

文章编号: 1001-0920(2005)03-0349-04

电流型脉宽调制在异步电动机转速控制中的应用

张莉¹, 王旭², 刘宗富²

(1. 东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对电压型PWM存在的缺点, 提出一种电流型脉宽调制方法, 并在此基础上对异步电动机的转速控制系统进行分析。仿真结果表明, 这是一种电流跟随控制系统, 其动静态特性好, 转速闭环系统稳定性高, 调速范围宽, 最低转速可以为零。它允许对系统的所有参数包括速度调节器参数进行变动。

关键词: 电流型PWM; I/F 控制; 电流跟随控制

中图分类号: TM 344.4

文献标识码: A

Application of current source PWM in speed control of induction motor

ZHANG Li¹, WANG Xu², LIU Zong-fu²

(1. Automation Research Center, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: ZHANG Li, E-mail: zl_ty@163.com)

Abstract: Due to the disadvantages of voltage source PWM, a current source PWM is proposed, and a speed control system for induction motor based on current source PWM is analyzed. Simulation results show that the current tracking control system can get good static and dynamic performance, high stability of the closed-loop, wide range of speed regulation, and the lowest revolution with zero. It allows all parameters of system including the speed regulator to be changed.

Key words: current source PWM; I/F control; current tracking control

1 引言

在晶闸管时代, 电流型逆变器比较流行; 进入大功率晶体管时代后, 电压型逆变器成为主流。现有的变频调速系统中大多采用电压型脉宽调制(PWM), 但该方法用于异步电动机的转速控制时, 低速段转矩脉动大, 调速性能不好^[1]。目前改善低速性能的主要方法是采用电流控制^[2]。对电压型脉宽调制的仿真研究发现^[3], 低速时异步电动机的反电势很小, 交直交逆变器供电, 直流回路的电压高并且恒定不变。电压型脉宽调制, 特别是矢量控制和直接转矩控制

中最常用的空间矢量脉宽调制, 不可能将空间矢量加到几百条, 低速时管子的导通时间过长, 电流的变化既大又快, 产生的谐波转矩很大, 控制起来十分复杂和困难。

根据研究步进电机的经验^[4], 提出了电流型脉宽调制方法。异步电动机调速系统具有多变量、强耦合、求解困难的特点。本文通过计算机仿真研究, 验证了电流型脉宽调制在异步电动机调速中应用的有效性和可行性。仿真结果表明, 这种方法可有效地解决上述难题。如果采用电流跟随控制, 则斩波次数会

收稿日期: 2004-06-02; 修回日期: 2004-08-18

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(2002CB312201)。

作者简介: 张莉(1957—), 女, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 从事工业自动化、计算机控制系统等研究; 刘宗富(1929—), 男, 河南济源人, 教授, 从事电气传动、步进传动系统等研究。

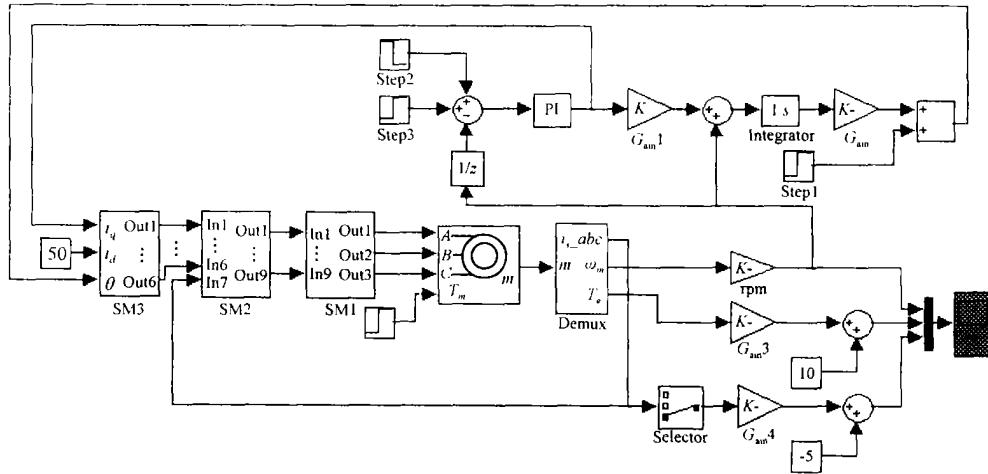


图1 转速闭环时的仿真电路

随着转速的降低而自动增加,从而较好地解决低速时的转矩脉动问题

2 电流型脉宽调制用于异步电动机转速控制的仿真模型

电压型脉宽调制在一般用途的逆变器中普遍采用 U/F 控制,但 U/F 控制存在着静态稳定性差等缺点,本文寻求使用电流型脉宽调制得到一种 I/F 控制的方法,以期使系统的性能指标得到改善

