

Ampere, MTPA) 是凸极式PMSM使用较多的一种电流控制策略。在凸极PMSM中, $L_d \neq L_q$, 因此电磁转矩公式中含有dq轴电流的乘积项。最大转矩电流比控制可以在产生相同转矩的情况下, 使得定子电流最小, 从而提高系统效率, 减轻逆变器负担。

若定子电流的幅值为 I , 由Park变换可得 i_d 、 i_q 与 I 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \cos \alpha \\ I \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ I \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \theta) \\ \sin(\alpha - \theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

所以

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2 \quad (7)$$

最大转矩电流比控制实际上是求解一个最优化问题, 即

$$\begin{cases} \min z = I_d^2 + I_q^2 \\ s.t. T_{em} p_n (L_d - L_q) i_d i_q + p_n \Psi_r i_q \end{cases} \quad (8)$$

若将 i_d 、 i_q 用定子电流的幅值来表示, 则

$$\begin{aligned} I_d &= I \cos \theta \\ I_q &= I \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中, θ 为 I 与 I_d 的夹角。

将式(9)代入式(5)可以得到

$$T_{em} = p_n (L_d - L_q) I^2 \sin \theta \cos \theta + p_n \Psi_r \cos \theta \quad (10)$$

则在 I 恒定的情况下, 可以得到电磁转矩与 θ 之间的关系如图2所示。

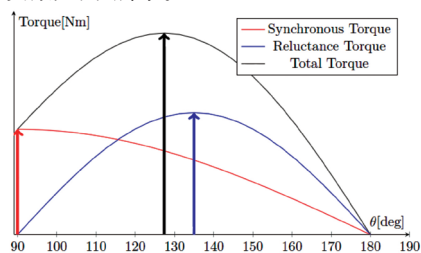


图2 电磁转矩与转矩角之间的关系曲线

图2中, 红线为 i_q 产生的转矩, 成为同步转矩分量, 蓝线为 i_d 、 i_q 乘积产生的转矩, 成为磁阻转矩分量, 黑线为两者之和, 即电磁转矩。可以看出, 在 I 恒定的情况下, 电磁转矩存在一个最大值。

对式(10)求导可以求出电磁转矩取最大值时对应的角度 θ 为

$$\theta = \arcsin \frac{-p_n \Psi_r + \sqrt{p_n^2 \Psi_r^2 + 8(L_d - L_q)^2 I^2}}{4(L_d - L_q)I} \quad (11)$$

3. 小结

总结上述3种矢量控制方法的特点: $i_d=0$ 控制计算量小, 容易实现; MTPA最大转矩电流比控制能够实现单位电流下输出转矩最大; 弱磁控制可

以实现电机的高速运行。此外, 对于隐极永磁同步电机, 由于 $L_d=L_q$, 所以电磁转矩与 i_d 无关, 因此, 隐极永磁同步电机的 $i_d=0$ 控制就是MTPA最大转矩电流比控制。

因此, $i_d=0$ 控制适用于隐极式永磁同步电机的恒转矩控制; MTPA最大转矩电流比控制适用于凸极式永磁同步电机的恒转矩控制; 弱磁控制适用于高于额定转速时的恒功率控制。

两种电流控制策略仿真

使用MATLAB/Simulink进行两种控制策略的仿真, 分析控制效果。Simulink中搭建的PMSM矢量控制如图3所示, 仿真参数如表1所示。

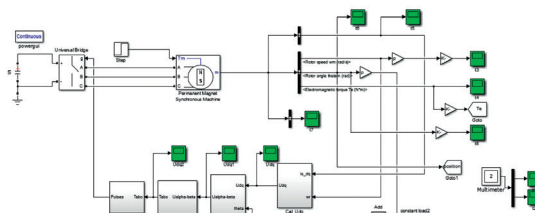


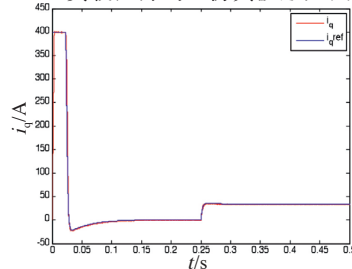
图3 Simulink中PMSM矢量控制仿真

表1 仿真参数

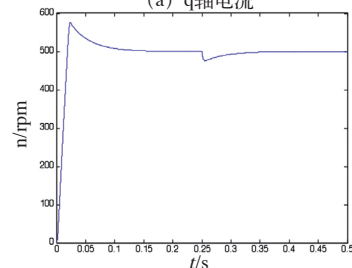
电机参数	
$L_d=0.00151 \text{ H}$	$L_q=0.0041 \text{ H}$
$R=0.1121 \Omega$	$p=4$
$J=0.2 \text{ kgm}^2$	$KE=0.256228717 \text{ Wb}$
逆变器参数	
$T_s=100\text{e}-6 \text{ s}$	$V_{dc}=750 \text{ V}$

