

永磁无刷直流电动机转矩脉动及其抑制方法

纪志成¹, 姜建国¹, 沈艳霞¹, 薛 花²

(1. 中国矿业大学, 江苏徐州 221008; 2. 江南大学, 江苏无锡 214036)

Review of Torque Ripple and its Suppression in Permanent Magnet Brushless DC Motor

JI Zhi - cheng¹, JIANG Jian - guo¹, SHEN Yan - xia¹, XUE Hua²

(1. China University of Mining Technology, Jiangsu Xuzhou 221008, China;

2. Southern Yangtze University, Jiangsu Wuxi 214036, China)

摘 要: 依据永磁无刷直流电动机的数学模型及其转矩特性, 分析了转矩脉动产生的多种原因, 并介绍了各种有效的控制策略。

关键词: 永磁无刷直流电动机; 数学模型; 转矩特性; 转矩脉动

中图分类号: TM33 文献标识码: A

文章编号: 1004 - 7018(2003)05 - 0033 - 05

Abstract: According to the mathematical model and torque characteristics of permanent magnet brushless DC motor, the reasons that give rise to torque ripple have been analyzed in this paper. The control strategies for suppressing the torque ripple are described respectively.

Keywords: permanent magnet brushless DC motor; mathematical model; torque characteristics; torque ripple

1 引言

永磁无刷直流电动机以其体积小、性能好、结构简单、可靠性高、输出转矩大、动态性能好等特点而得到了越来越广泛的应用, 尤其是在机器人、航空航天、精密电子仪器与设备等对电机性能、控制精度要求较高的场合和领域, 无刷直流电机的应用和研究受到了广泛的重视^[1-2]。对于这类应用场合, 转矩脉动控制的优劣成为衡量无刷直流电机性能好坏的一项重要指标, 通常高性能伺服系统的低速转矩脉动应小于 3%。因此, 抑制转矩脉动成为提高无刷直流电机伺服系统性能的关键, 从而, 对于抑制或者消除转矩脉动的有效措施的研究具有十分重要的意义。

2 永磁无刷直流电动机的数学模型

以二相导通星形三相六状态为例, 分析无刷直流电机的数学模型及电磁转矩等特性。为了便于分析, 假定:

- (1) 三相绕组完全对称, 气隙磁场为方波, 定子电流、转子磁场分布皆对称;
- (2) 忽略齿槽、换相过程和电枢反应等的影响;
- (3) 电枢绕组在定子内表面均匀连续分布;
- (4) 磁路不饱和, 不计涡流和磁滞损耗。

则三相绕组的电压方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 为定子相绕组电压 (V); i_a 、 i_b 、 i_c 为定子相绕组电流 (A); e_a 、 e_b 、 e_c 为定子相绕组电动势 (V); L 为每相绕组的自感 (H); M 为每两相绕组间的互感 (H); p 为微分算子, $p = d/dt$ 。

根据式 (1) 可得电机的等效电路图, 如图 1 所示。

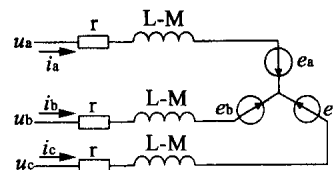


图 1 永磁无刷直流电机等效电路图

3 转矩特性

永磁无刷直流电动机的电磁转矩是由定子绕组中的电流与转子磁钢产生的磁场相互作用而产生的。定子绕组产生的电磁转矩表达式为

$$T_e = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

由式 (2) 可看出, 无刷直流电动机的电磁转矩方程与普通直流电动机相似, 其电磁转矩大小与磁通和电流幅值成正比, 所以控制逆变器输出方波电流的幅值即可控制无刷直流电动机的转矩。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, 梯形波反电动势的平顶部分也为 120° 电角度, 两者应严格同步。由于在任何时刻, 定子只有两相导通, 则电磁功率可表示为:

