

九相感应电机与三相感应电机的性能比较^{*}

李 勇¹, 郑 琦², 郑 瑜³

(1. 金华电业局, 浙江 金华 321000 ; 2. 宁波电业局, 浙江 宁波 315200 ;

3. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:与三相电机相比,多相电机具有高可靠性,转矩脉动小,多可控自由度等优点。针对多相电机是否具有这些优势的问题,建立了多相电机的数学模型,从磁动势角度出发,深入分析比较了多相电机与三相电机的性能,并以一台九相电机为研究对象进行了有限元仿真。研究结果表明,多相电机具有较高的可靠性,并能进行非正弦供电,输出转矩提高,转矩脉动减小。

关键词:多相电机;磁动势;有限元仿真

中图分类号: TM343

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)10-1273-04

Performance comparison of nine-phase induction motor and three-phase induction motor

LI Yong¹, ZHENG Qi², ZHENG Yu³

(1. Jinhua Electric Power Corporation, Jinhua 321000, China; 2. Ningbo Electric Power Corporation, Ningbo 315200, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Compared with the three-phase motor, multiphase motor has smaller torque ripple, higher reliability and multi-control freedoms. Aiming at this problem, the mathematical model of multiphase motor was established. The characteristics of 9-phase motor and 3-phase motor by using the MMF distribution were analyzed. A complete finite element analysis was included. The results indicate that the nine-phase induction motor will have higher reliability and it can be supplied by non-sinusoidal voltage. The output torque would increase and the torque ripple would minish.

Key words: multiphase motor ; MMF ; finite element analysis (FEA)

0 引 言

受电力系统的限制,电机的相数通常不超过三相。电力电子器件和技术的发展使得多相功率变换器件成为可能,从而电机的相数也突破了这一限制。多相电机大约在 35 年前提出,近几年才引起学者的广泛兴趣。由于电机功率正比于相数和相电压、电流的乘积,多相电机可较好地实现低压器件的大功率传动,适用于供电电压受限的场合。它可以通过改造电机结构来适应功率开关器件的耐压等级。

此外,多相电机还具有以下优点^[1]: ①转矩脉动

的幅值减小,脉动的频率增加; ②高可靠性^[2],多相电机的一相或几相定子绕组发生故障对驱动系统起动和运行的影响相对较小; ③多相电机具有多个控制自由度,比如,可利用一台 n 相逆变器独立控制多台多相电机^[3]。多相电机已在大功率舰船驱动、汽车驱动等领域获得重要应用。

本研究从多相电机磁动势的角度出发,深入探讨多相绕组的时空谐波与多相坐标变换的内在统一性以及多相电机的特点,并对一台九相感应电机和一台三相感应电机进行有限元仿真,分析比较其仿真结果,由此验证了多相电机由于其相数增加而具有的优势,为

收稿日期: 2011-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677060); 浙江省教育厅资助项目(Y200907092); 浙江省科技计划资助项目(2008C01011-2; 2008C21163)

作者简介: 李 勇(1983-),男,浙江金华人,主要从事电力管理方面的工作. E-mail: dayuee@hotmail.com

今后多相电机的优化设计和控制策略提供理论和仿真依据。

1 多相电机的坐标变换与数学模型

多相电机具有多个控制自由度,它也比三相电机具有更多种形式的绕组结构。简单起见,本研究以 9 相异步电机为例,分析其 2 种结构:①整距集中绕组电

机;②短距分布的正弦绕组电机。

这两种电机都是由完全相同且在空间均匀分布的九相绕组构成,可看成多相对称系统。文献[4-5]从矩阵对角化的角度推导了多相对称系统的变换矩阵,从推导过程来看,这两种电机的坐标变换矩阵都可采用下述矩阵:

$$C = \sqrt{\frac{2}{9}} \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & \cos(\varphi_1 - \alpha) & \cos(\varphi_1 - 2\alpha) & \cos(\varphi_1 - 3\alpha) \cdots \cos(\varphi_1 - 8\alpha) \\ \sin\varphi_1 & \sin(\varphi_1 - \alpha) & \sin(\varphi_1 - 2\alpha) & \sin(\varphi_1 - 3\alpha) \cdots \sin(\varphi_1 - 8\alpha) \\ \cos\varphi_3 & \cos(\varphi_2 - 3\alpha) & \cos(\varphi_2 - 6\alpha) & \cos(\varphi_2 - 9\alpha) \cdots \cos(\varphi_2 - 24\alpha) \\ \sin\varphi_3 & \sin(\varphi_2 - 3\alpha) & \sin(\varphi_2 - 6\alpha) & \sin(\varphi_2 - 9\alpha) \cdots \sin(\varphi_2 - 24\alpha) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \cdots \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\alpha = 2\pi/9$; 正交矩阵 C 将电机定转子变换到旋转坐标系下,对定转子电感及互感进行解耦,以简化数学模型并利于分析和控制。 C 的第 1、2 行构成一个 q_1d_1 平面,第 3、4 行构成一个 q_2d_2 平面,第 5、6 行构成一个 q_3d_3 平面,第 7、8 行构成一个 q_4d_4 平面, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 分别是这两个平面的旋转角度,由具体情况可得定、转子的变换矩阵 C_s 、 C_r ,逆变换 $C^{-1} = C^T$ 。

由三角函数的正交性易得,不同的谐波分量隶属于不同的平面。例如九相电机中 $9k \pm 1$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 次谐波分量(更确切地说是相邻相相位差为 $(9k \pm 1)2\pi/9$ 的电压或电流分量)属于 q_1d_1 平面, $9k \pm 3$ 次谐波分量属于 q_2d_2 平面, $9k \pm 5$ 次谐波分量属于 q_3d_3 平面, $9k \pm 7$ 次谐波分量属于 q_4d_4 平面。

经过变换后转子坐标系下的电机状态方程:

$$\begin{bmatrix} U_{st} \\ U_{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{st} \\ I_{rt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{st} & M_{srt} \\ M_{srt}^T & L_{rt} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{st} \\ I_{rt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_s \\ W_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{st} & M_{srt} \\ M_{srt}^T & L_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{st} \\ I_{rt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式中:

$$U_{st} = C_s U_s = [u_{q1s} \quad u_{d1s} \quad u_{q2s} \quad u_{d2s} \quad 0 \quad 0]^T;$$

$$I_{st} = C_s I_s = [i_{q1s} \quad i_{d1s} \quad i_{q2s} \quad i_{d2s} \quad 0 \quad 0]^T;$$

$$U_{rt} = C_r U_r = [u_{q1r} \quad u_{d1r} \quad u_{q2r} \quad u_{d2r} \quad 0 \quad 0]^T;$$

$$I_{rt} = C_r I_r = [i_{q1r} \quad i_{d1r} \quad i_{q2r} \quad i_{d2r} \quad 0 \quad 0]^T;$$

$$L_{st} = C_s L_s C_s^T;$$

$$L_{rt} = C_r L_r C_r^T;$$

$$M_{srt} = C_s M C_r^T;$$

$$W_s = -\dot{C}_s C_s^T;$$

$$L_r = -\dot{C}_r C_r^T; \quad (3)$$

式中: $\dot{C}_s$ 、 $\dot{C}_r$ —矩阵 C_s 、 C_r 对时间求导。

2 多相电机的磁动势分析

磁动势的分析是深入了解多相电机的一个重要手段^[6]。

电机中绕组常用绕组函数来表示^[7]。 a 相绕组的绕组函数 N_a , 即 a 相绕组通入单位电流时产生的磁势波。在对称的 n 相系统中,各相绕组的绕组函数可分别表示为:

$$N_a = N_1 \cos(j) + N_2 \cos(2j) + N_3 \cos(3j) + \dots$$

$$N_b = N_1 \cos(j - a) + N_2 \cos(2(j - a)) + N_3 \cos(3(j - a)) + \dots$$

$$N_c = N_1 \cos(j - 2a) + N_2 \cos(2(j - 2a)) + N_3 \cos(3(j - 2a)) + \dots$$

$$\vdots$$

$$N_n = N_1 \cos(j - (n-1)a) + N_2 \cos(2(j - (n-1)a)) + N_3 \cos(3(j - (n-1)a)) + \dots \quad (4)$$

