

九相异步电动机的非正弦驱动仿真试验

张婉婕¹, 张 静², 陈辉明^{1*}, 蔡卓剑¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 杭州市余杭电力局, 浙江 杭州 311100)

摘要: 为了对多相电机非正弦驱动系统进行研究, 分析了非正弦驱动技术的原理, 建立了适用于仿真的九相异步电机模型。以 Matlab Simulink 为开发平台, 应用推广的 Park 变换, 把自然坐标系下的电机模型转换到 d-q 谐波平面, 并在此基础上建立了通用型的仿真模型。基于多相电机可以注入高次谐波增强电磁转矩原理, 向定子侧注入 1、3、5、7 次电压的叠加, 并对非正弦供电与正弦供电情况下的电机转速、电磁转矩波形进行了对比。仿真分析结果验证了该电机模型的正确性, 以及非正弦驱动技术的优越性。

关键词: 多相电机; 高次谐波注入; 非正弦驱动; Matlab 仿真

中图分类号: TM343; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0678-04

Emulation of nonsine drive technology of nine-phase induction machine

ZHANG Wan-jie¹, ZHANG Jing², CHEN Hui-ming¹, CAI Zhuo-jian¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Power Supply Bureau of Yuhang District, Hangzhou 311100, China)

Abstract: In order to study the non-sinusoidal motor drive technology, a detailed analysis of non-sinusoidal motor drive technology was accomplished. Based on the Matlab Simulink development platform, a model of nine-phase induction motor was established, especially for emulation use. By applying the generalized Park transformation, multi-phase induction motor model was converted into d-q harmonic plane. On this basis, the model of a nine-phase induction motor was built. When injected with high order harmonics, a better performance was established in rotational speed and electromagnetic torque, compared to sinusoidal supply. The emulation result shows that non-sinusoidal motor drive technology has great advantages in high power applications.

Key words: multiphase motor; higher stator current injection; nonsine drive; Matlab emulation

0 引言

众所周知, 多相电机的一大优势是可以注入高次谐波以增强电磁转矩^[1-2]。除增强转矩作用外, 注入谐波使得任意时刻达到微饱和状态的定转子齿增加, 从而提高铁磁材料的利用率。在同等容量下, 可以减小电机体积, 减轻电机重量。

近年来, 随着电力电子技术的发展, 多相逆变器的相数增多降低了功率开关器件耐压等级, 解除了供电电压的限制, 扩大了多相电机驱动系统在大功率场

合的应用范围^[3-5]。随着数字信号处理(DSP)技术和可编程逻辑门电路(FPGA)的发展应用, 智能控制技术逐渐运用于多相电机驱动系统中, 借助数字处理器芯片可以实现复杂的多相电机控制方法^[6-7]。

本研究针对九相集中绕组鼠笼型异步电机, 在定子侧注入多个高次谐波增强转矩。从电机通用模型出发, 应用推广的 Park 变换, 推导出分布于 d-q 平面上的九相异步电机的模型, 最后通过 Simulink 建模、仿真, 分析比较非正弦供电、正弦供电技术下九相异步电机的转速、转矩性能。

收稿日期: 2011-12-08

作者简介: 张婉婕(1988-), 女, 山东菏泽人, 主要从事多相电机的非正弦驱动技术方面的研究。E-mail: zhangzhang-511@163.com

通信联系人: 陈辉明, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: huiming@zju.edu.cn

1 非正弦驱动技术

本研究中,九相异步电机定子采用集中整距绕组,在忽略定子铁芯饱和、忽略集肤效应和涡流效应的情况下,定子侧绕组函数如图1所示,记为 $N(\phi)$ 。

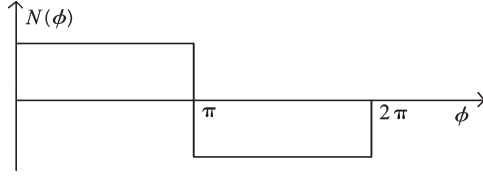


图1 集中整距绕组函数分布图

对绕组函数进行傅里叶分解:

$$N(\phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{n\pi} \right) \frac{N}{2} \sin \frac{n_s \pi}{2} \cos n_s (\phi + \alpha) \quad (1)$$

