第 53 卷 第 11 期 电机与控制应用 Vol. 53 No. 11, November, 25, 2026
2026 年 11 月 25 日 Electric Machines & Control Application CCBY-NC-ND 4.0 License
DOI:10.12177/emca.2026.242 文章编号:1673-6540(2026)11-1106-13 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

基于电流扇区特征的双三相永磁同步电机开关管开路故障诊断方法

祝欣怡, 崔 江*
(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

Diagnosis Method for Open-Circuit Faults of Power Switches in Dual Three-Phase PMSM Based on Current Sector Characteristics

Zhu Xinyi, Cui Jiang*
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: **[Objective]** Aiming at the open-circuit fault of inverter power switches in dual three-phase permanent magnet synchronous motor (DTP-PMSM), this paper proposes a fault diagnosis method based on current sector characteristics. **[Methods]** Taking advantage of the synchronization and symmetry characteristics of the sector-switching process of currents in the two sets of three-phase windings, the sector dwell width of the healthy winding was adopted as an adaptive reference benchmark. A diagnostic variable capable of characterizing winding abnormal states was constructed to realize rapid identification of the faulty winding. On this basis, the current crossing-point information during the sector transition of the healthy winding was extracted to establish an adaptive localization threshold. By counting the number of threshold-crossing points within the half-wave interval of each phase current of the faulty winding, the localization of single-switch open-circuit faults and various types of double-switch open-circuit faults was achieved. Finally, an experimental platform of the DTP-PMSM was built, and experimental verifications were carried out under different open-circuit fault types of power switches as well as dynamic operating conditions including speed and load variations. **[Results]** Experimental results demonstrated that the proposed method exhibited favorable robustness under multiple fault modes and dynamic operating conditions, together with a fast alarm response. The time interval from fault occurrence to alarm triggering was only half a sector period. **[Conclusion]** The proposed diagnosis method for open-circuit faults of inverter power switches in DTP-PMSM based on current sector characteristics achieves high diagnostic accuracy, favorable disturbance rejection capability and great potential for engineering applications.

Key words: dual three-phase permanent magnet synchronous motor; inverter power switch; open-circuit fault; current sector

摘 要:**【目的】**针对双三相永磁同步电机(DTP-PMSM)逆变器开关管开路故障,本文提出一种基于电流扇区特征的故障诊断方法。**【方法】**利用两套三相绕组电流扇区切换过程所具有的同步性与对称性特征,以健康绕组的扇区驻留宽度作为自适应参考基准,构造能够表征绕组异常状态的诊断变量,实现故障绕组的快速识别。在此基础上,通过统计故障绕组各相电流半波区间内的阈值超越点数,完成单管开路故障以及多种双管开路故障的定位。最后,搭建 DTP-PMSM 试验平台,针对不同开关管开路故障类型以及转速、负载变化等动态运行工况开展试验验证。**【结果】**试验结果表明,所提方法在多类故障模式与动态工况下均具备良好鲁棒性,同时报警响应迅速;系统从故障发生至故障报警触发仅需半个扇区时长。**【结论】**所提基于电流扇区特征的 DTP-PMSM 逆变器开关管开路故障诊断方法,诊断准确率高、抗扰动能力强,具备较强的工程应用价值。

关键词:双三相永磁同步电机;逆变器开关管;开路故障;电流扇区

0 引言

双三相永磁同步电机(Dual Three-Phase

基金项目:航空科学基金(201933052001)
Aeronautical Science Foundation of China (201933052001)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Permanent Magnet Synchronous Motor，DTP-PMSM）凭借其固有的绕组冗余特性以及低压大功率输出能力，逐步成为高可靠性电驱动系统的重要发展方向[1-3]。尽管 DTP-PMSM 具备一定的容错运行能力，但在实际运行过程中，由热应力、电应力及器件老化引起的逆变器开关管开路故障仍不可避免[4-5]。该类故障会导致逆变器输出电压矢量退化，破坏正常的电压合成过程，进而引起定子电流畸变、转矩脉动增加甚至二次级联故障。若不能在较短时间内实现故障检测与定位，极易诱发二次故障甚至导致系统崩溃[6-9]。因此研究 DTP-PMSM 逆变器开关管开路故障诊断方法对于确保其安全稳定运行至关重要。

目前，针对逆变器开路故障的诊断方法主要可归纳为三类：基于模型驱动的方法[10-11]、基于信号处理的方法[12-13]以及基于数据驱动的方法[14-15]。

（1）基于模型驱动的方法通常依托电机和逆变器的解析模型，通过残差生成、状态观测或参数辨识实现故障检测与定位[16]。文献[17]提出一种基于混合模型磁链观测器的实时开路故障诊断方法，将电压模型与电流模型的残差进行融合实现故障检测。文献[18]提出一种基于电压逻辑模型和残差分析的诊断方法，实现了九开关变换器驱动对称六相 PMSM 逆变器开路故障检测。文献[19]通过比较参考电压与模型估算输出电压的残差，提取直流分量和二次谐波构造故障指标，并利用直流分量极性定位故障开关管。

（2）基于信号处理的方法通常直接利用电流或电压信号的时域统计量、频域谐波特征、归一化变量或矢量轨迹形态构造故障判据[20]。文献[21]使用 Park 矢量模方法，通过监测平面电流轨迹的形态偏离来检测故障。文献[22]使用归一化相电流绝对值诊断变量的方法进行故障诊断，该方法在一定程度上能抑制负载变化与频率波动的影响。文献[23]提出一种针对六相/多相容错 PMSM 的平均电流 Park 矢量方法，该方法可在正常运行和容错运行两种模式下实现开路故障检测与定位。

（3）基于数据驱动的方法借助深度学习或模式识别技术，从电流、电压等信号中自动提取故障特征[24]，近年来在逆变器故障诊断中发展迅速。文献[25]将快速傅里叶变换与时间卷积网络相结合，实现了绝缘栅双极型晶体管开路故障与电流传感器故障的同步诊断，可有效融合电流信号的时频域特征。文献[26]针对小样本场景，提出基于小波卷积神经网络的方法，利用归一化电流矢量轨迹图实现鲁棒诊断。文献[27]提出可迁移的数据驱动诊断框架，通过特征对齐和迁移学习策略降低域差异对性能的影响，从而提升跨工况的适用性。

综上所述，尽管现有逆变器开路故障诊断方法能够实现故障检测与分类，但是针对具有空间冗余特性的 DTP-PMSM 的研究相对较少[28]，尤其是在转速波动、负载变化等动态工况下，现有基于固定阈值或单绕组特征的诊断方法容易出现误判，难以充分利用双三相系统两套绕组间的冗余信息。为此本文提出一种基于电流扇区特征的 DTP-PMSM 逆变器开关管开路故障诊断方法。首先，分析三相电流大小与空间扇区之间的对应关系，实现无需 Clarke 变换与幅角计算的电流扇区快速判定；其次，充分利用双三相系统两套绕组之间固定 30°电角度相移所形成的固有相位关联关系，以健康绕组实时扇区驻留宽度构造自适应故障指标，实现故障绕组识别；最后，利用健康绕组扇区跳变时的电流交叉点特征构建自适应定位阈值，通过统计故障绕组各相电流正负半波超越点数实现故障开关管定位。结果表明，所提方法无需速度信息，通过基于健康绕组电流交叉点构造的自适应定位阈值，实现了单管及双管开路故障诊断，在动态工况下具有良好的鲁棒性。

1 DTP-PMSM 驱动系统与开关管开路故障类型及特征分析

1.1 DTP-PMSM 驱动系统

DTP-PMSM 驱动系统结构如图 1 所示。系统由共享同一直流母线电压 U_{dc} 的两组三相两电平电压源逆变器与一台 DTP-PMSM 构成。电机定子上分布两套空间相差 30°电角度的对称三相绕组，分别记为 ABC、XYZ，两套绕组共用同一转子磁路并受相同转子磁场作用，但分别由独立逆变器供电，因此在电气上相互独立。两套绕组均采用星形连接，中性点悬浮不接地，因此满足瞬时基