式中: j —气隙圆周的空间角度; $a = 2p/n$, n 为相数; N_1 、 N_2 、 N_3 ...—每相绕组绕组函数的 1、2、3...次谐波幅值,它对应于绕组的各次空间谐波。通常电机中偶次空间谐波不存在,即 $N_v = 0$ (v = 偶数)。

含有各次谐波(在这里,谐波的次数体现在相位差上,而与频率关系不大)的各相励磁电流可写为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \sum_k I_k, \quad I_k = I_{km} \begin{bmatrix} \sin(\omega_k t) \\ \sin(\omega_k t - k\alpha) \\ \sin(\omega_k t - 2k\alpha) \\ \vdots \\ \sin(\omega_k t - (n-1)k\alpha) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: I_{km} — k 次谐波电流的幅值, $k = 1, 2, 3, \dots$ 。

通常电机中不存在偶次电流,且 $\omega_k = k\omega_1$ 。

一套 n 相定子绕组通入 k 次谐波电流产生的磁势波为:

$$F = \sum_{i=1}^n \{ I_{km} \sin[\omega_k t - k(i-1)\alpha] \sum_{\nu} N_{\nu} \cos[\nu(\varphi - (i-1)\alpha)] \} = \frac{I_{km}}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\nu} N_{\nu} \{ \sin[\omega_k t + \nu\varphi - (k+\nu)(i-1)\alpha] + \sin[\omega_k t - \nu\varphi - (k-\nu)(i-1)\alpha] \} \quad (6)$$

其中, ν 次磁势谐波 F_{ν} 为:

$$F_{\nu} = \begin{cases} \frac{nN_{\nu}I_{km}}{2} \sin(\omega_k t + \nu\varphi), & \text{当 } k + \nu = \mu n, \mu = 0, \pm 1, \dots \\ 0, & \text{当 } k \pm \nu \neq \mu n, \mu = 0, \pm 1, \dots \\ \frac{nN_{\nu}I_{km}}{2} \sin(\omega_k t - \nu\varphi), & \text{当 } k - \nu = \mu n, \mu = 0, \pm 1, \dots \end{cases} \quad (7)$$

由此易得 k 次电流谐波产生的 ν 次磁场旋转的电角速度为:

$$n_{\nu} = \begin{cases} -\frac{\omega_k}{\nu}, & \text{当 } k + \nu = \mu n, \mu = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \\ \text{NULL}, & \text{当 } k \pm \nu \neq \mu n, \mu = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \\ \frac{\omega_k}{\nu}, & \text{当 } k - \nu = \mu n, \mu = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)可得各种电机的磁场分布,三相电机的磁场分布如表 1 所示。其中,时间谐波对应于变量 k ,空间谐波对应于 ν ,各磁势波的幅值为 $3N_{\nu}I_{km}/2$; + 和 - 分别表示该磁场向前或向后旋转。

表 1 三相电机的磁场分布

时间谐波	空间谐波 ν							
k	1	3	5	7	9	11	13	15
1	1		-1/5	1/7		-1/11	1/13	
3		$\pm$			$\pm$			$\pm$
5	-5		1	-5/7		5/11	-5/13	
7			-7/5	1		-7/11	7/13	
9		$\pm$			$\pm$			$\pm$
11	-11		11/5	-11/7		1	-11/13	
13			-13/5	13/7		-13/11	1	
15		$\pm$			$\pm$			$\pm$

由表 1 可知:①主对角线上的各磁场旋转速度都相等,为基波同步速,但当 $k = \nu$ 且都为 3 的倍数时,该磁场为一驻波;②同一列中两磁场作用产生脉动转矩,脉动转矩主要源于 1、5 次谐波电流产生的基波磁场间的相互作用;③谐波磁场产生谐波电动势引起损耗,效率降低、振动及噪声等,所以三相电机中尽量使 $I_{km} = 0$ ($k > 1$) 和 $N_{\nu} = 0$ ($\nu > 1$),即电机采用短距分布绕组并提供正弦电流。

表 2 九相电机的磁场分布

时间谐波	空间谐波 ν									
k	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
1	1									-1/17 1/19
3		1						-3/15		
5			1					-5/13		
7				1			-7/11			
9					$\pm$					
11				-11/7		1				
13			-13/5				1			
15		-15/3						1		
17	-17									
19	19									

