

变频器在电厂渣浆泵中应用

骆 皓¹,朱卫风²,钱诗宝¹,张延安¹

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 望亭发电厂, 江苏 苏州 215155)

摘要: 望亭电厂 14 号机组渣浆泵进行了国产 ASD380D-160 变频技术改造。该变频器在传统变频调压 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 控制策略的基础上优化了矢量控制, 在特定条件下通过特定消谐算法降低了变频输出电压谐波。分析了连续运行 13 个月所产生的节能效益, 以及改造后节水所产生的效益; 因为此次技术改造实现了对渣浆池水位的 PID 闭环控制, 除节电、节水外, 基本结束了观测水位的繁琐劳动方式, 同时也基本停止了对补水阀门的频繁操作; 因为实现了恒水位控制, 避免了空泵运行, 有效延长了水泵的使用寿命且降低了其日常机械维护费用。

关键词: 变频技术; 节能; 闭环控制; 渣浆泵

中图分类号: TM 621; TN 773

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)09-0116-04

苏州望亭电厂原渣浆泵运行方式为定速方式, 渣浆池水位采用探头监视, 流量、流速完全依靠截流阀门和补水阀门的操作。其缺点是: 电机定速运行耗能大; 监视不及时易出现空泵运行或渣浆水溢出; 阀门磨损严重。变频器以其优越的调速特性和简单化的操作方式已基本取代了传统的变极调速、串阻调速、串级调速、滑差电机调速等交流电机调速方式。现就苏州望亭电厂所应用国产变频器基本控制原理、变频器输出消谐技术应用、变频器功能等几方面进行了理论分析, 对应用前后工况进行了比较, 并且对节能效果进行了实际测量值的分析。

1 变频器基本工作原理

目前, 国内外通用变频器生产厂商的变频主回路拓扑基本相通, 均采用两电平的交-直-交方案, 首先把工频交流电通过整流器变换为直流电, 然后利用逆变器变换为所需频率的交流电。但由于控制策略的不同, 各厂商所生产的变频器性能、保护功能、可靠性各方面大相径庭。

传统变频器采用正弦脉宽调制 (SPWM) 控制方式, 其特点是控制电路简单、成本低、机械特性硬度较好, 能够满足一般传动的平滑调速要求; 缺点是动态转矩能力和静态调速性能较差, 整流后直流母线电压利用率低, 直接导致电机转矩利用率不高^[1-4]。

新一代变频器多采用电压空间矢量法 (磁通轨迹法, SVPWM 控制方式), 此控制方式直接以电机气隙的理想圆形旋转磁场轨迹为控制对象, 在此基础上, 通过对频率进行补偿, 达到对电机的转速进行高性能控制; 对输出电压进行补偿, 消除电机定子压降

的影响, 达到对电机的转矩进行高性能的控制; 将输出电压和电流进行反馈, 大幅度提高动态精度和稳定度; 基于对开关管死区和最小脉宽的研究, 对 SVPWM 算法进行优化, 并且引入特定消谐 SHE (Selected Harmonic Eliminated) 算法, 使得通用变频器的技术含量得以大幅提升, 性能走上一个新的台阶, 也大幅度降低了变频器的输出谐波, 降低电机损耗、提高电机效率、降低电磁噪声、减小转矩脉动。

2 变频器 SHE 算法应用研究

当前通用变频器脉冲输出基本算法均采用空间电压矢量算法^{①[5-6]}, 其特点是直流电压利用率高, 每次只动作一只半导体器件, 损耗低, 数字化实现简单。但无论是 SPWM 还是 SVPWM 都没有根本解决变频器输出谐波大的问题, 直接导致电机发热严重, 影响电机使用寿命。

变频器 SHE 算法的基本原理是计算每个开关器件的开关角度, 以实现所需要的输出电压, 达到消除低次谐波的目的 (高次谐波的消除容易通过硬件实现)^[7-8]。

SHE 算法理论出现时间较早, 但是由于其在线计算量非常庞大, 实际应用阻力较大。随着计算机技术的快速发展以及存储器件读写速度的大幅提高, SHE 技术可以较为方便地工作于离线状态。

图 1 所示为 A 相电压输出波形。

将其进行傅里叶级数展开, 可得:

$$U_A = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (1)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U_A \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

① Texas Instrument. TMS320 LF/LC240XA DSP controllers reference guide, system and peripherals.

