

内埋式永磁同步电机驱动系统的弱磁控制

陈 宁[†], 张 跃, 桂卫华, 喻寿益

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对内埋式永磁同步电机(IPMSM)系统高频运行困难这一问题, 提出了一种基于交轴电压的弱磁控制方法. 该方法基于磁场定向控制, 运用交轴电压控制直轴电流, 将交轴电压的期望值与反馈值作差, 计算得到弱磁电流误差信号, 对其进行PI运算得到弱磁电流. 由于在重负载时直流母线电压急剧下降, 引入定子空间电压矢量的有效工作时间这一变量来闭环调节所得到弱磁电流, 从而实现重负载情况下的弱磁控制. 建立了内埋式永磁同步电机系统仿真模型, 验证了算法的正确性. 将所提出的弱磁控制方法应用变频空调压缩机控制系统中, 开发了基于STM32F103R8T6 ARM的弱磁控制系统实验平台, 实验验证该控制算法可显著提高IPMSM的弱磁转速范围.

关键词: 内埋式永磁同步电机; 弱磁; 交轴电压; 空间电压矢量

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A

Flux-weakening control for interior permanent magnet synchronous motor drive systems

CHEN Ning[†], ZHANG Yue, GUI Wei-hua, YU Shou-yi

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: To deal with the difficulty in the high frequency operation of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) systems, a flux-weakening control method based on q -axis voltage is proposed. On the basis of the field-oriented control, the q -axis voltage is used to control the d -axis current, and the error signal of demagnetization current can be obtained by subtracting the feedback value from the reference value of the q -axis voltage. The demagnetization current can be obtained by using the PI operation of its error signal. To deal with the sharp drop in the DC bus voltage under heavy load, we introduce the effective work-time of the space voltage vector in the closed-loop for regulating the demagnetization current. The system model of IPMSM is built and the validity of the proposed flux-weakening method is verified by the simulation results. The proposed control method is applied in an inverter air-conditioner compressor control system. The experimental platform of flux-weakening control system is developed by STM32F103R8T6 ARM. It is shown that the speed range of IPMSM is extended by the proposed flux-weakening algorithm.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor; flux-weakening; q -axis voltage; space voltage vector

1 引言(Introduction)

内埋式永磁同步电机(interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)以其高可靠性、高功率因数、结构紧凑、调速性能好等优点, 广泛应用于变频空调、变频洗衣机、电冰箱、电力机车等调速驱动系统^[1-2]. 永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)采用永磁体励磁, 不能通过调节励磁改变励磁磁场. 研究新的弱磁控制方法满足宽调速范围需求, 已成为变频空调研究领域中的一个重要课题.

在工业应用中, 最常采用是使直轴电流为零的控制策略, 其控制方式简单, 易于实现, 但该方法

无法利用磁阻转矩, 不适合在电机高速运行时采用. PMSM系统的转速达到电机基速以后, 电机反电动势峰值接近电子端电压幅值, 若要再提高转速, 则必须采用弱磁控制策略^[3]. 在逆变器容量一定的情况下采用弱磁控制可以拓宽系统的速度范围; 相对于同样的调速范围, 降低了PMSM系统的额定容量和逆变器容量^[4]. 文献[5]提出了一种完全依赖PMSM数学模型的基于公式计算的弱磁控制方法, 这种方法适合理论研究, 很难直接在工程实际中应用. 文献[6]提出了改变转子磁链给定值的鲁棒弱磁算法, 但空调用低惯性电机难以获得较好性能. 文献[7]提出了梯度下降法, 但是这种方法弱磁区域的

收稿日期: 2012-10-07; 收修稿日期: 2013-01-03.

[†]通信作者. E-mail: ningchen@csu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074001); 广东省省部产学研结合专项基金资助项目(2011A090200097); 铁道部科技研究开发计划资助项目(2011J010-E); 湖南省科技计划资助项目(2013GK3009).