九相电机的磁场分布情况如表 2 所示,各项磁势波的幅值为 $9N_{\nu}I_{km}/2$,可见:①随着相数的增大,转矩脉动的频率增大、幅值减小;②对于采用正弦绕组的多相电机:从磁势波的角度来看, $N_3 = 0$,由式(7)知 3 次谐波磁场的幅值为 0,即相应的反电势为 0,相当于逆变器产生的 3 次谐波电压直接加在定子漏抗上,这将产生较大的谐波电流;而谐波电流较大一直是多相正弦绕组电机的一个缺点,尽管利用变压器滤波^[8]或合理选择逆变器的开关状态^[9]等都能一定程度上解决这一问题;从坐标变换和数学模型的角度来看, $N_3 = 0$ 体现在 3 次谐波磁场旋转坐标系下对应的励磁电感 $L_{m3} = 3\pi\mu_0 l r N_3^2 / g_0 = 0$ (其中, r 表示电机气隙圆周半径, g_0 表示气隙的等效长度,即 3 次谐波电压直接加在定子电阻和漏感上)。 $q_2 d_2$ 平面不存在机电能量转换,因此,多相正弦绕组电机的坐标变换矩阵也常取该矩阵的前两行,其逆矩阵为它的广义逆^[10];③从表 2 可以看到,若电机绕组采用方波绕组(整距集中绕组),则 $N_3 \neq 0$,3 次谐波电流产生的 3 次磁场切割绕组会感应出 3 次反电势,3 次谐波电流要小得多,所以多相方波绕组电机中磁场映射到 $q_2 d_2$ 平面,即 $q_2 d_2$ 平面定转子耦合,存在能量转换,3 次谐波电流产生的 3 次谐波磁场也会产生正的稳定的转矩。

同理,九相方波绕组电机可利用 1、3、5、7 次电流产生的 1、3、5、7 次谐波磁场来产生正的稳定的转矩且它们之间不存在耦合,这 4 个磁场分别对应于坐标变换中的 4 个正交的 qd 平面,每个平面构成一个控制自由度。 $(2n+1)$ 相坐标变换具有 n 个正交平面或称 n 个控制自由度^[11-12]。

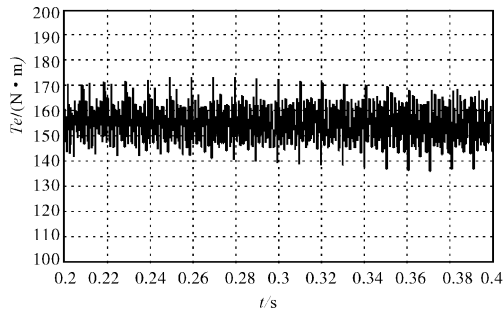
3 有限元仿真结果

本研究以一台九相 15 kW 异步电机为研究对象,该电机由一台三相异步电机(Y2-180L-6)改造而来,定子 54 槽,转子 44 槽,定子内径为 205 mm,转子外径

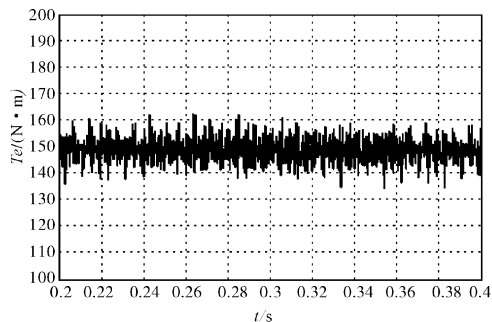
为 204.1 mm, 铁芯长 170 mm。改造后的九相电机定子采用分布绕组, 极对数 $p=3$, 每相串联匝数为 114, 并联支路数为 1, 转子不变。本研究采用二维有限元分析软件 Ansoft/Maxwell2D 来进一步计算。

3.1 额定运行

额定运行时, 三相电机额定相电压为 380 V, 三角形接法, 额定转速为 970 r/min; 九相电机的额定相电压为 253 V, 星形接法, 额定转速为 970 r/min。两台电机在各自额定运行状态下的输出转矩如图 1 所示。