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

尔霍夫电流定律(Kirchhoff Current Law, KCL)约束,即:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \tag{1}$$

$$i_X + i_Y + i_Z = 0 \tag{2}$$

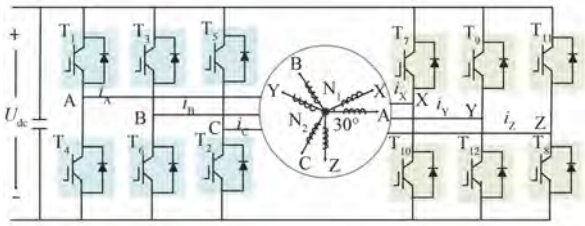


图 1 DTP-PMSM 驱动系统

Fig. 1 DTP-PMSM drive system

两组逆变器共包含 12 个功率开关器件。以任意一套三相绕组($j \in \{A,B,C\}$)为例,定义其桥臂开关函数 S_j 为

$$S_j = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通,下桥臂关断} \\ 0, & \text{上桥臂关断,下桥臂导通} \end{cases} \tag{3}$$

每组逆变器由 8 种基础开关组合构成,在α-β静止正交坐标系下映射为 6 个幅值相等的有效电压矢量和 2 个零矢量,有效矢量在复平面上呈正六边形对称分布,如图 2 所示。在标准空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)下,每一调制周期 T_s 内的参考电压矢量由其所在扇区的两个相邻有效矢量基于伏秒平衡原理合成。

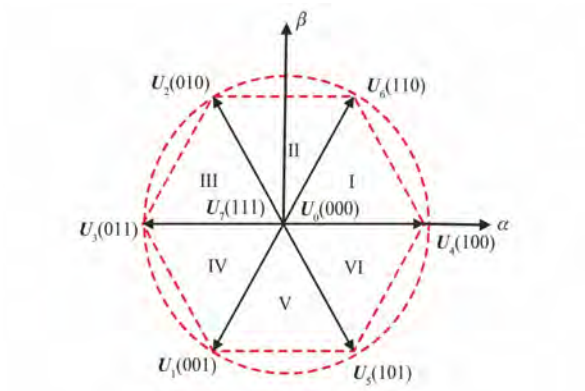


图 2 电压空间矢量图

Fig. 2 Voltage space vector diagram

1.2 开关管开路故障类型及特征分析

在实际复杂工况下,逆变器功率器件易受热应力过载、驱动电路故障等因素影响发生开路故障。将单套三相逆变器作为独立分析单元,在仅考虑单管、双管开路故障时,逆变器共有 22 种工作状态,包含正常状态与 21 种开路故障状态。结合故障开关管的数量与空间分布特征,将 21 种开路故障状态划分为四类,具体如表 1 所示。四类故障下的电流通路退化示意图如图 3 所示。

表 1 单套三相逆变器开路故障状态分类

Tab. 1 Classification of open-circuit fault states for a single three-phase inverter

故障分类	故障状态
单管故障	T_1、T_2、T_3、T_4、T_5、T_6
同桥臂双管故障	T_1T_4、T_3T_6、T_5T_2
异相同侧双管故障	T_1T_3、T_1T_5、T_3T_5、T_4T_6、T_4T_2、T_6T_2
异相异侧双管故障	T_1T_2、T_1T_6、T_3T_4、T_3T_2、T_5T_4、T_5T_6

1.2.1 单管开路故障

以 A 相上桥臂 T_1 开路为例,如图 3(a)所示。正常工况下,A 相流过正向电流时,电流路径为 U_{dc}→T_1→A 相绕组→中性点。T_1 发生开路故障后,A 相无法建立正常的正向导通通路。当控制器发出 $S_A=1$ 指令时,A 相端电压无法按照预期建立,相关开关状态发生退化映射。

逆变器正常运行时,SVPWM 根据伏秒平衡原理,利用调制周期 T_s 内相邻的两个有效电压矢量以及零矢量($\boldsymbol{U}_0$ 或 $\boldsymbol{U}_7$)的线性组合来合成期望参考电压矢量 $\boldsymbol{U}_{out}$。以第一绕组系统的第 I 扇区为例,空间矢量合成示意图如图 4 所示。伏秒平衡方程式表示为

$$\boldsymbol{U}_{out}T_s = \boldsymbol{U}_4t_4 + \boldsymbol{U}_6t_6 + \boldsymbol{U}_0t_0 \tag{4}$$

式中:t_4、t_6 分别为有效矢量 $\boldsymbol{U}_4$、$\boldsymbol{U}_6$ 在 T_s 内的作用时间;t_0 为零矢量的作用时间,且满足 $t_4+t_6+t_0=T_s$。

当 T_1 开路时,第 I 扇区内的基准有效矢量发生突变。理想矢量 $\boldsymbol{U}_4$(100)退化映射为零矢量 $\boldsymbol{U}_0$(000),理想矢量 $\boldsymbol{U}_6$(110)退化映射为 $\boldsymbol{U}_2$(010)。将此故障退化关系代入伏秒平衡方程可得:

$$\boldsymbol{U}'_{out} = \frac{t_6}{T_s}\boldsymbol{U}_2 \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{U}'_{out}$为实际输出电压矢量。

由此可见,原伏秒平衡方程不再成立,$\boldsymbol{U}'_{out}$被约束在 $\boldsymbol{U}_2$(010)的轴线上,使得逆变器无法在第 I 扇区合成内任意有效电压矢量。同理,由 $\boldsymbol{U}_5$(101)和 $\boldsymbol{U}_4$(100)合成的第 VI 扇区在故障期间

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

也将发生类似的退化。由于 $\boldsymbol{U}_5$ 退化为 $\boldsymbol{U}_1$(001)且 $\boldsymbol{U}_4$ 退化为零矢量，其实际合成电压矢量被迫映射至 $\boldsymbol{U}_1$ 的轴线上，引发第 VI 扇区的物理缺失。空间电压矢量的区域性缺失，使原本应进入扇区 VI 的区间被前一相邻扇区 V 吸收，原本应进入扇区 I 的区间被后一相邻扇区 II 吸收，导致扇区 V 和 II 扇区延长。而其余扇区受故障影响较小，驻留时间基本维持健康状态。

