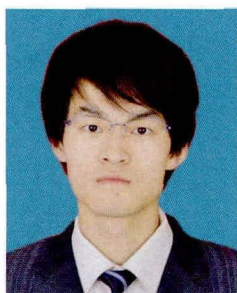


永磁同步电动机齿槽转矩的补偿方法

齿槽转矩是永磁同步电动机本体存在的固有问题,对电动机的运行及驱动系统有很大的影响。在矢量控制系统的基础上,利用注入交轴电流与直轴永磁体磁链耦合产生附加电磁转矩的方法,使附加电磁转矩与永磁同步电动机齿槽转矩幅值相等、相位相反,从而相互抵消来达到补偿齿槽转矩的目的,减小齿槽转矩对电动机及控制系统的影响。仿真和实验的结果表明该方法能够有效地抑制定位转矩带来的转速、转矩脉动。

吴剑林 王淑红 武 潇/太原理工大学电气与动力工程学院
王延涛/国网山东滨州供电公司



吴剑林/硕士研究生

关键词/Keywords

永磁同步电动机·
齿槽转矩·
注入电流·
补偿·

永磁同步电动机(PMSM)相对于感应电动机来说,具有体积小、质量轻、功率因数高、效率高、动作响应快以及可靠性高等优点,因此自从20世纪80年代开始,随着电力电子技术、微型计算机、稀土永磁材料和控制理论的飞速发展,永磁同步电动机在低容量的运动控制系统中得到广泛的应用。同时,永磁同步电动机的研究也进入了一个新的阶段。然而,永磁体和槽电枢贴片相互作用,不可避免地产生齿槽转矩,导致转矩波动,同时引起振动和噪声,影响系统的控制准确度^[1]。

对于永磁同步电动机齿槽转矩脉动减小的方法,主要有两大类:一是从电动机本体设计方面出发来削弱电动机齿槽转矩,包括定子斜槽或斜极、磁极形状优化、分数槽结构、极弧系数组合优化和转子分段等^[2-4];二是电动机制造完毕以后,在已经无法对电动机本身进行改进的情况下,通过控制策略来补偿电动机的

齿槽转矩^[5],从而提高其输出性能。

基于上述情况,本文提出了PMSM齿槽转矩的补偿方法。首先通过Ansoft对电动机的齿槽转矩进行计算,在利用傅里叶级数近似逼近PMSM齿槽转矩的基础上,对齿槽转矩进行谐波分析,找出齿槽转矩中幅值较大的基波和主要的高次谐波分量;其次采用注入交轴谐波电流的方法,使注入的交轴电流与直轴磁链耦合出与齿槽转矩幅值相等、相位相反的电磁转矩,从而达到补偿齿槽转矩的目的;最后在理论分析的基础上,进行Matlab/Simulink^[6-9]仿真,并在PMSM上进行实验。

PMSM参数与齿槽转矩分析

本文研究的PMSM是一台三相定子36槽/转子4极的电动机,其具体参数如表1所示。

表1 PMSM参数

参数	数值	参数	数值
相数 m	3	定子齿数 P_s	36
定子外径 D_{s0}/mm	155	转子极对数 P_r	2
定子内径 D_{si}/mm	98	转子内径 D_{ri}	38
气隙长度 g/mm	0.3	每相绕组匝数 N_{phase}	144
有效轴长 l_a/mm	90	—	—

PMSM齿槽转矩的周期以机械角度表示为

$$\theta_{\text{cog}} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ \quad (1)$$

图1为利用Ansoft计算得到的齿槽转矩波形。图中, θ 为以机械角度表示的转子位置角,并且齿槽转矩周期与式(1)中的计算结果相同。另外,PMSM的齿

山西省自然科学基金(20130110035-1)。

槽转矩峰峰值达到了2 N·m。通过观察，图1的PMSM齿槽转矩中存在大量的高次谐波分量，为了对其建立高度逼近的数学表达式进行了傅里叶谐波分析，分析结果如图2所示，图中 k 为谐波次数。

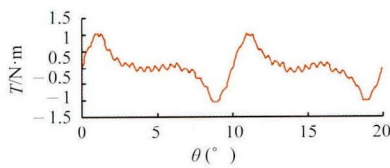


图1 PMSM齿槽转矩

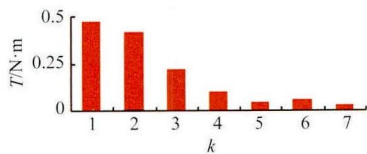


图2 齿槽转矩谐波分析

表2详细地给出了PMSM齿槽转矩主要谐波分量的幅值、与基波分量的比值以及相位角。

表2 齿槽转矩谐波分析

k	谐波幅值/N·m	谐波与基波幅值比 (%)	谐波分量相角 (°)
1	0.472 62	100	-78.71
2	0.417 88	88.42	52.22
3	0.216 16	45.74	59.44
4	0.095 25	20.15	29.21
5	0.042 16	8.92	-103.31
6	0.058 81	12.44	-127.99
7	0.028 61	6.05	106.81

