文章编号:1674-2974(2026)02-0169-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026166

T型三电平逆变器开关管开路故障诊断

林海†,宋春然 ,冯其洋 ,杨乐
(长安大学 电子与控制工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对T型三电平逆变器驱动永磁同步电机控制系统的开关管开路故障诊断难题,提出一种基于混合逻辑动态(mixed logical dynamic, MLD)模型的故障定位与类型辨识方法.通过解析系统在正常及不同开路故障状态下的电流传导路径与桥臂端电压之间的逻辑关系,建立涵盖系统健康与典型故障工况的MLD数学模型.诊断过程中同步执行双残差计算机制:实时采集逆变器输出电流,并与正常模型的电流估计值比较生成实际残差;同时将预设故障模型的输出电流与正常模型的电流估计值作差,形成理论残差.基于理论残差的幅值、符号及其数学关系特征构建故障类型判别准则,结合实际残差的动态变化特性实现故障开关管的精确位置判定.仿真与实验结果表明,该方法不仅能有效识别多种开路故障类型,还可实现故障器件的精确定位,同时兼具高诊断准确率与快速响应特性,并具备强鲁棒性.

关键词:T型三电平逆变器;混合逻辑动态模型;电流残差;开路故障诊断;永磁同步电机
中图分类号:TM464 **文献标志码**:A

Open-circuit fault diagnosis for switches in T-type three-level inverter

LIN Hai†,SONG Chunran,FENG Qiyang,YANG Le
(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To address the diagnostic challenges of open-circuit faults in the switching devices of a T-type three-level inverter-driven permanent magnet synchronous motor (PMSM) control system, this paper proposes a fault localization and identification method based on a mixed logical dynamic (MLD) model. By analyzing the logical relationships between the current conduction paths and the bridge-arm terminal voltages under both normal and various open-circuit fault conditions, an MLD mathematical model encompassing both healthy and typical faulty operating conditions is established. During the diagnosis process, a dual-residual computation mechanism is implemented synchronously: the actual residual is generated by comparing the real-time measured inverter output current with the estimated current from the normal model; simultaneously, the theoretical residual is derived from the difference between the output current of a preset fault model and the estimated current of the normal model. Fault type identification is achieved by constructing discrimination criteria based on the amplitude, polarity, and mathematical relationships of the theoretical residuals. Precise localization of the faulty switch is then realized by

* **收稿日期**:2025-03-14
基金项目:陕西省关键核心技术攻关重点项目(2024CY2-GJHX-10), Key Project for Critical Core Technology Breakthroughs of Shaanxi Province (2024CY2-GHJX-10);陕西省自然科学基础研究计划面上项目(2022JM-298), Natural Science Basic Research Program General Project of Shaanxi Province(2022JM-298)
作者简介:林海(1978—),男,陕西西安人,长安大学副教授,硕士生导师,国际博士生导师,博士
† 通信联系人,E-mail: linhai@chd.edu.cn

evaluating the dynamic characteristics of the actual residual. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method can not only effectively identify multiple open-circuit fault types but also accurately locate the faulty device. Furthermore, it exhibits high diagnostic accuracy, rapid response, and strong robustness.

Key words: T-type three-level inverter; mixed logic dynamic model; current residual; open-circuit fault diagnosis; permanent magnet synchronous motor

随着电力电子技术的发展,逆变器在电力系统中的应用日益广泛.T型三电平逆变器因其高效率、低谐波失真和良好的电能质量,广泛应用于高功率领域.然而,系统规模和复杂度的增加导致开关管因电气应力过载、热应力失效、驱动与控制异常或器件老化等因素易发生故障,主要类型为短路和开路故障[1].由于短路故障具有快速演变和高危害性,通常通过硬件检测和保护电路将其转化为开路故障处理[2].目前,开关管开路故障诊断技术主要分为三类:基于数据驱动的方法如机器学习、深度学习等[3];基于信号分析的方法如对故障信号的时域、频域分析等[4];基于模型的方法即残差分析法[5].

