

五相异步电动机的设计与参数计算^{*}

孙俊忠¹, 许伯强²

(1. 海军潜艇学院 机电动力系, 山东 青岛 266042;

2. 华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003)

摘 要: 五相异步电动机的研究基础在于五相异步电动机的设计、制造及参数计算。给出了一台小型五相异步电动机的设计方案并完成了样机制造, 建立了五相异步电动机的多回路数学模型, 并针对样机完成了相关参数计算, 以试验与仿真数据验证了上述工作的正确性。

关键词: 五相异步电动机; 设计; 多回路数学模型; 参数计算

中图分类号: TM 307 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0084-07

Manufacturing Design and Parameter Calculation of Five-Phase Asynchronous Motor^{*}

SUN Junzhong¹, XU Boqiang²

(1. Department of Electromechanical Power, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China;

2. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: At present, the research on five-phase induction motors has continuously accelerated on the basis of the design, manufacture, and parameter calculation of five-phase induction motors. The overall design of a small five-phase induction motor was completed and provided, accomplishing the manufacture of a prototype machine. The multi-loop mathematical model of five-phase induction motors was established, and moreover, all the parameters in this kind of model were calculated, taking the prototype machine as an example. Finally, experimental and simulation results were provided to validate the above work.

Key words: five-phase asynchronous motor; design; multi-loop mathematical model; parameter calculation

0 引 言

与传统的三相异步电动机相比,五相异步电动机具有诸多优势:转矩脉动、振动与噪声水平显著降低,功率密度显著提高及容错运行等。因此,五相异步电动机非常适合并日趋广泛地应用于电动汽车、轨道交通、舰船等驱动与推进领域。

文献[1]对五相异步电动机的设计与运行特性做了研究,文献[2-8]则对五相异步电动机驱动系统的控制方法展开研究。文献[1]、文献[2-8]

工作侧重于五相异步电动机的三次谐波电压注入运行模式。文献[9]对五相异步电动机做了瞬态仿真分析。文献[10]讨论了五相异步电动机驱动系统的容错运行控制。特别地,文献[11-12]对五相异步电动机的设计、模拟与控制(包括容错运行控制)做了综合评述。

显然,五相异步电动机的研究正呈如火如荼之势,而其基础之一即是试验样机的设计、建模与分析。

就设计而言,五相异步电动机与传统的三相

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51277077)

作者简介: 孙俊忠(1965—),男,教授,研究方向为电机的过渡过程与电力电子控制技术。

许伯强(1972—),男,博士研究生,教授,研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断。

异步电动机并无显著区别,借鉴成熟的三相异步电动机设计方法、流程即可^[13-15]。五相异步电动机多回路数学模型亦与三相异步电动机类似^[16],但其中某些参数的计算有其特殊性。譬如,定子端部漏抗、定子相绕组的自感系数及彼此间的互感系数等。对于三相异步电动机而言,上述参数的计算可以直接使用某些业已建立的公式^[13-16]。但需注意,这些公式是针对定子“三相”绕组而言的,对于定子“五相”绕组则不再适用,必须另行处理。就目前而言,系统而翔实的五相异步电动机设计方案及其多回路数学模型与参数计算,尚未见诸文献。有鉴于此,本文致力于以下工作。

首先,给出一台五相、1对极、5.5 kW 异步电动机的设计方案并完成样机制造;之后,建立其多回路数学模型,并完成相关参数计算;进而,以试验与仿真数据予以验证。

1 设计方案

关于五相异步电动机的具体设计方法、流程,参阅文献[13-15],无需赘述,此处直接给出主要设计结果。

输出功率 $P_N = 5.5$ kW、中心高 132 mm、相数 $m_1 = 5$ 、Y 接、相电压 $U_1 = 220$ V、频率 $f_1 = 50$ Hz、极对数 $p = 1$ 、定子槽数 $Z_1 = 30$ 、转子(笼型)槽数 $Z_2 = 26$ 、定子外径 $D_1 = 210$ mm、定子内径 $D_{i1} = 116$ mm、转子外径 $D_2 = 114.9$ mm、转子内径 $D_{i2} = 48$ mm。

