

编码器对 ACS6000 双驱变频控制的作用和影响

何 流, 朱新玉

(中铁建铜冠投资有限公司, 安徽 铜陵 244000)

[摘 要] 本文阐述了 ACS6000 型双驱变频器中编码器的工作原理, 并结合米拉多铜矿磨机系统应用 ACS6000 型双驱变频器时发生的问题现象, 分析了编码器对电机直接转矩控制和变频器功率计算的作用和影响。

[关键词] 绝对值编码器; ACS6000; 直接转矩控制

[中图分类号] TN762 [文献标志码] B [文章编号] 1003-8884(2023)03-0084-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.016

0 前言

ACS6000 型变频器为 ABB 公司设计生产的新一代高性能大功率变频器, 主要分为控制同步电机(SD 系列)和控制异步电机(AD 系列)两大类, 电机控制采用 ABB 公司特有专利直接转矩控制(DTC)技术, 功率范围 3~36 MW, 普遍用于冶金、船舶、轧机、矿山等领域。国外中资矿山米拉多铜矿一期设计规模 2 000 万 t/a, 选矿厂采用“半自磨机+顽石破碎机+球磨机”的 SABC 碎磨工艺, 分两个系列平行生产, 每个系列半自磨机与球磨机一对一配置, 驱动系统引进 ACS6000SD 型双驱变频器和低速无刷励磁同步电机, 经过多轮调试和优化, 目前设备运行已经达到世界先进水平, 双系列处理量稳定在 7 万 t/天。

编码器是一种通过信号转换原理把输出轴上的机械位移量转换为脉冲信号或者数字量的传感器, 采用编码器能够改善变频器电机速度控制的静态和动态精度。米拉多铜矿 ACS6000 驱动系统采用德国 HUBNER 公司 ASPAH 60 型混合式绝对值编码器, 同时具备旋转角度输出和转速脉冲输出功能。ACS6000 双驱变频器接收来自编码器的旋转位置信号和速度信号, 然后由电机模型计算出实际转矩输

出给转矩和磁通比较器, 转矩和磁通比较器再根据直接转矩控制原理输出最优的逆变开关逻辑, 实现对电机转矩的精准控制。本文笔者根据编码器工作原理和直接转矩控制原理, 结合 ACS6000 型双驱变频器现场运行时发生的故障问题和实验分析, 对编码器在 ACS6000 型变频器双驱变频控制的作用原理和控制影响作出分析介绍。

1 ACS6000 双驱传动系统组成

米拉多铜矿半自磨机和球磨机均为环形齿轮双驱磨机, 传动系统采用变频器+双驱同步电机+力矩限制器驱动方案, 其中变频器采用 24 脉波整流的电压源交-直-交型 ACS6000 变频器。电气传动系统主要由 1 台主回路断路器(MCB)、2 台整流变压器、1 台 ACS6000SD 双驱变频器、2 台交流无刷励磁同步电机组成, 半自磨机驱动功率 $2 \times 6\,250$ kW, 球磨机驱动功率 $2 \times 7\,800$ kW。

ACS6000SD 双驱变频器现场配置基本相同, 均为 2 个 LSU(Line Supply Unit)线性供电单元、2 个 INU(Inverter Unit)逆变单元、2 个 COU(Control unit)控制单元、1 个 CIU(Customer-Interface Unit)用户接口单元、1 个 WCU(WaterCooling unit)水冷单元和 2 个 EXU(Excitation Unit)励磁单元, 不同在于功率更大的球磨机配 2 个 CBU(Capacitorbank unit)电容组单元, 而半自磨机配 1 个 CBU 电容组单元。ACS6000 双驱变频系统应用于磨机传动具有以下优点:(1)变频器能够以低频率范围(0~18 Hz)输出, 可以选配低级数电机满足传动要求;(2)功率元件采用内循环水冷设计, 冷却效率高并且便于维护;

[收稿日期] 2023-01-12

[第一作者] 何流(1994—), 男, 安徽潜山人, 电气工程师, 大学本科, 主要从事电气及自动化技术相关工作。

[引用格式] 何流, 朱新玉. 编码器对 ACS6000 双驱变频控制的作用和影响[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 84-88.

