

# 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

李永恒<sup>1</sup>, 李志强<sup>2\*</sup>, 刘陵顺<sup>3</sup>, 闫红广<sup>3</sup>

(1. 92781 部队, 海南 三亚 572029; 2. 91388 部队, 广东 湛江 524000;  
3. 海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001)

## Open-Circuit Fault Diagnosis for Symmetrical Six-Phase PMSM Inverters Based on Nine-Switch Converters

LI Yongheng<sup>1</sup>, LI Zhiqiang<sup>2\*</sup>, LIU Lingshun<sup>3</sup>, YAN Hongguang<sup>3</sup>

(1. The 92781<sup>th</sup> Unit of People's Liberation Army, Sanya 572029, China;  
2. The 91388<sup>th</sup> Unit of People's Liberation Army, Zhanjiang 524000, China;  
3. Institute of Aviation Basic, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** [Objective] To improve the reliability of the symmetrical six-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system, this paper constructs a dynamic model based on a nine-switch converter and proposes an innovative open-circuit fault diagnosis method for the inverter. [Methods] Considering the dead-time effect of pulse width modulation, the logical mapping between the motor winding terminal-to-ground voltage and the switch state was defined. The dynamic correspondence between the phase voltage and the switch signal was established, and a unified logical model of the hybrid system was derived. Based on voltage hybrid logic operations, the voltage differences between standard and fault states were compared, and open-circuit faults were accurately located. [Results] The simulation results demonstrated that when an open-circuit fault occurred in the symmetrical six-phase PMSM inverter, the faulty switch could be accurately located through dynamic logic transformation and voltage difference analysis. [Conclusion] The proposed diagnostic method can effectively identify faults in a single switch or simultaneous open-circuit faults in two switches of the same bridge arm, demonstrating high accuracy and universality.

**Key words:** symmetrical six-phase permanent magnet synchronous motor; nine-switch converter; fault diagnosis; logical model

**摘要:**【目的】为了提高对称六相永磁同步电机(PMSM)驱动系统的可靠性,本文构建了基于九开关变换器的动态模型,并提出一种创新的逆变器开路故障诊断方法。【方法】在考虑开关管脉宽调制死区效应前提下,定义电机绕组端对地电压与开关管通断的逻辑映射,建立相电压-开关信号的动态对应关系,进而推导出混杂系统的统一逻辑模型。基于电压混合逻辑运算,对比标准与故障状态下的电压差异,实现开路故障的精准定位。【结果】仿真结果表明,对称六相PMSM逆变器发生开路故障时,通过动态逻辑变换与电压差值分析,可精准定位故障开关管。【结论】本文所提诊断方法可有效识别单一开关管或同一桥臂双开关管同时开路的故障,具有较高的准确性和普适性。

**关键词:** 对称六相永磁同步电机;九开关变换器;故障诊断;逻辑模型

## 0 引言

传统对称六相永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)需要十二开关变换器驱动。文献[1]首次将九开关变换器应用于双电机驱动系统,减轻系统的质量和体积。当某一开关变换器发生故障时,如果不能及时准确诊断出故障信息,对系统影响较大。

国内外研究学者围绕PMSM开路故障诊断方法展开大量研究<sup>[2-17]</sup>。文献[18]在生成对抗网络基础上,结合长短期记忆网络,提出一种新型故障

基金项目:国家自然科学基金(51377168)

National Natural Science Foundation of China (51377168)

诊断方法。该方法针对三相逆变器故障,搭建故障特征集,实现了对电机逆变器开路、短路等典型故障的高精度诊断。文献[19]在预测电流控制基础上,提出一种误差电流极性法。鉴于预测电流控制易受到扰动,该方法加入计数法后,能有效增强系统稳定性。文献[20]针对传统 PMSM 故障诊断无法溯源的问题,提出一种本体追踪诊断方法。该方法通过建立统一的异构信息,能有效扩大诊断范围。文献[21]在磁链观测器基础上,切换改进型相电压平均值故障诊断方法,有效提高诊断精确性。文献[22]提出一种混合开路故障诊断方法,通过将电流参考值与实际值产生的残差作为特征量,查表定位故障器件,有效消除内部参数变化对诊断结果的影响。文献[23]结合卷积神经网络,提出一种新型故障诊断方法。根据卷积和池化层的构造,选取相关参数,划分训练集和测试集,有效提高故障准确性。文献[24]将谐波平面和相角包含的故障特征作为基础,提出一种绕组开路故障诊断方法。文献[25]在五相 PMSM 电流变量和开关信号基础上,对电流状态进行估计,并给出剩余电流极性关系表。文献[26]针对单、双开关管故障,提出一种改进电流平均值算法,实现开关管准确定位。文献[27]以三相电流平均值与绝对值作为特征变量,提出一种逆变器快速诊断方法。

传统六相 PMSM 由双三相逆变器驱动,逆变器所需开关管数目较多,生产成本较大。九开关变换器可用于六相 PMSM,通过对中间三个开关管复用,减少 25% 的开关管数量,减轻系统体积和质量,有效节约成本。因此,将九开关变换器应用于对称六相 PMSM,并研究相应的逆变器故障诊断具有重要的理论和现实意义。目前国内对双三相逆变器开路故障研究较为深入,但对九开关变换器开路故障诊断研究较少。本文在考虑开关管脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)死区效应的前提下,定义电机绕组端对地电压与开关管通断之间的逻辑关系,建立电机相电压与九开关变换器开关管通断信号的对应关系,进而推导出基于九开关变换器的 PMSM 驱动系统逻辑动态模型,实现混杂系统连续时间变量与离散事件变量的统一。构建标准与故障两种状态下逆变器的电压混合逻辑运算模型,通过对两种状态下电压值进行比较,能够准确定位开关管开路故障。

## 1 九开关变换器拓扑结构

相比十二开关变换器,九开关变换器能够减轻系统质量和体积,如图 1 所示。

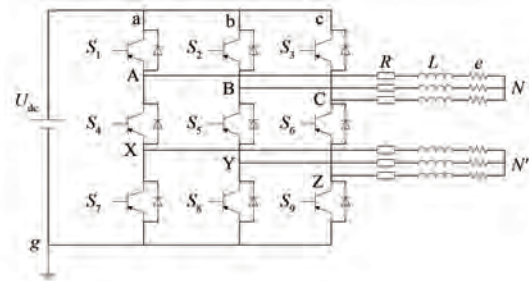


图 1 九开关变换器拓扑结构

Fig. 1 Topology of nine-switch converter

图 1 中,  $N, N'$  为电机中性点;  $g$  为接地;  $U_{dc}$  为直流侧母线电压;  $R$  为定子电阻;  $L, e$  为定子电感。九开关变换器每一桥臂理论上有 8 种开关方式,但只有 3 种有效开关方式。以 a 桥臂为例,其有效开关方式如表 1 所示。

