

# 双三相永磁同步电机缺相故障特性分析

阮磊, 胡亚山\*, 王吉平

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

## Fault Characteristics Analysis of Dual Three-phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Open Phase

RUAN Lei, HU Yashan\*, WANG Jiping

(College of Electrical and Information Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** [Objective] To provide important theoretical basis and technical references for the selection of open phase fault diagnosis methods and the formulation of fault-tolerant control strategies for the dual three-phase permanent magnet synchronous motor (DTP-PMSM), this paper investigates the fault characteristics of the DTP-PMSMs with open phase, including the current, voltage, torque, copper loss, and efficiency, as well as the impacts of the faults on the motor.

[Methods] Firstly, the vector space completely decoupling control of DTP-PMSM was briefly introduced. Secondly, based on the dual three-phase vector space completely decoupling theory and dual- $dq$  transform theory, the general expression of the current of DTP-PMSM with open phase fault was given by using the symmetric component method according to the asymmetric system characteristics of the motor during the fault. Then, the torque, copper loss, efficiency and voltage in different coordinate systems were systematically analyzed and evaluated and compared with the performance of the motor during normal operation. Finally, experiments were conducted on the DTP-PMSM under both normal and open phase operation, comparing the experimental results with theoretical analysis and simulation results from time-domain and vector diagram perspectives. [Results] The experimental results indicated that when the DTP-PMSM adopted vector space completely decoupling control and experienced an open phase fault, the amplitude of the remaining healthy phase currents increased. The trajectory of  $i_{\alpha\beta}$  and  $u_{\alpha\beta}$  in the fundamental subspace became distorted, and the harmonic currents and voltages escalated. At the same time, the DC component of copper loss increased by 38.09%, the second harmonic torque increased up to 40.76% of its DC component, and the efficiency decreased by 11.85%. [Conclusion] The experimental results validate the correctness of the theoretical analysis and simulation results

on the open phase fault characteristics of the DTP-PMSM proposed in this paper, and provide support for subsequent fault-tolerant control and fault detection in DTP-PMSM under open phase fault conditions.

**Key words:** symmetrical component method; dual three-phase permanent magnet synchronous motor; vector space completely decoupling; open phase fault; fault characteristic

**摘要:** [目的] 为给双三相永磁同步电机(DTP-PMSM)缺相故障诊断方法的选择和容错控制策略的制定提供重要的理论依据和技术参考,本文研究了DTP-PMSM发生缺相故障时的特性,包含电流、电压、转矩、铜耗和效率等,以及故障对电机造成的影响。【方法】首先,简单介绍了DTP-PMSM的矢量空间全解耦控制。其次,基于双三相矢量空间全解耦理论和双 $dq$ 变换理论,根据故障时电机的不对称系统特性,采用对称分量法,给出了DTP-PMSM发生缺相故障时的电流通用表达式。然后对转矩、铜耗、效率和不同坐标系下的电压等进行了系统分析和评估,并与正常运行时的电机性能进行了对比。最后进行了DTP-PMSM正常和缺相运行试验,并从时域和矢量图两个角度,将试验结果与理论分析和仿真结果进行了对比。【结果】试验结果表明,DTP-PMSM采用矢量空间全解耦控制且发生缺相故障时,电机剩余健康相的相电流幅值增大,基波子空间中的 $i_{\alpha\beta}$ 和 $u_{\alpha\beta}$ 的轨迹发生畸变,谐波电流和谐波电压增大。同时铜耗的直流分量增加了38.09%,电磁转矩的二次谐波增大为其直流分量的40.76%,效率降低了11.85%。【结论】试验结果验证了本文所提DTP-PMSM缺相故障特性理论分析和仿真结果的正确性,为后续DTP-PMSM缺相故障容错控制和故障检测提供了支持。

**关键词:** 对称分量法;双三相永磁同步电机;矢量空间全解耦;缺相故障;故障特性

## 0 引言

双三相永磁同步电机(Dual Three-Phase

Permanent Magnet Synchronous Motor, DTP-PMSM) 和传统三相永磁同步电机相比具有输出功率密度高、转矩纹波小等优点,被广泛应用于风力发电、新能源电动汽车<sup>[1]</sup>和轨道交通<sup>[2]</sup>等领域<sup>[3-4]</sup>。DTP-PMSM 定子绕组的相数增多使得控制对象增多,控制的自由度更大,电机发生缺相故障后,通过重新分配各相电流的幅值和相位仍能维持电机的正常运行,故 DTP-PMSM 比传统三相永磁同步电机有更强的容错能力<sup>[5-8]</sup>。DTP-PMSM 缺相故障运行提高了驱动系统的可靠性与安全性,能使驱动系统在性能受限的情况下维持基本功能或安全停车,为操作人员争取了宝贵的反应时间,避免了事故扩大,同时也避免了因故障停机导致的经济损失<sup>[9-10]</sup>。

DTP-PMSM 驱动系统的故障类型可以分为电气故障和传感器故障两大类<sup>[11]</sup>。其中,传感器故障可以细分为速度传感器故障<sup>[12]</sup>、电流传感器故障<sup>[13]</sup>和电压传感器故障;电气故障可以细分为开关管故障、电容故障、驱动故障、匝间短路故障<sup>[14-15]</sup>、相间短路故障<sup>[16]</sup>、相地短路故障和缺相故障<sup>[17-18]</sup>。缺相故障是 DTP-PMSM 较为常见的一种故障类型<sup>[19]</sup>。发生缺相故障时,DTP-PMSM 相当于去掉了故障相绕组,电机结构不再保持原有的对称性<sup>[20]</sup>,电流、电压和转矩等会发生畸变<sup>[21]</sup>,导致电机性能受到影响<sup>[22-23]</sup>。

文献[24]根据对称分量法,分析了五相永磁同步磁阻电机发生缺相故障时,基于电流基波信号幅值和相位的故障特性。文献[25]分析了双三相同步磁阻电机在缺相故障和逆变器短路故障下的故障特性,以及半供模式下电机的各种特性,为提高双三相同步磁阻电机驱动系统的可靠性和容错能力提供了理论支持和实践指导。文献[26]通过对 DTP-PMSM 谐波子空间电流矢量进行归一化处理,分析了 DTP-PMSM 缺一相故障时,电机相电流和谐波子空间电流矢量的故障特性。文献[27]根据 DTP-PMSM 不同故障时六相电流之间的相位差不同,具体分析了缺相故障和电流传感器故障时,DTP-PMSM 的故障特性。文献[26-27]对 DTP-PMSM 发生缺相故障时,电机的电流故障特性进行了详细地分析,但未对电机的电压、转矩脉动、铜耗和效率等故障特性进行分析。文献[28]对 DTP-PMSM 采用矢量空间解耦

(Vector Space Decoupling, VSD)控制且缺相时电机转矩、转速和电流的故障特性进行了研究。

不同控制策略会导致 DTP-PMSM 呈现不同的缺相故障特性。目前尚未有关于 DTP-PMSM 采用基于矢量空间全解耦控制策略时的缺相故障特性的相关研究报告,制约了先进容错控制算法的开发。为此,本文采用基于  $dqz$  变换<sup>[29-30]</sup>的矢量空间全解耦控制策略,对 DTP-PMSM 的缺相故障特性进行了详细地分析。

对于 DTP-PMSM 采用矢量空间全解耦控制且发生缺相故障的情况,首先分析并评估了电机的电流、电压、铜耗、转矩和效率等故障特性;然后分析了缺相故障对电机造成的影响;最后进行了 DTP-PMSM 正常和缺相运行试验,并与理论分析和仿真结果进行比较,从时域和矢量图两个角度验证了电机故障理论分析的正确性。

