

# 定制电力实验室的开发与建设

朱振飞,胡静,王小红

(国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 210003)

**摘要:**介绍了物理模拟实验室、定制电力技术基础实验室的方案设计、检测功能及基于实验室开展的功能试验,提出了物理模拟实验室检测并联补偿型、串联补偿型和串并联混合补偿型定制电力设备的试验方法,以及开展阀组温升试验和双脉冲试验的检测,并对动模实验室和高压电气性能实验室的检测能力进行了简单描述。

**关键词:**定制电力实验室;大功率物理模拟;试验检测平台

**中图分类号:**TM715

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2015)02-0031-06

定制电力技术是指使用电力电子器件及辅助的控制器,为电能质量敏感的配电用户(电压等级1~35 kV)提供满足其可靠性和电能质量参数要求的技术<sup>[1]</sup>。通过定制电力技术将先进控制技术直接应用于电力一次系统,可以显著提高和实现电网中发、输、配、用各个环节的可控性,是实现统一坚强智能电网的重要保障和基本条件,也是促进电力系统实现整体技术提升的必要基础。

目前,国内定制电力技术水平还停留少数定制电力装置的试点应用,产品的功能、性能和稳定性还有待现场长期运行的考验,对定制电力技术试验和检测方面的研究基本缺乏,还没有一家较为完整及专业的大容量定制电力技术产品试验、研究及检测实验室。为了加强定制电力设备关键技术研发试验工作,促进定制电力技术进步和健康发展,迫切需要建立相配套的定制电力技术研究能力与检测能力,建立试验标准,以支撑智能电网建设顺利实施。国网电力科学研究院基于“国家能源智能电网研发(实验)中心”的需要,启动了定制电力实验室开发与建设。通过定制电力实验室开发与建设,构建了690 V(380 V)、10 kV(3.3 kV)多电压等级大功率物理模拟实验室、1 kV小功率动态模拟实验室、定制电力技术基础实验室、高压电气性能实验室,全面提升了电力电子技术领域的产品研发试验能力和核心竞争力。

物理模拟实验室通过实物模拟定制电力设备的运行环境,提供装置级、系统级的研究、试验/检测能力;动态模拟实验室为定制电力技术产品的控制保护系统及控制保护策略提供一个试验、研究环境,给阀控系统提供一个长期运行、试验环境,指导定制电力技术设备控制保护系统工程实用技术的测试、检验等;定制电力技术基础实验室包括水冷设备阀组温升试验系统、双脉冲测试平台,建立器件级、阀控设备的研发、试验/检测能力;高压电气性能实验室具有对定制电力设备

进行工频耐压试验、冲击耐压试验和局部放电试验等电气性能试验检测能力。

## 1 物理模拟实验室

### 1.1 建设方案

物理模拟实验室拟通过实物模拟定制电力设备的实际运行环境,目标是具备定制电力设备整体功能、性能研发、试验/检测能力。最为理想的情况是利用这种方式进行设备的全功率功能、性能试验,但由于定制电力设备很多都是安装于母线处,其容量可能很大,在实验室实现难度比较大。针对高压大容量的定制电力设备,按照IEC标准要求可以分开进行,既通过动态模拟试验平台对控制保护系统进行检测和验证;通过高压电气性能试验平台对阀组或阀模块进行检测和验证;利用物理模拟试验平台对整体进行全电压、一定功率整体性能试验,实际测试装置的动态性能,如响应时间、稳定时间、谐波补偿率等。

通过深入研究典型定制电力设备的原理、功能及性能指标要求,结合相关的试验标准,调研相关厂家建立的试验检测设施,确定物理模拟试验平台建设方案,系统主接线原理图如图1所示。供电电源为一条10 kV馈线,为了消除物理模拟平台对供电系统的干扰和谐波污染,在电源接入点设置隔离变压器和滤波器。试验平台主要由模拟电网干扰的电压干扰发生器、模拟负载特性(包括干扰)的回馈型智能电子负载、阻感负载,适用于不同试验对象的配电系统、在线监测控制系统等。

### 1.2 试验检测功能

物理模拟试验平台设有380 V,690 V,3.3 kV,10 kV试验母线,用于进行被试设备的整体功能、性能试验,可接入并联型、串联型<sup>[2]</sup>、串并联混合型和网络重构型定制电力设备。基本的试验方式是通过电压扰动发生器模拟电网侧各种干扰,通过智能电子负载推动测试功率和模拟非线性负载特性<sup>[3]</sup>,以考察被试定制