表 1 九开关变换器 a 桥臂有效开关方式

Tab. 1 Effective switching modes of the a-bridge arm in the nine-switch converter

状态	$S_1$	$S_4$	$S_7$
1	1	1	0
2	1	0	1
3	0	1	1

## 2 电机逻辑动态模型构建

对称六相 PMSM 驱动系统拓扑结构如图 2 所示。

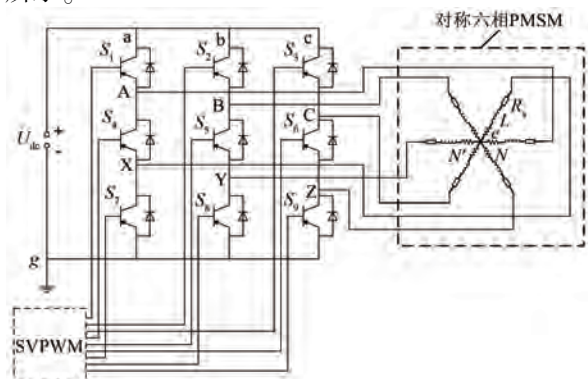


图 2 对称六相 PMSM 驱动系统拓扑结构

Fig. 2 Topology of symmetrical six-phase PMSM drive system

在工程实际中,九开关变换器因开关频率较高,需设置死区时间防止直流侧电压短路。定义电机电流流动方向为 $\eta$ ,电机电流从中性点流出至逆变器则 $\eta=0$ ,电机电流从逆变器流入中性点则 $\eta=1$ 。以a桥臂为例进行说明,在考虑死区时间的情况下,A相上、下开关管的通断以及A相绕组电流方向决定电压 $u_{Ag}$ 的大小。同理,求得电压 $u_{Xg}$ 的大小如表2所示。

表2 A相、X相绕组端对地电压

Tab. 2 A-phase, X-phase winding terminal-to-ground voltages

	$S_1$	$S_4$	$S_7$	$\eta_X$	$\eta_A$	$u_{Xg}$	$u_{Ag}$
1	1	0	1	×	×	0	$U_{dc}$
2	0	0	1	0	1	0	0
3	1	0	0	1	1	0	$U_{dc}$
4	1	0	0	0	0	$U_{dc}$	$U_{dc}$
5	0	1	0	1	0	0	$U_{dc}$
6	0	0	0	0	1	$U_{dc}$	0
7	0	0	1	1	1	0	0
8	0	0	1	0	0	0	$U_{dc}$
9	1	0	0	1	0	0	$U_{dc}$
10	0	1	0	0	1	$U_{dc}$	0
11	0	0	0	1	1	0	0
12	0	0	0	0	0	$U_{dc}$	$U_{dc}$
13	0	1	1	×	×	0	0
14	1	1	0	×	×	$U_{dc}$	$U_{dc}$
15	0	0	1	1	0	0	$U_{dc}$
16	1	0	0	0	1	$U_{dc}$	$U_{dc}$
17	0	1	0	1	1	0	0
18	0	1	0	0	0	$U_{dc}$	$U_{dc}$
19	0	0	0	1	0	0	$U_{dc}$

由表2可知,A相、B相、C相、X相、Y相和Z相的对地电压为

$$\begin{cases} u_{Ag} = U_{dc} \cdot \varepsilon_1 = U_{dc} \cdot \overline{S_4 S_7} (S_1 + \overline{S_1 \eta_A}) \\ u_{Bg} = U_{dc} \cdot \varepsilon_2 = U_{dc} \cdot \overline{S_5 S_8} (S_2 + \overline{S_2 \eta_B}) \\ u_{Cg} = U_{dc} \cdot \varepsilon_3 = U_{dc} \cdot \overline{S_6 S_9} (S_3 + \overline{S_3 \eta_C}) \\ u_{Xg} = U_{dc} \cdot \varepsilon_4 = U_{dc} \cdot \overline{S_7} (S_1 S_4 + \overline{S_1 S_4 \eta_X}) \\ u_{Yg} = U_{dc} \cdot \varepsilon_5 = U_{dc} \cdot \overline{S_8} (S_2 S_5 + \overline{S_2 S_5 \eta_Y}) \\ u_{Zg} = U_{dc} \cdot \varepsilon_6 = U_{dc} \cdot \overline{S_9} (S_3 S_6 + \overline{S_3 S_6 \eta_Z}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon$ 为系统离散输出量。

根据对称六相PMSM相电压与定子绕组接线端对地电压之间的关系,可得:

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \\ u_{XN'} \\ u_{YN'} \\ u_{ZN'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & 0 & \\ -1 & -1 & 2 & & & \\ & & & 2 & -1 & -1 \\ & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{S_4 S_7} (S_1 + \overline{S_1 \eta_A}) \\ \overline{S_5 S_8} (S_2 + \overline{S_2 \eta_B}) \\ \overline{S_6 S_9} (S_3 + \overline{S_3 \eta_C}) \\ \overline{S_7} (S_1 S_4 + \overline{S_1 S_4 \eta_X}) \\ \overline{S_8} (S_2 S_5 + \overline{S_2 S_5 \eta_Y}) \\ \overline{S_9} (S_3 S_6 + \overline{S_3 S_6 \eta_Z}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据空间解耦变换原则,列出对称六相PMSM矢量空间解耦变换表达式,如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \\ u_{XN'} \\ u_{YN'} \\ u_{ZN'} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{S_4 S_7} (S_1 + \overline{S_1 \eta_A}) \\ \overline{S_5 S_8} (S_2 + \overline{S_2 \eta_B}) \\ \overline{S_6 S_9} (S_3 + \overline{S_3 \eta_C}) \\ \overline{S_7} (S_1 S_4 + \overline{S_1 S_4 \eta_X}) \\ \overline{S_8} (S_2 S_5 + \overline{S_2 S_5 \eta_Y}) \\ \overline{S_9} (S_3 S_6 + \overline{S_3 S_6 \eta_Z}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{S_4 S_7 (S_1 + S_1 \eta_A)} \\ \overline{S_5 S_8 (S_2 + S_2 \eta_B)} \\ \overline{S_6 S_9 (S_3 + S_3 \eta_C)} \\ \overline{S_7 (S_1 S_4 + S_1 S_4 \eta_X)} \\ \overline{S_8 (S_2 S_5 + S_2 S_5 \eta_Y)} \\ \overline{S_9 (S_3 S_6 + S_3 S_6 \eta_Z)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

