

采用绕组变换的双三相永磁同步电动机建模研究

王步来, 顾伟, 郭燚, 褚建新, 吴卫民
(上海海事大学电气自动化系, 200135, 上海)

摘要: 提出了一种双三相永磁同步电动机的数学建模新方法. 基于产生相同磁动势和功率不变的原则, 构建了一个等效的三相绕组, 绕组变换后, 原双三相永磁同步电动机等效为普通的三相永磁同步电动机. 应用三相永磁同步电动机在两相同步旋转坐标系下的数学模型, 完成了双三相永磁同步电动机在 $d-q$ 坐标系下的数学建模和基于 Matlab/Simulink 的仿真建模. 对一台 6 极双三相永磁同步电动机进行了仿真和实验, 两者间最大误差在 5% 以内, 因此该建模方法是有效和正确的.

关键词: 绕组变换; 双三相永磁同步电动机; 等效; 仿真; 实验

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1275-05

Modeling for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine with Winding Transformation

WANG Bulai, GU Wei, GUO Yi, ZHU Jianxin, WU Weimin

(Department of Electrical Automation, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: A novel mathematical model for a dual three-phase permanent magnet synchronous machine(PMSM) was proposed. A set of equivalent three-phase windings was established based on the same magnetomotive force and power. A dual three-phase PMSM was substituted equivalently by a three-phase PMSM after a winding transformation. Then following the mathematical model of the three-phase PMSM in the rotary reference frame, the model of a dual three-phase PMSM was determined. A 6-pole dual three-phase PMSM was simulated and tested. Compared the simulation results with the corresponding test results, the maximum error got lower than 5% to demonstrate the validity and effectiveness.

Keywords: winding transformation; dual three-phase permanent magnet synchronous machine; equivalent; simulation; test

双三相电机系统比三相电机系统性能有明显的优势^[1-3]; 具有采用低压标准功率器件实现高压大功率处理的能力; 影响较大的空间谐波的次数增大, 且幅值下降, 转矩脉动下降; 磁动势波形改善; 提高了电机效率; 降低了电机噪声; 多相冗余结构的调速系统在系统级提高了可靠性. 文献[4]将交流电机的多回路理论与电磁场有限元方法结合起来, 建立了多相永磁电机的数学模型; 文献[5]从基本的支路电压方程入手, 采用实际物理量建立多相永磁同步电动机的状态空间数学模型, 对起动过程进行了分析;

文献[6]直接在双三相坐标系下给出双三相永磁同步电动机的数学模型, 然后再变换成 dqo 两相旋转坐标系下的数学模型, 分别对双三相供电和单三相供电模式进行了仿真研究. 本文提出一种新的双三相永磁同步电动机的建模方法, 可较精确地仿真双三相永磁同步电动机的稳态运行性能. 该方法首先进行双三相绕组到三相绕组的等效变换, 然后再结合三相永磁同步电动机在 dqo 坐标系下的数学模型, 完成了双三相永磁同步电动机的数学建模.

1 双三相绕组到三相绕组的等效变换

双三相永磁同步电动机的物理模型如图1所示. 为方便分析, 在满足工程实际所需的精度要求下, 作如下假设:

(1) 定子两套绕组 $A_1B_1C_1$ 和 $A_2B_2C_2$ 在空间错开 30° 电角度, 每套三相绕组在空间上对称, 即每相绕组匝数线规相同, 相绕组间隔 120° 空间电角度;

(2) 电机正常运行情况为三相对称绕组通入三相对称电流, 三相电流间每相电流时间上差 120° 时间电角度, $A_1B_1C_1$ 每相绕组电流分别领先 $A_2B_2C_2$ 对应的绕组相电流 30° 时间电角度, 忽略电流谐波的影响;

(3) 不计铁磁饱和、磁滞、涡流影响及导体趋肤效应, 阻尼绕组等效为互相垂直的两相绕组分别位于 d 、 q 轴上;

(4) 气隙磁场正弦分布, 忽略了磁场高次谐波的影响.

根据坐标变换原理, 只要变换前后所产生的磁动势和功率关系保持不变, 变换前后的绕组就是等效的, 三相交流电机的坐标变换就是在这一原则下进行的. 本文从双三相静止绕组到三相静止绕组的变换同样遵循这个原则.

