

# 多相永磁同步电机缺相故障下的 磁链动态特性分析\*

韩海风<sup>1,2</sup>, 邓明星<sup>1</sup>, 张海军<sup>2</sup>, 马强<sup>2</sup>, 向立明<sup>2</sup>, 朱博文<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北武汉 430081;

2. 湖北文理学院纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 湖北襄阳 441053)

**摘要:** 永磁同步电机(PMSM)电磁动态特性分析对电力传动系统运行与故障诊断策略研究具有重要作用。针对多相PMSM磁链的动态特性进行分析, 推导了电感与转子位置关系, 基于五相PMSM定子磁链的动态数学模型, 采用MATLAB软件对五相PMSM在不同缺相故障下的磁链、电感特性进行建模和仿真, 并对仿真结果进行了比较分析。研究结果可以为PMSM缺相故障诊断和容错控制提供一定的理论参考。

**关键词:** 五相永磁同步电机; 缺相故障; 数学模型; 磁链; 容错控制

中图分类号: TM 351; TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0104-07

doi: 10.12177/emca.2019.171

## Dynamic Characteristics Analysis of Flux Linkage in Multiphase Permanent Magnet Synchronous Motor Under Phase Failure\*

HAN Hai Feng<sup>1,2</sup>, DENG Mingxing<sup>1</sup>, ZHANG Haijun<sup>2</sup>, MA Qiang<sup>2</sup>, XIANG Liming<sup>2</sup>, ZHU Bowen<sup>2</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

**Abstract:** Analysis of the electromagnetic dynamic characteristics of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) plays an important role in the research of power transmission system operation and fault diagnosis strategies. The dynamic characteristics of the flux linkage of multi-phase PMSMs are analyzed, and the relation between inductance and rotor position is deduced. Based on the dynamic mathematical model of stator flux linkage of five-phase PMSM, the modeling and simulation of flux linkage and inductance characteristics of five-phase PMSMs under different phase failures are carried out by using MATLAB software. The simulation results are compared and analyzed, and the results can provide theoretical reference for phase failure diagnosis and fault-tolerance control of PMSMs.

**Key words:** five-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM); phase failure; mathematical model; flux linkage; fault-tolerant control

收稿日期: 2019-12-03; 收到修改稿日期: 2020-01-06

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51307047); 湖北省自然科学基金项目(2019CFC893); 湖北省技术创新专项重大项目(2016AAA051)

作者简介: 韩海风(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车用永磁同步电机动态特性。

张海军(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机控制与绕组故障诊断。(通信作者)

## 0 引言

高功率密度和高效率等优点使得永磁同步电机(PMSM)在各个领域的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。电机的可靠性要求在高尖端领域越来越高,因此科研人员逐渐将科研目标从传统三相 PMSM 转移到多相 PMSM<sup>[2-3]</sup>。

与三相电机相比,多相电机的优势在于:定子绕组相数的增加,使得功率器件串并联所引起的均压、均流等问题得到解决<sup>[4-5]</sup>;转矩脉动的频率得以提高,幅值降低,电机的振动和噪声问题得以改善<sup>[6-7]</sup>;相数的冗余使多相电机驱动系统具有较强的容错能力,提高了系统运行的可靠性<sup>[8-9]</sup>。电机容错<sup>[10]</sup>能力的重要性在各个领域均不容忽视。电机的容错能力是指即使电机在运行过程中出现了某些故障,电机的持续输出和可靠运行能力依然得到一定保障<sup>[11-12]</sup>。

对于电机电磁特性的分析研究,传统方法很多基于有限元针对静态的电磁特性进行研究。文献[13]提出了一种基于三维有限元分析和网格重构的绕组磁链和端部漏电感的计算方法,计算了一种三相 12/8 极开关磁阻电机的绕组端部磁链,并给出了端部漏电感随转子位置和邻近绕组电流变化的曲线族;文献[14]利用时步有限元软件对永磁电机进行二维有限元计算,对永磁电机的三相电感、互感及交直流电感的变化进行分析;文献[15]以 1 台 100 kW PMSM 为例,利用有限元分析软件在静态场中,对电机的交直流电感进行仿真分析;文献[16]采用 Ansoft 有限元软件对异步型电主轴电机进行工况仿真和瞬态磁场分析,分析结果验证了磁链分布、定子电磁参数变化等规律。