当开关管发生开路故障时,其输出电压发生变化,导致  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  产生畸变。由式(4)可知,开关管故障时,通过比较正常状态与故障状态下的  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ ,能够提取故障信息,迅速定位故障开关管。

### 3 逆变器开路故障诊断

定义开关管开路故障离散输出量为  $\varepsilon |_{s_x=0}$ ,以 a 桥臂开关管开路故障为例进行说明。

(a) 某一开关管开路故障

假定开关管  $S_1$  开路故障,定义离散输出量  $\varepsilon_1 |_{s_1=0}$ 、 $\varepsilon_4 |_{s_1=0}$  的数学表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 |_{s_1=0} = \overline{S_4 S_7 \eta_A} \\ \varepsilon_4 |_{s_1=0} = \overline{S_7 \eta_X} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(4)、(5),电压残差  $E_\alpha$ 、 $E_\beta$  分别为

$$\begin{cases} E_\alpha = \frac{1}{3} U_{dc} (\varepsilon_1 - \varepsilon_1 |_{s_1=0}) + \frac{1}{6} U_{dc} (\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{s_1=0}) = \\ \frac{1}{3} U_{dc} \cdot S_1 \overline{S_4 S_7 \eta_A} + \frac{1}{6} U_{dc} \cdot S_1 S_4 \overline{S_7 \eta_X} \\ E_\beta = \frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc} (\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{s_1=0}) = \\ \frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc} \cdot S_1 S_4 \overline{S_7 \eta_X} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,电压残差  $E_\alpha$  为  $0$ 、 $U_{dc}/6$ 、 $U_{dc}/3$  和  $U_{dc}/2$ ,电压残差  $E_\beta$  为  $0$ 、 $\sqrt{3}U_{dc}/6$ 。

假定开关管  $S_4$  开路故障,定义离散输出量  $\varepsilon_1 |_{s_4=0}$ 、 $\varepsilon_4 |_{s_4=0}$  的数学表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 |_{s_4=0} = \overline{S_1 + S_1 \eta_A} \\ \varepsilon_4 |_{s_4=0} = \overline{S_7 \eta_X} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(4)、(7),电压残差  $E_\alpha$ 、 $E_\beta$  分别为

$$\begin{cases} E_\alpha = \frac{1}{3} U_{dc} (\varepsilon_1 - \varepsilon_1 |_{s_4=0}) + \\ \frac{1}{6} U_{dc} (\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{s_4=0}) = \\ - \frac{1}{3} U_{dc} \cdot S_4 S_7 (S_1 + \overline{S_1 \eta_A}) + \frac{1}{6} U_{dc} \cdot S_1 S_4 \overline{S_7 \eta_X} \\ E_\beta = \frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc} (\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{s_4=0}) = \\ \frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc} \cdot S_1 S_4 \overline{S_7 \eta_X} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,无论如何取值,电压残差  $E_\alpha$  均不可能为  $-U_{dc}/6$ 。故电压残差  $E_\alpha$  为  $-U_{dc}/3$ 、 $0$ 、 $U_{dc}/6$ ,电压残差  $E_\beta$  为  $0$ 、 $\sqrt{3}U_{dc}/6$ 。

假定开关管  $S_7$  开路故障,定义离散输出量  $\varepsilon_1 |_{s_7=0}$ 、 $\varepsilon_4 |_{s_7=0}$  的数学表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 |_{s_7=0} = \overline{S_1 + S_1 \eta_A} \\ \varepsilon_4 |_{s_7=0} = \overline{S_1 S_4 + S_1 S_4 \eta_X} \end{cases} \quad (9)$$

根据式(4)、(9),电压残差  $E_\alpha$ 、 $E_\beta$  分别为

$$\begin{cases} E_\alpha = \frac{1}{3} U_{dc} (\varepsilon_1 - \varepsilon_1 |_{s_7=0}) + \\ \frac{1}{6} U_{dc} (\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{s_7=0}) = \\ - \frac{1}{3} U_{dc} \cdot S_4 S_7 (S_1 + \overline{S_1 \eta_A}) - \\ \frac{1}{6} U_{dc} \cdot S_7 (S_1 S_4 + \overline{S_1 S_4 \eta_X}) \\ E_\beta = \frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc} (\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{s_7=0}) = \\ - \frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc} \cdot S_7 (S_1 S_4 + \overline{S_1 S_4 \eta_X}) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,电压残差  $E_\alpha$  为  $-U_{dc}/2$ 、 $-U_{dc}/3$ 、 $-U_{dc}/6$  和  $0$ ,电压残差  $E_\beta$  为  $-\sqrt{3}U_{dc}/6$ 、 $0$ 。

同理,a 桥臂  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_8$  和  $S_9$  开关管故障后的电压残差如表 3 所示。

(b) 同一桥臂两开关管同时开路故障

假定开关管  $S_1$ 、 $S_4$  开路故障,定义离散输出量  $\varepsilon_1 |_{s_1 s_4=0}$ 、 $\varepsilon_4 |_{s_1 s_4=0}$  的数学表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 |_{s_1 s_4=0} = \overline{\eta_A} \\ \varepsilon_4 |_{s_1 s_4=0} = \overline{S_7 \eta_X} \end{cases} \quad (11)$$

表3  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$  和  $S_9$  开关管开路故障后的电压残差

Tab.3 Voltage residuals of  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$  and  $S_9$  switch tubes after open circuit faults

故障	$E_\alpha$	$E_\beta$
$S_1$	$0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}, \frac{1}{2}U_{dc}$	$0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_2$	$-\frac{1}{2}U_{dc}, -\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0$	$0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_3$	$-\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}, -\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0$
$S_4$	$-\frac{1}{3}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_5$	$-\frac{1}{3}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0$
$S_6$	$0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_7$	$-\frac{1}{2}U_{dc}, -\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0$
$S_8$	$0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}, \frac{1}{2}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0$
$S_9$	$-\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, \frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$

