

石化企业变频器测试系统加载控制仿真分析研究

石化企业原油和天然气开采工艺, 炼油、化工生产工艺都大量应用了变频调速技术。随着变频器的广泛使用, 拖动系统可靠性降低, 目前石化炼厂企业缺少相应的预防性试验手段, 无法准确评估变频器的运行状况。介绍了石化企业的变频器测试平台方案, 论述了加载系统的性能要求, 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, 提高了变频器测试的准确性, 保证了石化企业的安全高效生产。

李 君 杜红勇 刘维功 时振堂/中国石化抚顺石油化工研究院

0 引言

石化企业原油和天然气开采工艺, 炼油、化工大量工艺应用了变频调速装置。油田井厂中的游梁式抽油机、皮带式抽油机、电潜泵和注水泵以及集输站中的外输泵等逐步采用变频器驱动电动机, 使用变频器后可以实现电动机软启动, 消除泵类喘振, 压力连续控制, 电动机节能的目的。炼化企业反应釜搅拌机、空分装置压缩机、焦化装置水泵及锅炉风机等大量使用变频器, 可以实现流量自动调节, 满足生产工艺调速、节能要求, 提高过程控制自动化水平^[1]。随着变频器的广泛使用, 电能质量下降, 变频器本身可靠性影响了拖动系统的可靠性。使用企业缺少相应的检测手段, 无法准确评估变频器的运行状况。

1 变频器测试系统概况

变频器测试系统是伴随着变频器的发展而不断进步的, 通过测试系统可以进行变频器额定运行、电网异常、负载

异常及保护功能等测试, 提高了变频器的可靠性。根据变频器模拟负载不同, 测试过程中能量流动方式不同, 主要分为能量消耗型和能量回馈型。能量消耗型主要将能量以热的形式消耗掉, 典型方式为使用直流发电机作待测变频器电动机的负载, 通过调节励磁来调节负载转矩, 能量消耗在负载电阻上, 此种方式已很少使用。能量回馈型主要分为三类: ①使用直流发电机、直流电动机及同步发电机模拟负载, 通过调节励磁来调节负载转矩, 此种方式负载转矩调节准确, 能量回馈电网, 利用率较高, 但控制复杂, 使用量减少; ②四象限变频器—异步电动机模拟负载, 通过变频器调节负载转矩, 转矩调节快速准确, 能量回馈电网, 但对可控整流设备要求较高, 投资较大; ③供母线逆变器—异步电动机模拟负载, 此种方式与第二类类似, 但投资较省, 不足之处是待测变频器不独立, 一些测试指标会受到干扰。因此二、三类为主要方式^[2-5]。

2 测试系统能量分析

2.1 测试系统结构图

变频器试验包括环境、安全及电磁兼容等内容, 依据的标准主要为GB/T 12668.2—2002、GB 12668.3—2012、GB 12668.501—2013、GB/T 12668.502—2013、GB/T 12668.6—2011、GB/T 30844.1—2014和GB/T 30844.2—2014。石化行业关注与性能相关的试验项目,



李 君/高级工程师

关键词/Keywords

石化企业 ·
变频器测试 ·
转矩控制 ·
PWM整流器 ·

目的是确认被试变频器符合石化行业使用的特殊要求,测试标准主要参考后两种。

石化企业关注的测试内容:额定运行测试、电网异常测试、负载异常测试和保护功能测试等。多数测试需要通过调节加载系统来使待测变频器工作在不同状态,本文重点分析加载系统转矩控制。

设计时考虑到测试准确性,变频器种类较多及测试平台的通用性,选择能量回馈型的第二类方式,系统结构如图1所示。陪试变频器整流器使用PWM整流器,可以单位功率因数回馈电能。逆变器采用矢量控制,将转矩电流和磁场电流解耦控制,具有较好的动态特性。