考察图1的双三相永磁同步电动机的物理模型. 由电机的基本原理可知, 当双三相绕组通入双三相电流 (A_1 相电流超前 A_2 相电流 30° 时间电角度) 时, 两个三相绕组在气隙中产生的基波磁动势大小、相位均相同, 可以代数相加. 当 A_1 相电流达最大值时, 合成的旋转磁动势与 A_1 相绕组轴线重合, 即此时定子合成磁动势就处在图1的 A_1 相轴线位置. 现假设有一套新的三相绕组, 其 A 相绕组轴线位于原双三相绕组的 A_1 相轴线处. 这样, 对新的三相绕组而言, 当 A 相电流达最大值时, 新的三相电机定子合成磁动势也位于图1的 A_1 相轴线位置. 若新的三相绕组和原双三相绕组所产生的磁动势大小也相同, 则新的三相绕组可以替代原双三相绕组, 即

$$2 \times \frac{3}{2} \times \frac{4}{\pi} \times \frac{2^{1/2}}{2} \frac{N_6 I_{A_1}}{n_p} = \frac{3}{2} \times \frac{4}{\pi} \times \frac{2^{1/2}}{2} \frac{N_3 I_A}{2n_p}$$

式中: N_6 、 I_{A_1} 分别为双三相绕组的每相串联有效匝数和 A_1 相电流有效值; N_3 、 I_A 分别为等效三相绕组每相串联有效匝数和 A 相电流有效值; n_p 为电机极对数. 考虑到功率关系不变, 等效后的每相绕组匝数应该等于双三相绕组每相匝数的2倍, 因此有

$$i_A = i_{A_1} \quad (1)$$

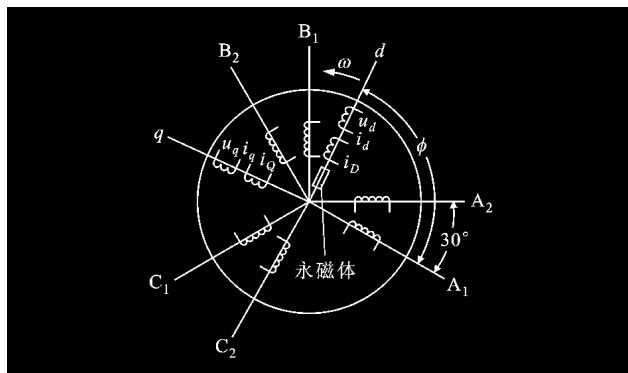


图1 双三相永磁同步电动机的物理模型

考虑到功率关系不变, 等效的三相绕组的每相电压亦为双三相绕组 $A_1B_1C_1$ 对应相电压的2倍, 即

$$u_A = 2u_{A_1} \quad (2)$$

设双三相绕组的每相电阻、漏感及直轴、交轴电枢反应电感分别为 R_{s1} 、 L_{ls1} 和 $L_{\alpha d1}$ 、 $L_{\alpha q1}$, 等效三相绕组的每相电阻、漏感及直轴、交轴电枢反应电感分别为 R_s 、 L_{ls} 和 $L_{\alpha d}$ 、 $L_{\alpha q}$, 那么它们之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} R_s &= 2R_{s1} \\ L_{ls} &= 2L_{ls1} \\ L_{\alpha d} &= 4L_{\alpha d1} \\ L_{\alpha q} &= 4L_{\alpha q1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

需要说明的是, 等效的三相绕组有效匝数与直接将 A_1A_2 、 B_1B_2 、 C_1C_2 分别正确相连后得到的三相电机的有效匝数是不同的. 简单分析可知, 后者的每相串联有效匝数是等效的三相绕组的 $\cos 15^\circ$ 倍. 因此, 由式(3)得到的等效三相绕组的参数与普通三相电机的参数是不同的.

假设(3)已经将阻尼绕组折算到互相垂直的 d 、 q 轴, 故阻尼绕组不必折算.

式(1)~式(3)即为双三相永磁同步电动机双三相定子绕组到等效三相永磁同步电动机三相定子绕组变换的数学关系, 即按此转换后的双三相永磁同步电动机与等效后的三相永磁同步电动机性能相同. 为节省篇幅, 式(1)、式(2)只列出 A 和 A_1 相之间的电压电流关系, 其他相间的电流、电压按照对称关系很容易得到.