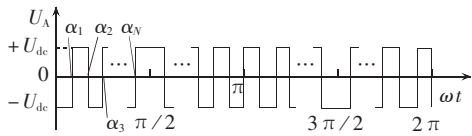


图 1 SHE 控制算法变频器 A 相电压输出波形
Fig.1 Waveform of phase A output voltage of inverter with SHE control algorithm

$$b_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}U_A\cos(n\omega t)d(\omega t)\tag{3}$$

根据图 1 可得:
当 n 为奇数时

$$a_n=\frac{4}{n\pi}U_{dc}\left[-1-2\sum_{k=1}^N(-1)^k\cos(n\alpha_k)\right],b_n=0\tag{4}$$

当 n 为偶数时
 $a_n=0, b_n=0\tag{5}$

由于输出电压不存在偶次谐波,且由于三相对称负载线电压不存在 3 次倍数谐波,故选择消除谐波次数应当为 5、7、11 次类推。由上述知输出电压基波幅值为 a_1 ,输出电压 5 次谐波幅值为 a_5 ,直至 T 次谐波幅值为 a_T (T 为奇数)。定义输出电压基波幅值与直流电压比为调制比,以 m 表示,则有

$$\frac{a_1}{U_{dc}}=m,\frac{a_n}{U_{dc}}=0\ (n=5,7,11,\cdots,T)\tag{6}$$

根据式(6)可得出非线性方程组:

$$\left\{\begin{aligned}&\frac{4}{\pi}[-1+2\cos\alpha_1-2\cos\alpha_2+2\cos\alpha_3-\cdots-2(-1)^N\cos\alpha_N]=m\\&\frac{4}{h_1\pi}[-1+2\cos(5\alpha_1)-2\cos(5\alpha_2)+2\cos(5\alpha_3)-\cdots-2(-1)^N\cos(5\alpha_N)]=0\\&\frac{4}{h_2\pi}[-1+2\cos(7\alpha_1)-2\cos(7\alpha_2)+2\cos(7\alpha_3)-\cdots-2(-1)^N\cos(7\alpha_N)]=0\\&\vdots\\&\frac{4}{h_{N-1}\pi}[-1+2\cos(h_{N-1}\alpha_1)-2\cos(h_{N-1}\alpha_2)+2\cos(h_{N-1}\alpha_3)-\cdots-2(-1)^N\cos(h_{N-1}\alpha_N)]=0\end{aligned}\right.\tag{7}$$

其中, $h_1,h_2,\cdots,h_{N-1}$ 为 N 个方程中需要抑制的 $N-1$ 个谐波次数。在解以上方程组时, $h_1,h_2,\cdots,h_{N-1}$ 必须在 5、7、11、 $\cdots$ 、 T 中选取,且必须满足 $0<\alpha_1<\alpha_2<\cdots<\alpha_N<\pi/2$ 。

通过牛顿迭代法数值计算,得出 $\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_N$,并存储于 E²PROM 中,以供 CPU 控制中查表。

在实际应用中,选取 5、7、11、13、17、19 次谐波为消除对象,求得 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\cdots,\alpha_7$,变频器输出波形如图 2 所示,抑制后各次谐波幅值与 SVPWM 输出结果比较见表 1。

3 变频器节能原理

当异步电机拖动风机、水泵在工频运行时,电动机工作在满负荷状态,风机和水泵的风量、风压、

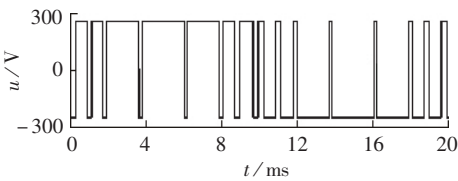


图 2 输出频率为 50 Hz 时特定消除 5~19 次谐波 SHE 仿真波形
Fig.2 Simulative waveforms of SHE with output frequency of 50 Hz and harmonics from 5th to 19th eliminated

表 1 输出频率为 50 Hz 时 5~19 次谐波抑制效果

算法	a_5	a_7	a_{11}	a_{13}	a_{17}	a_{19}
SVPWM	2.5	0.525	1.5	1.25	1.3	1.2
SHE	0.725	0.125	0.8	1.0	0.5	1.1

