

# 高压变频器在水泵驱动系统中的应用

刘 纲

(南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038)

**[摘要]** 介绍了变频调速的节能原理, 并分析南水北调中线惠南庄泵站水泵电动机驱动系统的组成、技术特点、各模块主要功能及运行特点。

**关键词** 高压变频器 变频调速 节能 水泵电动机

## 0 引言

在各类调速方式中, 变频调速作为一种转差功率不变的高效调速方式, 相对于调压调速、转子回路串电阻调速、串级调速、变极调速等方式, 具有调速范围宽、效率高、功率因数高、转速变换率小、平滑性能好等优点。从当前的技术手段看, 通过变频器实现风机、水泵类负载调速运行, 节能效果明显。另外, 变频装置特性可以保证起动和加速时具有足够的转矩, 使电机实现“软”起动, 以消除起动时对电机的冲击, 从而提高电机和机械的使用寿命, 保证电网稳定。因此, 高压变频器的应用前景十分广阔。

## 1 水泵变频调速节能原理

水泵的运行工况点是由扬程  $H$ 、流量  $Q$  与管网特性曲线  $R$  决定的。如图 1 所示, 水泵的正常运行工况点是在水泵额定转速特性曲线  $n_1$  与管路全开时管网特性曲线  $R_1$  的交点  $A$ 。在实际生产过程中, 为适应生产的需要或外界环境的变化, 水泵的工况点要随之变化, 称为泵的运行调节。改变工况点有两种方法: 一是改变管网特性曲线; 二是改变泵本身特性曲线。

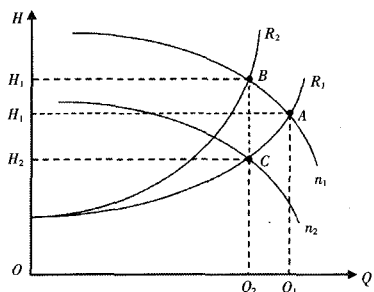


图 1 扬程  $H$  与流量  $Q$  的关系曲线

变速调节是在保持出口阀门开度不变的情况下, 通过改变水泵的转速来改变水泵特性曲线, 从而改变运行工况点, 以达到调节流量的目的。当转速改变时, 水泵特性曲线从  $n_1$  变为  $n_2$ , 由于此时管路阻力不变, 因此工况点沿管网特性曲线  $R_1$  从  $A$  点移动到  $C$

点, 此时流量减小为  $Q_2$ 、扬程减小为  $H_2$ , 所需轴功率 (kW) 为:

$$P_2 = \frac{rQ_2 H_2}{1000\eta}$$

从流体力学的原理得知, 使用感应电机驱动的水泵, 当电机转速由  $n_1$  变化到  $n_2$  时,  $Q$ 、 $H$ 、 $P$  与转速  $n$  的关系如下:

$$Q_2 = Q_1 \times (n_2/n_1)$$

$$H_2 = H_1 \times (n_2/n_1)^2$$

$$P_2 = P_1 \times (n_2/n_1)^3$$

可见轴功率  $P$  与转速  $n$  的立方成正比关系。在最低扬程满足用户需求情况下, 流量相对额定流量越小, 变速调节所需的轴功率越小。因此, 在低于额定流量时, 相同的流量, 变速调节相对节流调节所需要的轴功率小, 所消耗的供水功率少。因此, 采用变速调节时, 水泵工作效率基本上处于最佳状态, 节能效果显著。

## 2 水泵电动机驱动系统构成

惠南庄泵站共安装 8 台额定流量为  $10\text{m}^3/\text{s}$  的卧式单级双吸离心泵, 水泵与电机采用直联传动方式, 每台泵配套 7 300kW 异步电机, 额定转速为 375 r/min, 正常情况下机组 6 工 2 备, 出水总流量变化范围为  $20\sim 60\text{m}^3/\text{s}$ 。由于在供水运行时, 上游来水和下游需水情况变化较频繁, 需要经常性地改变机组投入数量和调节机组转速, 因此从提高工作效率、节能环保等方面考虑, 选用 ABB 公司生产的 ACS6000AD 高压变频器。整个水泵驱动系统由高压开关柜、输入变压器、ACS6000 变频器、高压电机等构成, 主回路如图 2 所示。