1. $i_q=0$ 控制仿真

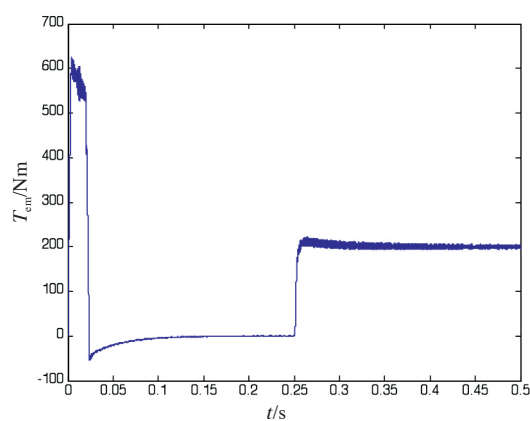
在电流环中, 将 i_d 给定值设为0, 转速调节器的输出作为 i_q 给定值, 实现 $i_d=0$ 控制。在0 s, 控制电机从0空载加速至500 r/min; 2.5 s时刻, 给电机施加200 N·m负载, 得到的仿真波形如图4所示。



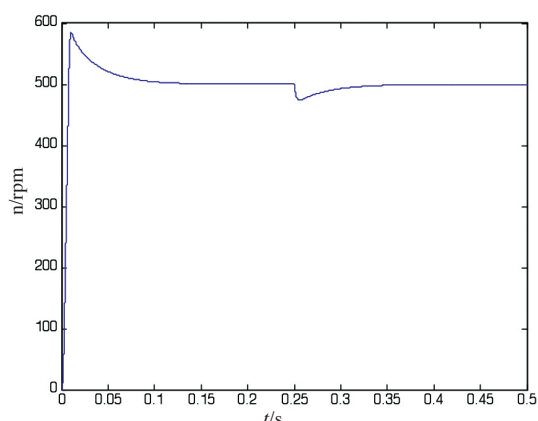
(a) q轴电流



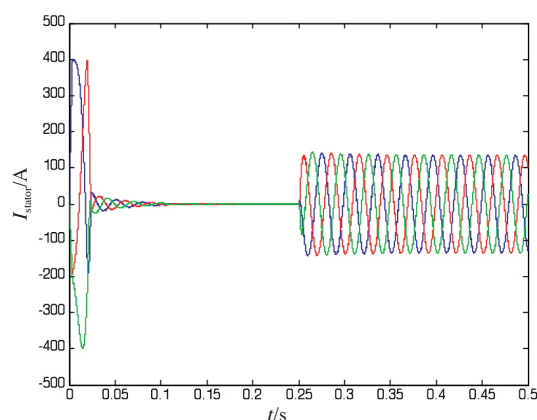
(b) 电机转速



(c) 电磁转矩



(b) 电机转速

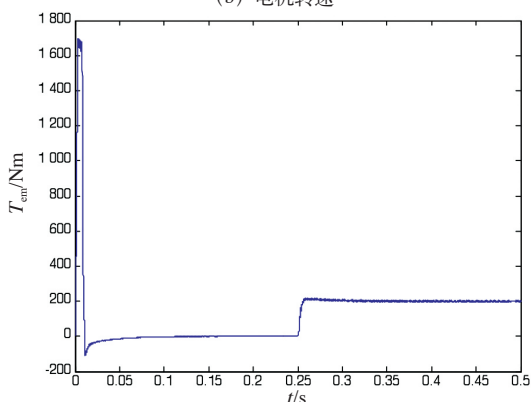


(d) 定子电流

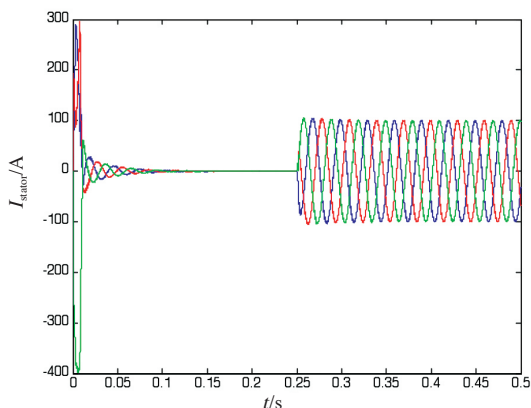
图4 $i_d=0$ 控制的仿真波形

2. MTPA最大转矩电流比控制

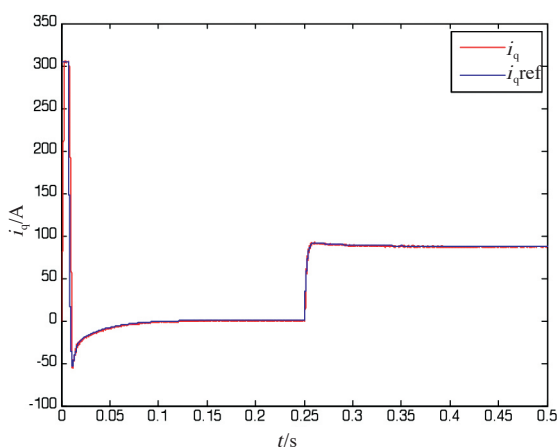
在仿真中，将转速环的输出作为定子电流 i_s 的给定值，利用式(11)计算出定子电流矢量与d轴电流的夹角，进一步算出 i_d 、 i_q 给定值，实现MTPA控制。在0 s，控制电机从0空载加速至500 r/min；2.5 s时刻，给电机施加200 N·m负载。得到的仿真波形如图5所示。