根据式(4)、(11),电压残差  $E_\alpha, E_\beta$  分别为

$$\left\{ \begin{aligned} E_\alpha &= \frac{1}{3}U_{dc}(\varepsilon_1 - \varepsilon_1 |_{S_1S_4=0}) + \\ &\frac{1}{6}U_{dc}(\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{S_1S_4=0}) = \\ &\frac{1}{3}U_{dc} \cdot [\overline{S_4S_7}(S_1 + \overline{S_1}\eta_A) - \overline{\eta_A}] + \\ &\frac{1}{6}U_{dc} \cdot S_1S_4\overline{S_7}\eta_X \\ E_\beta &= \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}(\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{S_1S_4=0}) = \\ &\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc} \cdot S_1S_4\overline{S_7}\eta_X \end{aligned} \right. \quad (12)$$

由式(12)可知,当  $S_1$  取1、 $S_4$  取1、 $S_7$  取0、 $\eta_X$  取1时,电压残差  $E_\alpha$  为

$$E_\alpha = \frac{1}{3}U_{dc} \cdot (1 - \overline{\eta_A}) + \frac{1}{6}U_{dc} \quad (13)$$

由式(13)可知,无论如何取值,电压残差  $E_\alpha$

均不可能为  $-U_{dc}/6$ 。故电压残差  $E_\alpha$  为  $-U_{dc}/3, 0, U_{dc}/6, U_{dc}/3$  和  $U_{dc}/2$ , 电压残差  $E_\beta$  为  $0, \sqrt{3}U_{dc}/6$ 。

假定开关管  $S_1, S_7$  开路故障,定义离散输出量  $\varepsilon_1 |_{S_1S_7=0}, \varepsilon_4 |_{S_1S_7=0}$  的数学表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_1 |_{S_1S_7=0} &= \overline{\eta_A} \\ \varepsilon_4 |_{S_1S_7=0} &= \overline{\eta_X} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

根据式(4)、(14),电压残差  $E_\alpha, E_\beta$  分别为

$$\left\{ \begin{aligned} E_\alpha &= \frac{1}{3}U_{dc}(\varepsilon_1 - \varepsilon_1 |_{S_1S_7=0}) + \\ &\frac{1}{6}U_{dc}(\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{S_1S_7=0}) = \\ &\frac{1}{3}U_{dc} \cdot [\overline{S_4S_7}(S_1 + \overline{S_1}\eta_A) - \overline{\eta_A}] + \\ &\frac{1}{6}U_{dc} \cdot [\overline{S_7}(S_1S_4 + \overline{S_1}S_4\eta_X) - \overline{\eta_X}] \\ E_\beta &= \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}(\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{S_1S_7=0}) = \\ &\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc} \cdot [\overline{S_7}(S_1S_4 + \overline{S_1}S_4\eta_X) - \overline{\eta_X}] \end{aligned} \right. \quad (15)$$

由式(15)可知,电压残差  $E_\alpha$  为  $-U_{dc}/2, -U_{dc}/3, -U_{dc}/6, 0, U_{dc}/6, U_{dc}/3$  和  $U_{dc}/2$ , 电压残差  $E_\beta$  为  $-\sqrt{3}U_{dc}/6, 0, \sqrt{3}U_{dc}/6$ 。

假定开关管  $S_4, S_7$  开路故障,定义离散输出量  $\varepsilon_1 |_{S_4S_7=0}, \varepsilon_4 |_{S_4S_7=0}$  的数学表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_1 |_{S_4S_7=0} &= S_1 + \overline{S_1}\eta_A \\ \varepsilon_4 |_{S_4S_7=0} &= \overline{\eta_X} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

根据式(4)、(16),电压残差  $E_\alpha, E_\beta$  分别为

$$\left\{ \begin{aligned} E_\alpha &= \frac{1}{3}U_{dc}(\varepsilon_1 - \varepsilon_1 |_{S_4S_7=0}) + \\ &\frac{1}{6}U_{dc}(\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{S_4S_7=0}) = \\ &-\frac{1}{3}U_{dc} \cdot S_4S_7(S_1 + \overline{S_1}\eta_A) + \\ &\frac{1}{6}U_{dc} \cdot [\overline{S_7}(S_1S_4 + \overline{S_1}S_4\eta_X) - \overline{\eta_X}] \\ E_\beta &= \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}(\varepsilon_4 - \varepsilon_4 |_{S_4S_7=0}) = \\ &\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc} \cdot [\overline{S_7}(S_1S_4 + \overline{S_1}S_4\eta_X) - \overline{\eta_X}] \end{aligned} \right. \quad (17)$$

由式(17)可知,电压残差  $E_\alpha$  为  $-U_{dc}/2,$

$-U_{dc}/3$ 、 $-U_{dc}/6$ 、 $0$  和  $U_{dc}/6$ , 电压残差  $E_\beta$  为  $-\sqrt{3}U_{dc}/6$ 、 $0$ 、 $\sqrt{3}U_{dc}/6$ 。

同理, a 桥臂  $S_2S_5$ 、 $S_2S_8$ 、 $S_5S_8$ 、 $S_3S_6$ 、 $S_3S_9$  和  $S_6S_9$  开关管故障后的电压残差如表 4 所示。

表 4  $S_1S_4$ 、 $S_1S_7$ 、 $S_4S_7$ 、 $S_2S_5$ 、 $S_2S_8$ 、 $S_5S_8$ 、 $S_3S_6$ 、 $S_3S_9$  和  $S_6S_9$  开关管故障后的电压残差

Tab. 4 Voltage residuals of  $S_1S_4$ 、 $S_1S_7$ 、 $S_4S_7$ 、 $S_2S_5$ 、 $S_2S_8$ 、 $S_5S_8$ 、 $S_3S_6$ 、 $S_3S_9$  and  $S_6S_9$  switch tubes after faults

