变频器适应性要素分析与测试系统设计研究

张洪阳，李　君，时振堂

（中国石化大连石油化工研究院第十二研究室，辽宁 大连 116045）

摘要：按照绿色低碳和节能减排的要求，目前油田企业已经广泛采用各类变频器用于生产环节，而在取得较好节能效果的同时，针对变频器适应要素分析与各类性能测试方法和手段的要求不断提高。从工作环境、供电品质和负荷工况三种适应性要素入手，明确了温升、效率、谐波和功率因数等作为变频器关键性能参数，提出了油田企业变频器在实验室中的测试路径，设计了由变频拖动、被测机组和回馈机组构成的能够实现电压、电流实时数据检测和计算的实验室测试方案，建设了可以适应功率等级 10 ～ 200 kW、电压等级 0 ～ 1 200 V 变频器系列产品的系统测试平台，通过实验验证了方案的有效性。

关键词：适应性要素分析；关键性能参数；测试方案；实验验证

Adaptive elementsthe analysis and test scheme design research of frequency converter

ZHANG Hongyang，LI Jun, SHI Zhentang

(SINOPEC Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Dalian 116045, China)

Abstract: Oilfield enterprises have widely used all kinds of frequency converters for production because the requirements of green, low-carbon, energy conservation and emission reduction. While achieving good energy-saving results, the requirements for adaptive elementsthe analysis and various performance test methods and means of frequency converters are constantly improving. The test path of frequency converter in oilfield enterprises under the three adaptive requirements of working environment are analyzed, power supply quality and load conditions, and defines the test methods of temperature rise, efficiency,harmonic and power factor as the key performance parameters of frequency converter and its adaptability to power grid. Based on the field test instrument, a laboratory test scheme which can realize the real-time data detection and calculation of voltage and current based on variable frequency drive, tested unit and feedback unit is designed, and a system test platform which can adapt to the series of inverter products with power level of 10～200 kW and voltage level of 0～1 200 V is built. The effectiveness of the scheme is verified by experiments.

Key words: adaptive elementsthe analysis; key performance parameters; test scheme; experimental verification

0　引言

变频器作为一种重要的电力电子设备，已经成为传动系统中实现节能的重要手段之一，其自身设计品质和工作性能是保证其安全可靠运行的关键。特别是在石油化工等要求“安稳长满优”的重要负荷场景中，变频器问题/故障会使生产

中国石化科技项目（编号：319019-2）

停车，不仅会带来巨大的经济损失，处理不当甚至会造成人员伤亡，因此开展变频器适应性要素分析、变频器测试技术研究和平台建设，探索高效的评价路径，对预防变频器事故、保障生产安全意义重大。关于变频器适应性要素、功能测试系统的研究主要集中在针对不同行业的应用场景和平台设计方面，或者是功能性的测试等方面。

在变频器适应性分析和测试平台设计上，文献[1]利用虚拟仪器LabWindows/CVI软件，考虑变频器整机测试涉及的控制、仪表通信和测试数据处理等搭建了测试平台。文献[2]通过建立基于共直流母线的能量回馈式感应电动机对拖实验系统，对变频器产品的各项运行特性参数进行实际测试及验证，通过模拟工况实验证明该系统具有很好的节能性和有效性。文献[3]研究了变频器的加载测试，被试变频器带动陪试电动机，通过具有反馈功能的ABB四象限变频柜将电能反馈到进线柜出线端，实现电能的内部循环，其控制系统实现精确控制，节能效果突出。针对石油石化行业变频器要求较高的防护等级，易燃易爆场合下更需要特殊设计来保障其安全性。文献[4]介绍了石化企业的变频器测试平台方案，提出了利用矢量控制变频器进行加载的方法，使加载系统可以模拟石化企业现场负载，论述了加载系统的性能要求。

