

永磁无刷直流方波电机控制特性 及其伺服系统控制策略

郝晓弘 新方义

(甘肃工业大学电气工程与信息工程系, 兰州 730050)

摘要 在建立永磁无刷直流电动机数学模型的基础上, 分析了 BDCM 的控制特性及产生转矩脉动的原因, 并对其交流伺服系统控制策略进行了综合评价, 提出该系统今后发展的方向。

关键词 无刷直流电动机(BDCM) 转矩脉动 伺服系统

The Control Characteristic of Permanent Magnetic Brushless DC Motor and Control Strategy of Its Servo System

Hao Xiaohong Jin Fangyi

(Gansu University of Technology)

Abstract The mathematical model of permanent magnetic brushless DC motor is established, its control characteristic and reason for torque ripple is also analyzed, evaluates control strategy of its AC servo system, and points out the developing direction of the servo system in the future.

Keywords Brushless DC motor(BDCM) Torque ripple Servo system

1 概述

近年来,随着高性能永磁材料、微电子技术和电力电子技术特别是大功率半导体器件的快速发展,永磁同步电机得到迅速发展。由于其调速性能优越,克服了直流伺服电动机机械式换向器和电刷带来的一系列限制,且体积小、重量轻、效率高、转动惯量小、不存在励磁损耗问题,因而在高性能、高精度的伺服驱动等领域具有广阔的应用前景。永磁同步电动机按其工作原理、驱动电流和控制方式的不同,可分为具有正弦波反电势的永磁同步电动机(PMSM)和具有梯形波反电势的永磁同步电动机,后者又称为无刷直流电动机(BDCM)^[1]。BDCM 和 PMSM 相比,具有更明显的优越性:①反馈装置简单,不需要采用绝对位置编码器或旋转变压器;②控制结构更为简单,能使电机和逆变器各自的潜力得到更充分的发挥^[2]。因此,永磁无刷直流伺服电机的应用和研究受到广泛的重视。本文从建

立永磁无刷直流伺服电动机的数学模型出发,分析了转矩脉动的原因,并对其控制策略等进行了综合探讨。

2 无刷直流伺服电机的组成

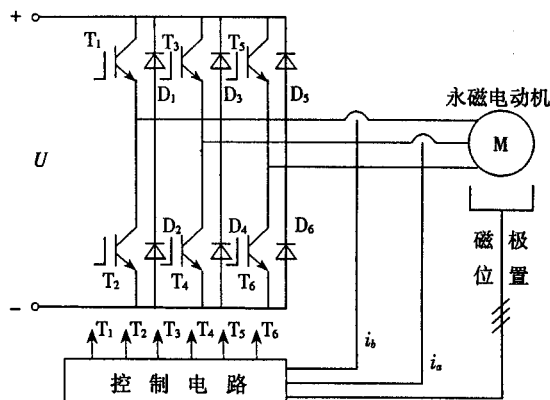


图 1 永磁无刷直流电动机的组成框图

用装有永磁体的转子取代有刷直流电动机的定子磁极,用具有多相绕组的定子取代电枢,用由固态逆变器和轴位置检测器组成的电

子换向器取代机械换向器和电刷,就得到了无刷直流电动机。无刷直流电动机一般由永磁同步电动机、转子位置检测器和电流控制的电压型逆变器组成,如图 1 所示。其相的理想反电动势波形是具有 120° 电角度平台的梯形波,并由 120° 方波电流(相电流)供电。其方波电流和梯形波反电动势如图 2 所示。

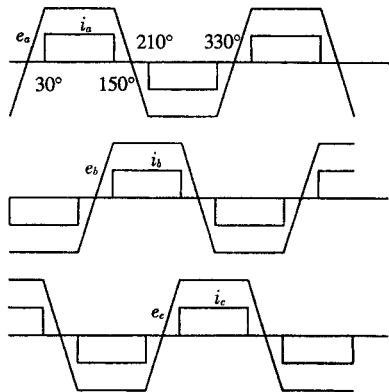


图 2 BDCM 的方波电流和梯形波反电动势

3 无刷直流电机的数学模型

BDCM 的特征是反电动势为梯形波,梯形波反电动势意味着定子和转子间的互感是非正弦的,将 BDCM 三相方程变换为 dq 方程是比较困难的,因为 dq 方程适用于气隙磁场为正弦分布的电动机。若将电感表示为级数形式且采用多参考坐标理论,也可进行这种坐标变换,但运算繁琐。若仅仅取其基波进行变换,计算结果误差大。相反,直接利用电动机原有的相变量来建立数字模型却比较方便,又能获得较准确的结果。为简化分析,以 1 台三相两极永磁电动机为例,并假设:(1)定子绕组为 60° 相带整距集中绕组,星形连接。(2)忽略齿槽效应,绕组均匀分布于光滑定子的内表面。(3)忽略磁路饱和,不计涡流和磁滞损耗。(4)不考虑电枢反应,气隙磁场分布近似为矩形波,平顶宽度为 120° 电角度。(5)转子上没有阻尼绕组,永磁体不起阻尼作用。