铁心长 $l_i = 105$ mm、定子铁心材料采用 D23 硅钢片、转子铁心材料采用 DR510-50 硅钢片、定转子间气隙长度 $\delta = 0.55$ mm、定转子冲片及尺寸参见图 1。

定子线圈匝数 $W_c = 44$ 、采用直径 $d_{c1} = 1.3$ mm 的 QZ-2 型漆包线单根绕制,图 2 为定子线圈及其端部示意图。

定子五相绕组型式为单层同心式、并联支路数 $a_1 = 1$,图 3 为定子绕组展开图。图 3 中,定子五相绕组分别以 A、B、C、D、E 表示,A 相绕组的具体连接已经明确示出(A1、A2 分别表示首、末端),其余四相绕组按照 A、B、C、D、E 顺次相隔 72° 空间电角度分相、连接即可。

转子绕组为铸铝型式,导条长度 $l_B = 105$ mm、导条截面积 $S_B = 96.8$ mm²、端环平均直径 $D_R =$

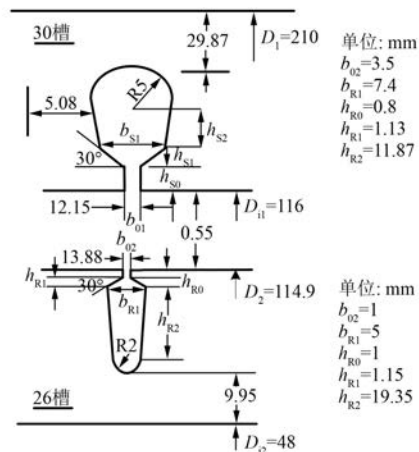


图 1 定转子冲片及尺寸

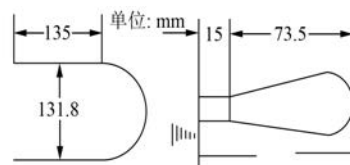


图 2 定子线圈及其端部

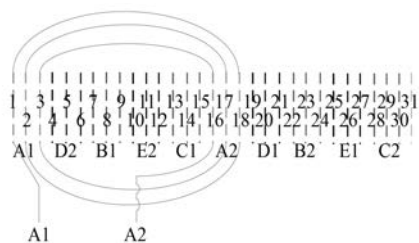


图 3 定子绕组展开图

86.7 mm、端环截面积 $S_R = 420$ mm²、斜槽宽度 12.15 mm。

另外,该电机采用 B 级绝缘、末端风扇通风冷却、IP44 防护。

该设计方案已提交至江西特种电机股份有限公司,并由其完成了样机制造,如图 4 所示。



图 4 五相异步电机样机

2 多回路数学模型及其参数计算

针对图 4 样机, 参照文献[1-10]、文献[16]建立了其多回路数学模型并完成了相关参数计算。

2.1 多回路数学模型

定子回路按照 A、B、C、D、E 五相绕组选取, 并设其电压分别为 u_A 、 u_B 、 u_C 、 u_D 、 u_E , 电流分别为 i_A 、 i_B 、 i_C 、 i_D 、 i_E , 磁链分别为 ψ_A 、 ψ_B 、 ψ_C 、 ψ_D 、 ψ_E 。

转子回路按照笼型转子的实际网状回路选取, 如图 5 所示。假设转子第 j ($j=1, 2, \dots, Z_2$) 个回路的电压、电流、磁链分别为 u_j 、 i_j 、 ψ_j 。

