点进行测试<sup>[5]</sup>。

## 2 测试的基本概念

### 2.1 测试的目的

测试的目的是检查软件要求达到的目的是否完全可靠地达到,硬件能否可靠地工作,并尽量多地找出软件产品(主要是指程序)中的错误和缺陷,加以改正。

对于暂态稳定控制系统的软件测试,主要包括:整个系统长时间无间断运行的可靠性;数据(模拟量和开关量)采集的正确性和误差分析;控制中心暂态稳定分析软件的速度和正确性;模块之间的通信能力;执行控制措施的开关动作的正确性;控制装置对时间的严格要求能否满足;顺序事件记录是否准确。如果有条件,还可以将整个系统与实时数字仿真(RTDS)相结合进行进一步的动态测试,获得更加全面准确的测试结果。

由于暂态稳定控制系统的设计并没有固定的标准可以参照,各个系统的设计都有自己的特点,加上测试的环境、条件不同,所以测试的项目也有所差别和侧重。

### 2.2 测试用例

要进行测试,除了要有测试数据(或称输入数据)外,还应同时给出该组测试数据应该得到怎样的输出结果,我们称它为预期结果。在测试时将实际的输出结果与预期结果比较,若不同则表示出现了错误,因此测试用例是由测试数据和预期结果构成的。为了发现程序中的错误,应竭力设计出能暴露错误的测试用例<sup>[5]</sup>。

### 2.3 测试的原则

测试分为开发人员自测和测试人员测试两个阶段。自测阶段主要由程序开发人员自己进行测试,方法采用“白盒”法。测试人员测试阶段要避免程序开发人员测试自己编写的程序。这是因为程序中的错误往往是由于程序设计人员对问题说明的误解,由他来测试自己的程序就不易找出因这种误解而产生的错误。测试的方法通常应该采用“黑盒”法<sup>[5]</sup>。

对非法和非预期的输入数据也要像合法和预期的输入数据一样编写测试用例。不仅应该检查程序是否做了应该做的事,更要检查程序是否做了不应该做的事。其中,主要是进行集成测试,对各模块组装而成的系统整体进行测试,严格检查模块间的接口和通信。

## 3 测试的数据

本测试用例来源于某电网 1999 年 500 kV 骨干

网的部分典型运行方式。数据包括静态数据和实时动态数据。静态数据是线路、变压器以及各种电气装置的参数;动态数据由模拟量(线路的电流、电压、功率等)和开关量(继电保护装置的开关动作时序信号、断路器变位信号)两部分组成。各种静态参数形成数据文件供程序调用,模拟量由实验电路图 2 提供,开关量由时序开关电路板形成,该电路板由单片机程序控制,能提供精确的继电器和断路器动作时序。

本次测试中共设置 4 个区域子站,只采集与子站相连接的各条线路的数据,其余子站的数据根据运行方式人为设定。

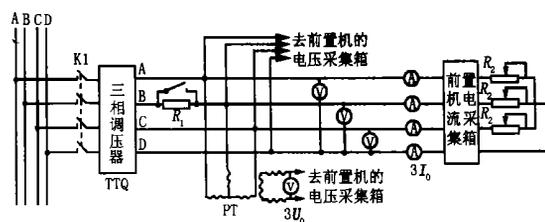


图 2 模拟量采集接线图

Fig. 2 Connections of analog collection

## 4 测试内容

### 4.1 稳定控制系统运行的可靠性

将整个测试系统连接好,加电运行,在实验电压范围内不断改变调压器电压,并由时序板发出各种继电器和开关的变位信号,整个系统应该正常运行,并能对各种输入数据做出正确的响应。该项测试应考虑到足够多的输入数据组合,并进行足够多次数的实验,以保证整个系统能在各种情况下可靠地工作。

### 4.2 数据采集的正确性及其误差分析

对于模拟量,逐级改变调压器电压,记录电压表、电流表、功率表的读数和经过程序处理显示在屏幕上的电压、电流和功率,并计算其误差。如果误差较大,应该从数据采集、处理的算法设计和测量表计的精度两个方面来分析,并加以改进。对于开关量,将电力系统中实际可能出现的各种继电器和断路器的位置状态进行组合,一一测试,观测前置机采集和工作站显示是否全部正确。表 1 是电压、电流数据采集记录的情况。