(a) 三相电机输出转矩



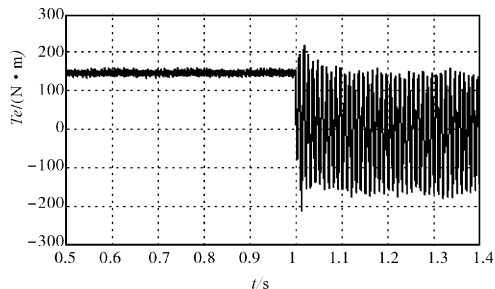
(b) 九相电机输出转矩

图 1 额定运行条件下九相电机与三相电机输出转矩比较

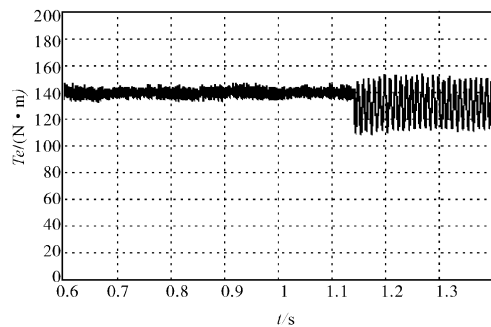
由图 1 可知, 在额定运行条件下, 九相电机的转矩脉动幅值比三相电机小。

3.2 单相开路运行仿真

在电机运行过程中, 突然一相发生故障而缺相, 本研究在这种情况下对两台电机的输出转矩进行仿真, 如图 2 所示。



(a) 三相电机单相开路输出转矩



(b) 九相电机单相开路输出转矩

图 2 单相开路九相电机与三相电机输出转矩比较

由仿真结果可见, 在单相开路情况下, 仍能继续运行, 可靠性高, 而三相电机不能继续运行。

3.3 九相电机正弦供电与非正弦供电比较

本研究将九相电机的短距分布绕组改绕成集中整距绕组, 在电压源供电下, 通入 1、3、5、7 次谐波, 在保持齿、轭部磁密幅值分别相等和定子铜耗相同的条件下, 比较了正弦供电和非正弦供电时的电机输出转矩, 如图 3~5 所示。

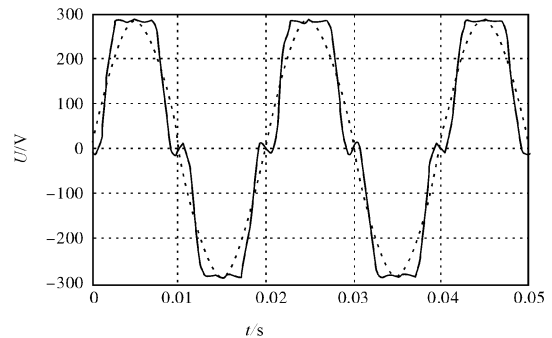


图 3 正弦供电和非正弦供电九相电机定子电压比较

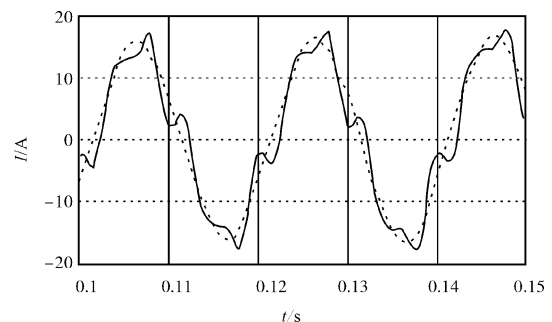


图 4 正弦供电和非正弦供电九相电机定子电流比较

由图 5 可知, 本研究利用多相电机的多控制自由度, 对多相电机注入谐波, 进行非正弦供电, 可以提高电机的输出转矩。

(下转第 1280 页)

容差故障状态下的全速电流测试仿真实验数据表明:对被测电路进行全速电流测试,采集电源电流在若干个工作周期内的平均电流值可实现非介入 PCB 电路故障信息的获取;并有望应用于印制电路板电路的非介入式故障诊断。

参考文献 (References):

- [1] 万九卿. 印制电路板故障诊断技术研究—基于统计模式识别理论的印制电路板非介入式故障诊断[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2003.
- [2] 朱彦卿. 模拟和混合信号电路测试及故障诊断方法研究[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院, 2008.
- [3] 荀庆来. 微处理器全速电流测试实验研究[D]. 长沙:湖南大学计算机与通信学院, 2006.
- [4] 邓杭剑. PIC12F509 全速电流测试及自反馈测试研究[D]. 长沙:湖南大学计算机与通信学院, 2007.
- [5] MIN Ying-hua, KUANG Jis-hun, NIU Xiao-yan. At-speed

current testing [C]//Proceedings of the 12th Asian Test Symposium (ATS'03), 2003:396-399.

