

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201510036



三相异步电动机空载时定子 阻抗不对称故障模型

李利¹, 李平¹, 金福江¹, 彭艳²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 为研究三相异步电动机定子绕组不对称故障对电机运行特性的影响,分别定义可表征定子绕组电阻和电感不对称故障程度的电阻不对称率和电感不对称率两个参数,并应用多回路理论建立描述电机定子阻抗不对称故障特性的微分方程.通过稳态时方程两边各项系数相等的原则,将电机微分方程组转化为线性方程组,解方程可得到定转子电流及电磁转矩关于阻抗不对称率的模型.最后,以鼠笼式异步电动机为例,分析电阻不对称率和电感不对称率对电机运行特性的影响,并用仿真和实验结果验证所得结论的正确性.

关键词: 三相异步电动机; 定子阻抗; 不对称率; 故障模型; 稳态线性方程组

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0139-07

Modeling Study on Impedance Asymmetry Fault of Stator for Three Phase Asynchronous Motor in Idle Load

LI Li¹, LI Ping¹, JIN Fujiang¹, PENG Yan²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to study the impact of the three-phase asynchronous motor stator winding asymmetry faults on the motor's operating characteristic, two parameters, the resistance asymmetry rate and the inductance asymmetry rate, were defined to characterize the degree of the stator winding impedance asymmetry fault. Based on this definition, the differential equations were established to describe the features of the stator impedance asymmetry faults through the multi-loop theory. With the principle that the two sides of the equation balance at steady state, the differential equations can be translated into a set of linear equations, which can be solved to obtain the models of stator and rotor current and electromagnetic torque on the impedance asymmetry rate. Finally the squirrel-cage induction motor is taken as an example to analyze the impact of the resistance and the inductance asymmetry rate on the motor's operating characteristics. Simulation and the experimental results verify the correctness of the conclusion.

Keywords: three-phase asynchronous motor; stator impedance; asymmetry ratio; fault model; steady-state linear equations

收稿日期: 2015-10-19

通信作者: 李平(1981-),女,副教授,博士,主要从事非线性系统、自适应模糊控制和容错控制的研究. E-mail: ping_ping_1213@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273069, 61203040);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61603144,61403245);上海市科委能力建设资助项目(14500500400);福建省高校产学研合作科技重大项目(2013H6016, 2011H6019);中央高校基本科研业务费,国家自然科学基金培育计划专项(JBZR1204)

据统计,定子故障占有所有电动机故障的30%~40%^[1-2].目前,三相异步电动机定子内部故障主保护的确定主要建立在稳态故障分析的基础上,而现有的电机故障诊断方法仍存在许多不足之处^[3].孙丽玲等^[4]用定子三相电流的相位差判断定子绕组有无故障,并进一步判定故障程度.文献[5-6]采用多回路数学模型,通过对异步电动机定子绕组匝间短路故障瞬变过程仿真,探讨各种故障特征的灵敏度与可靠性.然而,基于模型的分析结果很有可能导致误判,仍需进一步的研究^[7].另有学者对定子绕组不对称故障的定子负序阻抗^[8-9]、定子负序电流^[10-11]、功率、磁通等^[12-13]故障特性进行分析.张正东等^[14]以转子电流谱特征频率处的幅值为故障特征量,对异步电机定子电阻不对称故障的特征量提取方法进行研究.但这些方法对定子电感不对称或阻抗不对称故障的适用性,仍有待进一步研究.本文定义了电阻不对称率和电感不对称率两个参数,建立了故障稳态下定转子电流及电磁转矩关于阻抗不对称率的模型,以三相鼠笼式异步电动机为例进行仿真和实验,验证了模型的可靠性.

1 三相异步电动机的数学模型

1.1 三相异步电动机正常状态模型

假定三相异步电动机定子绕组Y接线.理想条件下,三相异步电动机正常运行时,在相坐标系的动态模型由电压方程、磁链方程和转矩方程组成.

1) 电压方程的表达式为

$$U = RI + p\psi. \quad (1)$$

式(1)中: $p = \frac{d}{dt}$ 为微分算子; $U = (u_A, u_B, u_C, u_1, u_2, u_3)^T$ 为定转子电压的瞬时值矩阵; $I = (i_A, i_B, i_C, i_1, i_2, i_3)^T$ 为定转子电流的瞬时值矩阵; $\psi = (\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_1, \psi_2, \psi_3)^T$ 为定转子磁链矩阵; $R = \text{diag}(R_A, R_B, R_C, R_1, R_2, R_3)$ 为定转子绕组的电阻矩阵,正常状态下 $R_A = R_B = R_C = R_s$; $R_1 = R_2 = R_3 = R_r$.

