

永磁无刷直流电机转矩波动及其抑制的探讨

刘文曾捷

(西安交通大学, 710049, 西安)

摘要 研究了永磁无刷直流电机的转矩特性 根据定子电流和转子反电势推导出了转矩表达式, 根据反电势和电流的各次谐波分量之值可以计算出转矩的各次谐波分量 对于一台给定的电机, 只要其反电势一定, 通过优化定子电流就可以消除主要的转矩谐波分量, 从而达到减小转矩波动的目的

关键词 永磁 无刷直流电机 转矩波动

中国图书资料分类法分类号 TM 921. 01

在高性能的伺服驱动和机器人应用中, 由于无刷直流电机具有巨大的优点, 因而它正在越来越多地替代传统的有刷直流电机 然而, 在要求平滑运行的场合, 特别是在低速情况下, 转矩波动是一个十分令人头痛的问题 因而在无刷直流电机的研究和应用过程中, 转矩波动的抑制这一课题正在引起众多研究和和使用人员的广泛关注 一般说来, 转矩波动的抑制可以通过特殊的电机设计来实现, 如增加电机的定子相数、优化电机的反电势波形等, 也可以通过驱动控制来实现 本文主要研究后者

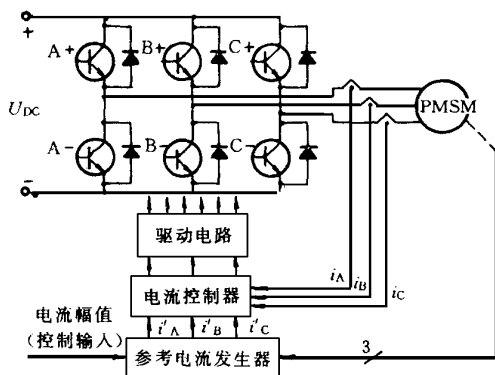
一台典型的无刷直流电机是由一台电流控制的三相 PWM 逆变器供电的永磁同步电动机构成的, 通过转子位置的检测来实现永磁同步电动机的自控式运行 在这种驱动方式中, 电磁转矩是定子磁势和转子磁场之间的相互作用而产生的, 而定子磁势和转子磁场又分别是由馈送电流波形和电机结构所决定的 定子磁势和转子磁场分布的不规则导致了不希望产生的转矩波动

本文研究了反电势波形一定的永磁同步电动机在加入不同的定子电流时的转矩特性, 提出了从优化定子电流波形来减小转矩波动的方法

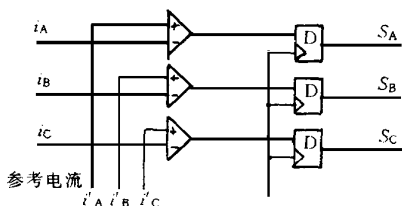
本文讨论的永磁无刷直流电机的原理框图如图1a 所示 图中的参考电流即为优化后的定子电流, 它可以为任何形状; 电流幅值是一种直接影响电机平均转矩的控制输入

电流控制采用同步采样控制原理, 其原理框图如图1b 所示 测量电流(i_a 、 i_b 、 i_c)通过3个比较器与参考电流(i_a 、 i_b 、 i_c)相比较 比较器的输出信号以恒定频率采样, 从而产生逻辑信号 S_A 、 S_B 、 S_C , 这3个信号用来决定逆变器的导通状态 逆变器的6个开关晶体管以高频率按一定

顺序导通,从而使定子电流尽可能与参考电流接近



(a) 电机的原理框图



(b) 同步采样电流控制的原理框图

图1 永磁无刷直流电机驱动

1 转矩计算的公式推导及转矩波动的抑制

1.1 转矩计算的公式推导

这里研究的是无中性线Y形连接的三相永磁同步电动机,它代表了许多应用场合中的绝大多数无刷直流电机。为了简化计算,作如下假设:

- (1) 电枢反应相对于励磁来说可以忽略;
- (2) 定子电流对称且无偶次谐波;
- (3) 定子绕组对称;
- (4) 转子磁场分布关于极轴对称;
- (5) 反馈电流和相应反电势的基波分量保持同相;
- (6) 不考虑凸极效应

无刷直流电机的电磁转矩可以看作是定子绕组中的电流与转子磁场相互作用而产生的,根据假设条件,采用永磁同步电动机的无刷直流电机的电磁转矩可以由定子相电流和转子反电势表示为

$$T_{em}(t) = [e_a(t) \cdot i_a(t) + e_b(t) \cdot i_b(t) + e_c(t) \cdot i_c(t)] / \omega \quad (1)$$

式中 ω 为转子角速度

根据假设条件, A 相反电势可以表示为

$$e_a(t) = E_1 \cdot \sin \alpha + E_3 \cdot \sin 3\alpha + E_5 \cdot \sin 5\alpha + E_7 \cdot \sin 7\alpha + \dots \quad (2)$$

根据假设条件,且注意到由于没有中性线连接,因而相电流中偶次和3的倍数次谐波不可能存在,故A相电流可以表示为

$$i_a(t) = I_1 \cdot \sin \alpha + I_5 \cdot \sin 5\alpha + I_7 \cdot \sin 7\alpha + I_{11} \cdot \sin 11\alpha + \dots \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知, $e_a(t) \cdot i_a(t)$ 中包含平均分量和偶次谐波分量

$$e_a(t) \cdot i_a(t) = P_0 + P_2 \cdot \cos 2\alpha + P_4 \cdot \cos 4\alpha + P_6 \cdot \cos 6\alpha + \dots \quad (4)$$

由于 $e_a(t) \cdot i_a(t)$ 和 $e_b(t) \cdot i_b(t)$ 以及 $e_a(t) \cdot i_a(t)$ 和 $e_c(t) \cdot i_c(t)$ 之间的相位差分别是 $-2\pi/3$ 和

$2\pi/3$, 因而 $[e_a(t) \cdot i_a(t) + e_b(t) \cdot i_b(t) + e_c(t) \cdot i_c(t)]$ 项中将只含有平均分量和6的倍数次分量, 其它的偶次谐波分量被抵消了. 因而瞬时转矩可以表示为

$$T_{\text{em}}(t) = T_0 + T_6 \cdot \cos 6\omega t + T_{12} \cdot \cos 12\omega t + T_{18} \cdot \cos 18\omega t + T_{24} \cdot \cos 24\omega t + T_{30} \cdot \cos 30\omega t + \dots \quad (5)$$

转矩谐波分量可由下式表达为

$$[T] = 3[E][I]/2\omega \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} [T] &= [T_0 \quad T_6 \quad T_{12} \quad T_{18} \quad T_{24} \quad T_{30} \dots]^T \\ [I] &= [I_1 \quad I_5 \quad I_7 \quad I_{11} \quad I_{13} \quad I_{17} \dots]^T \\ [E] &= \begin{bmatrix} E_1 & E_5 & E_7 & E_{11} & E_{13} & E_{17} & \dots \\ E_7 - E_5 & E_{11} - E_1 & E_{13} + E_1 & E_{17} + E_5 & E_{19} + E_7 & E_{23} + E_{11} & \dots \\ E_{13} - E_{11} & E_{17} - E_7 & E_{19} + E_5 & E_{23} - E_1 & E_{25} + E_1 & E_{29} + E_7 & \dots \\ E_{19} - E_{17} & E_{23} - E_{13} & E_{25} - E_{11} & E_{29} - E_7 & E_{31} - E_5 & E_{35} - E_1 & \dots \\ E_{25} - E_{23} & E_{29} - E_{19} & E_{31} - E_{17} & E_{35} - E_{13} & E_{37} - E_{11} & E_{41} - E_7 & \dots \\ E_{31} - E_{29} & E_{35} - E_{25} & E_{37} - E_{23} & E_{41} - E_{19} & E_{43} - E_{17} & E_{47} - E_{13} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \end{aligned}$$