2 等效三相永磁同步电动机在 dqo 旋转坐标系下的仿真模型

等效的三相定子绕组位于图1中 $A_1B_1C_1$ 所在位置, 现将等效三相绕组变换为以电角速度为 ω 旋转的 dq 两相绕组, dq 坐标与转子以相同的角速度旋转, 永磁体在 d 轴上, d 轴领先等效 $A(A_1)$ 相绕

组电角度 ϕ 。参照电励磁同步电动机的数学模型^[7],并对照图1永磁同步电动机物理模型,可列出等效三相永磁同步电动机的数学模型如下。

电压方程

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \\ u_q &= R_s i_q + p\psi_q + \omega\psi_d \\ 0 &= R_D i_D + p\psi_D \\ 0 &= R_Q i_Q + p\psi_Q \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

磁链方程

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= L_{sd} i_d + L_{md} i_D + \psi_f \\ \psi_q &= L_{sq} i_q + L_{mq} i_Q \\ \psi_D &= L_{mD} i_d + L_{rD} i_D + \psi_f \\ \psi_Q &= L_{mQ} i_q + L_{rQ} i_Q \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

电磁转矩和运动方程

$$\left. \begin{aligned} T_e &= n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \\ & n_p (\psi_f i_q + (L_{sd} - L_{sq}) i_d i_q + \\ & (L_{mD} i_d i_q - L_{mQ} i_Q i_q)) \\ T_e &= \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} + T_L \\ \omega &= p\phi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(4)~式(6)中: L_{sd} 为等效两相定子绕组 d 轴的自感, $L_{sd} = L_{ls} + L_{mD}$; L_{sq} 为等效两相定子绕组 q 轴的自感, $L_{sq} = L_{ls} + L_{mQ}$; L_{mD} 为 d 轴定子与转子绕组间的互感, $L_{mD} = \frac{3}{2} L_{ad}$; L_{mQ} 为 q 轴定子与转子绕组间的互感, $L_{mQ} = \frac{3}{2} L_{aq}$; L_{rD} 为 d 轴阻尼绕组的自感, $L_{rD} = L_{lD} + L_{mD}$; L_{rQ} 为 q 轴阻尼绕组的自感, $L_{rQ} = L_{lQ} + L_{mQ}$; L_{lD} 、 L_{lQ} 为阻尼绕组 d 、 q 轴绕组的漏感; ψ_f 为永磁体产生的磁链; d 、 q 、 D 、 Q 作为下标分别表示定子绕组 d 、 q 轴分量和转子绕组 d 、 q 轴分量; ϕ 为 d 轴领先 A_1 相或等效 A 相绕组的电角度(rad),如图1所示; ω 为 d 、 q 轴和转子的电角速度。

由式(4)~式(6),使用 Matlab/Simulink 做出的 d - q 坐标系下三相永磁同步电动机的仿真模型见图2。为仿真模型清晰和节省篇幅,仿真模型先将 i_d 、 i_q 、 i_D 、 i_Q 和 T_e 封装做成5个模块,然后封装成一个子系统。子系统输入为等效的 dq 两相定子电压、负载转矩和转子永磁体磁链,输出为转子角速度、转子位置角、电磁转矩以及 i_d 、 i_q 等。

3 双三相永磁同步电动机仿真模型

结合三相绕组到两相静止变换、两相静止到两相旋转变换及其反变换^[7]和式(1)~式(3),在图2

的输入端加上双三相电压到两相旋转坐标系下的电压的变换模型,输出端加上两相电流 i_d 、 i_q 到双三相电流的变换模型,得到图3的双三相永磁同步电动机的仿真模型。仿真模型输入变量为电压、负载转矩和永磁体提供的磁链,输出量有定子电流 i_{A1} 、 i_{B1} 、 i_{C1} 以及电磁转矩和转速。

