

浅析管道压缩机同步电机变频器 启动控制方案的改进

赵选锋¹ 江 兵² 杨 亮²

1. ABB 电网投资(中国)有限公司, 北京 100015;

2. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:管道压缩机的电驱系统以电压源型变频器驱动无刷励磁同步电机,采用同步启动控制方式能够解决无位置传感器启动困难的问题,但可能产生启动时电机短时反转情况。通过分析变频器常用的无刷励磁同步电机启动控制方案,以 16 MW 压缩机组电驱系统调试过程为案例,引入无位置传感器同步电机低频脉冲注入控制方案,经过现场测试验证了改进方案的有效性,成功地解决了同步电机的启动反转问题,保证了压缩机组启动安全和稳定运行。低频脉冲注入控制方案首次成功应用于无刷励磁同步电机启动反转抑制,对今后变频器控制系统持续改进有示范和指导意义。

关键词:低频脉冲注入;极性探测启动;励磁启动;无位置传感器;同步启动;反转

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.05.015

Analysis on the improvement of the starting control scheme of the synchronous motor frequency converter of the pipeline compressor

ZHAO Xuanfeng¹, JIANG Bing², YANG Liang²

1. ABB Power Grids Investment (China) Limited, Beijing, 100015, China;

2. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: The power drive system of the pipeline compressor drives the brushless excitation synchronous motor with a voltage source converter. The synchronous starting control scheme can solve the problem of difficult starting without position sensor, but it may cause a short time inversion of motor rotation during starting. By analyzing the starting control scheme of brushless excitation synchronous motor commonly used in frequency converter, using commissioning process of a 16 MW electric motor driven system as an example, this paper introduces a Low-Frequency Pulse Signal Injection (LF PULSE) control scheme for sensorless brushless synchronous motor. The field test verifies the effectiveness of the improved control scheme in solving the issue of rotation inversion during starting and ensures the safe start-up and stable operation of the unit. The Low-frequency Pulse Signal Injection is successfully applied for the first time to suppress rotation inversion during starting of the brushless excitation synchronous motor, which has a significance in demonstrating and guiding the continuous improvement of the converter control scheme in

收稿日期:2021-07-12

基金项目:国家管网集团西南管道有限责任公司项目“中卫—贵阳联络线工程”(S2009-50D)

作者简介:赵选锋(1980-),男,河南郑州人,工程师,学士,主要从事大功率传动和大功率高压无功补偿系统设计测试工作。

E-mail:xuanfeng.zhao@hitachienergy.com

the future.

Keywords: Low-frequency pulse signal injection; Polarity detection start-up; Excitation starting; No position sensor; Synchronous starting; Rotation inversion

0 前言

离心压缩机是天然气增压输送和天然气液化系统的重要设备,大型电驱系统驱动压缩机的技术方案在输气管道中广泛运用,变频器与同步电机构成的电驱系统具有功率因数高、调速范围宽的优势,且国产化后大大降低了总体设备费用,实际运行中通过压缩机电驱系统调节,压缩机与输气管道/液化工厂的变工况运行/调峰需求完美契合,可以节约运行成本,提高项目整体效益。

目前,国内输气管道电驱压气站主要以 16 MW 以上功率等级的电驱系统为主,输气作业的多变工况要求控制压缩机运行的流量和压力。由于压缩机处于易燃易爆厂房环境,为避免励磁碳刷摩擦产生火花,通常采用正压通风型无刷励磁同步电机驱动,变频器采用无编码器(即位置传感器)方式控制电机,无需周期性调节编码器的安装精度,去除同步电机编码器的维护工作^[1-2]。压缩机启动时,同步电机转速为零,变频器需要注入电机定子和转子电流,通过算法获得转子准确位置,从该位置以同步方式启动电机。不同控制方案存在控制策略及算法上的差别,在计算转子位置过程中会施加转矩导致同步电机正转或反转一定角度,而某些压缩机密封系统(如单向干气密封)是禁止反转的,因此需要采用一种合理的控制方案解决反转问题。瑞士 ABB 有限公司研发的低频脉冲注入^[3]控制方案成功解决了这一问题。