2) 磁链方程用分块矩阵表示为

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中: $\psi_s = (\psi_A, \psi_B, \psi_C)^T$; $\psi_r = (\psi_1, \psi_2, \psi_3)^T$; $i_s = (i_A, i_B, i_C)^T$; $i_r = (i_1, i_2, i_3)^T$; $L_{ss} = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix}$; $L_{rr} = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_2 & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_3 \end{bmatrix}$; $M_{sr} = M_{rs}^T = \begin{bmatrix} M_{A1} & M_{A2} & M_{A3} \\ M_{B1} & M_{B2} & M_{B3} \\ M_{C1} & M_{C2} & M_{C3} \end{bmatrix}$.正常状态下, $L_A = L_B = L_C = L_s$, L_s 为定子绕组自感; $L_1 = L_2 = L_3 = L_r$, L_r 为转子自感; $L_{AB} = L_{AC} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CA} = L_{CB} = M_s$, M_s 为定子绕组间互感; M_r 为转子绕组间互感, $L_{12} = L_{13} = L_{21} = L_{23} = L_{31} = L_{32} = M_r$; L_s, L_r, M_s, M_r 均为常数. M_{sr}, M_{rs} 为三相定转子绕组间的互感矩阵,是与定转子相绕组轴线间的夹角 θ 有关的时变参数.

3) 电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{P}{2} I \cdot \frac{\partial L}{\partial \gamma} I^T = P i_s \cdot \frac{\partial M_{sr}}{\partial \gamma} i_r^T. \quad (3)$$

式(3)中: P 为极对数.

1.2 定子不对称故障时的基本方程

1.2.1 电阻不对称率和电感不对称率的定义 三相异步电动机定子绕组发生故障时,需重新计算故障绕组相的参数,相关电阻、电感均发生变化.为分别研究定子绕组电阻和电感不对称故障对电机运行特性的影响,定义电阻不对称率(γ_R^*)和电感不对称率(γ_L^*),其表达式分别为

$$\gamma_R^* = R/R_s, \quad \gamma_L^* = \sqrt{L/L_s}. \quad (4)$$

式(4)中: R, L 分别为故障相的电阻和电感.

这里以三相异步电动机定子A相故障为例,分别给出定子绕组电阻不对称和电感不对称故障时的电机动态模型.根据式(4),可分别得到A相电阻不对称率和电感不对称率分别为

$$\gamma_{R,A}^* = R_A/R_s, \quad \gamma_{L,A}^* = \sqrt{L_A/L_s}. \quad (5)$$

式(5)中: R_A, L_A 分别为故障下定子A相绕组的电阻和电感.

1.2.2 电阻不对称故障下的动态模型 当定子 A 相绕组发生电阻不对称故障时, 相关电阻参数发生变化, 但电感部分依然对称. 此时, 电机的电压方程为

$$U = R'I + p\psi. \quad (6)$$

式(6)中: R' 为故障时的电阻矩阵, 相应 R' 中 $R_A = \gamma_{R,A}^* R_s$, $R_B = R_C = R_s$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_r$. 此外, 电阻不对称故障时的磁链方程、电磁转矩方程同式(2), (3).

1.2.3 电感不对称故障下的动态模型 当定子 A 相绕组发生电感不对称故障时, 相关电感参数发生变化, 各绕组电阻参数保持对称. 此时, 电机的状态微分方程为

$$\left. \begin{aligned} U &= RI + p\psi', \\ \psi' &= L' \cdot I, \\ T_e &= \frac{P}{2} I \cdot \frac{\partial L'}{\partial \gamma} I^T = P i_s \cdot \frac{\partial M'_{sr}}{\partial \gamma} i_r^T. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中: L' 为故障时电感矩阵; M'_{sr} 为故障时定转子绕组间的互感矩阵. 在 L' 中, $L_A = (\gamma_{L,A}^*)^2 L_s$, $L_{AB} = L_{AC} = L_{BA} = L_{CA} = \gamma_{L,A}^* M_s$, $L_{CB} = L_{BC} = M_s$; M'_{sr} 中定子 A 相绕组与转子回路间的互感系数; $M'_{Ar} = \gamma_{L,A}^* M_{Ar}$, M_{Ar} 为无故障时定子 A 相绕组与转子回路间的互感系数.

由此可以看出, $\gamma_R^* = 1$ 且 $\gamma_L^* = 1$ 时, 定子绕组三相对称, 电机在正常状态下运行; 随着 γ_R^* , γ_L^* 偏离对称状态值 1 的程度增大, 电机的不对称故障程度也增大.

2 空载时定子不对称故障稳态电流模型

稳态时, 先建立电机各回路电流的方程, 代入各状态下的微分方程组; 然后, 根据等号两端同频率量相等的原则, 把微分方程组化为线性代数方程组. 通过解线性代数方程, 求得各回路电流的稳态模型.