本文以五相 PMSM 为研究对象,重点针对缺

$$\mathbf{L}_m = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_e & \cos 2(\theta_e + 2\alpha_1) & \cos 2(\theta_e - \alpha_1) & \cos 2(\theta_e + \alpha_1) & \cos 2(\theta_e - 2\alpha_1) \\ \cos 2(\theta_e + 2\alpha_1) & \cos 2(\theta_e - \alpha_1) & \cos 2(\theta_e + \alpha_1) & \cos 2(\theta_e - 2\alpha_1) & \cos 2\theta_e \\ \cos 2(\theta_e - \alpha_1) & \cos 2(\theta_e + \alpha_1) & \cos 2(\theta_e - 2\alpha_1) & \cos 2\theta_e & \cos 2(\theta_e + 2\alpha_1) \\ \cos 2(\theta_e + \alpha_1) & \cos 2(\theta_e - 2\alpha_1) & \cos 2\theta_e & \cos 2(\theta_e + 2\alpha_1) & \cos 2(\theta_e - \alpha_1) \\ \cos 2(\theta_e - 2\alpha_1) & \cos 2\theta_e & \cos 2(\theta_e + 2\alpha_1) & \cos 2(\theta_e - \alpha_1) & \cos 2(\theta_e + \alpha_1) \end{bmatrix}$$

式中:  $L_n = \frac{\pi\mu_0 r N^2 a_1}{4}$ ;  $L_{\theta_e} = \frac{\pi\mu_0 r N^2 b_1}{8}$ ;  $\alpha_1$  是相邻两

相绕组轴线间的夹角,  $\alpha_1 = 2\pi/5$ ;  $a_1 = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{2g_{\min}g_{\max}}$ ;

相故障下磁链、电感的动态特性进行分析研究。

## 1 五相 PMSM 数学模型

### 1.1 自然坐标系下数学模型

电压方程为

$$\mathbf{u}_{5s} = \mathbf{R}_{5s} \mathbf{i}_{5s} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{5s}}{dt} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{u}_{5s} = [u_A \ u_B \ u_C \ u_D \ u_E]^T$  为定子相电压;  $\mathbf{i}_{5s} = [i_A \ i_B \ i_C \ i_D \ i_E]^T$  为定子相电流;  $\boldsymbol{\psi}_{5s} = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C \ \psi_D \ \psi_E]^T$  为定子每相磁链;  $\mathbf{R}_{5s} = \text{diag}[R \ R \ R \ R \ R]$  为电阻矩阵。

磁链方程为

$$\boldsymbol{\psi}_{5s} = \mathbf{L}_{5s} \mathbf{i}_{5s} + \boldsymbol{\lambda}_{5s} \psi_f \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{L}_{5s}$  为电感系数矩阵,

$$\mathbf{L}_{5s} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{AD} & M_{AE} \\ M_{AB} & L_{BB} & M_{BC} & M_{BD} & M_{BE} \\ M_{AC} & M_{BC} & L_{CC} & M_{CD} & M_{CE} \\ M_{AD} & M_{BD} & M_{CD} & L_{DD} & M_{DE} \\ M_{AE} & M_{BE} & M_{CE} & M_{DE} & L_{EE} \end{bmatrix} =$$

$$L_{1s} \mathbf{I}_{5 \times 5} + \mathbf{L}(\theta_e)。$$

由于气隙不均匀,定子电感中随转子位置变化的部分:

$$\mathbf{L}(\theta_e) = L_n \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha_1 & \cos 2\alpha_1 & \cos 3\alpha_1 & \cos 4\alpha_1 \\ \cos \alpha_1 & 1 & \cos \alpha_1 & \cos 2\alpha_1 & \cos 3\alpha_1 \\ \cos 2\alpha_1 & \cos \alpha_1 & 1 & \cos \alpha_1 & \cos 2\alpha_1 \\ \cos 3\alpha_1 & \cos 2\alpha_1 & \cos \alpha_1 & 1 & \cos \alpha_1 \\ \cos 4\alpha_1 & \cos 3\alpha_1 & \cos 2\alpha_1 & \cos \alpha_1 & 1 \end{bmatrix} - L_{\theta_e} \mathbf{L}_m \quad (3)$$

