排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 1 月 Jan. 2016 | 第 34 卷 第 1 期 Vol. 34 No. 1

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0012

内反馈电动机运用于泵站的节能效益分析



徐瑛瑛，莫岳平，吴松，吴磊，张赟媛
（扬州大学水利与能源动力工程学院，江苏 扬州 225127）

徐瑛瑛

摘要：设计了一套内反馈电动机控制系统，根据整流逆变原理及其公式推导结果，设计了该系统的斩波器，用于内反馈电动机调速. 将三相交流电压方程进行派克变换后转化为两相旋转坐标系下的电压方程，并结合前馈解耦控制策略得到三相电压型逆变器在 *dq* 坐标下的电压控制指令，设定 *q* 轴电流（无功电流）的给定值为 0，即可实现该控制系统的单位功率因数控制. SVPWM 控制器采样控制电压，并根据定子侧电压、电流信号的相位和大小产生驱动信号，控制逆变器的 6 个 IGBT 的开通和关断，将回馈的能量输送到定子附加绕组上，实现能量的二次利用. 利用 Matlab 对该控制系统进行仿真试验，仿真结果表明：随着斩波器占空比的逐步减小，电动机的速度也在不断减小，电动机有功功率不断减少，而无功功率始终为 0，说明电动机在平滑调速的同时能保持较高的功率因数. 以江苏省某泵站为例，采用内反馈电动机作为泵站的主电动机后，该泵站一年节约了电费 41.31 万元，计算结果表明该泵站获得了很高的经济效益.

关键词：内反馈电动机；单位功率因数；仿真；经济效益；泵站
中图分类号：S277.9；TV675　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2016)01-0038-07

徐瑛瑛，莫岳平，吴松，等. 内反馈电动机运用于泵站的节能效益分析[J]. 排灌机械工程学报，2016，34(1)：38-44.

XU Yingying，MO Yueping，WU Song，et al. Analysis of energy conservation of internal feedback motor in pumping stations[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2016，34(1)：38-44.(in Chinese)

Analysis of energy conservation of internal feedback motor in pumping stations

XU Yingying，*MO Yueping*，*WU Song*，*WU Lei*，*ZHANG Yunyuan*
(School of Hydraulic，Energy and Power Engineering，Yangzhou University，Yangzhou，Jiangsu 225127，China)

Abstract：For internal feedback motors，a control system is designed，in which a chopper circuit is developed for speed regulation based on the rectifier-inverter principle and corresponding formulas. The voltage control instructions in *dq* rotating reference frame are generated by changing the voltage in 3-phase static reference into 2-phase rotating reference with PARK transformation combined with the forward feedback decoupling control strategy. A unity power factor operation can be achieved by setting the current of the *q* axis (reactive current) to be 0. The SVPWM controller generates a driving signal according to the phase and amplitude of voltage and current stator as well as sampling control voltage. By controlling the IGBT on or off，the excess energy is delivered to the stator. The control system is simulated in Matlab and the results show that with the decrease of duty ratio，the speed and active power reduce，and the reactive power remains zero，suggesting the internal feedback motor is subject to a higher power factor during speed regulating. Finally，the electric bill of a pumping station in Jiangsu Province is calculated when the internal feedback motors are used to drive the pumps for a year. It is

收稿日期：2015-01-14；**网络出版时间**：
网络出版地址：
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51405428)
作者简介：徐瑛瑛(1989—)，女，江苏南通人，硕士研究生(xuyingying2015@126.com)，主要从事新型特种电机、电器及其控制研究.
莫岳平(1962—)，男，江苏武进人，教授，博士(通信作者，moyp@sina.com)，主要从事电动机及其控制研究.

shown that a ￥413 100 budget can be saved after the motors are used, causing significant economic benefits.

Key words: internal feedback motor; unity power factor; simulation; economic benefits; pumping station

随着国民经济的飞速增长,中国的水利事业得到了迅猛的发展,各种大、中型泵站相继建成. 据2004年的调查统计[1]显示,中国大、中型水泵站已经有5 500余座,当时的机电排灌保有量达7.000×10^7 kW. 至2008年,中国排灌机械保有量增加到8.668×10^7 kW,发展非常迅猛. 但是,目前中国很多大、中型泵站电动机的优化程度不高,泵站结构不先进,导致泵站设备的能源利用率较低. 因此,对泵站的主电动机形式进行优化调整对节能降耗意义深远.