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = 2 E_s I_s \quad (3)$$

电磁转矩又可表示为:

$$T_e = P_e / \omega = 2 E_s I_s / \omega \quad (4)$$

永磁无刷直流电动机转矩脉动及其抑制方法

运动方程:

$$T_e - T_L - B \frac{d\omega}{dt} = Jp \quad (5)$$

其中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数; ω 为电机机械转速; J 为电机的转动惯量。

4 转矩脉动

按转矩脉动产生的原因,可分为:电磁因素引起的转矩脉动、电流换向引起的转矩脉动、齿槽引起的转矩脉动、电枢反应影响和机械工艺引起的转矩脉动等。前三者所占比重较大,对电机性能影响较大,因此,我们主要讨论前三种脉动产生的原因和抑制方法。

4.1 电磁因素引起的转矩脉动

电磁转矩脉动是由于定子电流和转子磁场相互作用而产生的转矩脉动,它与电流波形、反电动势波形、气隙磁通密度的分布有直接关系。理想情况下,定子电流为方波,反电动势波形为梯形波,平顶宽度为 120° 电角度,电磁转矩为恒值。而实际电机中,由于设计和制造方面的原因,可能使反电动势波形不是梯形波,或者波顶宽度不为 120° 电角度;或者由于转子位置检测和控制系统精度不够而造成电动势与电流不能保持严格同步;或者电流波形偏离方波,智能近似地按梯形波变化等,这些因素的存在都会导致电磁转矩脉动产生。

抑制电磁因素引起的转矩脉动的方法有:电机优化设计法、最佳开通角法、谐波消去法、转矩反馈法等。

4.1.1 电机优化设计法

对于永磁无刷直流电动机,磁极形状、极弧宽度、极弧边缘形状不同时,对输出电磁转矩有很大影响^[3]。当气隙磁通密度呈方波分布时,即反电动势波形为理想的梯形波时,极弧宽度增加,则电磁转矩增加,转矩脉动减小;当极弧宽度达到一定值时,电机出力最大,而转矩脉动为零。据此,可以通过选择合理的无电磁转矩脉动的电机磁极和极弧的设计方案,改变磁极形状,或增加极弧宽度来有效消除电磁转矩脉动。

4.1.2 最佳开通角法

通过优化电机设计可以消除转矩脉动,但也有不足之处,例如:由于电机绕组的电感限制,即使电机采用恒流源供电,在换流过程中电流不能突变,灌入定子绕组的电流波形不可能是矩形波;另外,对于实际电机,气隙磁场很难保持理想的方波分布,绕组反电动势波形也并非理想的矩形,这样就无法实现完全从硬件设计上消除电磁转矩脉动。因此,只能通过控制手段和策略来消除脉动。如采用最佳开通角的方法抑制电磁转矩脉动^[4,5],首先推导出转矩脉动与开通角之间的函数关系式,再求取电流最优开通角,使电流波形和反电动势波形的配合适当,通过控制最优开通角而达到削弱转矩脉动的目的。

4.1.3 谐波消去法

正是由于无刷直流电机定子电流和转子磁场的非正弦,使得其相互作用产生的电磁转矩含有谐波转矩,造成

了转矩的脉动。根据电磁转矩脉动是由相电流和反电动势相互作用的原理,可以考虑通过控制电流的谐波成分来消除由此产生的转矩波动。不同次电流谐波和反电势谐波的结合,会产生具有相同角频率的谐波转矩分量,其中以角频率为 6 的谐波转矩分量所占比重最大,也是希望抑制的转矩分量。采用给恒流源通以特定形式补偿电流的方法供电给电动机,产生和角频率 6 的谐波转矩分量大小相等,相位差 180° 的转矩,以抵消或抑制该谐波转矩分量,可使转矩的脉动量大大减少。

文献[6]对无刷直流电机的转矩特性进行了深入的研究,分析了由谐波引起的转矩脉动。在无刷直流电机中,理想条件下,同次的磁链谐波与电流谐波(3倍谐波除外)相互作用产生恒定的转矩,不同次谐波之间是不产生转矩的。但在实际情况下,由于电机的电感限制了电流的变化率,使得输入定子绕组的电流不可能是矩形波,而往往是梯形波。而且,磁链波形的水平波顶也会小于理想时的 120° ,使得不同次的磁链谐波与电流谐波之间产生了脉动转矩。

