

中压大功率变频器在多台大水泵机组并联运行时的机理研究 Mechanism Research of Medium-voltage High Power Inverter in Multi Big Water Pumps Unit Parallel Running

北京市政工程设计研究总院 陈运珍

Chen Yunzhen

摘 要: 城市源水输送、城市给水排水处理工程、南水北调工程、大型工矿企业上下水处理、城市给水深度处理及中水处理、高层楼群二次供水系统,都是用电用水的大户,其能耗、药耗、水耗严重。我们必须认真研究各工艺流程的特征,特别是要研究多台大功率水泵机组并联变频调速运转的机理及其节电降耗的原理,科学地选用不同类型的变频器,使传统的老企业大户,做到有效的节能降耗。

关键词: 水工业系统 大水泵机组并联运转 降耗节能 绿色环保型变频器 网络监控

Abstract: They are all big electricity and water consumers of urban water delivery, urban water supply and drainage project, South-to-North water diversion project, water processing of big-size plant, urban water supply deep processing and high building's 2nd water supply system which have high cost of energy, remedy and water. We have to carefully investigate the characteristics of different technical flows, especially the mechanism of medium-voltage high power inverter in multi big water pumps unit parallel running as well as its reduction of energy cost. Through suitable selection of different kinds of inverters, traditional old companies could fulfill obvious reduction of energy cost.

Key words: Water industry system Big pump unit parallel running Reduce cost & save energy Green inverter Monitoring online

[中图分类号] TM921

文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2007)04-0068-06

1 引言

随着“十一五”规划的实施,缺水缺水将更加严重。多年来,许多城市限水限电。国家每年出巨资进行大规模的给水排水建设。据统计及预测:全国城市每年缺水 $2000 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,污水排放量从1981年迅速增到 $6 \times 10^8 \text{m}^3/\text{d}$,工业废水猛增到 $200 \times 10^8 \text{m}^3/\text{d}$,我国每年新建扩建上水处理厂近 $600 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,污水处理厂的处理能力为 $700 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 左右。当前情况是:一方面国家拨巨资进行建设,另一方面由于老一套的经济运转模式,存在严重的污染和浪费。综观当前国内水工业市场,绝大多数是老企业,设备陈旧,工艺及供电设备老化,自动化水平低下,水耗药耗材耗严重,先进控制技术极少

采用。就是近几年来新建扩建改建的水处理工程,花了不少投资组建的FCS、DCS、PLC监控系统也不是名符其实的,不能进行网络化监控,造成许多资源白白浪费。更有许多处理厂站,存在先天性的不足,工艺设计不合理,工艺流程布局混乱,变电站远离负荷中心,使得电力电缆和控制电缆大多太长。特别是水泵机组的配置不够科学,使得给排水系统的电耗居高不下。每吨水的单位电耗远远超过欧美、日本等国家。水工业的降耗节能到了刻不容缓的地步。水工业市场遇到了巨大的挑战,也给我们提供了巨大的空间和舞台。水工业各大系统节能降耗要做的文章太多了。下面就大功率水泵机组并联变频调速运转的机理及其节电效果进行分析和研究。

2 单台水泵工作原理

2.1 基本公式

水泵电机转速 n 与供水量 Q 、水泵扬程 H 、水泵轴功率 N 、综合效率 η 的关系如下:

$$H = H_h + H_f = H_h + CQ^2 \quad (1)$$

$$Q/Q' / Q'' = n/n' / n'' \quad (2)$$

$$H/H' / H'' = n^2/n'^2 / n''^2 \quad (3)$$

$$N/N' / N'' = n^3/n'^3 / n''^3 \quad (4)$$

$$n = 60f(1-S) / P \quad (5)$$

$$\eta = QH / N \quad (6)$$

其中: n —转子实际转速;

S —电机转差率;

f —定子频率

P —电机极对数;

Q 、 Q' 、 Q'' —综合流量;

H 、 H' 、 H'' —水泵扬程;

N 、 N' 、 N'' —电机功率;

