

交流伺服永磁同步电机的转矩控制实验研究

张召贤

大唐四川电力检修运营有限公司 四川 成都 610074

【摘要】：近年来，随着电力电子技术、微电子技术、新型电机控制理论和稀土永磁材料的快速发展，永磁同步电动机得以迅速的推广应用。与传统的电励磁同步电机相比，其具有损耗少、效率高、节电效果明显的优点。在节约能源和环境保护日益受到重视的今天，对永磁同步电机直接转矩控制研究就显得非常必要。本文从以下几个方面对永磁同步电机直接转矩系统进行研究：在永磁同步电动机工作原理基础上，对其建立数学模型并分析了工作特性；深入探讨了永磁同步电机直接转矩控制原理，得出系统结构图，掌握控制系统各个功能模块，构建永磁同步电机直接转矩仿真模型，得出仿真结果。实验结果表明永磁同步电机直接转矩控制系统有较好的调速性能。

【关键词】：永磁同步电机；直接转矩控制；仿真；数学模型

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.041

1 永磁同步电机的直接转矩控制系统的原理

直接转矩控制系统由许多模块构成：永磁同步电机部分、磁链转矩估算单元、3/2 变换模块、电压矢量选择部分、电压型逆变器以及扇区判断装置等几个模块。系统通过电压型逆变器输出电机电流和电压，通过内部运算得出电机定子磁链的初步计算值以及电机生成的转矩，系统将电机目标转速和实际转速的误差，经调节器输出事先设定好的转矩信号，运算出转子所处空间位置信息、电机磁链目标值以及转矩设定值与实机运行时的误差，再经过电压开关矢量表选择输出的电压矢量，进而通过逆变器来调节电机。其结构如图 3 所示。

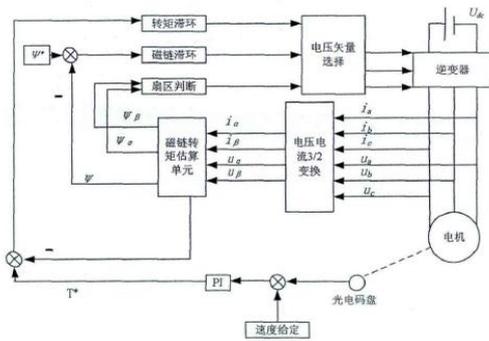


图 3 直接转矩控制系统结构示意图

2 直接转矩控制系统各仿真模块

2.1 逆变器及其电压矢量表模块

永磁同步电机调速系统中对逆变器的控制就相当于我们大脑对整个身体控制一般有着极其重要的作用。逆变器主要有两种，其中一类是电压型，另一类为电流型，矩控系统采用的是电压型逆变器。

逆变器有 ABC 三个桥臂，其中上桥臂和下桥臂交替导电^[15]，由此设定上桥臂开通时的状态为 1，断开时为 0。经过这番定义则逆变器就有了八种状态量即工作矢量，其中有六个有的状态量即非零矢量 $V_1 \sim V_6$ ，另有两个零矢量 V_0 和 V_7 。

由电力电子技术可知输出电压由逆变器开关的导通和关闭来实现，所以可得基本开关电压矢量定义式（等幅值变换）。

$$V_s = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j\frac{2}{3}\pi} + u_c e^{j\frac{4}{3}\pi}) \quad (3-1)$$

逆变器不能单独对八个工作矢量进行控制。需要通过不同的磁链值和转矩大小，以此联合逆变器实现对直接转矩的控制。图 4 为 8 个工作矢量在静止两相坐标系下的相对位置

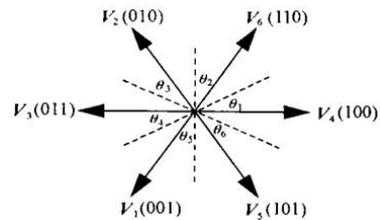


图 4 空间电压矢量和区段划分

电压矢量选择表模块是根据磁链滞环和转矩滞环的输出状态，以及扇区判断模块共同决定输出的矢量电压^[16-20]，从而通过逆变器逆变产生的电压去启动永磁同步电机。当施加电压矢量与 ψ_s 夹角小于 $\frac{\pi}{2}$ 时，磁链幅值减小，反之增大；当电压矢量超前于 ψ_s 时，转矩增加，反之减小。