故障	$E_\alpha$	$E_\beta$
$S_1S_4$	$-\frac{1}{3}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}, \frac{1}{2}U_{dc}$	$0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_1S_7$	$-\frac{1}{2}U_{dc}, -\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}, \frac{1}{2}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_4S_7$	$-\frac{1}{2}U_{dc}, -\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_2S_5$	$-\frac{1}{2}U_{dc}, -\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_2S_8$	$-\frac{1}{2}U_{dc}, -\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}, \frac{1}{2}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_5S_8$	$-\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}, \frac{1}{2}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0$
$S_3S_6$	$-\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}, -\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}$
$S_3S_9$	$-\frac{1}{3}U_{dc}, -\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}, -\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, \frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$
$S_6S_9$	$-\frac{1}{6}U_{dc}, 0, \frac{1}{6}U_{dc}, \frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, 0, \frac{\sqrt{3}}{6}U_{dc}, \frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$

由表 3、4 可知, 在某一开关管或者同一桥臂两开关管同时发生开路故障时, 在得知电压残差波形后, 通过查表方式即可判断故障开关管。但由表 4 可知, 开关管  $S_4$ 、 $S_7$  同时开路故障与开关管  $S_2$ 、 $S_5$  同时开路故障, 开关管  $S_1$ 、 $S_7$  同时开路故障与开关管  $S_2$ 、 $S_8$  同时开路故障, 这两种情况电压残差相同。故当提取到这两种情况的故障信息时, 可通过在线电流波形特征定位故障桥臂, 进而明确该桥臂的故障开关管。

## 4 仿真结果分析

基于 Matlab/Simulink 平台, 搭建基于九开关变换器对称六相 PMSM 的仿真模型, 如图 3 所示。图中,  $\omega_m$  为机械角速度;  $\omega_m^*$  为参考机械角速度;  $\theta$  为角度。

对称六相 PMSM 参数设置为: 主电感二次谐波幅值  $L_{rs} = 0.46$  mH, 主电感平均值  $L_{sm} =$

1.17 mH, 定子电阻  $R_s = 1$   $\Omega$ , 定子漏感  $L_s = 0.83$  mH, 转子磁链  $\psi_f = 0.1$  Wb, 转动惯量  $J = 0.02$  g·m<sup>2</sup>, 极对数  $p = 2$ , 负载转矩  $T_L = 1$  N·m 以及直流侧母线电压  $U_{dc} = 300$  V。

假设开关管  $S_1$  开路故障,  $S_1$  在 0.5 s 发生开路故障时的电机电流波形如图 4 所示, 实际输出电压  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  波形分别如图 5、6 所示, 电压残差波形如图 7 所示。

由图 4~7 可知, 当开关管  $S_1$  开路故障时, 电流、电压波动较大, 但通过图形观察可确定具体数值。通过比较可知, 电压残差  $E_\alpha$  取值 0、50、100、150, 电压残差  $E_\beta$  取值 0、86.6, 符合开关管  $S_1$  开路故障时的电压残差取值。

假设开关管  $S_3$ 、 $S_6$  开路故障, 开关管  $S_3$ 、 $S_6$  在 0.5 s 发生开路故障时的电机电流波形如图 8 所示, 实际输出电压  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  波形分别如图 9、10 所示, 电压残差波形如图 11 所示。

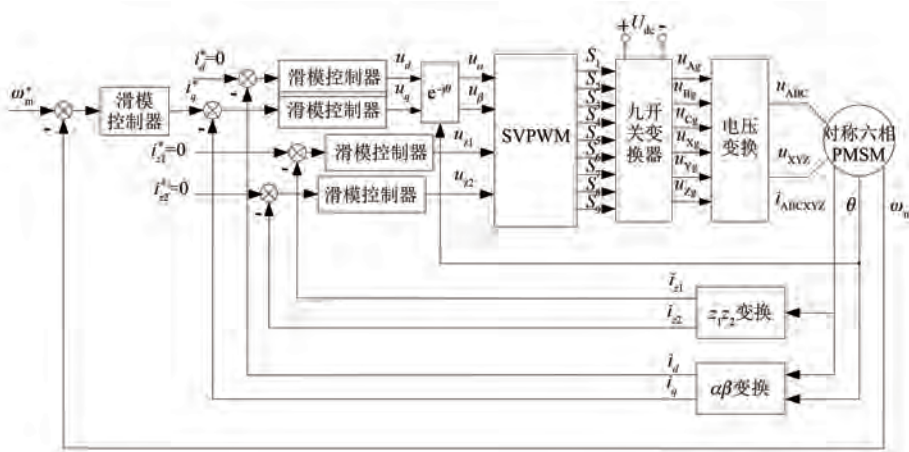


图3 对称六相 PMSM 控制系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of symmetrical six-phase PMSM control system

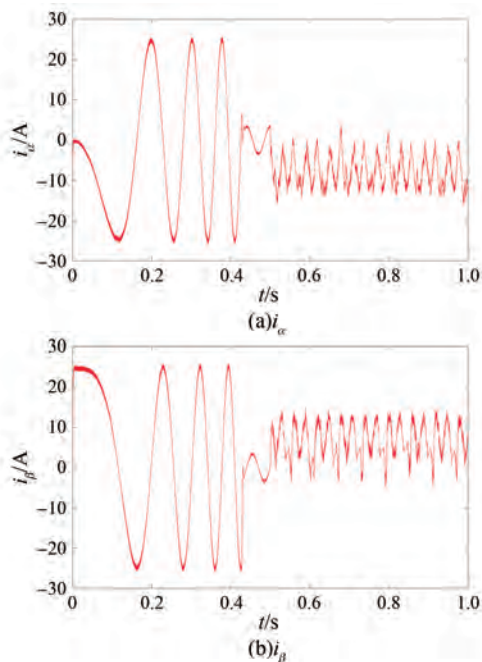


图4 开关管  $S_1$  在 0.5 s 发生开路故障时的电流波形

Fig. 4 Current waveforms with switch tube  $S_1$  open circuit fault when the time is 0.5 s

由图 8~11 可知,当开关管  $S_3$ 、 $S_6$  开路故障时,电流、电压出现较大波动,但通过图形观察可确定具体数值。通过比较可以看出,  $E_\alpha$  取值 -50、0、50,  $E_\beta$  取值 -173.2、-86.6、0、86.6,符合开关管  $S_3$ 、 $S_6$  开路故障时的电压残差取值。