η —综合效率。

2.2 水泵工作曲线

水泵电机 $H-Q$ 曲线与管网阻力曲线的相交点就是某台水泵机组的工作点,如图1所示。

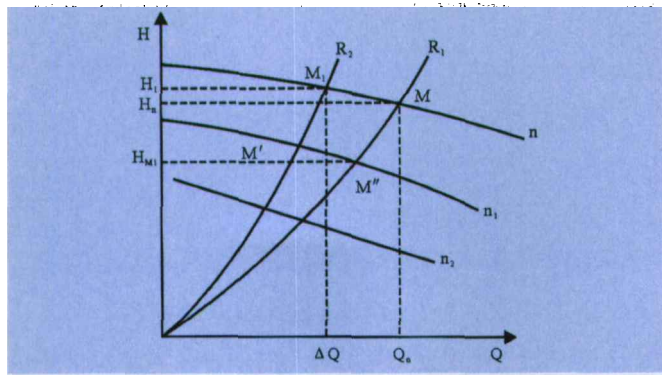


图1 水泵工作曲线

水泵的特性曲线有 $Q-H$, $Q-N$, $Q-\eta$, $Q-G$ 是管道特性曲线 (即曲线 R)。它们分别表示流量与扬程、流量与轴功率,流量与效率,流量与管道摩阻特性之间的关系。从公式 (2)、(3)、(4)、(5) 可知,改变转速和调节阀门都可达到调节水量的目的。改变 R 值, R 值越大,阀门开度就越小, R 曲线就越陡,管道阻力就越大,管网压降就越大,电能损耗就越大。

3 多台水泵并联工作原理

3.1 不同调速方式比较

工程建完了,其管道就定了,如图2所示。

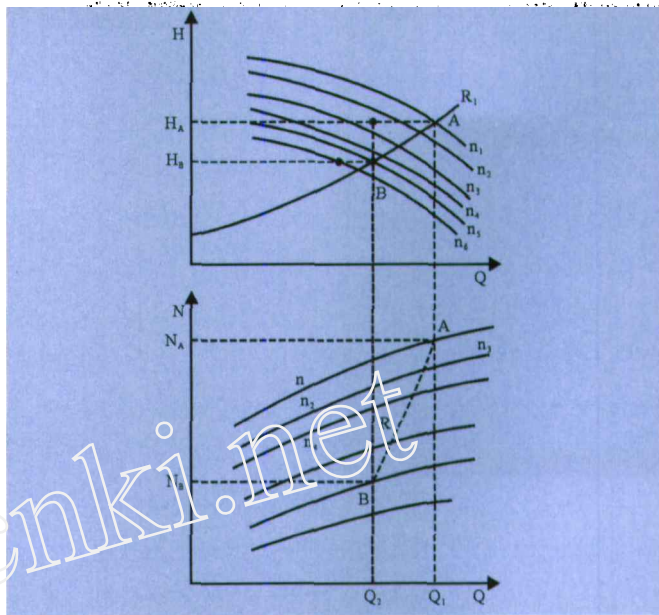


图2 改变泵的转速调节流量

要改变总的出水流量,采用古老的调阀门的方法,是不可行的,会产生巨大的水锤,会有巨大的破坏力,故障实例屡见不鲜。改变电机的转速,电耗就会大幅度下降,达到调节水量的控制目的。

各种调节流量的节电效果如图3所示。

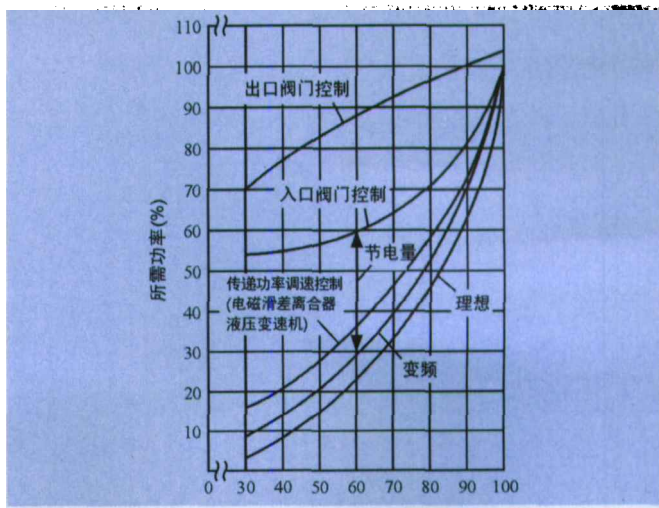


图3 水泵各种调速节电的比较

由图3可知:调节阀门,流量是变化了,但电机功率不变,电能并没有节省;过去常采用的液力耦合器,电能是节省一些,但电耗还是不小,最好的办法就是采用变频无级调速技术。

3.2 多台水泵机组并联与多泵站并联的工作原理

一个大型的给水工程,往往有1个或2个以上的取水泵站,几个中间加压泵站和综合的净配水厂组成。大、中型城市的供水系统,往往是多水源、多泵站、多管道、多用户组成。一个大型的水泵站,是多台机组并联运行。装机容量是按最不利的条件下,最大时流量和