## 1 DTP-PMSM 矢量空间全解耦控制

DTP-PMSM 驱动系统如图 1 所示,DTP-PMSM 采用双中性点结构,且 A 相绕组和 X 绕组的相位差  $\theta_s$  为  $30^\circ$ 。

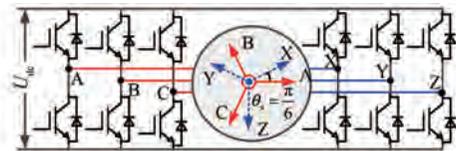


图 1 DTP-PMSM 驱动系统

Fig. 1 DTP-PMSM drive system

为了简化 DTP-PMSM 的数学模型,采用 VSD 坐标变换对其数学模型进行解耦处理,将自然坐标系中 DTP-PMSM 的各变量分别映射到 3 个相互正交的子空间: $\alpha$ - $\beta$  子空间、 $z_1$ - $z_2$  子空间和  $o_1$ - $o_2$  子空间。

VSD 坐标变换所用的变换矩阵  $T_{\alpha\beta}$  为

$$T_{\alpha\beta} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/2 & 1/2 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 1/2 & 1/2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



由式(6)可知,当采用矢量空间全解耦控制时, $i_d, i_{d1}, i_{d2}$ 的直流量相等且为0, $i_q, i_{q1}, i_{q2}$ 的直流量相等且为 $I_m$ 。由于DTP-PMSM为双中性点结构,故在缺A相故障时有 $i_B + i_C = 0$ ,结合式(6)可进一步计算得到 $\beta_b = 0, I_{mb} = \sqrt{3}I_m$ 。根据对称分量法,仅考虑基波分量时,可得到XYZ三相电流正负序分量的表达式为

$$\begin{cases} i_X = I_{m2+} \cos(\theta_e + \beta_{2+}) + I_{m2-} \cos(-\theta_e + \beta_{2-}) \\ i_Y = I_{m2+} \cos\left(\theta_e + \beta_{2+} - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ I_{m2-} \cos\left(-\theta_e + \beta_{2-} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_Z = I_{m2+} \cos\left(\theta_e + \beta_{2+} + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ I_{m2-} \cos\left(-\theta_e + \beta_{2-} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $I_{m2+}, I_{m2-}$ 和 $\beta_{2+}, \beta_{2-}$ 分别为XYZ三相电流正序分量、负序分量的幅值和初相角。

将XYZ三相电流的正序分量经Park坐标变换投影到dq坐标系上,得到只含直流量的电流 $i_{d2+}$ 和 $i_{q2+}$ 。由式(6)可知 $i_{d2+}$ 的直流量为0, $i_{q2+}$ 的直流量应为 $I_m$ ,由此可以解得 $\beta_{2+} = \pi/3, I_{m2+} = I_m$ 。XYZ三相电流的负序分量因需要求解的未知量数量大于求解关系式数量,故无法得到唯一解, $I_{m2-}$ 和 $\beta_{2-}$ 与电机驱动系统采用的控制策略相关。综上,DTP-PMSM采用矢量空间全解耦控制且缺A相故障时,剩余五相相电流表达式为

$$\begin{cases} i_B = \sqrt{3}I_m \cos \theta_e \\ i_C = \sqrt{3}I_m \cos(\theta_e + \pi) \\ i_X = I_m \cos(\theta_e + \pi/3) + \\ I_{m2-} \cos(-\theta_e + \beta_{2-}) \\ i_Y = I_m \cos(\theta_e - \pi/3) + \\ I_{m2-} \cos(-\theta_e + \beta_{2-} - 2\pi/3) \\ i_Z = I_m \cos(\theta_e + \pi) + \\ I_{m2-} \cos(-\theta_e + \beta_{2-} + 2\pi/3) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, $i_B$ 和 $i_C$ 的基波幅值为 $i_q^*$ 的 $\sqrt{3}$ 倍, $i_B$ 和 $i_C$ 相位相反,且 $i_B$ 和 $i_C$ 无二次谐波。XYZ三相电流正序分量的幅值相等为 $I_m, i_C$ 和 $i_Z$ 正序分量的相位相同。电机缺A相故障时, $i_B, i_C, i_X, i_Y$ 和 $i_Z$ 都会增大,若电机负载过大,会导致

电机电流过大,对电机造成损伤。DTP-PMSM缺一相故障时,相电流缺相故障特性如表1所示。表1中, $\theta_{A+}, \theta_{B+}, \theta_{C+}, \theta_{X+}, \theta_{Y+}$ 和 $\theta_{Z+}$ 分别为 $i_A, i_B, i_C, i_X, i_Y$ 和 $i_Z$ 正序分量的相位; $\varepsilon_1$ 为判断故障特性的一个很小的值。

表1 DTP-PMSM缺一相时的相电流故障特性

Tab. 1 Phase current fault characteristics of DTP-PMSM with one phase open

故障相	故障特性1	故障特性2
A	$ \theta_C - \theta_{Z+}  \leq \varepsilon_1$	$ \theta_B - \theta_C - \pi  \leq \varepsilon_1$
B	$ \theta_A - \theta_{X+}  \leq \varepsilon_1$	$ \theta_A - \theta_C - \pi  \leq \varepsilon_1$
C	$ \theta_B - \theta_{Y+}  \leq \varepsilon_1$	$ \theta_A - \theta_B - \pi  \leq \varepsilon_1$
X	$ \theta_{B+} - \theta_Y  \leq \varepsilon_1$	$ \theta_Y - \theta_Z - \pi  \leq \varepsilon_1$
Y	$ \theta_{C+} - \theta_Z  \leq \varepsilon_1$	$ \theta_X - \theta_Z - \pi  \leq \varepsilon_1$
Z	$ \theta_{A+} - \theta_X  \leq \varepsilon_1$	$ \theta_X - \theta_Y - \pi  \leq \varepsilon_1$

当DTP-PMSM缺A相且为双中性点结构时,根据基尔霍夫定律有 $i_B + i_C = 0, i_X + i_Y + i_Z = 0$ 。将剩余五相相电流进行VSD坐标变换并化简,可得静止坐标系下的电流表达式为

$$\begin{cases} i_\alpha = \frac{\sqrt{3}}{6}i_X - \frac{\sqrt{3}}{6}i_Y \\ i_\beta = -\frac{1}{2}i_Z + \frac{\sqrt{3}}{6}i_B - \frac{\sqrt{3}}{6}i_C \\ i_{z1} = \frac{\sqrt{3}}{6}i_Y - \frac{\sqrt{3}}{6}i_X \\ i_{z2} = -\frac{1}{2}i_Z - \frac{\sqrt{3}}{6}i_B + \frac{\sqrt{3}}{6}i_C \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得静止坐标系下电流之间的关系式为 $i_\alpha + i_{z1} = 0$ 。电机发生不同缺相故障时,根据基尔霍夫定律得到的电流约束条件不同,故不同缺相故障对应的静止坐标系中电流间的关系式也不同。

DTP-PMSM缺一相故障的另外五种情况可同理推导,结果如表2所示。由表2可知,DTP-PMSM缺A相故障时,谐波子空间中的电流 $i_{z1}$ 不为0。

DTP-PMSM正常运行和缺A相故障运行时,静止坐标系下的电流矢量轨迹仿真如图3所示。仿真时电机所采用的机械角速度为50 rad/s,负载转矩为50 N·m,永磁磁链为0.078 5 Wb,定子电阻为0.15  $\Omega$ ,极对数 $n_p$ 为5, $d$ 轴电感为