变频器功能测试系统不但可以用于对生产中使用的变频器进行测试，也适用于对产品的出厂测试，在控制领域广泛用于技术研发等。文献[5]设计了一套基于ACS-800变频器的负载性能测试系统，在变频器出厂之前需要对其进行负载性能测试；电能质量分析仪所测量的数值和波形通过RS 232传送至上位机，最后用MATLAB软件对采集到的电压、电流数据进行了谐波分析；文献[6-7]对AC-AC、多电平等不同电力电子装置的拓扑和功能进行了分析研究；文献[8]验证了示波器波形测试的谐波电流与专用仪表数据测试谐波电流一致性问题，通过MATLAB软件进行谐波分析；文献[9]基于TestStand和LabVIEW开发了控制板的自动测试程序，解决了控制板测试效率低、测试不全面等难题，降低了板卡在应用现场的故障率，用于变频器控制板卡的批量测试和维修。文献[10]设计了一种矿用变频器性能测试系统，提出了恒转矩加载控制算法，提高了转矩加载准确度。测试结果表明，该系统测试准确度高，在额定转矩范围内，转矩加载误差均小于1%。以上研究多以单一功能测试实现或者是以设备本身出发，缺乏从系统全局考虑实现变频器测试系统的设计，特别是针对石油化工行业的变频器并未太多涉及。

本文从系统和全局的角度出发，从变频器适应性分析、实验平台测试的角度，首先对影响油田用变频器性能的各适应性要素进行分析，其次开展功能测试系统的路径设计，最后通过实验平台建设以及实验测试等，验证了设计方案的有效性。从工作环境、供电品质和负荷工况三个方面，对油田企业的变频器测试路径进行分析，明确了温升、效率、谐波和功率因数等作为变频器关键性能参数，以及对电网适应性等方面的测试方法。设计基于变频拖动、被测机组和回馈机组构成的能够实现电压、电流实时数据检测和计算的测试方案，建设了可以适应功率等级10～200 kW、电压等级0～1 200 V变频器系列产品的系统测试平台，通过变频器测试和分析验证了方案的有效性。

1 变频器工作的适应性要素及分析

从变频器工程应用过程的用户需求出发，考虑工作环境、供电品质和负荷工况三类主要的适应性要素影响进行分析。

1.1 工作环境

变频器的工作环境如何与变频器性能直接相关。工作环境方面的影响因素包括温度、湿度、振动、腐蚀性气体及尘埃等。其中，温度是最重要的要素之一，变频器周围温度是影响变频器自身温升的重要原因，当环境温度过高时，变频器内部功率器件功率损耗的热量难以散失，会由于提前达到变频器自身的过温度保护阈值而停车。

因此，变频器使用过程中要保证周围温度控制在允许范围内。一般采用增加强迫风冷、半导体制冷，甚至是增加空调的方式实现强迫降低周围温度。石化行业生产装置对工艺流程停车、开车等要求较高，因此变频器必须按照计划停车，才能保证生产全过程的安全。在易燃易爆的情况下，变频器内的继电器、接触器动作时产生的火花都有可能引发着火，甚至发展为火灾或爆炸事故等，这些也是环境要素方面需要考虑的。

1.2 供电品质

供电品质中体现了变频器与供电电源之间的兼容性与电网的适应性。抽油机是油田重要的生产负荷，现多采用变频器控制。解决了供排不平衡、效率低下的问题，并且达到了快捷调整和便于管理的目的。变频器对电压暂降的敏感性以及变频器对电压暂降的耐受特性需要评估，以确保对电网（电压）的适应性满足要求。影响变频器对暂降耐受能力的主要因素是低电压和过电流保护阈值设置、负载特性等。其中，电压耐受曲线反映出暂降幅值和持续时间对变频器的影响，暂降幅值越低，则持续时间越长，变频器越敏感。

1.3 负荷工况

是否适应负荷工况是变频器长期稳定工作的前提。负荷过重是由于负载太大，主要体现在受到加减速时间和运行周期时间太短、电压波动和变频器功率太小等影响，主要特征是电动机和变流器发热问题突出。负荷过轻是由于负载小，变频器长期处于“大马拉小车”情况，经济性较差。因此，根据变频器恒转矩负载、恒功率负载的工作特性，针对抽油机、压缩机、风机和水泵等负荷的差异选择适当的变频器。