所需扬程来决定的。只有采用水泵机组变频的无级调速技术,才能连续地改变各水泵机组的转速,来变更水泵的工况,使其综合的厂水流量与综合的等效特性曲线适应特定管网用水量的变化,维护管网的压力恒定,最大限度地提高各水泵机组效率,达到理想的节能效果。

下面特举几个实例进一步阐述多台机组并联运行的变频调速节能的机理。

(1) 变频器在源水取水泵站中的应用实例分析

水工艺专家们,对取水泵站选泵设计时,都是考虑供水保证率达到95~99%的最低原水水位时泵站最大出水量的供水规模。大家知道,枯水期间,江河水位最低,水泵所需的扬程最高,而冬季的供水量很少;丰水期间,江河水位上升,夏季是高峰供水阶段,供水量最大,但水泵的静扬程不需要很高。由于某种原因,非正常供水也有可能经常出现:如夏季高峰供水时出现特大干旱,此时江河水位也可能下降到最低点,而此时供水量又要求最大;冬季枯水期时也可能需要特大的供水量。这样,投入巨资兴建的取水泵站,将不能发挥作用,按设计规范选定的扬程和流量参数将会变得非常不合理,运行能耗和基建投资浪费很大。

大家知道,取水泵站的流量变化系数:

$$K_{\text{取}} = K_{d1}/K_{d2} = 1.4/0.6 = 2.33$$

(K_{d1} —高日系数,取1.4; K_{d2} —低日系数,取0.6)

H_h 为水泵的几何高差,一般为常数; $H_f = CQ^2$ 为管道摩阻水头,随流量平方而变化, $H_f = H_{f\max}/H_{f\min} = K_{d1}^2/K_{d2}^2 = 5.4$ 。

一个供水系统的取水泵站,其综合水泵扬程是由几何高差和管道摩阻所组成。当江河水域远离取水泵站时,其供水管道就很长,按这种情况选取几何高差较小时,管道摩阻数值所占比重就增大,而冬季或夏季后半夜时,配水扬程就变得很低,水泵的工作点就会远离高效区,如图4所示。水泵的特性曲线有 $Q-H$, $Q-N$, $Q-\eta$, $Q-G$, 是管道特性曲线。它们分别表示流量与扬程、流量与轴功率、流量与效率、流量与管道摩阻特性之间的关系。水量总是变化的。当用水量减小时,如果水泵正常运转,则系统压力将增高,当流量减小到75%和50%时,可以看到:系统压力憋高,而 H_f 将加大, $Q-G$ 曲线平移到 $Q'-G'$, $Q''-G''$ 曲线上,它们与 $Q-H$ 曲线交于 A' 和 A'' 点,水泵工作效率降低了,大量的水头势能损失掉了,管网漏水量也将大大增