随着伺服系统对响应性能的要求越来越高,要产生上述最佳谐波电流的难度越来越大,使谐波消去法的应用受到了限制。

4.1.4 转矩反馈法

从谐波消去法的工作原理可知,谐波消去法的作用是有限的,因是开环控制方法,存在绕组阻抗不对称和所测电流有误差等干扰时,控制精度会受到影响。为了克服开环控制方法的缺点,提出从反馈角度考虑抑制转矩脉动的方法,即以转矩为控制对象,实现闭环控制^[8]。

转矩反馈法的基本原理是:根据位置和电流信号通过转矩观测器得到转矩反馈信号,再通过转矩控制器反馈给无刷直流电机主回路,实现对转矩的控制,从而消除转矩脉动^[9,10],其原理框图如图2所示。文献[10]提出了瞬态转矩控制法,其实质就是转矩闭环控制,该方法不仅能控制电机的平均转矩,也能控制电机的瞬态转矩,较好地抑制了磁通畸变和干扰带来的转矩脉动。

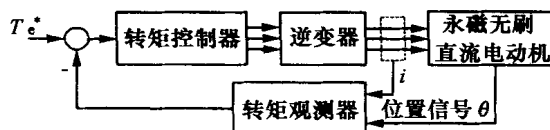


图2 转矩反馈法原理框图

转矩反馈法的关键是如何得到准确的转矩反馈信号,由图2可知,转矩反馈信号由转矩观测器产生,根据事先精确测量得到的永磁无刷直流电动机的气隙磁通和当前的电枢电流以及转子位置,通过逻辑判断和计算得到的。但也由此可见,转矩反馈法结构较为复杂,需预确定电机参数且算法复杂,实现比较困难。采用转矩观测器实现了低速时的转矩脉动,但还是受到了谐波转矩系

数的限制。

4.2 电流换向引起的转矩脉动

永磁无刷直流电动机工作时,定子绕组按一定顺序换流,由于各相绕组存在电感,阻碍电流的瞬时变化,每经过一个磁状态,电枢绕组中的电流从某一相切换到另一相时将引起电机转矩的脉动^[10]。抑制由电流换向引起的转矩脉动的方法有:电流反馈法、滞环电流法、重叠换向法、PWM 斩波法等。

4.2.1 电流反馈法

一般来说,电流反馈控制可以分为两种形式:一种是直流侧电流反馈控制,另一种是交流侧电流反馈控制。

(1) 直流侧电流反馈控制

其电流反馈信号由直流侧取出,主要控制电流幅值。由于直流侧电流反馈控制是根据流过直流电源的电流信号进行的,因此只需要一个电流传感器便可得到电流反馈信号。其基本原理为:在换向的动态过程中,反馈信号反映的是待建立的相电流的信息。在换向进行时,待建立的电流未达到给定值,则电流的控制负责使待建立的相电流的绝对值向增长的方向变化,直至换向完成。

通过计算和分析外加电压 U 和反电动势 E 之间的关系^[15],发现:当 $U < 4E$ 时,即高速时,电流控制手段不再有效。对此,可在控制环节中加入电流 PWM 控制器^[16],使直流侧电流反馈法同样适用于高速阶段。即在直流侧放置一个电流传感器,通过电流控制器控制 PWM 占空比,维持直流侧端电压不变,在低速和高速阶段自动选择不同的占空比,使得上升电流和下降电流的速率在低速或高速时始终保持一致,以保证电流换向时,非换向电流无脉动。因此,该方法适用于较宽的转速范围。

(2) 交流侧电流反馈控制

电流反馈信号由交流侧取出,此时,根据转子的位置来确定要控制的相电流,使其跟随给定。该控制是通过控制 PWM 信号所对应的逆变器的开关状态实现的。其基本原理为:在换向过程中,当非换向电流未到达给定值时,PWM 控制不起作用;当非换向电流超过设定值时,PWM 控制开始起作用,关断所有开关器件,使电流值下降,直至再闭合被关断的开关器件,使其值上升,以此往复,即可实现非换向相电流的调节,直至换向完成。