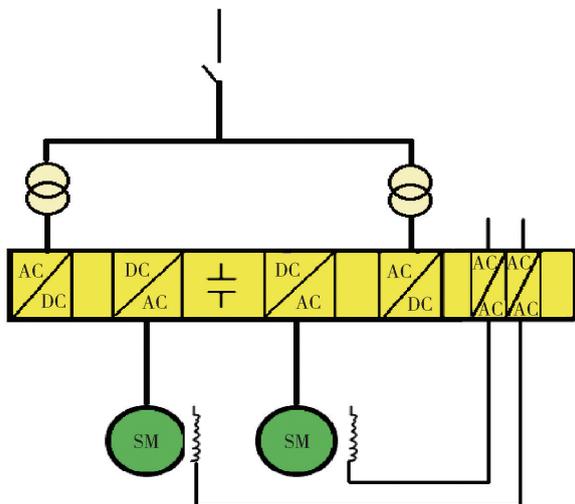


图1 传动系统结构图

(3) 动态响应快且启动转矩大, 能满足磨机重载启动要求; (4) 功率因数高且谐波失真低, 对高压电网影响小。

2 ACS6000 编码器类型及工作原理

旋转编码器按照工作原理划分, 主要分为光电式、磁式、感应式和电容式, 目前应用最多的为光电式编码器。按照测量输出类型划分, 光电式编码器主要分为增量型、绝对值型和混合式绝对值型。增量式编码器是将轴旋转位移转换成周期性的电信号, 再把这个电信号转变成计数脉冲, 用脉冲的个数表示位移的大小, 通过单位时间内脉冲个数就能计算出轴的转速; 绝对值编码器的旋转码盘上有依次按 2 线、4 线、8 线、16 线等来编排的光暗通道刻线, 通过读取每道刻线的通、暗, 获得一组从 2 的零次方到 2 的 $n-1$ 次方的唯一的 2 进制编码 (格雷码), 它的示值只与测量的起始和终止位置有关, 而与测量的中间过程无关, 当电源断开时, 如果绝对型编码器并不与实际的位置分离, 那么位置读数仍是当前的、有效的; 混合式绝对值编码器兼具增量式和绝对值型编码器两者功能特点, 能够输出两组信息, 一组信息用于检测轴位置, 带有绝对信息功能, 另一组则是与增量式编码器相同的脉冲转速信息。

米拉多铜矿 ACS6000 驱动电机采用低速无刷励磁同步电动机, 电机额定电压 3 050 V, 磁极数 12 级, 额定工作频率 0 ~ 18 Hz, 冷却方式采用风水冷, 具有体积小、维护方便等优点。电机编码器采用德国 HUBNER 空心轴 ASPAH 60 型编码器, 安装时与

电机非驱动端转子轴承固定法兰连接, 因为采用空心轴安装, 安装前需要用百分表测试法兰黑色外沿的同轴度, 外沿的同轴度不可超过 ± 0.05 mm。编码器端盖盖好锁紧后, 需要固定好扭矩支架, 支架中间的万向活结处两段支架的夹角应保持 $75^\circ \sim 105^\circ$ 之间。

ASPAH 60 型编码器为混合式绝对值编码器, 单圈绝对值分辨率 13 bit 共 8 192 脉冲, 有两路输出信号, 一路并行格雷码信号接入变频器 CIU 单元内 LD-GRB 模块, 为直接转矩控制提供轴位置反馈; 一路增量式 HTL 脉冲信号接入 CIU 单元内 NTAC 模块, 为电机控制提供转速反馈。ACS6000SD 型变频器规定, 应用格雷码绝对值编码器时, 首次安装或者更换编码器后需要执行零点标定功能, 通过零点标定能够计算出转子轴电气零点和机械零点偏移量, 标定完成后后将偏移量标定结果写入变频器参数组。