电流型脉宽调制应用于异步电动机转速闭环控制的仿真电路如图1所示,其中:SM1是IGBT逆变器和电流滞环调节器组成的子模块,给异步电动机供电;SM2是由6个电流给定信号和3个电流反馈信号组成的子模块;SM3是坐标变换模块。仿真使用的参数为:电机37kW,460V,60Hz,直流回路电压780V。当 $0 \leq t < 0.08$ s时,负载转矩为 $2\text{N}\cdot\text{m}$;当 $t = 0.08$ s后,负载转矩跃升为电机的额定转矩 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 。转速调节器的积分时间常数为2.6,比例常数为200。电路中引入速度反馈环节,目的是既作为斜坡发生器产生速度给定值,又作为电流给定产生所需的给定电流值。对精度没有严格要求

速度调节器的输出 I_q 为交轴电流,其作用是让电流自动适应负载的需要。 I_d 为直轴电流,是给定的最小电流,它可等于电机的空载电流。为进一步证明系统的鲁棒性,对 $I_d = 0 \sim 60\text{A}$ 进行仿真。结果表明, $I_d = 0$ 时系统的响应速度慢,速度降较大,恢复时间也较长,但电流的稳态值较小,电机的效率较高,电机处于节能运行状态

坐标变换是将给定的同步坐标系中的电流 I_d 和 I_q 变换为定子静止坐标系中的电流给定值 i_a, i_b 和 i_c ,即

$$i_a = I_q \cos(\theta) + I_d \sin(\theta), \tag{1}$$

$$i_b = I_q \cos(\theta - 0.667\pi) + I_d \sin(\theta - 0.667\pi), \tag{2}$$

$$i_c = I_q \cos(\theta + 0.667\pi) + I_d \sin(\theta + 0.667\pi). \tag{3}$$

其中 θ 表示同步坐标系的交轴 q 引前 A 相绕组轴线的夹角。采用这种坐标变换的优点是使给定的电流 I_d 产生励磁作用,其方向与励磁电流相同。由重叠原理可知, $\theta = 0$ 时由 I_q 产生的定子电流矢量与 A 相绕组轴线同方向,由 I_d 产生的定子电流矢量比 A 相绕组轴线滞后 90° ;这正是异步电动机所需要的。电机励磁电流是未知数,只能用空载电流去估计。系统的鲁棒性较好,允许进行估计。

图1中角度 θ 是定子电流矢量的转角,即

$$\theta = \omega t = 2\pi f dt \tag{4}$$

其中 ω 为定子电流矢量的角频率,它是转子角频率 ω_r 和滑差角频率 $\Delta\omega$ 之和。转子角频率来自电机的数学模型,滑差角频率的最大值为 $\Delta\omega_{\text{max}} = K_i I_{q\text{max}}$, $I_{q\text{max}}$ 为交轴电流的最大值,来自转速调节器的正负限幅。变换系数 K_i 是一个估计数值,可从额定转速和过载能力估算出滑差角频率的最大值 $\Delta\omega_{\text{max}}$,然后计算出 K_i 。

3 仿真实验结果与分析

3.1 转速开环控制

首先将电流型脉宽调制应用于异步电动机的转速开环控制。将图1电路用于异步电动机的转速开环控制时,去掉转速闭环单元即可。这时转速调节器饱和,其极限值构成了定子电流的给定,与 $G_{\text{aim}1}$ 相乘后得到转速的给定,从而构成电流和转速都恒定

的 I/F 控制

转速开环时的仿真结果如图 2 所示。通过分析可知, 这种转速开环控制与步进电机一样, 在低速时会产生明显的转速超调和振荡。原因是低速时不知道负载转矩, 只能用额定电流作给定, 但电流与负载不匹配, 所以转速产生的振荡比较大。