其中:

$$b_1 = \frac{2(g_{\max} - g_{\min})}{\pi g_{\min} g_{\max}}; \mu_0 \text{ 为真空磁导率}; r \text{ 为定子铁心}$$

内半径;  $N$  为每相绕组匝数;  $g_{\min}$  为气隙最小值,  $g_{\max}$  为气隙最大值;  $L_{1s}$  为定子漏感;  $\mathbf{I}_{5 \times 5}$  为五维单

位矩阵;  $\lambda_{5s} = [\sin\theta_e \quad \sin(\theta_e - \alpha) \quad \sin(\theta_e - 2\alpha) \quad \sin(\theta_e - 3\alpha) \quad \sin(\theta_e - 4\alpha)]$  为磁链系数矩阵;  $\theta_e$  为转子纵轴与 A 相轴线的电角度夹角;  $\psi_f$  为永磁体在每一相绕组中产生的磁链幅值。

转矩方程为

$$T_e = \frac{1}{2} p \frac{\partial}{\partial \theta_m} (i_{5s}^T \cdot \lambda_{5s}) \quad (4)$$

式中:  $p$  为电机的极对数;  $\theta_m$  为机械角度。

运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B_1 \omega_m \quad (5)$$

式中:  $J$  为转动惯量;  $\omega_m$  为电机的机械角速度;  $T_L$  为负载转矩;  $B_1$  为阻尼系数。

### 1.2 坐标变换

五相 PMSM 的坐标变换包括静止坐标变换和旋转坐标变换,其关系如图 1 所示。ABCDE 为

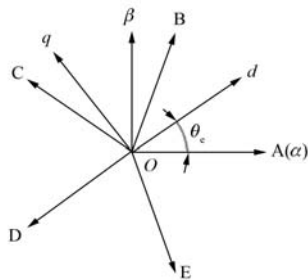


图 1 五相 PMSM 坐标系关系

$$T'_{dq} = T_{\alpha\beta} g T_{dq} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos(\theta_e - \alpha) & \cos(\theta_e - 2\alpha) & \cos(\theta_e - 3\alpha) & \cos(\theta_e - 4\alpha) \\ -\sin\theta_e & -\sin(\theta_e - \alpha) & -\sin(\theta_e - 2\alpha) & -\sin(\theta_e - 3\alpha) & -\sin(\theta_e - 4\alpha) \\ 1 & \cos 3\alpha & \cos 6\alpha & \cos 9\alpha & \cos 12\alpha \\ 0 & \sin 3\alpha & \sin 6\alpha & \sin 9\alpha & \sin 12\alpha \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix}.$$

## 2 磁链动态数学模型

### 2.1 电感与转子位置角的关系

$$L = \left( \frac{0.9mNK_w}{2p} \right)^2 \cdot \lambda(\theta) \quad (9)$$

式中:  $L$  为电感;  $\theta$  为转子位置角;  $m$  为定子相数; 基波绕组因数  $K_w = K_p \cdot K_d$ ,  $K_p$  为基波节距因数,  $K_d$  为基波分布因数;  $\lambda(\theta)$  为气隙磁导。

五相气隙磁导为

自然坐标系,  $\alpha$ - $\beta$  为静止坐标系,  $d$ - $q$  为同步旋转坐标系。

自然坐标系变换到静止坐标系:

$$[f_\alpha \quad f_\beta \quad f_x \quad f_y \quad f_0]^T = T_{\alpha\beta} [f_A \quad f_B \quad f_C \quad f_D \quad f_E]^T \quad (6)$$