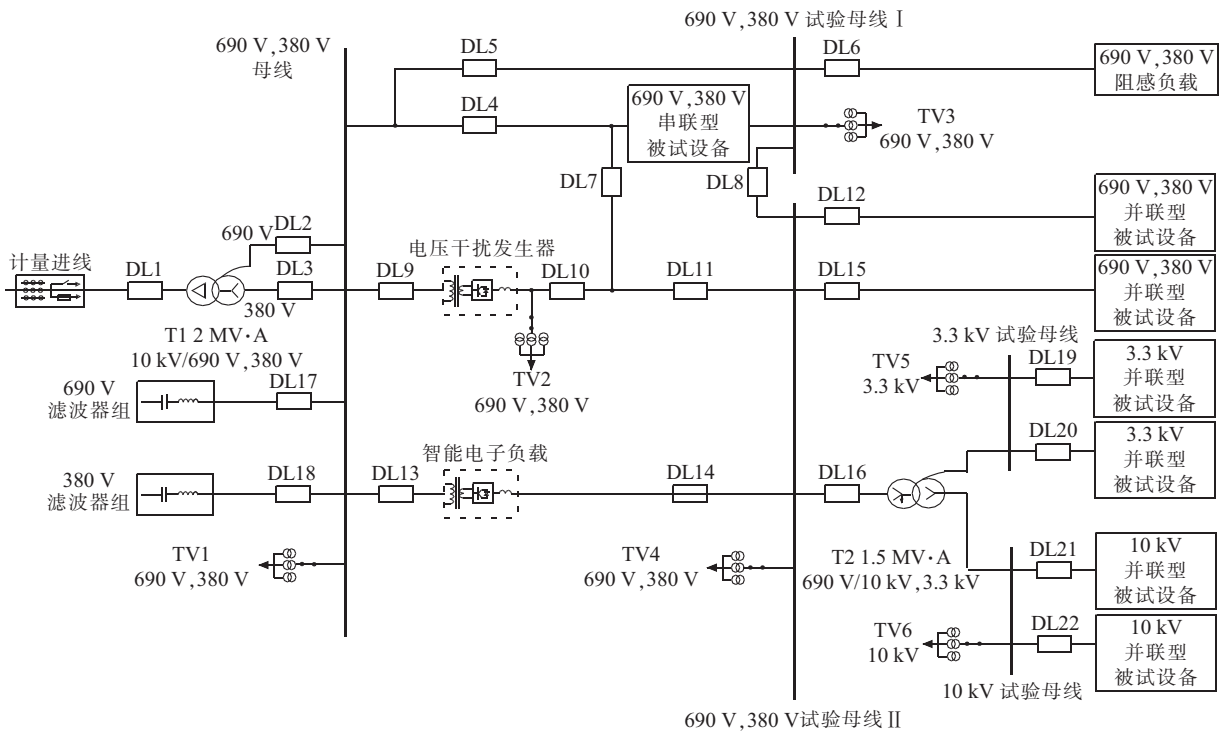


图1 物理模拟实验室电气主接线图

电力设备的整体功能和性能。690 V, 3.3 kV, 10 kV 试验母线试验容量为  $1 \text{ MV}\cdot\text{A}$ , 380 V 试验母线试验容量为  $500 \text{ kV}\cdot\text{A}$ , 可在试验母线的“并联型设备测试区”处接入被试设备, 进行定制电力设备及其他电力电子设备的大功率“对冲”试验, 以验证其整体和阀组的大功率运行能力, 同时提供一定的设备温升试验的条件。假设“对冲”试验装置有功损耗为装置总功率的  $p\%$ , 在试验过程中, 理想情况下 2 台被试设备遵循各相瞬时功率之和恒为 0 的原则, 电源只需要提供运行损耗, 系统的容量为  $1 \text{ MV}\cdot\text{A}$  则“对冲”试验功率可达。

### 1.3 试验方案

根据主电路拓扑结构和接入配电网的方式, 定制电力设备可以分为并联补偿型、串联补偿型和串并联混合补偿型。物理模拟试验平台考虑了以上各种型式定制电力设备进行整体功能、性能试验的接入方式及相应的试验方案。

#### 1.3.1 并联补偿型

典型的并联补偿型定制电力设备包括 DSTATCOM(即 SVG)、并联型 APF、SVC 等, 这类设备主要对配电系统进行无功补偿和谐波治理。对这类设备进行试验时, 模拟实际负载特性的智能电子负载可以工作在 2 种状态: 一种是功率因数为 0 的状态, 智能电子负载的负载模拟换流器只发出或吸收无功, 同时产生谐波干扰。另一种方式是功率因数不为 0, 智能电子负载的负载模拟换流器推动试验环路中的有功、无功交换, 同时产生谐波干扰, 并网换流器将有功功率回馈到电网, 即模拟实际负载以一定功率因数 (不为

0) 消耗功率同时产生干扰的情况。在实际应用场合可能会出现负载和电网同时产生干扰的情况, 这对定制电力设备的整体性能考核非常严苛。并联补偿性定制电力设备的试验方案如图 2 所示。电压干扰发生器模拟电网产生电压干扰和谐波, 智能电子负载模拟实际负载产生无功、谐波干扰。