3 编码器问题引起的故障现象

3.1 正转启动转矩大

米拉多铜矿 1[#] 球磨机在投入运行前期发生过转矩大无法启动故障现象, 具体表现为磨机正转启动转矩大 (10% 转速启动后转矩值达到 95% 左右)、加速时转矩继续增加导致超过 100% 额定值跳车, 在后续试车实验中又发现磨机反转启动正常 (10% 转速启动后转矩值在 55% 左右), 且能够成功加减速。现场通过多次减少钢球量降低负载, 最后磨机正转启动转矩下降至 70% 左右, 试车时成功启动并加速至额定满转转速, 但正转加减速过程的电流转矩趋势变化仍然存在异常: 10% ~ 50% 转速范围内转矩随着转速增大而增大, 50% ~ 100% 转速范围内转矩随着转速增大而减小, 50% 转速时转矩达到峰值 95%, 而 100% 转速时转矩下降至 65%。这种正转加速过程中转矩先增大后减小的表现与球磨机负载特性不符, 现场另一台正常运行的 2[#] 球磨机的启动转矩变化为: 转矩随着转速增加稳步增大, 100% 转速时转矩达到最大值, 且正反转表现基本相同。

为解决该故障难题, 现场技术人员和 ABB 技术团队对 1[#] 球磨机传动系统进行了全方位排查, 经过大量实验和分析, 最终发现一台电机编码器零点偏移量不正确是导致转矩异常现象的根本原因。该台编码器零点偏移量参数值小于实际偏移量, 手动增

大偏移量参数,启动转矩明显减小,经过多次参数调整优化,1#球磨机正转启动转矩大幅下降至 55% 左右,且加减速时转矩趋势图与 2#球磨机基本一致。

3.2 变频器显示功率不正确

同时在 1#球磨机故障排查过程中,为核实正转

启动的大转矩、大功率是否真实存在,开展了功率比较实验:记录不同转速时上级变电站配电柜、中压开关柜(MCB)和变频器逆变单元(INU)的实时功率,比较三者是否一致。

变频器 INU				中压柜 MCB		上级变电站	
转速	转矩	功率/kW	电流/A	视在功率/kVA	电流/A	有功功率/kW	电流/A
10%	75.80%	600	1 175	884.2	40.17	860.82	38
20%	85.20%	1 325	1 317	1 758.78	72.64	1 692.68	72
40%	95.00%	2 950	1 435	3 872.55	166.48	3 738.42	144
60%	87.00%	4 015	1 332	6 533.81	266.6	6 239.26	259
80%	74.30%	4 650	1 140	9 271.25	381.55	9 066.32	380
100%	74.30%	5 815	1 155	12 564.83	517.14	12 287.49	509.4
-10%	-44.50%	355	698	865.48	42.1	860.82	37
-20%	-46.40%	735	728	1 737.05	74.38	1 692.68	71
40%	-50.80%	1 550	755	3 955.41	166.6	3 738.42	145

图 2 1#球磨机功率比较实验数据

因为变频器配置两台逆变单元 INU,比较功率时 INU 功率数值需要进行 2 倍换算。通过数据分析比较发现:(1)不同转速下中压柜 MCB 和上级变电站配电柜的电流、视在功率基本一致,说明 MCB 和变电站功率测量值为真实有效数据。(2)转速为正转 80%、正转 100% 和反转时中压柜 MCB、变电站配电柜与逆变单元 INU 功率数值成 2 倍关系,说明此时 INU 功率显示数值能真实反应实际电能消耗情况。(3)转速为正转 10%、20%、40% 和 60% 时,INU 功率的 2 倍要明显大于 MCB 和变电站功率数据,说明此时 INU 功率可能不真实,要大于实际电能消耗。

从能量守恒角度分析,可以发现 1#球磨机在正转低速运行时变频器显示功率与实际电能消耗不相符,结合前面介绍的转矩异常现象,可以推测正转低速运行时 ACS6000 进行了错误的转矩计算和功率计算,进而输出了大转矩和大电流。下面就编码器如何引起 ACS6000 双驱变频器输出转矩和功率异常作进一步分析。