因为不同的磁链值和转矩大小会产生不同的电压矢量，因此可以获得一个如表 3-1 所示的电压矢量选择表， $\psi = 1$ 对应参考磁链大于反馈值， $\tau = 1$ 对应参考转矩大于反馈值；当 $\psi = 0$ 或 $\tau = 0$ 时反之。其模块内部结构如图 5 所示。该模块输入为磁链滞环比较器输出 ψ 、转矩滞环比较器输出 τ 以及磁链所在的区间位置 θ ，经过运算输出较为合适的电压矢量。

表 3-1 电压矢量开关选择表

ψ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	V_6	V_2	V_3	V_1	V_5	V_4

	0	V_5	V_4	V_6	V_2	V_3	V_1
0	1	V_2	V_3	V_1	V_5	V_4	V_6
	0	V_1	V_5	V_4	V_6	V_2	V_3

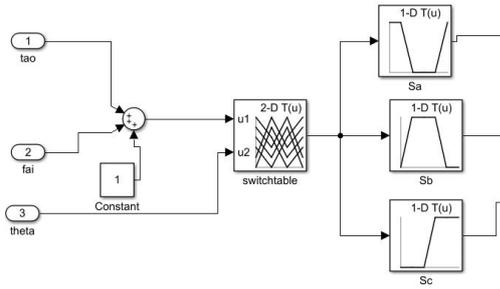


图5 开关电压矢量模型

逆变器三相负荷的定子绕组为星形接法，其基本的电压矢量定义式：

$$u_s = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j\frac{2}{3}\pi} + u_c e^{j\frac{4}{3}\pi}) \quad (3-2)$$

其中 u_a , u_b , u_c 分别 a, b, c 三相定子负荷绕组的相电压。由此基于逆变器的开关状态 S_a , S_b , S_c 和逆变器直流侧电压 u_{dc} 之间的关系得到 $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$, 再经过 2/3 坐标变换器变成 u_a , u_b , u_c , 基本方程如式 (3-3)、式 (3-4) 和式 (3-5) 所示：

$$u_{s\alpha} = \frac{2}{3}u_{dc}(S_a - \frac{1}{2}S_b - \frac{1}{2}S_c) \quad (3-3)$$

$$u_{s\beta} = \frac{2}{3}u_{dc}(\frac{\sqrt{3}}{2}S_b - \frac{\sqrt{3}}{2}S_c) \quad (3-4)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

2.2 坐标变换模块

直接转矩系统是静止坐标变换，三相定子电流经过 Clark 变换，获得 α β 坐标系下电流分量 i_α 、 i_β ，公式如下：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

电压变换也和电流变换相似，通过检测电压 u_a 、 u_b 、 u_c 再将其采用变换得到，这种计算方法在仿真中容易实现，然而在实际的实验平台上很难直接对三相电压进行检测，因此根据公式经变换就可得到电压矢量：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