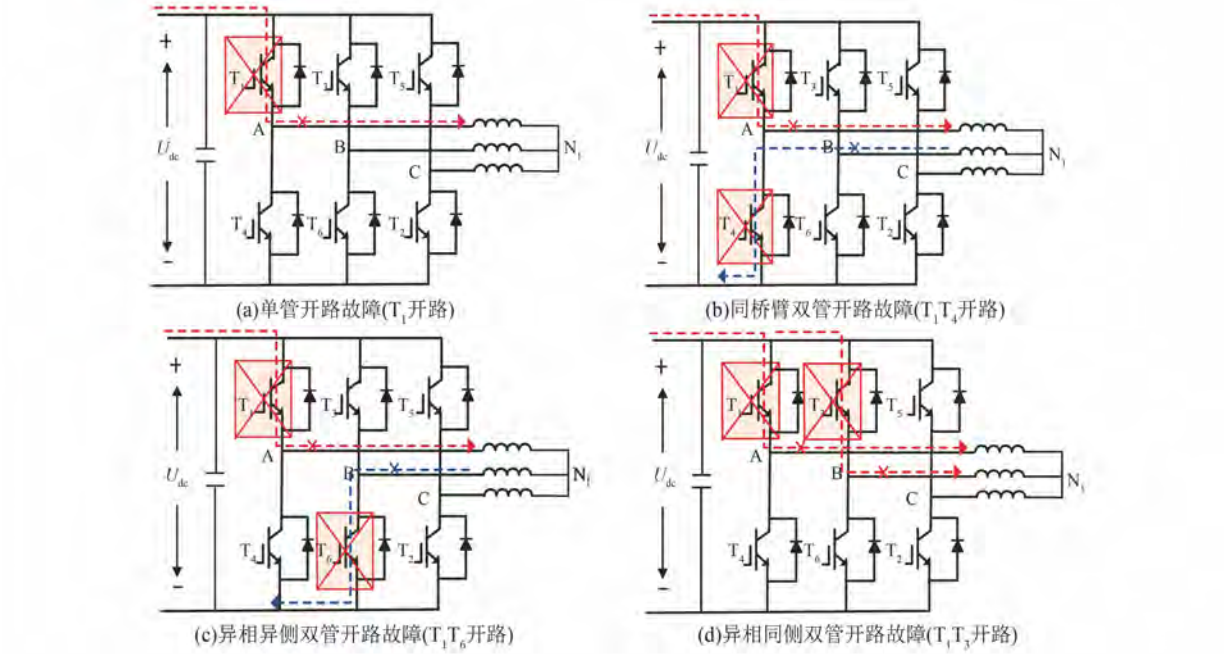


图 3　四类开路故障下的电流通路退化示意图

Fig. 3　Schematic diagram of current path degradation under four types open-circuit faults

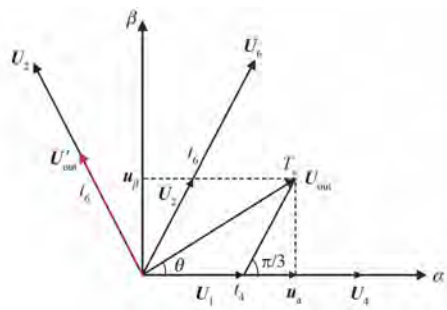


图 4　电压空间矢量合成示意图

Fig. 4　Schematic diagram of voltage space vector synthesis

1.2.2　同桥臂双管开路故障

以 A 相上下桥臂 T_1T_4 同时开路为例，如图 3(b)所示。正常工况下，A 相流过正向电流时，电流路径为直流母线正端→T_1→A 相绕组→中性点；A 相流过负向电流时，电流路径为中性点→A 相绕组→T_4→直流母线负端。故障发生后，A 相双向电流通路均被阻断，无法响应高、低电平调制指令，使包含 A 相高、低电平作用状态的有效电压矢量发生退化。其中，T_1 开路导致第 I、VI 扇区缺失；T_4 开路导致第 III、IV 扇区缺失。对应调制区间被相邻健康扇区吸收，表现为第 II 和第 V 扇区驻留宽度显著增加。从电流波形来看，A 相电流被钳位在零点附近，而 B、C 两相电流被迫承担主要电流通路，呈现幅值近似相等、相位近似相反的畸变特征。

1.2.3　异相异侧双管开路故障

以 A 相上桥臂 T_1 与 B 相下桥臂 T_6 同时开路为例，如图 3(c)所示。正常工况下，A 相正半波电流通过 T_1 与直流母线正端形成导通回路，B 相负半波电流通过 T_6 与直流母线负端形成导通回路。故障发生后，A 相正向电流通路和 B 相负向电流通路同时被阻断，对应桥臂失去正常调制能力，相关有效电压矢量发生退化。由此导致部分空间扇区缺失，原有扇区切换规律被破坏，相邻健康扇区的驻留宽度明显增加。同时，A 相正半波和 B 相负半波电流明显被抑制，形成典型的双相半波缺失特征。

1.2.4　异相同侧双管开路故障

异相同侧双管开路可视为空间相邻两个同侧单管故障的叠加。以 A 相上桥臂 T_1 与 B 相上桥

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

臂 T_3 同时开路为例,如图 3(d)所示。故障发生后,A 相和 B 相均失去高电平调制能力,逆变器上桥臂仅剩 C 相 T_5 能正常导通。当参考电压矢量运行至与 A、B 相正向供电相关区域时,由于 T_1 和 T_3 已发生开路故障,仅依靠 T_5 无法形成有效供电回路,整个逆变器上桥臂与直流母线的连接被彻底切断。导致第 VI、I、II 和 III 扇区连续缺失。对应扇区的调制区间被相邻健康扇区 IV 和 V 吸收,从而造成扇区 IV 和 V 驻留宽度显著增加。同时,A 相与 B 相正半波电流受到抑制被钳位在零点附近;在中性点电流约束作用下,C 相在对应区间内被迫承受两倍正常幅值的正半波反向协同畸变。

2 基于扇区特征的故障诊断方法

2.1 基于扇区驻留宽度比的故障报警机制

经典扇区判别方法通常需先通过 Clarke 变换将三相电流映射至静止 α-β 坐标系,再根据判别量的符号组合确定参考矢量所在的空间扇区。对于平衡三相正弦电流,空间矢量所在扇区与三相瞬时电流大小排序之间具有确定对应关系,如表 2 所示。开路故障导致三相电流大小关系无法按照正常顺序切换,进而造成电流扇区驻留时间异常延长甚至锁定。因此,本文利用三相瞬时电流的大小排序关系进行扇区判别,同时通过扇区的异常延长来识别故障是否发生。这种方法避免了显式坐标变换与幅角计算,有效降低了算法复杂度,提高诊断实时性。

表 2 基于三相瞬时电流排序的扇区判别规则

Tab. 2 Sector identification rules based on three-phase instantaneous current ranking

扇区编号	第一套绕组三相瞬时电流排序	第二套绕组三相瞬时电流排序
I	$i_A>i_B>i_C$	$i_X>i_Y>i_Z$
II	$i_B>i_A>i_C$	$i_Y>i_X>i_Z$
III	$i_B>i_C>i_A$	$i_Y>i_Z>i_X$
IV	$i_C>i_B>i_A$	$i_Z>i_Y>i_X$
V	$i_C>i_A>i_B$	$i_Z>i_X>i_Y$
VI	$i_A>i_C>i_B$	$i_X>i_Z>i_Y$

在正常工况下,由于三相电流的高度对称性,三相瞬时电流排序切换具有严格的等时性,单个电流扇区理论驻留时间 T_N 定义为

$$T_N=\frac{T_e}{6}=\frac{10}{n\cdot p} \tag{6}$$

式中:T_e 为电周期;n 为机械转速;p 为极对数。

实际运行中,转速与负载的动态波动会导致扇区驻留时间发生偏移,采用固定理论值作为判据易引发误报。鉴于 DTP-PMSM 两套绕组共用磁路且固有的 30°相位差,当任一绕组运行至扇区中段时,对侧绕组恰好完成扇区切换。在机械惯性下,短时转速变化极小,本文直接提取对侧绕组最新完成的扇区宽度作为实时参考基准。该机制下对速度信息和电机参数的依赖较小,可有效提升变工况下的检测鲁棒性

两套绕组分别记为 $s\in\{1,2\}$。定义 $C_s(k)$ 为 k 采样时刻绕组 s 所处扇区的当前累计采样数;$W_s^{\mathrm{lat}}(k)$ 为该绕组最近一次完整走过的单扇区锁存宽度;$N_s(k)$ 为对应的扇区编号。

考虑到采样噪声在扇区边界易引起伪切换,引入扇区变化合法性校验机制。仅当同时满足式(7)所示条件时,扇区切换被认定为有效。

$$\begin{cases}|\,N_s(k)-N_s(k-1)\,|\in\{1,5\}\\ C_s(k)\geqslant\kappa_v W_{3-s}^{\mathrm{lat}}(k)\end{cases} \tag{7}$$