1 管道压缩机驱动系统概述

常用的离心压缩机由压缩机、驱动系统、辅助系统、监控系统等构成。以某输气管道的压缩机组为例,整流变压器、功率单元、无刷励磁系统、同步电机、控制系统构成了 16 MW 电驱系统部分^[4],见图 1。压缩机部分包括主机和底座,以及联轴器、齿轮箱、干气密封系统、润滑油系统、机械保护系统。正常工况下,压缩机在 65% ~ 105% 额定转速范围内连续运行,同步电机额定转速 1 800 r/min,通过齿轮箱增速至压缩机额定转速 11 420 r/min。干气密封系统主要用于离心压缩机^[5]、螺杆压缩机、膨胀机等设备的轴封,是避免易燃气体沿压缩机级间或轴端泄漏而采取的有效措施^[6]。

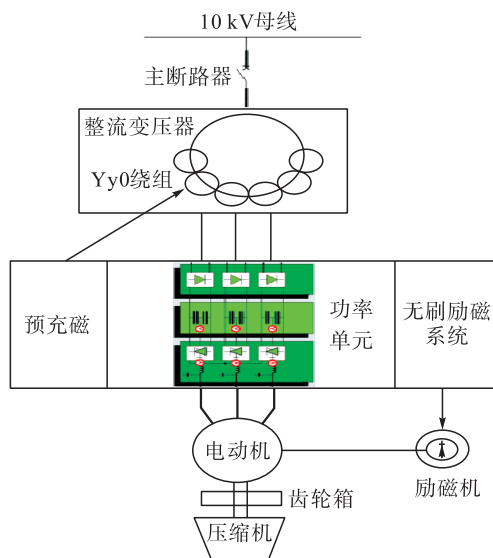


图 1 压缩机组电驱系统图

Fig. 1 Compressor set power drive system configuration

干气密封系统端面采用螺旋槽式设计,动环面上加工一系列的螺旋形流体动压槽并经过特殊抛光处理,运转时气体随环旋转由外径朝向中心,径向分量朝着密封堰流动,达到一定转速后产生足够的推力将动密封面和静密封面推开,流动的气体在密封面间形成气膜^[7],气膜阻塞天然气泄漏通道实现无接触轴封,见图 2。压缩机的启动/停止对干气密封系统的可靠性和寿命影响最大,尤其是对单向干气密封系统的压缩机,长期多次启动反转将会损坏干气密封系统^[8],本案例的电机转子反转 180°,压缩机转子将反转超过 1 080°,反向转动不利于气膜形成,并有可能损伤密封端面。因此,抑制同步电机反转是压缩机安全启动、保护干气密封系统的必要措施。

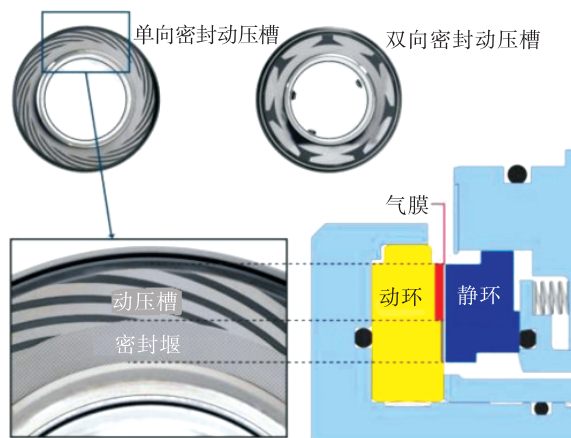


图 2 干气密封系统示意图

Fig. 2 Dry gas seal profile diagram

2 变频器启动控制方案

无刷励磁同步电机无位置传感器的控制方式对管道压缩机而言,在安装、维护、抗干扰能力方面具有明显优势^[9]。同步电机启动的关键是计算出转子具体的空间位置,并准确识别转子正负极性^[10]。通过不同的算法获得转子初始位置是变频器控制技术领域的热点之一。

2.1 强制启动

强制启动是一种经典且简单可靠的启动方案,适用于有刷励磁、无刷励磁和永磁同步电机。强制启动方案需事先设定电机转子定位时的最大限制电流和电流斜坡上升时间,启动同步电机时,变频器先执行无位置传感器定位算法,将转子电磁角度 0° 和机械角度 0° 对齐。此位置的电气特征是:电机定子 A 相绕组和 C 相绕组电流大小相等、方向相反,B 相绕组电流降为零。然后从此位置启动电机,定位时间取决于最大电流和斜坡时间的设定值,通常为 $18 \sim 40$ s,由于启动前转子在 360° 空间的位置是任意的,变频器控制算法选择电磁角度 0° 与机械角度 0° 对齐的最短路径,不考虑电机正反转。因此,理论上转子正反转各有 50% 的概率。