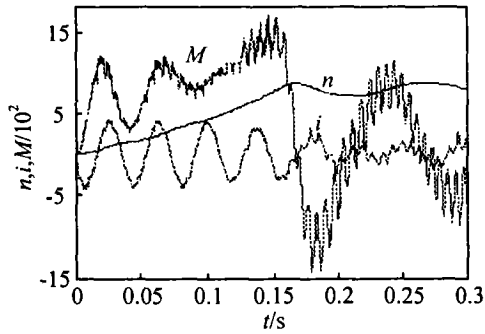


图 2 $n = 800 \text{ r/min}$ 时的转速开环控制

图 2 给定的转速为 800 r/min , 是比较高的。这时的给定电流是启动电流, 电流越大, 加速越快。当 $t = 0.1 \text{ s}$ 时, 转速上升到 360 r/min , 但由于电机反电势的作用, 电流开始失去跟随能力, 电流的最大值已小于 400 A ; 当 $t = 0.26 \text{ s}$ 时, 电流完全失去跟随作用, 变成由负载决定的需要值, 具有自适应的性质。电流完全失去跟随作用后, 电流型脉宽调制产生的电压波形与电压型脉宽调制在高速时产生的电压波形完全相同, 都是 120° 的方波。仿真进一步证明, 当给定的转速高于 1500 r/min 时, 转速比较稳定, 既没有超调也没有振荡。

本文通过仿真证明, 电流型脉宽调制能产生一种电流跟随作用, 只要直流电压足够高, 电机的电流就会紧紧跟随给定值, 而不受其他参数的影响, 鲁棒性好, 并与电机的结构参数无关。所以这种 I/F 控制是可行的, 但调速范围很小, 只能用于高速区和弱磁调速。

3.2 转速闭环控制

将电流型脉宽调制应用于异步电动机的转速闭环控制, 目的是希望得到性能优良的电流跟随控制, 扩大调速范围。转速闭环控制仿真采用矢量控制的某些环节^[5], 构成了双闭环系统。希望能与开环控制一样得到 I/F 控制, 而不产生矢量控制存在的弊端, 借助于转速的闭环作用产生定子电流给定和定子频率给定, 基本上不依赖于电机的结构参数, 不给调试造成过多的困难, 并且具有较强的适应性。

3.2.1 低速时的控制效果

采用电流型 PWM 的目的之一是解决低速时的

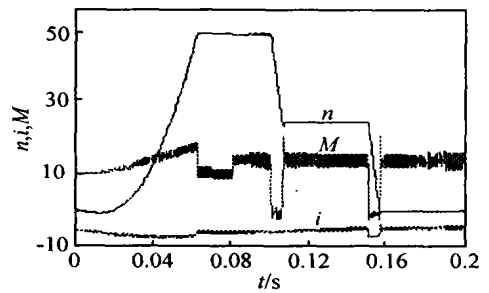


图 3 $n = 50 \text{ r/min}$ 时的转速闭环控制

转速控制问题。转速 $n = 50 \text{ r/min}$ 时的仿真结果如图 3 所示。为了便于比较, 图 3 中对坐标作了处理, 转矩和电流都乘以 0.02 , 并分别上移 10 个和下移 5 个单位。当 $t = 0$ 时, 转速设定值 $n_s = 50 \text{ r/min}$; 当 $t = 0.1 \text{ s}$ 时, $n_s = 25 \text{ r/min}$; 当 $t = 0.15 \text{ s}$ 时, $n_s = 0$ 。

从仿真结果可以看出, 转矩响应很快, 具有阶跃的性质。当转速达到 50 r/min 时, 转矩是阶跃下降的; 当 $t = 0.08 \text{ s}$ 时, 负载转矩从 $20 \text{ N}\cdot\text{m}$ 跃升为额定的 $200 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩是阶跃上升的。由于转矩的阶跃性变化, 转速变得比较平稳, 既不产生超调, 也不产生低频振荡, 转矩冲击产生的速度降很小, 恢复时间也很短。尤其是当转速为零时, 系统仍可正常工作, 这是用其他方法进行异步电动机的转速控制还没有很好解决的问题。

为证明系统的鲁棒性, 对直轴电流 I_d 以及所有能变动的系数都作了变动, 结果系统仍是稳定的。直轴电流 I_d 对转速降有较强的前馈作用, I_d 越小转速降越大。转速调节器的参数对动态性能影响很大, 小的积分时间常数和大的比例常数可减小动态转速降, 加快转速恢复过程, 但是动态过程太快, 转速中会产生明显的超调和振荡。采用电流跟随控制并加转速反馈的电路, 在低速范围内取得了意想不到的控制效果。