文献[13]采用的即为交流侧电流反馈控制方法,为避免换向时反电动势的影响,作者提出对电动机中性点电压和逆变器中性点电压的差值做出补偿。而在实际运行时,为了使相电流更好地跟踪参考电流,在电流控制环中加入了预测环节,通过电动机位置信号给出换向时所需的参考电流波形,由此可得到较为光滑的转矩波形,从而抑制了换向转矩脉动。

4.2.2 滞环电流法

在常用的电流控制方法中,除了电流控制 PWM 方式,还有滞环电流控制法。其基本原理是:在电流环中,采用 HCR (Hysteresis Current Regulator,滞环电流调节

器),通过比较参考电流和实际电流,使得换相时能够给出适合的触发信号。实际电流的幅值和滞环宽度的大小决定了 HCR 控制信号的输出。当实际电流小于滞环宽度的下限时,IGBT 器件导通;随着电流的上升,达到滞环宽度的上限时,IGBT 器件关断,使电流下降。实际电流可以是相电流,也可以是逆变器的输入电流。滞环电流法的特点是:应用简单,快速性好,具有限流能力。

滞环电流控制方法可分三种情况:由上升相电流控制的 HCR,由非换向电流控制的 HCR 和由三相相电流独立控制的 HCR。比较这三种方法抑制换向转矩脉动效果的实验证明:后两种情况的换向转矩特性相同,对换向转矩脉动具有较前者更好的抑制效果,适用于低速^[14]。

文献[15]也采用了滞环电流控制方法。主要是采用速度环和电流环的双闭环控制,速度环中带有自适应控制器,根据电机的实时转速给出相应的参考电流幅值,电流环负责给出理想参考电流,保证电流上升和下降的斜率一致,以此消除换相转矩脉动。由于自适应控制器的作用,滞环电流法抑制换向转矩脉动不仅适用于低速,在高速时也可取得令人满意的效果。

4.2.3 重叠换向法

电流反馈法、滞环电流法虽然解决了低速换向的转矩脉动问题,但通常在高速时效果不理想。现今,在高速段,抑制换向转矩脉动较成熟的方法是重叠换向法,其基本原理是:换向时,本应立即关断的功率开关器件并不是立即关断,而是延长了一个时间间隔,并将本不应开通的开关器件提前导通。传统的重叠换向法中,重叠时间需预先确定,但选取合适的重叠时间较为困难,且不能从最大程度上减小转矩脉动。

因此,在常规重叠换向法的基础上,引入定频采样电流调节技术,形成了采用 PWM 控制的重叠换向法^[16]。基本原理是:通过预先设定的 PWM 开关状态,在恒定的采样频率下进行电流调节,保持 $I_a + I_b = I_c = I$ (三相绕组两相导通 a 相与 b 相换向为例),与交流侧电流反馈控制方法类似,控制 PWM 信号所对应的逆变器的开关状态,只要 PWM 的开关频率足够高,就可将换向过程非换向相电流脉动抑制在较小的范围,对应的换向转矩脉动也得到了抑制。在 PWM 控制的重叠换向法中,重叠时间无需事先确定,可由电流调节过程自动调节,重叠区的大小与逆变器输入电压 U 和电机参数 (如定子绕组电感 L 、互感 M ,电枢电流 I 及反电动势 E 等) 有关。实验表明:非换向电流在不同的速度段都得到了控制,脉动较小,换向性能较高。

4.2.4 PWM 斩波法

PWM 斩波法与交流侧电流反馈控制方法较类似,即开关器件在断开前、导通后进行一定频率的斩波,控制换向过程中绕组端电压,使得各换向电流上升和下降的速率相等,补偿总电流幅值的变化,抑制换向转矩脉动。