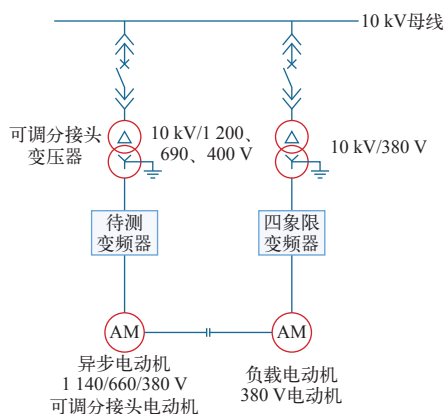


图1 变频器测试系统结构图

2.2 测试系统转矩分析

待测变频器工作在正常运行状态转矩为正,工作在回馈制动状态转矩为负,加载装置要输出不同转矩,模拟变频器的实际工作状态,这种测试方法还原了变频器的工作场景,考虑了主要负载特性,具有较高可信度。

以游梁式抽油机为例,说明加载系统的转矩设置。游梁式抽油机是一种四连杆机构,由于平衡块的配重作用,用很小的力可以驱动抽油机工作。工作过程如图2所示,电动机转矩如图3所示。在抽油机运动的一个冲程中,有一小段时间载荷转矩小于平衡块转矩,电动机处于倒发电状态,这个时段可能处于上冲程、下冲程或上、下冲程都有倒发电状态^[6-9]。

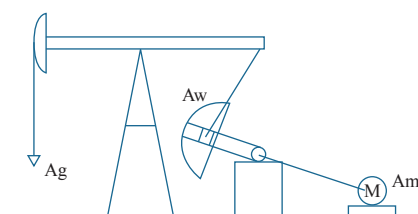


图2 抽油机系统结构图

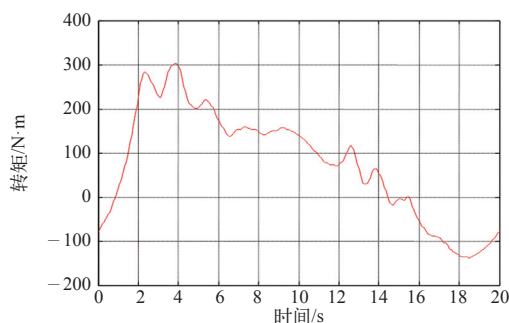


图3 抽油机电机转矩曲线

油田、煤层气开采等工艺逐步采用了变频器,主要为 U/f 控制模式,倒发电时泵升电压升高,经常损坏变频器。现场采取制动电阻、能量回馈等方法,降低了故障率,但缺少可靠的检测手段。采用变频器测试平台,控制加载系统转矩等于现场测试电动机转矩,模拟抽油机的实际工作状态,可以检测变频器的可靠性。

2.3 测试系统转矩控制分析

转矩控制采用定性分析,假设待测变频器为石化企业中应用最广泛的通用型变频器,控制方式为转速开环带补偿环节恒磁通控制,如图4所示。

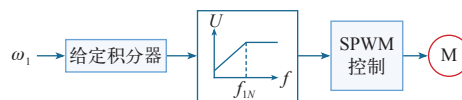


图4 通用变频器控制框图

陪试变频器需要模拟负载转矩特性,采用矢量控制,可以快速跟踪负载给定,如图5所示。陪试变频器的控制方式与常规矢量控制略有差别,常规矢量控制通常为转速外环,电流内环双环控制,陪试变频器采用转矩外环、电流内环控制,利用转矩传感器构成闭环控制,内环控制与常规控制相同,实际测试系统采用PLC为陪试变频器提供抽油机负载曲线。

