

文章编号:1671-251X(2013)09-0067-04

DOI:10.7526/j.issn.1671-251X.2013.09.018

王敦胜,梁玉,姚所贵. 矿山变频矢量控制系统效率优化方案研究[J]. 工矿自动化,2013,39(9):67-70.

矿山变频矢量控制系统效率优化方案研究

王敦胜¹, 梁玉², 姚所贵³

(1. 徐州中矿大传动与自动化有限公司, 江苏 徐州 221116; 2. 中国平煤神马集团 物资供应分公司, 河南 平顶山 467000; 3. 冀中能源邯郸矿业集团 赤峪煤矿, 山西 文水 032100)

摘要:针对矿山变频调速系统感应电动机采用恒定磁通控制,存在损耗严重、运行效率低的问题,提出了一种矿山变频矢量控制系统的效率优化控制方案。该方案在两相旋转 $d-q$ 坐标系下,建立了考虑定、转子铜损和铁损的系统损耗模型,推导得到不同运行工况下电动机损耗与转子磁链之间的对应关系;为改善因弱磁运行而造成的系统动态响应过慢问题,通过优化转矩电流和磁链电流比重关系,获得电动机电磁转矩的快速响应和转速跟踪。基于 DSP+FPGA 控制系统搭建 22 kW 三电平感应电动机调速系统实验平台,实验结果表明,该优化方案可以降低感应电动机矢量控制系统运行损耗,提高系统运行效率,并保证系统的稳态性能和动态响应性能。

关键词:感应电动机; 矢量控制; 效率优化; 磁链控制

中图分类号:TD631 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Research of efficiency optimization scheme of mine frequency-conversion vector control system

WANG Dun-sheng¹, LIANG Yu², YAO Suo-gui³

(1. China Mining Drives and Automation Co., Ltd., Xuzhou 221116, China;

2. Branch Office of Supplies, China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China;

3. Chiyu Coal Mine, Jizhong Energy Handan MIG, Wenshui 032100, China)

Abstract: In view of problems of serious loss and low efficiency of operation existed in induction motor of frequency-conversion speed-regulation system controlled by constant flux, the paper put forward a kind of efficiency optimization control scheme of mine frequency-conversion vector control system. Under two-phase $d-q$ rotating coordinate system, the scheme established loss model of the system including set and rotor copper loss and iron loss, derived corresponding relationship between motor loss and rotor flux under different operating conditions. In order to solve problem of slow dynamic response of the system caused by weak magnetic operation, it optimized proportion of torque current and flux current to get fast response of electromagnetic torque and speed tracking of the motor. It established experimental platform of speed regulation system of 22 kW three-level induction motor based on DSP+FPGA control system, and the experimental results show that the optimized scheme can reduce loss of vector control system of induction motor, improve operation efficiency of the system, and ensure steady-state performance and dynamic response performance of the system.

Key words: induction motor; vector control; efficiency optimization; flux linkage control

收稿日期:2013-05-20。

基金项目:江苏省重大科技成果转化资金项目(BA2008029);科技型中小企业技术创新基金重点项目(11C26213204616)。

作者简介:王敦胜(1973—),男,江苏徐州人,工程师,现主要从事矿山传动控制系统方面的开发与研究工作,E-mail:wdsh_cdc@163.com。

0 引言

随着现代煤炭开采技术的持续发展,多种变频调速系统被用于提高生产效率^[1-3],包括矿井提升机、电牵引采煤机、带式输送机、通风机水泵等变频调速系统。高性能矢量控制技术成为变频调速系统的主流控制方案。该方案采用磁场定相的方式将电动机磁链和转矩解耦。为保证电动机出力效果,多采用恒定磁通控制。然而,对于并非长期运行于重载工况下的矿山调速系统,采用恒定磁通控制会使电动机内部损耗严重,影响实际系统运行效率^[4]。

为此,本文提出了一种感应电动机矢量控制系统的效率优化控制方案。在建立考虑定、转子铜损和铁损的系统损耗模型的基础上,通过优化转子磁链给定的方式,提高矿山变频调速系统运行效率。针对弱磁运行造成的系统动态响应缓慢问题,通过优化转矩电流和磁链电流比重关系,使电动机电磁转矩得以快速响应,保证系统外环跟踪性能。以三电平感应电动机变频调速系统为研究对象,搭建Matlab/Simulink仿真模型和实验样机进行分析验证,结果表明,该效率优化方案是可行、有效的。

