

苏南 500 kV UPFC 工程电子式互感器现场试验

张弛¹, 庞福滨¹, 罗强², 刘琛琛³, 汤汉松², 孔祥平¹

(1. 国网变电站智能设备检测技术重点实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103; 2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009; 3. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210000)

摘要:为检验苏南 500 kV UPFC 工程现场的电子式互感器性能,对尚未正式投运的电子式互感器开展现场试验。提出了对电子式互感器的直流精度和阶跃响应性能进行测试的方法,使用自备的信号源产生一次电流信号,作为被测互感器和标准互感器的输入,使用互感器校验仪接收两者的输出并进行对比分析。结果表明,工程现场使用的电子式互感器性能良好,满足投运要求。同时,试验结果也证明了所用试验装置和方法的实用性,为后续进行系统的电子式互感器现场试验提供参考。

关键词:UPFC 工程;电子式互感器;现场试验;直流精度;阶跃响应

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)02-0033-05

0 引言

作为迄今为止最为全面的柔性交流输电 (flexible AC transmission system, FACTS) 装置,统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)具有电压调节、串联补偿和移相控制等功能,可同时快速控制输电线路中的有功、无功功率^[1-4]。世界上已经建成或在建的 UPFC 装置共有 6 套。其中,南京西环网 220 kV UPFC 示范工程在 2015 年顺利建成投运,积累了大量的工程建设和科研成果。文献[5—7]讨论了 UPFC 的结构及其对原有电网的影响;文献[8]研究了 UPFC 系统的启动调试方法;文献[9—11]探讨了 UPFC 控制保护系统的配置和运行策略。在此基础上,苏南 500 kV UPFC 工程开工建设,是目前世界上电压等级最高、容量最大的 UPFC 工程,代表了柔性交流输电的最先进水平^[12]。

目前,对于新建的直流输电和柔性交流输电工程,在设备入场之后、投运之前均有针对变压器、换流器等的交接试验,用以验证设备在运输过程中没有被损坏且性能满足投运要求。但是,对于在直流场被广泛应用的电子式互感器,没有成熟的手段对其进行现场试验,而只是通过一次通流对其极性和传变准确度进行简单验证。一方面,电子式互感器是直流场及其连接区重要的电气量采集设备,其性能优劣对直流控制保护等装置的可靠稳定运行影

响巨大。另一方面,运行经验表明,电子式互感器出现的问题要明显多于传统的电磁式互感器。所以,有必要在现场开展针对电子式互感器的专项测试,保证其性能满足投运要求。

文中首先对苏南 500 kV UPFC 工程进行简要介绍,随后重点阐述针对电子式电流互感器开展的现场试验过程,分析了试验数据。结果表明,所测互感器的精度、阶跃延时等特性满足投运要求。

1 苏南 500 kV UPFC 工程

为解决苏州南部电网在直流小方式下梅木双线的 N-1 过载问题,保证充分消纳锦苏直流输送功率,提升苏南地区电网的动态无功和电压支撑能力,选择在紧邻 500 kV 木渎变装设 UPFC 装置。将梅里—木渎双线改接至 UPFC,实现 UPFC 装置在梅里—木渎双线的控制功能,UPFC 站的接入位置如图 1 所示。苏南 500 kV UPFC 工程系统建设方案如图 2 所示。

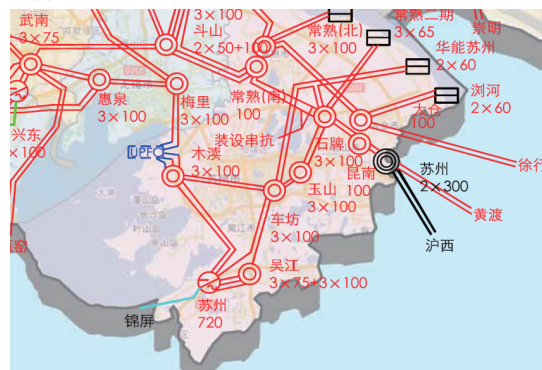


图 1 苏南 500 kV UPFC 站的接入位置

Fig.1 Access location of the Sunan 500 kV UPFC project

收稿日期:2017-11-11;修回日期:2017-12-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51707090);国家电网有限公司科技项目“500 kV 统一潮流控制器协调控制和保护配合技术研究”