确定需要计算恒转矩曲线与电压极限椭圆的夹角, 计算量大实现复杂. 文献[8]提出了负直轴电流补偿算法, 从数字控制的角度, 分析了电流失调的原因, 利用限幅后的负直轴电流进行弱磁控制, 当直轴电流饱和后对交轴电流进行相应的弱磁补偿, 虽然有一定的弱磁扩速效果, 但是在电机高速运行区间损失了比较大的电磁转矩.

本文基于PMSM系统的磁场定向控制策略, 提出一种利用交轴(q 轴)电压来调节直轴(d 轴)电流设定值的弱磁控制方法. 在高速重负载运行区域, 考虑到直流母线电压随负载增加而下降的问题, 采用空间电压矢量调制技术中的有效电压矢量工作时间对弱磁电流进行修正, 该方法易实现, 且鲁棒性好.

2 IPMSM的数学模型与弱磁运行分析 (Mathematical model of IPMSM and analysis of the flux-weakening control operation)

2.1 IPMSM系统的数学模型(Mathematical model of IPMSM system)

建立基于转子磁场定向的旋转两相 d - q 坐标系的IPMSM的矢量控制模型, IPMSM在转子两相旋转 d - q 坐标系下的电压方程可表示为

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -r_s i_d + u_d + \omega_e L_q i_q, \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -r_s i_q + u_q - \omega_e (\psi_f + L_d i_d), \end{cases} \quad (1)$$

其中: L_d , L_q 分别为 d , q 轴电感, i_d , i_q 分别为 d , q 轴电流, u_d , u_q 分别为 d , q 轴电压, r_s 为定子相电阻, ψ_f 为转子永磁磁链, ω_e 为电角速度.

IPMSM的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q, \quad (2)$$

其中 p 为磁极对数.

2.2 最大转矩电流比控制(Maximum torque per amper control)

IPMSM的 d 轴电感小于 q 轴电感, 所以负的 d 轴电流可以增加电机磁阻转矩分量. 最大转矩电流比(maximum torque per ampere, MTPA)控制方法[9-10]的优点就是在基速以下的恒转矩区根据给定的转矩控制使得定子电流的幅值最小.

上述问题就可以等效为, 以式(2)作为约束条件, 求定子电流 $I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ 的极小值, 采用拉格朗日极值定理, 构造辅助函数

$$H = i_d^2 + i_q^2 + \lambda \{T_e - \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q\}, \quad (3)$$

其中 λ 为拉格朗日算子. 对式(3)求偏导并令其等于零, 可解得

$$i_d = \frac{\psi_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2}. \quad (4)$$

式(4)体现在 d - q 坐标轴下为一条双曲线, 如图1中 AB 所示. 此曲线上所有的点在给定电流矢量的基础上可以输出最大的转矩. 随着电机转速的升高, 电机转矩的输出能力逐渐减小[11], 电机将沿着边界曲线 BC 与最大转矩电压比曲线(maximum torque per voltage, MTPV)运行.

2.3 电压与电流极限环(Voltage and current limit)

由式(1)知, 当PMSM运行在稳态时, d - q 坐标系下的电压方程就可以表示成下式:

$$\begin{cases} u_d = r_s i_d - \omega_e L_q i_q, \\ u_q = r_s i_q + \omega_e (\psi_f + L_d i_d). \end{cases} \quad (5)$$

考虑到电压型逆变器的输出容量和电机的额定参数, 定子电流 I_s 和定子端电压 V_s 的约束方程可表示为

$$I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{sm}, \quad (6)$$

$$V_s = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq V_{sm}, \quad (7)$$

其中: I_{sm} 为逆变器可以承受电流的最大幅值, V_{sm} 为逆变器可输出电压的最大幅值.