式中: n_s —电机相数; α —定子相邻相间的电角度。

由图1可知绕组函数具有空间对称性,其傅里叶分解形式中不包含偶数次空间谐波。

异步电机定子侧注入高次谐波,分析9相定子绕组所产生的总气隙磁动势:

$$F = N_a i_a + N_b i_b + N_c i_c + \dots + N_i i_i = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1}{nm} \right) \cdot \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{NI_m}{2} \cdot \sin \left(\frac{n\pi}{2} \right) \cdot \cos \left(\frac{m\pi}{6} \right) \cdot \left(\sin(m\theta - n\varphi) \cdot \left(\cos \frac{(m-n) \cdot 2\pi}{3} + \frac{1}{3} \right) + \sin(m\theta + n\varphi) \cdot \left(\cos \frac{(m+n) \cdot 2\pi}{3} + \frac{1}{2} \right) \right) \quad (2)$$

式(2)包含两大部分,前一部分是正向旋转磁场,后一部分是反向旋转磁场,则九相电机时空谐波分布如表1所示。

表1 九相异步电机时空谐波分布

	空间谐波(n)							
	1	3	5	7	9	11	13	15
1	+1.037							
3		+0.101						-0.020
5			+0.027				-0.010	
7				+0.007		-0.005 9		
9								
11					-0.005	+0.003		
13							+0.004	
15								+0.004

分析表1中的数据,只有当时间、空间谐波次数相等($m=n$)时,相应的旋转磁场以同步速正向旋转,才能产生正向力矩;时间、空间谐波次数不等($m \neq n$)时,谐波磁场旋转方向或正或负,都会引起转矩脉动。因此, n_s 相电机中只有小于 n_s 的所有奇次谐波都具有增

强转矩的作用。对于本研究中的九相异步电机,定子侧注入3、5、7次谐波,1、3、5、7次电压叠加后形成的非正弦电压波形如图2所示。

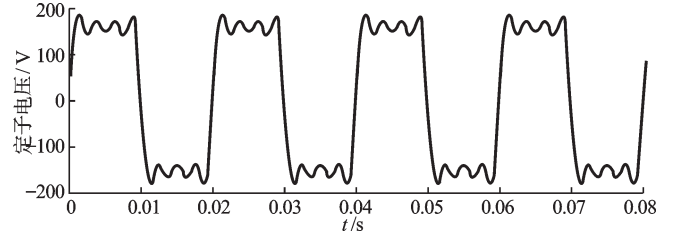


图2 电机定子侧非正弦供电电压波形图

2 通用电机模型

九相电机主要参数包括定子自感矩阵 $[L]_{ss}$,定子电阻矩阵 $[R]_{ss}$,转子自感矩阵 $[L]_{rr}$,转子电阻矩阵 $[R]_{rr}$,定子-转子互感矩阵 $[M]_{sr} = [M]$,及转子-定子互感矩阵 $[M]_{rs} = [M]^T$ 。

鼠笼型转子有 m_r 根导条,假定全部 m_r 根导条完全相同且均匀分布,则转子可以等效为 m_r 个回路。若忽略端部电流,转子等效成一个 m_r 相对称系统,如图3所示^[8]。

电机定子侧、转子侧向量分别用 $[X]_s$ 和 $[X]_r$ 表示:

$$\begin{cases} [X]_s = [x_{s1} & x_{s2} & x_{s3} & \dots & x_{s9}]^T \\ [X]_r = [x_{r1} & x_{r2} & x_{r3} & \dots & x_{r15}]^T \end{cases} \quad (3)$$

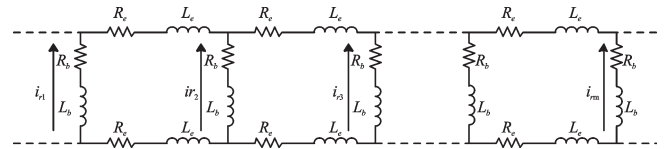


图3 笼型转子的等效电路图

九相电机通用模型为:

$$[V]_s = [R]_s \cdot [I]_s + \frac{d[\Psi]_s}{dt}, [0] = [R]_r \cdot [I]_r + \frac{d[\Psi]_r}{dt} \quad (4)$$

$$[\Psi]_s = [L]_{ss} \cdot [I]_s + [M] \cdot [I]_r, [\Psi]_r = [L]_{rr} \cdot [I]_r + [M]^T \cdot [I]_s \quad (5)$$

$$T_e = \frac{p}{2} \cdot [I]_s^T \cdot [I]_r \cdot \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L]_{ss} & [M] \\ [M]^T & [L]_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I]_s \\ [I]_r \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$T_m - T_e = \frac{1}{p} \cdot \left(J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \cdot \frac{d\theta}{dt} + K_m \cdot \theta \right)$$