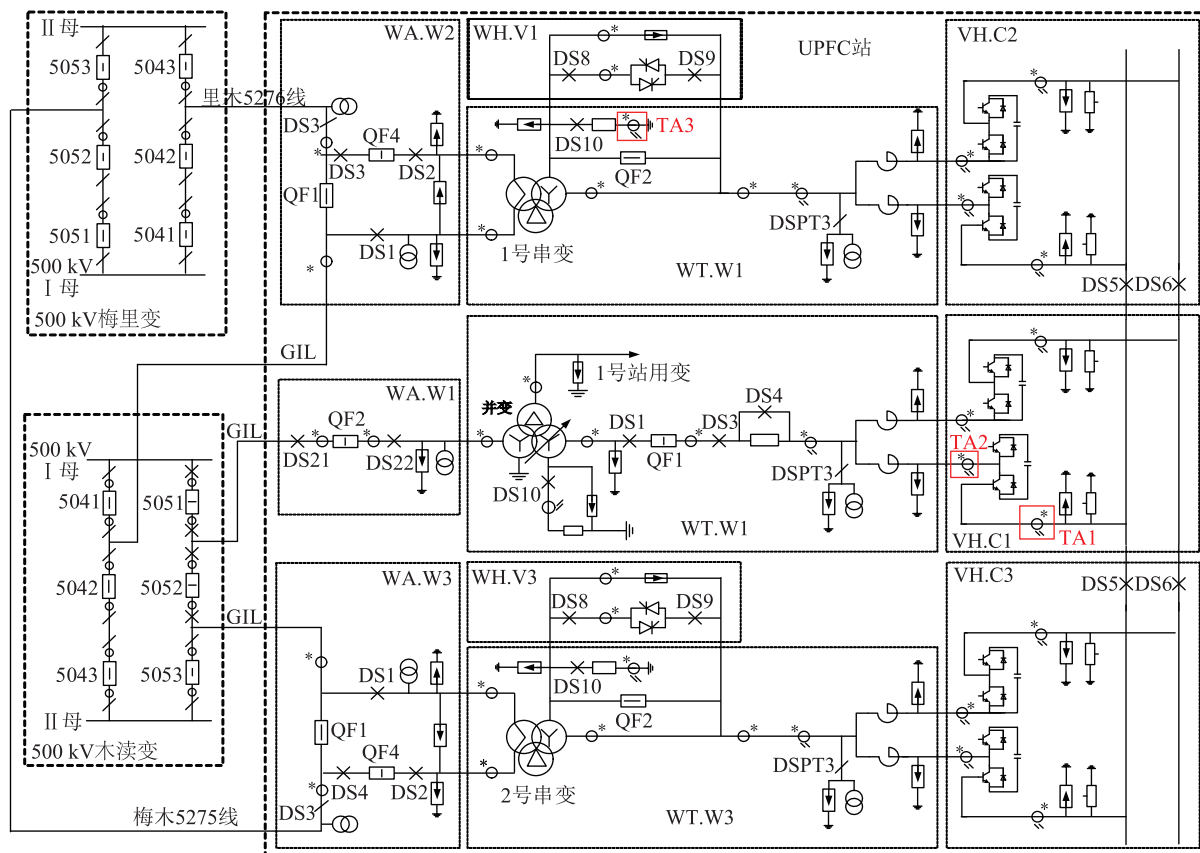


图2 苏南500 kV UPFC工程系统建设方案

Fig.2 System construction program of the Sunan 500 kV UPFC project

工程共包括3个换流器:并联侧一个换流器通过起动电阻接至并联变压器,再接入木渎500 kV母线;串联侧2个换流器通过2个串联变压器接入梅里—木渎500 kV双回线路。在并联变压器的阀侧和系统侧均配有交流断路器,串联变压器系统侧配置1台连接断路器,阀侧和系统侧各配置1台旁路断路器。3个换流器采用背靠背连接方式。