20世纪80年代,中国专家屈维谦首先提出内反馈调速理论. 基于该理论的内反馈电动机在中国的某些厂矿企业得到了应用. 内反馈电动机本质上也是交流励磁电动机. 目前,中国有华北电力大学、华中科技大学、浙江大学等从事交流励磁电动机的研究工作. 但是到目前为止,研究工作大部分还仅限于实验室中. 早在1981年,日本开始对变频调速抽水储能发电机组进行研究,主要是采用转子变频调速,转子铁芯置有三相交流励磁绕组,转子变流器装置采用GTO元件构成交-直-交电流型逆变器,并在1995年首次研究成功采用GTO作为功率元件的世界最大容量的变速恒频抽水储能发电机组,应用于日本电源开发公司所属的奥清津电站2号发电机,发电电动机的单机容量高达345 MW,转速调节范围为407~450 r/min,流量为154 m^3/s[2],运行工况较好.

大中型泵站在农田灌溉、城市生活用水、工业用水以及防汛等重大任务中扮演着重要的角色. 但过去国内人员对泵站的研究工作主要集中在流道的型式、水泵叶片设计和选型上,而对泵站主电动机型式特别是新型电动机型式缺乏深入的研究. 现有泵站的变工况运行主要依靠调节叶片的角度实现,此类调节的范围有限、对阀门和叶片的损害大,在泵站扬程变化较大时,泵内的流态紊乱,二次回流增加,效率也急剧下降,调节效果不理想. 而内反馈电动机的变速调节是通过对内反馈电动机控制器的调节实现的,故能平滑地实现无级调速;同时,内反馈电动机转子侧的控制器将转差能量反馈到电动机定子侧,实现能量的再次利用.

文中主要通过设计内反馈电动机逆变控制系统,实现无级调速和单位功率因数控制,并通过数值计算验证其经济效益.

1　泵站主电动机的现状

对于大型泵站,中国几乎都采用了低速大型同步电动机与水泵直联配套,大型同步电动机具有效率高、功率因数高的特点. 在同步电动机运行时,可通过调节转子上的直流励磁电流而改变功率因数,使电动机功率因数能保持在较高水平. 但是直联式方案也有一些明显的缺点:电动机直径比水泵大,造价比水泵高,在整个泵系统中,电动机的价格占一大半以上;由于电动机尺寸太大,必然使泵房的建筑高度、面积增加,泵站的总投资增加;此外,直联式传动系统中,泵对安装后的转动同轴度要求非常高,这使得电动机与泵安装定位时泵轴与电动机轴的对中精度要求较高,增加了安装难度.

大型泵站的配用动力机除可选用同步电动机外,也可选用异步电动机. 异步电动机通常与齿轮箱结合,进而向泵输出转矩. 中国第1台采用减速装置的大型泵,于1969年安装在江苏东台安丰抽水站[3],其泵组结构:立式轴流泵、卧式电动机、齿轮箱传动. 由于当时减速箱制造水平有限,装机运行期间振动噪声大,并且发生了齿轮断齿现象,造成停机. 自20世纪90年代以来,中国通过引进和消化国外的先进技术,已基本能生产出符合要求的大型齿轮箱. 但是选用异步电动机配备齿轮箱结构时,由于异步电动机在低速运行时功率因数偏低,因而此种结构总体的传动效率较低,对能源造成了很大的浪费.

2　内反馈电动机的原理及调速性能

2.1　内反馈电动机的原理

内反馈电动机[4-5]的结构是在普通异步电动机的定子铁芯上增设一套绕组,称其为调节绕组,该绕组主要用于接收从转子侧反馈回来的电能,与原绕组之间只存在电磁感应,没有电传导的联系. 内反馈电动机的控制系统原理图如图1所示(图中P_s为定子从电源吸收的功率;P_m为电动机输出的机械

功率;P_{es}为转子侧的回馈能量). 电动机的定子侧接收电源的能量,在电动机内部空间产生旋转磁场. 当电动机转速发生变化时,电动机将转子侧的能量通过变流装置回馈到电动机定子侧的附加绕组上,因而电动机定子从电源吸收的能量减少,电动机实现节能调速.