3 九相电机仿真模型

上一节给出的通用模型中,定转子电压、电流、磁链矢量均为9维数组,解析求解方法非常复杂;参数矩阵中包含非线性时变变量,耦合性强,并不适用于电机的仿真。

为简化通用模型,通常采用坐标变换的方法^[9],把自然坐标系下的 n_s 维空间转换成相互正交的 $d-q1$ 、

d - $q3$ 、 d - $q5$ 、 d - $q7$ 子空间,消除变量之间的耦合关系。对应自然坐标系下的任意9维向量 $[X]$,运用推广的Park变换矩阵 $[P]$ 可以将之变换为 $[X]_T$ 形式:

$$[X] = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \cdots \ x_9]^T [X]_T = \begin{bmatrix} x_{d1} & x_{q1} & x_{d3} & x_{q3} & x_{d5} & x_{q5} & x_{d7} & x_{q7} & x_0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{9}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/9) & \cos(\theta - 4\pi/9) & \cdots & \cos(\theta - 16\pi/9) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/9) & -\sin(\theta - 4\pi/9) & \cdots & -\sin(\theta - 16\pi/9) \\ \cos 3\theta & \cos 3(\theta - 2\pi/9) & \cos 3(\theta - 4\pi/9) & \cdots & \cos 3(\theta - 16\pi/9) \\ -\sin 3\theta & -\sin 3(\theta - 2\pi/9) & -\sin 3(\theta - 4\pi/9) & \cdots & -\sin 3(\theta - 16\pi/9) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos 7\theta & \cos 7(\theta - 2\pi/9) & \cos 7(\theta - 4\pi/9) & \cdots & \cos 7(\theta - 16\pi/9) \\ -\sin 7\theta & -\sin 7(\theta - 2\pi/9) & -\sin 7(\theta - 4\pi/9) & \cdots & -\sin 7(\theta - 16\pi/9) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & \cdots & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

变换后得到的 d - $q1$ 、 d - $q3$ 、 d - $q5$ 、 d - $q7$ 平面分别以 ω 、 3ω 、 5ω 、 7ω 的速度相对于定子旋转, $\theta = \int \omega dt$ 表示 d - $q1$ 平面相对于定子转过的电角度。

对通用电机模型应用推广的Park变换,可得到分布于1、3、5、7次谐波平面上的电机模型。

磁链方程为:

$$\psi_{vds} = (l_{vm} + l_{vrs}) \cdot i_{vds} + l_{vm} \cdot i_{vdr} \quad (9)$$

$$\psi_{vqs} = (l_{vm} + l_{vrs}) \cdot i_{vqs} + l_{vm} \cdot i_{vqr}$$

$$\psi_{vdr} = (l_{vm} + l_{vrs}) \cdot i_{vdr} + l_{vm} \cdot i_{vds} \quad (10)$$

$$\psi_{vqr} = (l_{vm} + l_{vrs}) \cdot i_{vqr} + l_{vm} \cdot i_{vqs}$$

电压方程为:

$$u_{vds} = r_s \cdot i_{vds} + \frac{d}{dt} \psi_{vds} + v\omega \psi_{vqs} \quad (11)$$

$$u_{vqs} = r_s \cdot i_{vqs} + \frac{d}{dt} \psi_{vqs} + v\omega \psi_{vds}$$

$$u_{vdr} = r_s \cdot i_{vdr} + \frac{d}{dt} \psi_{vdr} + v\omega \psi_{vqr} \quad (12)$$

$$u_{vqr} = r_s \cdot i_{vqr} + \frac{d}{dt} \psi_{vqr} + v\omega \psi_{vds}$$

运动方程为:

$$T_e = p \left(L_{1meg} (i_{q1s} i_{d1r} - i_{q1r} i_{d1s}) + 3L_{3meg} (i_{q3s} i_{d3r} - i_{q3r} i_{d3s}) + \right. \quad (13)$$