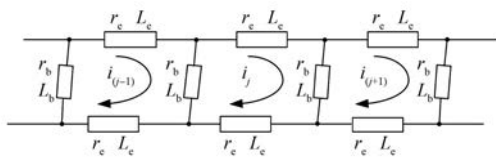


图 5 转子回路

式(1)~式(4)为该五相异步电动机的多回路模型。

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + p(\boldsymbol{\Psi}) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{M}\mathbf{I} \quad (2)$$

$$T_e = (P/2)\mathbf{I}^T(\partial\mathbf{M}/\partial\gamma)\mathbf{I} \quad (3)$$

$$p(\omega_r) = (P/J)(T_e - T_L) \quad (4)$$

需要注意, 此处忽略了转子端环回路(在异步电动机本体正常情况下, 转子端环回路电流近似为零)。

式(1)~式(4)中, 电压矩阵 $\mathbf{U}$ 、电流矩阵 $\mathbf{I}$ 、磁链矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 、电阻矩阵 $\mathbf{R}$ 与电感系数矩阵 $\mathbf{M}$ 的展开型式分别示于式(5)~式(9)。

$$\mathbf{U} = [u_A \quad u_B \quad u_C \quad u_D \quad u_E \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{I} = [i_A \quad i_B \quad i_C \quad i_D \quad i_E \quad i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad \cdots \quad i_{Z_2}]^T \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\Psi} = [\psi_A \quad \psi_B \quad \psi_C \quad \psi_D \quad \psi_E \quad \psi_1 \quad \psi_2 \quad \psi_3 \quad \cdots \quad \psi_{Z_2}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & -r_b & 0 & \cdots & -r_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_b & r_r & -r_b & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_b & r_r & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_b & 0 & 0 & \cdots & r_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{AD} & M_{AE} & M_{A1} & M_{A2} & M_{A3} & \cdots & M_{AZ_2} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & M_{BD} & M_{BE} & M_{B1} & M_{B2} & M_{B3} & \cdots & M_{BZ_2} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & M_{CD} & M_{CE} & M_{C1} & M_{C2} & M_{C3} & \cdots & M_{CZ_2} \\ M_{DA} & M_{DB} & M_{DC} & L_{DD} & M_{DE} & M_{D1} & M_{D2} & M_{D3} & \cdots & M_{DZ_2} \\ M_{EA} & M_{EB} & M_{EC} & M_{ED} & L_{EE} & M_{E1} & M_{E2} & M_{E3} & \cdots & M_{EZ_2} \\ M_{1A} & M_{1B} & M_{1C} & M_{1D} & M_{1E} & L_{11} & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1Z_2} \\ M_{2A} & M_{2B} & M_{2C} & M_{2D} & M_{2E} & M_{21} & L_{22} & M_{23} & \cdots & M_{2Z_2} \\ M_{3A} & M_{3B} & M_{3C} & M_{3D} & M_{3E} & M_{31} & M_{32} & L_{33} & \cdots & M_{3Z_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ M_{Z_2A} & M_{Z_2B} & M_{Z_2C} & M_{Z_2D} & M_{Z_2E} & M_{Z_21} & M_{Z_22} & M_{Z_23} & \cdots & L_{Z_2Z_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

图 5 与式(1)~式(9)中, r_b 、 L_b 分别为一根导条的电阻与漏磁自感系数; r_e 、 L_e 分别为一段端环的电阻与漏磁自感系数; r_s 为定子一相绕组的电阻; $r_r = 2(r_b + r_e)$ 为转子一个回路的全电阻; L_{JJ} 为定子 J ($J=A, B, C, D, E$) 相绕组的自感系数; L_{jj} 为转子第 j ($j=1, 2, \dots, Z_2$) 个回路的自感系数; $M_{JK} = M_{KJ}$ 为定子 J ($J=A, B, C, D, E$) 相绕组与定子 K ($K=A, B, C, D, E$ 且 $K \neq J$) 相绕组之间的互感系数; $M_{jk} = M_{kj}$ 为转子第 j ($j=1, 2, \dots, Z_2$) 个回路与转子第 k ($k=1, 2, \dots, Z_2$ 且 $k \neq j$) 个回路之间的互感系数; T_e 、 T_L 分别为电磁转矩与负载转矩; γ 为转子位置角, 即转子第一个回路的轴线领先于定子 A 相绕组轴线的空间电角度; J 为转动惯量; ω_r 为转子旋转电角速度; p 为微分算子; T 表示矩阵的转置。