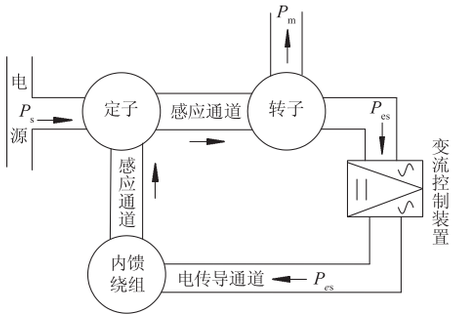


图1 内反馈电动机调速原理图

Fig. 1 Schematic of speed regulation principle of internal feedback motor

2.2 内反馈电动机的调速性能

内反馈电动机的调速性能[6-7]分析如下.

假设转子 a,b,c 三相电势为

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}sE_{2D}\cos(\omega t), \\ e_b = \sqrt{2}sE_{2D}\cos\left(\omega t + \dfrac{\pi}{3}\right), \\ e_c = \sqrt{2}sE_{2D}\cos\left(\omega t - \dfrac{\pi}{3}\right), \end{cases} \tag{1}$$

式中:s 为内反馈调速电动机转差率;E_{2D}为转子不转时的额定相电势.

转子电势经整流器整流后,其整流波形为三相正弦半波,其平均值的表达式为

$$U_d = \frac{6}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}sE_{2D}\cos(\omega t)\,\mathrm{d}t = 2.34sE_{2D}. \tag{2}$$

考虑到转子绕组中存在着电阻与漏抗,因此转子整流器的输出电压为

$$U_{d0} = 2.34sE_{2D} - I_d\left(\frac{3X_D s}{\pi} + 2R_D\right), \tag{3}$$

式中:I_d 为整流回路电流;R_D,X_D 分别为折算到转子侧的电动机每相电阻、每相漏抗.

假设 IGBT 斩波器的占空比为 D,那么整流器输出电压 U_{d0}与电容电压 U_{dC}(等式右侧为 U_{dC})之间的关系为

$$2.34sE_{2D} - I_d\left(\frac{3X_D s}{\pi} + 2R_D + R_d\right) = (1-D)U_C, \tag{4}$$

式中:R_d 为电抗器 L_1 的电阻,U_C 为电容电压.

又因为 $s = (n_0 - n)/n_0$,n_0 为理想空载转速,将其代入式(4)可得内反馈电动机的转速表达式为

$$n = n_0\left\{\frac{[2.34E_{2D} - (1-D)U_C] - I_d\left(\dfrac{3X_D}{\pi} + 2R_D + R_d\right)}{2.34E_{2D} - \dfrac{3X_D s}{\pi}I_d}\right\}. \tag{5}$$

由式(5)可知,内反馈电动机的转速随占空比的变化而变化(占空比调节可以通过控制图3中的斩波器实现). 当占空比较小时,流过 IGBT 的电流较少,而通过逆变器流入到调节绕组的电能较大,电动机反馈回来的能量较多,此时内反馈电动机的转速较低;反之,则反馈回来的能量较少,电动机的转速就较高. 这样就可以通过调节导通触发角实现电动机的平滑调速. 相比齿轮箱减速,可以有效地避免齿轮传动出现的齿易折断、磨损,噪声大,发热严重以及减速装置存在的润滑、密封和冷却等问题. 图2为内反馈电动机在不同占空比下的仿真波形.

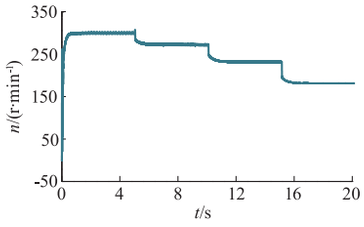


图2 内反馈电动机调速波形

Fig. 2 Speed regulating waveform of internal feedback motor

如图2所示,在0~5 s内,斩波器的占空比较小,电动机此时的转速较高;5 s以后,随着占空比的逐步减小,电动机的转速也在逐步减小.

3 内反馈电动机的单位功率因数控制

内反馈电动机的单位功率因数控制原理如图3所示,电动机转子侧的电流 I_r 经整流器整流后进入斩波器,SVPWM 控制器[8-10]采样斩波电位 V_{dL},并根据定子侧电压 U_k、电流信号 i_k 的相位和大小,产生 SVPWM 驱动信号 $S_1 - S_6$,控制 PWM 逆变器[11-12]中的6个 IGBT 的开与关,从而将内反馈电动机转子侧的回馈能量输送到定子附加绕组上,实现能量的二次利用.