注: a_i 为 i 次谐波时电压幅值, $i=5,7,11,13,17,19$;逆变直流电压为 514 V;SVPWM 算法开关频率为 2 kHz。

水量、水压处于不受控状态,而实际得到的风量、风压、水量、水压等参数往往超过实际所需要的参数,在此工况下,用户往往通过阀门进行调节,损耗很大,直接导致电能的损耗。

苏州望亭电厂渣浆泵原生产工艺采用电机全速运行方式,根据锅炉出灰量的大小,渣浆池水位和管道灰水流速完全依赖截流阀门的调节和补水阀门的调节,所以,电机始终处于满负荷工作状态。

若应用变频器,则可以对电机进行零损耗(实际损耗约为 2%)的调速。令水泵流量为 Q ,扬程为 H ,转矩为 T ,轴功率为 P ,转速为 n 。下文以水泵的平方转矩关系为例进行详细的量化分析。

假设同一台水泵在 n_1 和 n_2 不同转速运行时, $Q_1/Q_2=n_1/n_2,H_1/H_2=(n_1/n_2)^2,T_1/T_2=(n_1/n_2)^2,P_1/P_2=(n_1/n_2)^3$,流量与转速成正比关系,扬程和转矩与转速的平方成正比关系,轴功率与转速的立方成正比关系。

由异步电机原理可知,电机的转速与输入电源频率有如下关系: $n=60f(1-s)/p$,其中, n 为转速, f 为输入电频率, s 为转差率, p 为极对数。以 4 极电机为例,将同步转速代替异步转速进行理论计算:若调整流量为额定输出流量的 80%,调整输出频率为 40 Hz,则电机转速将从 1 500 r/min 降低至 1 200 r/min,则功率将降低,且 $P_d/P_N=(40/50)^3=51.2\%$,其中, P_d 为变频器拖动时电机消耗功率, P_N 为电机定速运行消耗的功率。采用阀门调节时电机消耗功率公式为 $P_v/P_N=0.4+0.6Q/Q_N$,仍旧调整输出流量为额定流量的 80%工况时, $P_v/P_N=88\%$, P_v 代表阀门调节流量时电机消耗功率,则节电可达到 36.8%。

4 苏州望亭电厂变频器改造方案

苏州望亭电厂 14 号机组渣浆泵变频改造方案如图 3 所示。

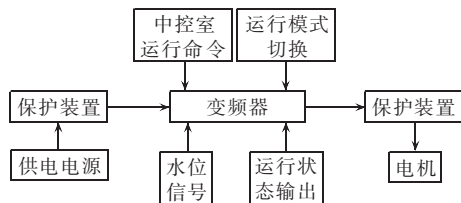


图 3 14 号机组渣浆泵变频系统原理图

Fig.3 Ash-water pump inverter system of unit 14

该改造系统由下述几部分构成:

a. 变频器本体;

b. 水位传感器单元,由水位传感器检测渣浆池水位,水位信号通过 4~20 mA 电流信号传递至变频器 PID 控制信号输入口;

c. 系统保护电气装置,主要指变频器的输入、输出空气开关,用于非正常状况下对进线电源的保护和对电机的保护;

d. 各类开关器件,实现远程命令的输入和操作模式的切换。

国产 ASD380D 系列通用变频器具有功能强大、数目众多的数字量和模拟量输入、输出接口^[9]。各端口功能主要包括各类开关量命令输入端口、各类开关量状态输出端口、各类模拟量命令输入端口、各类模拟量状态输出端口及可直接接入用户 DCS 系统的 RS-485 通信端口。以上所述所有端口可以保证变频器在各类工况下由用户自行灵活配置控制方案。

在实际应用中,变频器可以运行在手动开环状态、自动开环状态、手动闭环状态、自动闭环状态等适应各种操作方式的运行状态。

变频器除可进行手控盘操作外,可通过 4~20 mA 自动控制信号或 0~10 V 的自动控制信号对变频器的转速进行本地和远程的手动调节,也可以设定控制对象的收敛参数,通过 4~20 mA 反馈信号(诸如风压、风量、水压、水量等)实现转速的 PID 自动调整。

该项目改造中所用水位传感器为 UDM-21 系列浮球式液位变送器,其优点是适合多悬浮物、污浊、悬浮颗粒多的水体使用,不同于投入式液位变送器在污水中易发生颗粒物堵塞取样点。其水位测量范围最大可达到 4 m,误差度小于 2.5%,完全满足望亭电厂渣浆泵改造需要。