2.2 励磁启动

励磁启动控制方案的原理是在同步电机励磁机绕组注入快速上升的励磁电流并建立磁场,电机定子绕组处于此磁场中因而产生感应电流,根据楞次定律,电流变化率越快,电机定子绕组中感应电流越明显,当测量到电流值超过设定值时判定转子位置探测成功^[11]。基于测量到的定子电流矢量关系计算出转子的准确位置和极性,然后从探测到的转子位置直接启动电机,启动时间约 $5 \sim 15$ s。励磁电流变化率受到电感负载的制约,有刷励磁同步电机的直流电流可以快速注入转子绕组,因此响应速度一般能满足要求,而无刷励磁同步电机励磁机输出的交流电流,通过电感特性的旋转变压器整流回路,转换为直流励磁电流供给转子绕组,该电流变化率很小,很难在定子绕组感应出满足探测需要的电流值。因此,该方法适用于多数有刷励磁同步电机和极少部分无刷励磁同步电机。

2.3 极性探测启动

极性探测启动方案的控制原理是在电机的转子注入较大的励磁电流使电机磁通饱和,定子绕组注入 $1 \sim 1.5$ 倍额定电流,在转子特定的几个电磁角度位置(通常以 A 相绕组为基准)分别测量电流矢量,建立矢量模型计算出转子的大致位置^[2],该计算值存在误差需进行修正。因此,在该位置附近向电机转子绕组分别注入正、负向的电流矢量,检测两种情况下定子对应的饱和程度,饱和度深为正极性,饱和度浅为负极性,同时计算出

转子的准确位置,从该位置以同步转速启动电机即可^[12]。

极性探测启动要求同步电机的交轴、直轴超瞬变电抗百分比有明显差异,本案例压缩机组同步电机交轴、直轴的超瞬变电抗百分比分别为 16.9% 和 26.4%,现场进行 300 余次启动测试结论是:如果极性探测成功,探测过程时间约 $3 \sim 8$ s;极性探测失败时,就会出现定子过电流、励磁过电流、极性探测失败等故障报警,启动成功率 80% 左右。所以该方法通常用于启动可靠性要求不高的场合,在管道压缩机的电驱系统中应用较少。

2.4 低频脉冲注入

理论上低频脉冲注入方案适用于无刷励磁、有刷励磁同步电机,通过内部算法确定电机转子位置和极性后启动电机。其主要原理是通过变频器将低频电压脉冲(频率 $f \leq 10$ Hz,电压幅值 $U \leq 1\%$ 定子额定电压)从不同的空间方向注入电机定子绕组^[13-14](以定子 A 相绕组为 0° 基准,每 30° 一个电压注入和电流采样点)基于对应空间方向(以下称为 γ 角)测量电流,折算成标么值,解析后的基波分量称为定子电流指示,见图 3。图 3 中 γ 角定义为定子电流指示的函数,由不同的采样点绘成曲线^[15],以脉冲注入的角差($\Delta\gamma$)为横轴,纵轴为注入电流标么值(I_{puls}/I_N),周期为 180° ,最高点为转子位置。

计算转子位置时引入的重要参数转子阻抗是标量,无法判断转子的极性,存在 180° 偏差的可能,因此需要进行极性判断,才能得到转子的准确信息。注入定子的低频电压脉冲同时也会对励磁电流产生影响,测量转子对应位置的励磁电流,折算成标么值,解析后的基波分量为转子电流指示,见图 4。图 4 中 γ 角定义为转子电流指示的函数,由不同的采样点绘成曲线^[15],以脉冲注入的角差($\Delta\gamma$)为横轴,纵轴为励磁电流变量标么值($\Delta I_f/I_N$),周期为 360° ,最高点为转子正极性,最低点为转子负极性。由定子电流和转子电流指示函数曲线合并的实测曲线得到转子准确位置。