UPFC站进出线规模5回(梅里2回、木渎3回)。木渎变原500 kV梅里1、2线改接至UPFC站串联变压器分支。500 kV UPFC站新建2回联络线,由串联变压器另一分支与木渎变相连,接入原梅里1、2线间隔。当高、低压侧旁路开关均断开时,串联变压器串入线路,UPFC投入运行。并联换流器与1台三相变压器相连,后者通过专用断路器接入木渎变500 kV第5串预留间隔。

2 电子式互感器试验

2.1 试验对象

一般500 kV变电站中使用的电子式电流互感器多用于测量交流电流,采用罗氏线圈原理。而苏南500 kV UPFC工程中用到的电子式电流互感器需采集直流量,故原理有所不同。

苏南500 kV UPFC工程共使用了42套电子式互感器,其中电子式电流互感器36套,电子式电压互感器6套。电子式电流互感器中,除了3套测量变压器中性点电流的互感器采用霍尔元件外,其余均采用分流原理。电子式电压互感器则均采用分压原理。具体情况见表1。

表1 工程中使用的电子式互感器

Tab.1 Electronic transformers used in the project

类型	数量/套	型号	用途
电子式电流互感器	6	PCS-9250-EACD-90-1000	阀厅内直流电流测量装置
	9	PCS-9250-EACD-110-2000	串、并联变压器阀侧电流测量装置
	18	PCS-9250-EACD-110-2000	桥臂电流测量装置,可测交直流
电子式电压互感器	3	PCS-9250-ENC-100	变压器中性点电流测量装置
	6	PCS-9250-EAVD-100	阀厅内直流电压测量装置

由表1可知,现场使用的电子式电流互感器的型号共有3种。从这3种互感器中各选取1台进行试验,分别是并联换流器直流侧电流互感器、并联

换流器上桥臂电流互感器和 1 号串变中性点电流互感器。为表述方便,将这 3 套互感器依次命名为 CT1、CT2 和 CT3,其位置由图 2 中红框标出。

2.2 试验原理

试验中,通过直流信号源产生一次电流,并将其串接于标准互感器和被测电子式电流互感器。标准互感器将一次电流转换成小电压模拟信号输出给前置信号转换单元,后者将其转换为数字信号,通过光纤输出给电子式互感器校验仪。被测互感器则直接输出数字信号给互感器校验仪。通过后台分析系统比较被测互感器和标准互感器的输出,对被测互感器的性能进行评估。试验接线示意如图 3 所示。

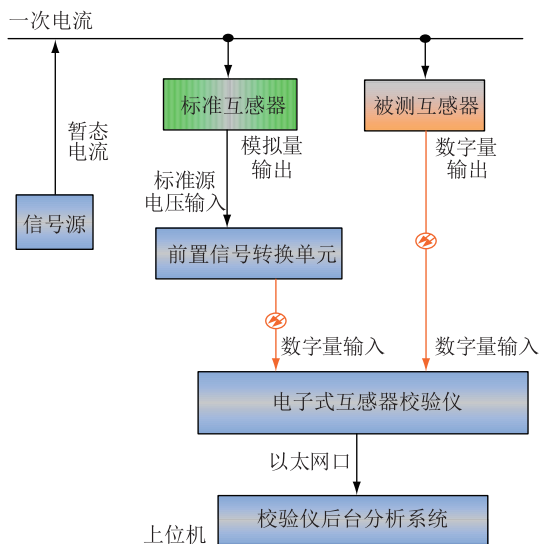


图 3 试验接线示意

Fig.3 Diagram of test wiring

本次对电子式电流互感器的试验包括 2 个项目,分别是直流精度试验和暂态阶跃试验。在直流精度试验中,信号源输出不同幅值的稳态直流信号,对被测互感器的测量精度进行考核。在暂态阶跃试验中,信号源输出直流阶跃信号,对被测互感器暂态阶跃指标中的上升时间、过冲和延时进行考核。