### 4.3 控制中心暂态分析软件的速度和正确性

整个控制系统中,控制中心的暂态稳定分析是关键之一,也是最耗时的模块。在最严重的情况下,也要求能够在少于 5 min 的时间内完成一次全网的

暂态稳定分析,并制定出相应的控制措施,下载到各个区域子站,所以应该针对各种不同的运行方式,来测试暂态稳定分析消耗的时间是否满足要求。对于每一次计算结果(控制措施)的检验,应该通过其它仿真程序(如 PSASP)或者动态模拟实验进行检验,保证系统不会失去稳定性。表 2 是实验的部分记录。

表 1 电压电流采集记录

Tab. 1 Collection of voltage and current

| 电压(以 A 相为例)/V |     |      | 电流(以 B 相为例)/A |      |      |
|---------------|-----|------|---------------|------|------|
| 测量值           | 采样值 | 误差 % | 测量值           | 采样值  | 误差 % |
| 20.3          | 20  | 1.50 | 1.01          | 0.99 | 1.98 |
| 40.1          | 40  | 0.25 | 2.00          | 1.98 | 1.00 |
| 59.8          | 59  | 1.33 | 3.00          | 2.96 | 1.33 |
| 80.1          | 79  | 1.37 | 4.01          | 3.98 | 0.75 |
| 100.7         | 101 | 0.3  | 5.12          | 5.07 | 0.97 |

表 2 暂态稳定分析时间记录

Tab. 2 Record of time of analyzing transient stability

| 实验次数 | 形成一个对策的平均时间/s |
|------|---------------|
| 46   | 178           |

#### 4.4 模块之间的通信能力

良好的站间通信是实现稳定控制的必要条件,本地通信可由智能通信卡来完成,可靠性很高。但是各个区域子站和控制中心之间必须采用远程通信,电力通信方式主要有三种:光纤、微波、电力线载波。光纤通道抗干扰能力强,不受气候环境的影响,是理想的通道。微波通道的可靠性则易受气候、空间辐射、镜面反射以及微波站的运行维护水平的影响。电力线载波可靠性和传输速率远不及上述两种通信方式,误码率较高,还容易受到电磁干扰,在线路挂地线检修时通信将被迫中断<sup>[6]</sup>。因此子站与控制中心的数据传输通道应根据实际情况选用,但是最好采用双通道备份的方式,以提高数据传输的可靠性。设计人员必须在系统开发研制的规划期间就规定好通信方式,并预留通道,在开发过程中严格按照规划进行研制。

在实验室环境中,各个模块之间的实际空间距离很短,所以只能以本地通信来代替远程通信进行测试,但必须考虑本地通信和远程通信在时延上的差别。

#### 4.5 执行控制措施的开关动作的正确性

稳定控制系统最终就是执行控制措施,控制发电机、负荷以及制动电阻的开关动作,保证电力系统

运行的稳定性。测试时,可以将所有可控的发电机、负荷、制动电阻的开关全部由一个继电器开出板来控制,当控制系统发出切机、切负荷、投制动电阻等命令时,只要相应的继电器动作,就表示控制措施已经发出,并最终执行。

#### 4.6 控制装置对时间的严格要求能否满足

故障的快速切除、稳定控制措施的快速执行,是保证电力系统稳定性的必要措施。因此,整个稳定控制系统对动作时间的要求是相当严格的,能否达到并尽量减少从接收到开关变位信号到稳定控制措施执行的时间,也是衡量该控制系统质量好坏的标志之一。时间的测试应采用高精度双踪示波器,同时检测开关变位信号和控制措施执行后开出板的继电器跳变信号,多次测量并记录从故障发生到控制措施执行结束的时间间隔。如果在程序中添加一些测试时间的模块,就可以分析出系统各个部分消耗的时间,并以此作为改进的依据。

#### 4.7 顺序事件记录的完整性和可用性

顺序事件记录应该完整地记录下每一次开关变位的 GPS 时间、类型、控制措施、执行结果以及执行时间,并间隔固定时段记录线路功率、电压及电流。这些数据对于分析系统运行情况、稳定控制措施的效果有重要的作用。

#### 4.8 RTDS 实时数字仿真测试

RTDS 的硬件支持多 CPU 并行处理,计算速度很快;软件采用 EMDC 核心,计算结果得到权威的认可。目前的 RTDS 已经可以支持较大的电力系统网络结构,仿真计算能力强,如果有条件,可以将开发的暂态稳定控制系统与 RTDS 结合,用 RTDS 进行实际的电力系统网络仿真,可以检验出暂态稳定分析的结果是否正确,并得到更加可信的测试结果。