式中:  $f$  为电机的电压、电流及磁链等变量; 坐标变换矩阵为

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos\alpha & \cos 2\alpha & \cos 3\alpha & \cos 4\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \sin 2\alpha & \sin 3\alpha & \sin 4\alpha \\ 1 & \cos 3\alpha & \cos 6\alpha & \cos 9\alpha & \cos 12\alpha \\ 0 & \sin 3\alpha & \sin 6\alpha & \sin 9\alpha & \sin 12\alpha \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix}.$$

静止坐标系变换到同步旋转坐标系:

$$[f_d \quad f_q]^T = T_{dq} [f_\alpha \quad f_\beta \quad f_x \quad f_y \quad f_0]^T \quad (7)$$

其中,坐标变换矩阵为

$$T_{dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

自然坐标系变换到同步旋转坐标系:

$$[f_d \quad f_q \quad f_0]^T = T'_{dq} [f_A \quad f_B \quad f_C \quad f_D \quad f_E]^T \quad (8)$$

其中,坐标变换矩阵为

$$\begin{cases} \lambda_a(\theta) = \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q)\cos 2\theta \\ \lambda_b(\theta) = \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q)\cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) \\ \lambda_c(\theta) = \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q)\cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) \\ \lambda_d(\theta) = \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q)\cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) \\ \lambda_e(\theta) = \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q)\cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) \end{cases} \quad (10)$$

五相 PMSM 转子永磁体尺寸如图 2 所示。转子直径为  $D$ , 永磁体轴长  $l$ ,  $d$  轴磁化方向宽度为  $a$ ,  $q$  轴磁化方向宽度为  $c$ , 磁化方向长度为  $b$ , 转子中心到永磁体垂直距离为  $n$ 。

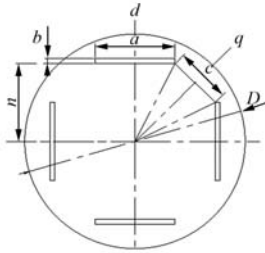


图 2 五相 PMSM 转子永磁体尺寸

$$\lambda_d = \frac{\mu_0 \cdot S_d}{\delta_d} \quad (11)$$

式中:  $\lambda_d$  为  $d$  轴气隙磁导;  $S_d$  为  $d$  轴方向永磁体与定子内圆相对面积;  $\delta_d$  为  $d$  轴方向气隙长度。

$$\lambda_q = \frac{\mu_0 \cdot S_q}{\delta_q} \quad (12)$$

式中:  $\lambda_q$  为  $q$  轴气隙磁导;  $S_q$  为  $q$  轴方向永磁体与定子内圆相对面积;  $\delta_q$  为  $q$  轴方向气隙长度。

### 2.2 磁链的计算

$$\psi(\theta) = K \cdot F \cdot \lambda(\theta) \quad (13)$$

式中:  $K$  为气隙磁链和磁动势、气隙磁导的比例系数;  $F$  为各相磁动势,  $F = \frac{0.9 m N K_w}{2p} \cdot I$ ,  $I$  为各相电流;  $\psi(\theta)$  为气隙磁链。

则五相定子绕组气隙磁链为

$$\begin{cases} \psi_a(\theta) = K \cdot \frac{0.9 m N_a K_{wa}}{2p} \cdot I_a \cdot \left[ \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q) \cos 2\theta \right] \\ \psi_b(\theta) = K \cdot \frac{0.9 m N_b K_{wb}}{2p} \cdot I_b \cdot \left[ \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q) \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) \right] \\ \psi_c(\theta) = K \cdot \frac{0.9 m N_c K_{wc}}{2p} \cdot I_c \cdot \left[ \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q) \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) \right] \\ \psi_d(\theta) = K \cdot \frac{0.9 m N_d K_{wd}}{2p} \cdot I_d \cdot \left[ \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q) \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) \right] \\ \psi_e(\theta) = K \cdot \frac{0.9 m N_e K_{we}}{2p} \cdot I_e \cdot \left[ \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q) \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) \right] \end{cases} \quad (14)$$