2.3 试验过程及结果

分别对并联换流器直流侧电流互感器 CT1, 并联换流器上桥臂电流互感器 CT2 和 1 号串变中性点电流互感器 CT3 进行直流精度试验和暂态阶跃试验。

2.3.1 并联换流器直流侧电流互感器 CT1 试验

并联换流器直流侧电流互感器 CT1 的额定电流为 1000 A。通过信号源输出幅值分别为 100 A, 200 A, 500 A 和 1000 A 的直流电流,完成被测互感器在不同比率点下的精度测试,结果如表 2 所示。

表 2 CT1 直流精度试验结果

Tab.2 Results of CT1 DC accuracy test %

比率	比差最大值	比差最小值	比差平均值	复合误差
10	-0.260 7	-0.224 8	-0.247 0	0.397 6
20	-0.160 9	-0.149 3	-0.154 5	0.201 7
50	-0.109 7	-0.106 8	-0.108 4	0.128 6
100	-0.080 6	-0.076 5	-0.078 9	0.094 6

通过信号源输出稳定后幅值为 100 A 直流阶跃信号,完成被测互感器的暂态阶跃试验,结果如表 3 所示。为表述方便,表格中用“标互”代指“标准互感器”,用“试品”代指“被测互感器”。

表 3 CT1 暂态阶跃试验结果

Tab.3 Results of CT1 step test

标互上升时间/ μs	试品上升时间/ μs	标互过冲 / %	试品过冲 / %	试品延时时间 / ms
68.9	82.5	51.0	43.5	0.309 3

暂态阶跃试验过程中标准互感器和被测互感器的输出波形如图 4 所示。

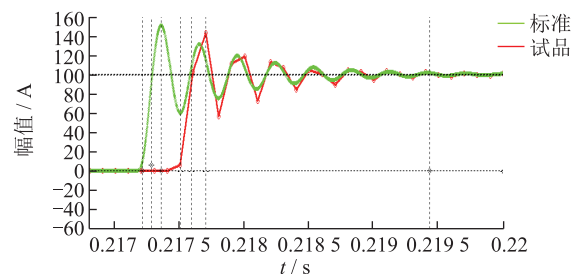


图 4 CT1 暂态阶跃试验波形

Fig.4 Waveforms of the CT1 step test

根据厂家提供的说明书,此型号互感器的测量精度满足 0.2 级要求,阶跃响应上升时间小于 125 μs 。试验结果表明,被测互感器特性与说明书所述一致。

2.3.2 并联换流器上桥臂电流互感器 CT2 试验

并联换流器上桥臂电流互感器 CT2 的额定电流为 2000 A。通过信号源输出幅值分别为 200 A, 400 A, 600 A 和 1000 A 的直流电流,完成被测互感器在不同比率点下的精度测试,结果如表 4 所示。

表 4 CT2 直流精度试验结果

Tab.4 Results of CT2 DC accuracy test %

比率	比差最大值	比差最小值	比差平均值	复合误差
10	-0.314 8	-0.288 3	-0.303 0	0.392 8
20	-0.199 5	-0.187 1	-0.192 2	0.233 2
30	-0.152 0	-0.145 6	-0.148 7	-0.148 9
50	-0.096 0	-0.092 7	-0.094 2	0.109 7