通过控制 d 轴和 q 轴电流, 可以使得IPMSM在基速以上的恒功率弱磁区间运行时的定子端电压等于逆变器的极限电压, 即 $V_s = V_{sm}$. 如图1所示, 体现在 d - q 平面上, 电流约束关系是一个以 I_{sm} 为半径, $(0, 0)$ 点为圆心的圆. B 点为电流极限圆和MTPA曲线的交叉点, IPMSM电流指令工作在此点的速度 ω_b 就称为基速.

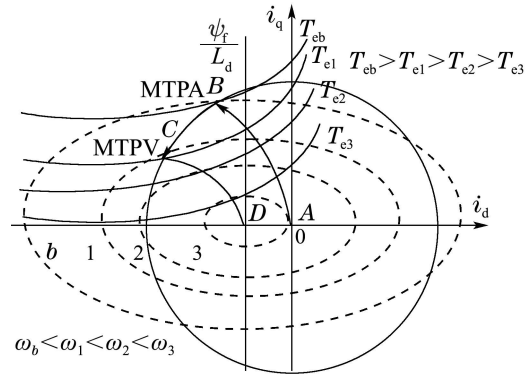


图1 IPMSM运行时电流、电压轨迹图

Fig. 1 State trajectories of the current and the voltage of IPMSM

忽略电机定子电阻的压降, 由式(5)得到 d 轴电流 i_d 为

$$i_d = \frac{u_q}{\omega_e L_d} - \frac{\psi_f}{L_d}. \quad (8)$$

同时电压约束椭圆又可以改写成定子电流 i_d 和 i_q 作为约束条件的不等式:

$$\frac{i_q^2}{(\frac{V_{sm}}{\omega_e L_q})^2} + \frac{(i_d + \frac{\psi_f}{L_d})^2}{(\frac{V_{sm}}{\omega_e L_d})^2} \leq 1. \quad (9)$$

由式(9)可得,在 d - q 平面上的任意工作点都必须在以 $(V_{\text{sm}}/\omega_e L_q)$ 为短半轴,以 $(V_{\text{sm}}/\omega_e L_d)$ 为长半轴的椭圆内。图1说明随着IPMSM转速的升高,以定子电流作为约束条件的椭圆区域越来越小。

综上, 本文在IPMSM基速以内采用最大转矩电流比控制. 在弱磁控制区域, 通过 q 轴电压控制 d 轴电流. 针对IPMSM重负载时直流母线电压急剧下降的问题, 采用电压空间矢量的有效工作时间这一变量来闭环修正弱磁电流, 防止电机失调. 通过采用不同的 d 轴电流控制策略实现电机的高速可靠控制.

3 基于交轴电压的弱磁控制方法(Flux weakening control method based on q -axis voltage)

3.1 弱磁控制算法设计(Design of the flux-weakening control algorithm)

以空调压缩机为实际应用对象的控制算法,要求其简单、易于实现和控制. 无速度传感器控制技术能够提高交流传动系统的简便性、廉价性和可靠性^[12], 因此建立无速度传感器的磁场定向控制的IPMSM弱磁算法结构如图2所示.