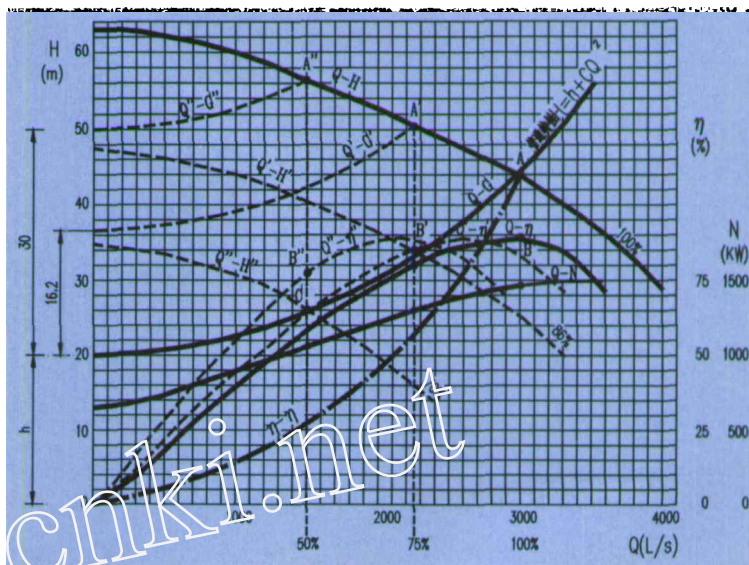


图4 水泵不同调流方式运行工况图

加。为了使水泵工作效率仍保持在高效区,采用关小出水闸阀角度来调节流量,由图4可知,水头势能全浪费在闸阀上,闸阀就极易被破坏。为了适应流量的变化,可改变水泵运转台数和组合,此时,水泵的工作点将运转在低效率上,大量的能源将浪费在管道的水头损失上。如果采用变频调速,从公式(2)、(3)、(4)可知,当流量减少到75%和50%时, $Q-H$ 曲线平移至 $Q'-H'$ 和 $Q''-H''$,效率曲线 $Q-\eta$ 移至 $Q'-\eta'$ 和 $Q''-\eta''$ 。可见水泵效率(B, B', B'' 点)基本不变,仍在高效区域内,而水泵所需的轴功率都相应减小了,转速下降了,水头损失不存在,但其工作效率却很高。还有,水泵组合的扬程处处能与管道综合的系统阻力相适应,能始终保持管网末端的压力稳定。所以说,变频调速是水泵机组节能降耗的最佳选择。北京市第九水厂、第八水厂的加压泵站,天津市引滦工程、深圳东湖取水泵站,南水北调所有的输水泵站,全国许多大中小型城市的取水输水泵站,均采用了变频调速装置。

东北市政设计院设计的引英入连供水工程水源泵站,2001年正式投产,其供水能力为66万 m^3/d ,共5台2800kW的卧式离心水泵,定速电机电压为10kV,变速电机电压为3kV,其中4台水泵机组选用Simovort MV电压源型变频器,采用三电平的磁场定向式矢量控制技术,逆变侧采用了大功率全控器件高压IGBT元件,因为IGBT元件的开通和关断过程都是连续可控的,无需附加其它电路,就能实现 dv/dt 控制,减小了电机和变压器上的 dv/dt 。由于采用了KTY84器件,可在线地得到高精度的转矩控制,Simovort MV是一种可靠性很高的变频器,4年来一直运转良好,其节电效果非常

明显:每年节电452万kW·h,按0.6元/kW·h计算,则每年均能省电费536万元。而取水泵站的全部调速装置投资为800万元,不到2年,就收回了基建投资。

(2) 变频器在给水处理厂站中的应用实例分析

给水处理工艺流程,一般为进水、配水井、絮凝沉淀、过滤、清水池、配水泵房,送入配水管网;还有加药、加氯、加氨等辅助系统,中间还有回流泵房等。

每个城市的供水系统,每个水厂,水量变化是绝对的。春夏秋冬时变化系数和日变化系数都很大。净配水厂的流量变化系数:

$$K_{配} = (K_{d1}K_{h1}) / (K_{d2}K_{h2}) \\ = (1.4 \times 1.4) / 0.6 \times 0.5 = 6.53$$

(注:高时变化系数 K_{h1} 取1.4;低时系数 K_{h2} 取0.5)

由此可见,净配水厂比取水厂站的流量变化更大,给水处理厂更要考虑科学的调流降耗的措施。流量的千变万化,影响着整个处理系统的不断变化,如絮凝沉淀、各种过滤的处理程序,加氯、加氨、加药的随机变化,以及回流泵房等,都要采取各种先进监控技术来调节变化。这些先不提了,重点研究一下送水泵房大容量水泵机组的调节问题。

上世纪80年代中期,我院承担的日产百万吨的北京市第九水厂设计中已充分认识了这个问题。从整个工艺流程到变配电设备选型,不是按最高日最高时的流量和其所对应的压力为工作点来选水泵和水泵组合;而是在满足最大设计流量的基础上,尽量使调速高效特性曲线接近系统的特性曲线,也就是说,尽量将各种调速泵组合的高效区能套入出现机率最高的工作段或点上。调速水泵台数,应在全年内运行工况中开泵出现次数最多的台数为需要的台数,而备用选泵用定速泵。北京第九水厂配水泵工作特性曲线图如图5所示。

由电算可知,首期2台2500kW转出现机率最大,其次为3台同时运转,要考虑的是各种台数组合的系统曲线的高效区均能包入高日高时流量的基础上向右下方移动。由图5可知,加大了额定流量,但降低了额定扬程,使多合配水泵综合的高效中心线介于两、三台水泵运转时的系统特性曲线之间,二期后同时运转需要4台的2500kW的水泵机组,再考虑日变系数和时变系数