## 5 结语

本文构建了基于九开关变换器的对称六相

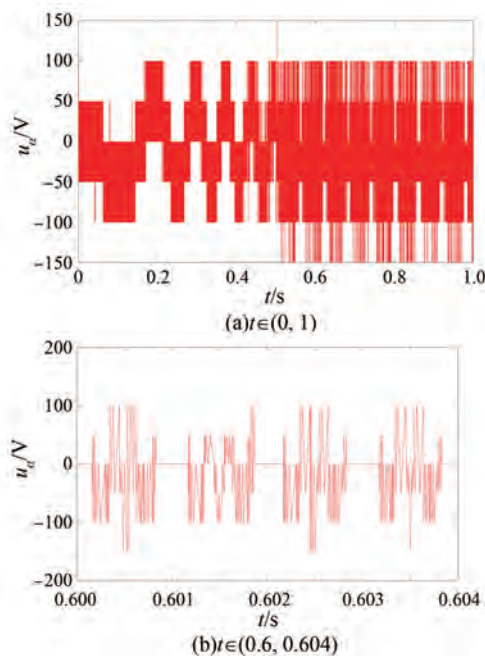


图5 开关管  $S_1$  在 0.5 s 发生开路故障时的电压波形  $u_\alpha$

Fig. 5 Voltage waveforms  $u_\alpha$  with switch tube  $S_1$  open circuit fault when the time is 0.5 s

PMSM 动态模型,并提出一种针对开关管开路故障的精准诊断方法。通过建立标准与故障状态下的电压混合逻辑运算模型,并对比两者的电压值差异,实现了故障的快速定位。仿真结果验证了该方法的有效性,为高可靠性电机驱动系统提供了理论支持。

## 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

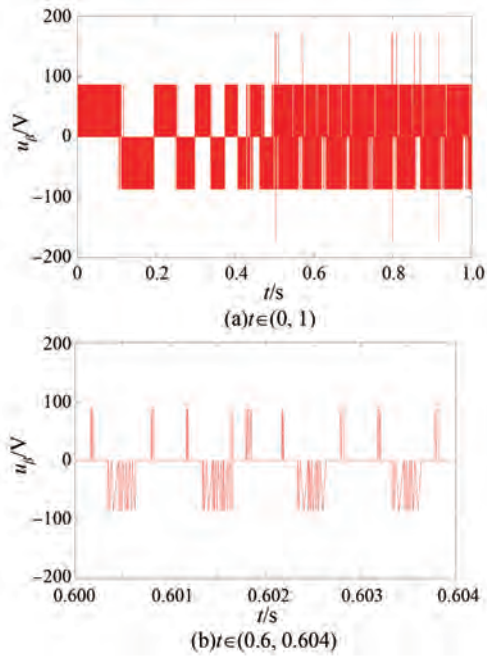


图 6 开关管  $S_1$  在 0.5 s 发生开路故障时的电压波形  $u_\beta$

Fig. 6 Voltage waveforms  $u_\beta$  with switch tube  $S_1$  open circuit fault when the time is 0.5 s

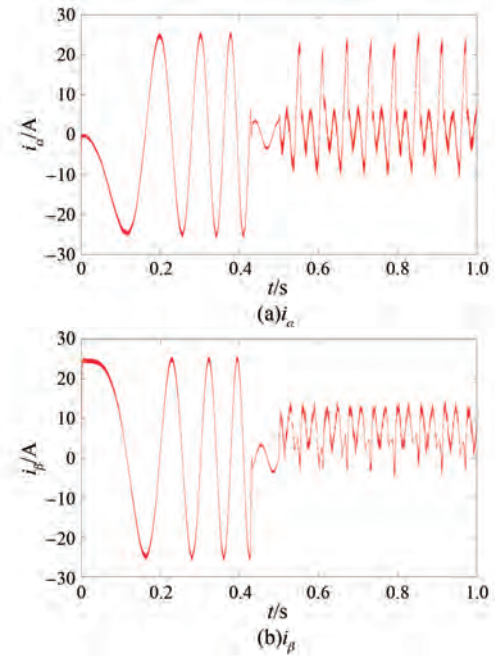


图 8 开关管  $S_3$ 、 $S_6$  在 0.5 s 发生开路故障时的电流波形

Fig. 8 Current waveforms with switch tube  $S_3$ 、 $S_6$  open circuit fault when the time is 0.5 s

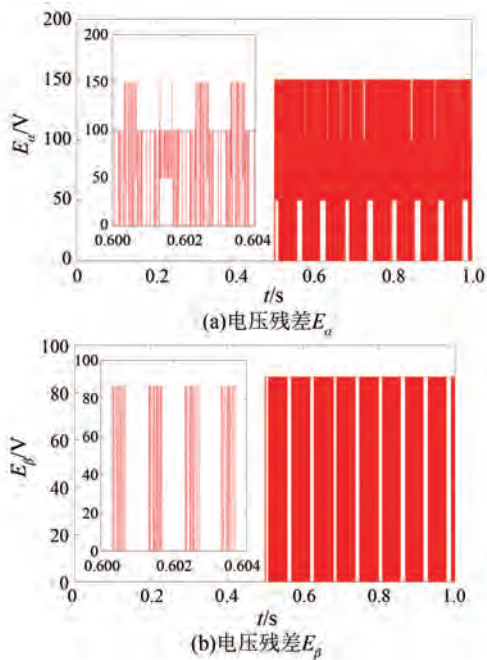


图 7 开关管  $S_1$  在 0.5 s 发生开路故障时的电压残差波形

Fig. 7 Voltage residual waveforms with switch tube  $S_1$  open circuit fault when the time is 0.5 s

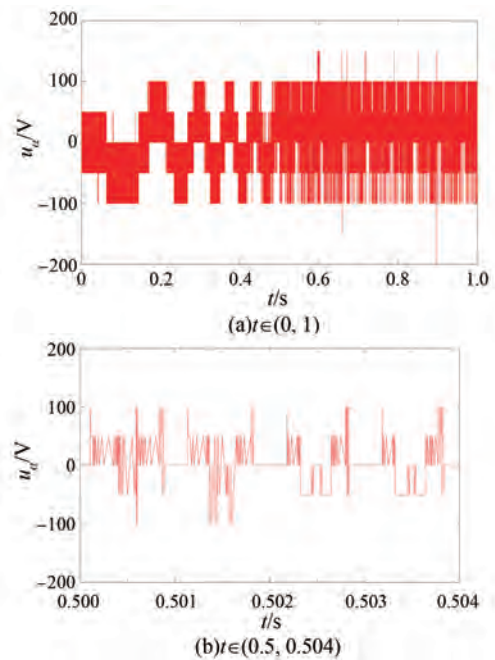


图 9 开关管  $S_3$ 、 $S_6$  在 0.5 s 发生开路故障时的电压波形  $u_\alpha$

Fig. 9 Voltage waveforms  $u_\alpha$  with switch tubes  $S_3$ 、 $S_6$  open circuit fault when the time is 0.5 s

All authors disclose no relevant conflict of interests.