## 3 五相 PMSM 缺相故障建模

### 3.1 电感仿真建模

基于 MATLAB/Simulink 软件平台搭建五相 PMSM 缺相电感仿真模型, 首先通过第 2.1 节电感的计算方法编写 A 相电感的计算程序, 其余四相电感依次相差  $72^\circ$  机械角度, 接着调用 M 函数将程序写入, 最后接入搭建的五相 PMSM 缺相故障下的仿真模型。为了观察和分析五相 PMSM 缺相状态下的各相电感变化, 通过实时的转子角度输入, 得出五相电感的动态特性仿真图, 如图 3 所示。

### 3.2 磁链仿真建模

基于 MATLAB/Simulink 软件平台搭建五相 PMSM 缺相磁链仿真模型, 首先通过第 2.2 节磁链的计算方法编写 A 相磁链的计算程序, 其余四相磁链依次相差  $72^\circ$  机械角度, 接着调用 M 函数将程序写入, 最后接入搭建的五相 PMSM 缺相故

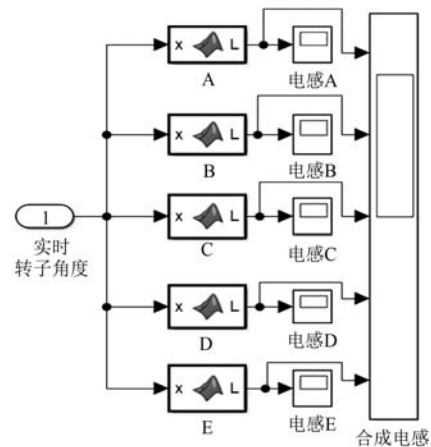


图 3 五相 PMSM 缺相电感仿真模型

障下的仿真模型。为了观察和分析五相 PMSM 缺相状态下的各相磁链变化, 通过实时的五相电流和转子角度输入, 得出五相磁链的动态特性仿真图, 如图 4 所示。

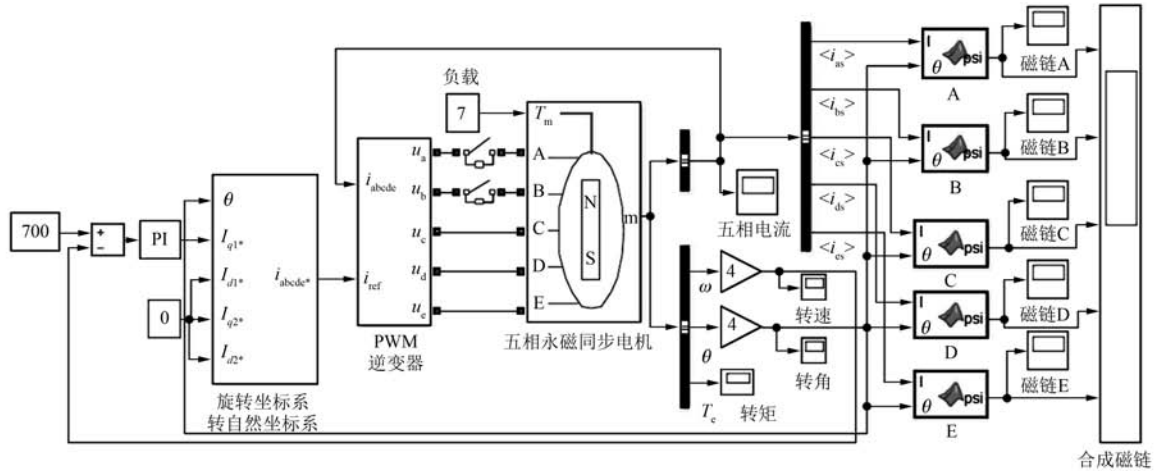


图4 五相 PMSM 缺相磁链仿真模型

### 4 五相 PMSM 缺相状态仿真分析

#### 4.1 电流波形分析

五相 PMSM 正常与缺相电比如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,当五相 PMSM 定子五相绕组均正常运行时,电流幅值为-20~20 A;而在 A 相绕组于 0.084 4 s 开路之后,电流幅值范围增长 1 倍,约为-40~40 A;从图 5(b)可以看出,当 A 相绕组开路后,接着让 B 相绕组于 0.171 s 开路,电流幅值 C 相增长最为剧烈,增长了近 4 倍, D、E 两相电流增长近 2 倍。