文献[17]中,作者进一步采用了带 PWM 控制的永磁无刷直流电动机转矩脉动及其抑制方法

180°导通的方法,通过仿真得到频率与占空比最佳配合的PWM信号用于控制,该方法对电机高速段相电流换向引起的转矩脉动起到了很好的抑制作用。与重叠换向法相比,实验结果表明:该方法具有更小的转矩脉动,适合于精度要求更高的场合。

4.3 齿槽引起的转矩脉动

由于定子铁心槽齿的存在,使得永磁体与对应的电枢表面的气隙磁导不均匀,当转子旋转时,使得在一个磁状态内,磁路磁阻发生变化,从而引起转矩脉动。电磁因素和电流换向引起的转矩脉动是定子电流与转子磁场相互作用产生的,而齿槽引起的转矩脉动是定子铁心与转子磁场相互作用产生的,与定子电流无关。

抑制由齿槽引起的转矩脉动的方法主要集中于优化电机设计上,主要包括:斜槽法、辅助凹槽法和齿、槽宽度配合法等。

4.3.1 斜槽法

由于无刷直流电机的电枢磁场为非圆形跳跃式旋转磁场,理论和实践证明,斜槽或斜磁钢能抑制转矩波动^[18]。经过推导计算可以得出,斜槽使电机电磁转矩各次谐波的幅值均有所减小。例如:采用斜槽角度 $\alpha = 10^\circ$,电磁转矩的基波转矩幅值相当于直槽时的90%,3次谐波幅值相当于直槽时的30%,5次谐波转矩相当于直槽时的19%。斜槽还使定位转矩各次谐波的幅值都得到衰减,当 $\alpha = 10^\circ$ 时,各次谐波幅值均为零。因此,定子采用斜槽或转子采用斜极是减少齿槽转矩脉动有效的方法^[18-20],也是抑制齿槽转矩脉动应用广泛的方法之一。

当设计电机采用适合的斜槽角度(例如 10.9° 时,可以大大减少电磁转矩谐波分量的幅值,消除定位转矩,同时又不至于对电磁转矩的基波造成大的影响,减小电机的输出功率^[21]。实验表明,将齿槽斜过一个齿距,可使齿槽转矩减小的额定转矩的(1-2)%或更小。但值得注意的是,采用斜槽斜极对无刷直流电动机气隙磁感应强度平顶宽度有影响,从而对电磁转矩有影响。因此选择合适的斜槽角度是有效抑制齿槽转矩脉动的关键。

为避免斜槽法的不足,也有提出采用奇数槽或分数槽,使电动机的槽数与极对数之间无公约数,以削弱转子转动时引起的磁场波动,也有助于减少齿槽转矩脉动。

4.3.2 辅助凹槽法

采用齿面加辅助凹槽的方法,是削弱齿槽转矩脉动的另一方法^[20-21]。由谐波平衡法可确定:通过辅助凹槽,可增加齿槽转矩脉动的基波次数,次数越高,幅值越小。当齿面上加2个辅助凹槽后,除基波四倍次的谐波分量以外,其他谐波皆被消去,从而有效地减小了电动机磁阻转矩。

通过有限元法得到的计算结果表明:采用辅助凹槽法后,齿槽转矩脉动减小了85%^[22]。选取合适的辅助凹槽的尺寸,是最大程度的削弱齿槽转矩脉动的关键。文献[20]中,还提出了移动相邻磁极的位置来抑制齿槽转

矩脉动的方法,实验结果表明:该方法也可使齿槽转矩脉动减小85%。

4.3.3 齿、槽宽度配合法

采用磁性槽楔,适当控制齿或槽的宽度,以减小气隙磁阻的变化,削弱磁阻转矩脉动^[23-24],通过对齿、槽宽度的选择和齿槽转矩脉动的影响作详细的分析,证明合理选择齿槽宽度,控制气隙大小,可降低气隙磁阻的变化,减小由此产生的转矩脉动^[25]。