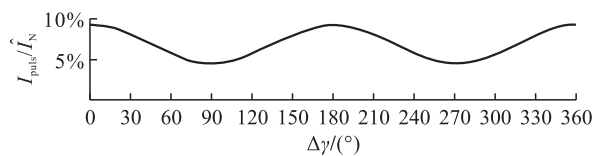


图 3 定子电流的 γ 函数曲线图

Fig. 3 γ function curve of stator current

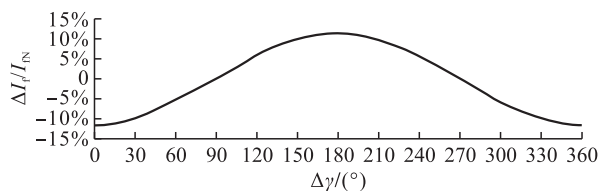


图 4 转子电流的 γ 函数曲线图

Fig. 4 γ function curve of rotor current

3 低频脉冲注入的现场测试

变频器启动同步电机时,低频脉冲注入的控制方案是通过启动算法确定转子电磁角度 0° 初始位置,然后在此位置直接同步启动^[16]。因此,确定转子初始位置是同步电机正常启动的前提,直接影响启动转矩和控制品质^[17-18]。

3.1 确定注入方案

确定注入电压脉冲参数(频率和幅值)的最佳组合,才能得到标准的定子电流和转子电流指示函数曲线,该过程称为识别运行。识别运行主要是通过注入不同频率和幅值组合的电压脉冲,记录对应的定子和转子函数曲线,接近正弦或余弦的曲线表明与电机特性匹配较好,见图 5;匹配性越差,曲线则无明显正弦余弦规律性,见图 6。执行识别运行时,电机不会连续转动,只会在静止位置小幅摇摆。

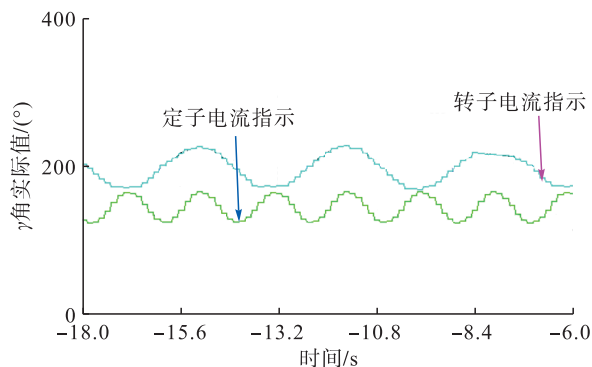


图 5 10 Hz / 0.6% 额定电压识别运行指示图

Fig. 5 10 Hz / 0.6% U_e ID run curve

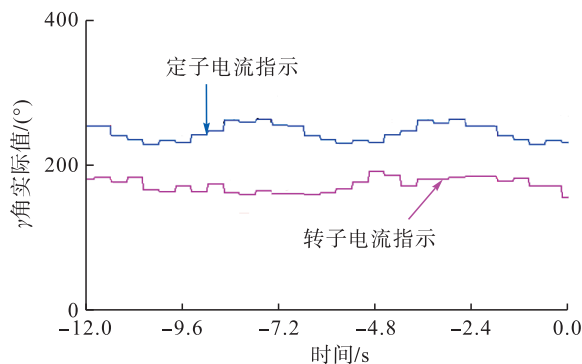


图 6 5 Hz / 0.2% 额定电压识别运行指示图

Fig. 6 5 Hz / 0.2% U_e ID run curve

对比图 5 和图 6 可以发现,准确识别转子位置和极性的必要条件是定子电流、转子电流指示函数曲线近似正弦或余弦曲线。通过识别运行确定注入电压脉冲参数(频率和幅值)的最佳组合,如本案例最佳组合为 10 Hz / 0.6% 额定电压,经过启动验证后固化参数,电机启动时变频器自动注入该频率和幅值的电压脉冲,无需重复执行识别运行。对于不同特性的电机,电压脉冲参数(频率和幅值)的最佳组合是有差别的,调试时必须通过识别运行确定最佳组合,再固化参数。

3.2 启动同步电机

电机启动过程中注入电压脉冲时参数变化见图 7,变频器通过控制励磁机向同步电机转子注入励磁电流,建立磁场,电压脉冲从 0° (定子 A 相绕组为 0° 基准,逆时针方向为正角度)、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° 等 6 个角度方向依次注入电机定子绕组,阶段 1~7 的 6 个角度称为 γ 角,覆盖了 1 个 180° 的循环周期,通过 6 个角度的定子电流实测值解析成定子电流指示,由此计算出转子位置,增加阶段 7 则是验证转子位置的准确性,见图 8。与