SVPWM 的基本工作原理:在三相对称正弦波供电情况下,以交流电动机产生的理想圆形磁链轨

迹为基准,在 1 个控制周期 T_s 内,利用平行四边形法则将任意参考电压矢量分解成 2 个相邻的基本空间矢量和零矢量,并控制其作用时间,从而使电动机的实际气隙轨迹逼近理想的圆形,如图 4 所示. 以第一扇区内的空间矢量为例,参考矢量 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{ref}}$ 由相邻的 2 个电压矢量 $\boldsymbol{u}_a$,$\boldsymbol{u}_b$ 和零矢量合成.

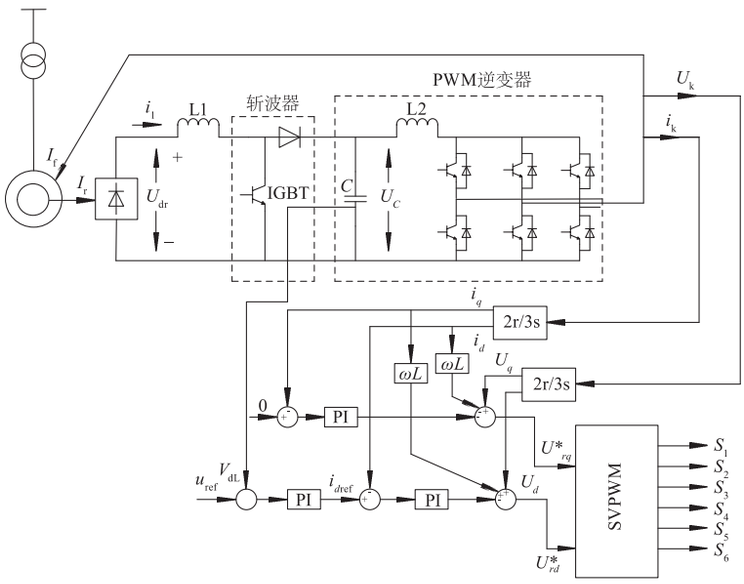


图 3　内反馈电动机控制系统框图

Fig. 3　Block diagram of control system of internal feedback motor

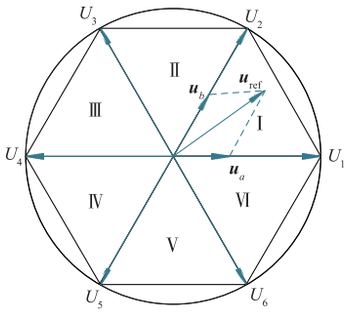


图 4　空间矢量与扇区

Fig. 4　Space vector and sector

伏秒平衡原则为

$$t_a\boldsymbol{u}_a + t_b\boldsymbol{u}_b + t_0\boldsymbol{u}_0 = t_s\boldsymbol{u}_{\mathrm{ref}}, \tag{6}$$

$$t_a + t_b + t_0 = t_s, \tag{7}$$

式中:t_a 为 $\boldsymbol{u}_a$ 作用的时间;t_b 为 $\boldsymbol{u}_b$ 作用的时间;t_0 为零矢量 $\boldsymbol{u}_0$ 作用的时间;t_s 为最小载波周期;$\boldsymbol{u}_{\mathrm{ref}}$ 为参考电压.

式(6)的意义是矢量 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{ref}}$ 在 t_s 内所产生的积分效果与 $\boldsymbol{u}_a$,$\boldsymbol{u}_b$,$\boldsymbol{u}_0$ 分别在 t_a,t_b,t_0 的积分效果相加的总和值相同. 由于三相正弦波电压在电压空间矢量中就相当于参考电压 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{ref}}$,因此在图 4 中从 U_1 开始,逐渐增加 1 个小增量,每个增量用其所在区域中的相邻的基本非零向量和零向量予以合成,如此得到的电压向量即为在平面上平滑旋转的电压矢量,从而就能达到电压空间向量脉宽调制[13-15]的目的.

为了实现内反馈电动机的单位功率因数控制,必须先对内反馈电压进行解耦. 假设定子侧的输入电压为

$$\begin{cases} u_a = U_{\mathrm{m}}\cos(\omega t), \\ u_b = U_{\mathrm{m}}\cos(\omega t - 2\pi/3), \\ u_c = U_{\mathrm{m}}\cos(\omega t + 2\pi/3), \end{cases} \tag{8}$$

式中:U_{m},ω 分别为电压峰值、电网角频率.