式中:$\kappa_v=0.3$ 为防抖系数。

若扇区切换有效,则更新 $W_s^{\mathrm{lat}}(k)=C_s(k)$,并令计数器 $C_s(k)=0$,重新累加。

构造有效驻留宽度 $W_s(k)$,将其定义为实时计数值与最近一次锁存值的极大值:

$$W_s(k)=\max\{C_s(k),W_s^{\mathrm{lat}}(k)\} \tag{8}$$

同时构造监测绕组宽度比指标 $\gamma(k)$:

$$\gamma(k)=\max\left\{\frac{W_1(k)}{W_2(k)},\frac{W_2(k)}{W_1(k)}\right\} \tag{9}$$

正常运行时,$C_s(k)$ 不会超过各自的锁存值 $W_s^{\mathrm{lat}}(k)$,此时式(9)中 $\gamma(k)$ 稳定在 1 附近。发生开路故障后,故障侧绕组扇区切换受阻,其编号停滞,导致 $C_s(k)$ 持续单调累加并迅速超过其历史锁存值。此时故障侧 $W_s(k)$ 等效为持续增加的 $C_s(k)$,而对侧健康绕组仍正常刷新保持常数。因此故障绕组对应的宽度比值持续增大,使 $\gamma(k)$ 超过报警阈值 γ_{th}。

由此建立故障报警判据:

$$\gamma(k)>\gamma_{\mathrm{th}} \tag{10}$$

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

结合试验统计结果，正常工况下 $\gamma(k)$ 小于 1.2，故障工况下 $\gamma(k)$ 快速超过 2。因此本文取 $\gamma_{th}=1.5$。当式(10)成立时，故障报警标志 FD 由 0 变为 1，同时将式(7)中最大值对应的绕组编号记为故障绕组 m。

为直观展示故障发生前后诊断指标的动态演化过程，本文在 Matlab/Simulink 中搭建 DTP-PMSM 矢量控制系统仿真模型。仿真中通过设置相应开关管开路模拟故障，并采集六相电流信号，用于计算扇区驻留宽度比诊断指标及半波超越点计数结果。仿真模型的主要参数如表 3 所示。

表 3　DTP-PMSM 仿真参数

Tab. 3　Simulation parameters of DTP-PMSM

参数名称	参数值
极对数	15
线电感/mH	1.2
额定转矩/(N·m)	4
额定直流母线电压/V	120
定子相电阻/mΩ	40.9
转动惯量/(kg·m^2)	0.016
永磁体磁链/Wb	0.021
额定转速/(r·min^{-1})	1 000

以 A 相上桥臂 T_1 开路为例，系统从故障发生到报警的完整过程如图 5 所示。故障发生后，绕组 1 的累计宽度 $W_1(k)$ 不再随扇区切换归零，而是持续累加；绕组 2 仍保持正常运行。$W_1(k)/W_2(k)$ 由 1 开始上升，经过半个扇区时间后突破 γ_{th}，FD 由 0 跳变为 1，同时锁定故障绕组 $m=1$。

2.2　开关管故障定位

在 2.1 节的报警机制触发并判定故障绕组 m 后，需进一步定位具体的开路开关管。由开关管开路故障机理可知，无论是上桥臂还是下桥臂开路，对应的半波电流都无法建立。因此，开关管定位可转化为对故障绕组三相电流正、负半波缺失状态的判断。

考虑到负载和转速变化会引起电流幅值波动，故本文不采用固定阈值，而是利用健康绕组扇区跳变时的电流交叉点构造自适应阈值。对于平衡三相电流，其时域解析表达式可统一表示为

$$i_r = I_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}x\right) \tag{11}$$

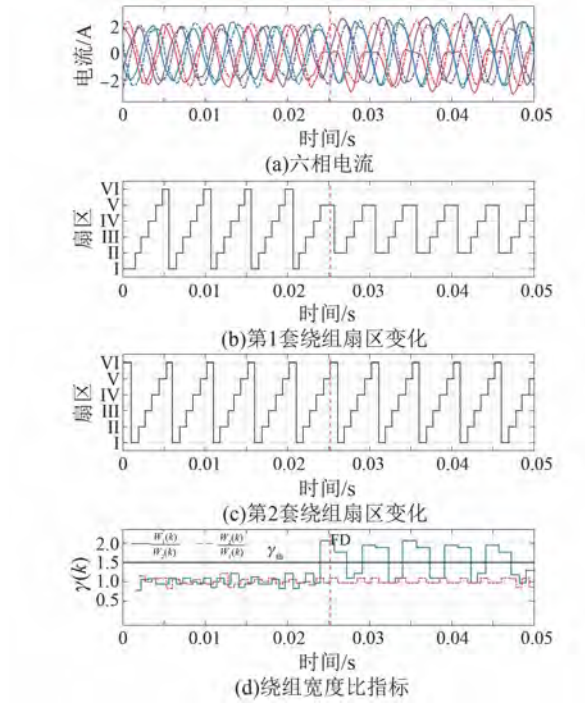


图 5　T_1 开路故障下诊断指标仿真结果

Fig. 5　Simulation results of the diagnostic indicator under T_1 open-circuit fault

式中：$r\in\{A, B, C\}$；$x\in\{0, 1, 2\}$ 为对应的相移系数；I_m 为基波电流幅值；θ 为电角度。

在电机正常运行期间，任意相邻两相电流 i_e、i_f 发生交叉时，满足 $i_e=i_f$。联立求解三相正弦函数交点，可得所有交叉点处的瞬时绝对值均满足：

$$i_e = i_f = I_m \sin 150° = \frac{I_m}{2}, e \neq f \tag{12}$$

因此在正常运行状态下，各扇区边界对应的电流交叉点幅值均等于当前工况下电流峰值的一半。

正常运行时，健康绕组每完成一次有效扇区切换，同步采样并锁存当前的电流交叉点幅值。取健康绕组 3−m 在报警时刻附近一个完整电流基波周期内的 6 个交叉点。根据交叉点电流方向将其分为正向交叉点集合 $\boldsymbol{P}$ 和负向交叉点集合 $\boldsymbol{G}$，并分别取其中位值 K_{up} 和 K_{low}：

$$K_{up} = \mathrm{med}(\boldsymbol{P}) \tag{13}$$

$$K_{low} = \mathrm{med}(\boldsymbol{G}) \tag{14}$$

式中：med(·)为中位数运算。

采用中位值可以削弱噪声、谐波和扇区边界抖动对单次采样值的影响。进一步构造自适应阈值：

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$I_{\mathrm{th}}=\frac{K_{\mathrm{up}}-K_{\mathrm{low}}}{2} \tag{15}$$

分别对故障绕组固定周期的三相电流的正半波与负半波进行超 I_{th} 的采样点计数。定义正向超越计数器 $C_{\mathrm{p},i}$ 与负向超越计数器 $C_{\mathrm{n},i}$ 如式(16)所示:

$$\begin{cases}C_{\mathrm{p},i}=\sum\limits_{k=k_{\mathrm{alm}}}^{k_{\mathrm{alm}}+N_{\mathrm{T}}}\mathbb{I}[i_i(k)>I_{\mathrm{th}}]\\ C_{\mathrm{n},i}=\sum\limits_{k=k_{\mathrm{alm}}}^{k_{\mathrm{alm}}+N_{\mathrm{T}}}\mathbb{I}[i_i(k)<-I_{\mathrm{th}}]\end{cases} \tag{16}$$

式中:i 为故障绕组对应的相序号(若 $m=1$,$i\in\{\mathrm{A},\mathrm{B},\mathrm{C}\}$;若 $m=2$,$i\in\{\mathrm{X},\mathrm{Y},\mathrm{Z}\}$);$k_{\mathrm{alm}}$ 为故障报警标志 FD 首次由 0 变为 1 时对应的采样序号;N_{T} 为健康绕组有效扇区切换 6 次的时间;$\mathbb{I}(\cdot)$ 为指示函数,条件成立时取 1,否则取 0。