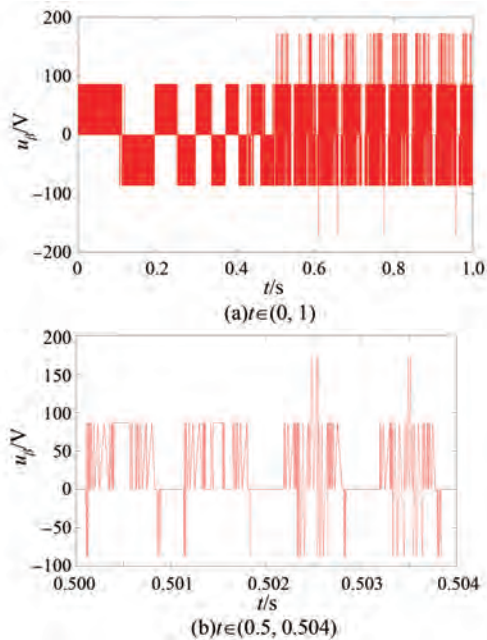


图 10 开关管  $S_3$ 、 $S_6$  在 0.5 s 发生开路故障时的电压波形  $u_\beta$

Fig. 10 Voltage waveforms  $u_\beta$  with switch tubes  $S_3$ 、 $S_6$  open circuit fault when the time is 0.5 s

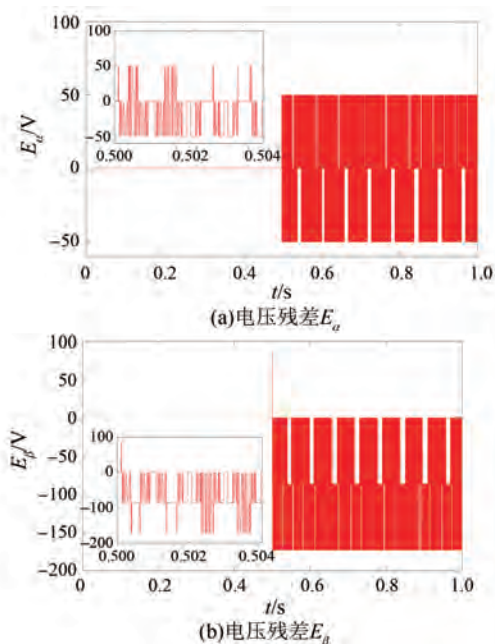


图 11 开关管  $S_3$ 、 $S_6$  在 0.5 s 发生开路故障时的电压残差波形

Fig. 11 Voltage residual waveforms with switch tubes  $S_3$ 、 $S_6$  open circuit fault when the time is 0.5 s

#### 作者贡献

李永恒进行了方案设计、内容总结与论文撰

写,李志强、刘陵顺进行了仿真研究,闫红广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, content summary and paper writing were carried out by Li Yongheng. The simulation was conducted by Li Zhiqiang and Liu Lingshun. The manuscript was revised by Yan Hongguang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

#### 参考文献

- [ 1 ] Kominami T, Fujimoto Y. A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads [ C ]// 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, New Orleans, LA, USA, 2007: 2346-2350.
- [ 2 ] 熊勇虎,姚维,许海波. 基于电网侧电流的 PMSM 电气故障诊断[J]. 微特电机, 2024, 52(12): 59-64.
- Xiong Y H, Yao W, Xu H B. Electrical fault diagnosis of PMSM based on grid side current [ J ]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52 ( 12 ): 59-64.
- [ 3 ] 闫国华,胡以怀. 基于多尺度 CNN 和 BiLSTM 的船舶推进永磁同步电机故障诊断[J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(4): 83-91+116.
- Yan G H, Hu Y H. Fault diagnosis of permanent magnet synchronous motors for ship propulsion based on multi-scale CNN and BiLSTM [ J ]. Journal of Shanghai Maritime University, 2024, 45(4): 83-91+116.
- [ 4 ] 丁伟,宋俊材,陆思良,等. 基于多通道信号二维递归融合和 ECA-ConvNeXt 的永磁同步电机高阻接触故障诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6397-6408.
- Ding W, Song J C, Lu S L, et al. High-resistance connection fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor based on two-dimensional recursive fusion of multi-channel signals and ECA-ConvNeXt [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 ( 20 ): 6397-6408.
- [ 5 ] 徐政,张建忠,姜永将,等. 基于高频信号注入的永磁同步电机局部退磁故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3205-3214.

