

一种用于新型大功率电力电子装置的高功率试验系统

行 鹏^{1,2}, 程 琼¹, 李 侠², 胡 宇², 段朝辉², 刘冬火²

(1. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430068; 2. 西安西电电力系统有限公司, 西安 710077)

摘要: 大功率电力电子装置的测试和考核是保证装置在正常运行条件下以及故障条件下能完成预定的工作目标而不损坏和影响系统的运行。笔者介绍了一种用于新型大功率电力电子装置试验的高功率试验系统, 详细说明了该系统的组成和试验能力。根据该新型大功率电力电子装置试验系统的功能需求, 高功率试验系统将划分为三个功能试验区即功补试验区、变频试验区、整流试验区。各功能试验区将能够满足各类新型大功率电力电子装置的出厂试验和型式试验。该新型大功率电力电子装置试验系统将具有硬件结构可靠性高、操作方便和测量精度高等特点, 可满足实际工程应用的需要。

关键词: 新型大功率电力电子装置; 试验系统; 功补试验; 变频试验; 整流试验

中图分类号: TM761.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)07-0052-05

High Power Test System for Novel High Power Electronic Device

XING Peng^{1,2}, CHENG Qiong¹, LI Xia², HU Yu², DUAN Zhao-hui², LIU Dong-huo²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The author introduces a test system of novel high power electronic device and explains the composition and test capacity of the system in detail in this paper. According to the novel power electronic device test system functional requirements, the test system is divided into 3 functional test areas of power compensation test area, frequency test area, rectifying test area. Every experimental zone can meet all kinds of novel high power electronic device factory test and type test. Engineering practice has proved that, the novel power electronic device test system hardware structure is of high reliability, convenient operation and higher measuring precision, can meet the needs of practical application.

Key words: novel high-power electronic device; test system; power compensation test; frequency test; rectifying test

0 引言

近年来,随着科学技术在各个领域的飞跃发展,大功率电力电子技术及其装置也飞速发展,越来越多的新型大功率电力电子装置和设备投入到实际的工程中运行^[1-2]。电力电子技术的核心是电力电子器件技术。电力电子器件技术由半控型、全控型器件进入了全新的智能型时代。其表现是,一方面原有各新型电力电子器件额定参数不断提高;另一方面电力电子技术与微电子技术进一步结合,使电力电子器件朝着大容量、智能化方向迅速发展。

大功率电力电子装置的测试和考核是保证装置在正常运行条件下以及故障条件下能完成预定的工作目标而不损坏和影响系统的运行^[3-4]。因此,针对大功率电力电子装置的测试和考核,目前国内外多家机构先后建立了大功率电力电子装置测试实验室。笔者介绍的一种大功率电力电子装置高功率试验系统是一套集测试系统、监控系统、水冷系统于一体的高性能、高效率的试验系统,试验能力和试验范围也将较国内外其他试验系统更加完善和全面。该新型大功率电力电子装置试验系统的建设与应用对该领域的发展具有重要的意义。

1 新型大功率电力电子装置试验系统的组成与功能介绍

1.1 新型大功率电力电子装置试验系统的组成

新型大功率电力电子装置高功率试验系统是一套将用于高电压、大功率电力电子装置(或产品)高功率试验的试验系统。该系统将解决高压、大容量无功补偿装置(或阀组)、变频器、整流装置、光伏逆变器、风电逆变器、电机软起动装置及电力有源滤波器等装置的高功率试验和等效容量试验。

试验系统主回路将主要由调压器、变压器、电抗器、电容器、断路器、隔离开关、接地开关、电动机、发电机、高压变频器、TCR、TSC 等设备构成^[5]。

根据新型大功率电力电子装置试验系统的功能需求,该试验系统将由功补装置试验系统、变频器试验系统、整流装置试验系统等 3 个试验系统兼容组成。每一个试验系统的试验能力都将具备最新型的电力电子装置(或产品)各种测试要求。

1.2 变频器试验系统试验能力

变频器试验系统的试验能力见表 1。

表 1 变频器试验系统试验能力

Tab. 1 The experiment ability of frequency test area

序号	试验产品	参数	
		容量	电压
1	级联式高压变频器	$\leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$	10 kV/6 kV
2	矿用高压变频装置	$\leq 800 \text{ kW}$	10 kV/6 kV
3	变频器	$\leq 1 \text{ MW}$	3 300 V
4	变频器	$\leq 710 \text{ kW}$	1 140 V
5	变频器	$\leq 710 \text{ kW}$	690 V
6	转子变频器	$\leq 3.6 \text{ MW}$	690 V
7	永磁直驱全功率变流器	$\leq 3.25 \text{ MW}$	690 V
8	高压软起动装置	$\leq 3.25 \text{ MW}$	10 kV/6 kV