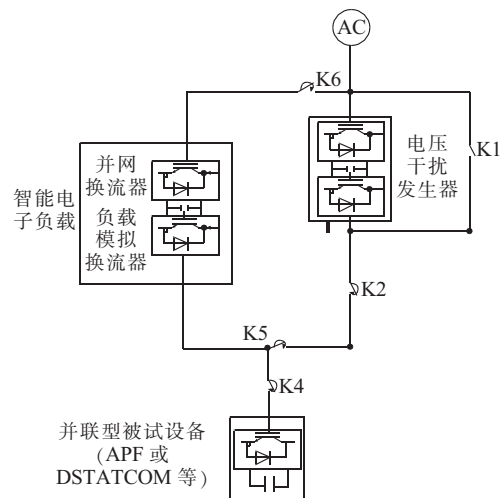


图2 并联补偿性定制电力设备的试验方案

#### 1.3.2 串联补偿型

串联补偿型定制电力设备一般用于补偿系统电压暂降, 将敏感设备和干扰源隔离以保障其正常运行。典型的串联型定制电力设备包括动态电压恢复器 DVR、动态不间断电源 DUPS、串联型有源滤波器等。其中串联型有源滤波器除了具有前述功能外, 还可以接在供电系统与非线性负荷之间将系统与非线性负荷隔离开, 同时在负荷侧并联无源滤波器, 防止非线性负荷的

谐波电流流入系统。针对带大容量储能部件的串联型定制电力设备,如果采用有功功率回送的试验方案,试验过程中可能会出现向配电网单向馈出电能的情况,如图3所示。在这种情况下选择采用常规负载的试验方案,由常规无源负载消耗有功功率,智能电子负载模拟无功和谐波干扰。

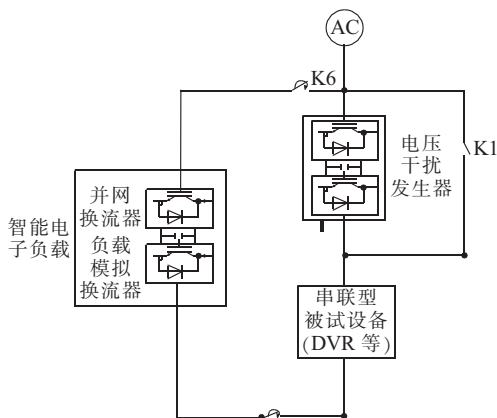


图3 串联补偿性定制电力设备的试验方案

### 1.3.3 串并联混合补偿型

串并联混合补偿型定制电力设备为统一电能质量调节器UPQC (Unified Power Quality Conditioner)。UPQC由串联型和并联型有源滤波器结合而成,将并联电流补偿原理和串联电压补偿原理结合在了一个装置中,可同时对电压和电流进行补偿。UPQC一般连接在谐波源附近,其不但能够补偿非线性负载的不对称和谐波,而且能够补偿电源电压的不对称和谐波,因此它提高了供给接在同一条交流母线上其他谐波敏感负载的电能质量。实验方案如图4所示。电压干扰发生器模拟电源侧的干扰,智能电子负载模拟非线性负载的干扰,UPQC同时进行补偿。通过检测常规无源负载侧的电能质量对UPQC的整体功能进行评估。

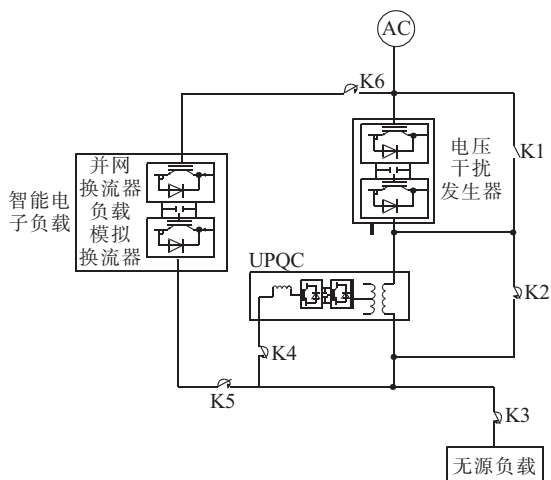


图4 串并联混合补偿性定制电力设备的试验方案

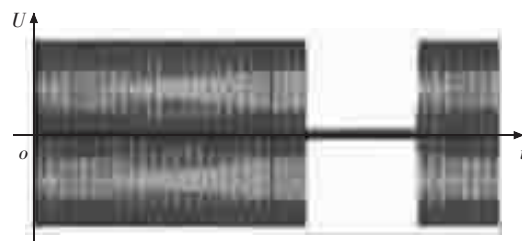
## 1.4 试验波形

物理模拟试验平台针对不同的被测设备,要求电压扰动源和智能电子负载模拟电网产生的各种电能质

量干扰。这里不针对某种定制电力设备开展相关试验研究,只检测电压扰动源设备的输出指标,根据国标要求进行功能性试验。

### 1.4.1 电压暂降试验

电压扰动发生器输出电压暂降范围:下降深度10%~95%,在额定电压范围内可调,持续时间按国标要求连续可调。输出电压为690V,电压暂降深度为95%时,持续时间设置在1000ms时的三相电压波形如图5(a)所示;从图5(b)中能明显看出,电压扰动源能很好地模拟电网的暂降输出,能有效地考核其他设备的运行状态。



