

节能高效数字化兆瓦级风电变流器试验系统*

李谟发, 刘万太, 邓鹏, 周惠芳

(湖南电气职业技术学院 风能工程学院, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 针对现有风电变流器试验系统能量损耗高、试验效率低的问题, 提出了一种基于环形功率回馈的试验方法。重点阐述了试验系统的基本原理与结构, 并搭建了变流器试验软硬件平台, 实现了对变流器各特性参数的自动测试要求。对兆瓦级风电变流器进行了相应的试验, 试验结果表明: 该系统试验效率优, 而且系统操作方便, 安全可靠, 可实现变流器试验系统的高效节能与数字化。

关键词: 风电变流器; 节能高效; 分布式数据采集; 试验系统

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)09-0075-05

Energy Saving and Efficient Digital Experimental System of Megawatt Wind Power Converter*

LI Mofa, LIU Wantai, DENG Peng, ZHOU Huifang

(College of Wind Energy Engineering, Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan 411101, China)

Abstract: Focusing on the problem of high energy loss and low test efficiency of the existing wind power converter test system, a test method based on loop power feedback was proposed. The basic principles and the structure of the test system were emphasized, meanwhile the hardware and software platform of converter test was built. The proposed system could realize the automatic testing of various characteristic parameters of the converter. Corresponding tests were carried out on the MW-class wind power converter. The test results showed that the system test efficiency was excellent, and the system was easy to operate, safe and reliable, and could realize energy saving and digitization of the converter experimental system.

Key words: wind power converter; energy efficiency; distributed data collection; experimental system

0 引言

在风电变流器行业, ABB 公司的产品系列比较齐全, 技术先进, 基本能代表行业的最高水平。国内变流器技术也在不断地发展^[1], 在国内风电变流器厂家中, 拥有雄厚研发技术的公司均取得了不错的成果, 如合肥阳光、金风科技、九州电气、禾望电气、中车株洲电力机车研究所等。为了满足风电变流器现场投运的要求, 需要根据变流器的拓扑结构以及现场应用工况, 搭建测试平台来检测风电变流器的各种性能指标。

现有全功率变流器试验系统方案的缺点是需

要 2 台电机^[2], 一台是同步发电机和一台是原动机, 而且原动机和发电机间需要联轴器。因此, 组建一个地面试验台, 所需设备多, 占地空间大, 不但系统运行效率低, 而且能耗较高^[3]。为了解决上述问题, 本文提出一种基于环形功率回馈、运行可靠、能耗低的节能高效数字化风电变流器试验系统。

1 系统试验项目及主要技术指标

1.1 试验项目

试验系统的变流器按照 GB/T 3797—2005 《电气控制设备》、GB/T 25387.2—2010 《风力

* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ5008, 2018JJ5009); 湘潭市科技计划项目(CXY-YB20181005)

作者简介: 李谟发(1986—), 博士研究生, 工程师, 研究方向为电机特性分析与控制、电力电子及应用与分布式新能源发电等。

发电机组 全功率变流器 第 2 部分: 试验方法》、NB/T 31015—2011《永磁风力发电机变流器制造技术规范》与 NB/T 31051—2014《风电机组低电压穿越能力测试规程》等国家标准进行试验, 主要针对一般性结构与电气检查、电气试验项目与低电压穿越能力及功能恢复试验^[4]。试验项目包括: 一般性电气检查(含绝缘耐压测试)、保护功能试验、通信试验、加载试验、无功功率控制试验、整机效率试验、稳定运行时间试验、温升试验、过载能力试验、机侧 du/dt 试验、防护性能试验、电网适应能力试验、电网侧功率因数测定试验、直流母线纹波测试、电能质量测量试验、直流电含量测定试验、低电压穿越能力及有功恢复试验等。