2 测试系统设计

2.1 变频器测试路径

变频器作为重要的一种电力电子设备，其设计复杂、元器件多，涉及单一器件、组件和系统级的测试方法和手段较多。本节仅从用户的角度出发，对影响变频器使用过程中的关键要素和测试方案路径进行分析。系统总的测试路径如图1所示。相应说明如下：采用电动调压器，额定容量为315 kV·A，调节范围为0～420 V；变压器采用双输出的结构，电压为0～1 400 V，容量为250 kV·A，采用660 V和1 140 V的双输出头；电参数测试仪电压范围为0～1 400 V，电流范围为0～5 A（互感器采用800/5 A）；测量频率0～800 Hz，准确度采用0.2级，具有谐波分析、波形录制和波形分析等功能；控制平台基于西门子1200系列PLC；选择380 V、690 V和1 140 V的22 kW测试机组、被测变频器以及高低压配电柜等。

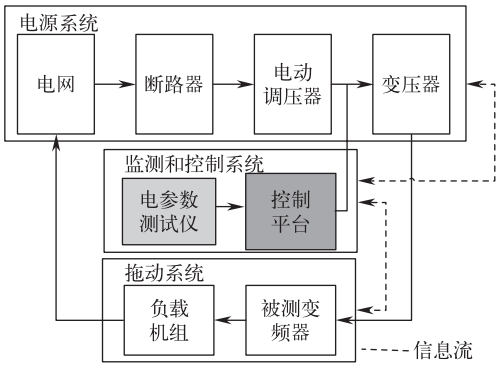

图1 系统总的测试路径

Fig. 1 Overall test path of the system

2.2 关键性能参数及影响

变频器作为高度自动化的电力电子设备，根据油田场景的使用情况，总结了温升、效率、谐波和功率因数等变频器关键性能参数以及对电网适应性等是影响变频器质量的重要因素。温度是工作环境中最重要的指标之一，是影响电子器件寿命及可靠性的重要因素，温度对变频器的影响会直接导致设备过温度而停车；效率是用户从经济性角度出发考虑的主要因素；谐波和功率因数则是电能质量两个方面的重要指标。

使用变频器后，相当于在抽油机传动系统中额外增加一个环节，在负荷不变的情况下，会降低整个机采系统的效率，但是对采用变频调速之后，特别是与油井配合使用的变频器调参之后，节能效果得到显现。使用变频器，其入端功率因数普遍高于不使用变频器的异步电动机油井。使用变频器会产生谐波，针对此类问题，采用能馈

滤波技术，可参考油田电网无功控制技术。经过大量的实践，采用测试加数据分析的方法是适合油田的最为有效的变频器测试和故障诊断手段。此外，油田变频器普遍没有能量回馈模块，因此其倒发电不能回馈，这一现象除了会导致倒发电作为损耗降低变频器效率，还会导致变频器入出端的平衡度测试结果不一致。

2.3 测试项目分类

变频器，特别是低压变频器，一般根据不同种类变频器性能测试需求，主要测试项目分类：①额定运行测试，变频器带额定负载运行时，测量输入电压/电流、功率、功率因数、频率、输出电压/电流和变频器效率；②电网异常测试，包括进线侧过电压、欠电压测试；③负载异常测试，包括过电流保护、过载能力测试；④保护功能测试，包括输出短路、风扇故障和安全停车测试；⑤温度测试等。

通过搭建测试平台的手段，建成多种被测变频器的工作环境以及被测变频器相关参数的测试系统。对被测变频器各项运行参数进行验证考核并记录分析，确认被测变频器是否满足相关要求。