1 三电平感应电动机调速系统

图1为三电平感应电动机变频调速系统简化结构图。相较传统两电平拓扑结构,三电平中点箝位式(Neutral Point Clamped, NPC)拓扑结构^[5]可提供多达27种离散电压空间矢量,可更好地拟合出定子侧正弦交流电,保证变频调速系统安全可靠运行。

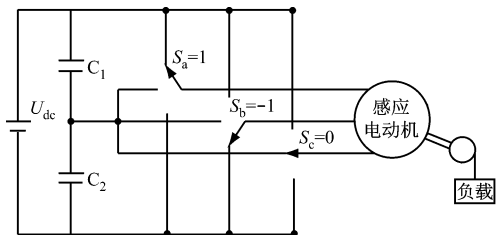


图1 三电平感应电动机调速系统简化结构

对于感应电动机调速系统,建立其两相旋转 $d-q$ 坐标系下的动态数学模型:

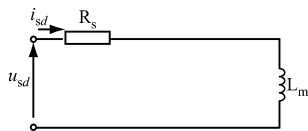
$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 L_\delta i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_1 L_\delta i_{sd} \\ T_e = n_p \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd} i_{sq} \\ L_\delta = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 为电动机定子侧输入电压 $d-q$ 坐标分

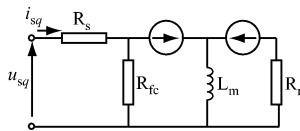
量; i_{sd}, i_{sq} 为电动机定子侧输入电流 $d-q$ 坐标分量; L_s 为定子自感; L_r 为转子自感; L_m 为互感; $T_r = L_r/R_r$ 为转子电磁时间常数; R_s 为定子电阻; n_p 为电动机极对数; ω_1 表示定子角频率; T_e 为电磁转矩。

2 损耗模型建立

考虑到感应电动机结构的特殊性,其系统运行时包含定转子铜损、定转子铁损、杂散损耗和机械损耗。杂散损耗和机械损耗占全局损耗的较小部分($<20\%$),且其与电动机磁场大小不存在数学关系,无法通过优化算法进行改进,故本文将其忽略不计。定转子铜损、铁损与变频调速系统电气变量存在对应关系,且其在整体系统损耗中占较大部分($>80\%$)。本文以上述可控损耗为研究对象,构建感应电动机在两相旋转 $d-q$ 坐标系下的等效电路,如图2所示。



(a) d 轴稳态等效电路



(b) q 轴稳态等效电路

图2 感应电动机等效电路

由等效电路可得 $d-q$ 轴上的电动机铜损和铁损数学模型:

$$\begin{cases} P_{cus} = R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) \\ P_{cur} = R_r i_{sq}^2 \\ P_{fe} = R_{fe} / (R_{fe} + R_r)^2 (R_r^2 i_{sq}^2 + L_m^2 \omega_r^2 i_{sd}^2 + 2R_r L_m i_{sq} i_{sd}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{cus} 为定子侧铜损; P_{cur} 为转子侧铜损; P_{fe} 为电动机铁损。

根据式(1)、(2)可知,感应电动机可控损耗为

$$P_{loss} = P_{cus} + P_{cur} + P_{fe} = R_q i_{sq}^2 + R_d i_{sd}^2 = (k_1 + k_2 \omega_r^2) \Psi_r^2 + k_3 \frac{T_e^2}{\Psi_r^2} \quad (3)$$

式中: $k_1 = \frac{R_s}{L_m^2}$; $k_2 = \frac{1}{R_r + R_{fe}}$; $k_3 = \frac{L_r^2}{n_p^2 L_m^2} (R_s + \frac{R_r R_{fe}}{R_r + R_{fe}})$ 。

分析式(3)结构形式可知, 其为一个凸函数, 对于转矩和转速给定的系统, 对式(3)转子磁链项求导并令其为零, 可以得到最优转子磁链给定 Ψ_r^* :

$$\Psi_r^* = \sqrt{\frac{k_3}{k_1 + k_2 \omega_r^2}} \sqrt{T_e} \tag{4}$$

式(4)即为效率优化运行时对应不同工况的矢量控制系统最优转子磁链给定值 Ψ_r^* 。

3 动态性能优化

根据式(4)确定变频调速系统不同工况下最优磁链给定, 可以最大额度地降低电动机可控损耗, 有效地优化稳态运行效率。然而对于高性能调速系统, 其动态响应性能同样需要关注。若前一时刻基于效率优化策略的系统稳态运行于弱磁状态时, 给定或负载信号突变使调速系统进入动态响应区域, 此时需要电磁转矩保持较高的变化率。考虑到实际电动机系统最大输入电流限制, 需对矢量控制系统解耦后的转矩电流分量和励磁电流分量进行限幅, 以避免过高的定子电流造成电动机系统损坏。