采样计数完成后,对 $C_{\mathrm{p},i}$ 和 $C_{\mathrm{n},i}$ 进行统一分析。正常情况下,任一相电流在计数窗口内均应存在正、负半波,因此 $C_{\mathrm{p},i}$ 和 $C_{\mathrm{n},i}$ 均应大于零。当某相上桥臂开关管开路时,该相正半波电流被钳位在零点附近,对应 $C_{\mathrm{p},i}$ 接近零;当某相下桥臂开关管开路时,该相负半波电流被钳位在零点附近,对应 $C_{\mathrm{n},i}$ 接近零。由此得到定位判据:

$$\begin{cases}C_{\mathrm{p},i}\leqslant C_{\mathrm{th}}\Rightarrow\text{上桥臂开关管开路}\\ C_{\mathrm{n},i}\leqslant C_{\mathrm{th}}\Rightarrow\text{下桥臂开关管开路}\end{cases} \tag{17}$$

式中:C_{th} 为计数阈值,理想情况下取 $C_{\mathrm{th}}=0$,考虑采样噪声、死区效应和纹波时取 $C_{\mathrm{th}}=3$。

以第 1 套绕组 A 相上桥臂开关管 T_1 开路为例,故障诊断仿真结果如图 6 所示。锁定故障绕组 $m=1$ 后进入开关管定位。由于 A 相正向电流通路被阻断,导致在正半周期内难以正常建立。因此在计数窗口内,A 相电流超过正向阈值 $+I_{\mathrm{th}}$ 的采样点数明显减少,表现为 $C_{\mathrm{p,A}}=0$。采样完成后,对故障绕组三相电流的 6 个计数结果进行比较,仅有 $C_{\mathrm{p,A}}$ 满足低计数条件,则可判定第 1 套绕组 A 相上桥臂开关管发生开路故障。

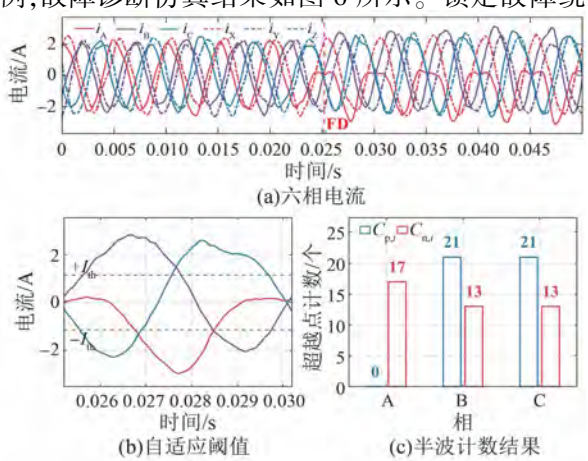


图 6 T_1 开路故障诊断仿真结果

Fig. 6 Simulation results of T_1 open-circuit fault diagnosis

3 试验验证

3.1 试验平台

以 36 槽 15 对极、相移 30° 的 Y 型 DTP-PMSM 为研究对象,其参数如表 4 所示。试验平台主要由 DTP-PMSM、六相电压型逆变器、直流电源、STM32F7 控制器、伺服加载电机、阻性负载、电流采集电路、增量式编码器以及 Smacq USB Series DAQ 数据采集卡及上位机组成,如图 7 所示。试验中直流电源为逆变器提供母线电压;控制器通过脉宽调制驱动逆变器向电机供电;伺服电机经整流器和阻性负载实现转矩加载;电流信号和转速位置信号分别由霍尔传感器和增量式编码器采集,用于控制及故障数据记录分析。

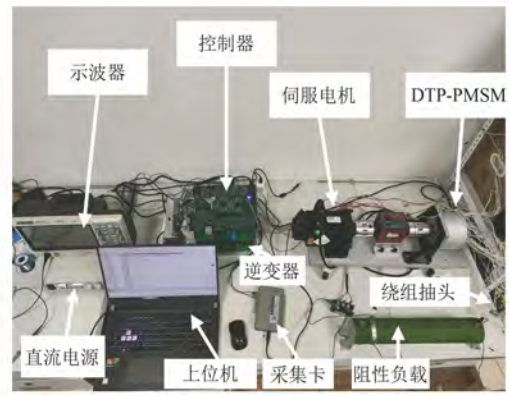


图 7 试验平台

Fig. 7 Experimental platform

3.2 稳定工况下故障诊断试验

设置 DTP-PMSM 在恒定转速和恒定负载下运行。试验中,直流母线电压设置为 60 V,负载转矩分别设置为 1 N·m、2 N·m 和3 N·m,电机转速可选取 300 r/min、400 r/min 或 500 r/min。待系统进入稳定运行状态后,切断指定开关管的驱动信号,模拟逆变器开关管开路故障,并记录故障发生前后的六相电流、$\gamma(k)$、自适应阈值、半波计数结果以及故障诊断输出。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

表 4　试验用 DTP-PMSM 参数

Tab. 4　Parameters of DTP-PMSM for experiment

参数名称	参数值
极对数	15
线电感/mH	1.2
额定转矩/(N·m)	4.1
额定直流母线电压/V	120
额定相电流/A	3
定子相电阻/mΩ	40.9
转动惯量/(kg·m^2)	0.016
额定输出功率/W	430
额定转速/(r·min^{-1})	1 000

3.2.1　单管开路故障

转速为 300 r/min、负载为 2 N·m 工况下 A 相上桥臂 T_1 开路诊断结果如图 8 所示。

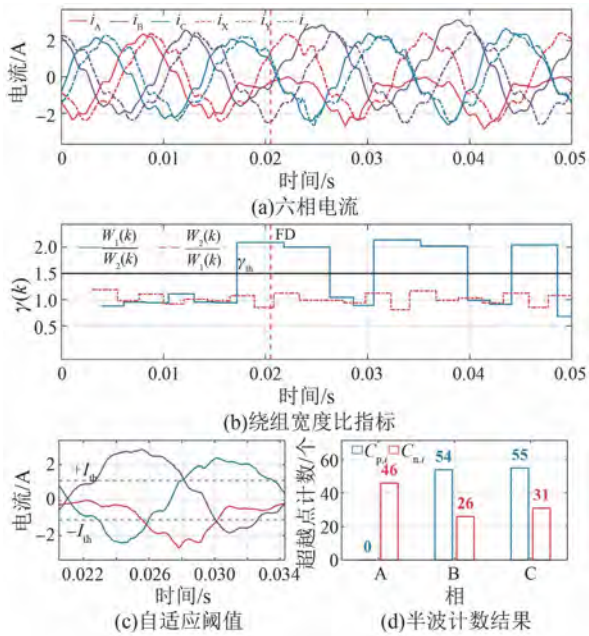


图 8　转速 300 r/min、负载 2 N·m 工况下 T_1 开路故障诊断试验结果

Fig. 8　Experimental results of T_1 open-circuit fault diagnosis under the working condition of 300 r/min speed and 2 N·m load

由图8可知，故障发生前，双三相系统运行正常，两套绕组均能正常完成扇区切换。0.018 s T_1 开路，A 相正半波电流被钳位，导致故障绕组 I、VI 扇区缺失，扇区驻留宽度增大，健康绕组仍保持正常切换，使 $\gamma(k)$ 迅速上升，超过 γ_{th} 报警阈值时，FD 由 0 变为 1，并依据宽度比值锁定故障绕组为第 1 套绕组。从故障发生到报警触发经历半个扇区驻留时间，表明所提方法具有较快的故障响应能力。

报警触发后利用健康绕组构造自适应阈值 I_{th}，并在诊断窗口内对故障绕组三相电流进行半波超越点计数。由于 A 相正半波电流缺失，无法触及 $+I_{th}$，导致 A 相正向超越点计数为 0，而其余相计数器均保持正常。对比各相计数结果，即可锁定故障开关管为 T_1。