5.841 mH,  $q$  轴电感为 4.336 mH。

表 2 DTP-PMSM 缺一相且为双中性点结构时

$i_\alpha, i_\beta, i_{z1}$  和  $i_{z2}$  之间的关系

Tab.2 Relationships between  $i_\alpha, i_\beta, i_{z1}$  and  $i_{z2}$  when DTP-PMSM has double neutral point with one phase open

故障相	$i_\alpha, i_\beta, i_{z1}$ 和 $i_{z2}$ 之间的关系
A	$i_\alpha + i_{z1} = 0$
B	$i_\alpha + i_{z1} = -\sqrt{3}(i_{z2} - i_\beta)$
C	$i_\alpha + i_{z1} = \sqrt{3}(i_{z2} - i_\beta)$
X	$i_\beta + i_{z2} = \sqrt{3}(i_{z1} - i_\alpha)$
Y	$i_\beta + i_{z2} = -\sqrt{3}(i_{z1} - i_\alpha)$
Z	$i_\beta + i_{z2} = 0$

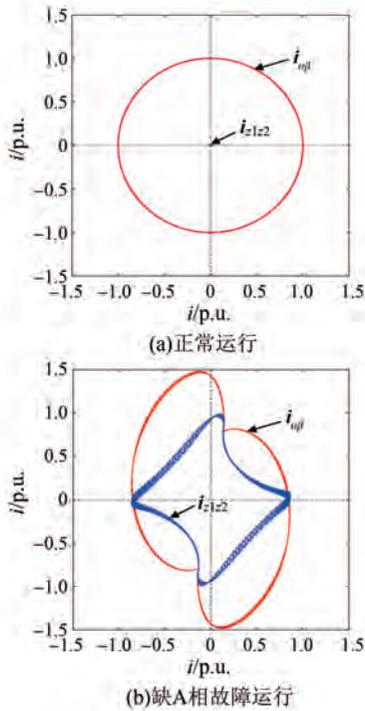


图 3 静止坐标系下电流矢量轨迹仿真结果

Fig.3 Simulation results of current vector trajectories in stationary coordinate system

图 3 中的电流矢量都进行了标么化处理, 基准值为满载工况下电机定子相电流幅值。由图 3 (a) 可知, 电机正常运行时,  $i_{\alpha\beta}$  ( $i_\alpha + j i_\beta$ ) 的轨迹为标准的圆;  $i_{z1z2}$  ( $i_{z1} + j i_{z2}$ ) 的轨迹在原点附近。由图 3 (b) 可知, 电机缺 A 相故障运行时,  $i_{\alpha\beta}$  的轨迹发生了畸变, 不再为标准的圆, 导致电机的圆形旋转磁场发生较大畸变; 而  $i_{z1z2}$  轨迹所圈面积不再为 0, 电机谐波子空间中有较大的电流  $i_{z1}, i_{z2}$ , 导致电机损耗增加。

对式(8)进行坐标变换, 得到 DTP-PMSM 缺 A 相时  $dq$  坐标系、 $dqz$  坐标系和  $d_1q_1, d_2q_2$  坐标系下的电流表达式为

$$\begin{cases} i_{d1} = I_m \sin(2\theta_e) \\ i_{q1} = I_m \cos(2\theta_e) + I_m \\ i_{d2} = I_{m2-} \cos\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) \\ i_{q2} = I_m + I_{m2-} \sin\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} i_d = \frac{1}{2} I_{m2-} \cos\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2} I_m \sin(2\theta_e) \\ i_q = \frac{1}{2} \left[ I_m \cos(2\theta_e) + 2I_m + I_{m2-} \sin\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) \right] \\ i_{dz} = -\frac{1}{2} I_m \sin(2\theta_e) + \frac{1}{2} I_{m2-} \sin\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{qz} = -\frac{1}{2} I_m \cos(2\theta_e) - \frac{1}{2} I_{m2-} \cos\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知, DTP-PMSM 缺 A 相故障且采用矢量空间全解耦控制策略时,  $i_d, i_{d1}, i_{d2}, i_{dz}$  和  $i_{qz}$  的直流量为 0, 且均含有二次谐波分量;  $i_q, i_{q1}$  和  $i_{q2}$  的直流量为  $I_m$ , 也均含有二次谐波分量。

DTP-PMSM 缺 A 相故障运行时, 六相定子电流、静止坐标系中电流和各  $dq$  轴电流的仿真结果如图 4 所示。

由图 4(a) 可知, 缺 A 相故障发生后, A 相电流变为 0。对六相定子电流波形进行快速傅里叶变换分析可知,  $i_b, i_c$  的基波初相位分别为  $13.2^\circ$  和  $193.2^\circ$ , 基波相位差为  $180^\circ$ , 基波幅值分别为 71.59 A 和 71.61 A, 幅值基本相等;  $i_z$  正序分量的基波初相位为  $193.7^\circ$ , 基波幅值为 39.9 A。  $i_\alpha, i_{z1}$  的基波初相位分别为  $102^\circ, -78^\circ$ , 相位差为  $180^\circ$ ,  $i_\alpha, i_\beta, i_{z1}$  和  $i_{z2}$  的基波幅值分别为 28.88 A、52.19 A、28.91 A 和 30.56 A, 可认为  $i_\alpha, i_{z1}$  的基波

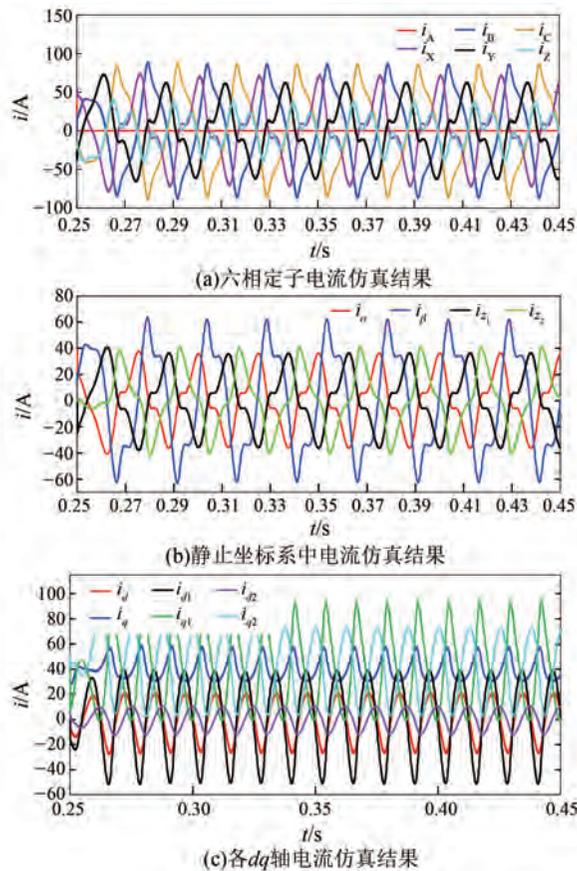


图4 缺A相故障运行的电流仿真结果

Fig. 4 Current simulation results for open fault operation of phase A

幅值相等。综上可得,缺A相故障时, $i_\alpha = -i_{z1}$ ,仿真结果与理论分析相符。

由图4(c)可知,缺A相故障时, $i_d$ 、 $i_{d1}$ 和 $i_{d2}$ 的直流量分别为0.0037 A、0.0052 A和0.0069 A,可认为 $i_d$ 、 $i_{d1}$ 和 $i_{d2}$ 的直流量相等; $i_d$ 、 $i_{d1}$ 和 $i_{d2}$ 的二次谐波分别增大为22.64 A、43.69 A和10.81 A; $i_q$ 、 $i_{q1}$ 和 $i_{q2}$ 的直流量分别为41.81 A、41.94 A和41.68 A,可认为 $i_q$ 、 $i_{q1}$ 和 $i_{q2}$ 的直流量相等; $i_q$ 、 $i_{q1}$ 和 $i_{q2}$ 二次谐波分别增大为11.87 A、43.12 A和34.61 A。