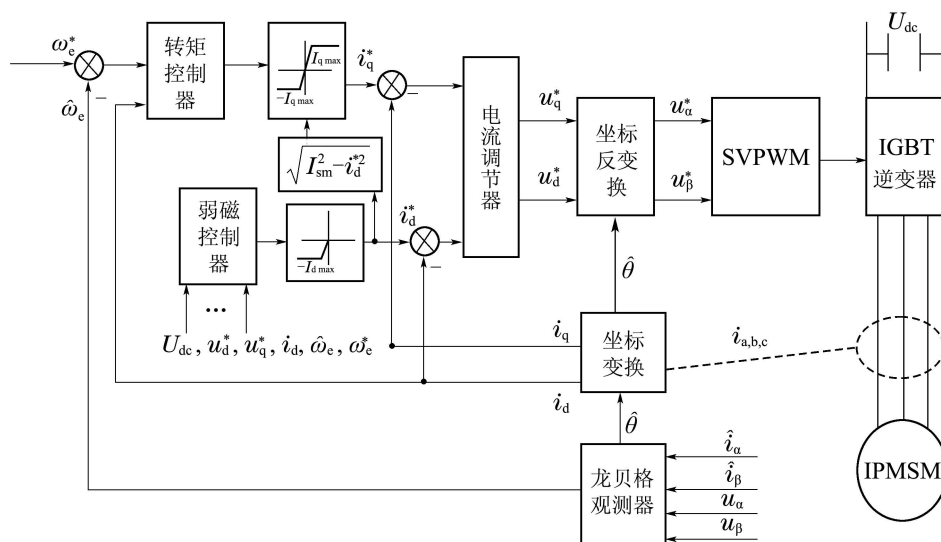


图 2 IPMSM控制系统弱磁算法框图

Fig. 2 Block diagram of the flux-weakening method of IPMSM control systems

图2中: SVPWM为空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation). 由图2所示, 在基速以下, 由转矩控制器的输出可得到 q 轴电流设定值 i_q^* , 此时 d 轴电流设定值 i_d^* 为0; 在基速以上, IPMSM的反电动势大小会越来越接近逆变器的输出极限值 V_{sm} , 为了减小IPMSM定子绕组上反电动势的大小, 需要获得一个产生的磁场方向与转子永磁磁场方向相反的负的弱磁电流 i_d .

式(8)表明: IPMSM稳态时用 q 轴电压 u_q 可控制 i_d . 为了得到 d 轴电流设定值 i_d^* , 任意时刻都须考虑 q 轴电压所能达到的最大值 u_{qm} , q 轴电压最大值应受下式约束关系:

$$u_{\text{qm}} = \sqrt{V_{\text{sm}}^2 - u_{\text{d}}^{*2}}. \quad (10)$$

此外,系统稳态时, q 轴电压最大输出值 u_{qm} 和重构设定值 u_q^* 又可以分别表示为

$$u_{\text{qm}} = \omega_e^*(\psi_f + L_d i_d^*) = (\hat{\omega}_e + \Delta\omega)(\psi_f + L_d i_d) + \omega_e^* L_d i_{de}, \quad (11)$$

$$u_{\text{q}}^* = \hat{\omega}_{\text{e}}(\psi_{\text{f}} + L_{\text{d}}i_{\text{d}}), \quad (12)$$

其中: i_{de} 为 d 轴电流误差, $i_{de} = i_d^* - i_d$.

定义 q 轴电压误差为

$$u_{\text{qe}} = u_{\text{qm}} - u_{\text{q}}^*. \quad (13)$$

由式(11)–(13), 将 q 轴电压的输出最大值与重构设定值相减, 求解可得到 d 轴电流设定值的误差量:

$$i_{\text{de}} = \frac{u_{\text{qe}} - \Delta\omega(\psi_{\text{f}} + L_{\text{d}}i_{\text{d}})}{L_{\text{d}}\omega_{\text{e}}^*}. \quad (14)$$

对误差量进行比例积分运算求得 d 轴电流设定值,推出 d 轴电流设定值可由下式求得:

$$i_d^* = K_p(i_{de} + K_i \int_0^t i_{de} dt). \quad (15)$$

图3为弱磁控制器框图, 将 d 轴电流 i_d , 速度设定值 ω_e^* 与速度反馈值 $\hat{\omega}_e$, 直流母线电压 U_{dc} , d 轴电压参考值 u_d^* , q 轴电压参考值 u_q^* , 作为弱磁控制器的输入, 控制器输出经限幅环节后得到 d 轴电流设定值.

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T}{U_{dc}} \sqrt{3} V_s \sin(\frac{\pi}{3} - \xi), \\ T_2 = \frac{T}{U_{dc}} \sqrt{3} V_s \sin \xi, \end{cases} \quad (21)$$

其中: ξ 为给定电压矢量的位置信息, U_{dc} 为直流母线电压。

2) 弱磁电流的修正.