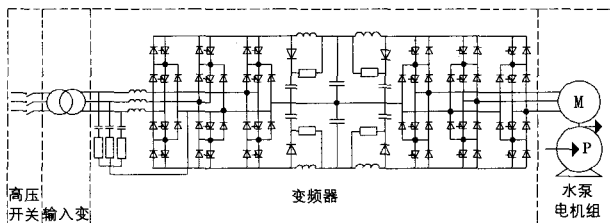


图 2 水泵驱动系统主回路

收稿日期: 2010-07-29

作者简介: 刘纲 (1977-), 工程师, 从事泵站运行管理工作。

## 2.1 高压开关柜

机组馈线高压开关柜为移开式金属铠装型, 配套施耐德真空断路器 Evolis-12, 额定电流为 1 250A, 配有微机综合保护(GE 公司的 F650), 以有效保护输入变和变频器。按照变频器设备运行安全要求, 该断路器分闸及熄弧时间合计小于 60ms; 同时, 断路器操作机构除常规的跳闸线圈外, 还配备了欠压分闸线圈, 确保故障情况下可靠分闸。

## 2.2 输入变压器

输入变容量为 8 620kVA, Dy11 接线, 联接于电源与变频器之间, 使电网电压(10kV)与变频器输入电压(3 160V)相互匹配, 为变频器提供所需电能。

## 2.3 ACS6000 变频器

ACS6000 系列变频器以 ABB 公司自行研制的 IGCT 作为开关元件, 采用 DTC(直接转矩控制)电机控制方式。电机配套选用的变频器型号为 ACS 6111\_F06\_1a11\_C26\_W2a, 该系统主要由输入滤波单元(IFU)、有源整流单元(ARU)、电容组单元(CBU)、逆变单元(INU)、控制单元(COU)、水冷单元(WCU)和终端连接单元(TEU)等组成, 其中 TEU 和 COU 安装在一个柜体内, 前后布置。

### 2.3.1 IGCT 性能特点

IGCT 由 ABB 公司最先开发并投入市场, 是在 GTO 基础上发展起来的新型复合器件, 它吸收了 GTO 和 IGBT 的技术优点, 具有优良的特性: 门极驱动采用特殊的环形封装, 使得门极电感非常小, 因此无需吸收电路, 有利于器件串联应用; IGCT 内部集成了驱动电路, 对门极驱动的要求比 IGBT 和 GTO 都低, 用户只需提供 20~40V 的直流电源供电即可, 驱动电路与系统控制器采用一条光纤连接, 用于传输控制信号和器件故障反馈信息, 抗干扰能力强; 开关损耗低、通态电流大、响应快速; 不使用焊接或键合导线, 而是采用了独立的弹簧压力封装技术, 降低了器件对压力不均匀性的敏感度, 提高了器件在高压大容量应用领域的可靠性; 工作范围可达几百赫兹至几十千赫兹, 接近 IGBT 的开关速度。

### 2.3.2 ARU 和 INU 的功能及其特点

ARU 作用是将交流电转换成直流电后提供给逆变电路, 通过对 ARU 的控制, 可调节直流电压和功率因数。ARU 为三相全控整流电路, 与 INU 配合可实现能量的双向流动, 实现电机四象限运行。INU 的作用是将直流电转换成负载所需的交流电, 通过对 INU 的控制, 可调节电机转矩及磁通。ARU 和 INU 都具有一个交流端和一个直流端, 直流侧都连接到直流回路的电容上, 因此系统是对称的。在电动运行模式时, ARU 单元的运行如同一个制动模式的 INU 单元; 在制动模式, ARU 单元的运行如同一个电动模式的 INU 单元。

图 3 是 INU 的主回路电气原理图(ARU 电气原理图与之相反), 主要包括 12 个 IGCT(S11~S14、S21~S24、S31~S34)、12 个续流二极管(D11~D14、D21~D24、D31~D34)、6 个钳位二极管(D15、D16、D25、D26、D35、D36)和 3 个平衡电阻(R1~R3)。该电路是典型的二极管中性点钳位三电平逆变电路。