## 2.2 电压的缺相故障特性分析

根据式(1)~式(3)的矩阵变换,不考虑零序分量,DTP-PMSM正常运行时,dq坐标系和dqz坐标系下的电压表达式为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + pL_d i_d - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + pL_q i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \\ u_{dz} = R_s i_{dz} + pL_{dz} i_{dz} - \omega L_{qz} i_{qz} \\ u_{qz} = R_s i_{qz} + pL_{qz} i_{qz} + \omega L_{dz} i_{dz} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $R_s$ 为定子电阻; $\omega$ 为电角速度; $p$ 为微分算子; $L_d$ 、 $L_q$ 分别为dq坐标系中的d、q轴电感; $L_{dz}$ 、 $L_{qz}$ 分别为dqz坐标系中的dz、qz轴电感; $\psi_f$ 为永磁磁链。

DTP-PMSM正常运行和缺A相故障运行时,静止坐标系下的电压矢量轨迹仿真如图5所示。

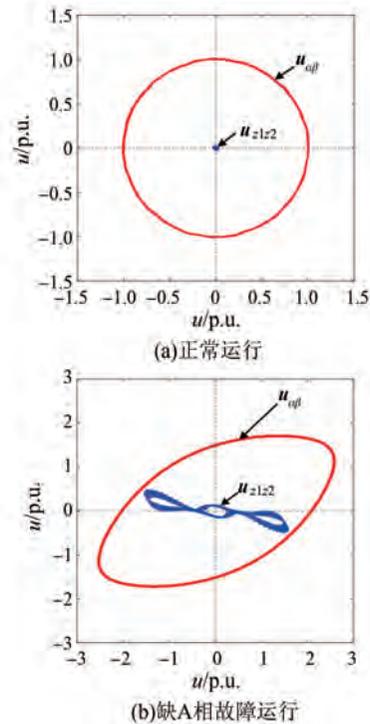


图5 静止坐标系下电压矢量轨迹仿真结果

Fig. 5 Simulation results of voltage vector trajectories in stationary coordinate system

图5中的电压矢量都进行了标幺化处理,基准值为满载工况下电机的相电压幅值。由图5和式(12)可知,当电机正常运行时, $u_{z1z2}(u_{z1}+ju_{z2})$ 的轨迹在原点附近, $u_{\alpha\beta}(u_\alpha+ju_\beta)$ 的轨迹为标准的圆。电机缺A相故障运行时, $u_{\alpha\beta}$ 的轨迹发生畸变, $u_{z1z2}$ 轨迹所圈的面积不再为0,即 $u_{z1}$ 、 $u_{z2}$ 不再为0。由于 $i_d$ 、 $i_q$ 、 $i_{dz}$ 和 $i_{qz}$ 含有二次谐波分量,根据式(12),此时 $u_d$ 、 $u_q$ 、 $u_{dz}$ 和 $u_{qz}$ 中也含有二次谐波分量。

## 2.3 铜耗的缺相故障特性分析

DTP-PMSM的总输入功率 $P_1$ 为

$$P_1 = 3u_d i_d + 3u_q i_q + 3u_{dz} i_{dz} + 3u_{qz} i_{qz} + 3u_{o1} i_{o1} + 3u_{o2} i_{o2} \quad (13)$$

式中: $i_{o1}$ 、 $i_{o2}$ 和 $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$ 分别为 $o_1$ - $o_2$ 子空间中的零序电流分量和零序电压分量。

对于中性点未引出的三相系统, $i_{o1}$ 和 $i_{o2}$ 的

值为 0。将式(12)代入式(13)可得:

$$P_1 = 3R_s(i_d^2 + i_q^2 + i_{dz}^2 + i_{qz}^2) + 3\omega(L_d i_d i_q + \psi_f i_q - L_q i_q i_d - L_{qz} i_{qz} i_{dz} + L_{dz} i_{dz} i_{qz}) + 3[i_d p(L_d i_d + \psi_f) + i_q p(L_q i_q) + i_{dz} p(L_{dz} i_{dz}) + i_{qz} p(L_{qz} i_{qz})] \quad (14)$$

式(14)中的第一项为电机总定子铜耗  $P_{Cu} = 3R_s(i_d^2 + i_q^2 + i_{dz}^2 + i_{qz}^2)$ , 可以看出 DTP-PMSM 六相定子铜耗之和等于新坐标系下各轴的定子铜耗之和。式(14)中第三项为电流与磁链变化率的乘积, 表示磁场能量的增加率。根据功率平衡关系(电能 = 热能+电机机械能+磁场储存的能量), 式(14)中第二项为电磁功率  $P_{em}$ 。

由式(11)和  $P_{Cu}$  表达式可知, 电机正常运行时,  $i_d$ 、 $i_{dz}$  和  $i_{qz}$  都为 0,  $P_{Cu}$  只与  $i_q$  有关且为直流量; 电机缺 A 相故障运行时,  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $i_{dz}$  和  $i_{qz}$  的直流量不变, 同时  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $i_{dz}$  和  $i_{qz}$  都含有二次谐波分量, 使  $P_{Cu}$  增大。故电机长时间大负载故障运行时, 可能会导致电机过热而损坏。

DTP-PMSM 正常运行和缺 A 相故障运行时,  $P_{Cu}$  的仿真结果如图 6 所示。

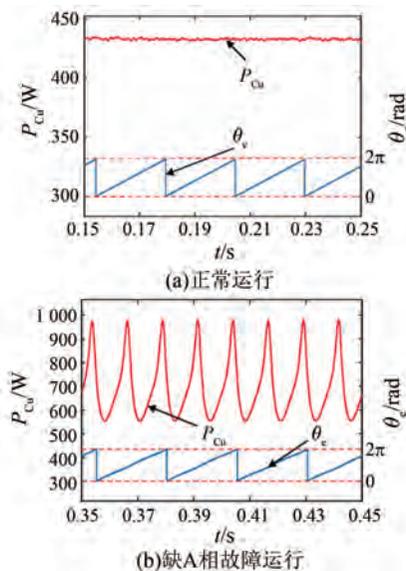


图 6 铜耗仿真结果

Fig. 6 Simulation results of copper loss

由图 6(a)可知, 电机正常运行时,  $P_{Cu}$  的直流量为 433 W, 二次谐波很小, 为 0.050 4 W; 由图 6(b)可知, 电机缺 A 相故障运行时,  $P_{Cu}$  的直流量增大为 697.3 W, 二次谐波增大为 165.785 W。综上, 电机发生缺 A 相故障后,  $P_{Cu}$  的直流量增大了 61.04%。

## 2.4 电磁转矩的故障特性分析

DTP-PMSM 发生缺 A 相故障时在  $dq$  坐标系和  $dqz$  坐标系中的电磁转矩  $T_{em}$  可根据式(11)和式(14)得到, 如式(15)所示:

$$T_{em} = 3n_p[(L_d - L_q)i_q i_d + (L_{dz} - L_{qz})i_{qz} i_{dz} + \psi_f i_q] = 3n_p\{ (L_d - L_q)[I_m^2(0.125b + 0.5a_1) + I_m I_{m2-}(0.25d_1 + 0.5c_1) + 0.125I_{m2-}^2 d_2] + (L_{dz} - L_{qz})(0.125I_m^2 b - 0.25I_m I_{m2-} d_1 + 0.125I_{m2-}^2 d_2) + \psi_f(I_m + 0.5I_m a_2 + 0.5I_{m2-} c_2) \} \quad (15)$$