由式(21)可知, 当 U_{dc} 降低时, 对于相同的给定电压矢量, 此时计算出来的 $T_1 + T_2$ 大于 T , 即

$$T_1 + T_2 > T. \quad (22)$$

由式(22)可知计算时间出现了饱和, 逆变器无法提供当前电机所需电压的准确值, 母线电压下降越多, 失调越明显。

为此, 引入有效电压矢量工作时间的闭环控制, 如图5所示, 针对母线电压下降的问题, 实时修正直轴电流, i_{dt}^* 为电压空间矢量闭环修正调节得到的弱磁电流, i_d^{**} 为最终的弱磁电流。当 $T_1 + T_2 > T$ 时, 开通图5改进的这部分弱磁单元; 当 $T_1 + T_2 < T$ 时, 不开通这部分弱磁单元。

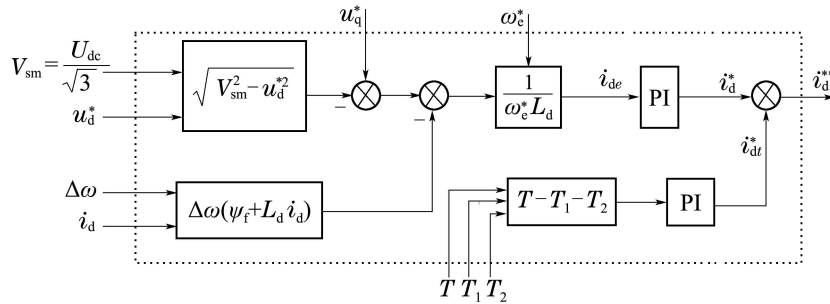


图5 改进的弱磁控制框图

Fig. 5 Improved flux-weakening control block

4 实验及结果分析(Experiment and result analysis)

4.1 系统仿真实验(Simulation results of the system)

为验证本文所提IPMSM弱磁控制方法的可行性, 用MATLAB/Simulink仿真软件对该算法进行仿真验证。电机参数为

$$p=3, r_s=0.49 \Omega, L_d=6.5 \text{ mH}, L_q=11.8 \text{ mH},$$

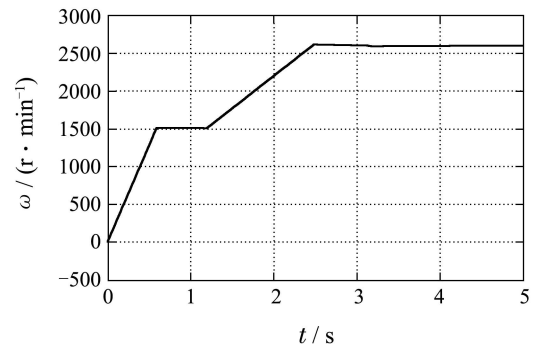
$$K_t=0.474, K_e=26.9 \text{ V}/(\text{kr} \cdot \text{min}^{-1}),$$

$$J=0.00063 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

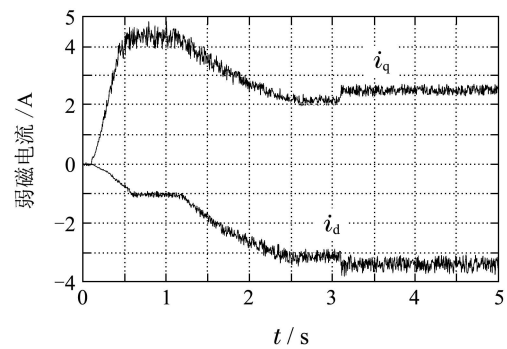
额定转速为1500 r/min; 主弱磁控制器PI控制参数为 $K_p=6, K_i=0.0005$ 。