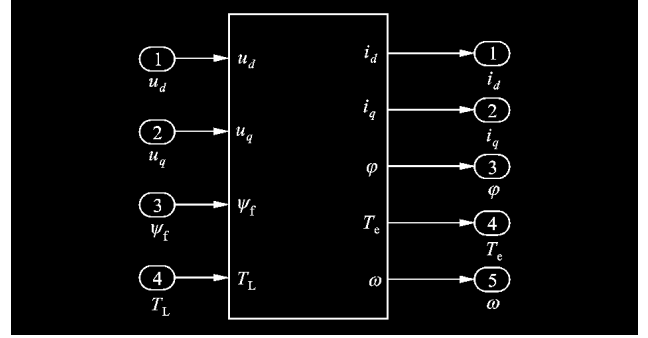


图2 永磁同步电动机 dqo 坐标系下的仿真模型

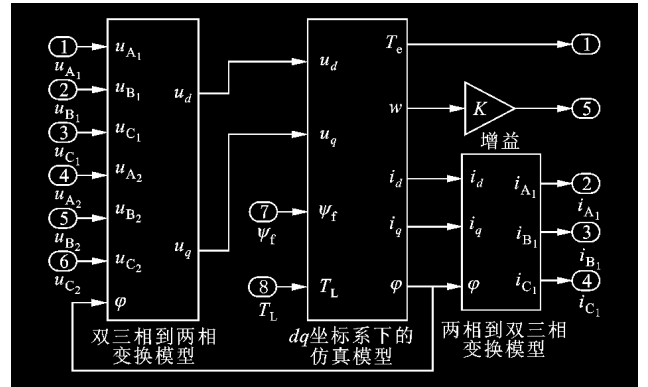


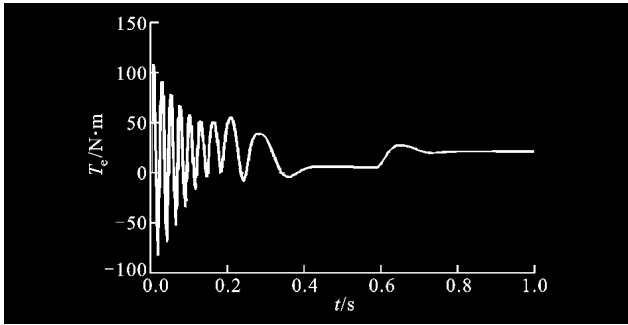
图3 双三相永磁同步电动机仿真模型

4 仿真实例及实验对比分析

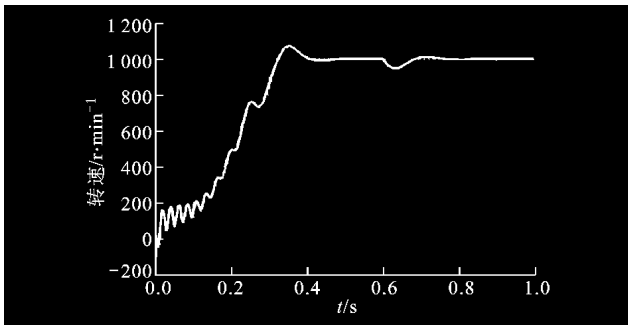
为深入研究,我们设计了一台双三相永磁同步电动机,其主要数据如下:额定功率为2.2 kW,极对数 $n_p = 3$,额定电压为190 V,双三相绕组Y接法,空间错开 30° 电角度。换算成 dqo 旋转坐标系下的电阻电感等数据,则 $R_s = 3.51 \Omega$, $R_{rD} = R_{rQ} = 5.20 \Omega$, $L_{mD} = 0.0822 \text{ H}$, $L_{mQ} = 0.1362 \text{ H}$, $L_{sd} = 0.1006 \text{ H}$, $L_{sq} = 0.1546 \text{ H}$, $L_{rD} = 0.1003 \text{ H}$, $L_{rQ} = 0.1543 \text{ H}$, $J = 0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\psi_f = 0.98 \text{ Wb}$ 。

4.1 仿真结果

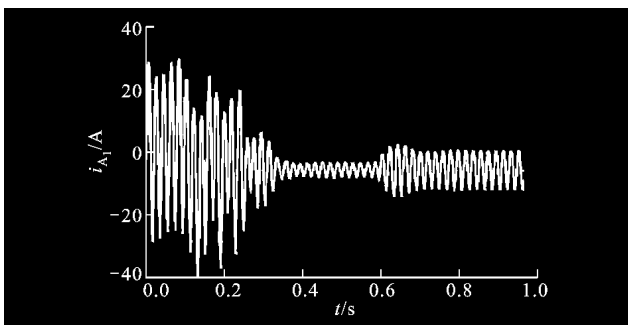
图4为给定转矩 $5.03 \text{ N} \cdot \text{m}$ 起动0.6 s后转矩增加到 $20.79 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的转矩、转速和 A_1 相电流波形的仿真结果,分别将负载转矩给定设置为10.36、15.62和 $22.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 进行仿真,可以得到相应的仿真结果。为节省篇幅,其他负载给定时的仿真图形略



(a)电磁转矩



(b)电机转速



(c) i_{A1} 相电流

图4 双三相永磁同步电动机仿真结果

表1 双三相永磁同步电动机仿真数据

$T_L/N \cdot m$	$T_2/N \cdot m$	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	i_{A1}/A
5.03	4.78	1 000	1.429
10.36	10.05	1 000	2.122
15.62	15.25	1 000	2.956
20.79	20.37	1 000	3.925
22.70	22.26	1 000	4.300