转速为 300 r/min、负载为 3 N·m 和转速为 500 r/min、负载为 2 N·m 两种工况下的诊断结果分别如图9和图 10 所示。

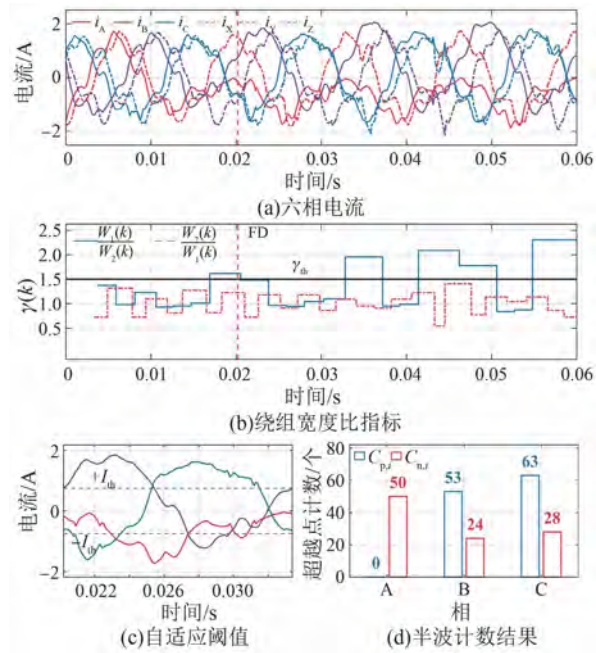


图 9　转速 300 r/min、负载 3 N·m 工况下 T_1 开路故障诊断试验结果

Fig. 9　Experimental results of T_1 open-circuit fault diagnosis under the working condition of 300 r/min speed and 3 N·m load

由图9和图 10 可知，故障发生前，两套绕组能正常完成扇区切换，$\gamma(k)<\gamma_{th}$。故障发生后，两种工况都显示出同样的诊断结果，即 $C_{p,A}=0$，满足低计数条件，其余计数值均在正常范围内，故可锁定 T_1 发生开路故障。可见，所提方法所有工况下均能稳定输出一致的诊断结果，验证了该方法在复杂工况下的有效性。

3.2.2　同桥臂双管开路故障

转速为 400 r/min、负载为 2 N·m 工况下 T_1T_4

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

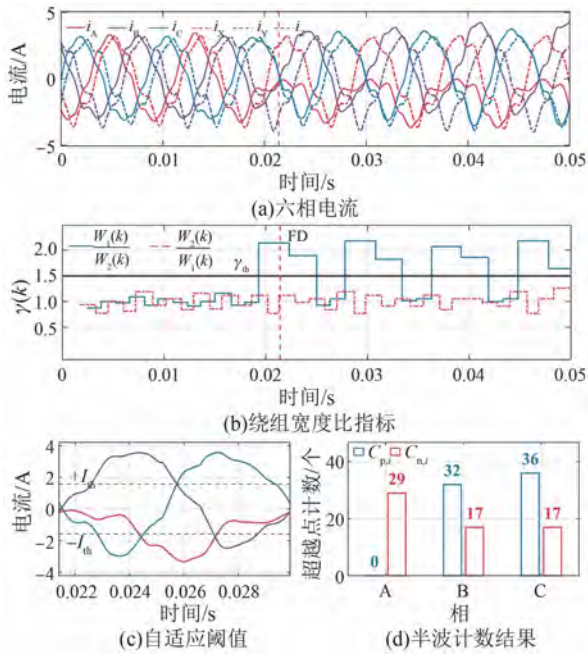


图10　转速 500 r/min、负载 2 N·m 工况下 T_1 开路故障诊断试验结果

Fig. 10　Experimental results of T_1 open-circuit fault diagnosis under the working condition of 500 r/min speed and 2 N·m load

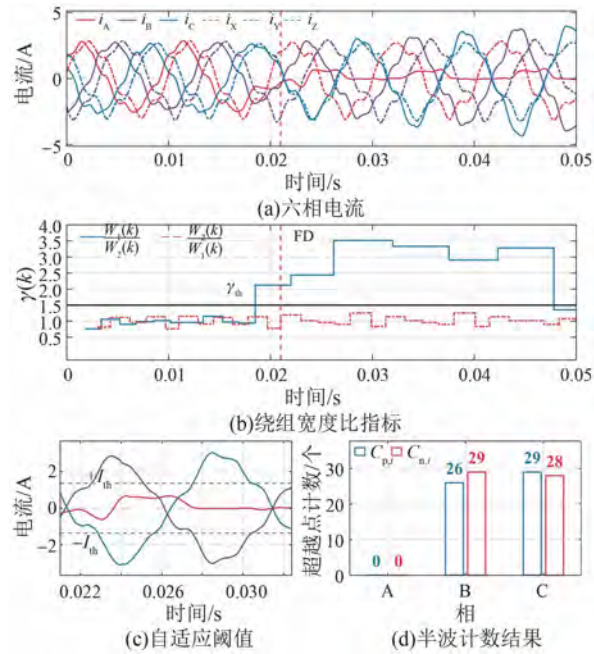


图 11　转速 400 r/min、负载 2 N·m 工况下 T_1T_4 开路故障诊断试验结果

Fig. 11　Experimental results of T_1T_4 open-circuit fault diagnosis under the working condition of 400 r/min speed and 2 N·m load

开路诊断结果如图 11 所示。

由图11 可知,故障发生前,两套绕组均能正常完成扇区切换,$\gamma(k)<\gamma_{th}$。故障发生后,A 相供电回路被阻断,桥臂与直流母线间的双向导通路径被完全切断,A 相电流无法建立,导致对应特征扇区缺失并引起扇区驻留时间异常增加。当驻留时间超过设定阈值时,系统触发故障报警,FD 由 0 跳变为 1。从故障发生到报警触发约经历半个扇区驻留时间。由于 A 相电流无法触及 $\pm I_{th}$,$C_{p,A}$、$C_{n,A}$ 同步归零,其余计数值维持在正常范围,故障锁定为 T_1T_4 同桥臂双管开路故障。

3.2.3　异相异侧双管开路故障

转速为 300 r/min、负载为 3 N·m 工况下 T_1T_6 同时开路的诊断结果如图 12 所示。

由图12 可知,故障发生前,两套绕组均能正常完成扇区切换,$\gamma(k)<\gamma_{th}$。故障发生后,A 相正向导通能力和 B 相负向导通能力同时丧失,导致对应特征扇区发生缺失或跳跃,严重破坏正常扇区切换序列,使故障绕组的扇区驻留时间显著增加。当驻留时间超过设定阈值时,系统迅速触发故障报警,FD 由 0 跳变为 1。从故障发生到报警触发小于 1 个扇区。A 相正半波与 B 相负半波瞬时值均无法触及 $\pm I_{th}$,$C_{p,A}$、$C_{n,B}$ 同步归零,故障锁定为 T_1T_6 异相异侧双管开路故障。

3.2.4　异相同侧双管开路故障

转速为 300 r/min、负载为 2 N·m 工况下第2套绕组 X 相下桥臂 T_{10} 与 Y 相下桥臂 T_{12} 同时开路的诊断结果如图 13 所示。