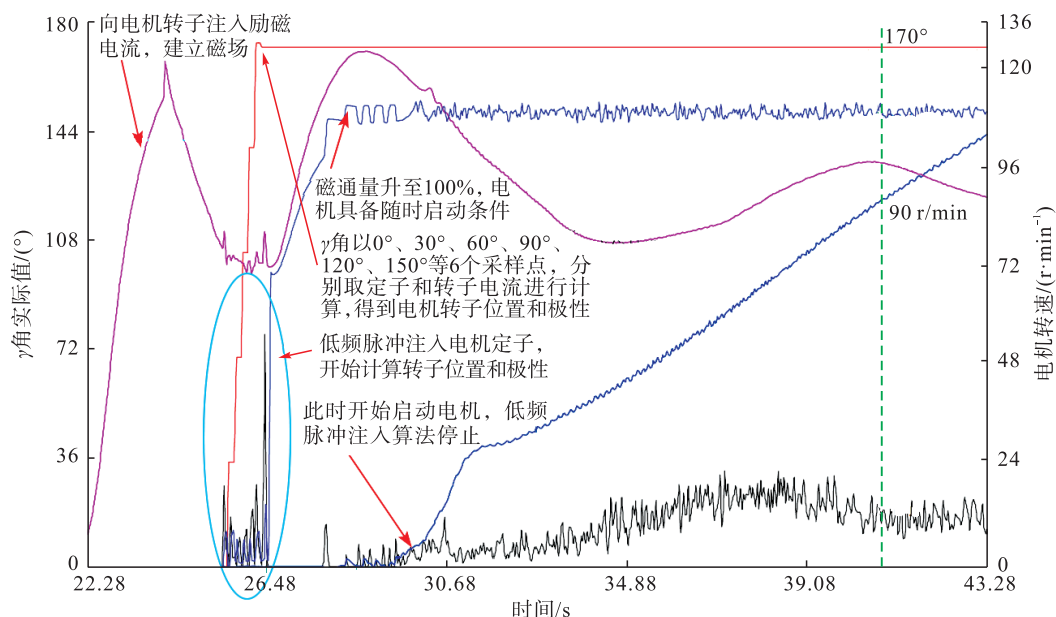
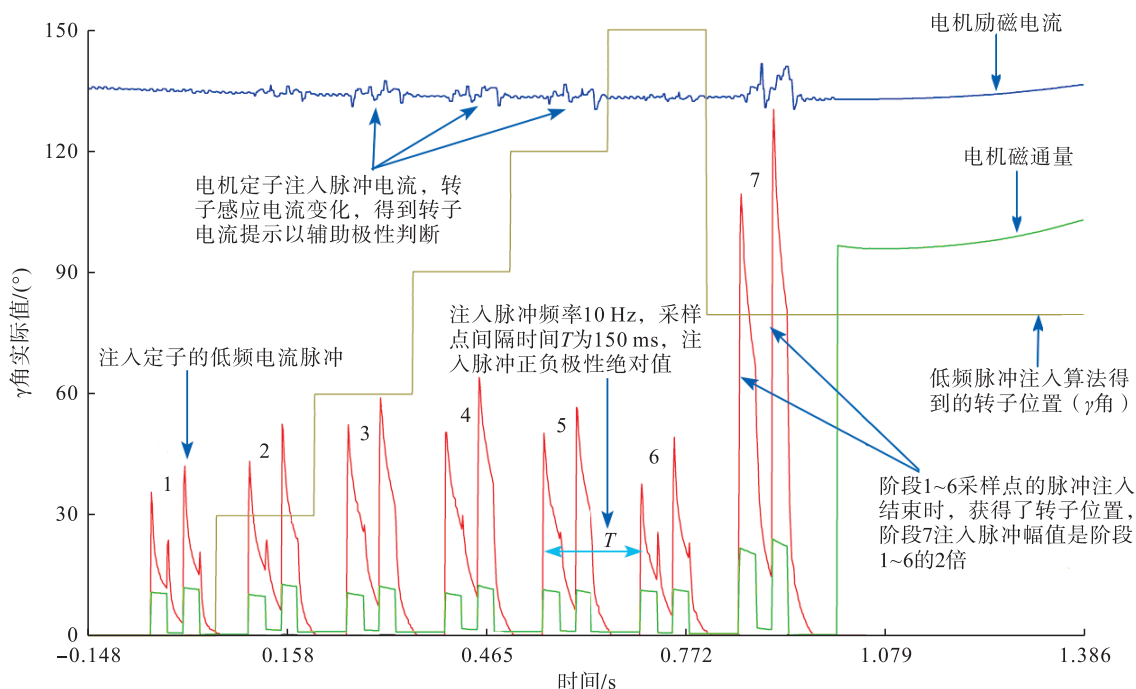