式中:  $a_1$ 、 $b$ 、 $a_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $d_1$  和  $d_2$  的表达式为

$$\begin{cases} a_1 = \sin(2\theta_e) \\ a_2 = \cos(2\theta_e) \\ b = \sin(4\theta_e) \\ c_1 = \cos\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) \\ c_2 = \sin\left(-2\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) \\ d_1 = \cos\left(-4\theta_e + \beta_{2-} + \frac{\pi}{6}\right) \\ d_2 = \sin\left(-4\theta_e + 2\beta_{2-} + \frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (16)$$

电机正常运行时,  $i_d$ 、 $i_{dz}$  和  $i_{qz}$  都为 0, 式(15)可简化为  $T_{em} = 3n_p \psi_f i_q$ , 此时  $T_{em}$  只有直流量, 电机理论上无转矩脉动。而电机缺 A 相故障运行时,  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $i_{dz}$  和  $i_{qz}$  含有二次谐波分量, 使得  $T_{em}$  也含有较大的谐波分量, 导致产生较大的转矩脉动, 严重影响电机运行。

DTP-PMSM 正常运行和缺 A 相故障运行时,  $T_{em}$  的仿真结果如图 7 所示。

由图 7(a)可知, 电机正常运行时,  $T_{em}$  的直流量为 50.02 N·m, 二次谐波很小, 为 0.001 7 N·m; 由图 7(b)可知, 电机缺 A 相故障运行时,  $T_{em}$  的直流量为 50.04 N·m, 二次谐波增大为 20.409 N·m。综上, 电机发生缺 A 相故障后,  $T_{em}$  的直流量不变, 二次谐波增大为直流量的 40.79%, 电机转矩脉动增大。

## 2.5 效率的故障特性分析

DTP-PMSM 的效率  $\eta$  的表达式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{(T \cdot n)/9.55}{P_1} \cdot 100\% \quad (17)$$

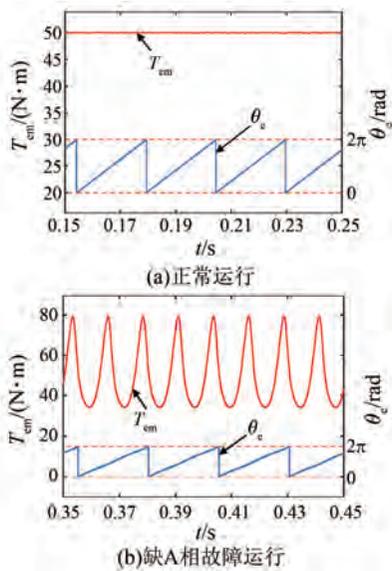


图7 电磁转矩仿真结果

Fig. 7 Simulation results of electromagnetic torque

式中: $P_2$ 为总输出功率; $T$ 为转矩; $n$ 为转速。

电机缺A相故障运行时,相电流幅值增大,电机铜耗增大,导致 $P_1$ 变大。 $P_2$ 虽会因转矩脉动而产生波动,但其直流量保持不变。综上,在电机发生缺A相故障时,电机效率会降低。

DTP-PMSM正常运行和缺A相故障运行时, $\eta$ 的仿真结果如图8所示。

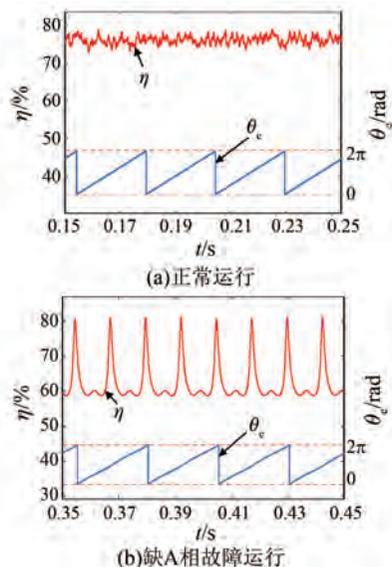


图8 效率仿真结果

Fig. 8 Simulation results of efficiency

由图8(a)可知,电机正常运行时, $\eta$ 的直流量为76.23%,二次谐波为0.06%。由于仿真时采用的转速远低于额定转速,电机正常运行时效率

较低。由图8(b)可知,电机缺A相故障运行时, $\eta$ 的直流量减小为62.57%,二次谐波增大为5.675%。综上,仿真结果和理论分析相符,电机缺A相故障时,效率降低了13.66%。

### 3 DTP-PMSM 缺相故障试验

为了验证故障特性理论分析的正确性,搭建了如图9所示的试验平台进行试验验证。

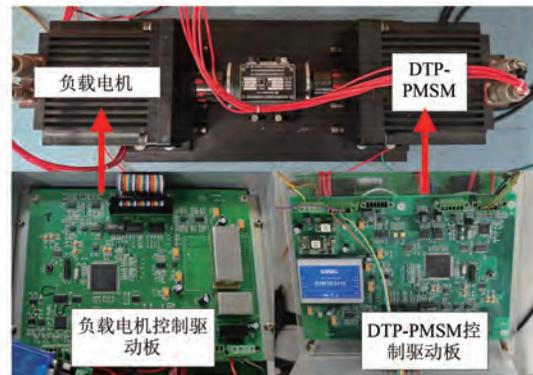


图9 试验平台

Fig. 9 Experimental platform

试验中控制板的主控芯片为TMS320F28335, PWM频率为10 kHz,死区时间为2  $\mu$ s,逆变器直流侧母线电压为80 V,电机转速为300 rpm。试验用负载转矩为25 N·m。DTP-PMSM试验参数如表3所示。

表3 DTP-PMSM 试验参数

Tab. 3 Experimental parameters of DTP-PMSM

参数名称	参数值
永磁磁链 $\psi_f$ /Wb	0.078 5
定子电阻 $R_s$ / $\Omega$	0.15
$q$ 轴电感 $L_q$ /mH	0.584 1
$d$ 轴电感 $L_d$ /mH	0.433 6
$d_z$ 轴电感 $L_{dz}$ /mH	0.266 2
$qz$ 轴电感 $L_{qz}$ /mH	0.276
转动惯量 $J$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	0.01
额定转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	3 000
极对数 $n_p$	5

#### 3.1 缺相故障时电流试验结果

DTP-PMSM正常运行和缺A相故障运行时的六相定子电流试验结果如图10所示。

由图10(a)可知,正常运行时,六相定子电流基波幅值相等,为20.21 A,且二次谐波很小,由于

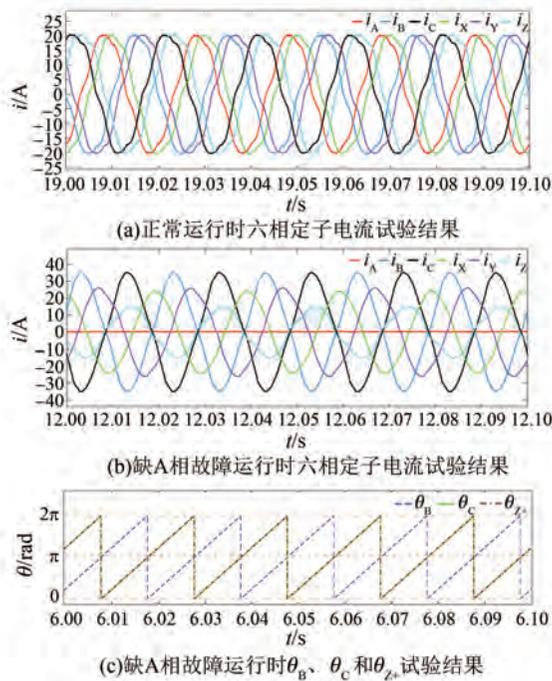


图 10 六相定子电流试验结果

Fig. 10 Experimental results of six-phase stator currents

相电流中含有 5 次、7 次谐波, 故相电流波形不是标准的正弦波。由图 10(b)、图 10(c) 可知, 缺 A 相故障运行时,  $i_A$  为 0,  $\theta_C$  为  $240.2^\circ$ 、 $\theta_B$  为  $60.2^\circ$ 、 $\theta_{Z+}$  为  $240.4^\circ$ , 即  $i_{Z+}$  和  $i_C$  的相位相同;  $i_B$  的幅值为 33.26 A,  $i_C$  的幅值为 33.39 A, 故  $i_B = -i_C$ 。综上, 试验结果与理论分析和仿真结果相符, 电机缺 A 相故障运行时,  $i_B$ 、 $i_C$ 、 $i_X$ 、 $i_Y$  和  $i_Z$  的幅值增大。