(a) 电压暂降全波形



(b) 电压暂降缩放后的波形

图5 暂降深度95%暂降时间1000ms

### 1.4.2 三相不平衡试验

电压扰动发生器输出三相不平衡电压在0%~20%可调。此处不平衡度是指在维持单元输出基波正序线电压为690V时,叠加一定比例的基波负序分量构成的不平衡。图6(a)为系统设置不平衡度为20%时,通过电能质量监测仪测得的相电压实际波形及实测的不平衡度;图6(b)是实测的不平衡度为19.88%,误差为-0.12。

### 1.4.3 三相不平衡试验

电压扰动发生器输出电压谐波:2~50次,可单次发也可随机组合,幅值且相位可调。电压基波和25次谐波组合的输出波形如图7所示。其中,测量出的基波电压为687.8V,25次谐波电压为182.8V。

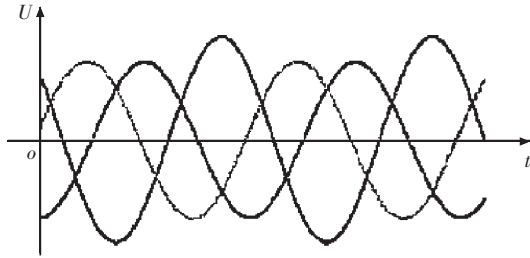
### 1.4.4 输出电压变频试验

电压扰动发生器输出电压变频范围:45~66Hz,频率分辨率 $\leq 0.1$ Hz。图8中设定系统频率45Hz,用仪器测量到的频率为44.963Hz,相对误差为-0.08,满足要求。

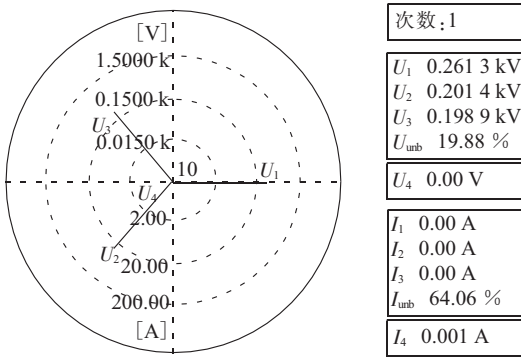
### 1.4.5 电压波动试验

电压扰动发生器输出电压在工频基波上叠加幅度





(a) 不平衡度为 20% 时三相电压输出波形



(b) 不平衡度为 20% 时的相位

图 6 三相不平衡的电压输出波形与相位

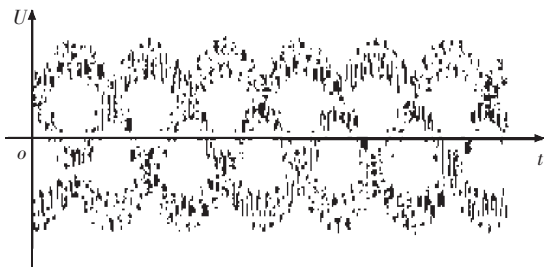


图 7 基波+25 次谐波

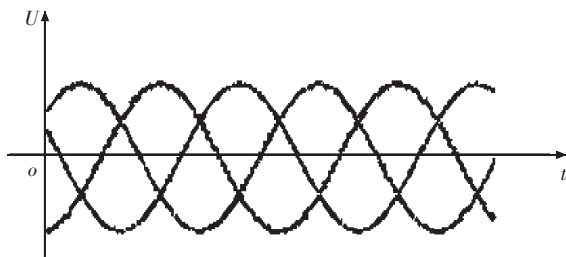


图 8 基波频率为 45 Hz 输出电压波形图

范围为 0%~20% 额定电压, 频率范围 0.5~25 Hz 的调制波形, 调制波包括正弦波和方波 2 种形式。在 2.618 kV 的单元输出线电压正序基波上叠加一定比例的 25 Hz 或 0.5 Hz 的正弦波模拟得到的电压波形, 如图 9、图 10 所示。