$$\left. 5L_{5meg} (i_{q5s} i_{d5r} - i_{q5r} i_{d5s}) + \cdots \right)$$

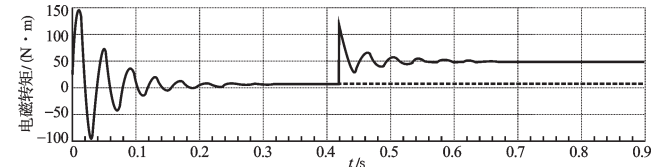
$$T_m - T_e = \frac{1}{p} \cdot \left(J \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \cdot \frac{d\theta}{dt} \right) = \frac{1}{p} \left(J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \right) \quad (14)$$

式中: v —各次谐波平面, $v=1, 3, 5, 7$ 。

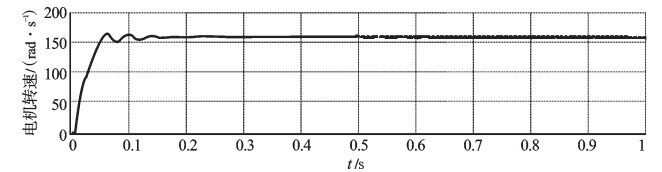
4 九相电机建模仿真试验

本研究中九相异步电机的参数如表2所示,可以

利用九相电机的基本参数计算出九相电机各相电阻、电感值,进而算出定子侧、转子侧相应的电阻矩阵、电感矩阵、互感矩阵等^[10]。仿真时向电机定子端注入1、3、5、7次电压谐波的叠加值,基波幅值为200 V,各次谐波幅值之比为 $1/v$ (其中 $v=1, 3, 5, 7$),把电机参数代入到式(9~14),并在Matalb Simulink中建立电机模型,以仿真九相异步电机的非正弦驱动响应过程,其结果如图4所示。



(a) 电磁转矩波形比较图



(b) 电机转速比较图

图4 九相异步电机的定子磁链、转速、转矩波形图

图4中,实线所示为电机启动后0.5 s加40 N·m负载转矩时的电机转速、电磁转矩波形;虚线所示则为空载情况下转速、转矩的波形。由图4分析可知,电机空载启动过程中会出现转矩振荡,最大振荡幅值约为120 N·m。启动后,在0.4 s时达到稳定状态,转矩稳定值为2 N·m,大致与电机空载转矩相等;转速稳定值为155 rad/s=1 480 r/min,转差较小。负载转矩的突然增加,会导致电磁转矩不稳定,电机约需要0.2 s达到新的稳定状态;电机转速略有下降,稳定后的转速稳定值约是152 rad/s=1 450 r/min,转差较空载时增大。

向九相异步电机中注入3、5、7次谐波,主要目的在于增强转矩;空载及负载时,分别采用注入非正弦、正弦电压供电技术,仿真得到的电机定子电流、转速、负载转矩波形图如图5所示。其中实线为非正弦供电

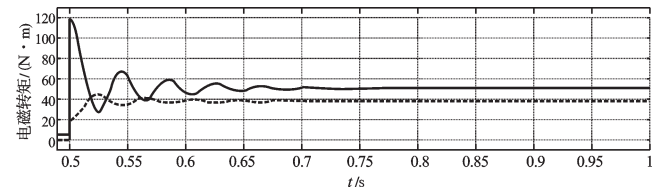


图5 在0.5 s时突加40 N·m负载,非正弦供电、正弦供电电磁转矩比较

表2 九相电机参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
额定功率	10 kW	额定频率	50 Hz	极对数	2	定子每相电阻	0.495 ohm	气隙有效长度	0.4 mm
额定电压	215 V	额定转速	1 450 r·min ⁻¹	绕组接法	Y	转子导条电阻	0.24 ohm	定子铁芯长度	145 mm
额定电流	6.1 A	定子内径	126 mm	转子导条数	30	转子端部电阻	0.2 ohm	定子每槽导体数	48