4 ACS6000 编码器作用原理及分析

4.1 直接转矩控制原理

直接转矩控制的思想是以转矩为中心来进行磁

链、转矩的综合控制,一般采用离散的两点式调节器(Band—Band 控制),把转矩检测值与转矩给定值作比较,使转矩波动限制在一定的容差范围内,容差的大小由滞环调节器来控制,调节器直接对逆变器的开关状态进行控制,以获得高动态性能的转矩输出。直接转矩控制的控制效果不取决于电动机的数学模型是否能够简化,而是取决于转矩的实际状况,它不需要将交流电动机与直流电动机作比较、等效、转化,即不需要模仿直流电动机的控制,由于它省掉了矢量变换方式的坐标变换与计算和为解耦而简化异步电动机数学模型,没有通常的 PWM 脉宽调制信号发生器,所以它的控制结构简单、控制信号处理的物理概念明确、系统的转矩响应迅速且无超调,是一种具有高静、动态性能的交流调速控制方式。异步电动机直接转矩控制一般利用空间矢量、定子磁场定向的分析方法,直接在定子坐标系下分析电动机的数学模型,计算与控制电动机的磁链和转矩。同步电动机直接转矩控制一般用于高性能调速领域,因为转子磁链固定(永磁体)或者可控(电励磁),普遍采用转子磁场矢量定向控制,

米拉多铜矿 ACS6000 双驱变频器电机控制为无刷励磁同步电动机的高级直接转矩控制,采用速度环和转矩环双闭环控制,控制器利用滞环控制原

理,在微秒级范围内不断将给定值与反馈值进行比较运算并输出最优开关逻辑,达到转矩精准调节目的。转矩控制器为转矩和磁通比较器,主要由比较单元和数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor) 单元组成,核心组件 DSP 单元作用为:每 25 微秒通过直流母线电压、电机电流、上一次开关逻辑顺

序、励磁电流和来自编码器的速度和转子位置角度等信号输入,基于同步电机模型完成电机转矩和磁通计算。然后比较单元将 DSP 单元计算值与转矩给定值进行比较,每 50 微秒由最优的开关逻辑控制器直接决定最优的开关位置。

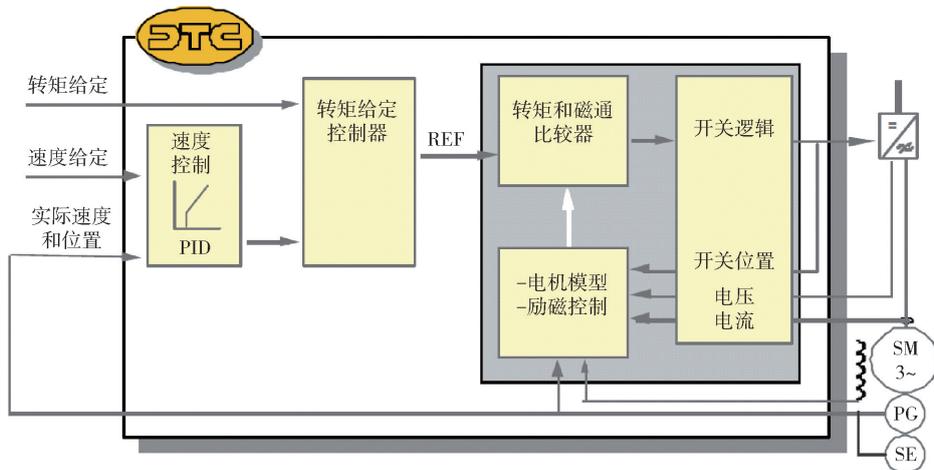


图 3 同步电机直接转矩控制原理图

4.2 编码器角色和作用

根据 ACS6000 同步电机直接转矩控制原理图,编码器在控制系统作用为提供实际转速和实际位置角度反馈。控制逻辑图中,速度控制器接受来自编码器的转速反馈量,然后将速度反馈量与给定值比较,输出转换后的偏差转矩值给转矩给定控制器;同时,转矩和磁通比较器接收来自编码器的转速反馈量和位置角度反馈量,通过电机模型完成转矩和磁通计算并与转矩给定控制器的给定值比较,按照直接转矩控制原理决定最优的逆变开关逻辑。