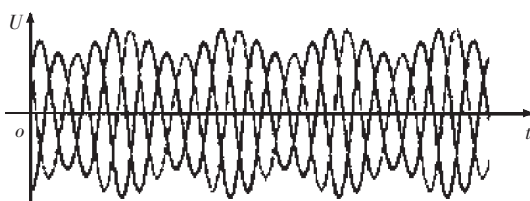


图 9 波动幅度 20% 正弦且波动频率 25 Hz 输出电压波形图



图 10 波动范围 20% 方波且波动频率 0.5 Hz 输出电压波形图

## 2 定制电力技术基础实验室

定制电力技术基础实验室拟建立器件级、阀控制级的研发试验能力, 为研究定制电力的关键技术和工艺提供基础条件。定制电力技术基础试验平台包括水冷系统阀组温升试验系统、双脉冲测试系统等。

### 2.1 水冷设备阀组温升试验系统

电力设备运行时, 由于功率损耗的存在使各功率部件和某些结构件内部发热, 引起设备的温升提高。温升太高会损坏绝缘材料, 使之失去绝缘性能或缩短使用寿命; 温升较低说明所用绝缘材料没有被充分利用, 不经济。为了使电力设备既能安全地运行, 又能得到合理经济运行, 必须要进行设备的温升试验, 以验证电力设备的温升设计与结构设计是否合理<sup>[4]</sup>, 验证各部分的温升能否满足温升限值的要求。对于定制电力设备, 阀组温升试验旨在检查在严酷的重复性最大负荷条件下阀中的功率器件和相关电路是否能正常工作。大功率高压阀温升试验系统如图 11 所示。

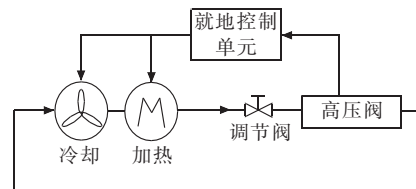


图 11 大功率高压阀温升试验系统

试验系统中包括水冷却单元、水加热单元、就地控制单元, 电加热装置设置在水冷却单元与高压阀之间, 温升试验时给冷却水加热, 使升温后的水通过高压阀散热器将功率开关器件加热, 使得试品阀进水口温度通过恒温控制达到并维持在发生最大暂态过电压过电流前可能的最大温度。

### 2.2 双脉冲检测平台

#### 2.2.1 设计方案

对于全控器件的可靠性测试关键在于能建设出能适应各种全控器件 IGBT 的测试平台, 这个测试平台能够可靠真实地反映出全控器件在连续开断过程中的动、静态特性<sup>[5]</sup>。该测试技术的主要测试参数包括:

- (1) 对比不同的 IGBT 的参数;
- (2) 获取 IGBT 开关过程的主要参数, 例如  $R_{on}$  和

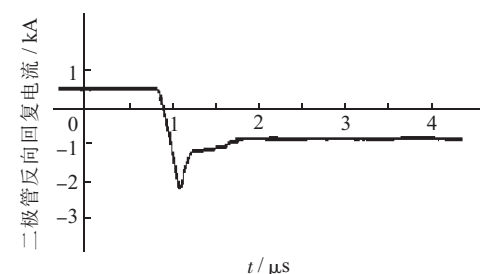
$R_{off}$  是否合适,是否需要配吸收电路等;

(3) 考量 IGBT 在变换器中工作时的实际表现。例如二极管的反向恢复电流是否合适,关断时的电压尖峰是否合适,开关过程是否有不合适的震荡等。

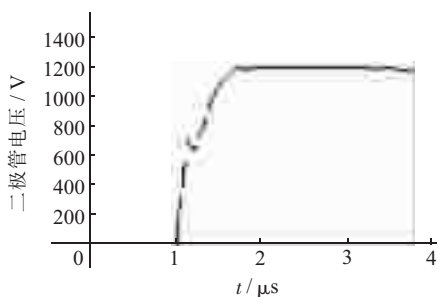
双脉冲测试平台<sup>[6]</sup>是能够检验控制监视设备的性能是否正常,比如  $R_{on}$  和  $R_{off}$  是否满足要求,软关断特性是否能够符合全控器件的保护要求。

### 2.2.2 试验波形

通过双脉冲测试平台对全控器件 IGBT 进行测试时,全控器件的反并续流二极管作为一个非常重要的元件,往往容易被忽视。全控器件反并二极管反向恢复时,实测的电压、电流及损耗功率波形如图 12 所示。