3 实验

3.1 实验平台搭建

搭建的实验平台部分实物图如图2～图5所示。此实验平台满足被测变频器功率范围10～200 kW、过载测试为1.5倍的要求。考虑选3个典型的电动机功率配置。

机组1：选择22.5 kW电动机+46 kW变频器的机组作为7.5 kW、11 kW、15 kW和18.5 kW等变频器的实验机组。

机组2：选择81 kW电动机+132 kW变频器的机组作为22 kW、30 kW、37 kW、45 kW、55 kW和75 kW等变频器的实验机组。

机组3：选择215 kW电动机组+315 kW变频器的机组作为90 kW、110 kW、132 kW、160 kW、185 kW和200 kW等变频器的实验机组。

图 2 测试系统平台
Fig. 2 Test system platform

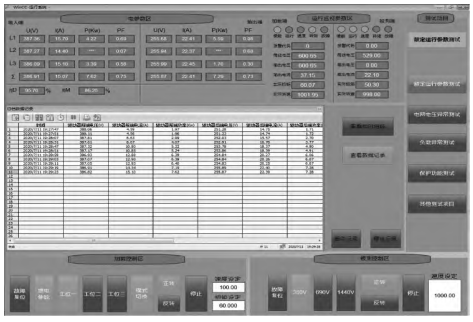

图 3 测试系的操作界面
Fig. 3 Operation interface of testing system

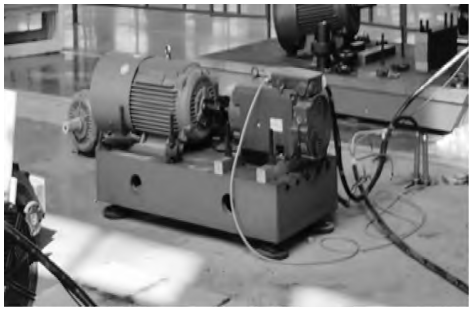

图 4 测试机组
Fig. 4 Testing plant unit

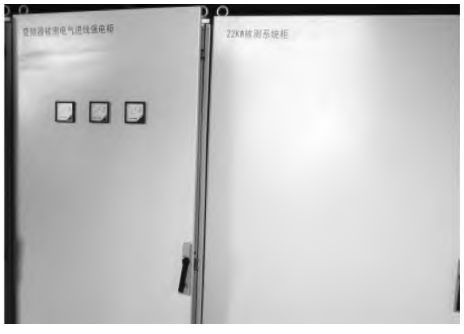

图 5 被测变频器
Fig. 5 Tested converter

3.2 实验测试

为验证该平台对变频器测试的有效性，开展不同频率下的变频器电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、电压谐波总畸变率和电流谐波总畸变率的测试。不同频率下的变频器各参数见下表。可以看出，随着频率的提高，变频器的功率因数、电压谐波总畸变率和电流谐波总畸变率呈下降趋势。不同频率下的THD_U和THD_I测试曲线和三相电压电流示波器测试波形分别如图6和图7所示。

表　不同频率下的变频器各参数

Tab. Parameters of frequency converter at different frequencies

项目 频率 /Hz	电压 /V	电流 /A	有功功率 /W	无功功率 /var	功率因数	电压谐波总畸变率 THD_U（%）	电流谐波总畸变率 THD_I（%）
5	96.383	0.248	6.805	22.931	0.285	98.564	47.675
10	121.59	0.25	10.775	28.468	0.354	66.72	59.423
15	142.47	0.254	14.82	33.045	0.409	60.51	48.448
20	160.55	0.257	18.865	36.665	0.458	54.21	25.563
25	176.62	0.26	23.003	39.664	0.502	53.848	53.663
30	191.26	0.261	27.099	42.01	0.542	48.319	29.33
35	204.93	0.264	31.415	44.103	0.58	30.296	35.71
40	217.68	0.264	35.391	45.34	0.615	46.717	29.195
45	223.73	0.275	40.205	46.534	0.654	33.719	30.622
50	223.79	0.293	44.417	48.285	0.677	6.262	2.62