1.2 主要技术指标

变流器运行方式为四象限矢量控制^[5], 采用水冷方式; 额定效率≥96.5%; 额定运行条件下稳定运行时间≥72 h; (额定工况) 机侧电压变化率 du/dt≤1 200 V/μs; 过载能力为每 10 min 持续 1 min 1.1 倍过载; 无功功率调节能力为±0.95; 额定运行条件下, 直流母线纹波不大于 50 V。额定运行条件下, 被测变流器向电网馈送的直流电流含量不应超过其输出电流额定值的 0.5%。电能

质量测试中, 电流谐波不大于 4%。被测变流器额定电气参数如表 1 所示。

表 1 变流器额定电气参数	
参数名称	网侧
电网电压/V	690(±10%)
额定容量/kVA	2 270
额定电流/A	1 900
频率/Hz	50(±5%)

试验站使用环境条件如下: 环境温度 -30~40 ℃, 环境湿度≤95%, 无凝露场合; 海拔高度≤2 000 m; 安装地点为户内。

2 系统整体方案设计

2.1 系统硬件结构

MW 级风电变流器共直流母线的试验方案如图 1 所示。硬件结构包括高压开关及测量柜、隔离降压变压器 T1、测控及配电柜 1、环形功率回馈单元、无功补偿装置和测试台。环形功率回馈单元包括三绕组变压器 T2、测控及配电柜 2、机侧滤波电抗电容、网侧滤波电抗电容与变流器。测试台中包括 PLC 及通信组件、远程控制按钮、仪表显示、上位机控制界面^[6]。

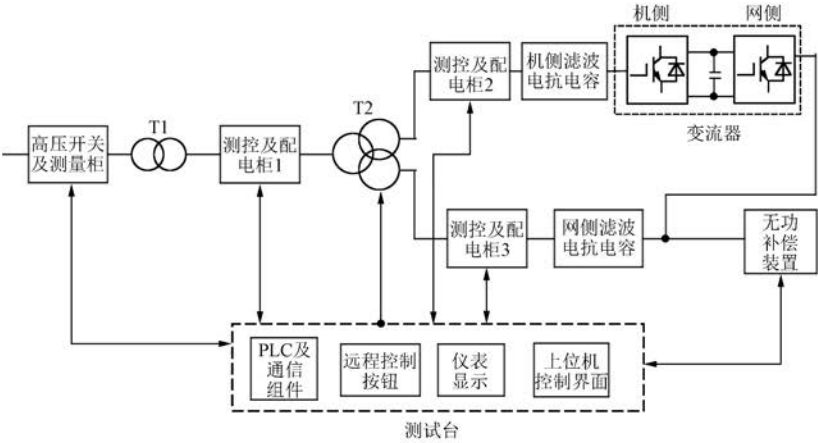


图 1 MW 级风电变流器共直流母线的试验方案

2.2 系统工作原理

系统中测控及配电单元起到电能分配及测量与显示电量的作用; 隔离降压变压器 T1 主要可以把输入的高压降压到试验所需要的低压, 所用变压器为 10 kV/690 V; 试验用三绕组变压器 T2 的二次侧绕组中, 机侧一对绕组(第一绕组)模拟风

电系统中机侧的输入电源, 网侧一对绕组(第二绕组)模拟风电系统并网电源; 机侧滤波单元和网侧滤波单元主要是滤波和环流系统发生故障时, 降低故障对变压器、变流器等试验主设备的冲击; 测控及配电单元中的动作信号可以通过测试台上的 PLC 及通信单元、按键单元、上位机操控

界面来进行远程控制;测试台既可以向各测控及配电单元发送信号,也可以采集各测控及配电单元中的信号;试验用三绕组变压器中电压的输出调节也可通过 PLC 远程控制来实现,使试验过程全自动化。在变流器低电压穿越试验时,无功补偿装置可以通过与变流器自身网侧绕组的功率控制运行时输出的功率分配来实现。