基于数据驱动的方法通过从历史或实时数据中自动学习故障特征与模式,无需依赖系统物理模型.文献[6]提出通过Park变换将三相电流转换为dq轴电流,降低数据维度,再对dq轴电流进行重构生成轨迹图形,利用图像处理技术提取轨迹的上下边界均值和标准差作为特征向量,通过支持向量机(SVM)训练并建立特征向量与故障类型的映射关系,实现故障诊断.文献[7]提出通过逆变器输出端电压波形数据,结合小波包能量熵算法提取故障特征,并采用主成分分析法降维,最终利用超参数优化的随机森林算法实现异常状态判别.文献[8-9]基于桥臂电压信号设计卷积神经网络模型,通过自适应优化机制调节网络参数,提升了故障判别精度与实时性.文献[10-11]对桥臂电压进行快速傅里叶变换提取故障特征,构建多神经网络协同诊断模型,提高了检测精度和效率.近年来,长短时记忆网络(LSTM)因其在处理时序数据和捕捉长程关联特性方面的优势,被应用于逆变器故障诊断.文献[12]提出基于并行堆叠LSTM网络结合注意力机制,从多源时间序列数据中提取特征并加权,实现故障识别.然而,基于数据驱动的故障诊断方法高度依赖历史数据的质量和完备性,若数据量不足、存在噪声或未覆盖所有潜在故障模式,可能导致诊断模型泛化能力差或漏检;此外,这类方法通常缺乏物理可解释性,难以通过系统内在机理验证诊断结果的合理性,尤其在复杂动态系统中可能误判未知故障.

基于信号分析的方法通过分析系统运行中产生的物理信号的时域、频域或时频域特征,识别异常模式来判断故障类型.文献[13]基于中点钳位(NPC)型三电平逆变器单相桥臂开关器件开路故障工况,通过分析输出信号时域特征构建故障特征库,采用实时信号特征提取与特征库匹配机制,实现特定功率管开路故障的快速定位.文献[14]通过引入基于旋转参考系统的时域分析方法,解决了传统频域方法计算复杂、资源消耗大的问题,实现了高效、低成本的电力逆变器开路故障诊断.文献[15]提出通过滑动窗口采样与变模长度归一化预处理消除负载波动影响,结合离散傅里叶变换提取频域特征,并利用主成分分析降维及贡献图定位,实现电机驱动逆变器中功率开关管开路故障的快速精准诊断.然而,基于信号的方法(如傅里叶变换、小波分析)对信号特征提取的敏感度高,易受环境噪声干扰,且在非平稳或非线性系统中难以有效捕捉动态故障特征.

与以上两种方法相比,基于模型的方法虽需精确的数学建模,但其通过系统物理规律推导的故障阈值更具理论依据,对未知故障的适应性和诊断逻辑的透明性更强.文献[16]提出分层诊断方法,通过建立包含调制策略的相电压预测模型,分别在零电压和非零电压区间提取电压残差特征,设定差异化阈值,结合幅值相位组合判据实现相似故障模式的辨识.文献[17]提出基于电压残差的电力牵引系统三电平变换器故障诊断方法,能够识别晶体管和箝位二极管的故障,并实现桥臂级和元件级的分层诊断.文献[18]通过分析开关器件在正常与故障工况下的电流路径特征,建立混合逻辑动态模型,以三相输出电压为监测对象,构造电压信号扩展观测器进行动态电压估算,利用观测器输出与实际电压的残差实现故障检测,并结合三相电压残差的数值关联

特性形成多维度判据,完成故障定位.然而,其故障类型覆盖不足,观测器参数调优过程依赖人工经验,且验证仅基于仿真而未通过实际硬件平台测试,导致参数与阈值设定缺乏实际代表性;同时,该方法未在嵌入式系统中进行可行性评估,限制了其工程适用性.

为提高系统安全性与可靠性,本文通过分析T型三电平逆变器在正常及故障工况下的电流路径特性,提出一种基于混合逻辑动态(MLD)模型的开路故障诊断方法.该方法通过对比实际电流与MLD模型估算值的差异,综合故障与正常状态下的电流残差特征,实现T型三电平逆变器开路故障的精准辨识.相较于现有方法,所提方案可诊断的故障类型更广,机理可解释性强,能通过物理模型直接定位故障根源,且硬件结构简单、成本低.仿真与实验结果表明,该方法具有现实可行性且诊断精度高、鲁棒性强,为逆变器故障诊断提供了高效可靠的技术路径.