通过派克变换[16-17]后的两相旋转坐标下的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = \dfrac{2}{3}\left[u_A\cos(\omega t) + u_B\cos\left(\omega t - \dfrac{2\pi}{3}\right) + u_C\cos\left(\omega t - \dfrac{4\pi}{3}\right)\right], \\ u_q = \dfrac{2}{3}\left[-u_A\sin(\omega t) - u_B\sin\left(\omega t - \dfrac{2\pi}{3}\right) - u_C\sin\left(\omega t - \dfrac{4\pi}{3}\right)\right]. \end{cases} \tag{9}$$

通过给定系统有功功率 P^* 和无功功率 P_Q^*,可以得到其所对应的电流给定为

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} u_d & u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} P^* \\ P_Q^* \end{bmatrix}. \tag{10}$$

为了实现逆变器的单位功率因数控制[18],将无

功功率给定为0,并采用前馈解耦策略,可得三相电压型逆变器在 dq 坐标[19]下的电压控制指令为

$$U_d^* = -\left(K_{pi}+\frac{K_{ii}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + u_d + \omega L i_q,$$
$$U_q^* = -\left(K_{pi}+\frac{K_{ii}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + u_q - \omega L i_d, \quad (11)$$

式中:K_{pi},K_{ii}分别为比例系数、积分系数;i_d^*,i_q^* 分别为转子侧 d 和 q 轴参考电流;i_d,i_q 分别为定子侧 d 和 q 轴电流;u_d,u_q 分别为定子侧 d 和 q 轴电压;ω 为角速度;L 为控制器电感.

式(11)中将 q 轴电流的给定值设为0,即无功功率为0,可实现系统的单位功率因数[20-21]控制. 图5为单位功率因数控制的仿真波形,图中 P 为有功功率,kW;P_Q 为无功功率,V·A;t 为仿真时间,s.

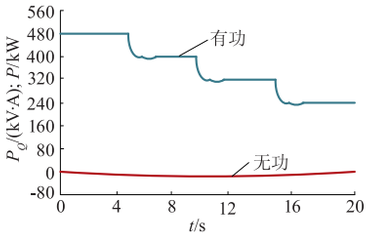


图5 调速时有功无功相应波形

Fig. 5 Active and reactive response waveform when speed is regulated

由图5可看出,当电动机调速时,系统的无功功率始终为0,有功功率随着速度的改变在不断减小,系统总体的功率因数较高.

4 内反馈电动机的节能效益分析

当泵站净扬程变化使机组运行工况偏离高效区时,采用内反馈电动机调速,可以动态调整机组的运行转速,使得泵站在满足供水要求的前提下高效运行,减少运行费用. 以江苏省某泵站为例,该泵站年调水时间 t 为180 d,调水时间主要集中在4—10月. 该泵站前池水位受潮汐的影响,调水时扬程变化范围较大,为4.5~9.5 m,最大、最小调水扬程分别用 H_{JH},H_{JL}表示.

该泵站水泵的性能曲线方程为

$$\eta_{ze} = -2.575Q_e^2 + 12.645Q_e + 71.275, \quad (12)$$
$$H_{Je} = -0.165Q_e^2 - 1.081Q_e + 12.405, \quad (13)$$

式中:η_{ze}为水泵的运行效率;H_{Je}为水泵的扬程;Q_e为水泵的排水流量.

该水泵1 a的调水总量为

$$V_p = Qt = 50\times180\times24\times3\,600 = 7.776\times10^8\ \mathrm{m^3}, \quad (14)$$

式中:Q 为流量,其值为50 m^3/s.

因为调水时间相对集中,因此调速运行可使运行工况与额定转速最优工况相似,即实际运行时的效率 η_{zg} 与最优运行工况下的效率 $\eta_{z\,opt}$ 相等,为87.3%,因此认为在调水时,在4.5~9.5 m范围内各扬程出现的概率相等,则调速调水的平均扬程为

$$\bar{H}_{pL} = (H_{JH} + H_{JL})/2 = (9.5+4.5)/2 = 7\ \mathrm{m}. \quad (15)$$

将 H_{JL},H_{JH}分别代入式(13),得额定转速下对应最大、最小泵流量分别为 $Q_{p\,max} = 5.577\ m^3/s$,$Q_{p\,min} = 4.243\ m^3/s$. 则正常抽排时泵的平均效率为

$$\bar{\eta}_{zp} = \frac{1}{Q_{p\,max} - Q_{p\,min}}\int_{Q_{p\,min}}^{Q_{p\,max}} \eta_{ze}\mathrm{d}Q = 82.7\%. \quad (16)$$

电动机效率为 $\eta_{mt} = 93.5\%$,在电能单价 a = 0.5元/(kW·h)的前提下,额定转速抽排年需电费为

$$R_p = \frac{a\rho g V_p \bar{H}_{pL}}{3.6\times10^6\eta_{mt}\bar{\eta}_{zp}} = 958.14\ 万元, \quad (17)$$

式中:ρ 为水的密度,1 000 kg/m^3;g 为重力加速度,9.8 m/s^2.