试验时,先检查试验线路是否接好。线路接好后,给测试单元通入电源,起动 PLC 及上位机,通过按键单元或者上位机操控界面起动高压开关及测量单元中的断路器等需要合闸的器件。电源接通到隔离降压变压器 T1。远程控制测控及配电柜 1 中的开关器件合闸起动,把电网电源接入到环形功率回馈单元。此时,根据变流器的试验项目需要起动上位机对应的操作界面,控制环形功率回馈单元中的各设备组合运行。完成变流器的试验。

通过整机效率测试、电能质量测试、电网侧功率因数测试、温升测试、过载能力测试、加载测试、稳定运行时间测试等一系列试验来判断变流器的性能。通过三绕组变压器 T2 给环形功率回馈系统通入电源的同时,调节全功率风电变流器机侧与网侧的控制方式,对变流器进行相关试验,观察各个节点电网电压、直流电压、输出功率、频率、电流、电压等参数曲线是否正常。试验过程中变流器的冷却系统要正常工作,监视采集的变流器温

度是否在正常范围。通过测试话筒的测量值来检测变流器的电磁噪声是否在正常的范围内;通过电能质量分析仪、电流互感器、电压互感器、示波器等设备以及上位机采集的数据来记录分析变流器的各种电参数,如端电压、电流、频率等。通过上述试验可以判断变流器的特性以及各种参数是否达到设计要求。

环形功率回馈单元的原理:变流器在进行通电试验时,功率电流可以在环内流动,功率电流沿三绕组变压器→测控及配电柜 2→机侧滤波电抗电容→变流器→网侧滤波电抗电容与变流器→测控及配电柜 3→三绕组变压器循环,达到节能的目的。

2.3 系统软件设计

系统软件开发的程序结构图如图 2 所示。试验时,测控系统的动态参数设定,试验数据的采集、显示,可分类别实现^[7]。上位机主界面包括用户权限管理界面、试验管理界面、系统界面。分项试验界面又包括变流器加载试验、整机效率测试与电网功率测试等所需试验项目对话框类。分别封装了试验的数据采集、对数据的处理函数与数据存储,能够实现相应的试验功能。用于监测、显示和记录变流器试验数据,对高精度电流互感器、宽频高精度电流传感器、变频功率传感器及变频功率分析仪等测得的实时电参量值进行分析和处理,并自动生成试验报告。

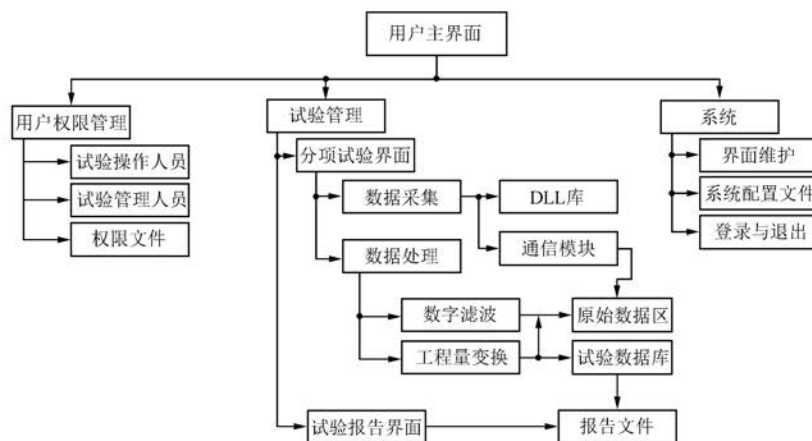


图 2 程序结构图

2.4 系统实现功能

系统通过集中监控软件来实现实时通信,并对各种电能质量参数及温度情况进行长期在线监

测和显示^[8],包括电压和电流的有效值、幅值、谐波、不平衡度、有功功率、无功功率、谐波测试的分析与结果、实时测试波形等。同时在后台形成虚

拟示波器,实现对测试数据的自动测试、分析与日志报表形成等功能。

系统频率、电压和电流系统提供仿真试验界面,包含2个主界面,用于系统试验的操作和相应的系统设置等。主要包括测试功能区、检测区、数据实时区。检测平台实时监测参数并对参数进行分析,给出显示结果,实现对平台更好的控制和保护。