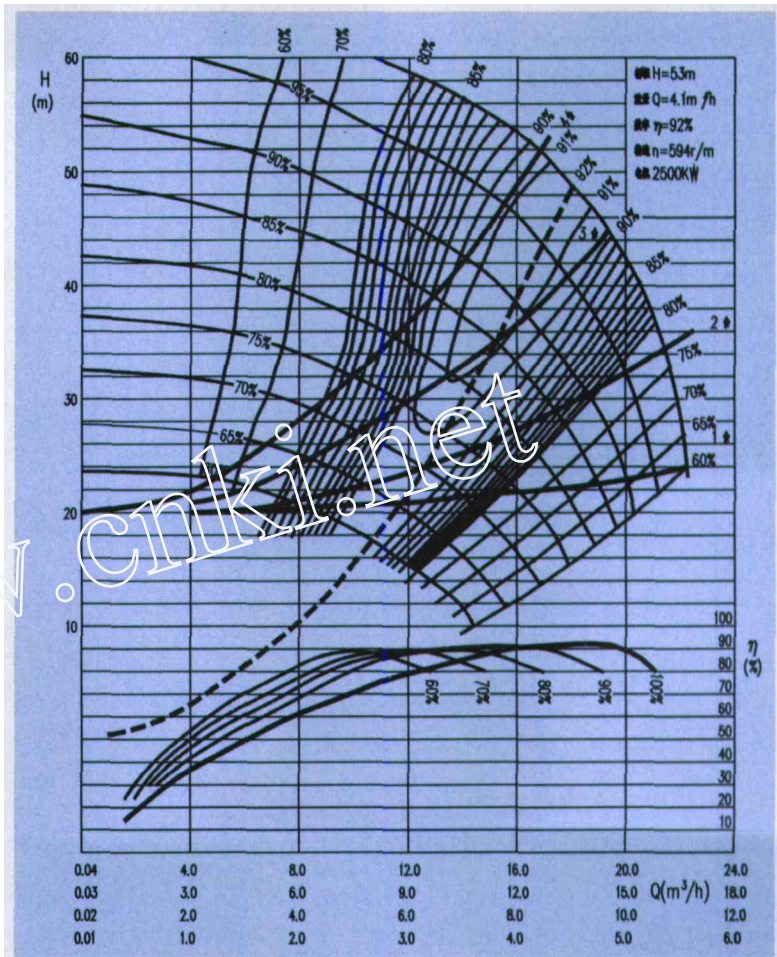


图5 九厂配水泵特性曲线

的变化率,设计中规定,4台运转泵均采用变频调速装置,这样运转,最为经济合理。当1台调速泵有故障时,可以3调1定运转,其综合效率降低一点,而工作扬程还是很高。如果按老套路设计,就会选更多的水泵机组,为了调节水量,就要选各种不同容量不同型号的水泵机组,或者只上1台调速装置去试一试。这样一来,水泵机组很多,泵房面积很大,土建投资更大;同时,管理维修难度加大,水锤现象无法避免,更谈不上什么供水系统优化调度了,其电耗、水耗、药耗还是会居高不下。学究式的单台调速理论研究已基本定格,由二电平到三电平和四电平,由矢量控制到直接转矩控制,各种变频器的电压等级和型式已经研究得差不多了。而只有面向实际,把主要精力放在研究解决实践中出现的问题上,帮助各企业建立一个节能降耗的有效手段上,这才是我们理论研究界和产品创新制造界的立足点,给水排水市场巨大,机遇极多,正是变频调速的巨大舞台。

现在北京水源九厂的送水泵房有了4套西门子的变频调速装置,第三期又上了2套罗宾康的电压源型变频带的变频调速装置。6台2500kW的调速水泵机组同时

运转。日供水量为 $150\text{万 m}^3/\text{d}$ ，占了北京总供水量的 $2/3$ 之多，其节能降耗的成果非常显著。

从上世纪80年代开始，水工业市场真正步入了变频调速时代。如北京水源九厂、深圳梅林水厂、深圳东湖泵站、北京第八水厂、长春第二水厂、上海自来水公司、重庆、成都、武汉、昆明、石家庄、大庆油田、厦门、福州、东莞、天津、苏州、沈阳、哈尔滨、西安自来水公司等几百个大中小型水厂的配水泵房都选用了变频调速装置。水泵电机单机容量从 200kW 到 3000kW ，采用了大容量的变频调速装置约2000台以上。 200kW 以下容量选用变频调速装置的就更多了。