图 7 低频脉冲注入启动的参数变化时序图

Fig. 7 Parameters' changing sequence when started by LF PLUSE

图8 低频脉冲注入启动 γ 角变化时序图Fig. 8 γ angle changing sequence when started by LF PLUSE

此同时,注入的低频电压脉冲影响转子励磁电流,根据6个角度励磁电流的实测值,解析成转子电流指示,由此得出转子的正负极性。如果是正极性,则计算出的 γ 角就是转子位置角,否则需要在 γ 角基础上偏移 180° (正负极性相差 180°)。电机转子位置和极性确定后,电机磁通量升至100%,具备启动电机的条件,变频器以预先设定的加速时间控制同步电机加速至给定速度,启动完成。

3.3 抑制反转

变频器低频脉冲注入控制方案研发后缺少与电机联机测试数据进行验证,本案例压缩机组现场调试过程中,采用低频脉冲注入控制方案启动电机时,电机转子有明显的反转(最大反转角度达到 60°),必须回到初始位置开始升速,经过多次测试反转概率仍然有10%,现场记录的反转和无反转典型速度响应见图9~10。

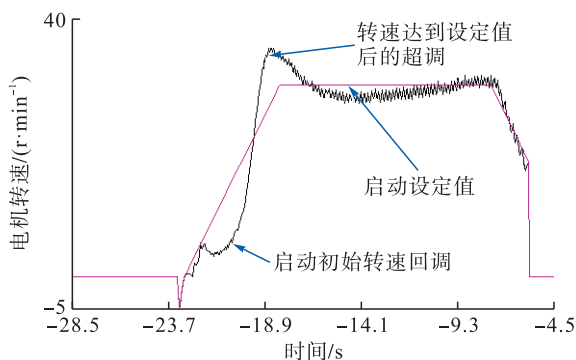


图9 电机启动反转时电机速度响应图

Fig. 9 Speed response of motor with rotation inversion during starting

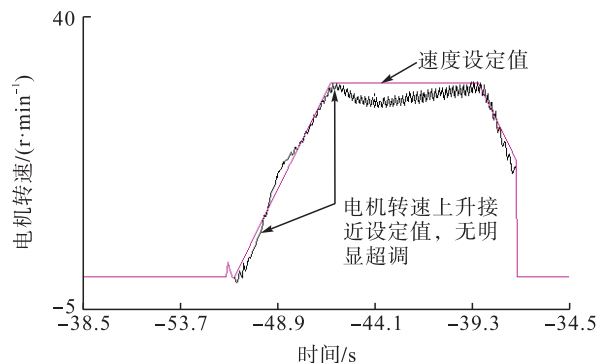


图10 电机启动无反转时速度响应图

Fig. 10 Speed response of motor without rotation inversion during starting

通过分析图9数据,发现反转原因是转子位置计算不够准确,励磁晶闸管工作时会产生谐波电流干扰,造成计算位置和实际位置的误差超过了变频器的允许值,待电机反转一定角度后,变频器的直接转矩控制算法利用实测定子电流和转子电流在初始转子位置估计坐标系中建立与位置角相关的误差函数^[19]识别出电机反转。为此改进了软件控制算法,设计了一种基于离散位置信号谐波分析的观测器^[20],用于分离电压脉冲注入过程中产生的谐波电流,并增加了图11的检测到转子位置后反复验证的阶段8、9、10,以阶段1~7的转子位置和极性为基本参数,在转子位置的负极增加一次逆向验证,电压脉冲注入幅值与阶段7相同,以确保阶段9获得的转子位置、极性与阶段7相同,在此转子位置上沿电机反转方向偏移 10° ,从而消除探测误差的影响。增加修