图6为0s时速度从0 r/min渐升到1500 r/min, 1.2s后继续升速到2600 r/min, 3.15s时负载转矩从1 N·m跳变到1 N·m后电机转速, d, q 轴电流的响应波形, 由图6(a)可知由给定的速度控制方法, 电机在各点均能以稳定的速度运行, 仅在3.15s到3.3s之间速度有短暂的波动, 波动幅度约为50 r/min, 该控制算法对负载突变具有很好的鲁棒性。系统在1.2s之前采用最大转矩电流比控制, 1.2s以后切入弱磁控制, 由图6(b)知1.2s以后, d 轴电流负向增加, q 轴电流相应减小; 当负载转矩在3.15s时刻从1 N·m跳变到2 N·m后, 为了保证转

速的稳定, d 轴电流和 q 轴电流分别相应地增大。



(a) 转速响应曲线



(b) 弱磁电流

图6 转速上升、转矩阶跃变化时转速、电流的响应曲线
Fig. 6 Speed, current response curve when the speed rises and the torque step changes

4.2 系统实验平台开发(Experimental platform exploitation of the system)

实验平台的搭建基于某品牌的1.5匹变频空调, 空调压缩机为永磁同步电机. 压缩机额定转速4500 r/min, 其他参数同4.1节, 空调实验平台整体设计如图7所示.

实验平台的硬件主要包括主电路电源及电机控制模块、检测模块、通信模块、控制模块(以ST公司的32位 ARM 芯片 STM32F103R8T6 为核心、逆变器采用功率集成模块 TGF7NC60HD)等; 工

作台由计算机、数字示波器、接线板、J-Link仿真器等构成. 软件开发环境为IAR Systems公司开发的IAR EWARM, 采用C语言编写控制程序, 功能上实现了对变频空调压缩机的弱磁调速控制.

本文在1~5 s之前用最大转矩电流比控制算法, 5 s之后切入弱磁算法, 弱磁控制下10 s之前空调可以稳定运行在110 Hz. 实验中AD采样频率为1 kHz, 每个变量采集10000个数据, 实验结果的 d 轴电流、 q 轴电流、输出转矩和相电流波形分别如图8~10所示.