4 创造高效节能型的可持续发展的现代化的科学水泵站

4.1 多台大功率并联运行的水泵机组台数和单机容量的选择

输水泵站、取水厂站、加压泵房、净配水厂，工程设计时要有创新理念，坚决放弃旧的传统观念，从节约用地出发，选择效率高和特性曲线俱优的水泵和电机，选择台数少、功率大，同型号规格的水泵机组，由于是大功率的水泵机组，选用一控一的变频器，多台并联运转的水泵机组都要在变频调速状态下运转，可选1台定速泵备用。这样，多台变频调速设备并联同时运行，就能最灵活地适应流量、扬程、管网压力的变化，又能提高单机效率和整体效率。

4.2 创建科学的综合等效的理想特性曲线

每建一个大功率多台并联运行的泵站或改造一个大规模的综合的给水排水系统，都要把实际情况搞透，进行科学的水力计算，创建“泵站节电节水的最高目标”的软件，使整个泵站的综合的运转特性曲线，由一条曲线扩大为一个工作面、工作点，由一个点变成沿管阻特性曲线的一个线段，将多台并联运行的调速泵组合为一台等效的理想特性曲线。就是说，改变转速，特别是在小流量的最低速时，也能使泵站始终运行在高效区域内，真正平滑无级的运转在最优化的组合上，保证水处理系统一直运转在最低的电耗、药耗、水耗的目标上。

4.3 选择绿色环保型的变频器

要选择技术性能（如效率、功率因数、速度控制、转矩脉动、噪声、谐波抑制等）较高的产品，其可靠性、稳定性、售后服务、成本都好的产品。

4.4 变频器及水泵电机电压等级的选择

应根据泵站的规模、水泵功率和水工艺流程优化

要求等综合因素，选择合适的电压等级。

加药系统、先进控制配套的变频器要选择高端变频器。

其电压可选：

- $200\text{kW} \sim 400\text{kW}$ 水泵机组选用 380V 的变频器和电动机；

- 200kW 以下的水泵机组选用 380V 的变频器和电动机；

- $400\text{kW} \sim 800\text{kW}$ 的水泵机组宜选用 380V 或 660V 的变频器和电动机；

- $800\text{kW} \sim 1500\text{kW}$ 的水泵机组宜选用 690V 、 1200V 、 2400V 或 6kV 的变频器和电动机；

- $1500\text{kW} \sim 2000\text{kW}$ 的水泵机组宜选用 6kV 或 10kV 的变频器和电动机或同步机；

- 2000kW 以上的水泵机组宜选用 6kV 或 10kV 的变频器和电动机或同步机。

4.5 关于选用VC和DTC的思考

矢量控制系统（VC）的特点是通过两次坐标变换，按转子磁链定向，电压模型和电流模型都要应用，涉及到电机参数多，其定向准确度受电机参数非线性变化的影响大。直接转矩控制系统（DTC），是在转速环内，利用转矩反馈直接控制电机的定子磁链。除了极低速度，DTC受转子侧参数影响不大，DTC鲁棒性要比VC强。

DTC系统由电机的电压和电流直接计算出定子磁链和转矩，采用Band-Band控制器来实现变频器的PWM控制，其着眼点是电压，省去了两次的坐标变换，而矢量控制的着眼点是电流，存在电流调节的滞后性，而DTC没有电流控制环路，没有任何电流反馈，电机可以获得较大的加速电流，产生较快的电流响应，DTC转矩响应要比VC快4~5倍。但，DTC由于采用“砰—砰”控制，开关频率不很稳定，其电流谐波比VC稍大一些，稳定性比VC稍差一些。无速度传感器控制是DTC和VC控制系统共同的研究课题，它们都采用同样的交流电机数学模型，DTC和VC都是转矩控制，都是高性能的交流变频调速系统。是选用DTC，还是选用VC系统，要从实用性来选择，否则有害无益。DTC和VC本质上是相同的，只是控制方法上有差异，各有侧重的应用领域。VC系统更适应于取水送水的大容量的水泵机组，因为取水送水都有静水头，且其调速范围不用100%，调速运转中精度要求不高。而加药系统及各种先进控制系统中，其配套的电动机容量不大，但调速范围宽，调节响应要求快，选用鲁棒性能好的DTC