DTP-PMSM 正常运行和缺 A 相故障运行时, 静止坐标系下的电流试验结果如图 11 所示。

由图 11(a) 可知, 正常运行时,  $i_\alpha$  和  $i_\beta$  的幅值相等, 为 20.29 A,  $i_{z1}$  和  $i_{z2}$  幅值为 0。由图 11(b) 可知, 缺 A 相故障运行时,  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 、 $i_{z1}$  和  $i_{z2}$  的幅值分别为 13.62 A、28.33 A、13.59 A 和 13.54 A, 且  $i_\alpha$  和  $i_{z1}$  的相位相反, 故  $i_\alpha = -i_{z1}$ 。综上, 试验结果与理论分析和仿真结果相符, 电机缺 A 相故障运行时, 电机谐波子空间中的电流增大, 导致电机损耗增大。

静止坐标系下, DTP-PMSM 的电流矢量轨迹试验结果如图 12 所示。图 12 中的电流矢量都进行了标么化处理, 基准值为满载工况下电机定子相电流幅值。正常运行时,  $i_{\alpha\beta}$  的轨迹为标准圆,  $i_{z1z2}$  的轨迹在原点附近, 此时电机损耗很小。缺 A 相故障运行时,  $i_{\alpha\beta}$  的轨迹发生了畸变, 不再

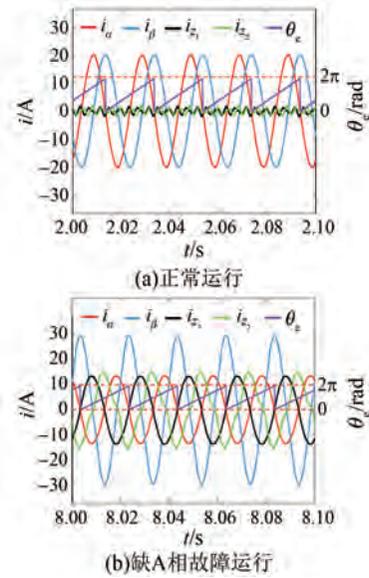


图 11 静止坐标系下的电流试验结果

Fig. 11 Experimental results in stationary coordinate system

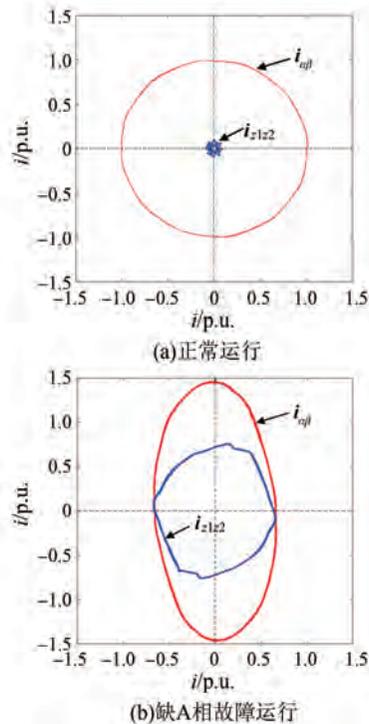


图 12 静止坐标系下电流矢量轨迹试验结果

Fig. 12 Experimental results of current vector trajectories in stationary coordinate system

为标准圆形, 使电机圆形旋转磁场发生畸变, 影响电机运行; 且  $i_{z1z2}$  的轨迹所圈的面积不再为 0, 此时谐波电流增大, 电机损耗增大, 导致电机运行效率降低。由于仿真采用的负载转矩远大于试验采

用的负载转矩,故  $i_{\alpha\beta}$  和  $i_{z1z2}$  的矢量轨迹试验结果和仿真结果存在些许差异。

在  $dq$  坐标系和  $d_1q_1d_2q_2$  坐标系下, DTP-PMSM 的电流试验结果如图 13 所示。

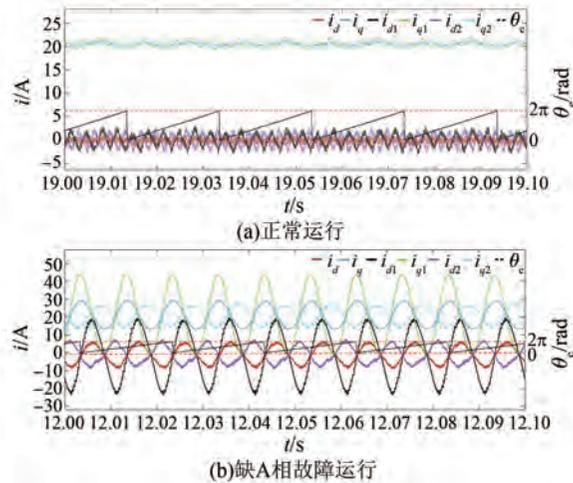


图 13  $dq$  坐标系和  $d_1q_1d_2q_2$  坐标系下的电流试验结果

Fig. 13 Experimental results of current in  $dq$  and  $d_1q_1d_2q_2$  coordinate systems

由图 13(a) 可知,电机正常运行时,  $i_d$ 、 $i_{d1}$  和  $i_{d2}$  的直流量均为 0,且无二次谐波;  $i_q$ 、 $i_{q1}$  和  $i_{q2}$  的直流量均为 20.5 A,同样无二次谐波。由图 13(b) 可知,电机缺 A 相故障运行时,  $i_d$ 、 $i_{d1}$  和  $i_{d2}$  的直流量均为 0,二次谐波分别增大为 6.57 A、19.65 A 和 6.56 A;  $i_q$ 、 $i_{q1}$  和  $i_{q2}$  的直流量均为 20.95 A,二次谐波分别增大为 8.11 A、22.08 A 和 6.29 A。电机缺 A 相故障运行时,  $i_d$ 、 $i_{d1}$ 、 $i_{d2}$ 、 $i_q$ 、 $i_{q1}$  和  $i_{q2}$  所含的二次谐波较大,且根据式(13)和式(14),这些较大的电流谐波会导致电机产生较大的转矩脉动,导致电机铜耗增加。

### 3.2 缺相故障时电压试验结果

DTP-PMSM 在静止坐标系下电压矢量轨迹试验结果如图 14 所示。图 14 中的电压矢量也都进行了标幺化处理,基准值为满载工况下电机相电压幅值。如图 14(a) 所示,正常运行时,  $u_{\alpha\beta}$  的轨迹为一个标准的圆,  $u_{z1z2}$  的轨迹所圈面积为 0,  $u_{z1}$  和  $u_{z2}$  为 0。如图 14(b) 所示,缺 A 相故障运行时,  $u_{\alpha\beta}$  的轨迹发生较大的畸变,且  $u_{z1z2}$  的轨迹所圈面积不再为 0,电机损耗增大。由于此时  $u_{z2}$  中含有较大的三次谐波分量,故  $u_{z1z2}$  的轨迹比较扁平。