图 4 所示为国产 ASD380D-160 变频器在实验室中拖动额定转矩启动时对应输出电压波形;图

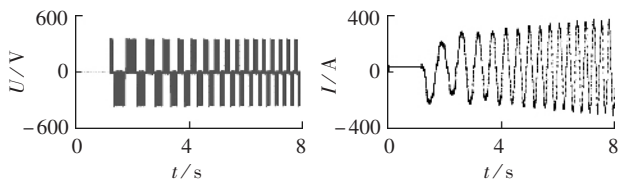


图 4 拖动额定负载启动变频器输出电压

Fig.4 Inverter output voltage during motor startup with rated load

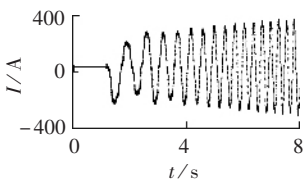


图 5 拖动额定负载启动变频器输出电流

Fig.5 Inverter output current during motor startup with rated load

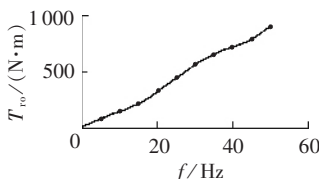


图 6 设定平方转矩曲线时拖动转矩能力

Fig.6 Torque driving capability with square torque curve

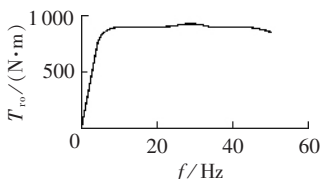


图 7 设定恒压频比时拖动转矩能力

Fig.7 Torque driving capability with constant U/f curve

5 所示为实验室中拖动额定转矩启动能力及对应输出电流波形;图 6 所示为该变频器在频率调节范围内设置平方转矩曲线时,拖动平方转矩负载实际测得转矩输出能力曲线, f 为输出频率, T_n 为输出额定转矩;图 7 所示为该变频器在频率调节范围内设定线性 U/f 曲线时拖动额定负载能力曲线。

实验室数据证实:该变频器对风机、水泵类平方转矩负载和恒转矩负载都具有可靠、稳定、精确的拖动能力。

由于变频器所采用 SVPWM 算法和 SHE 相结合,在高速运行时输出电压、电流、功率、转矩较大时,采用 SHE 查表算法,输出电流谐波含量被显著抑制,避免了变频器拖动普通电机导致的电机发热严重、转矩脉动大、电磁啸叫严重、易导致绝缘受损、电机寿命缩短的问题。

由于 ASD380D-160 变频器具有过电压保护、欠电压保护、过电流保护、过热保护、电机过载保护、缺相保护等多项保护功能,保障了现场应用的稳定性和可靠性。

5 变频技术改造经济效益分析

苏州望亭电厂此次变频拖动工况如图 8 所示,渣浆泵 B 为变频拖动电机,渣浆泵 A 为工频备用电机。水位恒定设为 1 m 处,变频投运且 PID 收敛后,变频器平均运行频率约为 44.5 Hz。

经过变频改造后,该厂灰渣池水位的有人值守操作工艺得到改善,既保证了灰渣池意外溢出的故障发生,也防止了水泵抽空的现象发生;中控室运行人员劳动强度大大降低;补水设施利用率基本降低为零,若干补水用电机能耗基本降低为零。

14 号机组渣浆泵 B 电机功率因数为 0.85,变频器出线平均电压 $U_o = 330$ V,出线平均电流 $I_o = 185$ A,实验值计算:实验功耗 $P_o = 1.732 \times U_o \times I_o \times 0.85 = 89.9$ (kW);使用变频器前,电机侧平均电压 $U'_o = 400$ V,平均电流 $I'_o = 210$ A,原功耗值计算 $P_o = 123.6$ kW;每小时节电 33.7 kW·h,节能率为 28%,若以发电厂 0.3 元/(kW·h)计算,每小时节省电费 10.11 元,连续运行 13 个月节省电费 9.5 万元。由于补水阀门关闭,无需操作,平均每小时将直接节约清水 3.6 t。