系统更好些。

4.6 建立一个好的监控网络

“十一五”规划指出：“坚持以信息化带动工业化”，“广泛应用高新技术和先进适用技术改造提升制造业”。多年的实践证明：信息化正在迅速推进全球性的产业革命，信息化加速了经济全球化的进程，推动工业经济向信息化经济型式转变。

每条输水系统，每个水处理系统，不论是大水泵机组的调速，还是加药系统，污水生化处理中曝气量的调控，都必须根据实际变化来控制变频器装置的运转，变频器是整个供水系统的一个棋子，是系统网络上的一个节点，是这个系统的有机体。要从整个系统的综合最小电耗、药耗为指标考虑，以实时在线的水质参数标准为依据，来控制变频器的运转。现在是网络化、数字化时代。“网络就是控制器”。所有供水系统又是一个非常复杂的受多变量非线性参数影响的大滞后的流程企业制造系统。随着实时工业以太网、TCP/IP 协议的不断完善和Internet 技术的不断发展，都必须受网络来监控，必须“E 网到底”，使变频器运转得更加合理，真正发挥其“节能降耗”的巨大作用，使它们始终运转在最佳的状态下。

5 结束语

“创新是硬道理”。水行业的各种工程，是我们研究单位、制造厂家取之不尽、用之不竭的源泉，要把研究攻关的重心放到各行业的实际工程中去，真正解决实际工程中提出的各种难题，扎扎实实地把节能降耗落实到实处。

温总理在今年的“政府工作报告”中反复强调，要“认真落实科学发展观”，要把“节约能源、保护环境、集约用地放在更加突出的位置”，使传统的老企业，真正“增强经济竞争力和可持续发展能力”。在快速发展经济全球化的浪潮中，能占领一席之地。不要辜负时代赋予我们科技工作者的神圣的历史责任，过若干年后回顾我们当今的努力，才会有一种满足感。

参考文献

- [1] 陈伯时. 交流变频传动控制的发展. 北京：第一届变频器与伺服企业论坛，2004：1-3
- [2] 马小亮. 变频器选型中的几个问题. 变频器行业企业家论坛，深圳，2002

[3] 吴忠智，吴加林. 高压大功率变频器在泵站上的应用原则及实际效果. 变频器世界，2005(1)

[4] 陈运珍. 现代水工业自动化必须走信息控制一体化的道路. 自动化博览，2006(6)

作者简介

陈运珍 (1941 —) 男 高级工程师 从事电气与自控专业的设计工作，现任中国电工技术学会水工业电工专委会秘书长。

(上接第55页)

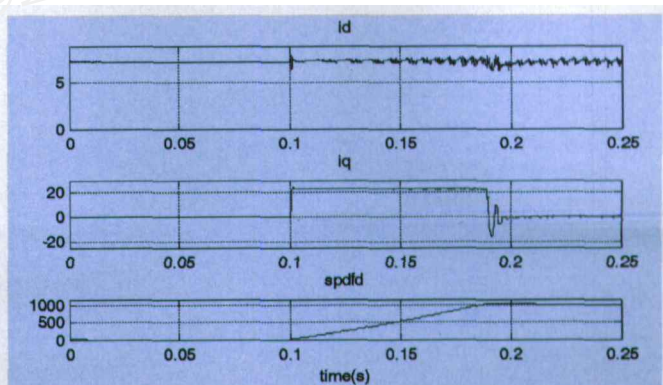


图6 电流 i_d , i_q 和速度 $spdfd$ 响应曲线

5 结束语

本文设计了一种模糊PID 电流控制器来改善SVPWM 异步电机调速系统的电流控制性能。针对 d、q 轴电流响应性能的不同要求，给出了两种控制方案。为加强 d 轴电流环的抗扰能力，提出 i_q 采用常规PI 控制器， i_d 采用模糊PID 控制器的控制方案；为改善 i_q 的动稳态响应性能，提出 i_d 采用常规PI 控制器， i_q 采用模糊PID 控制器的控制方案。仿真结果表明，两种控制方案都达到了预期的效果。

参考文献

- [1] 顾生杰，刘春娟. 基于模糊自整定的异步电机矢量控制系统仿真. 兰州交通大学学报，2005
- [2] 刘金琨. 先进PID 控制及其MATLAB. 仿真. 北京：电子工业出版社，2003

作者简介

张红霞 女 硕士研究生 研究方向为电力电子与电力传动。