正后,以阶段 10 偏移 10° 后的电角度作为最终转子位置
启动电机。随后经过 400 余次启动验证试验,没有出现
反转,压缩机组进入试运行阶段。

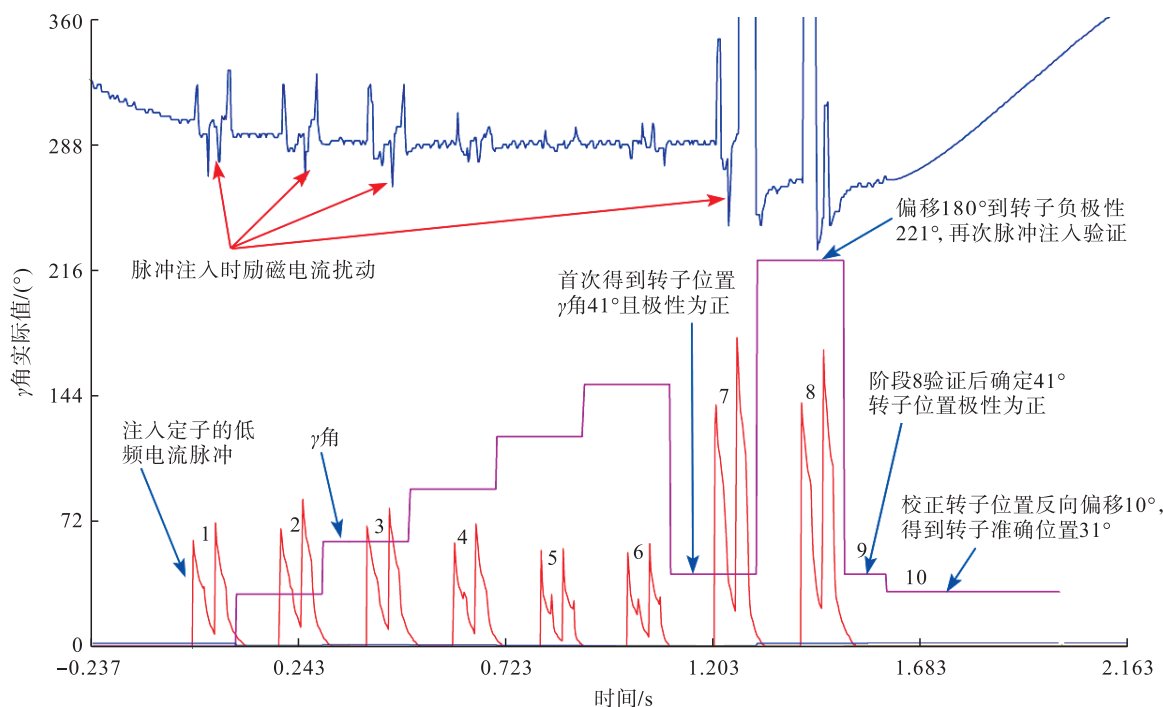


图 11 低频脉冲注入修正启动参数变化时序图

Fig. 11 Enhanced inject parameter's changing sequence when started by LF PLUSE

4 结论

低频脉冲注入是瑞士 ABB 有限公司 2016 年研发的变频器控制方案,适用于所有无刷励磁和有刷励磁同步电机的无位置传感器启动。在某输气管道工程压缩机组调试过程中修正控制策略,有效解决了转子定位时发生反转的问题,同时积累了大量现场测试数据,并推广运用到类似管道压缩机组,大大减少了调试时间,也验证了控制方案的可靠性及可用性,是一种理想的无刷励磁无位置传感器同步电机启动方案。低频脉冲注入在输气管道电驱压气站的成功运用,彻底解决了启动过程同步电机反转引起的压缩机干气密封性能损坏和使用寿命降低问题,是目前电驱系统的最佳控制方案。

参考文献:

- [1] 彭 勃,张定华,刘浩平. 无刷直流励磁同步电机启动控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(4): 3-7.
PENG Bo, ZHANG Dinghua, LIU Haoping. Research on the starting control strategy of brushless synchronous motor with DC excitation [J]. Electric Drive, 2021, 51 (4): 3-7.

- [2] STULZ C. TN181001 Commissioning brushless encoderless SD [Z]. Turgi; ABB Switzerland Ltd., 2018.
- [3] BUERGLER A. ACS 5000 medium voltage ac drives-torque control software (TC SW) for synchronous machine drive commissioning manual LLC16500 [Z]. Turgi; ABB Switzerland Ltd., 2017.
- [4] ECKERLE J. Commissioning documentation for Brushless excitation unit air-cooled EXU [Z]. Turgi; ABB Switzerland Ltd., 2009.
- [5] 辛 顺,孙 旭. 压缩机干气密封基本原理及系统配置分析[J]. 中国造船, 2008, 49(增刊 2): 475-481.
XIN Sun, SUN Xu. Basic principle and system analysis on dry gas seal of compressor [J]. Shipbuilding of China, 2008, 49 (Suppl 2): 475-481.
- [6] 刘培军,杨默然. 干气密封在离心压缩机中的应用[J]. 油气储运, 2007, 26(7): 51-54.
LIU Peijun, YANG Moran. The application of dry gas seal in centrifugal compressor [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26 (7): 51-54.
- [7] 张 蕾. 干气密封在离心压缩机中的应用影响因素分析[J]. 石油和化工设备, 2015(2): 68-70.
ZHANG Lei. Affecting analysis dry gas seal application in