1.3 整流装置试验系统试验能力

整流装置试验系统的试验能力将满足以下新型大功率电力电子装置的试验要求,具体如下:

1)额定电压 400 V、额定容量 1 MV·A 的 APF 装置的全容量试验;

2)额定电压 10~1 500 V、最大额定电流 25 000 A 的整流装置的等效全容量试验;

3)交流 400 V、500 kW 以下功率等级光伏发电变流器全容量试验。

1.4 功率补偿装置试验系统试验能力

功率补偿装置试验系统将满足以下试验要求:

1)试验 1:额定电压 35 kV、额定容量 200 Mvar 的 TCR 阀的等效全容量试验;

2)试验 2:额定电压 35 kV、额定容量 ± 100 Mvar

的 STATCOM 装置的等效全容量试验;

3)试验 3:额定电压 10 kV、额定容量 10 Mvar 的 TCR 阀的全容量试验;

4)试验 4:额定电压 10 kV、额定电流 500 A 的 TSC 阀的全容量试验;

5)试验 5:额定电压 10 kV、额定电流 500 A 的 STATCOM 装置的全容量试验。

2 新型大功率电力电子装置试验系统组成

该新型大功率电力电子装置高功率试验系统的分系统包含有电源分系统、功率补偿装置试验分系统、变频装置试验分系统、整流装置试验分系统、试验系统的控制系统。每一个分试验系统将能够满足市场上最新型的大功率电力电子装置试验以及普通的电力电子装置试验。

2.1 电源系统

新型大功率电力电子装置试验系统的电源系统可以根据试验系统的容量、频率、相数、短路水平等要求进行设计,具体分为高压进线电源及低压配电电源。低压配电电源可以参考相关标准进行,高压进线电源参数见表 2。

表 2 高压进线电源参数

Tab. 2 The parameters of high voltage line power

序号	项目	现场条件
1	系统额定电压	10 kV
2	相数	3 相
3	系统额定容量	10 MV·A
4	系统额定频率	50 Hz(49.5~50.5 Hz)
5	系统短路水平	31.5 kA(三相,有效值)

2.2 功补装置试验系统

功补装置试验系统是高功率试验系统的第 1 组成部分,该功补装置试验系统可以进行不同额定电压/额定容量下的 TCR 阀的等效全容量试验、额定电压/额定电流下的 TSC 阀的全容量试验、额定电压/额定电流下的 STATCOM 装置的全容量试验、额定电压/额定容量下的 STATCOM 装置的全容量试验。

被试品接于试品调试支路后,投入试品调试支路、5 路滤波补偿支路和试品陪试支路即可进行不同的试验项目。

2.2.1 周期触发和熄灭试验

改变被试品的导通电流(不大于额定电流),5 路滤波补偿支路和试品陪试支路动态实时补偿,使电源系统满足电力部门相关电能质量要求。该试验验证被试品的周期触发和熄灭性能(周期性开通和关断的开关能力和动态均压能力)。

2.2.2 温升试验

设定被试品的导通电流为 1.05 倍额定电流,5 路滤波补偿支路和试品陪试支路动态实时补偿,使电源系统满足电力部门相关电能质量要求。持续 30 min 以上使之达到热平衡,测量元件的温度。该试验验证被试品的温升性能。

2.2.3 动态补偿试验

改变 5 路滤波补偿支路和试品陪试支路的总电流,验证试品调试支路能否动态实时补偿,使电源系统满足电力部门相关电能质量要求。该试验验证试品的动态补偿性能。

为了验证在试验过程中,陪试静止无功补偿器(SVC)^[6-7]是否能吸收被试品所产生的谐波及无功功率,在功补装置试验系统设计前须对功补区进行仿真^[8-9],以对功补区内各试验工况进行仿真为例,主要针对谐波和电压不平衡度两个方面,不考虑电压波动及系统功率因数。

根据国标《GB/T 14549—93 电能质量 公用电网谐波》、《GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡度》,接于公共接点的每个用户,引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%,短时不得超过 2.6%。典型工况 35 kV/200 Mvar/TCR 试验仿真如下。