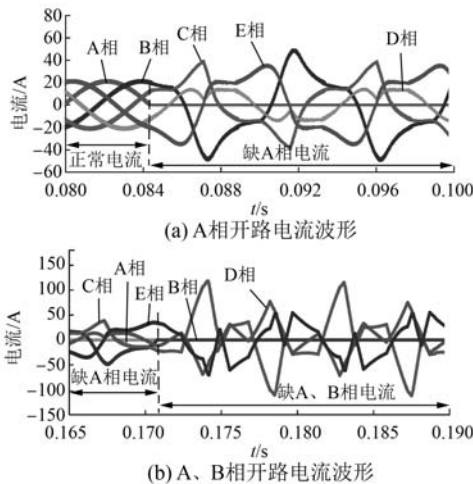


图5 五相 PMSM 正常与缺相电流对比

#### 4.2 转速波形分析

五相 PMSM 正常与缺相转速对比如图 6 所

示。从图 6(a)可以看出,当五相 PMSM 定子五相绕组均正常运行时,转速保持稳定值;而在 A 相绕组于 0.084 4 s 开路之后,转速范围约为 704~706 r/min,平均转速降低;从图 6(b)可以看出,当 A 相绕组开路后,让 B 相绕组于 0.171 s 开路,转速范围增大至 680~710 r/min,降低了平均转速。

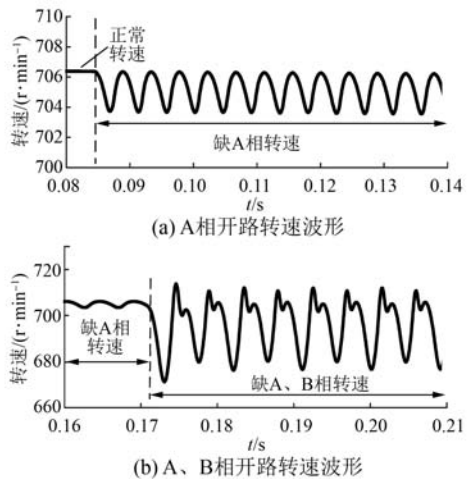


图6 五相 PMSM 正常与缺相转速对比

#### 4.3 转矩波形分析

五相 PMSM 正常与缺相转矩对比如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,当五相 PMSM 定子五相绕组均正常运行时,电机转矩幅值为 10~11 N·m;而在 A 相绕组于 0.084 4 s 开路之后,转矩幅值范围增大至 9.5~12.0 N·m。从图 7(b)可以看出,当 A 相开路后,让 B 相于 0.171 s 开路,转矩幅值范围为 0~35 N·m,甚至低于 0。

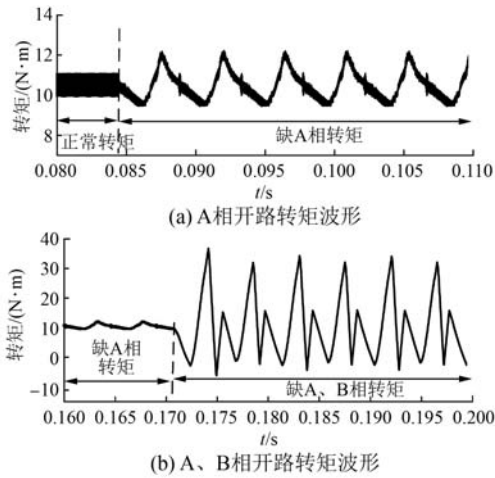


图7 五相 PMSM 正常与缺相转矩对比

#### 4.4 动态电感分析

五相 PMSM 正常与缺相电感的对比如图 8 所示。从图 8 可以看出,当 A 相绕组于 0.083 s 开路,当 B 相绕组于 0.1 s 开路后,五相 PMSM 电感的幅值不会随着五相定子绕组 A 相开路或是 A、B 两相开路而出现波动,由此证明五相 PMSM 电感与电流无关,与转子角度密切相关。