4.4 电枢反应和机械加工引起的转矩脉动

电枢反应对转矩脉动的影响主要有:(1)电枢反应使气隙磁场发生畸变,改变了转子永磁体在空载时的方波气隙磁感应强度分布波形,使气隙磁场的前极尖部分被加强,后极尖部分被削弱。该畸变的磁场与定子通电绕组相互作用,使电磁转矩随定、转子相对位置的变化而脉动。(2)在任一磁状态内,相对静止的电枢反应磁场与连续旋转的转子主极磁场相互作用而产生的电磁转矩因转子位置的不同而发生变化,从而产生转矩脉动。

适当增大电机气隙,设计磁路时使电机在空载时达到足够饱和,或者电机选择瓦形或环形永磁体径向励磁结构等方法都可削弱由电枢反应引起的转矩脉动。在有刷电机中,削弱电枢反应的主要方法是装设换向极和移动电刷。永磁无刷直流电机无法装设换向极,也无法装设电刷,但可通过电路让电机电枢绕组超前或滞后导通,就相当于移动电刷,实现削弱电枢反应影响的目的。

机械加工因素引起的转矩脉动有:制造电机所用材料的不一致性、转子的偏心、各相绕组的不对称等。可通过选择高质量材料,提高工艺加工水平,如装配的偏心、轴承阻力矩的不稳定引起的偏差、电枢绕组不对称偏差等方法来减小由机械加工引起的转矩脉动。

5 结 论

本文分类论述了永磁无刷直流电机转矩脉动产生的原因及其相应的抑制方法。可以看出:由电磁因素和电流换向引起的转矩脉动多是从控制理论和策略上加以抑制,而由齿槽和电枢反应引起的转矩脉动主要是通过优化电机硬件设计而实现的。