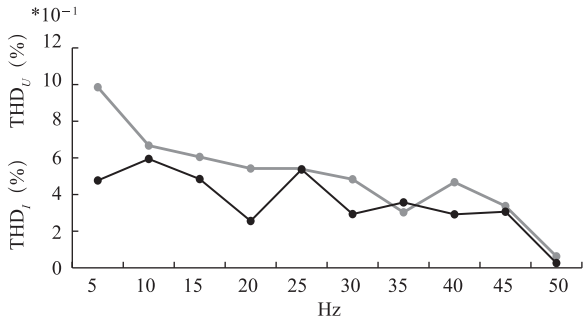

图 6　不同频率下的 THD_U 和 THD_I 测试曲线

Fig. 6 THD_U and THD_I test curves at different frequencies

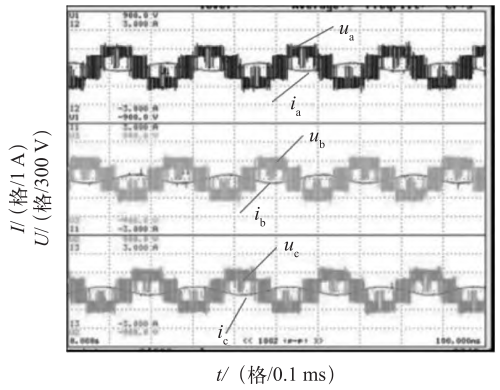

图 7　三相电压电流示波器测试波形

Fig. 7 Test waveform of three-phase voltage and current

4　结束语

本文针对油田用的变频器开展实验室基于测试平台的测试技术研究。首先从工作环境、供电品质和负荷工况三个方面适应性要素进行了分析，并对油田企业的变频器影响情况进行分析；其次对在实验室中的测试路径进行分析，明确了温升、效率、谐波和功率因数等作为变频器关键性能参数以及对电网适应性等；最后设计了基于变频拖动、被测机组和回馈机组构成的能够实现电压、电流实时数据检测和计算的实验室变频器测试平台方案，建设了可以适应功率等级10～200 kW、电压等级0～1 200 V变频器系列产品的系统测试平台，通过实验验证了方案的有效性。

研究发现现有的相关标准有修订空间，后续可在变频器测试标准方面开展相关研究。

参考文献

[1] 陈小平，李云飞，颜友钧，等．基于虚拟仪器技术的变频器测试系统的研制[J]．仪器仪表学报，

2004(5)：684-687.

[2] 王家校．基于共直流母线的变频器对拖试验系统设计[J]．电力电子技术，2014，48(7)：10-12.

[3] 潘军，张宇光．一种四象限变频器的加载试验台[J]．煤矿机电，2017(2)：33-35.

[4] 李君，杜红勇，刘维功，等．石化企业变频器测试系统加载控制仿真分析研究[J]．电气应用，2017，36(15)：52-56.

[5] 张峰，刘述喜，李山，等．基于ACS-800变频器负载性能测试系统的设计与谐波分析[J]．重庆理工大学学报(自然科学)，2016，30(12)：95-101.

[6] CHEN Xiaomei，NIU Wangqiang，ZHANG Xiong．Design and implement of a high-frequency bridge type AC-AC direct converter for contactless power transfer systems[A]．Intelligent Information Technology Application Association．Electronics and Signal Processing（EEIC 2011 LNEE V3）[C]．Intelligent Information Technology Application Association：2011（8）：139-146.

[7] VINOGRADOV A B，KOROTKOV A A．Control of a multilevel frequency converter of a power-efficient electric drive[J]．Russian Electrical Engineering，2017，88(4)：212-218.

[8] 秦旭东，王金全，陈晓宁，等．变频器谐波电流测试与分析[J]．电气技术，2009(1)：24-26.

[9] 刘静，赵泽生，于洪泽，等．变频器控制板自动测试系统设计[J]．电气传动，2021，51(10)：58-61.

[10] 荣相．矿用变频器性能测试系统设计[J]．工矿自动化，2021，47(5)：9-15.

作者简介

张洪阳（1982—），男，博士，副研究员，主要从事电力电子装备研发和应用等工作。

（收稿日期：2022-03-26）