2.2 参数计算

2.2.1 电阻参数

定子绕组每相电阻 r_s 、转子一根导条的电阻 r_b 、转子一段端环的电阻 r_e 分别根据式(10)~式(12)计算,参阅文献[13-15]。

$$r_s = \frac{\rho_1 N_{\Phi 1} l_{c1}}{a_1 N_{c1} A_{c1}} \quad (10)$$

$$r_b = \frac{K_B \rho_B l_B}{S_B} \quad (11)$$

$$r_e = \frac{\pi \rho_R D_R}{Z_2 S_R} \quad (12)$$

式(10)中, ρ_1 为导线的电阻率; $N_{\Phi 1}$ 为每相串联导线数; l_{c1} 为线圈平均半匝长度; N_{c1} 为导线并绕根数; A_{c1} 为每根导线的截面积。对于本例, $\rho_1 = 0.0217 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}$ 、 $N_{\Phi 1} = 264$ 、 $l_{c1} = 342.5 \text{ mm}$ 、 $a_1 = 1$ 、 $N_{c1} = 1$ 、 $A_{c1} = 1.34 \text{ mm}^2$, 故 $r_s = 1.4643 \Omega$ 。

式(11)中, K_B 为校核系数; ρ_B 为导条电阻率。对于本例, $K_B = 1.04$ 、 $\rho_B = 0.0434 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}$ 、 $l_B = 105 \text{ mm}$ 、 $S_B = 96.8 \text{ mm}^2$, 故 $r_b = 4.8961 \times 10^{-5} \Omega$ 。

式(12)中, ρ_R 为端环电阻率。对于本例, $\rho_R = 0.0434 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}$ 、 $D_R = 86.7 \text{ mm}$ 、 $Z_2 = 26$ 、 $S_R = 420 \text{ mm}^2$, 故 $r_e = 1.0825 \times 10^{-6} \Omega$ 。

转子一个回路的全电阻 $r_R = 2(r_b + r_e) = 1.0009 \times 10^{-4} \Omega$ 。

至此,对于本文所设计的五相笼型异步电动机,其电阻矩阵 $\mathbf{R}$ 诸元素的具体数值已经确定。

2.2.2 定子电感参数

文献[13-16]详细推导了异步电动机电感参数的计算式,在此直接引用。

定子单个线圈的自感系数根据式(13)计算。

$$L_{cii} = L_{cl} + \frac{4\mu_0 W_c^2 \tau l_{eff}}{\delta_{eff} p \pi^2} \sum_{\nu} \left(\frac{k_{y\nu}}{\nu} \right)^2 \quad (13)$$

式中: i ——定子线圈编号;

L_{cl} ——单个线圈的漏磁自感系数;

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

τ ——极距, $\tau = \pi D_{il} / (2p)$;

l_{eff} ——定子铁心有效长度;

δ_{eff} ——气隙有效长度, $\delta_{eff} = K_{cs} K_{cr} K_s \delta$;

K_{cs} 、 K_{cr} 、 K_s ——定、转子卡氏系数与饱和系数;

ν ——谐波次数;

$k_{y\nu}$ ——线圈 ν 次谐波节距因数, $k_{y\nu} = \sin$

$(\nu \pi \beta_c / 2)$;

β_c ——线圈短距比。

式(13)中,单个线圈的漏磁自感系数 L_{cl} 包括两个组成部分:槽漏磁自感系数 L_{sl} 与端部漏磁自感系数 L_{el} , 即 $L_{cl} = L_{sl} + L_{el}$ 。