2.1 定子不对称故障时的定转子稳态电流

2.1.1 定转子绕组均不对称时定转子电流的谐波 对于交流电机定转子绕组均不对称的最一般的情况而言, 设有定子线圈 AA' , 转子线圈 RR' , 转子转速为 ω . 若 AA' 中流过的基波电流 $i = I \sin \omega_0 t$, 由文献[15]中的推导结果可知, 电流 i 在转子线圈 RR' 中产生的磁链及感应产生的电流的频率都是 $|\omega_0 \pm j\omega|$ ($j=1, 3, 5, \dots$). 转子线圈的感应电流又在定子线圈 AA' 中感应产生频率为 $|\omega_0 \pm j\omega \pm j'\omega|$, ($j=1, 3, 5, \dots; j'=1, 3, 5, \dots$) 的电流, 如图 1 所示.

最终, AA' 中具有频率为 $|\omega_0 \pm 2k\omega|$, ($k=0, 1, 2, \dots$) 的电流, RR' 中具有频率为 $|\omega_0 \pm j\omega|$, ($j=1, 3, 5, \dots$) 的电流. 这是因为 j, j', j'' 都是正奇数, 所以 $\pm j\omega \pm j'\omega$ 和 $\pm 2k\omega$ 有相同的数值, $\pm j\omega \pm j'\omega \pm j''\omega$ 和 $\pm j\omega$ 有相同的数值.

2.1.2 空载时三相异步电动机定子不对称故障的定转子稳态电流 空载状态下, 当三相异步电动机发生定子绕组不对称故障时, 转差率 $s \approx 0$, 即近似有 $\omega = \omega_0$. 这时, 电机定子的回路电流频率为 $|1 \pm 2k|\omega = m\omega$, $m=1, 3, 5, \dots$; 转子的回路电流频率为 $|1 \pm j|\omega$, $j=1, 3, 5, \dots$. 则定子回路电流方程为

$$i_s = \sum_m \{I_{s,m} \cos m\omega t + I'_{s,m} \sin m\omega t\}, \quad m = 1, 3, 5, \dots \quad (8)$$

而转子第 g 条回路的电流方程为

$$i_g = \sum_j \{I_{1,j} \cos[(1+j)\omega t + j(g-1)\varphi] + I'_{1,j} \sin[(1+j)\omega t + j(g-1)\varphi]\}. \quad (9)$$

式(9)中: $j = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$; 转子为三回路结构时, $\varphi = 2\pi/3$.

2.2 空载时定子不对称故障的稳态电流模型

将电流方程式(8), (9)分别代入电机定子绕组电阻和电感不对称故障下的动态模型, 可得到对应故障下含有各种频率量的新的方程.

2.2.1 电阻不对称故障下的稳态电流模型 电源为基波频率的正弦形电压时, $u_A = U \cos \omega t$. 故障稳态下, 将式(8), (9)代入电压方程式(6), 可得定子 A 相的电压方程为

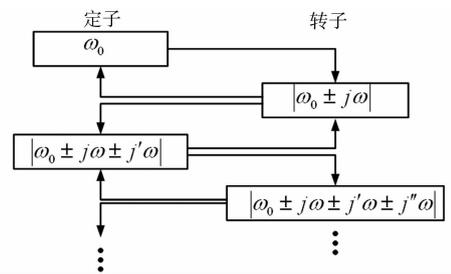


图 1 定子和转子电流的相互关系
Fig. 1 Relationship of current between stator and rotor

$$\begin{aligned}
 U \cos \omega t &= p\phi_A + R_A i_A = \sum_m \{[-m\omega L_s I_{A,m} - m\omega M_s I_{B,m} - m\omega M_s I_{C,m} + R_A I'_{A,m}] \sin m\omega t + \\
 & [m\omega L_s I'_{A,m} + m\omega M_s I'_{B,m} + m\omega M_s I'_{C,m} + R_A I'_{A,m}] \cos m\omega t\} + \\
 & \sum_k \sum_j \frac{3}{2} M_k \{-(1+6n)\omega I_{1,j} \sin(1+6n)\omega t + (1+6n)\omega I'_{1,j} \cos(1+6n)\omega t - \\
 & (1+6n_1)\omega I_{1,j} \sin((1+6n_1)\omega t) + (1+6n_1)\omega I'_{1,j} \cos((1+6n_1)\omega t)\}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

式(10)中: $m=1, 3, 5, \dots; k=1, 3, 5, \dots; j=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots; 6n=j+k(n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 其余情况下与 $6n$ 对应项为零; $6n_1=j-k(n_1=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 其余情况下与 $6n_1$ 对应项为零. 式(10)是一个恒等式, 其两边的同频率量应相等. 对于定子 B 相和 C 相及转子可得到与式(10)相似的电压方程.