根据矢量控制原理可知, 转矩和磁链分量存在如下关系:

$$\begin{cases} T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r i_{sq} \\ \Psi_r = \frac{L_m}{1 + T_r p} i_{sd} \end{cases} \tag{5}$$

为确定转矩最快响应时转矩电流和励磁电流之间的关系, 对式(5)中的电磁转矩求微分:

$$\frac{dT_e}{dt} = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{sq}(t) i_{sd}(t) - T_e / T_r \tag{6}$$

式(6)所描述的为电磁转矩动态变化率与转矩电流和励磁电流之间的关系, 考虑到电动机定子侧最大允许电流 i_{max} 限制, i_{sd} 和 i_{sq} 存在如下约束:

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \leq i_{max}^2 \tag{7}$$

由式(7)可知, 当励磁电流和转矩电流满足式(8)时, 转矩变化率可以取得最大值。

$$i_{sd}(t) = i_{sq}(t) = i_{max} / \sqrt{2} \tag{8}$$

系统在动态过程中遵循式(8)进行转矩和磁链电流比重分配, 可使动态电磁转矩响应在系统安全允许的前提下达到最快, 有效地提升系统动态性能。

4 实验分析

效率优化感应电动机矢量控制系统全局框图如图 3 所示, 其中定子相电流 i_{sa} 、 i_{sb} 由电流霍尔传感器测得, 电动机转速 ω_r 由旋转编码器测得, 基于上

述测量信息结合电动机电压、电流模型设计状态观测器, 获得准确的转子磁链 Ψ_r 及其对应定相角 θ 。结合式(4), 根据实际转速和转矩需求确定最优转子磁链给定值 Ψ_r^* , 以优化调速系统稳态性能; 根据控制系统转矩电流给定 i_q^* 的变化情况判断系统是否处于动态过程, 若为动态过程则根据式(8)获得转矩电流和磁链电流比重分配关系, 用于提升系统动态响应性能。系统内环经 2 个 PI 调节器获得消除系统跟踪误差所需的期望电压矢量 $V_{\alpha\beta}^*$, 经 SVPWM 技术线性拟合出与期望电压矢量效果一致的脉冲序列, 并将其作用于三电平拓扑对应开关器件。实验用三电平感应电动机参数见表 1。

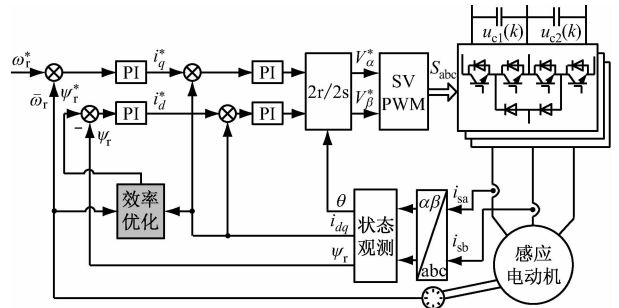


图 3 效率优化感应电动机矢量控制系统全局框图

表 1 实验用三电平感应电动机参数

参数	数值	参数	数值
电动机额定电压 U_N /V	660	定子电阻 R_s /Ω	0.525 7
电动机额定电流 I_N /A	24.5	转子电阻 R_r /Ω	0.301 7
额定功率 P_N /kW	22	定子电感 L_s /H	0.121 5
额定转速 n_N /(r·min ⁻¹)	1 470	转子电感 L_r /H	0.121 5
额定频率 f_N /Hz	50	互感 L_m /H	0.116 6
极对数 n_p	2		

实验所用控制系统结构如图 4 所示, 以 DSP TMS320F2812 作为主控器件, 主要进行直接功率控制算法计算; 采用 FPGA 进行协处理, 主要完成死区延时、AD/DA 接口、上位机通信等功能; CPLD 通过对 PWM 反馈信号校对以实现系统保护。