2.3 磁链计算模块

磁链计算模块作用是测算出定子磁链为后面用定子磁链测算出磁链具体位置。在定子 α - β 两相静止坐标系下，通过电压分量 u_α 、 u_β 和电流分量 i_α 、 i_β 可以得到磁链计算方程式：

$$\psi_\alpha = \int (u_\alpha - R i_\alpha) dt \quad (3-8)$$

$$\psi_\beta = \int (u_\beta - R i_\beta) dt \quad (3-9)$$

$$\psi_s = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \quad (3-10)$$

ψ_α 和 ψ_β 是定子磁链在 α - β 两相静止坐标系下的分量， ψ_s 是定子磁链。

建立模型，如图 6 所示：

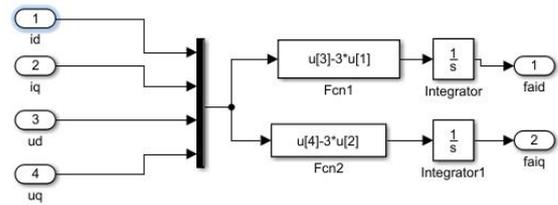


图6 磁链计算模块

2.4 转矩计算模块

在直接转矩控制系统中对转矩的测量很困难，通常采用间接方法测算出机电磁转矩，在前面已经建立了永磁同步电机的数学模型，由电机的转矩数学模型可推导出在 α - β 两相静止坐标系下数学模型：

$$T_e = \frac{2}{3}n_p(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (3-11)$$

其输入为磁链计算模块输出的 ψ_α 、 ψ_β 以及 i_α 和 i_β ，输出为电磁转矩 T_e ，所以可得出转矩计算模块仿真。

2.5 磁链滞环比较器

磁链滞环比较器大多都是通过电机运行时定子磁链实时数值和目标数值的差值，来确认要输出到逆变器的信号。 ψ_{out} 是作为滞环比较器的输出，磁链的滞环宽为 $2\varepsilon_\psi$ 。参考值与实际值之差为 $\Delta\psi_s = \psi_s - \psi_s^*$ ，当磁链误差 $\Delta\psi_s$ 超过滞环比较器的滞环宽时，变换输出信号，确保磁链误差 $\Delta\psi_s$ 限制在系统规范的范围。若 $\Delta\psi_s > \varepsilon_\psi$ 时，这时 $\psi_{out}=0$ ，施加电压矢量使 ψ_s 变小； $\Delta\psi_s < -\varepsilon_\psi$ 时，这时 $\psi_{out}=1$ ，施加电压矢量使 ψ_s 变大；当 $|\Delta\psi_s| \leq \varepsilon_\psi$ 时，这时 ψ_{out} 保持不变，施加电压矢量使 ψ_s 维持稳定。

2.6 转矩滞环比较器

转矩的自我控制可以通过转矩滞环比较器得以实现。其工作原理和上一小节中提到的磁链比较器相类似，滞环比较器输

出信号 T_{out} ，采取的同样为两点调整法，滞环比较器输入的是转矩的目标数值 T_e^* 和转矩的实际数值 T_e 的差值为 $\Delta T_e = T_e - T_e^*$ ；当差值跌落到最低底线 $-\varepsilon_T$ 时，它的输出信号 T_{out} 就变成“1”，此时就给定一个较为适当的矢量电压让定子磁链不断旋转、转矩增大。和前面相类似，当差值超出最大顶端值 ε_T 时，就给定一个适合于它的矢量电压就能让它反向旋转，转矩减小。

2.7 磁链位置判别模块

磁链位置判别模块可分为两部分，一部分为角度计算模块，另一部分为磁链区段计算模块，两者共同工作来确定磁链位置。定子磁链矢量处在的位置我们可以根据磁链在 α - β 坐标上的分量进行判定，由的 ψ_α 正负以此来初步确定定子磁链矢量所在象限，再通过 $\arctg\left(\frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha}\right)$ 确认它所处的详细空间信息。

2.8 永磁同步电机模块

电机功率：200W；电机电压：AC220V；额定转矩：0.637Nm；瞬时转矩：1.91Nm；额定电流：2.1A；瞬时最大电流：6.5A；额定转速：3000rpm；最高转速：5000rpm；力矩参数：0.327Nm/Arms；相反电势系数：11.4mV/RPM；转动惯量：0.1814*0.0001kg.m2；线电阻：3.2 欧；线电感：10.15mH；极对数：4。