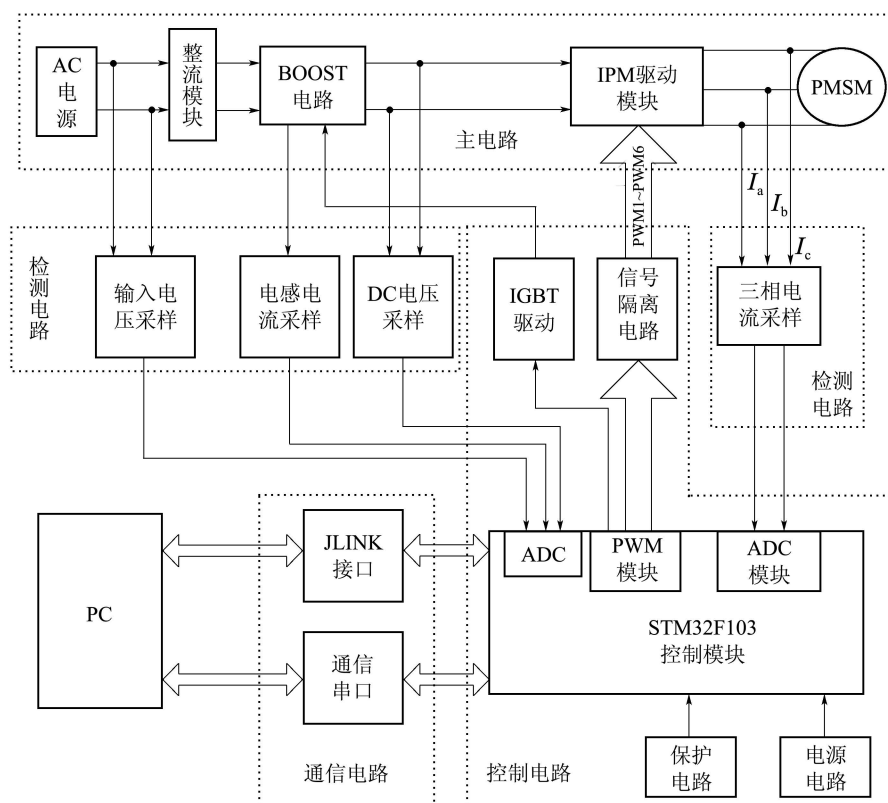


图7 变频空调用永磁同步电机弱磁控制系统实验平台

Fig. 7 Flux weakening control system experimental platform of IPMSM for air conditioner

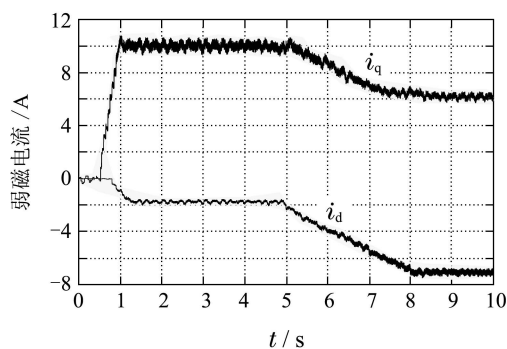


图8 弱磁电流曲线

Fig. 8 Curve of flux-weakening current

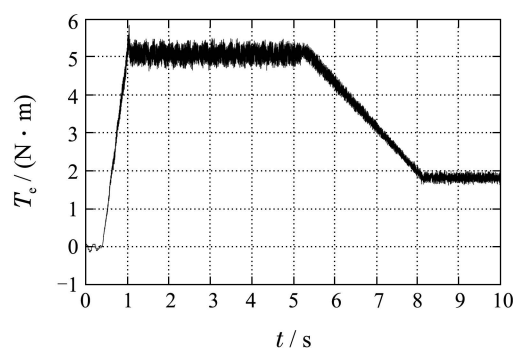


图9 转矩变化曲线

Fig. 9 Torque change curve

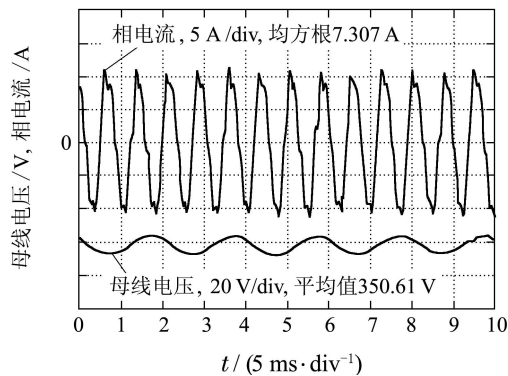


图10 变频空调110Hz运行时相电流与母线电压波形
Fig. 10 Phase current and DC bus voltage waveform for 110 Hz inverter air-conditions

从图8可知,在最大转矩电流比控制下 d 轴电流为 -2 A , q 轴电流为 9.8 A ,此时能输出最大的转矩;5s之后,随着速度的升高, d 轴电流分量迅速变大,达到 -7 A ,表明该算法具有较强的弱磁能力, q 轴电流相应减小,最后保持在 6.2 A 左右.由图9表明转矩的输出能力与弱磁强度成反比,随着转速的稳定,最终输出转矩稳定在约 $2\text{ N}\cdot\text{m}$.变频空调高频稳定运行时的相电流波形和直流母线电压波形如图10所示.

5 结论(Conclusions)

针对变频空调压缩机控制系统,本文提出了一种基于交轴电压的弱磁控制方法,并且运用空间电压矢量的有效工作时间闭环对弱磁电流进行了修正.在电机低速运行时,采用最大转矩电流比控制,以保证较大转矩输出;弱磁运行时,运用本文提出的弱磁算法控制电机,确保电机高频稳定运行.该算法实时性能好,且简单易于工程实现.在变频空调控制系统上的实验证明,该控制方法的正确性和可靠性.