去,而将仿真结果,特别是 A_1 相电流列于表1。

表中 T_2 为电机输出转矩,等于 T_L 扣除机械损耗和附加损耗对应的转矩后所得,其中机械损耗按经验取 20 W,附加损耗取输入功率的 1%。

4.2 实验结果

按图5接好线,使用电机输入、输出测试系统中的定点测试功能设定好输出转矩,测试结果如图6所示,主要数据整理于表2,图7是实验照片。

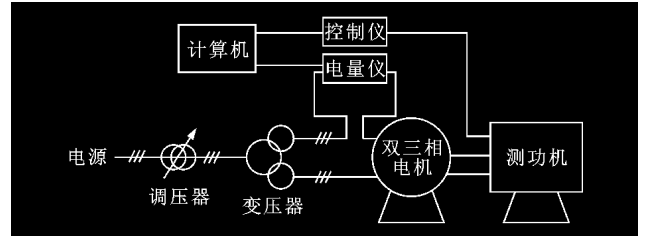


图5 双三相永磁同步电动机实验接线图



图6 双三相永磁同步电动机测试截图

表2 双三相永磁同步电动机测试数据

转矩/ $N \cdot m$	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	电流/A	输入功率/ W	效率/%
4.78	1 001.4	1.410	654.44	76.6
10.05	1 001.4	2.147	1 231.04	85.6
15.25	1 001.7	3.084	1 807.50	88.5
20.37	1 001.4	4.104	2 400.90	89.0
22.26	1 001.4	4.496	2 624.46	89.0

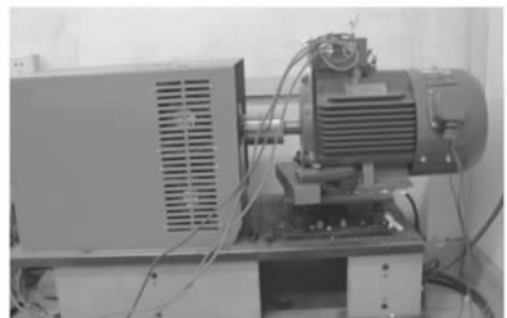


图7 双三相永磁同步电动机实验照片

4.3 对比分析

对比表 1 和表 2, 在输出转矩相同的情况下, 分析电机的 A_1 相电流, 结果列于表 3. 从表 3 的对比可以看出, 仿真与实验之间存在一定的误差, 但最大误差仅为 -4.362% , 这样的误差在工程上是可以接受的. 因此, 可以认为双三相永磁同步电动机的数学模型和仿真模型是正确的, 仿真结果比较符合电机的实际情况.

表 3 仿真与实验数据对比

$T_2/N \cdot m$	A_1 相实测 电流/A	A_1 相仿真 电流/A	仿真误差/%
4.78	1.410	1.429	1.348
10.05	2.147	2.122	-1.164
15.25	3.084	2.956	-2.866
20.37	4.104	3.925	-4.362
22.26	4.496	4.300	-4.359

5 结 语

本文直接从双三相永磁同步电动机出发, 构建了一个等效的三相永磁同步电动机, 进而建立了双三相永磁同步电动机的数学模型, 并据此建立了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型, 为双三相永磁同步电动机的建模研究提供了一个新的方法. 经与实验比较, 仿真结果的误差在工程可接受的范围内, 证明该转换方法是可行的, 所建模型是正确的.

参考文献:

[1] SINGH G K. Multi-phase induction machine drive research a survey[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 62:139-147.

[2] PARSA L. On advantages of multi-p machines[C]//

2005 Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005:6-10.

[3] DWARI S, PARSA L. Optimum fault-tolerant control of multi-phase permanent magnet machines for open-circuit and short-circuit faults[C]// Applied Power Electronics Conference 2007 Twenty Second Annual IEEE. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1417 - 1422.

[4] 乔鸣忠, 张晓锋, 任修明. 多相永磁同步电动机数学模型的分析与研究[J]. 中国航海, 2003(1):67-72.

QIAO Mingzhong, ZHANG Xiaofeng, REN Xiumin. Research and analysis of the mathematical model of the multi-phase permanent magnet motor[J]. Navigation of China, 2003(1):67-72.

[5] 谢卫, 黄家圣, 谌瑾. 船舶电力推进多相永磁同步电动机的起动性能分析[J]. 上海海运学院学报, 2004, 25(1):29-33.

XIE Wei, HUANG Jiasheng, CHEN Jin. Starting performance analysis of multi-phase permanent magnet synchronous motor in electric propulsion system[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2004, 25(1):29-33.

[6] 陈巨涛, 郭毅, 郑华耀. 船舶电力推进双三相永磁同步电机的数学模型和仿真[J]. 电网技术, 2006, 30(增): 653-658.

CHEN Jutao, GUO Yi, ZHENG Huayao. Mathematical models and simulation of marine electric propulsion double 3-phase permanent magnet synchronous machine[J]. Power System Technology, 2006, 30(s):653-658.

[7] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(编辑 杜秀杰)