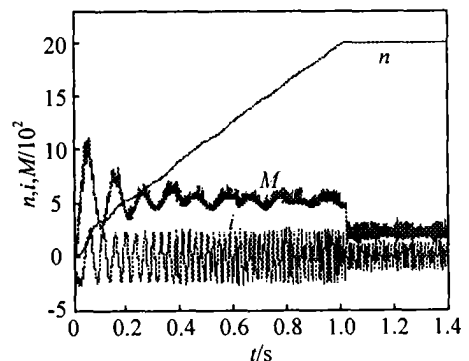


图 4 $n = 2000 \text{ r/min}$ 时的转速闭环控制

3.2.2 高速时的控制效果

在异步电动机的转速控制中,常常需要电机在高于额定转速的情况下运行.图4为 $n = 2000$ r/min时的仿真结果.由图可见,定子电流实测值随着转速的上升而逐渐减小,当电机的实际转速达到给定转速时,转矩阶跃下降,使得电机速度稳定在给定的转速值上,没有产生超调和振荡.这证明该系统在高速区仍可达到理想的调速效果.

4 结 论

本文提出一种电流型脉宽调制方法,电流型脉宽调制能产生电流跟随作用.将其应用于异步机的转速控制,取得了优良的控制效果.仿真证明这种调制方法调速范围很宽,既可在零速运行,又可在弱磁区工作.特别是这种 I/F 控制具有很强的鲁棒性,它与电机的结构参数无关,当转速调节器的比例常数和积分时间常数在1~10的范围内变化时,转速仍是稳定的.这种调制方法具有广阔的应用前景,值得进一步在理论上深入研究.

参考文献(References)

- [1] 侯轩,李永东,曾毅.空间矢量PWM的转矩脉动优化[J].*电气传动*,2002,32(增刊):47-50
(Hou X, Li Y D, Zeng Y. Torque ripple optimization of space vector PWM[J]. *Electric Drive*, 2002, 32(S): 47-50.)
- [2] 郑颖楠,傅诚.电压型可逆变频器的控制策略现状与发展[J].*电气传动*,2001,6:3-6
(Zheng Y N, Fu C. The present situation and development of control strategy in three-phase rectifier converters[J]. *Electric Drive*, 2001, 6: 3-6.)
- [3] 刘宗富.直流斩波的MATLAB仿真研究[J].*变频器世界*,2004,5:33-41
(Liu Z F. MATLAB simulation based on the DC chop[J]. *The World of Inverters*, 2004, 5: 33-41.)
- [4] 孙鹤旭.*交流步进传动系统*[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [5] 李冀昆,高仕斌,王涛.异步电动机直接转矩控制的仿真[J].*控制工程*,2004,11(增刊):194-197.
(Li J K, Gao S B, Wang T. Simulation and analysis on direct torque control for induction motors[J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(S): 194-197.)

(上接第348页)

参考文献(References)

- [1] 朱海,莫军.*水下导航信息融合技术*[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 邓自立,王建国.带模型误差系统自适应Kalman滤波现象虚拟噪声补偿技术[J].*信息与控制*,1989,18(1):1-4
(Deng Z L, Wang J G. Self-adapting Kalman filter virtual noise compensation technology of system with model error[J]. *Information and Control*, 1989, 18(1): 1-4.)
- [3] 颜东,张洪钺.抑制发散的新方法及其应用[J].*北京航空航天大学学报*,1994,20(4):392-396
(Yan D, Zhang H Y. A new design to control divergence and its application[J]. *Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1994, 20(4): 392-396.)
- [4] Li X L, Luo Z Q, Boss E. An interior point linear programming approach to two-scan data association[J]. *IEEE Transactions on AES*, 1999, 35(2): 474-489.
- [5] 徐国亮.机动目标跟踪算法[J].*情报控制指挥系统与仿真技术*,2002,8:42-56
(Xu G L. Algorithm of maneuvering target tracking[J]. *Information Control System and Simulation Technology*, 2002, 8: 42-56.)
- [6] Medel J M. *Optimal seismic deconvolution: An estimation based approach*[M]. New York: Academic Press, 1983.
- [7] Hall D L, Linas J L. An introduction to multisensor data fusion[J]. *Proc of the IEEE*, 1997, 85(1): 6-23.
- [8] Francisco J, Jimenez Rodriguez M. Multisensor and ADS data integration for en-route and terminal area air surveillance [A]. *FUSION 98 Int Conf* [C]. Nevada, 1998: 827-834.