通过表2给出的数据可以看出，齿槽转矩谐波分量很大，其中最主要的是2次谐波，3~7次谐波的幅值也不可忽略，则PMSM齿槽转矩的表达式为

$$T_{\text{cogging}} = \sum_{n=1}^7 T_n \quad n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$
$$T_n = T_{cn} \sin(6kP_n\theta_n + \zeta_n)$$

(2)

式中， T_{cn} 为齿槽转矩各次谐波分量的幅值； ζ_n 为各次谐波分量的相角； k 为谐波的次数； θ_n 为以电角度表示的转子位置角。其中 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ； $k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。

齿槽转矩补偿控制方法

PMSM在dq轴坐标系下的数学模型表达式为

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q + R_a i_d \\ U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d + R_a i_q \end{cases}$$

(3)

其中

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases}$$

式中， ω 为转子角速度； R_a 为定子电阻； i_d 、 i_q 分别为d、q轴电流； Ψ_d 、 Ψ_q 分别为d、q轴磁链； L_d 、 L_q 分别为d、q轴电感； Ψ_f 为永磁体在定子上的耦合磁链。

则电动机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)$$
$$= \frac{3}{2} p [\Psi_f i_d + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

(4)

式中， p 为极对数。

由式(4)可以得出，对于PMSM而言，永磁体的励磁磁链和交、直轴电感确定后电动机的转矩取决于定子电流空间矢量；而定子电流空间矢量的大小取决于 i_d 和 i_q ，即控制交、直轴电流，因此可以控制电动机的转矩，实现矢量控制。

本文所用矢量控制采用 $i_d=0$ 的方法，转矩 T_e 和 i_q 呈线性关系，只要对 i_q 进行控制，就可以控制转矩，其表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_f i_q$$

(5)

采用 $i_d=0$ 的矢量控制方法，根据电磁转矩与q轴电流的线性关系，求解附加的q轴注入谐波电流 i_{qc} ，使注入的谐波电流 i_{qc} 产生的附加电磁转矩谐波分量与齿槽转矩的幅值相等、相位相反，即可以相互抵消，从而达到抑制转矩脉动的目的，表达式为

$$T_{ec} = \frac{3}{2} p \Psi_f i_{qc} = -T_{\text{cogging}}$$

(6)

则补偿电流为

$$i_{qc} = -\frac{2}{3p\Psi_f} T_{\text{cogging}}$$

(7)

图3为加入补偿电流的PMSM矢量控制系统框图。

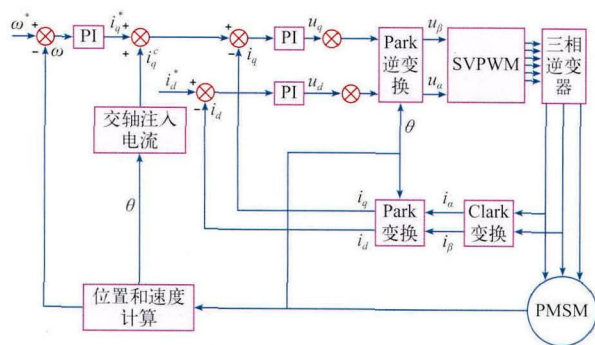


图3 齿槽转矩补偿控制框图

仿真结果分析

根据图3所示的齿槽转矩谐波电流注入补偿法建立Matlab/Simulink仿真模型。仿真时,给定转速为额定转速 $n=1\ 500\text{ r/min}$,负载为额定负载 $T=14\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

图4和图5为补偿前后的转速仿真波形。补偿前PMSM的转速随着齿槽转矩的影响脉动;补偿后转速脉动消失。

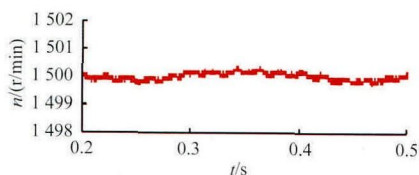


图4 补偿前转速波形曲线

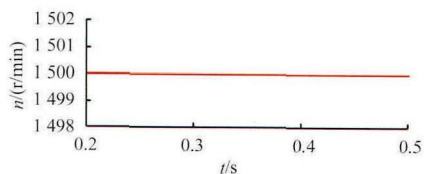


图5 补偿后转速波形曲线

图6和图7为电动机负载运行时,补偿前后的转矩仿真波形。补偿前转矩脉动的峰峰值达到 $2\text{ N}\cdot\text{m}$;补偿后转矩脉动峰峰值减小到 $0.8\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动在补偿后有明显的减小。