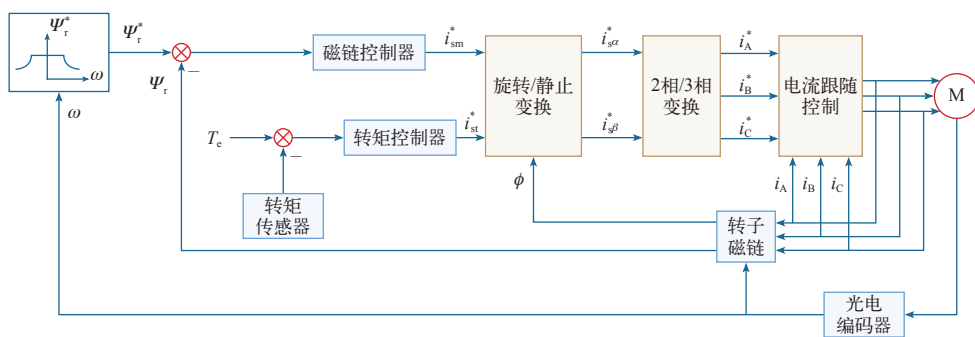


图5 矢量控制变频器控制框图

待测变频器电动机和陪试变频器电动机连轴运动，两台电动机的转矩差作用于轴，稳态时转矩平衡，运动公式为

$$T_D - T_P = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

式中， T_D 为待测变频器电动机机械转矩； T_P 为陪试变频器电动机机械转矩； J 为联轴转动惯量。

以转速-转矩曲线分析。如图6所示，曲线 D 为通用变频器转矩特性，与交流电动机转矩特性类似，曲线 P 为矢量控制变频器转矩特性，曲线与直流电动机转矩特性类似，因为矢量控制使交流电动机获得了直流电动机一样的线性力学特性，这也是高性能交流调速性能优越的原因。假设待测变频器系统 D_1 和陪试变频器系统 P_1 在转速 n_1 时达到平衡，拖动转矩等于负载给定转矩， $T_1 = T_2$ 。提高待测变频器负载转矩时，待测变频器采用恒气隙磁通开环控制，转矩特性曲线 D_1 不变，陪试变频器转矩给定增大，经过转矩闭环控制，曲线特性下移，在速度 n_2 处重新达到平衡，稳态时 $T_3 = T_4$ 。如待测变频器采用速度闭环控制，维持速度不变，则同时要提高待测变频器频率，使曲线上移，同时陪试变频器降低频率，使曲线下移，仍

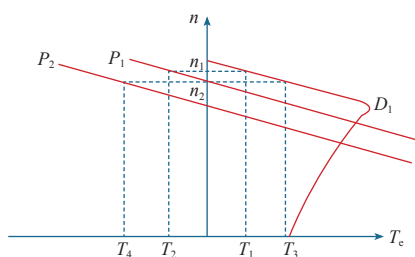


图6 转矩调节示意图

旧在 n_1 处达到平衡，稳态时 $T_3 = T_4$ ，如图7所示。

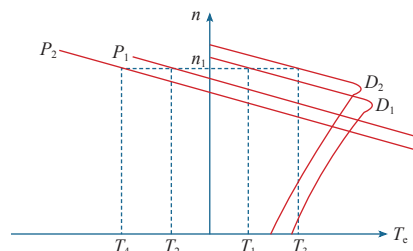


图7 速度闭环系统转矩调节示意图

2.4 测试系统能量分析

电动机电动运行：待测变频器拖动电动机处于电动状态，稳态时 $\omega_{1D} > \omega > \omega_{1P} > 0$ ，其中 ω_{1D} 为待测变频器同步角频率， ω_{1P} 为陪试变频器同步角频率， ω 为轴的旋转角频率，待测变频器系统 $\omega_{s1} = (\omega_{1D} - \omega) / \omega_{1D} > 0$ ，处于电动状态；陪试变频器系统 $\omega_{s2} = (\omega_{1P} - \omega) / \omega_{1P} < 0$ ，处于回馈制动状态，能量通过PWM整流器回馈电网。

回馈制动运行：待测变频器拖动电动机处于回馈制动状态， $\omega_{1P} > \omega > \omega_{1D} > 0$ ， $\omega_{s1} = (\omega_{1D} - \omega) / \omega_{1D} < 0$ ，处于能量回馈状态，通用变频器为二极管整流，能量无法回馈电网，泵升电压升高后，制动电阻动作或过电压保护动作； $\omega_{s2} = (\omega_{1P} - \omega) / \omega_{1P} > 0$ ，陪试变频器处于电动状态。

2.5 PWM整流器分析

陪试变频器整流侧为PWM整流器，可以实现能量双向流动，采用有功、无功解耦控制，实现功率平衡。有功控制 d 轴为电压外环、电流内环，电压控制保持陪试变频器母线电压恒定，维持有