由定转子电压方程, 根据方程两边同频率量相等的原则, 可得到一组线性代数方程. 其中, 各未知电流的系数与各回路的电感和电阻参数有关, 可预先求得. 考虑定转子电流的基波项, 忽略定子绕组与转子回路间高次谐波的作用而只计及基波项互感时, $m=1, k=1, j=1; j+k=2$, 只需计算与 $6n_1$ 相关的项. 解电阻不对称故障下的线性代数方程组, 可求得 A 相电流的有效值为

$$I_A = \sqrt{I_{A,m}^2/2 + I'_{A,m}^2/2}. \quad (11)$$

式(11)中: $I_{A,m} = f(\gamma_{R,A}^*)/h(\gamma_{R,A}^*)$, $f(\gamma_{R,A}^*) = \{D[F - ACR(1 - \gamma_{R,A}^*) + B(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)] + G[E - A(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2) - BCR(1 - \gamma_{R,A}^*)]\}U$, $h(\gamma_{R,A}^*) = \{-[F + B(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)]^2 + [E - A(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)]^2 + AR(C - 1)(1 - \gamma_{R,A}^*)[F + B(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)] - BR(C + 1)(1 - \gamma_{R,A}^*)[E - A(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)] + CR(A^2 - B^2)(1 - \gamma_{R,A}^*)\}$; $I'_{A,m} = \frac{[(M_s - L_s)\omega R_r - 2R\omega(L_r - M_r)]U}{F - ACR(1 - \gamma_{R,A}^*) + B(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)} + \frac{-E + A(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2) + BR(1 - \gamma_{R,A}^*)}{F - ACR(1 - \gamma_{R,A}^*) + B(C^2 + \gamma_{R,A}^* R^2)} \cdot \frac{f(\gamma_{R,A}^*)}{h(\gamma_{R,A}^*)}$. 其中, $A = \{1. 5\omega^3 M_k^2 M_s + 3\omega^3 M_k^2 L_s + (L_r - M_r)[2\omega R^2 + 2\omega^3(M_s^2 - L_s^2)] + 2RR_r\omega L_s\}/(C^2 + R^2)$; $B = \{3M_k^2\omega^2 \times R + R_r\omega^2(M_s^2 L_s^2) - 4\omega^2 RL_s(L_r - M_r) + R^2 R_r\}/(C^2 + R^2)$; $C = \omega L_s + 2\omega M_s$; $D = 4. 5\omega^2 M_k^2 + 2\omega^2(M_s - L_s)(L_r - M_r) + RR_r$; $E = 4. 5\omega^3 M_k^2 M_s + \omega(M_s - L_s)[(1. 5\omega^2 M_k^2 + 4\omega^2(L_r - M_r)M_s) + 2RR_r\omega M_s]$; $F = R[1. 5\omega^2 M_k^2 + 4\omega^2(L_r - M_r)M_s - 2\omega^2 M_s R_r(M_s - L_s)]$; $G = (M_s - L_s)\omega R_r - 2R\omega(L_r - M_r)$.

类似可依次求出故障稳态下, 定转子电流 I_B, I_C, I_r 关于电阻不对称率 $\gamma_{R,A}^*$ 的模型.

将定转子电流表达式(8), (9)代入电磁转矩方程(3), 化简后可得

$$\mathbf{T}_e = \mathbf{T}_{ave} + \mathbf{T}_{pul}. \quad (12)$$

式(12)中: \mathbf{T}_{ave} 为平均转矩; \mathbf{T}_{pul} 为脉振转矩, 其表达式分别为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}_{ave} &= \frac{3}{4} PM_k [I_{A,m} I'_{1,j} + I'_{A,m} I_{1,j} + \frac{1}{2}(I'_{B,m} I_{1,j} - \sqrt{3} I'_{B,m} I'_{1,j} - I_{B,m} I'_{1,j} - \\
 & \sqrt{3} I_{B,m} I_{1,j} + I'_{C,m} I_{1,j} + \sqrt{3} I'_{C,m} I'_{1,j} - I_{C,m} I'_{1,j} + \sqrt{3} I_{C,m} I_{1,j})], \\
 \mathbf{T}_{pul} &= \frac{3}{4} + PM_k \{\sin(2\omega t) \cdot [-I_{A,m} I_{1,j} + I'_{A,m} I'_{1,j} + \frac{1}{2}(I_{B,m} I_{1,j} - I'_{B,m} I'_{1,j} - \\
 & \sqrt{3} I'_{B,m} I_{1,j} - \sqrt{3} I_{B,m} I'_{1,j}) + \frac{1}{2}(I_{C,m} I_{1,j} - I_{C,m} I'_{1,j} + \sqrt{3} I'_{C,m} I_{1,j} + \sqrt{3} I_{C,m} I'_{1,j})] + \\
 & \cos(2\omega t) \cdot [I_{A,m} I'_{1,j} + I'_{A,m} I_{1,j} + \frac{1}{2}(-I'_{B,m} I_{1,j} + \sqrt{3} I'_{B,m} I'_{1,j} - I_{B,m} I'_{1,j} - \\
 & \sqrt{3} I_{B,m} I_{1,j}) + \frac{1}{2}(-I'_{C,m} I_{1,j} - \sqrt{3} I'_{C,m} I'_{1,j} - I_{C,m} I'_{1,j} + \sqrt{3} I_{C,m} I_{1,j})]\}.
 \end{aligned}$$