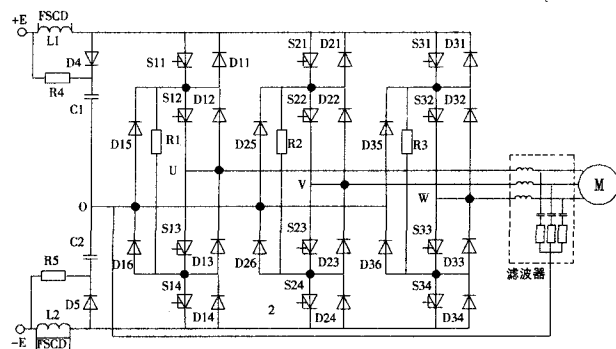


图 3 INU 主回路电气原理图

L1 和 L2 为  $di/dt$  钳位线圈, 保护上、下半桥的功率开关器件, 防止在短路等情况下产生过大的电流突变。快速短路监测装置(FSCD)并联在 L1 和 L2 上, 当监测到由短路引起的过大电流或 IGCT 故障且触发后没有正常电流流过时, 迅速发出跳闸信号切除电源, 使变频器紧急退出运行。

R4、D4、C1 和 R5、D5、C2 组成 RC 钳位电路, 防止某个 IGCT 关断时产生的电压突变, 并释放钳位线圈 L1、L2 的能量。

中性点钳位二极管确保每相上下半桥 IGCT 分担的直流电压均衡, 并保证当另一桥臂上 IGCT 都关断时元器件的安全, 是电路实现三电平输出的不可缺少的重要组成部分。

平衡电阻用于保证当 IGCT 都关断时的电压分布, 防止出现直流正负母线电压不平衡的情况。

在交流侧都接有三相滤波器, 限制  $du/dt$  的大小, 防止其对电机或输入变造成伤害。

ARU 和 INU 的硬件组成及结构基本上相同, 唯一不同的是 ARU 比 INU 多 2 块 ASE(Anti Saturation Equipment)抗饱和装置, 其作用是当能量向电网反馈时, 监测输出到电网侧的直流分量, 防止输入变因饱和而过热。

### 2.3.3 CBU 的功能及特点

CBU 连接在 ARU 和 INU 之间, 起到直流稳压作用。CBU 主要包括 2 组电容器、充电单元、接地刀闸和放电单元, 其电路如图 4 所示。

电容组是 CBU 单元的主要组成部分, 直流电压被两组水冷电容器(每组 6 个电容器)等分, 上端和下端电容器组构成三电平逆变器要求的直流母线的三电位结构。

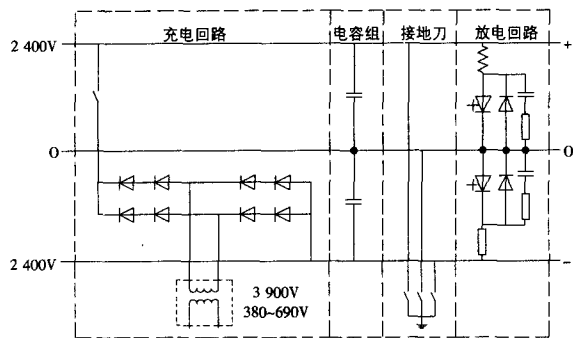


图4 CBU主回路电气原理图

接地刀是为运行安全设计，只有当接地刀合闸后才允许运行人员打开CBU柜门；同时为防止带电合接地刀，柜内设置了电磁闭锁装置，只有当直流母线电压低于50V时才可以进行接地刀闸的操作。

充电回路是在整流器主电源投运前对直流母线进行预充电而设置，主要是考虑到直接用整流器对电容器充电时冲击电流较大，因此在变频器启动前，用低压辅助充电变压器通过充电回路对电容器组进行充电。当直流母线电压达到约4300V时，充电变压器断开，待电压降到4200V时，MCB合闸，由ARU进行充电，直至达到4840V工作电压。辅助充电回路采用二极管构成整流桥，由于电压较高，因此每个桥臂由2个二极管串联组成。

放电回路只有在变频器电源切除后才能动作，放电电阻放电或关闭IGCT由INU控制。

### 2.3.4 WCU 水冷单元

由于变频器功率大、发热量大，因此其功率元件都采用水冷方式冷却。变频器冷却系统分内、外两部分，相互隔离，通过热交换器进行热量交换。为防止温度升高等情况导致内部循环水电导率升高，威胁元器件安全，在冷却水回路中安装有水电导率监测装置和离子过滤器。另外，低压和控制电缆等都需要通过WCU柜引入，以确保与TEU高压电缆有效隔离，防止干扰。

### 2.3.5 COU 控制单元

COU是ACS6000的核心，除对变频器本体进行控制外，COU还要对电机、输入变和高压主开关及WCU系统的运行状况进行监控，所有控制按钮都安装在COU的盘柜面板上。TEU同COU共用1个盘柜，两个单元前后布置，TEU位于COU后，所有高压一次电缆进出线都安装在TEU柜内。