编码器速度和位置角度反馈直接影响直接转矩控制输出结果,速度反馈量由 NTAC 模块单位时间脉冲数量转换计算得出,位置信号则根据 LD-GRB 模块绝对值格雷码转换计算,角度是指电气角度,计算前需要定义电气零点,这也是 ACS6000 规定更换安装或者更换编码器后需要执行偏移量标定的原因,通过偏移量和机械零点能够计算出电气零点。

4.3 转矩和功率计算原理

因为采用同步电机直接转矩控制,ACS6000 同步电机模型中转矩 T 为电机定子磁通和定子电流的乘积,定子电流由变频器内置电流互感器可以直接测量,定子磁通在直接转矩控制中可分解为直轴方向 d 轴分量和交轴方向 q 轴分量,两个方向的分

量磁通又可以等效于电感分量与电流分量乘积与转子磁通分量的和。计算各参数分量时需要使用坐标转换,将静止坐标系 x, y, z 参数值转换为转子旋转坐标系 d, q 参数值,转子坐标系位置由编码器位置角度反馈量决定,如果位置角度不正确,定子磁通和转矩计算值就会偏离实际值。1[#]球磨机故障现象是因为编码器偏移量参数小于实际偏移量,偏移量决定着电气零点也就是 dq 坐标系的起始位置,偏移量偏小会使坐标变换超前,造成正转启动时计算生成的转矩值大于实际值。

根据电机拖动原理,电机功率 P 等于转速 n 乘以转矩 T ,转速 n 在 ACS6000 双驱变频器中由接入 NTAC 模块的编码器计数脉冲信号测量转换,而转矩 T 由 ACS6000 同步电机模型计算,如果电机模型转矩计算值不正确时,会直接导致功率计算错误,这也解释了为什么 1[#]球磨机正转启动转矩大时输出功率大于实际电能消耗。

同时,米拉多铜矿半自磨机和球磨机采用双驱传动,ACS6000 双驱变频器对两台电机采用主从同步控制,主机和从机的速度、转矩时刻保持一致,任何一台电机的测量误差都会引起整体输出转矩和计算功率的误差。因此,1[#]球磨正转启动转矩大和功率输出异常都是因为编码器位置角度反馈不正确引

起的。

5 结语

近年来,国内越来越多大型矿山半自磨机和球磨机开始引进 ACS6000 型双驱变频器作为驱动系统,磨机变频已经成为新型矿山选矿设备的发展趋势,笔者根据国外米拉多铜矿现场 ACS6000 型双驱变频器的应用经验,阐述了编码器在双驱变频控制系统的重要作用,并结合球磨机转矩和功率异常故障现象,分析了编码器偏移量不准确造成的重要影响。作为 ACS6000 型双驱变频系统的组成部分,编码器虽然不起眼,但是在电机控制中却有着举足轻重的作用,因此做好编码器正确安装调试和日常维

护是发挥好 ACS6000 型双驱变频器优势性能的前提,特别是零点偏移量的准确标定。

[参考文献]

- [1] 刘延斌,闫学良. ACS6000 变频传动系统在冷轧机中的应用[J]. 有色金属加工,2013,42(06):61-63.
- [2] 赵雄飞. 光电编码器的原理及应用[J]. 天津冶金,2016(04):44-46.
- [3] 杨建飞. 永磁同步电机直接转矩控制系统若干关键问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [4] 何流. 一种用于直接转矩控制的新型无刷励磁[J]. 有色设备,2021,35(02):90-92.
- [5] 刘永龙,郑小娜. 永磁调速技术在冷却塔风机上的应用[J]. 有色设备,2018(03):34-37.

The Role and Influence of Encoder on ACS6000 Dual-drive Frequency Conversion Control

HE Liu, ZHU Xin-yu

Abstract: This paper expounds the working principle of the encoder in the ACS6000 dual-drive inverter, and analyzes the problems that occur when the ACS6000 dual-drive inverter was applied in the Mirador copper mine, and analyzes the encoder's role and impact to direct torque control of the motor and power calculations of convert.

Key words: ACS6000; Direct torque control; Absolute encoder