(a) 二极管反向恢复电流波形



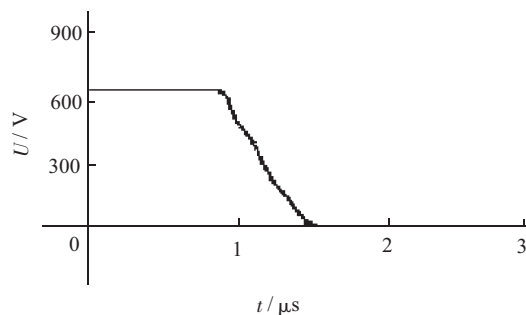
(b) 二极管电压波形

图 12 实测电压/电流/损耗功率的波形

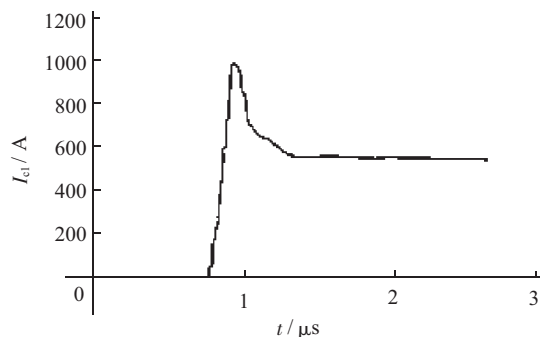
从图 12 中可以看出,全控器件反并二极管的反向恢复电流上升时,杂散电感上产生的电压是与母线电压相抵的。反向恢复电流下降时,杂散电感电压与母线电压同向,电压落在全控器件的反并二极管上,全控器件的反并二极管出现电压尖峰,风险加大。如果杂散电感比较大,全控器件的反并二极管就更加危险了,容易跑出安全工作区。全控器件反并二极管的电压尖峰是由于杂散电感与全控器件反并二极管反向恢复电流的后沿相作用而产生的。所以减小直流母排的杂散电感及优化反向恢复电流的后半沿斜率都可以有效提高全控器件的反并二极管的安全裕量。

通过本双脉冲测试平台也可以在开通过程观察并联的动态均流水平。在 IGBT 开通时,  $R_{gn}$  的影响很大,它可以影响  $di/dt$  的速度、反向恢复电流的峰值,进而决定开通损耗。所以确定  $R_g$  最好的方法还是通过本测试平台进行双脉冲测试法动态调试该参数。图 13 为 3 个 IGBT 并联的情况下测试的开通波形,外部提供一

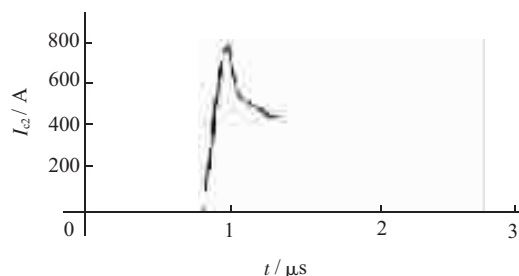
个电压,测量出 3 个 IGBT 的导通电流  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  和  $I_{c3}$ 。用此方法可以很准确地测试出动态均流的情况,从而进行动态均流调试。



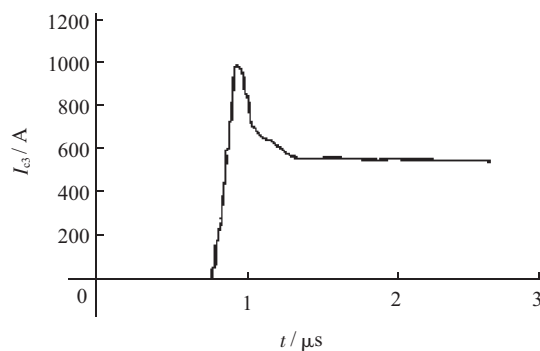
(a) 外加电压波形



(b) IGBT1 的电流波形



(c) IGBT2 的电流波形



(d) IGBT3 的电流波形

图 13 全控器件并联的测试图

## 3 动态模拟实验室

动态模拟试验平台为 SVC, STATCOM 的控制保护系统及控制保护策略<sup>[7]</sup>提供一个试验、研究环境,给 VCU 和 TCU 等阀控系统提供一个长期运行、试验环境;同时针对 SVC<sup>[8]</sup>, STATCOM<sup>[9]</sup>等设备研究控制保

护系统试验方法并形成试验规范;并按照 IEC 标准进行试验研究;指导 SVC,STATCOM 控制保护系统工程实用技术的测试、检验等。动态模拟实验室搭建 SVC,SVG 两大平台的一次结构如图 14 所示。

### 4 高压电气性能实验室

高压电气性能实验室目的在于研究各类阀组的取能技术、触发技术、冷却技术以及控制保护技术;同时针对 STATCOM,SVC 等定制电力设备研究其高压试验方法并形成试验规范;并且按照 IEC 标准进行型式试验和例行试验的研究;指导工程实用技术的测试、检验等。

具备工频耐压试验、雷电波全波试验和雷电波截波试验、局部放电试验等定制电力设备高压阀组(35 kV 及以下)的电气性能试验检测能力。

### 5 结束语

定制电力实验室的开发与建设是涉及到多个学科和行业的一项系统工程,不仅对技术研究、产品研发的有效协调和优化使用,有效促进定制电力设备的安全运行,还大大增强了定制电力技术领域的检测研究能力。在深入研究定制电力设备技术特性的基础上,结合