由图13 可知,故障发生前,两套绕组均能正常完成扇区切换,$\gamma(k)<\gamma_{th}$。故障发生后,T_{10}、T_{12} 开路直接阻断 X、Y 相的负半波电流通道。根据 KCL,X、Y 相电流无法为负,迫使 Z 相电流被强制钳位在负半周。尽管 T_{11} 健康,受 KCL 耦合作用,Z 相正半波仍受到明显抑制,在电流半波特征上呈现类似上桥臂开路的附加缺失特征。这种大范围的通路阻断会导致连续四个空间扇区发生有效矢量退化与缺失,系统被迫长时间驻留在仅存的健康扇区。当系统监测到该扇区驻留时间超过阈值时,触发故障报警,FD 由 0 跳变为 1。由于 X、Y 相的负半波与 Z 相的正半波严重缺失,导致其无法触及 $\pm I_{th}$,使得 $C_{n,X}=0$,$C_{n,Y}=0$,$C_{p,Z}=0$,故障锁定为 $T_{10}T_{12}$ 异相同侧双管开路故障。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

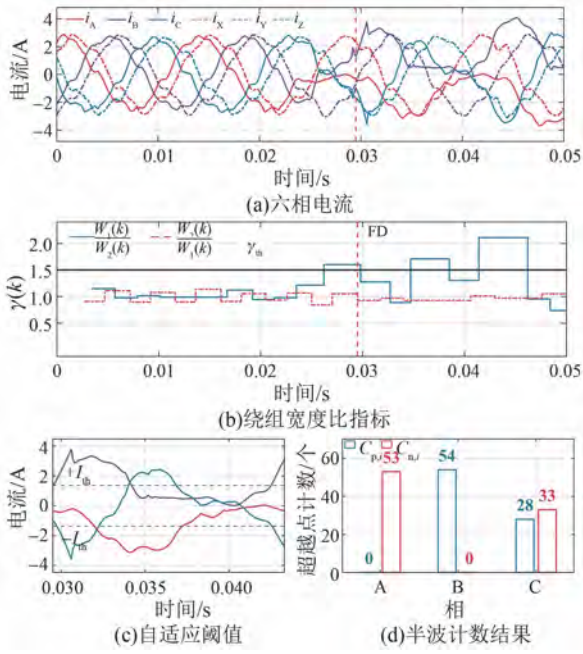


图 12　转速 300 r/min、负载 3 N·m 工况下 T_1T_6 开路故障诊断试验结果

Fig. 12　Experimental results of T_1T_6 open-circuit fault diagnosis under the working condition of 300 r/min speed and 3 N·m load

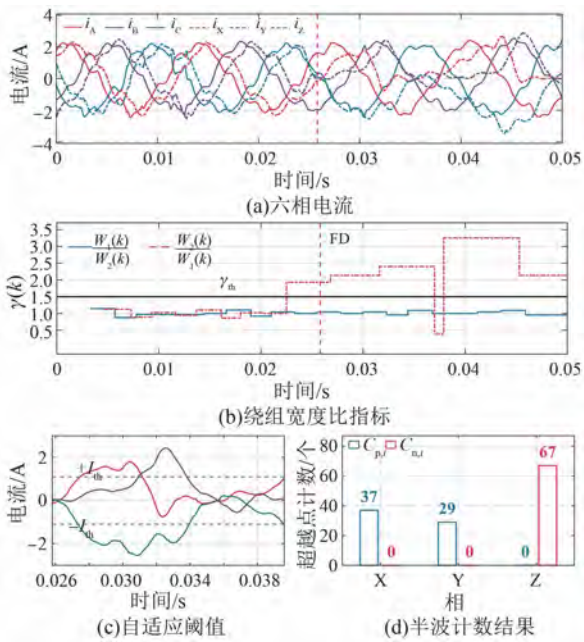


图 13　转速 300 r/min、负载 2 N·m 工况下 $T_{10}T_{12}$ 开路故障诊断试验结果

Fig. 13　Experimental results of $T_{10}T_{12}$ open-circuit fault diagnosis under the working condition of 300 r/min speed and 2 N·m load

3.3　动态扰动下的故障诊断试验

为验证所提方法在动态工况下的鲁棒性，在正常运行状态下施加转速变化扰动与负载突变扰动。设置负载转矩为 2 N·m，转速分别由 300 r/min 变化至 500 r/min、400 r/min 变化到 200 r/min 以模拟加减速过程；设置转速 300 r/min 保持不变，负载转矩分别由 2 N·m 突变至3 N·m、2 N·m 突变至 1 N·m 以模拟加减载过程。动态过程中的六相电流和综合指标变化情况分别如图 14 和 15 所示。

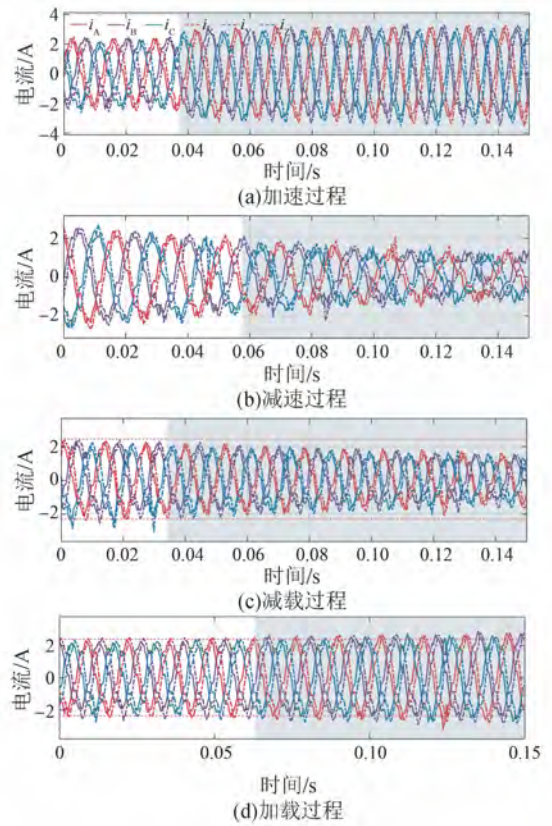


图 14　动态过程中的六相电流波形

Fig. 14　Six-phase current waveforms in dynamic process

由图 14 和图 15 可知，转速变化过程中，电流基波频率及扇区切换周期均随之发生改变，导致各扇区的实际驻留宽度产生动态波动。然而，由于所提方法利用另一套健康绕组实时提供参考宽度，并同步更新扇区驻留基准，因此能够自动跟踪转速变化带来的扇区宽度变化。试验结果表明，虽然两套绕组的电流频率发生明显变化，但诊断指标始终保持在正常范围内，FD 始终为 0，未出现误报警现象。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

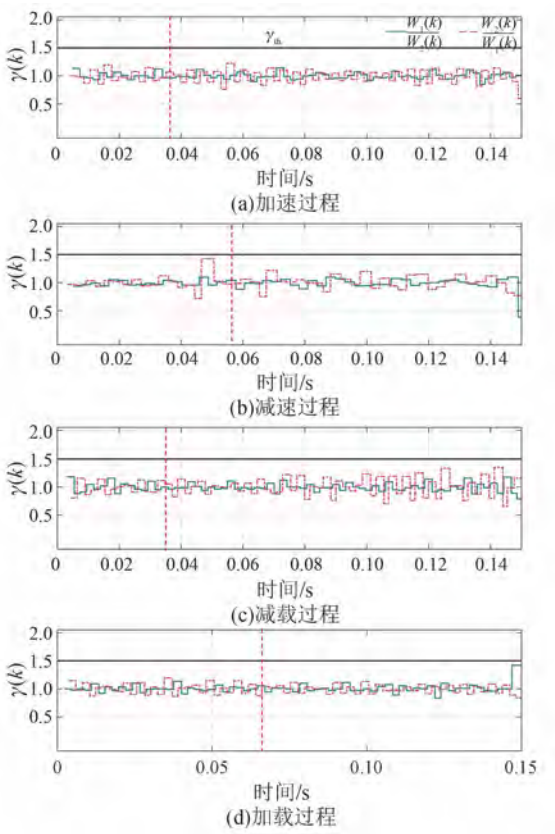


图 15　动态过程中诊断性能验证

Fig. 15　Verification of diagnosis performance in dynamic process

负载突变后,两套绕组相电流幅值均发生变化,但三相电流扇区仍按照正常顺序循环变化,未出现连续停留在某一扇区的现象,扇区停留计数始终低于故障报警阈值。因此,所提方法在负载突变瞬态也不会产生误报警。