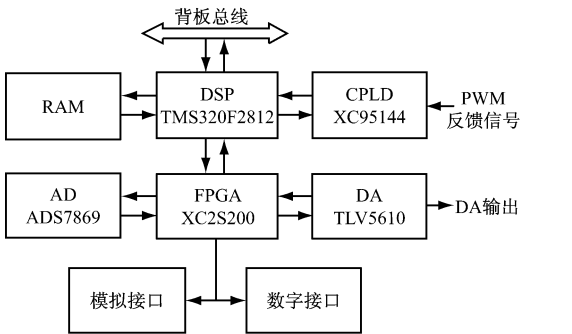


图 4 控制系统结构

图 5 为系统稳态效率优化实验波形,在 $t=4\text{ s}$ 时效率优化控制投入使用,转子磁链幅值 $|\Psi_r|$ 由 1.2 Wb 下降至 0.7 Wb ,此时系统电磁转矩 T_e 和电动机转速 n 均无明显跌落,与此同时电动机损耗 P_{loss} 由 2.5 kW 下降至 1.5 kW 。由此可见,效率优化控制用于降低电动机内部损耗和提升系统运行效率是可行的。

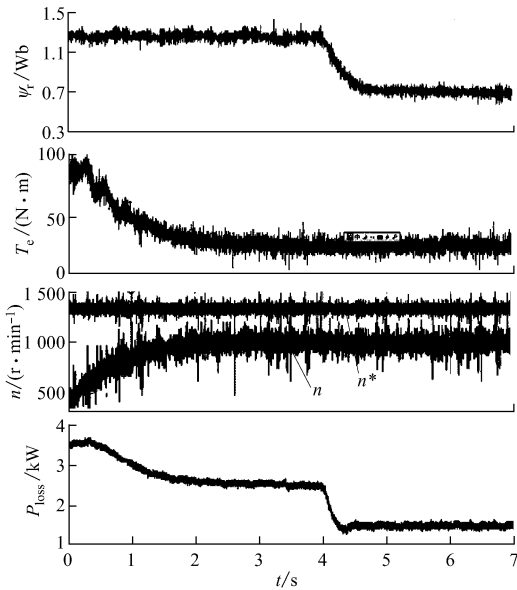


图 5 系统稳态效率优化实验波形

图 6 为系统动态响应实验波形,由速度曲线 n 可知,系统经历了加速运行、匀速运行、减速运行、爬行停车 4 个阶段,对应各个阶段系统电磁转矩 T_e 保持较高的动态响应,且定子电流 i_s 满足一定的电动机允许最大幅值限制,验证了转矩电流和磁链电流比重分配机制的优越性。

5 结语

结合矿山变频调速系统实际工况特点,提出一种考虑电动机损耗的感应电动机效率优化控制方案。基于 DSP+FPGA 搭建实验样机,实验结果表明,该优化控制方案在提高变频系统运行效率的同

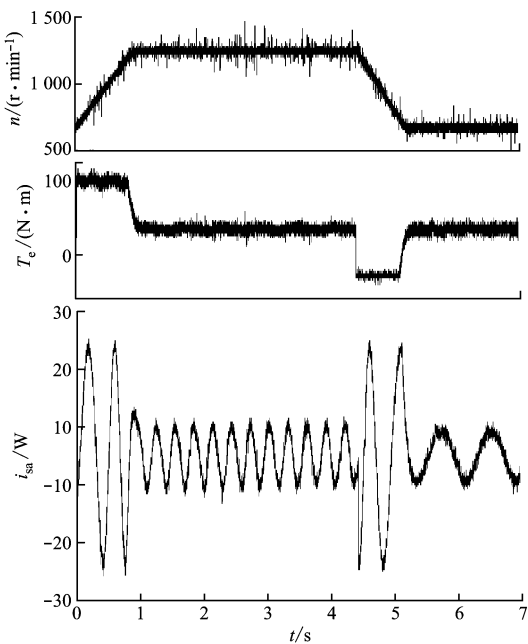


图 6 系统动态响应实验波形

时,兼顾考虑系统动态性能,为矿山变频系统进一步节能减排提供了一种切实可行的方法。

参考文献:

[1] 谭国俊,吴轩钦,李浩,等. Back-to-Back 双三电平永磁同步电动机矢量控制系统[J]. 电工技术学报,2011,26(3):36-42.

[2] 关恒祝. 交—直—交矿井提升传动系统中定子变压器的功率计算与探讨[J]. 工矿自动化,2012,38(5):26-29.

[3] 郭金龙. 提高主井提升能力的技术途径[J]. 工矿自动化,2012,38(8):112-114.

[4] 于伟光,祁新梅,郑寿森. 基于定子磁链规划的异步电动机最优效率控制[J]. 电气传动,2012,42(1):14-16.

[5] RODRIGUEZ J, BERNET S, STEIMER K, et al. A survey on neutral point clamped inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2010, 57(7): 2219-2230.