永磁无刷直流电机调速系统的关键是对转矩的控制,怎样将转矩脉动控制在尽可能小的范围内,怎样在直接驱动的应用场合避免转矩脉动引起的电机速度控制特性恶化,怎样进一步提高电机的转矩性能等等,还有许多问题需要深究与解决。上述消除转矩脉动的方法有些已广泛应用于实际,有些已取得了较满意的效果,但还是存在不足之处。对于上面的问题,相信随着新型控制策略的不断成熟和微电子技术的快速发展,消除转矩脉动的方法会愈加多样(如已有采用智能控制方法抑制转矩脉动^[26-27]),愈加完善(如已有采用电动机速度控制方案抑制转矩脉动^[28-30]),永磁无刷直流电机也会随之具有越来越广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Pillay P, Krishnan R. Modeling, simulation, and analysis of permanent - magnet motor drives, Part : The permanent - magnet synchronous motor drive[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1989, 25 (2) : 265 - 273.
- [2] Pillay P, Krishnan R. Modeling, simulation, and analysis of permanent - magnet motor drives, Part : The brushless DC motor drive[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1989, 25 (2) : 274 - 279.
- [3] Hwang SM, Lieu DK. Reduction of torque ripple in brushless DC motors [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1995, 31 (6) : 3737 - 3739.
- [4] Yoon - Ho Kim, Yoon - Sang Kook, Yo Ko. A new technique of reducing torque ripples for BDCM drives[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1997, 44 (5) : 735 - 739.
- [5] Yoon - Ho Kim, Byung - Guk Cho, Yo Ko. Generalized techniques of reducing torque ripples in BDCM drives[C]. Proceedings from IECON, 1994: 514 - 519.
- [6] BH Ng, NF Rahmant, TS Low, et al. An Investigation Into the Effects of Machine Parameters on Torque Pulsations in a Brushless Dc Drive[C]. Proceedings from IECON, 1988: 749 - 754.
- [7] Hung JY, Ding Z. Design of currents to reduce torque ripple in brushless permanent magnet motors[J]. IEE Proceedings - B, 1993, 140 (4) : 260 - 266.
- [8] Low TS, Lee T, Tseng K, et al. Servo performance of a BLDC drive with instantaneous torque control[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1992, 28(2) : 445 - 462.
- [9] Lee T, Low T, Tseng K. An intelligent indirect dynamic torque sensor for permanent magnet brushless DC drives[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1994, 41(2) : 191 - 200.
- [10] Batzel TD, Lee KY. Commutation torque ripple minimization for permanent magnet synchronous machines with Hall effect position feedback[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1998, 13 (3) : 257 - 262.
- [11] Tan Hui. Controllability analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC motors[C]. Proceedings from ICEMS, 2001: 1317 - 1322.
- [12] Chang - hee Won, Joong - Ho Song, Ick Choy. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor[C]. Proceedings from PESC, 2002: 985 - 990.
- [13] Berendsen CS, Champenois G, Pavione J. Commutation strategies for brushless DC motors influence on instant torque [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1993, 8(2) : 231 - 236.
- [14] Gwang - Heon Kim, Seog - Joo, Jong - Soo Won. Analysis of the commutation torque ripple effect for BLDCM fed by HCRPWM - VSI (brushless DC motors) [C]. Proceedings from APEC, 1992: 277 - 284.
- [15] Yilmaz Sozer, David A. Torrey. Adaptive torque ripple control of permanent magnet brushless DC motors [C]. Proceedings from APEC, 1998: 86 - 92.
- [16] Yoshida M, Murai Y, Takada M. Noise reduction by torque ripple suppression in brushless DC motor [C]. Proceedings from PESC Record, 1998: 1397 - 1401.
- [17] Yoshihiro Mural, Yoshihiro Kawase, Kazuharu Ohashi, et al. Torque ripple improvement for brushless DC miniature motors [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1989, 25 (3) : 441 - 450.
- [18] Min Dai, Ali Keyhani, Tomy Sebastian. Torque ripple analysis of a permanent magnet brushless DC motor using finite element method [C]. Proceedings from IEMDC 2001, 2001: 241 - 245.
- [19] Tomy Sebastian, Vineeta Gangla. Analysis of induced EMF waveforms and torque ripple in a brushless permanent magnet machine [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32 (1) : 195 - 200.
- [20] Sunia Murthy, Benoit Derouane, Buyun Liu, et al. Minimization of torque pulsations in a trapezoidal back - EMF permanent magnet brushless DC motor [C]. Proceedings from Thirty - Fourth IAS Annual Meeting, 1999: 1237 - 1242.
- [21] Sangmoon Hwang, Dennis K Lieu. Design techniques for reduction of reluctance torque in brushless permanent magnet motors [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1994, 30 (6) : 4287 - 4289.
- [22] Breton C, Bartolome J, Benito JA, et al. Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent - magnet brushless motors [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 36 (5) : 3819 - 3823.
- [23] Aengus Murray. Torque and EMF ripple reduction in brushless machines [J]. IEE Colloquium on Permanent Magnet Machines and Drives, 1993, 8(5) : 8/1 - 8/4.
- [24] Takeo Ishikawa, Gordon R. Slemon. A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1993, 29 (2) : 2028 - 2031.
- [25] Favre E, Cardoletti L, Jufer M. Permanent - magnet synchronous motors a comprehensive approach to cogging torque suppression [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1993, 29(6) : 1141 - 1149.
- [26] Fukuda T, Shibata T. Theory and application of neural networks for industrial control system [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1992, 39(6) : 432 - 489.
- [27] Ahmed R, Kotaru, Raj. Neural net - based robust controller design for brushless DC motor drives [J]. IEEE Trans. on Applications and Review, 1999, 29(3) : 460 - 474.
- [28] Kwok ST, Lee CK. Torque ripple reduction for brushless DC motor speed control system [C]. Proceedings from PESC, 1991: 702 - 706.
- [29] Lee CK, Kwok NM. Torque ripple reduction in BLDC motor velocity control systems using an optimal controller [C]. Proceedings from Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 376), 1993: 600 - 605.
- [30] Lee CK, Kwok NM. Torque ripple reduction in brushless DC motor velocity control systems using a cascade modified model reference compensator [C]. Proceedings from PESC, 1993: 458 - 464.

作者简介: 纪志成(1959 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力与电力传动。