单个线圈的槽漏磁自感系数 L_{sl} 可以根据定子槽型、尺寸,按照经验公式计算。以图1所示半闭口圆底槽为例,经验公式如下:

$$L_{sl} = 2\mu_0 W_c^2 l_{eff} (\lambda_{U1} + \lambda_{L1}) \quad (14)$$

式(14)中, λ_{U1} 、 λ_{L1} 分别为定子槽上、下部的漏磁导,具体计算参阅文献[14]。对于本例, $W_c = 44$ 、 $l_{eff} = 106.1 \text{ mm}$ 、 $\lambda_{U1} = 0.4351$ 、 $\lambda_{L1} = 0.6951$, 故 $L_{sl} = 5.8347 \times 10^{-4} \text{ H}$ 。

对于三相异步电动机,单个线圈的端部漏磁自感系数 L_{el} 可以采用经验公式计算^[13-15]。与之不同,五相异步电动机的 L_{el} 应该采用离散方式计算:将线圈端部划分为若干电流元,按照毕奥-萨伐尔定理计算该电流元所产生的磁场;端部每一点的磁场均是各电流元在该点磁场的叠加,据此获得线圈端部的自漏磁链和相应的漏磁自感系数,具体参阅文献[16]。对于本例,采用上述方法计算得到: $L_{el} = 6.7369 \times 10^{-4} \text{ H}$, 单个线圈的漏磁自感系数则为 $L_{cl} = L_{sl} + L_{el} = 1.2572 \times 10^{-3} \text{ H}$ 。

定子两个线圈(编号 i, j) 之间的互感系数根据式(15)计算。

$$M_{cij} = M_{cl} + \frac{4\mu_0 W_c^2 \tau l_{eff}}{\delta_{eff} p \pi^2} \sum_{\nu} \left[\left(\frac{k_{y\nu}}{\nu} \right)^2 \cos(\nu \alpha_{ij}) \right] \quad (15)$$

式中: M_{cl} ——两个线圈间的漏磁互感系数;

α_{ij} ——定子线圈 i, j 轴线之间的空间电角度。

式(15)中,两个线圈间的漏磁互感系数 M_{cl} 包括两个组成部分:槽漏磁互感系数 M_{sl} 与端部漏磁互感系数 M_{el} , 即 $M_{cl} = M_{sl} + M_{el}$ 。

槽漏磁互感系数 M_{sl} 可以根据定子槽型、尺寸,按照经验公式计算。对于本例,定子绕组为单层绕组,故 $M_{sl} = 0$ 。

类似于端部漏磁自感系数 L_{el} , 端部漏磁互感系数 M_{el} 亦可采用离散的方式计算,参阅文献[16]。对于本例,共有15个定子线圈。采用上述方法计算定子线圈 i, j 间的端部漏磁互感系数 M_{el} , 如表1所示。

表 1 定子线圈间的端部漏磁互感系数 ($\times 10^{-4}$ H)

$ i-j +1$														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6.736 9	5.966 1	4.095 9	2.725 4	1.545 3	0.647 6	-0.368 0	-1.158 4	-1.970 1	-2.823 7	-0.347 6	-4.279 5	-4.909 3	-5.552 5	-6.250 6

在确定定子线圈自感、互感系数之后,结合定子绕组的具体连接方式,即可计算其自感系数。

假设定子绕组 S 由 m 个线圈串联组成,则其自感系数 L_{SS} 即为这 m 个线圈的全部电感系数之和,即

$$L_{SS} = \sum_{i=1}^m L_{cii} + \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1, j \neq i}^m M_{cij} \right) \quad (16)$$

类似地,可以计算定子绕组之间的互感系数。假设另一定子绕组 Q 由 n 个线圈串联组成,则定子绕组 S、Q 之间的互感系数 M_{SQ} 为

$$M_{SQ} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n M_{cij} \right) \quad (17)$$