1　T型三电平逆变器的MLD模型

1.1　T型三电平逆变器拓扑分析

与传统两电平逆变器相比,T型三电平逆变器的开关应力仅为一半,显著降低了开关损耗.与NPC型相比,T型逆变器无须考虑二极管均压和复杂开关时序控制,简化了控制策略.其低导通损耗和均匀功率损耗分布使其在性能上具有显著优势.T型三电平逆变器拓扑结构如图1所示,该拓扑左侧为直流母线电压U_{dc}供电,两个容值相同的电容串联起来并联在直流母线两端,每相由4个带有反并联二极管的功率开关管构成,其中S_{x1}、S_{x4}为外管,S_{x2}、S_{x3}为内管$(x = A, B, C)$.

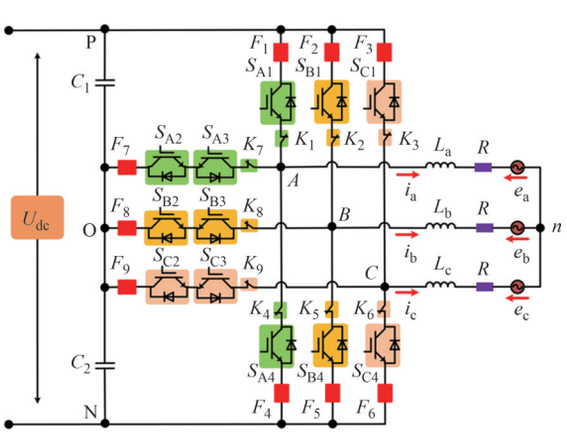


图1　T型三电平逆变器拓扑图

Fig.1　T-type three-level inverter topology diagram

T型三电平逆变器在运行时,每相桥臂仅允许相邻的两个开关管导通,以防止出现短路情况,约定S_{x1}与S_{x3}管互补导通,S_{x2}与S_{x4}管互补导通.当S_{x1}和S_{x2}导通时,逆变器输出电压为$U_{xO} = U_{dc}/2$,定义为P状态;当S_{x2}和S_{x3}导通时,逆变器输出电压为$U_{xO} = 0$,定义为O状态;当S_{x3}和S_{x4}导通时,逆变器输出电压为$U_{xO} = -U_{dc}/2$,定义为N状态.将T型三电平逆变器的工作状态归纳为表1,其中开关管导通记为1,关断记为0.

表1　T型三电平逆变器开关状态

Tab.1　Switching states of the T-type three-level inverter

开关状态	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	输出电平
P	1	1	0	0	$U_{dc}/2$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-U_{dc}/2$

以A相桥臂为例,分析逆变器每个状态的工作情况,约定A相电流i_A从逆变器端流向负载端时$i_A > 0$,A相电流i_A从负载端流向逆变器端时$i_A < 0$.图2展示了T型三电平逆变器在不同工作状态下的电流路径,其中图2(a)、(b)、(c)分别为逆变器P、O、N状态下的电流路径,该拓扑共有6种换流方式.

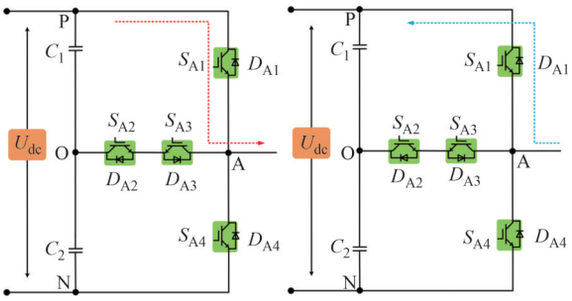
如图2(a)所示,开关管S_{A1}和S_{A2}导通,而S_{A3}和S_{A4}关断,当$i_A > 0$时,电流流经S_{A1}输出,且S_{A2}无电流流过.当$i_A < 0$时,电流流经D_{A1}完成续流,此时逆变器A相工作在P状态,A相输出电压为$U_{AO} = U_{dc}/2$.

如图2(b)所示,开关管S_{A2}和S_{A3}导通,而S_{A1}和S_{A4}关断,当$i_A > 0$时,电流流经S_{A2}和D_{A3}输出.当$i_A < 0$时,电流流经S_{A3}和D_{A2}完成续流,此时逆变器A相工作在O状态,A相输出电压为$U_{AO} = 0$.