1)投入陪试 SVC 前。投入陪试 SVC 前,被试品将产生大量的谐波电流通过 A-B 相流入系统,造成电压畸变及系统严重不平衡。此时各次谐波电压含有率及总的畸变率见表 3,电压波形见图 1(A 相为例)。由表 3 可知,主要次数的谐波电压含有率及总的电压畸变率均超标。

表 3 谐波电压畸变率(A 相)

Tab. 3 Distortion rate of harmonic voltage (phase A)

谐波次数	谐波电压/V	含有率/%
3	982.0	19.4
5	600.0	11.8
7	611.0	12.0
11	300.0	5.9
THDu/%	/	26.4

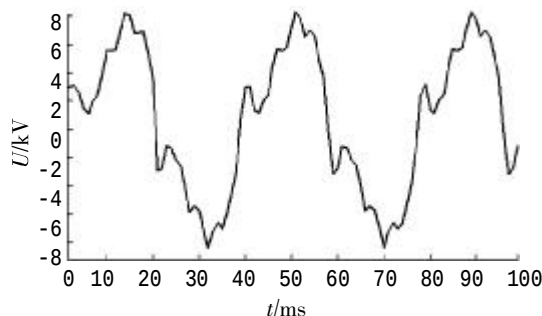


图 1 电压波形(A 相)

Fig. 1 Voltage waveform (phase A)

此时三相电压的有效值及相位见表 4,通过计算,此时负序电压不平衡度为 12.8%,超出国标要求。

表 4 三相电压参数(A 相)

Tab. 4 The three-phase voltage parameters (phase A)

项目名称	电压有效值/V	角度/(°)
A 相	4 944.9	-6.88
B 相	4 935.3	-113.3
C 相	5 919.9	120

2)投入陪试 SVC 后。投入陪试 SVC 后,流入系统中的谐波电流及造成的电压畸变大大减少。此时流入系统的谐波电流见表 5;造成的电压畸变各次谐波电压含有率及总的畸变率见表 6,电压波形见图 2(A 相为例),各次谐波均满足国标要求。

表 5 系统谐波电流(A 相)

Tab. 5 The harmonic current of system (phase A)

谐波次数	谐波电流/A	限值/A
3	13.23	20.0
5	1.74	20.0
7	1.08	15.0
11	0.13	9.3

表 6 谐波电压畸变率(A 相)

Tab. 6 Distortion rate of harmonic voltage (phase A)

谐波次数	谐波电压/V	含有率/%
3	43.11	0.72
5	9.30	0.15
7	7.43	0.12
11	2.65	0.04
THDu/%	/	0.76

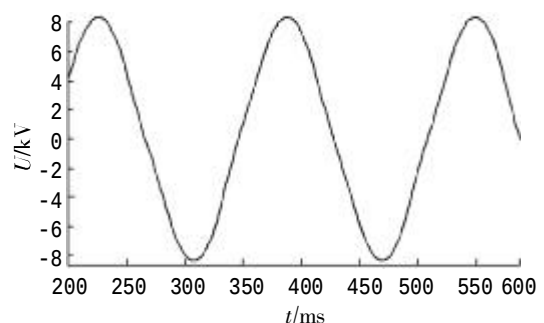


图 2 电压波形(A 相)

Fig. 2 Voltage waveform (phase A)

通过计算,此时负序电压不平衡度为 0.01%,满足国标要求。三相电压的有效值及相位见表 7。

2.3 变频器试验系统

高压变频器试验系统是高功率试验系统的第 2 组成部分,该试验系统能够满足级联式高压变频器、矿用高、中、低压变频器、双馈风力发电机组用转子

表 7 三相电压参数(A 相)

Tab. 7 The three-phase voltage parameters (phase A)

项目名称	电压有效值/V	角度/(°)
A 相	5 923.1	0
B 相	5 921.6	-120
C 相	5 919.9	120

变频器、永磁直驱全功率变频器、高压软起动装置试验。依据的相关标准有《GB/T 1094.11—2003 电力变压器 第 11 部分：干式变压器》^[10]、《GB/T 12668—2002 调速电气传动系统》^[11]、《JB/T 7118—2004 VVVF 变频调速专用三相异步电动机技术条件》^[12]、《GB 3906—2006 3.6kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》^[13]等。

2.3.1 系统配电参数计算

依据 10 kV 系统短路电流为 31.5 kA, 可得 10 kV 系统阻抗 $X_s = \frac{U}{I} = \frac{10}{31.5} = 0.317 \Omega$, 10 kV 线路额定电流 $I_{e-10} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 577 \text{ A}$, 6 kV 线路额定电流 $I_{e-6} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6 \times 10^3} = 962 \text{ A}$ 。以上参数作为总开关及进线开关的选择依据。