对于本例, $W_c = 44$ mm, $l_{\text{eff}} = 106.1$ mm, $\delta_{\text{eff}} = K_{cs} K_{cr} K_s \delta = 1.25 \times 1.023 \times 1.197 3 \times 0.55 = 0.842 1$ mm, $p = 1$, $\tau = \pi D_{il} / (2P) = 182.21$ mm, $\beta_e = 1$, $k_{yv} = 1$, 计及至 11 次谐波,根据式(14)~式(17)计算定子 A、B、C、D、E 五相绕组的自感系数及彼此间的互感系数,结果如表 2 所示。

表 2 定子绕组间的电感系数 H

	A	B	C	D	E
A	0.227 3	0.05	-0.155 2	-0.155 2	0.05
B	0.05	0.227 3	0.05	-0.155 2	-0.155 2
C	-0.155 2	0.05	0.227 3	0.05	-0.155 2
D	-0.155 2	-0.155 2	0.05	0.227 3	0.05
E	0.05	-0.155 2	-0.155 2	0.05	0.227 3

需要注意,对于三相异步电动机,定子相绕组的自感系数及彼此间的互感系数可以采用公式直接计算^[16];但对于五相异步电动机,必须从单个线圈入手,根据式(14)~式(17)计算。

2.2.3 转子电感参数

转子导条回路的自感系数根据式(18)计算^[16]。

$$L_{jj} = 2(L_b + L_e) + \frac{2\mu_0 p \tau l_{\text{eff}}}{\delta_{\text{eff}}} \frac{Z_2 - 1}{Z_2^2} \quad (18)$$

式中: j ——导条回路的编号;

L_b ——一段导条的漏磁自感系数;

L_e ——一段端环的漏磁自感系数。

一段导条漏磁自感系数 L_b 的计算与定子槽漏磁自感系数的计算类似^[13-15],不予赘述,但注意计及斜槽效应。对于本例, $L_b = 4.362 9 \times 10^{-7}$ H。

一段端环漏磁自感系数 L_e 的计算与定子单个线圈端部漏磁自感系数的计算类似^[16],不予赘述。对于本例, $L_e = 5.214 2 \times 10^{-9}$ H。

转子导条回路(编号 j, k)之间的互感系数根据式(19)计算^[16]:

$$M_{jk} = -\frac{2\mu_0 p \tau l_{\text{eff}}}{\delta_{\text{eff}}} \frac{1}{Z_2^2} \quad (19)$$

若转子回路 j, k 相邻,则相应增加 $-L_b$ 项。

对于本例,根据式(18)、式(19)计算转子各个回路的自感系数及彼此间的互感系数,结果如下:转子第 j 个回路的自感系数 $L_{jj} = 3.016 9 \times 10^{-6}$ H、转子第 j, k 个回路之间的互感系数 $M_{jk} = -8.535 6 \times 10^{-8}$ H 或 $-5.216 5 \times 10^{-7}$ H (转子回路 j, k 相邻)。

2.2.4 定转子间互感

对于笼型转子异步电动机,可将转子回路看作一个单匝线圈,则定子线圈 i 、转子回路 j 之间的互感系数可以根据式(20)计算,而定子回路 S (假设由 m 个线圈串联组成)、转子回路 j 之间的互感系数可以根据式(21)计算。

$$M_{cSiRj} = \frac{4\mu_0 W_c \tau l_{\text{eff}}}{\delta_{\text{eff}} p \pi^2} \sum_{\nu} \left[\frac{k_{yv} k_{rv}}{\nu^2} \cos(\nu \alpha_{cji}) \right] \quad (20)$$

$$M_{Sj} = \sum_{i=1}^m M_{cSiRj} \quad (21)$$

式中: k_{rv} ——转子回路的 ν 次谐波节距因数;