3 试验结果

3.1 加载试验

加载试验的目的是验证不同转速下变流器的输出功率与设定的风力发电机功率曲线的对应关系。跟踪误差 $\leq \pm 2\%$ 。加载试验测试结果如表2所示。

表2 加载试验测试结果

序号	给定功率 /kW	网侧				机侧			跟踪误差 /%
		电压/V	电流/A	有功功率/kW	$\cos \varphi$	电压/V	电流/A	有功功率/kW	
1	140	669.49	110.01	124.71	0.977 59	302.53	273.90	142.63	1.88
2	300	664.77	247.31	285.55	1.000 00	392.33	453.10	302.76	0.92
3	540	664.38	456.74	525.50	0.999 81	488.48	672.55	549.03	1.67
4	700	665.43	585.16	674.30	1.000 00	539.76	788.07	701.48	0.21
5	900	666.45	753.45	870.11	1.000 00	595.29	936.34	902.48	0.28
6	1 200	667.98	1 006.4	1 159.4	0.995 69	681.37	1 122.7	1 202.2	0.18
7	1 400	669.82	1 170.4	1 362.1	1.000 00	696.07	1 252.9	1 401.6	0.11
8	1 800	671.03	1 506.1	1 746.9	0.997 98	695.68	1 625.1	1 805.3	0.29
9	2 180	671.51	1 827.6	2 130.1	1.000 00	695.96	2 022.6	2 198.0	0.83

3.2 整机效率测试

在额定功率条件下,测试变流器的效率应不

低于 96.5%。
整机效率测试结果如表3所示。

表3 整机效率测试结果

序号	输出(网侧)			输入(机侧)			η /%
	电压/V	电流/A	有功功率/kW	电压/V	电流/A	有功功率/kW	
1	669.49	110.01	124.71	302.53	273.90	142.63	87.44
2	664.77	247.31	285.55	392.33	453.10	302.76	94.32
3	664.38	456.74	525.50	488.48	672.55	549.03	95.71
4	665.43	585.16	674.30	539.76	788.07	701.48	96.13
5	666.45	753.45	870.11	595.29	936.34	902.48	96.41
6	667.98	1 006.4	1 159.4	681.37	1 122.7	1 202.2	96.44
7	669.82	1 170.4	1 362.1	696.07	1 252.9	1 401.6	97.18
8	671.03	1 506.1	1 746.9	695.68	1 625.1	1 805.3	96.77
9	671.51	1 827.6	2 130.1	695.96	2 022.6	2 198.0	96.91

3.3 过载能力测试

变流器额定运行至各器件温升达到稳定值后,在110%的电机侧标称电流容量下运行1 min,随后电流降至额定值以下运行一段时间,在整个运行期间,输入电流有效值不超过额定输入电流,变流器应能正常工作。

过载能力测试结果如表4所示。

3.4 电网侧功率测试

调节机侧电压,对应风电变流器运行在额定转速以下、额定转速、额定转速以上的3个点测量。

电网侧功率因数测试结果如表5所示。

表 4 过载能力测试结果

时间	入水 温度/℃	机侧电抗 /℃	IGBT 温度 /℃	网侧				机侧		
				电压/V	电流/A	有功功率/kW	cos φ	电压/V	电流/A	有功功率/kW
13:52:10	55.3	58	80.8	667.5	1 801	2 082	1	694.6	2 071	2 157
13:55:40	54.6	60	80.4	666.0	1 800	2 076	1	635.0	2 226	2 160
13:57:50	54.6	61	81.0	668.0	1 800	2 082	1	636.8	2 233	2 154
14:00:00	53.4	63	78.5	666.0	1 815	2 094	1	694.8	2 081	2 151
14:05:00	51.1	64	76.8	667.3	1 811	2 093	1	595.0	2 086	2 157