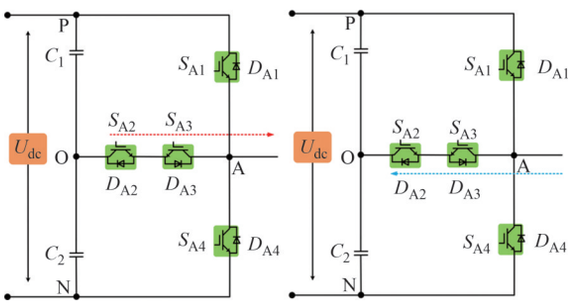
如图2(c)所示,开关管S_{A3}和S_{A4}导通,而S_{A1}和S_{A2}关断,当$i_A > 0$时,电流流经D_{A4}输出,且S_{A3}无电流流过.当$i_A < 0$时,电流流经S_{A4}完成续流,此时逆变器A相工作在N状态,A相输出电压为$U_{AO} = -U_{dc}/2$.

1.2　T型三电平逆变器混合逻辑动态模型

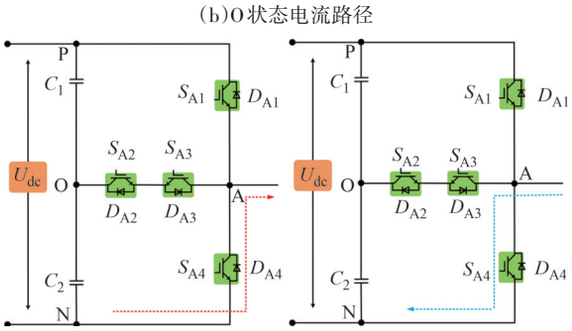
T型三电平逆变器拓扑包含12个开关控制变量和3个电流方向条件变量.具体定义:A相开关信号控制变量:S_{A1}~S_{A4},B相开关信号控制变量:S_{B1}~S_{B4},C相开关信号控制变量:S_{C1}~S_{C4}.A相电流信号条件变量δ_A,B相电流信号条件变量δ_B,C相电流信号条件变量δ_C.规定电流由逆变器流向负载侧为正方向,电流由负载流向逆变器侧为负方向,条件变量δ_A、δ_B、δ_C的具体对照关系为



(a)P状态电流路径



(b)O状态电流路径



(c)N状态电流路径

图2 各工作状态下电流路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of current paths under various operating states

$$\begin{cases}\delta_{\mathrm{A}}=1\leftrightarrow i_{\mathrm{A}}>0,\delta_{\mathrm{A}}=0\leftrightarrow i_{\mathrm{A}}<0\\ \delta_{\mathrm{B}}=1\leftrightarrow i_{\mathrm{B}}>0,\delta_{\mathrm{B}}=0\leftrightarrow i_{\mathrm{B}}<0\\ \delta_{\mathrm{C}}=1\leftrightarrow i_{\mathrm{C}}>0,\delta_{\mathrm{C}}=0\leftrightarrow i_{\mathrm{C}}<0\end{cases}\tag{1}$$

以A相为例,结合T型三电平逆变器的工作原理,归纳出端电压与开关管通断信号、电流换流方向的关系.

将表2中的逻辑关系进行归纳,得到A相端电压u_{AO}与开关管通断状态及电流换流方向δ_{A}之间的逻辑表达式为

$$u_{\mathrm{AO}}=U_{\mathrm{dc}}\left(\begin{matrix}S_{\mathrm{A1}}S_{\mathrm{A2}}\overline{S_{\mathrm{A3}}}\,\overline{S_{\mathrm{A4}}}\delta_{\mathrm{A}}-\overline{S_{\mathrm{A1}}}\,\overline{S_{\mathrm{A2}}}S_{\mathrm{A3}}S_{\mathrm{A4}}\delta_{\mathrm{A}}+\\ S_{\mathrm{A1}}S_{\mathrm{A2}}\overline{S_{\mathrm{A3}}}\,\overline{S_{\mathrm{A4}}}\,\overline{\delta_{\mathrm{A}}}-\overline{S_{\mathrm{A1}}}\,\overline{S_{\mathrm{A2}}}S_{\mathrm{A3}}S_{\mathrm{A4}}\overline{\delta_{\mathrm{A}}}\end{matrix}\right)/2\tag{2}$$