3 永磁同步电机直接转矩仿真结果

永磁同步电机给定转速 21rad/s 即 200r/min。转矩在 0.5 秒从 0 阶跃为 5.3N · m。从图 3-15c 可以发现，定子磁链的迹接近于一个圆，说明电机磁链误差控制在一定范围内，从图中还可以发现磁链运行轨迹不圆滑，因其矢量电压在经过电压开关选择表时产生的系统误差。从图 9a 和 c 发现电机在刚开始开启的时候产生了短暂波动，但转速在到达目标值之后运行的很平滑。图 c 显示系统在启动过程中很快就达到稳定。图 a 显示转速的上升时间为 0.01 秒，速度没有超调，在电机到达稳态之后速率曲线很平稳，在转矩阶跃时转速有细微的跌落。说明永磁同步电机直接转矩控制系统在低调速范围内有良好的转矩和速度响应。

参考文献：

[1] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2016.
 [2] 阮毅.电力拖动自动控制系统运动控制系统第4版[M].北京:机械工业出版社,2017.
 [3] 凌跃胜,黄文美,宋桂英编著.电机理论基础[M].北京:中国电力出版社.2009.
 [4] 黄慧敏.永磁同步电机控制方法建模与仿真研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
 [5] 牛慧文.永磁同步电机直接转矩控制系统的仿真研究[D].太原:太原理工大学,2012.

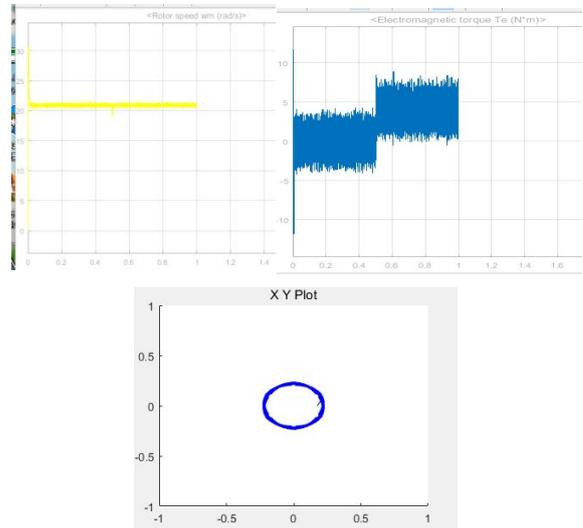


图 7 a 转速波形 b 转矩波形 c 定子磁链波形

永磁同步电机从 84rad/s 即 800r/min 阶跃到 126rad/s 即 1200r/min 时，波形图如 8 所示。仿真的结果表明永磁同步电机直接转矩控制系统在调速范围内都能有很好的调速效果。

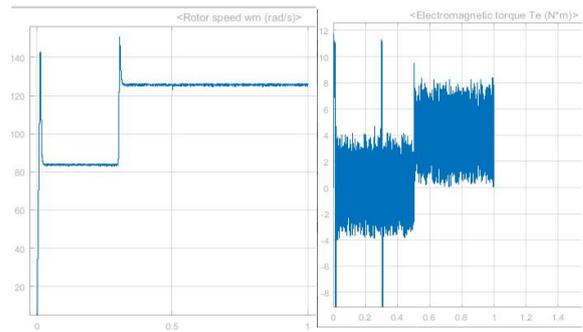


图 8 a 转速波形 b 转矩波形

4 结论

永磁同步电机的控制系统多种多样，DTC 系统中转矩和磁链采取的是双位控制的规律即对应系统中的转矩滞环和磁链滞环比较器模块，并且逆变器直接使用转矩和磁链控制信号从而产生电压去驱动电机，因此不必进行繁琐的矢量变换。对磁链和转矩产生的误差进行细化，使定子磁链的迹接近于一个圆，减少转矩波动；改双位控制规律为连续控制规律，如间接自控系统和按定子磁链定向的控制系统。