### 2.3.6 DTC 直接转矩控制

在DTC控制系统中，定子磁通和转矩作为主要控制变量，在先进的电机模型软件中通过高速数字信号处理器对电机状态以每秒40000次的速度进行计算。由于电机定子磁通和转矩值不断更新，所得实际值与设定参考值不断进行比较，因此可实现对逆变器中每

一个开关元件状态的确定，确保其始终保持最佳的开关组合，当负载突变或电源干扰所引起的动态变化时可迅速作出反应，保证电机定子磁通和转矩均处于设定的范围内，使系统稳定运行且快速控制电机的转速和旋转磁场。

图5为直接转矩控制系统的逻辑框图，该系统将检测到的电机电压和电流的瞬时值经电机模型运算后得到电机的电磁转矩和定子磁通，再与同系统设定值进行比较后送入控制系统，通过计算得到逆变器IGCT的最佳触发时间与最优开关位置，然后发出触发脉冲，控制逆变器各开关元件的运行。

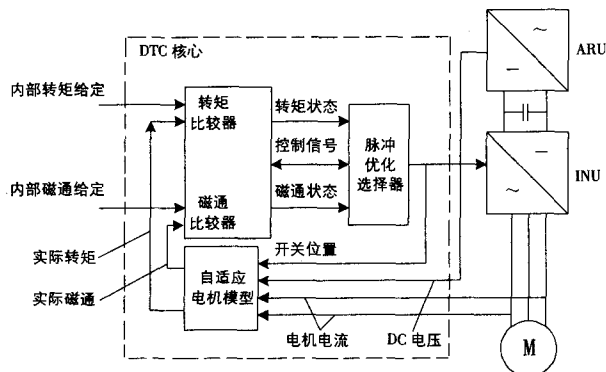


图5 直接转矩控制系统逻辑框图

## 2.4 运行特点

(1)速度和转矩控制精确，电机软启动冲击小，运行平稳。由于DTC提供了精确转矩控制，配合使用脉冲编码器，静态速度控制偏差达到 $\pm 0.01\%$ ，动态速度控制偏差为 $0.2\% \sim 0.5\%$ 。变频器在电机零速时能提供1.2倍额定转矩的启动转矩，启动过程即快又稳，且启动电流较小，无冲击，真正实现了软启动。在整个调速范围内，变频器运行平稳，温升正常，运行噪音低于75dB。

(2)谐波抑制效果好，达到了标准要求。变频器整流侧采用三电平全控PWM有源整流电路，电源侧输入电流波形接近正弦，测得电源侧高次谐波含量低于2%，即使母线上3台电机同时运行，电压和电流谐波也满足GB/T 14549的要求。

(3)完善的保护功能和故障自诊断功能。ACS6000具有非常完善的保护功能，如电源过压、欠压、缺相，变频器过压、欠压、过流、短路、接地，IGCT故障，电机超温、堵转，通讯监测等，并且自诊断功能完善。当系统出现异常或故障时，可给出简短准确的故障信息，维护人员根据故障信息对照手册即可了解具体的故障内容和处理方法。

(4)DriveWindow SW软件工具强大。DriveWindow SW软件可实现变频器参数的设定、备份，数据监视，故障或事件记录等功能，完成变频器配置和故障诊断工作，同时还可作为远方控制平台使用。通过光



纤连接至装有 DriveWindow SW 工具的电脑后,即可实现对变频器的远程控制操作。故障记录器可记录 64 组最新的故障或报警事件记录,数据记录器记录任意选定的 6 个 I/O 点或通道的实时采样数据,并用图形化的界面显示出来。记录器触发方式可任意选择为外部触发、故障信号触发、越限触发、手动触发、报警信号触发,适合现场调试和故障查找的需要。

(5)网侧功率因数高。在整个调速范围内,变频器电源侧的功率因数保持为 1.0,无需无功补偿装置就达到供电企业对用户的功率因数不得低于 0.9 的要求,节省了力率调整电费;同时由于无功电流减少,电机涡流损失、铜损、线损都相应减小。

(6)适应电网电压波动能力强,电压工作范围宽。电网电压在  $-10\% \sim 10\%$  之间波动时,系统均可正常运行。DTC 控制的快速转矩阶跃响应特性在负载和电网变化时能快速作出响应,使其适应电网电压波动和负载突变。