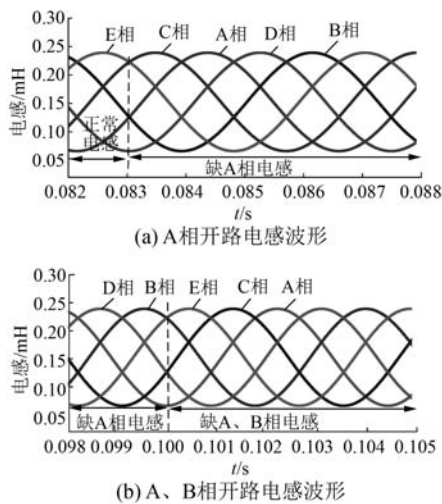


图8 五相 PMSM 正常与缺相电感对比

#### 4.5 动态磁链分析

五相 PMSM 正常与缺相磁链对比如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,当五相 PMSM 定子五相绕组均正常运行时,五相磁链幅值在  $-1.5 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6$  Wb 之间;而在 A 相绕组于 0.084 s 开路之后,其余四相磁链开始发生畸变,并且幅值相比

正常情况下增长 1 倍以上。从图 9(b)可以看出,当 A 相开路后,让 B 相于 0.153 s 开路,其余三相磁链发生更为严重的畸变,其幅值比正常情况下增长了 3~5 倍。

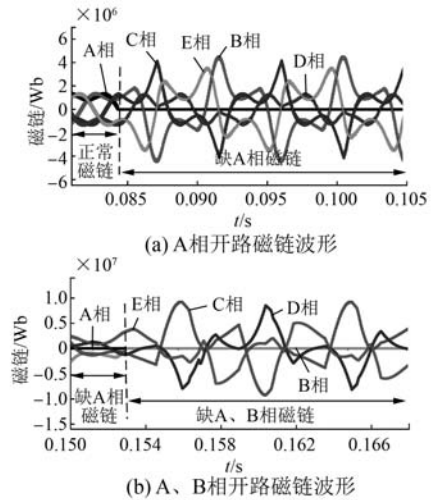


图9 五相 PMSM 正常与缺相磁链对比

### 5 结 语

本文通过对五相 PMSM 在缺 A 相及缺 A、B 相邻两相 2 种故障下的磁链和电感的动态特性分析研究,发现在这 2 种故障状态下:

- (1) 磁链所受影响比较大,畸变和幅值波动比较大。
- (2) 电感几乎不受其影响,电感与定子绕组电流几乎没有关系,与转子位置角密切相关。
- (3) 电流、转速、转矩受其影响也比较大,畸变和幅值波动也比较剧烈。

以上结论以及对电机的磁链、电感的动态特性及其在缺相故障状态下的不同响应特性的理论与仿真分析可以为多相 PMSM 缺相故障诊断和容错控制提供理论参考,特别为多相 PMSM 缺相故障下磁链容错控制及磁链控制研究提供重要参考。

#### 【参考文献】

[ 1 ] 许颖,朱焜秋.无轴承永磁同步电机系统及其关键技术发展综述[J].中国电机工程学报,2019,39(10):2994.  
 [ 2 ] DEMIR Y, YOLACAN E, EL-REFAIE A M, et al. Investigation of different winding configurations and