2.3.2 变频器试验系统参数计算

根据变频试验区试验能力的要求, 可采用 3 组机组及相应的陪试变频器、断路器等设备形成陪试系统来实现。机组 1 实现 10 kV/6 kV 级联大容量变频器试验及双馈风力发电转子变频器试验; 机组 2 实现 10 kV/6 kV 级联小容量变频器试验及矿用变频器试验; 机组 3 实现永磁风力发电变频器试验及 10 kV/6 kV 级联中容量变频器试验。

2.4 整流装置试验系统

整流装置试验系统是高功率试验系统的第 3 组成部分, 该试验系统能够满足新型大功率电力电子装置试验如 APF 装置、整流装置等功率试验和等效全容量试验以及光伏发电变流器试验。整流试验区由 APF 装置试验单元、光伏发电变流试验单元及整流装置试验单元组成。对各种变压器电流的计算可以正确选择变压器的型号, 对损耗的计算可以作为散热的依据。

整流试验分区参数计算见表 8。

2.5 试验系统的测控系统

新型大功率电力电子装置试验系统监控与测量系统用于对试验系统内的所有被试设备、陪试设备和保障设备进行集中监控和试验数据测量^[14]。此系统可分为就地控制、区域操控和远程监控 3 个层次。

表 8 整流试验分区参数

Tab. 8 Rectifier test partition parameters

参数		数值
电源变压器 T_{4-1}	额定容量/(kV·A)	1 250
	输入电压/kV	(三相)10
	输出额定电流/A	$I_{e-0.4} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{1.250 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3} = 1\ 800$
感应调压器 T_{4-2}	额定容量/(kV·A)	1 000
	额定输入电压/V	(三相)380
	输出额定电流/A	$I_{e-0.66} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{1.000 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.66 \times 10^3} = 870$
整流变压器 T_{4-3}	额定容量/(kV·A)	150
	额定输入电压/V	(三相)650
	T5 额定输入电流/A	$I_{e-0.65} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{0.2 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.65 \times 10^3} = 177.6$
整流变压器 T_{4-4}	额定容量/(kV·A)	880
	额定输入电压/V	(三相)600
	额定输入电流/A	$I_{e-0.6} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{0.880 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.60 \times 10^3} = 846.8$
整流变压器 T_{4-5}	额定容量/(kV·A)	800
	额定输入电压/V	(三相)380
	额定输入电流/A	$I_{e-0.38} = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{0.800 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.38 \times 10^3} = 1\ 216$

测试系统的 3 个层次分别为现场传感器检测层、区域测量层和远程中央测量监视层。电压、电流传感器布置在现场开关柜或接线柜中, 其输出信号集中连接到区域测量层的测量柜中, 由区域测量系统对数据进行采集、计算、分析和存储^[15]。远程中央测量监视层设备通过以太网连接区域测量系统, 监视试验的测量过程和测量数据。监控与测量系统结构见图 3。

3 结语

该新型大功率电力电子装置高功率试验系统是一套可满足新型高电压、大功率电力电子装置(或产品)高功率试验的试验系统。该系统将解决高压、大容量无功补偿装置(或阀组)、变频器、整流装置、光

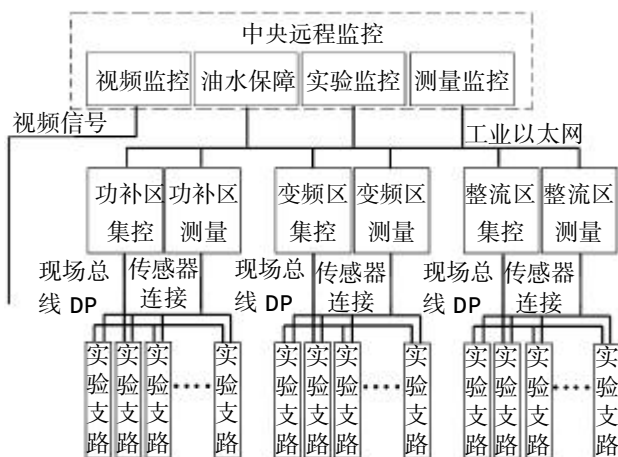


图 3 监控与测量系统结构

Fig. 3 The monitoring and measurement system

伏逆变器、风电逆变器、电机软起动装置及电力有源滤波器装置的高功率试验和等效容量试验。该系统集测试系统、监控系统、水冷系统于一体的高性能、高效率的试验系统,将具备良好的系统兼容性,试验能力也将较以往的普通高功率电力电子装置试验系统更加强大。该新型大功率电力电子装置试验系统的测量控制系统具有硬件结构可靠性高、操作方便和测量精度高等特点,可满足实际工程应用的需要。