1.2 转矩波动的抑制

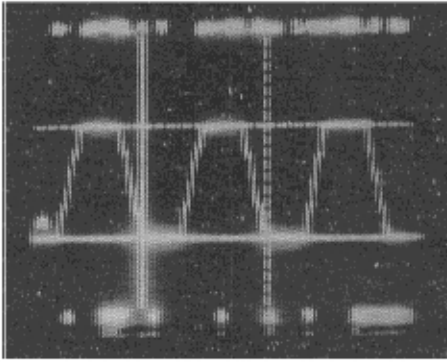
如果反电势波形已知, 那么通过选择适当的电流谐波就能消除某些转矩谐波分量, 从而达到减小转矩波动的目的. 因为 T_6 、 T_{12} 、 T_{18} 、 T_{24} 是最显著的转矩谐波分量, 因而我们使 $T_6 = T_{12} = T_{18} = T_{24} = 0$, 由式(6)可推导出下式

$$\begin{bmatrix} (E_5 - E_7) I_1 \\ (E_{11} - E_{13}) I_1 \\ (E_{17} - E_{19}) I_1 \\ (E_{23} - E_{25}) I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} - E_1 & E_{13} + E_1 & E_{17} + E_5 & E_{19} + E_7 \\ E_{17} - E_7 & E_{19} - E_5 & E_{23} - E_1 & E_{25} + E_1 \\ E_{23} - E_{13} & E_{25} - E_{11} & E_{29} - E_7 & E_{31} - E_5 \\ E_{29} - E_{19} & E_{31} - E_{17} & E_{35} - E_{13} & E_{37} - E_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_5 \\ I_7 \\ I_{11} \\ I_{17} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过解式(7)的方程组, 就能得到优化电流波形的各次谐波分量之值. 在优化电流波形的情况下, 就能得到最小的转矩波动.

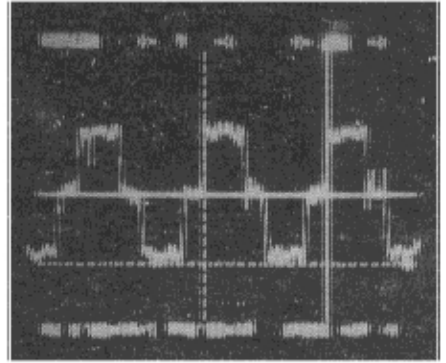
2 转矩计算及电流优化

作者研制的无刷直流电机的本体为永磁同步电动机, 其转子磁密波形为梯形波, 励磁电势也有同样的波形. 图2所示为用示波器拍摄的在 $n = 1500 \text{ r/min}$ 时A相的反电势波形, 图3所示为 $n = 1500 \text{ r/min}$ 、 $T = 3.4 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 时用示波器拍摄的电机A相电流波形. 对该反电势波形和电流波形分别进行傅里叶分解, 可分别得到它们的各次谐波分量之值.



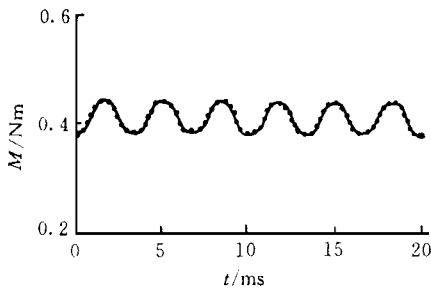
$n = 1\,500 \text{ r/m in}$

图2 A 相反电势波形



$n = 1\,500 \text{ r/m in}; T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

图3 A 相电流波形



$n = 1\,500 \text{ r/m in}; T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

图4 转矩波动情况

将以上求得的反电势和电流的各次谐波分量之值代入式(5)和式(6), 可以求得 $n = 1\,500 \text{ r/m in}$ 、 $T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 时的转矩表达式