- [6] SAGARS S, WALKER M. Iddx-based test methods: a survey [J]. **Transactions on Design Automation of Electronic Systems**, 2004, 9(2):159-198.
- [7] 白金纬. 基于电流的数字集成电路故障诊断的方法研究[D]. 成都:电子科技大学自动化工程学院, 2005.
- [8] 邓晓茜. 数字系统动态电流 IDDT 测试技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院, 2007.
- [9] KONDAGUNTURI R, BRADLEY E. Benchmark Circuits for Analog and Mixed Signal Testing[C]//Southeastcon'99. Proc., 1999:217-220.
- [10] 卢建林, 杨士元, 王 红, 等. 基于 PSPICE 进行模拟电路故障建模的方法[J]. **微电子学与计算机**, 2006, 23(7):17-19.
- [11] 李泉峰, 姚文熙, 吕征宇. 基于 PLECS 的三相隔离 BUCK 仿真研究[J]. **机电工程**, 2010, 27(12):110-112.

[编辑:张 翔]

(上接第 1276 页)

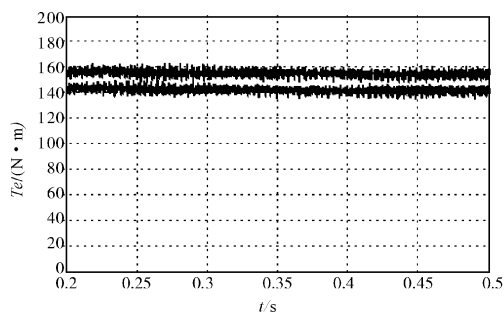


图 5 非正弦供电(上)和正弦供电(下)九相电机输出转矩比较

4 结束语

本研究建立了多相电机的数学模型,从磁动势的角度出发,深入探讨多相绕组的时空谐波与多相坐标变换的内在统一性。并对一台九相感应电机和一台三相感应电机进行有限元仿真。仿真结果证明,多相电机具有以下优势:①转矩脉动的幅值减小;②高可靠性,在一相或几相定子绕组发生故障对驱动系统起动和运行的影响相对较小;③多相电机具有多个控制自由度,利用该特性可以对多相电机注入谐波,进行非正弦供电,提高电机的输出转矩。

参考文献 (References):

- [1] SINGH G K. Multiphase induction machine drive research - a survey [J]. **Electronic Power System Research**, 2002 (61):139-147.
- [2] 康 敏, 黄 进. 9 相 3Y 电机的模型与比较分析[J]. **大电机技术**, 2009(8):20-24.

- [3] LEVI E. A novel concept of a multiphase, multi-motor vector controlled drive system supplied from a single voltage source inverter [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2004, 19(2):320-325.
- [4] 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.
- [5] KIANINEZHAD R, NAHID-MOBARAKEH B, BAGHI L, et al. Modeling and control of six-phase symmetrical induction machine under fault condition due to open phase [J]. **IEEE Transactions on industrial Electronics**, 2008, 55(5):1966-1977.
- [6] TOLIYAT H A, LIPO T A, WHITE J C. Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications part 2 [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversin**, 1991, 6(4):684-692.
- [7] LUO Xiao-gang, LIAO Yue-feng, TOLIYAT H A, et al. Multiple coupled circuit modeling of induction machines [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1995, 31(2):311-318.
- [8] APSLEY J M. De-rating of multiphase induction machine s due to supply unbalance [C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009:1851-1857.
- [9] 薛 山, 温旭辉. 一种新颖的多相 SVPWM [J]. **电工技术学报**, 2006, 21(2):68-72.
- [10] 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.
- [11] XU Huang-sheng. Rotor field oriented control of a five-phase induction motor with the combined fundamental and third harmonic injection [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001:392-398.
- [12] 黄 进, 康 敏, 杨家强. 基于多相理论的新型单绕组无轴承电机 [J]. **浙江大学学报:工学版**, 2007, 41(11):1850-1856.

[编辑:张 翔]