而采用内反馈斩波串级调速系统时,由于内反馈电动机调速控制器效率为 $\eta_b = 99\%$,则该泵站水泵内反馈调速抽排年需电费为

$$R_{pt} = \frac{a\rho g V_p \bar{H}_{pL}}{3.6\times10^6\eta_{mt}\eta_{z\,opt}\eta_b} = 916.83\ 万元. \quad (18)$$

则采用内反馈电动机调速调水泵站年节省电费为

$$\Delta R_p = R_p - R_{pt} = 41.31\ 万元. \quad (19)$$

此项数据充分显示了内反馈电动机在节电、节能方面的优越性. 据2008年的调查统计[1]显示,中国大、中型泵站达7 400余台,若以每座泵站节约41万元计算,可节省人民币30.34亿元. 此外,由于内反馈电动机的特殊结构,可以取代传统的齿轮变速箱传动,若以单台变速器的平均价格为7 000元计算,则7 400多台泵站可直接节约设备成本达5 180万元,经济效益相当可观.

5 结 论

通过设计控制器,利用整流逆变以及矢量控制的原理,将内反馈电动机转子侧的多余能量回馈到

电动机的定子侧. 内反馈电动机的优点是调速平滑、稳定,且在调速过程中始终保持较高的功率因数,从而降低能耗. 例如江苏省的某泵站,在采用内反馈电动机作为泵站的主电动机后,一年共节约了电费41.31万元,节能效益显而易见. 实际上,中国大部分河流的水头变化大,多泥沙,如果采用可变速运行的水泵机组,则无论在丰水期还是在干旱期,都能使水泵处于较好的工况下运行,大大减少了水泵叶片气蚀和泥沙磨损,既提高机组综合效率,又延长了机组寿命,且内反馈电动机不需要专门的减速和功率补偿装置,其结构精巧、设备故障少,因此内反馈电动机在泵站上的运用具有很高的经济效益和社会效益.

参考文献(References)

[1] 厉明祥. 南水北调大型泵结构设计研究[J]. 排灌机械, 2003,21(3):1-5.
LI Mingxiang. The large pump structure design research for South-to-North water diversion[J]. Drainage and irrigation machinery, 2003,21(3):1-5. (in Chinese)

[2] 吕树清. 交流励磁变速抽水蓄能机组的应用探讨[J]. 南昌水专学报,2000,19(4):29-32.
LYU Shuqing. Application of variable-speed pumped storage manchine in AC excitatoin[J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2000,19(4):29-32. (in Chinese)

[3] 葛强,陈松山,王林锁. 大型泵站主电动机选型优化的研究[J]. 水泵技术, 2002(5):39-42.
GE Qiang, CHEN Songshan, WANG Linsuo. The optimal selection research of main motor for large pumping station[J]. Pump technology, 2002(5):39-42. (in Chinese)

[4] 王兵树,张晓东,郭晓原. 内反馈串级调速电机的近似数学建模与simulink仿真[J]. 系统仿真学报, 2010,22(2):537-541.
WANG Bingshu, ZHANG Xiaodong, GUO Xiaoyuan. Approximate mathematical modeling and simulation of cascade speed regulation of inner-feedback motor[J]. Journal of system simulation, 2010,22(2):537-541. (in Chinese)

[5] 张海峰,范毅. 基于DSP控制斩波内反馈串级调速系统研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2010,30(2):16-19.
ZHANG Haifeng, FAN Yi. DSP based research of speed regulation system of internal feedback cascade motor with chopper[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2010,30(2):16-19. (in Chinese)

[6] 洪长艳,黄秀波. 内反馈串级调速电机的原理及设计[J]. 防爆电机, 2003(2):11-13,20.
HONG Changyan, HUANG Xiubo. Principle and design of internal-feedback cascade speed-adjusting motor[J]. Explosion-proof electric machine, 2003(2):11-13, 20. (in Chinese)