α_{cji} ——转子回路 j 、定子线圈 i 轴线之间的空间电角度。

需要注意,定转子之间的互感系数是时变的。对于本例,假定在某一时刻转子第 1 个回路与定子第 1 个线圈的轴线重合,此时定子 A 相绕组与转子第 1~13 个回路(处于一个磁极范围内)间的互感系数,与转子第 14~26 个回路(处于另外一

个磁极范围内)间的互感系数则对应地互为相反数。

至此,对于本文所设计的五相笼型异步电动机,其电感矩阵 $\mathbf{M}$ 诸元素的具体数值已经确定。

另外,式(4)中的转动惯量 J 按照式(22)估算:

$$J = \frac{1}{4} G \cdot D_2^2 \quad (22)$$

式中: G ——转子总重。

对于本例, $G = 5.68 \text{ kg}$ 、 $D_2 = 114.9 \text{ mm}$, 故 $J = 0.0187 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

尚需说明:在异步电动机起动过程中,由于漏磁路饱和与转子挤流效应,定子单个线圈的槽漏磁自感系数 L_{sl} 、一段导条的漏磁自感系数 L_b (计及起动过程中的斜槽效应)以及转子一根导条的电阻 r_b , 相对于其正常运行时的数值显著不同,因此应予以修正,具体方法参见文献[13-15]。

对于本例,在起动过程中, $L_{sl} = 5.0659 \times 10^{-4} \text{ H}$ 、 $L_b = 2.7914 \times 10^{-7} \text{ H}$ 、 $r_b = 6.6146 \times 10^{-5} \Omega$ 。

综上,多回路数学模型业已建立、其参数业已计算完毕,据此即可针对该电机进行数字仿真,具体方法参见文献[9,16]。

3 试验与仿真结果

对设计、制造的五相异步电动机样机(参见图4)进行了一系列试验与仿真。结果表明:试验样机的起动性能以及转速、定子电流、功率因数等工作特性均满足设计要求,本文的设计方案因而切实可行。另外,仿真结果与试验结果吻合,这表明:本文所建立的多回路数学模型及其参数计算是正确的。限于篇幅,此处仅提供试验样机空载时降压软起动性能的试验与仿真结果。

图6、图7分别表示起动过程中定子电压、电流的试验波形(以A相为例)。由此显见,试验样机具有良好的起动电流性能。

以图6所示定子电压作为多回路数学模型的外加电压激励——式(5)中的 u_A (u_B 、 u_C 、 u_D 、 u_E 类似)而进行仿真,图8表示对应的定子电流的仿真波形。对比图8、图7可知,二者基本吻合,这就说明本文所建立的多回路数学模型及其参数计算是正确的。

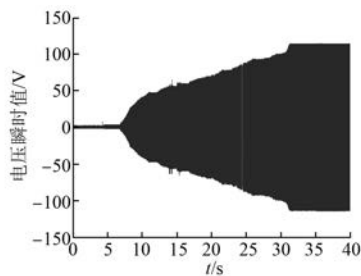


图6 定子电压

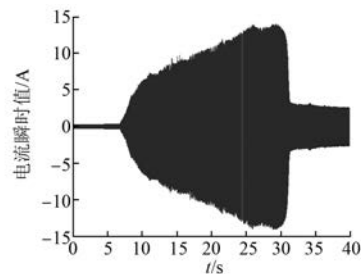


图7 定子电流(试验结果)

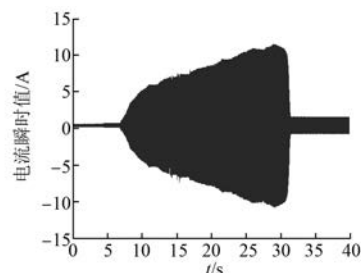


图8 定子电流(仿真结果)

4 结语

当前,五相异步电动机的研究如火如荼,而其基础之一即是试验样机的设计、建模与分析。

本文给出了一台五相、1对极、5.5 kW 异步电动机的翔实的设计方案;之后,建立了其多回路数学模型,并完成了相关参数计算;进而,以试验与仿真数据验证了上述设计方案、多回路数学模型及参数计算的正确性。

本文工作对于五相异步电动机的设计、运行与控制等诸多领域的研究具有切实的参考价值。

【参考文献】

- [1] 陈宇.三次谐波注入下五相感应电机的设计与运行特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.