波形,虚线为正弦供电波形。

电机启动后,在0.5 s时突加40 N·m负载转矩,非正弦供电及正弦供电条件下的电磁转矩波形如图5所示,其中实线表示非正弦供电情况,虚线表示正弦供电情况。分析图5可知,非正弦供电情况下电机产生的电磁转矩明显高于正弦供电情况。由图5可以看到加40 N·m负载后,稳定状态非正弦供电、正弦供电情况下电磁转矩差值为6 N·m,验证了注入高次谐波可以极大提高电磁转矩理论的正确性。与此同时,由于定子侧注入了高次谐波,暂态过程中的转矩振荡也大幅增加,其幅值约为120 N·m,经过0.2 s的时间达到新的稳定状态。

5 结束语

本研究首先运用多回路方法,分析了九相鼠笼型异步电动机的定子方程、转子方程。然后应用推广的Park变换到电机模型,得出变换后的分布于 $d-q$ 平面的电机电压方程、磁链方程以及运动方程,再在Matlab Simulink环境中建立九相异步电机的仿真模型。最后,将电机转速和电磁转矩的仿真波形图与理论分析结果进行比较,二者的一致性成功验证了模型的正确性。该模型把相互耦合的电机矢量分解到各次谐波平面,消除了各次谐波之间的耦合,简化了九相异步电机电磁转矩的计算,非常适用于建模及仿真场合。

参考文献(References):

- [1] XU Huang-sheng, TOLYAT H A, PETERSEN L J . Rotor Field Oriented Control of Five-Phase Induction Motor with the Combined fundamental and Third Harmonic Currents [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC Anaheim, CA, 2001:524-533.
- [2] TOLYAT H A, LIPO T A, COLEMAN J . Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications part II: motor design and performance [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 1991, 6(4):679-683.
- [3] LEVI E, BOJOI R, PROFUMO F . Multiphase induction motor drives - a technology status review [J]. **IET Electrical Power Application**, 2007, 1(4):489-516.
- [4] DUJIC D, LEVI E, JONES M . Dc bus utilization in multi-phase VSI supplied drives with a composite stator phase number [C]//Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Baden Dattwil, Switzerland, 2010:1495-1500.
- [5] 王 东, 吴新振, 马伟明, 等. 非正弦供电十五相感应电机气隙磁势分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 88-94.
- [6] 薛 山, 温旭辉, 王又珑. 多相永磁同步电机多维控制技术[J]. 电工技术学报, 2008, 23(9):65-69.
- [7] AYMAN S, KHALIK A, GADOUE S M . Improved flux pattern by third harmonic injection for multiphase induction machines using neural network [J]. **Alexandria Engineering Journal**, 2011, 50(2):163-169.
- [8] 康 敏, 黄 进, 刘 东. 多相异步电机参数的计算与测量[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24):81-87.
- [9] 黄 进. p 对极 n 相对称系统的变换理论[J]. 电工技术学报, 1995, 10(1):53-57.
- [10] PEREIRA L. A, SCHARLAU C C, PEREIRA L F A . Model of a Five-Phase Induction Machine Allowing for Harmonics in the Air-Gap Field Part I: Parameter Determination and General Equations [C]//The 30th Annual conference of IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea, 2004: 98-103.

[编辑:张 翔]

(上接第677页)

- [4] TAKEDA K, HATTORI T, IZUMI T, et al. Application of SPRT to an image data sequence for a remote monitoring system [J]. **Artificial Life and Robotics**, 2010, 15(4): 421-424.
- [5] 袁 芳. 基于S3C2410X的嵌入式图像采集压缩系统的设计[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院, 2010.
- [6] 曹 原, 方建安. 基于Web的嵌入式远程监控系统[J]. 机电工程, 2011, 28(7):859-862, 871.
- [7] 傅玲燕, 姜 伟, 周见行. 基于Web和GPRS技术的塔式起重远程监控系统[J]. 机电工程, 2011, 28(7):843-845, 854.
- [8] 罗淳榕, 秦现生, 马新刚. 基于CGI的嵌入式远程控制系统[J]. 测控技术, 2006, 25(8):50-52.
- [9] 郭建文, 王安庆, 林中达. 基于Web的火电厂远程监控及故障诊断系统开发[J]. 机电工程技术, 2010, 39(1):13-15.
- [10] 雷才嘉, 单 蒙. 嵌入式以太网在工业测控系统中的应用[J]. 机电工程技术, 2010, 39(11):30-31.

[编辑:张 翔]