- Xu Z, Zhang J Z, Jiang Y J, et al. Detection of local demagnetization in permanent magnet synchronous machine based on high frequency signal injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3205-3214.
- [ 6 ] 龙玉江, 王杰峰, 钱俊凤, 等. 基于数字孪生的永磁同步电机故障诊断技术研究[J]. 微特电机, 2024, 52(2): 74-78.
- Long Y J, Wang J F, Qian J F, et al. Research on fault diagnosis technology of permanent magnet synchronous motor based on digital twinning [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(2): 74-78.
- [ 7 ] 葛晨, 戴必翔, 王闰羿, 等. 基于信号注入法的 Prius 永磁同步电机退磁故障诊断[J]. 电工技术, 2024(1): 52-54.
- Ge C, Dai B X, Wang R Y, et al. Signal injection-based diagnosis of demagnetization faults of Prius permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Engineering, 2024(1): 52-54.
- [ 8 ] 闫国华, 胡以怀. 以信号图像表示的基于 CNN 的永磁同步电机故障诊断方法[J]. 船舶工程, 2025, 47(1): 114-123.
- Yan G H, Hu Y H. CNN-based permanent magnet synchronous motor fault diagnosis method with signal image representation [J]. Ship Engineering, 2025, 47(1): 114-123.
- [ 9 ] 宋君健, 徐文婧, 高宏洋, 等. 永磁同步电机定子匝间短路故障诊断技术研究[J]. 微特电机, 2025, 53(11): 31-35+54.
- Song J J, Xu W J, Gao H Y, et al. Research on stator turn-to-turn short circuit fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(11): 31-35+54.
- [ 10 ] 马建, 王建平, 孟德安, 等. 永磁同步电机故障诊断方法研究综述[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 104-115.
- Ma J, Wang J P, Meng D A, et al. Review of fault diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 104-115.
- [ 11 ] 毛念玲, 陈辉. 改进 2D-CNN 的永磁同步电机故障诊断分析[J]. 兰州工业学院学报, 2024, 31(2): 7-12.
- Mao N L, Chen H. Improved 2D-CNN based fault diagnosis method for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2024, 31(2): 7-12.
- [ 12 ] 李富松, 赵海宾, 胡瑞雪, 等. 基于 CNN-Former 的电动汽车永磁同步电机故障诊断[J]. 机床与液压, 2025, 53(10): 130-138.
- Li F S, Zhao H B, Hu R X, et al. Fault diagnosis of electric vehicles permanent magnet synchronous motors based on CNN-Former [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(10): 130-138.
- [ 13 ] 邱建琪, 沈佳晨, 史涔激, 等. 基于残差卷积网络的多传感器融合永磁同步电机故障诊断[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(7): 24-33+42.
- Qiu J Q, Shen J C, Shi C W, et al. Fault diagnosis of multi-sensor fusion permanent magnet synchronous motor based on residual convolutional neural network [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(7): 24-33+42.
- [ 14 ] 乔维德. 电动汽车永磁同步电机 BP 神经网络故障诊断模型研究[J]. 石家庄学院学报, 2024, 26(6): 50-55.
- Qiao W D. Research of fault diagnosis model for electric vehicle permanent magnet synchronous motor on BP neural network [J]. Journal of Shijiazhuang University, 2024, 26(6): 50-55.
- [ 15 ] 宋开元, 辛现伟. 多信号特征融合机制的永磁同步电机故障诊断方法[J]. 现代制造工程, 2025(10): 127-137+158.
- Song K Y, Xin X W. Fault diagnosis method for permanent magnet synchronous motor based on multi-signal feature fusion mechanism [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2025(10): 127-137+158.
- [ 16 ] 赵金涛, 郭凯凯, 高雄, 等. 基于电流矢量分析的 PMSM 系统开路故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 64-73.
- Zhao J T, Guo K K, Gao X, et al. Open-circuit fault diagnosis method for PMSM systems based on current vector analysis [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 64-73.
- [ 17 ] 张鹏, 赵国新, 崔效源, 等. 匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流影响分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 78-87.
- Zhang P, Zhao G X, Cui X Y, et al. Analysis of the effect of inter-turn short -circuit fault on the state current of permanent magnet synchronous motor [J].

- Electric Machines & Control Application, 2024, 51 (6): 78-87.
- [18] 黄潇, 冯莉, 罗洪林. 基于 GAN-LSTM 的 PMSM 逆变器开路故障诊断研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(12): 49-53.  
Huang X, Feng L, Luo H L. Research on open circuit fault diagnosis of PMSM inverter based on GAN-LSTM [J]. Power Electronics, 2024, 58 (12): 49-53.
- [19] 原敏昕, 尹忠刚, 罗培恩, 等. 基于 MPCC 的永磁同步电机驱动系统逆变器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 电气传动, 2023, 53(12): 25-31.  
Yuan M X, Yin Z G, Luo P N, et al. MPCC-based open-circuit fault diagnosis method for the inverter IGBT of PMSM drive system [J]. Electric Drive, 2023, 53(12): 25-31.
- [20] 张潇丹, 段斌, 刘昌杰, 等. 基于本体追踪的永磁同步电机驱动系统开路故障诊断方法[J]. 电机技术学报, 2022, 37(13): 3341-3349.  
Zhang X D, Duan B, Liu C J, et al. Open circuit fault diagnosis method for permanent magnet synchronous machine drive system based on ontology tracking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3341-3349.
- [21] 刘青, 朱景伟, 李明轩, 等. 基于改进相电压法的永磁容错电机开路故障诊断策略[J]. 大连海事大学学报, 2025, 51(1): 112-119.  
Liu Q, Zhu J W, Li M X, et al. Open-circuit fault diagnosis strategy of permanent magnet fault-tolerant motor based on improved phase voltage [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2025, 51(1): 112-119.
- [22] 杜嘉晨, 樊启高, 黄文涛. 基于混合逻辑动态模型的 PMSM 系统开路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 100-108.  
Du J C, Fan Q G, Huang W T. Open circuit fault diagnosis for PMSM system based on mixed logical dynamic model [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 100-108.
- [23] 王志文, 郑晓钦. 基于卷积神经网络的六相永磁同步电机系统开路和电流传感器故障诊断[J]. 大电机技术, 2025(2): 1-8+17.  
Wang Z W, Zheng X Q. A fault diagnosis method based on convolutional neural network for open circuit and current sensor fault of six-phase PMSM system [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(2): 1-8+17.
- [24] 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 diagnose method for dual three-phase permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 108-116.
- [25] 周令康, 罗力岩, 杜嘉晨, 等. 五相 PMSM 驱动系统开路故障混合诊断方法[J]. 微特电机, 2023, 51(8): 53-59+63.  
Zhou L K, Luo L Y, Du J C, et al. Hybrid diagnosis method for open-circuit fault in five-phase PMSM drive systems [J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(8): 53-59+63.
- [26] 徐高满, 雷秉霖, 鄢伦, 等. 永磁同步电机变频调速装置开路故障诊断方法[J]. 船电技术, 2025, 45(8): 81-87.  
Xu G M, Lei B L, Yan L, et al. Open-circuit fault diagnosis method for variable frequency drive in PMSM [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2025, 45(8): 81-87.
- [27] 赵金涛, 郭凯凯, 薛王琦. 永磁同步电机逆变器开路故障快速诊断方法研究[J]. 电工技术, 2025 (23): 270-273+278.  
Zhao J T, Guo K K, Xue W Q. Research on quick diagnosis method for open circuit fault of inverters in permanent magnet synchronous motor drive systems [J]. Electric Engineering, 2025 (23): 270-273 + 278.

---

收稿日期:2025-12-01

收到修改稿日期:2026-01-23

作者简介:

李永恒(1990—),男,博士,工程师,研究方向为电机控制与算法研究,870137364@qq.com;

\*通信作者:李志强(1988—),男,博士,高级工程师,研究方向为装备试验研究,763607429@qq.com。