功平衡, 电流控制改变整流器与电网交换有功大小。无功控制 q 轴为电流环, 无功电流给定为0, 使整流器工作在单位功率因数状态下, 节省了整流器容量, 如图8所示。

3 仿真分析

仿真研究使用Matlab/Simulink仿真模块,框图如

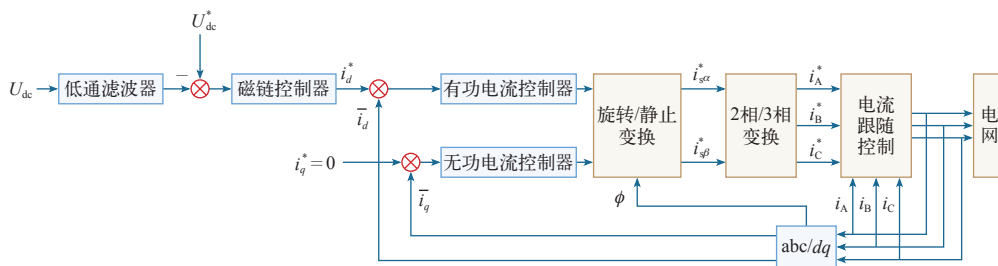


图8 PWM整流器控制框图

图9所示, 两台电动机参数相同: 额定功率37 kW; 额定电压380 V; 额定频率50 Hz; 定子电感0.4 Ω ; 定子漏感2 mH; 转子电阻0.8 Ω ; 转子漏抗2 mH; 定转子同轴绕组等效互感0.070 H; 转动惯量0.20 kg·m²; 极对数2。待测变频器采用带补偿环节恒磁通控制, 陪试变频器采用矢量控制, 系统参数计算为

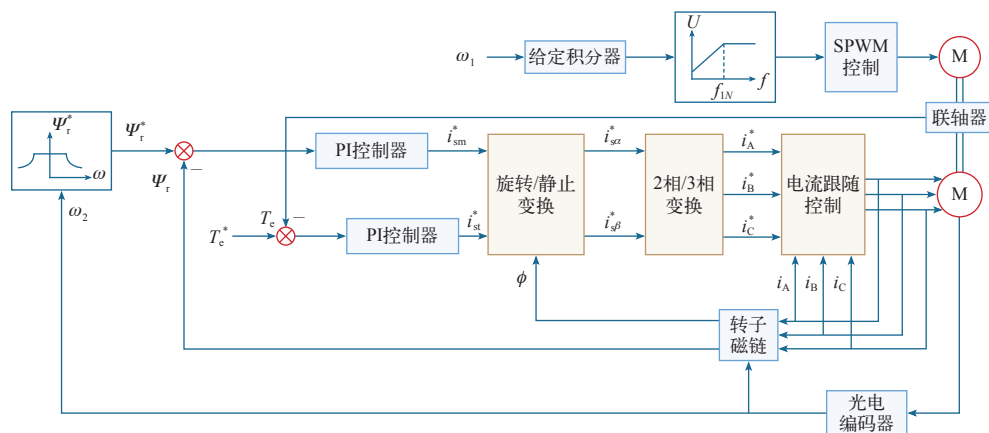


图9 对拖测试控制框图

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{L_m + L_{lr}}{R_r} = \frac{0.070 + 0.002}{0.800} = 0.09 \quad (2)$$

$$L_r = L_m + L_{lr} = 0.072 \quad (3)$$

仿真时，将实际抽油机转矩特性曲线输入到陪试变频器，如图10所示。陪试变频器输出转矩，如图11所示，它们的转矩差如图12所示。从仿真结果看到负载转矩迅速跟踪给定转矩，较好地模拟了抽油机实际运行状况。抽油机的转速特性曲线如图13所示，运行过程中转速的变化较小，因为无论电动状态或发电状态，抽油机电动机都工作在速度-转矩曲线很陡的一段稳定区域内。