2.2.2 电感不对称故障下的稳态电流模型 将式(8), (9)代入定子绕组电感不对称故障下的微分方程式(7), 可得电感不对称故障下的定转子电压线性方程组. 如果只考虑基波项时, 解方程组可求得定子 A 相电流的有效值为

$$I_A = \sqrt{I_{A,m}^2/2 + I'_{A,m}^2/2}. \quad (13)$$

式(13)中: $I_{A,m} = (\gamma_{L,A}^*)/h(\gamma_{L,A}^*)$, $f(\gamma_{L,A}^*) = D\{[(F_1 F - E_1 E)(1 - \gamma_{L,A}^*) + (DF + GE)\gamma_{L,A}^*](\gamma_{L,A}^*)^2 + [(F_1 B - E_1 A)(1 - \gamma_{L,A}^*) + (BD + GA)\gamma_{L,A}^*][C^2(\gamma_{L,A}^*)^2 + R^2] + CR[(F_1 A - E_1 B)(1 - \gamma_{L,A}^*) + (AD + GB)\gamma_{L,A}^*](\gamma_{L,A}^*)^2[1 - (\gamma_{L,A}^*)^2]\}$; $h(\gamma_{L,A}^*) = (E^2 + F^2)(\gamma_{L,A}^*)^4 + (A^2 + B^2)\{[C^2(\gamma_{L,A}^*)^2 + R^2]^2 + C^2 R^2[1 -$

$$(\gamma_{L,A}^*)^2\}} + 2(-AE + BF)(\gamma_{L,A}^*)^2 [C^2 (\gamma_{L,A}^*)^2 + R^2] + 2(BE + AF)CR(\gamma_{L,A}^*)^2 [1 - (\gamma_{L,A}^*)^2]; I'_{A,m} = -E_1 U + (E_1 + G)\gamma_{L,A}^* U - \{E(\gamma_{L,A}^*)^2 - A[C^2 (\gamma_{L,A}^*)^2 + R^2] + BCR[1 - (\gamma_{L,A}^*)^2]\} \cdot \frac{f(\gamma_{L,A}^*)}{h(\gamma_{L,A}^*)}$$

$$F(\gamma_{L,A}^*)^2 + B[C^2 + (\gamma_{L,A}^*)^2 + R^2] + ACR[1 - (\gamma_{L,A}^*)^2]$$

其中, $E_1 =$

$$\frac{3\sqrt{3}}{4}\omega^2 M_k^2 [AR + B\omega(L_s + 2M_s)] + [CR^2 + DR\omega(L_s + 2M_s)] - \omega(L_s - M_s)[DR - C\omega(L_s + 2M_s)], F_1 =$$

$$\frac{3\sqrt{3}}{4}\omega^2 M_k^2 [-BR + A\omega(L_s + 2M_s)] + [-DR^2 + CR\omega(L_s + 2M_s)] - \omega(L_s - M_s)[DR - D\omega(L_s + 2M_s)].$$

依次求解可得故障稳态下, 定转子电流 I_B, I_C, I_r 及电磁转矩 T_e 关于电感不对称率 $\gamma_{L,A}^*$ 的模型。

3 实验与分析

3.1 仿真验证

对一台四极, 2.2 kW, 380 V 三相鼠笼式异步电动机进行故障仿真. 电机定子三相绕组 Y 接, 电源电压为额定值并理想对称. 在处理与定子各回路有关的电感系数时, 把每个线圈作为一相回路. 不同阻抗不对称率下的定子三相电流, 如图 2 所示.