[7] 刘志奇,黄魁,张晓东. 内反馈串级调速电机技术特点及应用分析[J]. 仪器仪表与分析监测, 2010(1):9-11.
LIU Zhiqi, HUANG Kui, ZHANG Xiaodong. The application analysis and technology features of cascade speed control system of inner feedback motor[J]. Instrumentation analysis monitoring, 2010(1):9-11. (in Chinese)

[8] VALAN RAJKUMAR M, MANOHARAN P S. FPGA based multilevel cascaded inverters with SVPWM algorithm for photovoltaic system[J]. Solar energy, 2013, 87:229-245.

[9] SHEHADA A, BEIG A R. An improved CSI fed induction motor drive[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2013,46:26-35.

[10] CHARUMIT C, KINNARES V. Discontinuous SVPWM techniques of three-leg VSI-fed balanced two-phase loads for reduced switching losses and current ripple[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015,30(4):2191-2204.

[11] GABALLAH M M. Design and implementation of space vector PWM inverter based on a low cost microcontroller[J]. Arabian journal for science and engineering, 2013,38(11):3059-3070.

[12] VASQUEZ J C, MASTROMAURO R A, GUERRERO J M, et al. Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009,56(11):4510-4519.

[13] ZHAO Di, HARI V S S P K, NARAYANAN G, et al. Space-vector-based hybrid pulsewidth modulation techniques for reduced harmonic distortion and switching loss[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010,25(3):760-774.

[14] DAS S, NARAYANAN G, PANDEY M. Space-vector-based hybrid pulsewidth modulation techniques for a three-level inverter[J]. IEEE transactions on power electronics, 2014,29(9):4580-4591.

[15] XIAO Xiangning, JIANG Xu, LIU Hao, et al. Study on the SVPWM algorithm of N-level inverter in the context of non-orthogonal coordinates[J]. Frontiers of electrical and electronic engineering in China, 2006,1(2):199-204.

[16] BABAEI E, SABAHI M. Development of pulse width modulation technique for controlling inverters under balanced and unbalanced operations[J]. Arabian journal for science and engineering, 2014, 39(4): 2941-2951.

[17] YAO Wei, CHEN Min, MATAS J, et al. Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011,58(2):576-588.

[18] 谈龙成,李耀华,刘丛伟,等. 三相电流型PWM整流器的功率因数控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2):86-93.
TAN Longcheng, LI Yaohua, LIU Congwei, et al. Power factor control method of three phase current source PWM rectifier[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2010,25(2):86-93. (in Chinese)

[19] 吴云亚,阚加荣,谢少军. 基于双$d-q$坐标系的并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2011,26(8): 106-112.
WU Yunya, KAN Jiarong, XIE Shaojun. Control strategy for grid-connected inverter based on double $d-q$ coordinates[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2011,26(8):106-112. (in Chinese)

[20] 姚骏,廖勇,李辉,等. 直驱永磁同步风力发电机单位功率因数控制[J]. 电机与控制学报, 2010,14(6): 13-20.
YAO Jun, LIAO Yong, LI Hui, et al. Unity power factor control of a direct-driven permanent magnet synchronous wind-power generator[J]. Electric machines and control, 2010,14(6):13-20. (in Chinese)

[21] 刘文良,张国政. 永磁同步电机单位功率因数控制[J]. 微电机,2012,45(2):63-67.
LIU Wenliang, ZHANG Guozheng. Unity power factor control of permanent magnet synchronous motor[J]. Micromotors, 2012,45(2):63-67. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)

(上接第37页)

LI Deyou, WANG Hongjie, GONG Ruzhi, et al. Design and experiment of turbine model testing system based on LabVIEW[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2014,33(4):263-268. (in Chinese)

[8] 李德友, 王洪杰, 刘世勋, 等. 基于NI PXI的水力测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(S12): 452-457.
LI Deyou, WANG Hongjie, LIU Shixun, et al. Hydraulic test system based on NI PXI[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2011, 32(S12): 452-457. (in Chinese)

[9] Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. Model acceptance tests: IEC60193—1999[S].

[10] 潘罗平. 卡门涡诱发的水电机组振动特性研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2010,11(3):134-137,154.
PAN Luoping. Study on vibration characteristics induced by Karman vortices for hydropower units[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(natural sciences edition), 2010,11(3):134-137,154. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)