先进实用的试验方法,建立定制电力设备检测和整体性能验证平台,按照各类试验标准要求,建立完善的实验室产品检测服务体系,为国家提供全方位的定制电力设备检测环境和产业化生产服务机制。

### 参考文献:

- [1] 周岐岗. 定制电力技术在解决配电侧电能质量问题中的应用[J]. 煤炭技术, 2012, 31(12): 50-51.
- [2] 杨志新, 杨世海. 基于串联补偿的间谐波抑制技术研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 38-42.
- [3] 丁凯, 赵爽, 夏勇军. 一种基于新能源接入的电压扰动检测平台研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(10): 46-48.
- [4] 杨茂生, 姜周曙, 王剑. SVC 纯水冷却控制系统研制[J]. 机电工程, 2011, 28(2): 220-223.
- [5] 李更生, 杨莉, 徐庆坤, 等. IGBT 静态参数测试方法研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(12): 55-59.
- [6] 夏明华. 高压大容量 IGBT 测试技术及测试平台的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [7] 邹宁, 方存洋, 刘育鑫, 等. PSCAD/EMTDC-MATLAB 联合仿真技术在 SVC 控制系统仿真建模中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 40-44.
- [8] 任旭超, 万秋兰. SVC 预防电压失稳的快速控制方法[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(2): 1-3.
- [9] 翁海霞. 基于瞬时无功理论的 STATCOM 电流检测方法与控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.