3.1 电压方程

定子三相绕组的电压方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, L_a 、 L_b 和 L_c 分别为三相绕组的自感,且 $L_a = L_b = L_c = L$, L_{ab} 为 A 相和 B 相绕组的互感;其它亦然,且有 $L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = M$ 。若定子三相绕组为 Y 连接,且无中性线,则有 $i_a + i_b + i_c = 0$, 可得 $Mi_a + i_b = -Mi_c$, 可得到 BDCM 的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.2 转矩方程

电磁转矩为: $T_{em} = P_n(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)/\omega$, 运动方程为: $T_{em} = T_1 + (\omega_r/P_n) + JP(\omega_r/P_n)$ 为产生恒定的电磁转矩,要求定子电流为方波,反电动势为梯形波,且在每半个周期内,方波电流的持续时间为 120° 电角度,梯形波反电动势平顶部分也为 120° 电角度,两者应严格同步。在任何时刻,定子只有两相导通,则有电磁功率为: $P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = 2e_s i_s$, 电磁转矩为: $T_{em} = P_e/\Omega_r = 2/\Omega_r \cdot e_s i_s$, 机械特性为: $n = U/(2K_\Phi \Phi_s) - 2R/(K_\Phi \Phi_s) T_{em}$, 机械特性和直流电动机类似,因而通过调节电源电压 U 和定子电流 i_s 均可实现调速,通过调节电枢电流达到转矩控制。

3.3 状态方程

可将电压方程写成状态方程的形式:

$$P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

4 BDCM 转矩脉动的原因

无刷直流伺服电动机中存在的转矩脉动问题,一直是交流伺服领域的最大困扰,使其无法实现更精确的位置控制和更高性能的速度控制,尤其是在直接驱动应用的场合,转矩脉动问题更为突出。引起转矩脉动的因素较多。

4.1 齿槽效应和磁通畸变引起的转矩脉动

在直流无刷电机中,任何电枢电流都不存在的情况下,当转子旋转时,由于定子齿槽的存在,定子铁芯磁阻的变化而产生的磁阻转矩就是磁槽转矩。磁槽转矩是交变的,与转子的位置有关,因此它是电动机本身空间和永磁励磁磁场的函数。在电机制造上,将定子齿槽或永磁体斜一个齿距,可以使齿槽转矩减小到额定转矩的1%左右。齿槽效应和磁通畸变引起转矩脉动的问题,文献^{[2][3]}作了详尽的分析,并从电机设计的角度提出了消除和改善方法,收到了很好的效果。

4.2 谐波引起的转矩脉动

在BDCM中,恒定转矩主要是由基波磁链和基波电流相互作用后产生的,更高次的同次谐波间产生的恒定转矩可以忽略不计,不同次谐波磁链和电流间不产生脉动转矩。但在实际电机中,灌入定子绕组的电流不可能是矩形波,因为电动机的电感限制了电流的变化率。反电动势与理想波形的偏差越大,引起的转矩脉动越大。非理想磁链波形对转矩动也有影响,当磁链波的水平波顶小于理想的 120° 时,将会产生转矩脉动;若磁链波的水平波顶大于 120° ,而电流仍为理想的 120° 方波,则不会产生脉动转矩。

4.3 相电流换向引起的转矩脉动

相电流换向是引起转矩脉的主要原因之一,对于换向转矩脉动,文献^[4]作过理论和仿真分析,但未提出克服的方法;文献^[5]提出用重叠换向法来抑制,但控制效果并不理想。文献^[6]在分析直流侧电流反馈控制和交流侧

电流反馈控制的换向转矩脉动产生的基础上,利用逆变器电压控制矢量优化调制的思想,提出了PWM控制的重叠换向法来消除换向引起的高速段转矩脉动。实验结果表明,非换向相电流在不同速度段都得到了控制,脉动较小,尤其对高速段换向转矩脉动的抑制,具有重大意义。