## 5 结论

暂态稳定控制系统结构复杂,功能强大,软硬件结构多,另外电网结构多样,安装现场空间距离遥远,情况更加复杂。当整个控制系统设计开发完成以后,在进行实际安装调试以前,必须在实验室内部进行系统静态测试,检验系统的功能是否完全实现,设计开发中是否存在不足并加以改正。本文针对上述特点,提出了在实验室环境下对暂态稳定控制系统进行静态测试的原则和方法,具有较强的针对性和可操作性。

另外,根据所设计开发的暂态稳定控制的结构、功能以及要求的不同,还可以增加对双机备份系统

的切换测试,硬件冗余测试,实时潮流、拓扑结构检测,数据库测试等。

#### 参考文献:

- [1] 方勇杰,等. 在线预决策的暂态稳定控制系统[J]. 电力系统自动化,1999,(1):8-11.
- [2] 方勇杰,等. OPS-1 在线预决策的暂态稳定控制系统[J]. 电力系统自动化,2000,(2):56-59.
- [3] Ola H, Y Kitayama, Ito H, et al. Development of Transient Stability Control System (TSC system) Based on On-line Stability Calculation [J]. IEEE Trans. On PWRs, 1996, 11(3): 1463-1472.
- [4] 卢卫星,等. 浑江电厂安全稳定控制装置的研究[J]. 电网技术,1995,(4):38-40.

- [5] 王春森. 程序员教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2001:171-175.
- [6] 孙光辉. 区域稳定控制中若干技术问题[J]. 电力系统自动化,1999,(2):4-7.

收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2003-04-25

#### 作者简介:

屈万一(1978-),男,硕士研究生,主要从事电力系统暂态稳定控制方面的研究;

袁荣湘(1965-),男,副教授,主要从事电力系统继电保护,电力系统稳定方面的教学和研究;

刘启胜(1962-),男,副教授,主要从事电力系统稳定控制与电力电子方面的教学和研究。

### Static testing method of transient stability control system

QU Wan-yi, YUAN Rong-xiang, LIU Qi-sheng

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In this paper, a TSC(Transient Stability Control) system with principle of on-line pre-decision and real-time matching is tested. The test data from a real power system, and "White-box" and "Black-box" method are also used to test every part of the software. In addition, by programming test program and building test circuit, the reliability of the system, the correctness, trip speed and error of data collection, the software package of transient stability analysis, and the communication between modules are all tested. The testing work is useful for the further dynamic testing and the implementation of the real power system.

**Key words:** power system; transient stability control system; static test

## 《电厂运行与检修》征稿启事

针对广大电力系统从业人员的需求,在综合权衡、统筹安排之后,《继电器》杂志社以原班人马和电力相关专业的青年大学生为团队,合力打造实用型科普期刊《电厂运行与检修》。

**宗旨:**本刊意在突破传统学术期刊的局限,旨在服务电厂一线从业人员,为其构建一片交流心得体会、品评经验技术、借鉴优势项目和推广节能环保之新品与技术的天地。

**专业:**本刊专业范围广泛,涉及电厂的安全生产管理、设备安装与调试、运行与维护的全过程。囊括火电厂中炉、机、电及其辅助生产系统和水电厂主设备及其辅助设备等的维护与检修,节能与环保等各方面的技术改进与经验交流;同时还包含新品推广与资讯速递等内容。

欢迎广大电力系统从业人员踊跃投稿,共同搭建一个涵盖全国电厂的经验交流与资源共享的平台。

**投稿请寄:** 1. 河南省许昌市延安路科技中心《继电器》杂志社《电厂运行与检修》编辑部 邮编:461000  
2. E-mail: ppom@cepc.com 传真:0374-3360297  
3. 联系电话:0374-3212254, 3125278 联系人:张志强 石晋美 葛彦娜

**投稿须知:** 1. 稿件请用一般科技论文格式书写;来稿请注明作者简历(姓名、性别、学位、职称、职位及专业范围等);写清作者单位、详细通讯地址(含邮编)、电话及 E-mail,来信必复。作者请自留底稿,稿件一律不退,若三个月内未接到编辑部刊用通知,作者可自行处理稿件。  
2. 欢迎采用 E-mail 投稿;邮寄请用打印稿。