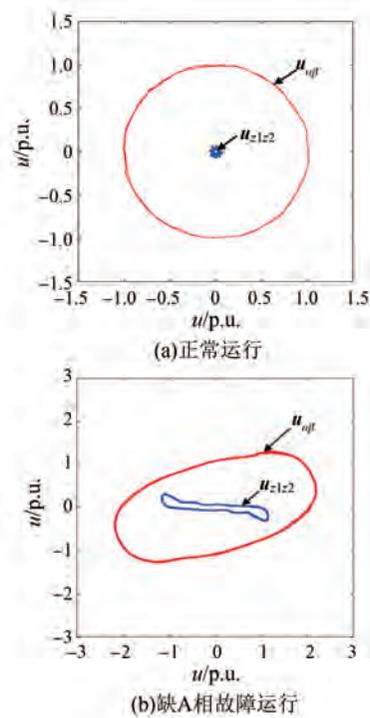


图 14 静止坐标系下电压矢量轨迹试验结果

Fig. 14 Experimental results of voltage vector trajectories in stationary coordinate system

### 3.3 缺相故障时铜耗试验结果

DTP-PMSM 正常运行和缺 A 相故障运行时  $P_{Cu}$  试验结果如图 15 所示。

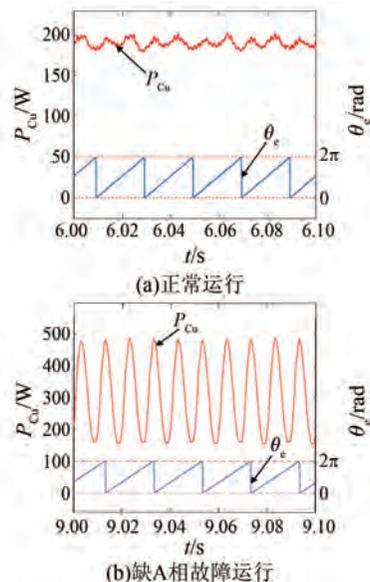


图 15 铜耗试验结果

Fig. 15 Experimental results of copper loss

由图 15(a) 可知,正常运行时,  $P_{Cu}$  的直流量为 190.5 W,由于试验时谐波子空间中的电流并没有

完全控制为 0, 故  $P_{Cu}$  含有较小的二次谐波, 为 5.59 W。由图 15(b) 可知, 缺 A 相故障运行时,  $P_{Cu}$  的直流量增大为 307.7 W, 二次谐波增大为 164.37 W。综上, 电机发生缺 A 相故障时,  $P_{Cu}$  的直流量增加了 38.09%, 易导致电机过热产生事故。

### 3.4 缺相故障时电磁转矩试验结果

DTP-PMSM 正常运行和缺 A 相故障运行时  $T_{em}$  试验结果如图 16 所示。

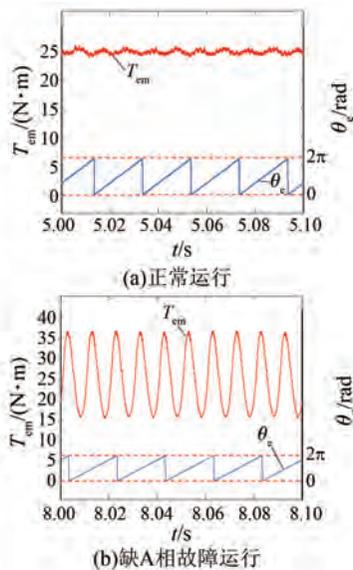


图 16 电磁转矩试验结果

Fig. 16 Experimental results of electromagnetic torque

由图 16(a) 可知, 正常运行时,  $T_{em}$  的直流量为 24.82 N·m, 二次谐波很小。由图 16(b) 可知, 缺 A 相故障运行时,  $T_{em}$  的直流量为 25.17 N·m, 二次谐波为 10.26 N·m, 二次谐波增大为直流量的 40.76%, 电机转矩脉动较大, 长时间不均匀的转矩输出会使电机轴等传动部件因机械疲劳而损坏。

### 3.5 缺相故障时效率试验结果

DTP-PMSM 正常运行和缺 A 相故障运行时  $P_1$ 、 $P_2$  和  $\eta$  的试验结果如图 17 所示。

由图 17(a) 和图 17(c) 可知, 正常运行时,  $P_1$ 、 $P_2$  和  $\eta$  的直流量分别为 1 043 W、772.5 W 和 74.24%。由于试验采用的电机转速较低, 且逆变器直流侧母线电压较低, 故正常运行时电机效率较低。由图 17(b) 和图 17(d) 可知, 缺 A 相故障运行时,  $P_1$ 、 $P_2$  和  $\eta$  的直流量分别为 1 291 W、789.1 W 和 62.39%。综上, 电机发生缺 A 相故障后效率降低了 11.85%。

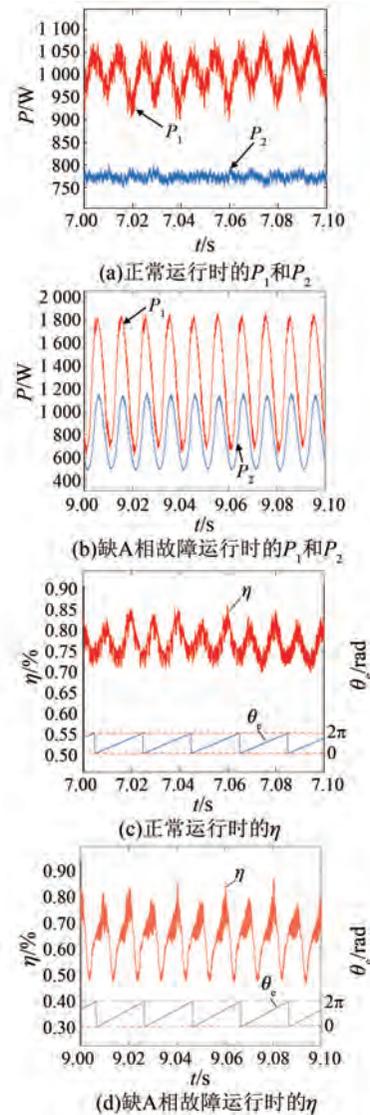


图 17 输入功率、输出功率和效率的试验结果

Fig. 17 Experimental results of input power, output power and efficiency

## 4 结语

本文分析了 DTP-PMSM 采用矢量空间全解耦控制时的缺相故障特性, 并通过试验验证了理论分析的正确性。通过研究得到以下结论。

(1) 电机发生缺相故障时, 电机剩余健康相电流幅值会增大, 当电机负载较大且长时间运行时容易烧坏电机。

(2) 缺相故障发生后, 电机基波子空间中的  $i_{\alpha\beta}$  的轨迹会发生畸变不再为标准的圆, 谐波子空间中的电流  $i_{z1}$  和  $i_{z2}$  同样会增大, 不能控制为 0, 会导致电机损耗增大, 影响电机运行性能;  $u_{\alpha\beta}$  的

轨迹也会发生较大畸变,且  $u_{z1}$  和  $u_{z2}$  不再为 0。

(3)缺相故障发生后,电机  $d$ 、 $q$  轴电流除了直流量外还含有二次谐波分量,使得电机铜耗的直流量增加了 38.09%,电机电磁转矩的二次谐波增大为其直流量的 40.76%,电机转矩脉动增大,电机效率降低了 11.85%。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