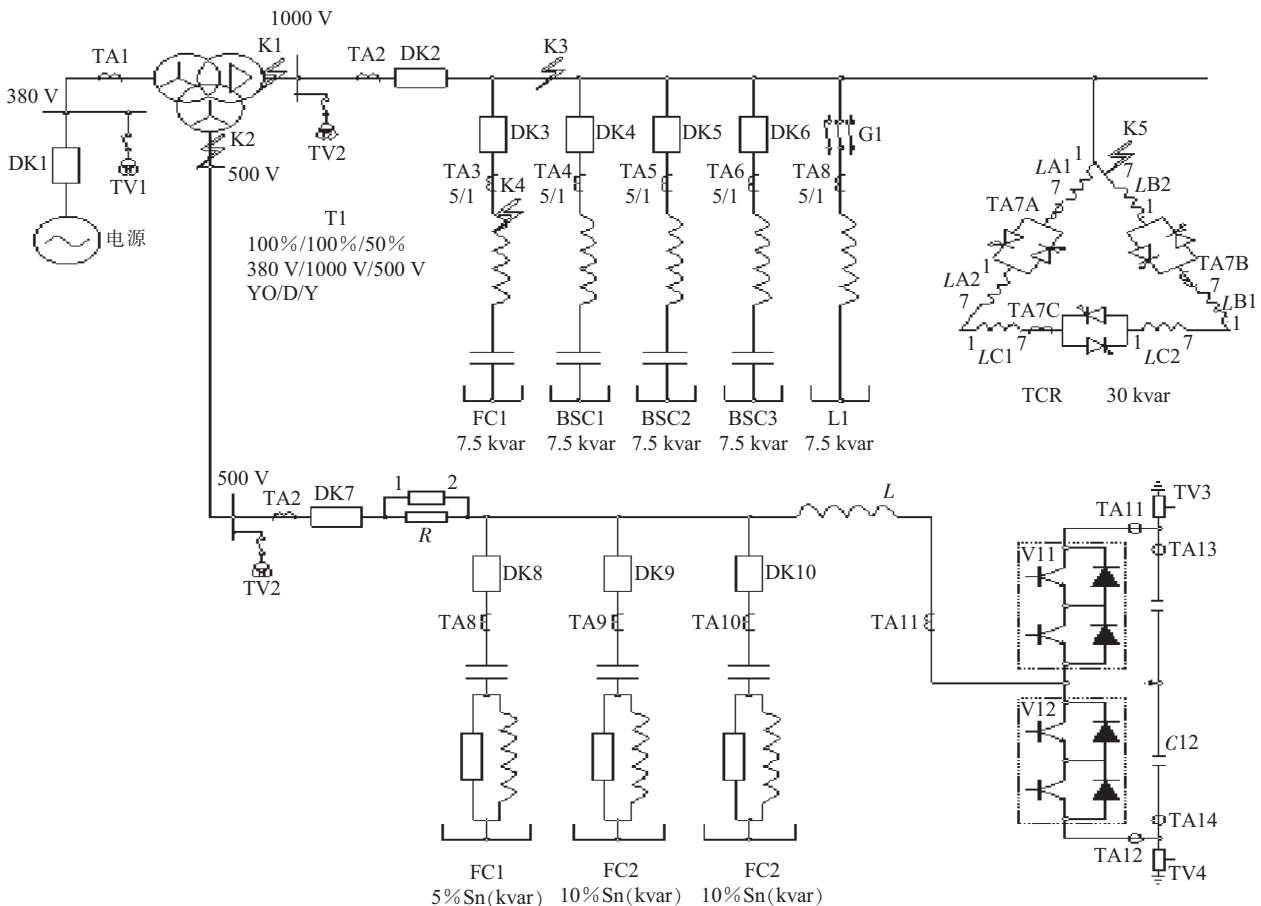


图 14 动模试验模型主接线图

器运行;当厂用电系统电压跌落结束主路交流电源再度恢复正常供电后,变频器自动切换至主路电源供电。

直流环节一般由蓄电池组、充电器、静态开关、控制器等部分组成,这种方式可以实现1套直流电源装置带单台或多台电动机变频器运行,1台变频器外加1套直流电源原理示意图如图3所示。这种方案也需要采购设备进行技术改造,日常维护工作量明显增加。日常运行中要确保蓄电池组正常浮充电,并定期对蓄电池进行均衡充电和核对性充放电活化试验,合理选择蓄电池的安装地点,降低环境温度对蓄电池寿命的影响,并定期更换蓄电池组。

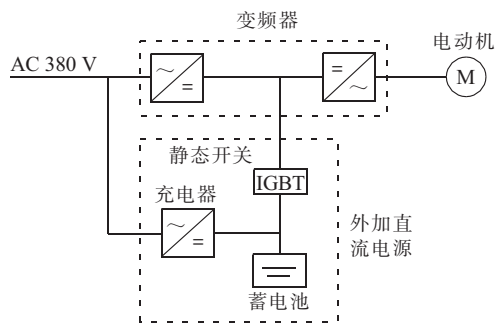


图3 变频器外加直流原理示意图

## 4 结束语

针对低电压穿越对发电厂辅机变频器设备可能产生的危害,总结了典型的现场应用技术看方案,综合比较,对于新建和改扩建的一类辅机变频器,推荐采用方案1,即参照《大型汽轮发电机组一类辅机变频器高、低电压穿越技术规范》要求,提高变频器自身躲过低电压穿越能力。对于已经投入运行的一类辅机变频器,推荐采用方案2,即一方面变频器控制电源采用UPS供电,保证控制电源不中断;另一方面优化DCS控制策略,并结合不同系统的设备允许电动机停运时间增加延时来躲过低电压穿越情况,当电源供电恢复时,及时实现变频器自启动。

### 参考文献:

- [1] DL/T 994—2006,火力发电厂风机水泵用高压变频器[S].
- [2] 国家电网公司. 大型汽轮发电机组一类辅机变频器高、低电压穿越技术规范[S]. 2013:3-4.

### 作者简介:

周道军(1973),男,河南光山人,工程师,从事发电厂电气二次专业工作。

## The Analysis of Frequency Converter Prevent Low Voltage Ride Through

ZHOU Daojun

(Shenhua Guohua Taicang Power Generation Co. Ltd., Taicang 215433, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of network scale, the probability of fault occurs in power system is increasing, the accident of power network will lead to the adjacent power plant electrical system in LVRT a short time. On the other hand, due to the energy saving effect is remarkable, the frequency converter is widely applied in power plants, and the LVRT may cause frequency converter tripping, resulting in power plant outage, such accidents have occurred more than. Based on power plant coal feeder frequency converter as an example, this paper analyses the causes and harm of LVRT, and combined with the experience in production field, measures to prevent from the security and economy analysis, to optimize the DCS control logic and the frequency converter control power is the best solution to prevent the accident of LVRT.

**Key words:** low voltage ride through (LVRT); instantaneous; frequency converter

(上接第36页)

### 作者简介:

朱振飞(1958),男,江苏启东人,高级工程师,从事电力电子技术在电力系统中应用的研究工作;

胡静(1987),男,江苏镇江人,工程师,从事电力电子技术在电力系统中应用的研究工作;

王小红(1973),女,安徽怀远人,高级工程师,从事电力电子技术在电力系统中应用的研究工作。

## Development and Establishment of Custom Power Laboratory

ZHU Zhenfei, HU Jing, WANG Xiaohong

(NARI Technology Development Co.Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** This paper emphatically introduces the scheme, detection function and some functional tests of physical simulation laboratory. Testing methods for parallel compensation type, series compensation type and parallel-series hybrid compensation type using physical simulation laboratory are proposed. With the methods, temperature rise and double pulse tests for valve are implemented. A description of the detection ability of dynamic simulation laboratory and high-voltage electrical laboratory is provided.

**Key words:** custom power laboratory; high-power physical simulation; test platform