- [2] 朱军.五相异步电机变频调速系统控制方法研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [3] 朱鹏,张晓峰,乔鸣忠,等.三次谐波电压注入的五相感应电机 SVM_DTC 方法[J].电机与控制学报,2010,14(9): 13-18.
- [4] 赵品志,杨贵杰,李勇.三次谐波电压注入的五相感应电机 SVM_DTC 方法[J].中国电机工程学报,2010,30(33): 71-77.
- [5] 孔武斌,黄进,李炳楠,等.三次谐波电压注入的五相感应电机 SVM_DTC 方法[J].中国电机工程学报,2014,34(6): 882-888.
- [6] JOSE A R, FEDERICO B, EMIL L, et al. Variable-speed five-phase induction motor drive based on predictive torque control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 2957-2968.
- [7] NANDOR B, MARTIN J, EMIL L. Aspace vector PWM with common-mode voltage elimination for open-end winding five-phase drives with a single DC supply [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(5): 2197-2207.
- [8] MILAN D, MARTIN J, EMIL L. Variable-speed five-phase induction motor drive based on predictive torque control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 538-549.
- [9] 徐磊.多相感应电机瞬态仿真分析与研究[D].长沙: 湖南大学,2008.
- [10] HUGO G, FEDERICO B, MARIO J D. IGBT-gating failure effect on a fault-tolerant predictive current-controlled five-phase induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 15-20.
- [11] FEDERICO B, MARIO J Duran. Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—Part I [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 449-458.
- [12] MARIO J D, FEDERICO B. Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—Part II [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 459-468.
- [13] 陈世坤.电机设计(修订本)[M].北京:机械工业出版社,1990
- [14] 上海电器科学研究所《中小型电机设计手册》编写组.中小型电机设计手册[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [15] 傅丰礼,唐孝镐.异步电动机设计手册[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [16] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2005.

收稿日期: 2017 -05 -31

(上接第 83 页)

- [12] 段东辉.异步电机矢量控制变频技术的研究与实现[D].大连:大连理工大学,2014.
- [13] 雷奶华,陈筱铁,温韵光.变频调速异步电机负载特性检测研究[J].机械研究与应用,2014(4): 203-205.
- [14] 王伟光,李伟.双速异步风力发电机电磁场谐波分析及槽配合选择[J].防爆电机,2012,47(6): 13-16.
- [15] 陈世元.交流电机磁场的有限元分析[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1998.
- [16] 丁树业,关天宇,崔广慧.船舶驱动用异步电机三维温度场研究[J].哈尔滨理工大学学报,2015,20(5): 1-7.
- [17] 王艳武,杨立,陈翾,等.异步电机转子三维温度场及热应力场研究[J].电机与控制学报,2010,14(6): 27-32.
- [18] 胡田,唐任远,李岩.空-空冷中型异步电机流体场与温度场计算及分析[J].电气工程学报,2015,10(7): 11-17.
- [19] 郑军.YKK 中型高压异步电机流体场与温度场综合计算[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [20] 王艳武,孙斌,王斌,等.三相异步电机三维瞬态温度场仿真研究[J].红外技术,2011,33(7): 416-419.
- [21] 陈华毅,杨明发.异步电机三维电磁场及温度场耦合仿真分析[J].电机与控制应用,2015,42(1): 42-47.
- [22] 魏永田,孟大伟,温嘉斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [23] 王伟光,陈卫杰,李伟,等.异步电机定子叠频法温升试验及效率研究综述[J].电工电能新技术,2016,35(10): 49-62.

收稿日期: 2016 -12 -25