5 BDCM 交流伺服系统的控制策略

现代化控制理论的发展和应用促使了许多新型的交流伺服电机控制方法的诞生,由于交流伺服电机是一个多变量、非线性、强耦合的控制对象,仅仅采用一般的控制方法,很难达到较高的性能要求。

5.1 变结构控制

变结构控制由于具有响应速度快、对控制对象参数变化及外部扰动不灵敏、物理实现简单等优点,BDCM位置伺服方式下的运行大都采用变结构控制。变结构控制的开关模式即可由系统的传递函数导出,也可根据系统的最大速度、最大加速度等系统参数来设计,都会使系统的位置控制达到较好的效果。文献^[6]分析了BDCM交流伺服系统的开环模型,利用时间最优控制的思想,设计了变结构控制器,并给出了开关模式。其理论应用于由IGBT—PWM逆变器、115ST—CMG02A型无刷直流伺服电机、80C196KB单片机实现的控制器以及接口电路组成的实验系统,实验结果表明系统的定位精度较高。在有些情况下,当位置调节误差接近零位时,由于开关控制的效果,会使系统的机械传动装置发生颤振现象,这对系统的机械结构相当不利。为避免这种情况,可采用双模控制的策略,即在大偏差时采用变结构控制,在小偏差时采用PID控制等。

5.2 无传感器控制

从控制系统的成本、维护性、可靠性等方面来考虑,无传感器的传动系统对提高系统的可靠性和对环境的适应性具有更重要的意

义,为国内外学术界高度重视,成为近年的研究热点。对于无传感器控制技术,关键在于速度/位置的观测与估计,而观测和估计的方法又随着永磁电机的不同类型而有所不同。BDCM 更适于无传感器控制,因为在任意时刻,定子的三相绕组只有两相绕组同时有励磁电流,此时,另外一相绕组的感应电动势幅值较小,杂波较多。因此这种方法很难适用于低速场合,一般的调速范围为 1000~6000 r/min。文献^[7]利用三相反电动势中的三次谐波分量来检测,这种方法是基于三次谐波信号同转子磁通和负载情况保持有恒定的相位关系的原理,它对逆变器开关造成的噪声不敏感,因而可把系统的调速范围扩展到 100~6000 r/min。采用端电压检测法,结合 80C196 单片机对 BDCM 进行控制,实验结果表明,低速和高速时检测位置准确,系统运行良好。

5.3 智能控制

智能控制是控制理论发展的高级阶段,一般包括模糊控制、神经网络控制、专家系统。智能控制系统具有自学习、自适应、自组织功能等,能够解决模型不确定性问题、非线性控制问题以及其它较复杂的问题。严格来说,BDCM 是一个多变量、非线性、强耦合的研究对象,利用智能控制可以取得较满意的控制效果。

5.3.1 模糊控制和 PID 相结合的 Fuzzy-PID 控制

如何在较宽的调速范围内提高电流调节特性及减小力矩波动一直是交流伺服系统研究的焦点。现有的高性能交流伺服系统大都采用模拟控制,仅做到速度闭环,速度调节器大部分采用数字 PID 调节器,只不过有些系统对其进行了一定程度的改进,如变系数等。这对多变量、非线性、强耦合的交流伺服系统来说是一个局限性。模糊控制一直是近年来研究的热点,它不依赖于被控对象精确的数学模型,对系统动态响应有较好的鲁棒

性,但难以消除调节终了时系统的稳态误差,而 PID 控制方法可很好地解决这一不足,若将二者结合起来,则系统同时兼有两种方法的双重优点。把该控制方案应用于以 8098 单片机为核心,由 IGBT—PWM 逆变器、IFT5064—OAC 型三相无刷直流伺服电机等组成的系统上,实际运行结果表明,采用 Fuzzy-PID 复合控制,系统具有 Fuzzy 和 PID 控制的双重优点,响应快,速度无超调,低速运行平稳,调速范围可达 1:10000,定位精度高,在不同的负载下具有较强的鲁棒性^[8]。