表 5 电网侧功率因数测试结果

序号	网侧					机侧				
	电压/V	电流/A	功率/kW	频率/Hz	cos φ	电压/V	电流/A	功率/kW	频率/Hz	cos φ
1	669.49	110.01	124.71	49.983	0.977 59	302.53	273.90	142.63	3.472 8	0.993 60
2	671.51	1 827.60	2 130.10	50.011	1.000 00	695.96	2 022.6	2 198.0	7.962 7	0.901 50
3	671.51	1 827.60	2 130.10	50.011	1.000 00	695.96	2 022.6	2 198.0	7.962 7	0.901 50

3.5 网侧输出电能质量测试

图 3、图 4 所示为进行变流器试验时,测得的网侧输出电能质量图。从图 3、图 4 可以看出,网侧电压 U_{ab} 的电压谐波含量 THD=1.3%,网侧电流 I_c 谐波含量 THD=2.3%,试验结果符合试验要求。

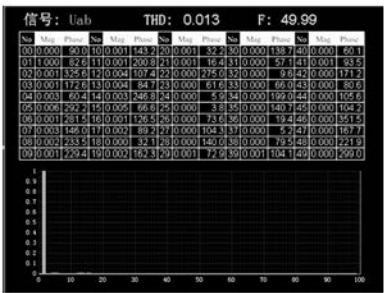


图 3 U_{ab} 输出电能质量

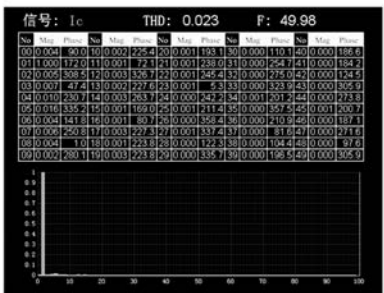


图 4 I_c 输出电能质量

4 结 语

(1) 采用多功能变压器,变压器二次侧一端接变流器网侧,一端接机侧,通过二次侧 2 个绕组的向量耦合实现能量的交流回馈,可以对变流器

的温升耐压、加载、电网侧功率因数、总谐波效率、负载突变、转矩速度波动等进行试验。通过内回馈试验法,降低了试验过程中的电能损耗,达到了绿色节能的效果。

(2) 整个试验系统采取变流器试验电源柜与控制电源柜分离技术,防止了中高压试验电源的谐波对采集系统的干扰,提高了采集数据的精度,对变流器机侧与网侧也采取独立的配电与采集,试验的可控性与故障排除得到了保障。

【参 考 文 献】

[1] 冯江华.风电变流器的技术现状与发展[J].大功率变流技术,2013,5(3): 5.

[2] 李建军,王传军,汪玉山.2 MW 高压变流器试验系统设计[J].电机与控制应用,2014,41(12): 53.

[3] 王阳.一种测试 1.5MW 双馈变流器试验台[J].重工与起重技术,2015(3): 21.

[4] 宋鹏,王辉,王德默,等.一种大功率 AFE 变频器试验方法[J].电气传动,2014,44(9): 9.

[5] 李路遥,王志新,吴定国.海上风电柔性直流输电变流器控制与试验系统设计[J].电网与清洁能源,2012,28(9): 50.

[6] 李宇飞,王跃,吴金龙,等.一种分布式发电并网变流器测试装置设计方案及实现[J].电工技术学报,2015,30(3): 115.

[7] 韩宝江,段建刚.电机检测系统网络群控技术及应用[J].电机与控制应用,2015,42(10): 69.

[8] 谢文强.基于虚拟仪器的变流器试验系统的研制[J].计算机测量与控制,2013,21(11): 3029.

收稿日期: 2019-05-27