(7)操作简单,运行方便。设备模块化集成度高,指示功能完备,闭锁功能完善,运行操作简便,还可通过计算机远程操控,便于实现无人值班、少人值守。

### 3 结束语

不同厂家、不同控制原理的高压变频驱动系统的主电路结构、性能指标等差异较大。在设备选型时,

必须根据所驱动设备的运行工况、变频器效率、调速范围、过载能力、转矩脉动、外形尺寸、对电网电压波动的适应性、谐波含量能否控制在国家标准范围内、价格及售后服务等多项指标进行综合比较。本文对中性点二极管钳位三电平逆变电路和 ACS6000 系列高压变频装置的原理和技术特点进行了基本介绍,为相关人员提供选型参考。

### 参考文献

- [1] Bin Wu. 大功率变频器及交流传动[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- [2] 张皓,续明进,杨梅. 高压大功率交流变频调速技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006
- [3] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- [4] 张承慧,崔纳新,李珂. 交流电机变频调速及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- [5] 陈国呈. 新型电力电子变换技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004
- [6] 赵莉,葛琼璇. 基于三电平逆变器的异步电动机直接转矩控制[J]. 电气应用,2005,24(10):111~114
- [7] 袁登科,陶生桂. 一种感应电机直接转矩控制系统性能改善方案[J]. 中国电机工程学报,2005,24(8):151~155

(编辑 张美惠)

## 自动化实践技术丛书 (全书共 8 册)

### 《西门子 PLC 控制技术实践》

潘峰,刘红兵 编著

定价 28.00 元

ISBN 978-7-5083-8310-1

#### 内容提要

本书以西门子 S7-300 PLC 为主要介绍对象,全书分为五章:第一章为 PLC 概述,介绍 PLC 的起源、现状及发展;第二章为 PLC 的结构和工作原理;第三章为 PLC 编程,主要介绍了 STEP 7 编程技术、PLC 组态技术及 PLC 的指令;第四章为 PLC 的通信和网络组态,主要介绍了 MPI、PROFIBUS、工业以太网的实用通信和组网技术;第五章为 PLC 应用实例,以实际项目的开发为主导,介绍了利用 S7-300 PLC 完成的几个典型应用。

本书以 PLC 的应用技术为重点,淡化原理,注重实用,以项目、实例为线索进行内容的编排。本书可作为各类 PLC 培训的教材或参考书,也可作为高等院校、高职高专自动化、机电一体化等相关专业的教材,同时可供广大工程技术人员工作参考。

### 《DSP 控制技术实践》

智泽英,杨晋岭,刘辉 编著

定价 29.80 元

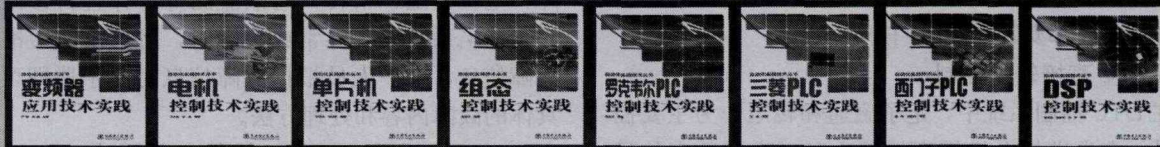
ISBN 978-7-5083-8180-0

#### 内容提要

本书是《自动化实践技术丛书》之一。

本书主要以 TI 公司的 TMS320F28x 系列 DSP 为对象,以 TMS320F28x 的应用技术为重点。全书共十章。第一章~第五章主要介绍 TMS320F28x 系列 DSP 的原理,包括 DSP 的起源、现状及发展,并系统介绍了 TMS320F28x 系列 DSP 的总体结构、CPU 及存储器映像、外设模块、寻址方式、指令系统及开发环境等。第六章~第十章主要介绍了 TMS320F28x 系列 DSP 的应用,主要包括其在电能质量监测、无刷直流电机、永磁同步电机中的应用,并对 TMS320F28x 系列 DSP 进行系统开发过程中出现的问题及解决方法进行了总结。

本书以 DSP 的应用技术为重点,淡化原理,注重实用。本书适合作为各种层次教学、培训的教材或参考书,也是初中级工程技术人员自学 TMS320F28x 系列 DSP 的理想选择。



以上图书由中国电力出版社用电技术出版中心出版。如需以上图书的内容简介和详细目录,或者更多的专业图书信息,请登录 [www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)。如要出版新著,请与编辑联系。

地址:北京市西城区三里河路 6 号二里沟(100044)

电话:010-58383411