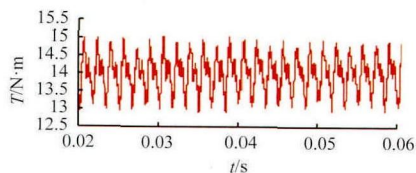


图6 补偿前转矩波形曲线

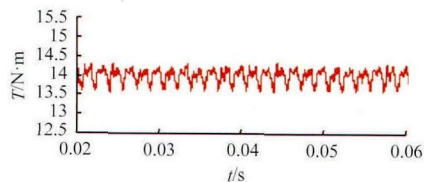


图7 补偿后转矩波形曲线

图8和图9为补偿前后的电流波形,以A相电流为例进行分析。在实施补偿方法前,电流波形为正弦波;补偿后,由于注入了交轴谐波电流,使得最后的电流产生波形畸变。

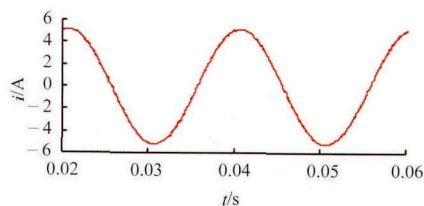


图8 补偿前电流波形曲线

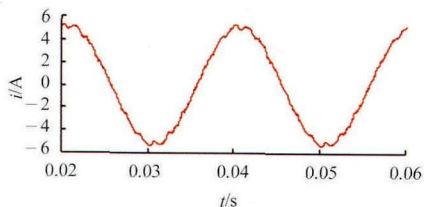


图9 补偿后电流波形曲线

实验结果分析

为了验证理论分析和仿真结果的正确性,对实验室一台额定功率为 2.2 kW 的PMSM进行实验。PMSM控制器和样机如图10和图11所示。

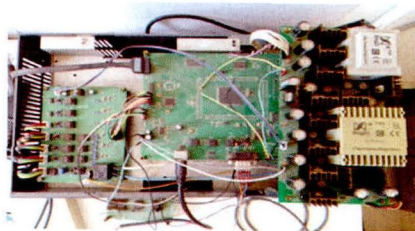


图10 PMSM控制器

实验室控制器采用美国德州仪器(TI)的电动机控制专用芯片TMS320F2812,以智能功率模块(IPM)作为功率器件,并辅以电流采样调理电路、驱动电路和检测及保护电路,通过DSP的C语言编程,并且以TDS560USB PLUS连接控制器与

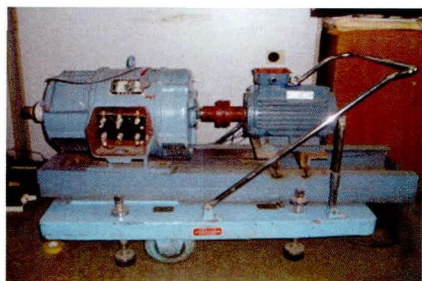


图11 PMSM样机

实验用计算机, 用eCan记录处理实验数据, 实现PMSM的全数字控制系统。

实验中电动机给定转速为60 r/min, 图12和图13分别为实测补偿前后电动机转速的波形。由图可知, 补偿前转速波动比较大; 补偿后转速的波形得到明显的改善。

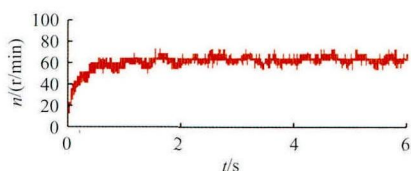


图12 实测补偿前转速波形

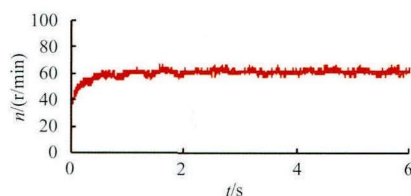


图13 实测补偿后转速波形

结束语

本文综合分析了PMSM本身固有的齿槽转矩, 利用注入交轴谐波电流和直轴磁链耦合产生附加转矩的方法, 使其与齿槽转矩幅值相等、相位相反来补偿齿槽转矩, 并且进行了Matlab/Simulink仿真和实验研究。仿真和实验结果表明: 本文所采用的方法能够有效地抑制PMSM齿槽转矩带来的

转矩和转速脉动, 从而改善电动机运行性能, 减小齿槽转矩给电动机及电动机控制器带来的负面影响。

参考文献

- [1] 王秀和, 等. 永磁电机 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011: 75-79.
- [2] 王淑红, 武潇, 高泽梅, 等. Taguchi法在内嵌式永磁同步电动机中的应用 [J]. 太原理工大学学报, 2014, 45 (5): 618-622.
- [3] Bianchi N, Bolognani S. Design technique for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2002, 38 (5): 1259-1265.
- [4] Koh C S, Yoon J S. New cogging torque reduction method for brushless permanent-magnet motors [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2003, 39 (6): 3503-3506.
- [5] 王爱龙. 无刷双馈电机的数学模型和有限元仿真 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [6] 张红生, 吴炳娇. 永磁同步电动机本体数学模型在MATLAB下的仿真 [J]. 自动化与仪器仪表, 2012 (2): 134-138.
- [7] Williason S. Generalized theory of the brushless doubly-fed machine, Part1: analysis [J]. IEE Proc. Electr. Power Appl., 1997, 144 (2): 111-122.
- [8] 于艳君, 柴凤, 程树康, 等. 内置式永磁同步电动机非线性模型研究 [J]. 微特电机, 2009 (4): 1-3.
- [9] 胡建辉, 周继斌, 陈霞. 无刷直流电机的理想与非理想定位力矩及其综合抑制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (22): 153-157.

(收稿日期: 2015-01-03) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告