5.3.2 神经网络和模糊控制相结合的复合控制

神经网络即具有非线性映射的能力,可逼近任何线性和非线性模型,又具有自学习、自收敛性;神经网络控制既可用于线性对象,也可用于非线性对象,对被控对象无需精确建模,对参数变化有较强的鲁棒性。神经网络一般和模糊控制相结合,通常有两种结合方式:一种是在大误差范围内采用模糊控制器来改善性能,提高快速性,同时在小误差范围内采用神经网络控制器达到精确定位的目的;另一种是利用神经网络来实现模糊控制规则的映射。采用前一种结合方式,即在误差大范围内采用模糊控制,在误差小范围内采用 BP 神经网络进行精确定位。模糊控制利用人脑的直觉经验推理出一系列控制规则,无需对被控对象精确建模,对伺服系统存在的未知因素和参数漂移不敏感,只是定位精度不高,易发生超调和振荡,但在误差大范围内收敛速度比神经网络控制器快。经实验证明,采用这种结合方式的伺服系统定位精度高、无超调。曾提出一种根据系统位置给定及误差状态对神经元学习速率进行模糊校正的方法,大大增强了自适应神经元的适应性,同时建立了学习速率自调整模糊控制规则,将模糊校正的神经元控制算法用于 BDCM 交流伺服系统。结果表明,系统调速范围可达 1:5000,消除了仅由单神经元控制器在

不同位置给定下位置响应的不一致性,动、静态性能指标优良,完全可以用于高精度定位系统。采用后一种结合方式,利用三层BP神经网络实现模糊控制规则的映射,建构一种模糊神经网络控制的电流调节器来控制非换向相电流,使其在不同速度段平滑,减小换向引起的转矩脉动,其方案用于一台无刷直流电机。结果表明,系统电流保持平滑、转矩脉动大幅度减小、系统响应快、抗干扰能力强、并具有较强的鲁棒性。

5.3.3 遗传算法和模糊控制的结合

近年来,遗传算法受到了国内外的重视,成为研究的热点之一。遗传算法是一种模仿生物进化过程的最优化方法,具有不要求梯度、能得到全局最优解、算法简单、可并行处理等优点。而模糊控制具有一些局限性,由于模糊控制器的设计参数很多(模糊控制规则及规则可信度、输入/输出的比例因子、输入输出变量各模糊子集的隶属度函数)以及模糊控制器本身的非线性等原因,至今仍缺乏有效通用的模糊控制器设计和调整方法,而只能依靠设计者的经验和反复调试。最近出现了一些用遗传算法优化模糊控制器设计参数的研究成果。采用遗传算法优化调整模糊控制器的隶属度参数并应用于倒立摆的控制,取得了较好的效果。若这一思想应用于交流伺服系统,即把用遗传算法优化隶属度参数后的模糊控制器应用于BDCM交流伺服系统,或这种模糊控制和其它算法相结合应用于交流伺服系统,从理论上来说,是完全切实可行的。

6 结论

针对BDCM交流伺服系统的特点,上述

控制策略虽然取得了较满意的控制效果,但都不是尽善尽美的。随着微电力技术和现代控制理论的迅速发展以及在电机控制中的成功应用,作为高性能交流伺服系统发展主要方向的BDCM交流伺服系统,困扰其性能提高的转矩脉动、电流控制等问题将会有有一个突破性的进展。智能化、全数字化是系统发展的主要方向,特别是模糊控制、神经网络、遗传算法和自学习控制的发展将使系统性能更加优越。

参考文献

- 1 朱震莲. 现代交流调速系统. 西安:西北工业大学出版社,1994
- 2 M Lajoie-Mazenc, B Nogarede, J C Fagundes. Analysis of Torque Ripple in Electronically Commutated Permanent Magnet Machines and Minimization methods. The International Conference Electrical Machines and Drive, 1989: 85 - 89
- 3 T - S Low T Lee, K Tseng, K Lock. Servo Performance of a BLDC Drive with Instantaneous Torque Control. IEEE Trans Ind Applicat, 1992; 28(2): 445 - 462
- 4 R Carlson etc. Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless DC Machines. IEEE Trans Ind Applicat, 1992; 28(3): 632 - 638
- 5 Y Murai. Torque Rippl Improvement for Brushless DC Miniature Motors. IEEE Trans Ind Applicat, 1998; 25(3): 441-450
- 6 吴忠, 王秀芝, 许镇琳. BDCM交流伺服系统变结构控制. 电气传动, 1996; (3): 25-31
- 7 田淳. 无位置传感器稀土永磁无刷直流方波电机调速系统. 第五届中国交流电机调速传动学术会议论文集, 1997
- 8 郝晓弘. 智能控制全数字交流伺服系统. 第五届中国交流电机调速传动学术会议论文集, 1997

(收稿日期:1999-04-19)

本刊 2000 年广告已开始征订, 欢迎联络!