综上,无论是转速突变还是负载突变,所提方法均能依靠双绕组对称结构构造的动态参考机制实现自适应调整,有效抑制运行工况变化对诊断结果的影响。验证了所提方法在动态工况下具有良好的抗干扰能力和鲁棒性。

4　结语

本文针对 DTP-PMSM 逆变器开路故障,提出了一种基于电流扇区特征的故障诊断方法。该方法利用两套绕组空间相移的物理对称性,通过构造扇区有效驻留宽度比作为报警变量,并利用动态电流交叉点实时提取自适应定位阈值,实现复杂工况下的故障诊断。试验结果表明,所提方法在多故障模式与动态工况下均展现出较好的鲁棒性,且具备较快的报警速度,系统从故障发生到触发报警仅需半个扇区时间。

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

祝欣怡参与了模型仿真、试验平台搭建、信号采集与处理、诊断算法编写和论文撰写,崔江参与了理论分析指导和论文审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Zhu Xinyi was responsible for model simulation, experimental platform construction, signal acquisition and processing, diagnosis algorithm programming, and manuscript writing. Cui Jiang provided guidance on theoretical analysis, as well as manuscript review and revision. All authors have read and approved the submission of the final manuscript.

参 考 文 献

[1] Frikha M A, Croonen J, Deepak K, et al. Multiphase motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends [J]. Energies, 2023, 16(2): 768.

[2] Wang Y N, Zhang C M, Zhang C Y, et al. Review of high-power-density and fault-tolerant design of propulsion motors for electric aircraft [J]. Energies, 2023, 16(19): 7015.

[3] 钱铁群, 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 of permanent magnet synchronous motor based on improved empirical wavelet transform [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52 (1): 12-21.

[4] Yan X Z, Ai S, Li C S, et al. Fault-tolerant control of dual three-phase PMSM based on minimum copper loss under multi-phase open and open-switch faults [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024, 19(5): 3163-3174.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[5] Geng Q，Du W H，Jin X F，et al. Online fault detection of open-circuit faults in a DTP-PMSM using double DQ current prediction [J]. World Electric Vehicle Journal，2024，15(5)：204.

[6] 吴锋.功率变换器功率器件开路故障诊断方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学，2017.
Wu F. Research on open-circuit fault diagnosis method for power devices of power converter [D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2017.

[7] Chen L，Chen M，Li B D，et al. Optimized fault-tolerant control of dual three-phase PMSM under open-switch faults [J]. Energies，2024，17(20)：5198.

[8] 阮磊，胡亚山，王吉平. 双三相永磁同步电机缺相故障特性分析[J]. 电机与控制应用，2025，52(9)：957-970.
Ruan L，Hu Y S，Wang J P. Fault characteristic analysis of dual three-phase permanent magnet synchronous motor with phase loss fault [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(9)：957-970.

[9] 金宁治，邢杰，王令，等. 基于非线性干扰观测器永磁同步电机逆变器扰动误差补偿的研究[J]. 电机与控制应用，2025，52(6)：608-622.
Jin N Z，Xing J，Wang L，et al. Research of inverter disturbance error compensation based on nonlinear disturbance observer for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52 (6)：608-622.

[10] Zhou X X，Sun J，Cui P L，et al. A fast and robust open-switch fault diagnosis method for variable-speed PMSM system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(3)：2598-2610.

[11] 卢伟国，何晴，白月，等. 多相 Buck 变换器功率器件复合开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报，2025，40(24)：8080-8092.
Lu W G，He Q，Bai Y，et al. Converter compound open circuit fault diagnosis method for power devices of multi-phase Buck converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40 (24)：8080-8092.

[12] Zhang Y C. Current behavior-based open-switch fault on-line diagnosis of inverters in PMSM drive systems [J]. Measurement，2022，202：111810.

[13] Li P，Xu X S，Yang S R，et al. Open circuit fault diagnosis strategy of PMSM drive system based on grey prediction theory for industrial robot [J]. Energy Reports，2023，9：313-320.

[14] Chu K S K，Chew K W，Chang Y C，et al. An open-circuit fault diagnosis system based on neural networks in the inverter of three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) [J]. World Electric Vehicle Journal，2024，15(2)：71.

[15] 孔凡文，毕贵红，赵四洪，等. 基于双模式分解多通道输入的 VSC-STATCOM 逆变器故障诊断模型[J]. 电机与控制应用，2024，51(7)：103-118.
Kong F W，Bi G H，Zhao S H，et al. Fault diagnosis model of VSC-STATCOM inverter based on dual-mode decomposition and multi-channel input [J]. Electric Machines & Control Application，2024，51(7)：103-118.

[16] An Q T，Li S，Sun L Z. Current residual vector-based open-switch fault diagnosis of inverters in PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2014，30(5)：2814-2827.

[17] Diao N Z，Zhang Y W，Sun X R，et al. A real-time open-circuit fault diagnosis method based on hybrid model flux observer for voltage source inverter fed sensorless vector controlled drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2022，38(2)：2539-2551.

[18] 李永恒，李志强，刘陵顺，等. 基于九开关变换器的对称六相永磁同步电机逆变器开路故障诊断[J]. 电机与控制应用，2026，53(4)：340-350.
Li Y H，Li Z Q，Liu L S，et al. Open-circuit fault diagnosis for symmetrical six-phase PMSM inverters based on nine-switch converters [J]. Electric Machines & Control Application，2026，53(4)：340-350.

[19] Wang B，Feng X B，Wang R X. Open-circuit fault diagnosis for permanent magnet synchronous motor drives based on voltage residual analysis [J]. Energies，2023，16(15)：5722.

[20] Jlassi I，Cardoso A J M. A single method for multiple IGBT，current，and speed sensor faults diagnosis in regenerative PMSM drives [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2019，8(3)：2583-2599.

[21] Estima J O，Cardoso A J M. A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-source inverters [J]. IEEE Transactions on Industry

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Applications, 2011, 47(6): 2487-2494.

[22] Freire N M A, Estima J O, Cardoso A J M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(9): 3957-3967.

[23] Tupe-Waghmare P, Ganvir N, Dhumale R B, et al. Open-circuit fault diagnosis in 3ϕ V/F-controlled VSIs under variable load conditions at different frequencies using Park's vector normalization and extreme gradient boosting [J]. Processes, 2025, 13(5): 1313.

[24] Yan H, Peg Y M, Shang W J, et al. Open-circuit fault diagnosis in voltage source inverter for motor drive by using deep neural network [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 120: 105866.

[25] Lu F L, Guo Q, Dou Z F, et al. A novel simultaneous diagnosis method for IGBT open-circuit faults and current sensor faults of three-phase SPWM inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(8): 11369-11379.

[26] Hang J, Sun X M, Ding S C, et al. Robust open-circuit fault diagnosis for PMSM drives using wavelet convolutional neural network with small samples of normalized current vector trajectory graph [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 7653-7663.

[27] Xia Y, Xu Y. A transferrable data-driven method for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 13478-13488.

[28] 王坎. 双三相永磁同步电机逆变器 IGBT 故障诊断与容错控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023.
Wang K. Research on IGBT fault diagnosis and fault-tolerant control of inverter for dual three-phase permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

收稿日期:2026-06-22
收到修改稿日期:2026-08-23

作者简介:

祝欣怡(2001—),女,硕士研究生,研究方向为电机故障诊断,zhuxyi@nuaa.edu.cn;

*通信作者:崔 江(1977—),男,博士,副教授,研究方向为电机故障诊断与检测,cuijiang@nuaa.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.