参考文献(References):

- [1] KOWN Y C, KIM S M, KWON T S, et al. Improved speed control of permanent magnet [C] // *Proceedings of the 27th Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Orlando: IEEE, 2012: 938 – 945.
- [2] 唐朝晖, 丁强, 喻寿益, 等. 内埋式永磁同步电机的弱磁控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 68 – 72.
(TANG Zhaohui, DING Qiang, YU Shouyi, et al. Research of flux weakening strategy of interior permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Electric Machines and Control*, 2010, 14(5): 68 – 72.)
- [3] 黄明明, 林鹤云, 金平, 等. 混合励磁同步电机驱动系统弱磁控制 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 8 – 12.
(HUANG Mingming, LIN Heyun, JIN Ping, et al. Flux weakening control for driving system of hybrid excitation synchronous motor [J]. *Journal of Electric Machines and Control*, 2012, 16(4): 8 – 12.)
- [4] 喻寿益, 曾国庆, 高金生, 等. 37 kW 异步电机交流调速试验平台的研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 980 – 985.

(YU Shouyi, ZENG Guoqing, GAO Jinsheng, et al. 37 kW asynchronous motor AC speed regulation experimental platform [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 40(4): 980 – 985.)

- [5] PAN C T, SUE S M. A linear maximum torque perampere control for ipmsm drive over full-speed range [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(2): 359 – 366
- [6] KIM S H, SU S K. Voltage control strategy for maximum torque operation of an induction machine in the field weakening region [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, 44(4): 512 – 518.
- [7] 盛义发, 喻寿益, 桂卫华, 等. 轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 74 – 79.
(SHENG Yifa, YU Shouyi, GUI Weihua, et al. Field weakening operation control strategies of permanent magnet synchronous motor for railway vehicles [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2010, 30(9): 74 – 79.)
- [8] 朱磊, 温旭辉, 赵峰, 等. 永磁同步电机弱磁失控机制及其应对策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 67 – 72.
(ZHU Lei, WEN Xuhui, ZHAO Feng, et al. Control policies to prevent PMSMs from losing control under field-weakening operation [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2011, 31(18): 67 – 72.)
- [9] SIMANEK J, NOVAK J, CEMY O, et al. FOC and flux weakening for traction drive with permanent magnet synchronous motor [C] // *Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronic (ISIE)*. Cambridge: IEEE, 2008: 753 – 758.
- [10] KWON T S, SUL S K. A novel flux weakening algorithm for surface mounted permanent synchronous machines with infinite constant power speed ration [C] // *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Seoul: IEEE, 2007: 440 – 445.
- [11] LAGRIOUI A. Speed and current control for the pmsm using a luenberger observer [C] // *Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. Morocco: IEEE, 2011: 1 – 6.
- [12] 黄志武, 桂卫华, 年晓红, 等. 基于自适应观测器的无速度传感器感应电机控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 913 – 918.
(HUANG Zhiwu, GUI Weihua, NIAN Xiaohong, et al. Adaptive observer-based sensorless speed control of induction motors [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 913 – 918.)
- [13] DER BROECK VAN H W, SKUDELNY H C, SKANKE G V. Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1988, 24(1): 142 – 150.

作者简介:

陈宁 (1970–), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为永磁同步电机交流调速控制、复杂大系统分散鲁棒控制及工业大系统的建模与优化控制, E-mail: ningchen@csu.edu.cn;

张跃 (1987–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为永磁同步电机交流调速控制, E-mail: zhangyue@csu.edu.cn;

桂卫华 (1950–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工业大系统递阶和分散控制理论及应用、鲁棒控制、优化控制和现代交流调速控制, E-mail: gwh@csu.edu.cn;

喻寿益 (1940–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应控制、直接转矩控制、现代交流调速控制, E-mail: s-yushouyi@sina.com.