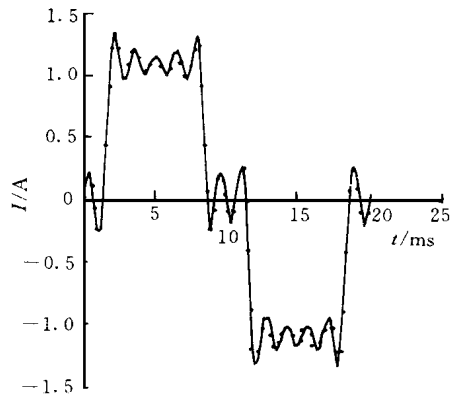
$$T_{\text{em}}(t) = 0.4125 - 0.0316\cos 6\omega t + 0.0031\cos 12\omega t + 0.0014\cos 18\omega t - 0.0007\cos 24\omega t + 0.0004\cos 30\omega t + \dots \quad (8)$$

由式(8)可以计算

出 $n = 1\,500 \text{ r/m in}$ 、 $T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 时在一个周期内各点的转矩值, 转矩波动的情况如图4所示

为了消除 T_6 、 T_{12} 、 T_{18} 、 T_{24} , 将反电势各次谐波分量代入式(7)中, 得到一个四元一次方程组用高斯消去法求解此方程组, 即可得到优化后的电流各次谐波分量之值, 由此可得优化后的电流表达式为

$$i(t) = 1.2115\sin\omega t - 0.2622\sin 5\omega t - 0.1963\sin 7\omega t + 0.1715\sin 11\omega t + 0.2152\sin 13\omega t - 0.0223\sin 17\omega t + \dots$$



$n = 1\,500 \text{ r/m in}; T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

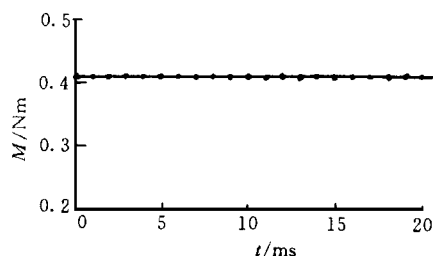
图5 优化电流波形

(9)

由式(9)可以计算出 $n = 1\,500 \text{ r/m in}$ 、 $T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 时优化后的电流波形, 如图5所示采用优化电流后, 转矩谐波中的6次、12次、18次、24次分量被消除了, 从而转矩表达式可以写为

$$T_{em}(t) = 0.4125 + 0.004\cos 30\omega t + \dots \quad (10)$$

由式(10)可以计算出 $n = 1500 \text{ r/min}$ 、 $T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 时优化电流后的转矩波动情况,如图6所示
由此可见,采用优化电流波形后,转矩波动大为减小



$n = 1500 \text{ r/min}$; $T = 3.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

图6 优化电流后的转矩波动情况

参 考 文 献

- 1 刘文. 微机控制的无位置传感器无刷直流电动机及其调速系统: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学电气工程学院, 1995
- 2 Le-huy H, Perret R, Feuillet R. Minimization of torque ripple in brushless DC motor drives. IEEE Trans Ind Appl, 1986, 22(4): 748~755
- 3 Favre E, Cardoletti L, Jufer M. Permanent magnet synchronous motors: a comprehensive approach to cogging torque suppression. IEEE Trans Ind Appl, 1993, 29(6): 1141~1149

(编辑 赵大良 葛赵青)

Investigation into Torque Ripple and Its Suppression in Permanent Magnet Brushless DC Motor

Liu Wen Zeng Jie

(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an)

Abstract This paper presents a study on torque characteristics of PM brushless DC motors. First, the torque expression is derived in terms of the stator current and emfs in the rotor. Torque harmonics components are then calculated in terms of the back emf and current harmonics components. For a given machine, the back emf harmonics can be determined, and it is possible to calculate an optimum feed current waveform that cancels out most significant torque harmonics to produce smooth torque.

Keywords permanent magnet brushless DC motor torque ripple