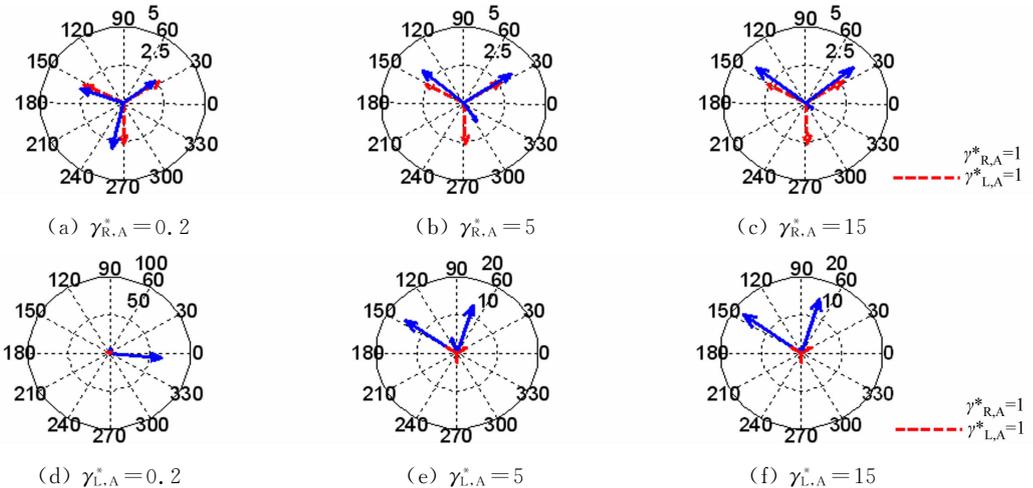


图 2 阻抗不对称故障下的定子三相电流

Fig. 2 Three phase currents of stator under impedance asymmetry failure

进一步计算并画出定转子电流随电阻不对称率 $\gamma_{R,A}^*$ 、电感不对称率 $\gamma_{L,A}^*$ 的变化曲线, 如图 3 中线 I 所示. 同时, 针对三相异步电动机正常状态及定子绕组阻抗不对称故障状态下的动态数学模型, 在空载且只考虑基波项时, 运用 MATLAB 软件进行仿真, 采集数据, 绘制定转子稳态电流随 $\gamma_{R,A}^*, \gamma_{L,A}^*$ 的变化曲线, 如图 3 中线 II 所示. 图 3 中: 结果均为标么值.

从以上仿真结果可以得出以下 4 点结果.

1) 由图 2 可知: 三相异步电动机定子绕组发生阻抗不对称故障时, 定子三相电流的模值和相角均不对称, 且这种不对称随着阻抗不对称程度的增大而增大. 电阻不对称故障下, B, C 相电流偏离正常状态很小, 近似为对称状态; 电感不对称故障下, 定子三相电流的对称性遭到很大的破坏, 电流模值和相角都发生严重畸变. 这一结果与实际情况相符.

2) 在已知三相异步电动机相关结构参数的情况下, 根据所得模型能直接获得定转子电流及电磁转矩与电阻不对称率 $\gamma_{R,A}^*$ 和电感不对称率 $\gamma_{L,A}^*$ 之间的对应关系曲线. 这样, 在已知 $\gamma_{R,A}^*, \gamma_{L,A}^*$ 时, 根据相应的关系曲线, 即可对电机故障稳态时的运行特性进行分析; 故障情况未知时, 通过测量定子三相电流的有效值及其在一定时间内的变化方向, 借助相应的关系曲线, 可确定 $\gamma_{R,A}^*, \gamma_{L,A}^*$ 的值, 实现故障检测.

3) 由图 3 可知: 根据三相异步电动机故障线性方程组计算所得结果与动态模型微分方程仿真所得结果在变化规律上基本一致, 说明文中分析的相关理论及结果是正确的. 图 3 中存在细微的误差, 是因为运用 MATLAB 工具直接求解状态微分方程的过程中存在一定的计算误差.