通过信号源输出稳定后幅值为 100 A 直流阶跃

信号,完成被测互感器的暂态阶跃试验,结果如表 5 所示。

表 5 CT2 暂态阶跃试验结果
Tab.5 Results of CT2 step test

标互上升 时间/ μs	试品上升 时间/ μs	标互过冲 / %	试品过冲 / %	试品延时 时间/ms
67.4	118.3	49.9	41.0	0.365 8

暂态阶跃试验过程中标准互感器和被测互感器的输出波形如图 5 所示。

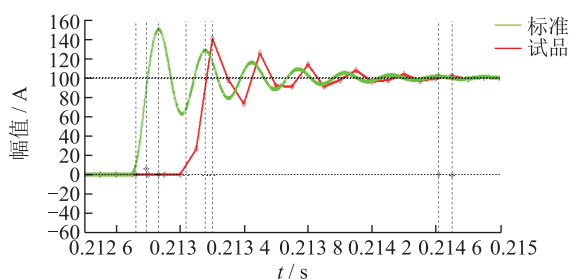


图 5 CT2 暂态阶跃试验波形
Fig.5 Waveforms of the CT2 step test

根据厂家提供的说明书,此型号互感器的测量精度满足 0.2 级要求,阶跃响应上升时间小于 125 μs 。试验结果表明,被测互感器特性与说明书所述一致。

2.3.3 1 号串变中性点电流互感器 CT3 试验

1 号串变中性点电流互感器 CT3 的额定电流为 100 A。通过信号源输出幅值分别为 10 A, 20 A, 50 A 和 100 A 的直流电流,完成被测互感器在不同比率点下的精度测试,结果如表 6 所示。

表 6 CT3 直流精度试验结果
Tab.6 Results of CT3 DC accuracy test %

比率	比差最大值	比差最小值	比差平均值	复合误差
10	0.146 2	-0.028 9	0.053 6	0.711 9
20	-0.207 4	-0.135 9	-0.165 5	0.405 7
50	-0.256 2	-0.188 0	-0.226 9	0.266 1
100	-0.204 5	-0.185 0	-0.194 6	0.219 8

通过信号源输出稳定后幅值为 100 A 直流阶跃信号,完成被测互感器的暂态阶跃试验,结果如表 7 所示。

表 7 CT3 暂态阶跃试验结果
Tab.7 Results of CT3 step test

标互上升 时间/ μs	试品上升 时间/ μs	标互过冲 / %	试品过冲 / %	试品延时 时间/ms
34.4	126.7	54.0	6.4	0.473 8

暂态阶跃试验过程中标准互感器和被测互感

器的输出波形如图 6 所示。

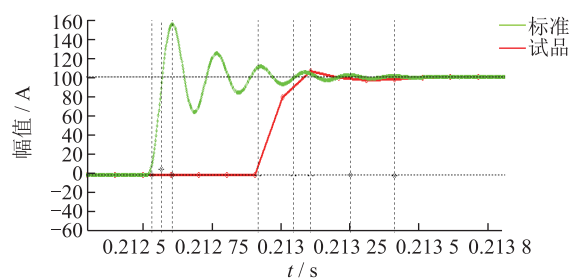


图 6 CT3 暂态阶跃试验波形
Fig.6 Waveforms of the CT3 step test

根据厂家提供的说明书,此型号互感器的测量精度满足 1 级要求,无阶跃响应上升时间要求。试验结果表明,被测互感器特性与说明书所述一致。

3 结语

对苏南 500 kV UPFC 工程中使用的电子式电流互感器进行了现场测试,包括直流精度试验和暂态阶跃试验,测试结果表明被测互感器性能满足投运要求。作为首次在现场开展的针对电子式互感器的交接试验,本次现场测试的顺利开展证明了所提出的测试装置与测试方法的实用性,为后续进行系统的电子式互感器现场试验奠定了基础。

参考文献:

- [1] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
State grid Jiangsu electric power company. Unified power flow controller technology and application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [2] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. Voltage source converter based hvdc power transmission systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [3] GYUGI L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller; a new approach to power transmission control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (2): 1085-1093.
- [4] 陈峰,江道灼,周洋. 基于故障电流控制的新型 UPFC-FCL 设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 145-150.
CHEN Feng, JIANG Daozhuo, ZHOU Yang. Design of UPFC-FCL based on fault current control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 145-150.
- [5] LI Peng, WANG Yuting, KONG Xiangping, et al. Performance analysis of MMC-UPFC in Nanjing western grid [C] // 2016 International High Voltage Direct Current Conference (HVDC 2016). Shanghai, China: CSEE, 2016: 489-494.
- [6] YUAN Yubo, LI Peng, KONG Xiangping, et al. Harmonic influence analysis of unified power flow controller based on modular

- multilevel converter[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1):10-18.
- [7] 凌峰,李九虎,田杰,等.适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J].电力系统自动化,2015,(21):113-119,143.
LING Feng, LI Jiuhu, TIAN Jie, et al. Optimization analysis of UPFC system structure for double-circuit lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, (21):113-119, 143.
- [8] 李鹏,王玉婷,高磊,等.统一潮流控制器串联变压器启动调试方法[J].电力自动化设备,2017,37(5):68-73,84.
LI Peng, WANG Yuting, GAO Lei, et al. Startup test method for series transformer of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):68-73, 84.
- [9] 张晓宇,顾乔根,文继锋,等.统一潮流控制器系统串联变压器保护设计[J].电力系统自动化,2017,41(17):72-77,112.
ZHANG Xiaoyu, GU Qiaogen, WEN Jifeng, et al. Series transformer protection design in unified power flow controller system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17):72-77, 112.
- [10] 潘磊,李斌,杨光,等.交流系统故障时统一潮流控制器处理策略[J].电力工程技术,2017,36(6):132-137.
PAN Lei, LI Bin, YANG Guang, et al. Control and protection strategies of unified power flow controller during AC system failure[J]. ELECTRIC POWER ENGINEERING TECHNOLOGY, 2017, 36(6):132-137.
- [11] 潘磊,李继红,田杰,等.统一潮流控制器的平滑启动和停运策略[J].电力系统自动化,2015,(12):159-164,171.
PAN Lei, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Smooth start and stop strategies for unified power flow controllers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, (12):159-164, 171.
- [12] 李鹏,林金娇,孔祥平.统一潮流控制器在苏南500 kV电网中的应用[J].电力工程技术,2017,36(1):20-24.
LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping, et al. Application of UPFC in the 500 kV southern power grid of Sunan[J]. Electric Power Engineering Technology, 2015, (12):159-164, 171.

作者简介:



张弛

张弛(1992—),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护、电子式互感器相关工作(E-mail:mysszc@163.com);

罗强(1980—),男,硕士,工程师,从事继电保护及电子式互感器校验技术工作(E-mail:luoqiangmail@163.com);

庞福滨(1987—),男,博士,高级工程师,从事电力系统继电保护、电磁兼容相关工作。

Field Test of Electronic Transformers in Sunan 500 kV UPFC Project

ZHANG Chi¹, PANG Fubin¹, LUO Qiang², LIU Chenchen³, TANG Hansong², KONG Xiangping¹

(1. State Grid Key Laboratory of Substation Intelligent Equipment Testing Technology

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China;

2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China;

3. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: Field tests are conducted on the electronic transformers in Sunan 500 kV UPFC project in order to examine their performance. Test equipment and method are presented referring to DC accuracy test and transient step test. A signal source is employed to produce primary current signal as the input of transformers to be tested and the standard transformer. A transformer tester is applied to receive the output signals of the two which are compared and analyzed accordingly. Test results show that performance of the transformers utilized in the project meet the requirements of operation. In addition, the test verifies the practicability of the equipment and the method. It can provide reference for further tests on the transformers.

Key words: UPFC project; electronic transformers; field test; DC accuracy; step response

(编辑 钱悦)