- centrifugal compressor [J]. Petro & Chemical Equipment, 2015 (2): 68-70.
- [8] 崔秋丽. 浅谈离心压缩机干气密封失效的主要原因及维护措施[J]. 科技与企业, 2014(10): 300.
- CUI Qiuli. Introduction failure analysis and maintenance of dry gas seal of centrifugal compressor, science technology and enterprise [J]. Science-Technology Enterprise, 2014 (10): 300.
- [9] 魏佳丹, 史明明, 吴天国, 等. 无刷交流同步电机无位置传感器起动控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(9): 60-67.
- WEI Jiadan, SHI Mingming, WU Tianguo, et al. Sensorless control strategy of brushless synchronous machine in start mode [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18 (9): 60-67.
- [10] 彭丽巧, 洪 春. 无刷励磁同步电机变频驱动控制系统[J]. 变频器世界, 2014(12): 65-69.
- PENG Liqiao, HONG Chun. Brushless excitation synchronous motor frequency conversion driving control system [J]. The World of Inverters, 2014 (12): 65-69.
- [11] NIEMELÄ M. Position sensorless electrically excited synchronous motor drive for industrial use based on direct flux linkage and torque control [D]. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 1999.
- [12] HOLTZ J. Initial rotor polarity detection and sensorless control of PM synchronous machines. [C] //IEEE. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. New York: IEEE, 2006: 2040-2047.
- [13] LINKE M, KENNEL R, HOLTZ J. Sensorless speed and position control of synchronous machines using alternating carrier injection [C] //IEEE. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. New York: IEEE, 2003: 1211-1217.
- [14] FEUERSANGER S, PACAS M. Initial rotor position detection in electrically excited medium voltage synchronous machines [C] //IEEE. IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. New York: IEEE, 2012: 600-607.
- [15] STULZ C. Commissioning instruction for the LFSS Method [Z]. Turgi: ABB Switzerland Ltd., 2017.
- [16] 余龙海, 廖育武, 刘德刚, 等. 直流无刷励磁同步电动机变频软起动方法[J]. 大电机技术, 2019(1): 41-46.
- YU Longhai, LIAO Yuwu, LIU Degang, et al. Variable frequency conversions of start method for dc brushless synchronous motor [J]. Large Electrical Machine and Hydraulic Turbine, 2019 (1): 41-46.
- [17] 朱熹秋, 成秋良. 无起动绕组永磁同步电机初始定位及起动策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 61-65.
- ZHU Huangqiu, CHENG Qiuliang. Initial orientation and starting strategy on PMSM without starting windings [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (9): 61-65.
- [18] FEUERSANGER S, PACAS M. Initial rotor position identification in medium voltage synchronous machines [C] //IEEE. IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. New York: IEEE, 2012: DOI: 10.1109/iecon. 2012. 6388919.
- [19] 周扬忠, 胡育文, 黄文新. 直接转矩控制电励磁同步电机初始转子位置估计[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (12): 55-60.
- ZHOU Yangzhong, HU Yuwen, HUANG Wenxin. Initial Rotor position estimation for direct-torque-controlled electrically excited synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (12): 55-60.
- [20] LIU Bing, ZHOU Bo, NI Tianheng. Enhanced position observer with a selective harmonic error eliminator and an error feed-forward compensator for sensorless surface-mounted permanent magnet synchronous motor drives [C] //IEEE. 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia. New York: IEEE, 2017: 1210-1214.

欢迎订阅 2022 年《天然气与石油》

《天然气与石油》是中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司主办的石油化工类科技刊物,以“推广国内外油气田地面建设先进技术,探讨建设及运行中难点问题”为办刊宗旨,主要报道油气储运与处理,油气勘探与开发,腐蚀与防护,公用工程,信息、安全与管理,技术经济,工程勘察等方面的最新科技成果。

《天然气与石油》每期定价 30.00 元,全年共 180.00 元。邮发代号:62-641。详情咨询编辑部。地址:(610041)四川省成都市高新区升华路 6 号,电话/传真:(028)82978130。