参考文献:

- [1] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 1-5.
TANG Guang-fu. 2004 CIGRE series reports of HVDC and power electronic technology development status and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5.
- [2] 李尚明, 查晓明. 大功率电力电子装置测试及考核研究现状与发展[J]. 变频器世界, 2008(11): 28-32.
LI Shang-ming, ZHA Xiao-ming. Research and development of testing and evaluation of high-power electronic devices[J]. The World of Inverters, 2008(11): 28-32.
- [3] 贺之渊, 汤广福, 郑健超. 大功率电力电子装置试验方法及其等效机理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 47-52.
HE Zhi-yuan, TANG Guang-fu, ZHENG Jian-chao. High power electronic equipment test method and its equivalent mechanism [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2006, 26(19): 47-52.
- [4] KICHENMAN I B P, 徐佩芬. 先进的电力电子装置试验基地[J]. 电力牵引快报, 1994(3): 20-26.
KICHENMAN I B P, XU Pei-fen. Advanced power electronic device test base[J]. Power Traction Letters, 1994(3): 20-26.
- [5] 汤广福, 贺之渊. 相似理论在大功率电力电子装置试验中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007(22): 74-79.
TANG Guang-fu, HE Zhi-yuan. The similarity theory in high power electronics equipment experiment application [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2007 (22): 74-79.
- [6] 刘世欣, 楼书氢, 闫金春. 静止无功补偿装置及其工程应用前景[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十五届学术年会. 长沙: IEEE, 2009: 162-164.
LIU Shi-xin, LOU Shu-qing, YAN Jin-chun. Static var compensation and its engineering application [C]//China Electric Power System and Automation in the Twenty-fifth Annual Meeting. Changsha: IEEE, 2009: 162-164.
- [7] 苏玲, 宋珊, 陈建业. 静止无功补偿器(SVC)应用的最新进展[J]. 国际电力, 2004, 8(1): 44-49.
SU Ling, SONG Shan, CHEN Jian-ye. Static var compensator (SVC) latest application [J]. International Electric Power, 2004, 8(1): 44-49.
- [8] 宋强, 刘钟淇, 张洪涛. 大功率电力电子装置实时仿真的研究进展[J]. 系统仿真学报, 2006(12): 3329-3333.
SONG Qiang, LIU Zhong-qi, ZHANG Hong-tao. High power electronic device real-time simulation [J]. Journal of System Simulation, 2006(12): 3329-3333.
- [9] 高源, 陈允平, 刘会金. 电力系统物理与数字联合实时仿真[J]. 电网技术, 2005(12): 77-80.
GAO Yuan, CHEN Yun-ping, LIU Hui-jin. Power system physical and digital real-time simulation [J]. Power System Technology, 2005(12): 77-80.
- [10] GB/T 1094.11—2003. 电力变压器 第 11 部分: 干式变压器[S].
GB/T 1094.11—2003. Power transformer Part eleventh: Dry-type transformer [S].
- [11] GB/T 12668—2002. 调速电气传动系统[S].
GB/T 12668—2002. Adjustable speed electrical power drive system [S].
- [12] JB/T 7118—2004. VVVF 变频调速专用三相异步电动机技术条件[S].
JB/T 7118—2004. VVVF Frequency variable speed regulation motor technology conditions [S].
- [13] GB 3906—2006. 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备[S].
GB 3906—2006. 3.6 kV~40.5 kV AC metal closed switch equipment and control equipment [S].
- [14] KAMRAN F, HABETLER T G. Combined deadbeat control of a series-parallel converter combination used as a universal power filter [J]. Transaction on Power Electronics, 1998, 13(1): 160-168.
- [15] ATSUKO K, RONACHAI C, TOSBIMASA H. Deadbeat control of PWM inverter with modified pulse patterns for uninterruptible power supply [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1998, 35(2): 295-300.

行 鹏(1968—), 男, 高级工程师, 从事超、特高压直流输电换流阀及新型大功率电力电子方面的研究。

程 琼(1959—), 女, 教授, 从事高压电器故障监测方面的研究。