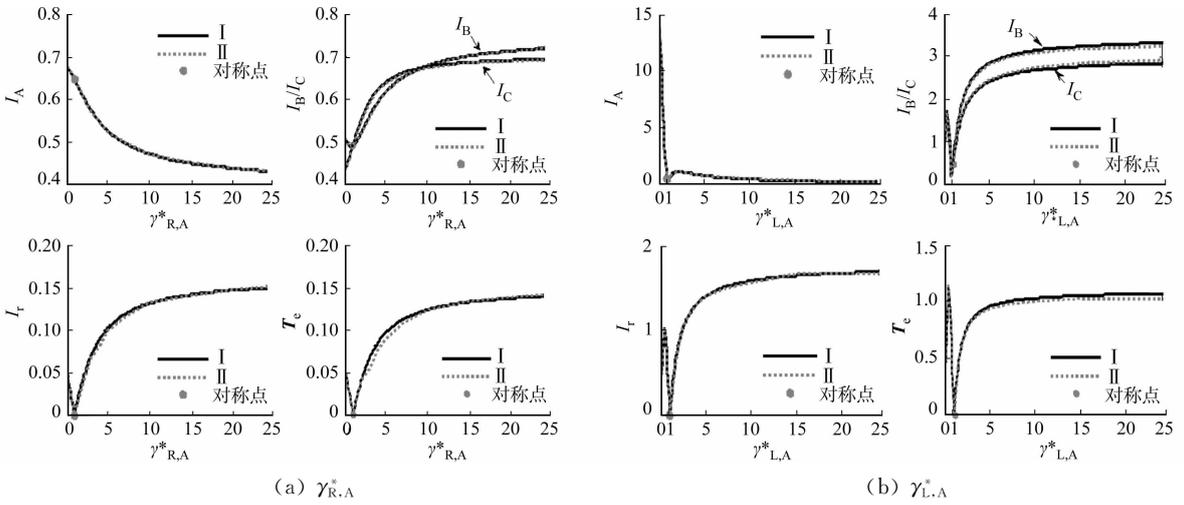


图3 定、转子电流及电磁转矩随 $\gamma_{R,A}^*$ 和 $\gamma_{L,A}^*$ 的变化曲线

Fig. 3 Curves of currents and electromagnetic torque along with $\gamma_{R,A}^*$ and $\gamma_{L,A}^*$

4) 由图3可知:当 $\gamma_{R,A}^* > 1$ 或 $\gamma_{L,A}^* > 1$ 时,定子B,C相电流、转子电流及电磁转矩均随不对称率的增大而增大;但当 $\gamma_{R,A}^* < 1$ 或 $0 < \gamma_{L,A}^* < 1$ 时,定子B,C相电流、转子电流及电磁转矩均随不对称率的增大先增后减;定子B,C相电流近似对称;故障A相电流受 $\gamma_{R,A}^*$, $\gamma_{L,A}^*$ 的影响,无论是变化趋势还是变化速度都大大不同; $\gamma_{L,A}^*$ 对电机运行特性的影响更复杂,影响程度也更大。

3.2 实验验证

对一台 2.2 kW, 380 V 鼠笼式三相异步电动机进行实测,实验接线如图4所示.实验过程中,电压为额定电压(380 V),通过在三相异步电动机定子A相串接电阻R模拟定子绕组的电阻不对称故障($\gamma_{R,A}^* > 1$);电感不对称实验中,因定子绕组间、定转子绕组间的互感参数难以同步且准确设置,故仅通过在电机定子A相串接电感线圈L模拟定子绕组的自感不对称故障,所得实验结果仅供参考,并以智能转速表测电机的转速供检测。

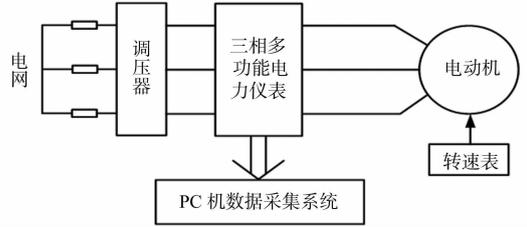


图4 实验接线图

Fig. 4 Experimental wiring diagram

表1 电阻不对称故障下的空载实验数据

Tab. 1 Experimental results of no-load motor under resistance asymmetry failure

$\gamma_{R,A}^*$	R/Ω	I_A/A	I_B/A	I_C/A
0.998 7	0	0.418 0	0.435 2	0.393 9
2.177 3	7.0	0.399 5	0.449 0	0.401 1
3.455 4	14.6	0.357 9	0.451 5	0.420 3
5.625 0	27.5	0.312 4	0.431 9	0.457 4
8.820 4	46.5	0.304 6	0.417 7	0.468 7
17.448 0	97.8	0.303 8	0.378 9	0.505 7

空载时,正常及不同故障程度下实测的定子电流有效值,如表1,2所示.表1,2中:各电流均以标幺值表示,单位为1.电机正常运行时,LCR测试仪测得的定子三相绕组的电阻值 $R_A=5.938 \Omega$, $R_C=5.940 \Omega$, $R_B=5.965 \Omega$.这样,即使在正常状态下,定子三相绕组的电阻也不是理想对称的,在计算电阻不对称率 $\gamma_{R,A}^*$ 时,

取 $R_r = (R_A + R_B + R_C)/3 = 5.946 \Omega$.电机电感参数由短路实验测得,定子自感 $L_1 = 924.65 \text{ mH}$.在计算电感不对称率 $\gamma_{L,A}^*$ 时,假设定子三相绕组电感对称,取 $L_s = L_1 = 924.65 \text{ mH}$.