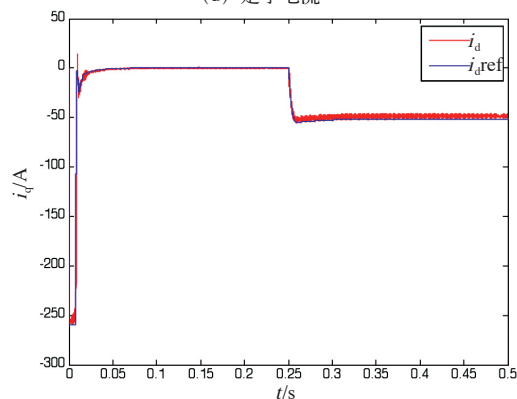
(c) 电磁转矩



(d) 定子电流



(a) q轴电流



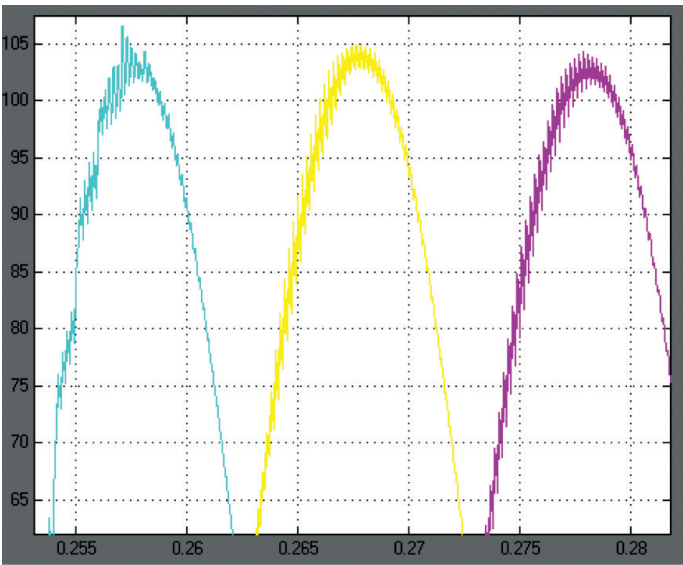
(e) d轴电流

图5 MTPA控制的仿真波形

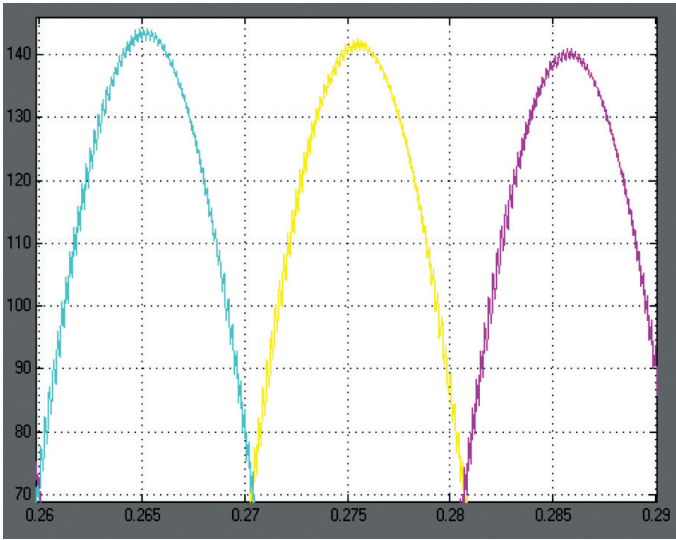
3. $i_d=0$ 控制和MTPA控制的对比

图6a和图6b分别为图5d和图4d的定子电流波形的局部放大图。可以看出，在稳态时输出转矩均为200 N·m的情况下，MTPA控制的定子电流峰值为

105 A，而 $i_d=0$ 控制的定子电流峰值达到了140 A，可见MTPA实现了单位定子电流的情况下输出更大的转矩。此外，从图4c和图5c的电磁转矩波形可以看出，在电机加速过程中，MTPA提供的加速转矩更大。



(a) MTPA控制



(b) $i_d=0$ 控制

图6 MTPA控制和 $i_d=0$ 控制定子电流峰值

结束语

描述了永磁同步电机的数学模型，在数学模型的基础上，分析了永磁同步电机矢量控制的两种电流控制策略： $i_d=0$ 控制，MTPA最大转矩电流比控制。描述了两种控制策略的控制原理和特点，通过仿真对两种控制策略进行了验证。 $i_d=0$ 控制计算量小，容易实现，适用于隐极式永磁同步电机的恒转矩控制；MTPA最

大转矩电流比控制能够实现单位电流下输出转矩最大，适用于凸极式永磁同步电机的恒转矩控制。此外，对于隐极永磁同步电机，由于 $L_d=L_q$ ，所以电磁转矩与 i_d 无关，因此，隐极永磁同步电机的 $i_d=0$ 控制就是MTPA最大转矩电流比控制。EA

(收稿日期：2016.06.18)

(编辑：白文亭)