- displacements of a nine-phase permanent-magnet-synchronous motor with unbalanced AC winding structure[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3660.
- [ 3 ] 匡晓霖,徐金全,黄春蓉,等.六相永磁同步电机驱动控制方式[J].北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1361.
- [ 4 ] 吴公平,黄守道,饶志蒙,等.新型  $N * 3$  相永磁同步电机的特性分析及其预测控制[J].中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1171.
- [ 5 ] 刘胜,郭晓杰,张兰勇.六相永磁同步电机新型单向往滑模控制[J].电机与控制学报, 2018, 22(10): 10.
- [ 6 ] 汪丹妮,罗建,马鸿泰,等.永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J].电机与控制应用, 2019, 46(4): 15.
- [ 7 ] 詹宇声,祝后权,周贵厚.斜槽对永磁同步电机径向激振力波及振动的影响[J].电机与控制应用, 2019, 46(5): 36.
- [ 8 ] 薛诚,宋文胜,武雪松,等.考虑去磁效应的五相永磁同步电机优化开关表直接转矩控制算法[J].中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5774.
- [ 9 ] ZHAO W, CHENG M, JI J, et al. Design and analysis of a new fault-tolerant linear permanent-magnet motor for maglev transportation applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 2185209.
- [ 10 ] CINTRON-RIVERA J G, FOSTER S N, STRANGAS E G. Mitigation of turn-to-turn faults in fault tolerant permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 465.
- [ 11 ] 刘国海,宋成炎,徐亮,等.基于 SVPWM 的五相永磁同步电机两相开路故障容错控制策略[J].电工技术学报, 2019, 34(1): 23.
- [ 12 ] 王凌波,闫震,周扬忠.五相永磁同步电机缺两相容错型直接转矩控制[J].电机与控制应用, 2019, 46(10): 58.
- [ 13 ] 谢德馨,阎秀恪,张奕黄,等.旋转电机绕组磁链的三维有限元分析[J].中国电机工程学报, 2006, 26(21): 143.
- [ 14 ] 肖玉坤,戴正文,邹琳,等.永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1196.
- [ 15 ] 刘平宙,方丹,王兆岩.静态场永磁同步电机交直流电感的有限元分析[J].微电机, 2013, 46(8): 24.
- [ 16 ] 成涛,合焯,陈小安,等.基于有限元的异步型电主轴电机电磁场分析和参数优化[J].机械, 2013, 40(2): 1.

(上接第 103 页)

- [ 8 ] 盛万兴,刘海涛,曾正,等.一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J].中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541.
- [ 9 ] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668.
- [ 10 ] FRACK P F, MERCADO P E, MOLINA M G, et al. Control strategy for frequency control in autonomous microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1046.
- [ 11 ] 张辉,谭树成,肖曦,等.具有直流电机特性的储能接口变换器控制策略[J].高电压技术, 2018, 44(1): 119.
- [ 12 ] 刘其辉,逯胜建.参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J].电力系统自动化, 2018, 42(9): 171.
- [ 13 ] 刘东奇,钟庆昌,王耀南,等.基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J].中国电机工程学报, 2017, 37(2): 544.
- [ 14 ] 吕志鹏,梁英,曾正,等.应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J].中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287.
- [ 15 ] 雷志方,汪飞,高艳霞,等.面向直流微网的双向 DC-DC 变换器研究现状和应用分析[J].电工技术学报, 2016, 31(22): 137.
- [ 16 ] HUANG A. FREEDM system-a vision for the future grid[C]//IEEE PES General Meeting, 2010.
- [ 17 ] 周建萍,张纬舟,王涛,等.含 V2G 的直流微网电压分层控制策略[J].广东电力, 2017, 30(8): 19.
- [ 18 ] 赵钰彬,赵兴勇,陆维,等.基于双重移相控制的直流微电网双主动全桥 DC/DC 变换器[J].广东电力, 2019, 32(1): 60.
- [ 19 ] 赵彪,宋强,刘文华,等.用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J].中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295.
- [ 20 ] 胡超,张兴,石荣亮,等.独立微电网中基于自适应权重系数的 VSG 协调控制策略[J].中国电机工程学报, 2017, 37(2): 516.