表2 电感不对称故障下的空载实验数据

Tab. 2 Experimental results of no-load motor under inductance asymmetry failure

L/mH	$\gamma_{L,A}^*$	实验结果			仿真 I			仿真 II		
		I_A/A	I_B/A	I_C/A	I_A/A	I_B/A	I_C/A	I_A/A	I_B/A	I_C/A
0	1.000 0	0.443 6	0.462 4	0.410 9	0.490 3	0.490 3	0.490 3	0.488 4	0.489 7	0.487 1
539.2	1.258 2	0.142 1	0.604 8	0.561 0	0.167 8	0.658 8	0.624 8	0.188 6	0.662 9	0.605 4
781.4	1.358 3	0.139 2	0.628 8	0.583 3	0.133 5	0.676 8	0.640 0	0.151 1	0.680 7	0.624 5

从实际测量数据可得以下4点主要结论。

1) 即使在正常状态下运行, 三相异步电动机的定子三相电流也存在一定的不平衡。这是因为定子三相绕组及电源电压并不是理想对称的, 且电机运转过程中的摩擦、铁心损耗及温度变化等也会对电机的对称性能产生影响。实测的电流值小于理想仿真值, 这一结果与实际情况相符。

2) 随着 $\gamma_{R,A}^*$ 增大, A 相电流逐渐减小, 而 C 相电流逐渐增大; 受实验电机本身制造及饱和情况的影响, 在 $\gamma_{L,A}^* = 5.10$ 之后, B 相电流虽略有下降, 但是在 $\gamma_A^* < 3.18$ 内却保持明显的增加趋势。

3) 由表 2 可知: 仿真 I, II 分别由定子绕组电感不对称故障下的线性方程组和动态数学模型仿真所得。对比可发现, 随定子绕组自感不对称程度的增大, 实验结果与两种仿真结果在变化规律上一致。

4) 由表 1, 2 可知: 实测数据与仿真计算结果在变化规律上基本一致, 说明相关理论是正确的。

4 结束语

在多回路理论的基础上, 建立三相异步电动机定子绕组阻抗不对称故障的数学模型。仿真实验表明: 已知三相异步电动机相关结构参数时, 根据所得模型可直接获得定转子电流及电磁转矩与电阻不对称率、电感不对称率之间的对应关系曲线。此外, 相较于电阻不对称故障, 电感不对称故障对三相异步电动机运行特性的影响更加复杂, 影响程度也更大。在实际的电机计算中, 可根据定子绕组的实际线圈回路数设定回路电流, 并结合供电电源的实际情况列写各回路电压方程; 同时, 根据计算精度的要求选取合适的谐波项, 可以求解得到与电机实际运行接近的故障状态解。

参考文献:

- [1] SIDDIQUE A, YADAVA G S, SINGH B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 106-114. DOI: 10.1109/TEC.2004.837304.
- [2] TOLIYAT H A, NANDI S, CHOI S, *et al.* Electric machine: Modeling, condition monitoring, and fault diagnosis [M]. 1 版. 周卫平, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2014: 19-20.
- [3] 王旭红. 异步电机定子绕组匝间故障诊断方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012: 2-6.
- [4] 孙丽玲, 李和明, 许伯强. 基于多回路数学模型的异步电动机内部故障瞬变过程研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 35-40, 75. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2004.23.007.
- [5] 许伯强, 李和明, 孙丽玲. 异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 177-182. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.07.033.
- [6] BACHIR S, YNANI S, TRIGEASSOU J C, *et al.* Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 963-973.
- [7] KIM B W, KIM K T, HUR J. Simplified impedance modeling and analysis for inter-turn fault of IPM-type BLDC motor[J]. Journal of Power Electronics, 2012, 12(1): 10-18. DOI: 10.6113/JPE.2012.12.1.10.
- [8] VASEGHI B, TAKORABET N, NAHID M B, *et al.* Modeling and study of PM machines with inter-turn fault dynamic model-FEM model[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8): 1715-1722.
- [9] WU Qing, NANDI S. Fast single-turn sensitive stator inter-turn fault detection of induction machines based on positive and negative sequence third harmonic components of line currents[J]. IEEE Industry Applications Society Meeting, 2008, 46(3): 974-983. DOI: 10.1109/08IAS.2008.25.
- [10] SERGIO M A, CRUZ A J, MARQUES C. Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 611-619.
- [11] KLIMAN G B, PREMIERLANI W J, KOEGL R A, *et al.* Sensitive on-line turn-to-turn fault detection in AC motors [J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, 28(10): 915-927.
- [12] 王江萍. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 13-16.
- [13] 马宏忠, 张志艳, 张志新, 等. 双馈异步发电机定子匝间短路故障诊断研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 50-54. DOI: 10.3969/j.issn.1007-449X.2011.11.009.
- [14] 张正东, 马宏忠, 时维俊, 等. 双馈异步发电机定子绕组故障特征量提取方法研究[J]. 微电机, 2014, 47(5): 66-70.
- [15] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 550-552.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)