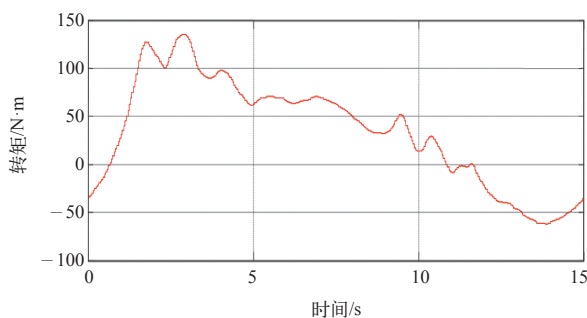


图10 实际抽油机转矩曲线

4 结束语

本文通过电动机速度-转矩特性曲线定性分析了变频器对拖测试系统转矩平衡关系, 陪试变

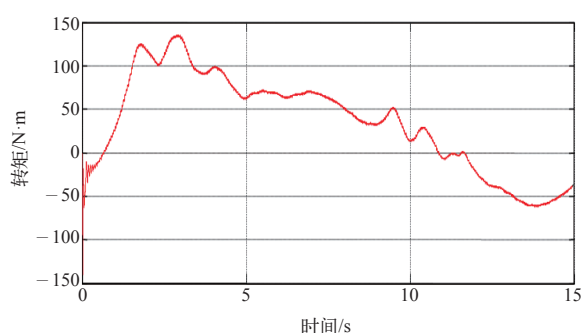


图11 陪试变频器输出转矩曲线

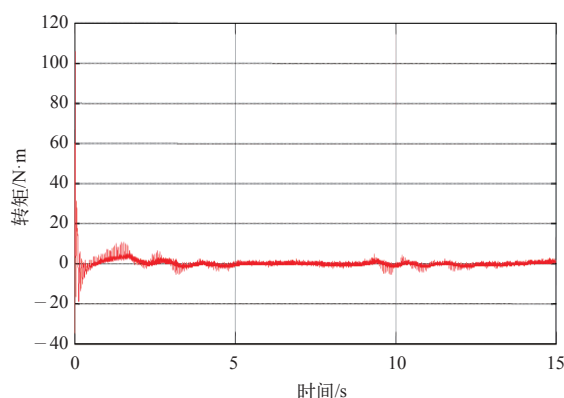


图12 实际与仿真转矩差曲线

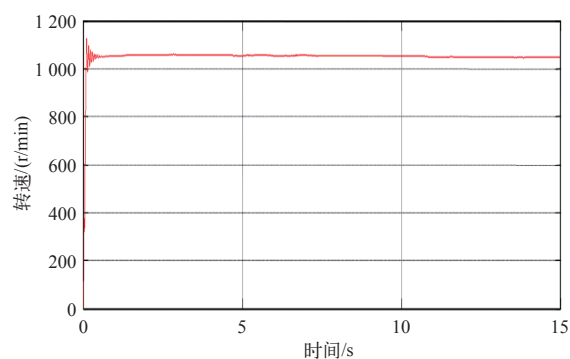


图13 抽油机电动机转速曲线

变频器采用转矩外环、电流内环控制方式，可以准确模拟负载状态。以抽油机为例分析了载荷模拟的准确性，陪试变频器系统可以较准确模拟待测变频器负载变化，再现油田抽油机变频器的实际工作状态，为变频器参数测试提供了较好的平台。

参考文献

- [1] 满永奎, 韩安荣. 通用变频器及其应用 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 李晓尚. 交流牵引异步电机试验系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [3] 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.
- [4] 郑琼林, 林飞. 现代轨道交通与交流传动互馈试验台 [J]. 电工技术学报, 2005, 20 (1): 21-25.
- [5] 黄宜山, 张文军, 李伟聪, 等. 纯电动乘用车驱动电机系统对拖试验台架 [J]. 汽车工程师, 2012 (12): 41-43.
- [6] 孙东. 抽油机变频器电参数测试技术 [J]. 油气田地面工程, 2011, 30 (1): 21-24.
- [7] 张卫华, 崔晓霖. 抽油机变频器损耗测试技术 [J]. 石油石化节能, 2013 (9): 21-23.
- [8] 彭鸿才. 电机原理及拖动 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 闫治安, 何志明, 顾冰. 变频感应电动机测试系统的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34 (9): 44-49.

(收稿日期: 2016-12-13) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告