阮磊、胡亚山进行了方案设计、内容总结,阮磊进行了试验研究、论文撰写,胡亚山、王吉平参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and content summary were carried out by Ruan Lei and Hu Yashan. The experimental research and paper writing were carried out by Ruan Lei. The manuscript was reviewed and revised by Hu Yashan and Wang Jiping. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] WU Z H, GU W S, ZHU Y, et al. A novel open-phase fault detection method for dual Y shift 30 degrees permanent magnet synchronous motor [ C ]// 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Hanoi, 2019.
- [ 2 ] POLATER N, KAMEL T, TRICOLI P. Control and power sharing strategy of dual three-phase permanent magnet synchronous motor for light railway applications [ C ]//2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Gijon, 2021.
- [ 3 ] 史奔奔. 双三相永磁同步电机缺相容错运行效率优化控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- SHI B B. Research on fault-tolerant operation and efficiency optimization control strategy for dual three-phase PMSM with open phase fault [ D ]. Xi ' an; Xi ' an University of Technology, 2023.
- [ 4 ] 张威威. 双三相永磁同步电机高品质控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHANG W W. Research on high quality control technology of dual-three-phase PMSM [ D ]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2021.
- [ 5 ] HU Y S, FENG Y J, LI X F. Fault-tolerant hybrid current control of dual three-phase PMSM with one phase open [ J ]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 3418-3426.
- [ 6 ] 高一唱,姚钢,周荔丹,等. 多相开路故障下的双三相 PMSM 统一容错控制策略[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 94-102.
- GAO Y C, YAO G, ZHOU L D, et al. Unified fault-tolerant control strategy of dual three-phase PMSM under multi-phase open-circuit faults [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(11): 94-102.
- [ 7 ] 孟祥硕,肖玲斐,王国强,等. 基于电流优化的双三相 PMSM 开路故障容错控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 1-9+19.
- MENG X S, XIAO L F, WANG G Q, et al. Open-circuit fault-tolerant control of dual three-phase PMSM based on current optimization [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10):1-9+19.
- [ 8 ] 郑冬霞,刘咏莹. 绕组开路故障下的双三相永磁同步电机容错控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 28-32+8.
- ZHENG D X, LIU Y X. Fault-tolerant control of dual three-phase permanent magnet synchronous motors under open winding faults [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 28-32+8.
- [ 9 ] 王涛,王爱元,孙健,等. 两相开路六相永磁同步电机的容错控制研究[J]. 微电机, 2019, 52(8): 83-89.
- WANG T, WANG A Y, SUN J, et al. Research on fault tolerant control of six-phase PMSM with two-open-phase [ J ]. Micromotors, 2019, 52(8): 83-89.
- [ 10 ] 周长攀,杨贵杰,苏健勇,等. 基于正常解耦变换的双三相永磁同步电机缺相容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 86-96.
- ZHOU C P, YANG G J, SU J Y, et al. The control strategy for dual three-phase PMSM based on normal decoupling transformation under fault condition due to

- open phases [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 86-96.
- [ 11 ] 王学庆. 双三相永磁同步电机驱动系统故障诊断及容错控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
WANG X Q. Research on fault diagnosis and fault-tolerant control of dual three-phase PMSM drive system [ D ]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [ 12 ] XIAO L, ZHANG L Y, GAO F, et al. Robust fault-tolerant synergetic control for dual three-phase PMSM drives considering speed sensor fault [ J ]. IEEE Access, 2020, 8: 78912-78922.
- [ 13 ] HAN R, SONG Z, LIU C, et al. Single current sensor fault-tolerant control and harmonic suppression method for dual three phase PMSM based on axes transformation [ C ]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.
- [ 14 ] HE Z Y, WANG Z, DUAN C L, et al. Fault diagnosis of inter-turn short circuit faults in dual three-phase PMSM drives [ C ]//2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Dallas, 2021.
- [ 15 ] 付彦伟, 余建生, 易建波. 永磁同步电机匝间短路故障匝数诊断方法 [ J ]. 电机与控制应用, 2023, 50(9): 42-48.  
FU Y W, YU J S, YI J B. Diagnosis method of turns of permanent magnet synchronous motor for inter-turn short-circuit fault [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(9): 42-48.
- [ 16 ] 侯飞宇. 双三相永磁同步电机短路故障转矩波动抑制研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.  
HOU F Y. Research on torque fluctuation suppression for dual three-phase permanent magnet synchronous motor with short-circuit fault [ D ]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [ 17 ] KANG J K, YOO D W, HUR J. Fault diagnosis using voltage angle in dual three-phase interior permanent magnet synchronous motor [ C ]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, 2022.
- [ 18 ] WANG X Q, WANG Z, XU Z X, et al. Comprehensive diagnosis and tolerance strategies for electrical faults and sensor faults in dual three-phase PMSM drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6669-6684.
- [ 19 ] ORVIZ M, LABORDA D F, GUERRERO J M, et al. Fault-tolerant control of a dual three-phase interior PMSM under open-phase faults [ C ]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, 2022.
- [ 20 ] DURAN M J, GONZALEZ-PRIETO I, RIOS-GARCIA N, et al. A simple, fast, and robust open-phase fault detection technique for six-phase induction motor drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 547-557.
- [ 21 ] 钱轶群, 张孜乐, 杨依林, 等. 基于改进经验小波变换的永磁同步电机故障诊断策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 12-21.  
QIAN Y Q, ZHANG Z L, YANG Y L, et al. Fault diagnosis strategy for permanent magnet synchronous motors based on improved empirical wavelet transform [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 12-21.
- [ 22 ] SONG Z F, JIA Y L, LIU C H. Open-phase fault-tolerant control strategy for dual three-phase permanent magnet synchronous machines without controller reconfiguration and fault detection [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 789-802.
- [ 23 ] 袁雷, 程剑波, 徐岸非, 等. 双三相永磁同步电机两相开路谐波抑制矢量容错控制 [ J/OL ]. 电工技术学报, 2024-12-02. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241411>.
- YUAN L, CHENG J B, XU A F, et al. Vector fault-tolerant control with harmonic suppression for a dual three-phase permanent magnet synchronous motor under two-phase open-circuit conditions [ J/OL ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024-12-02. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241411>.
- [ 24 ] ARAFAT A K M, CHOI S, BAEK J. Open-phase fault detection of a five-phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor based on symmetrical components theory [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6465-6474.
- [ 25 ] PARK J K, BABETTO C, BIANCHI N. Fault analysis for dual three-phase synchronous reluctance motor [ C ]//2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, San Diego, 2019.
- [ 26 ] 王爽, 谢圣宝, 张秦一. 双三相永磁同步电机绕

- 组开路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 108-116.
- WANG S, XIE S B, ZHANG Q Y. Winding open circuit fault diagnosis method for dual three-phase permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(5): 108-116.
- [27] ZHAO W X, CHEN Y F, TAO T, et al. Open-phase fault and current sensor fault diagnosis based on spatial distributions of phase currents for dual three-phase PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 72(5): 4375-4388.
- [28] 汤昊岳. 双三相永磁同步电动机及其驱动系统关键技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- TANG H Y. Research on key techniques of dual three-phase permanent magnet synchronous motor and its drive system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [29] HU Y S, Q Z Z, ODAVIC M. Comparison of two-individual current control and vector space decomposition control for dual three-phase PMSM [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(5): 4483-4492.
- [30] LI Y G, HU Y S. Comparative study on harmonic current suppression of dual three-phase PMSM based on LMS adaptive linear neuron and resonant controller [C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.

---

收稿日期:2025-03-11

收到修改稿日期:2025-06-18

作者简介:

阮磊(2000-),男,硕士研究生,研究方向为双三相永磁同步电机容错控制,ruanlei@hnu.edu.cn;

\*通信作者:胡亚山(1982-),男,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动、变频器 and 伺服驱动器、大型直驱永磁风力发电、三相 PWM 整流器以及现代交直流电机调速技术等,huyashan@hnu.edu.cn。