由于变频的高度自动化控制、高精度定位以及

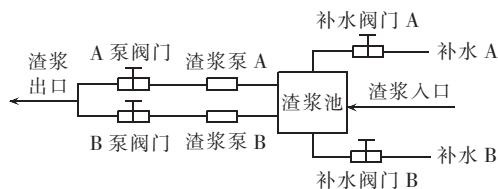


图8 系统运行示意图
Fig.8 Schematic diagram of
system operation

与DCS和PLC的高度兼容性,发电厂的运行人员劳动强度也得到大幅度缓解,风机、水泵等各类传动设备实现无人值守;变频的软起特性降低前端变压器的冲击电流、降低各类风门和液体阀门的所受冲击诸多因素使得各类设备的运行寿命大幅度延长。以灰浆泵改造为例,灰池水位的闭环控制将补水操作减小为零,补水管、补水水泵、补水阀门的设备投资、运行成本得以节省,灰浆系统的故障率得以大幅度降低。

6 结语

目前,进口变频器在国内市场占有份额较大,且价格和售后服务成本高。苏州望亭电厂所应用国产变频器除具备调速范围内优异的动、静态性能外,操作界面为大屏幕全中文操作,集成化的参数设置,人机界面友好程度优于进口变频器,值得推广。国产ASD380D-160变频器自苏州望亭电厂改造正式投运至今,运行稳定,未出现任何故障,变频器本体未发生保护动作。技术改造后,电能的消耗、清水的消耗量都显著降低,自动化程度的提高也使得人员劳动强度得到缓解。

参考文献:

- [1] 李磊,胡育文. 基于DSP的新型无速度传感器直接转矩控制系统的研究[J]. 电机与控制学报,2001,5(1):27-31.

- LI Lei,HU Yu-wen. DSP-based new speed sensorless direct torque control system of induction machine[J]. Electric Machines and Control,2001,5(1):27-31.
- [2] 李凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [3] 夏超英. 交直流传动系统的自适应控制[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [5] 刘和平,王维俊,江渝,等. TMS320LF240X DSP C语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [6] 金雍,羊彦,毕强. 利用单片机实现空间矢量调制算法[J]. 电机与控制学报,2001,5(1):47-51.
- JIN Yong,YANG Yan,BI Qiang. A space vector modulation algorithm using single chip computer[J]. Electric Machines and Control,2001,5(1):47-51.
- [7] 刘文华,宋强,陈远华,等. NPC逆变器SHE-PWM开关角度的计算方法研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):31-34.
- LIU Wen-hua,SONG Qiang,CHEN Yuan-hua,et al. A method of solution to selective harmonic eliminated PWM angles for NPC inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(11):31-34.
- [8] 郭涛,孙玉坤,任明炜,等. 链式多电平变换器特定谐波消除脉宽调制方法研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):52-54.
- GUO Tao,SUN Yu-kun,REN Ming-wei,et al. Research on SHEPWM technique based on cascade multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):52-54.
- [9] 宋万杰,罗丰,吴顺君. CPLD技术及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

骆皓(1978-),男,回族,山东禹城人,硕士研究生,研究方向为电力电子及电气传动(E-mail:luohao@sac-china.com);

朱卫凤(1958-),男,江苏无锡人,工程师,研究方向为电气自动化;

钱诗宝(1976-),男,江苏姜堰人,硕士研究生,研究方向为开关电源及逆变器;

张延安(1952-),男,江苏南京人,高级经济师,研究方向为企业管理。

Application of inverter in ash-water pump of power plant

LUO Hao¹,ZHU Wei-feng²,QIAN Shi-bao¹,ZHANG Yan-an¹

(1.Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 210003,China;

2.Wangting Power Plant,Suzhou 215155,China)

Abstract: The ash-water pump of Wangting Power Plant unit 14 is reconstructed using homemade ASD380D-160 inverter,which is optimized with vector control on the basis of conventional VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) control strategy to reduce the output harmonics by SHE (Selected Harmonic Eliminated) specific algorithm under certain conditions. The energy-saving and water-saving of 13 months' continuous operation are analyzed. Furthermore,the implementation of PID closed-loop control for the water level of ash-water pool nearly avoids the manual observation and the frequent operation of water supply valve,and the implementation of constant water level control avoids the pump operation without load,which extends pump service life and reduces its maintenance cost.

Key words: VF technique; energy save; closed-loop control; ash-water pump