将式(2)整理得到

$$u_{\mathrm{AO}}=U_{\mathrm{dc}}\left(S_{\mathrm{A1}}S_{\mathrm{A2}}\overline{S_{\mathrm{A3}}}\,\overline{S_{\mathrm{A4}}}-\overline{S_{\mathrm{A1}}}\,\overline{S_{\mathrm{A2}}}S_{\mathrm{A3}}S_{\mathrm{A4}}\right)/2\tag{3}$$

由于相电压与端电压的关系为

表2 A相端电压真值表

Tab.2 Truth table of phase A terminal voltage

δ_{A}	S_{A1}	S_{A2}	S_{A3}	S_{A4}	u_{AO}
	1	1	0	0	$U_{\mathrm{dc}}/2$
1	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	$-U_{\mathrm{dc}}/2$
	1	1	0	0	$U_{\mathrm{dc}}/2$
0	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	$-U_{\mathrm{dc}}/2$

$$\begin{bmatrix}u_{\mathrm{An}}\\u_{\mathrm{Bn}}\\u_{\mathrm{Cn}}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{\mathrm{AO}}\\u_{\mathrm{BO}}\\u_{\mathrm{CO}}\end{bmatrix}\tag{4}$$

从而得到相电压输出与开关管通断状态关系式为

$$\begin{bmatrix}u_{\mathrm{An}}\\u_{\mathrm{Bn}}\\u_{\mathrm{Cn}}\end{bmatrix}=\frac{U_{\mathrm{dc}}}{6}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}S_1\\S_2\\S_3\end{bmatrix}\tag{5}$$

式中:$\begin{bmatrix}S_1\\S_2\\S_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{\mathrm{A1}}S_{\mathrm{A2}}\overline{S_{\mathrm{A3}}}\,\overline{S_{\mathrm{A4}}}-\overline{S_{\mathrm{A1}}}\,\overline{S_{\mathrm{A2}}}S_{\mathrm{A3}}S_{\mathrm{A4}}\\S_{\mathrm{B1}}S_{\mathrm{B2}}\overline{S_{\mathrm{B3}}}\,\overline{S_{\mathrm{B4}}}-\overline{S_{\mathrm{B1}}}\,\overline{S_{\mathrm{B2}}}S_{\mathrm{B3}}S_{\mathrm{B4}}\\S_{\mathrm{C1}}S_{\mathrm{C2}}\overline{S_{\mathrm{C3}}}\,\overline{S_{\mathrm{C4}}}-\overline{S_{\mathrm{C1}}}\,\overline{S_{\mathrm{C2}}}S_{\mathrm{C3}}S_{\mathrm{C4}}\end{bmatrix}$,记$\mu_x=S_{x1}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}S_{x4}$,$(x=\mathrm{A},\mathrm{B},\mathrm{C})$,基于此简化式(5)得

$$\begin{bmatrix}u_{\mathrm{An}}\\u_{\mathrm{Bn}}\\u_{\mathrm{Cn}}\end{bmatrix}=\frac{U_{\mathrm{dc}}}{6}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{\mathrm{A}}\\\mu_{\mathrm{B}}\\\mu_{\mathrm{C}}\end{bmatrix}\tag{6}$$

从而得到T型三电平逆变器的MLD模型为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_{\mathrm{A}}\\i_{\mathrm{B}}\\i_{\mathrm{C}}\end{bmatrix}=-\frac{R}{L}\begin{bmatrix}i_{\mathrm{A}}\\i_{\mathrm{B}}\\i_{\mathrm{C}}\end{bmatrix}+\frac{U_{\mathrm{dc}}}{6L}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{\mathrm{A}}\\\mu_{\mathrm{B}}\\\mu_{\mathrm{C}}\end{bmatrix}-\frac{1}{L}\begin{bmatrix}e_{\mathrm{A}}\\e_{\mathrm{B}}\\e_{\mathrm{C}}\end{bmatrix}\tag{7}$$

因此用向量表示的电驱系统MLD模型为

$$\dot{\boldsymbol{i}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{i}+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{e}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{\mu}\tag{8}$$

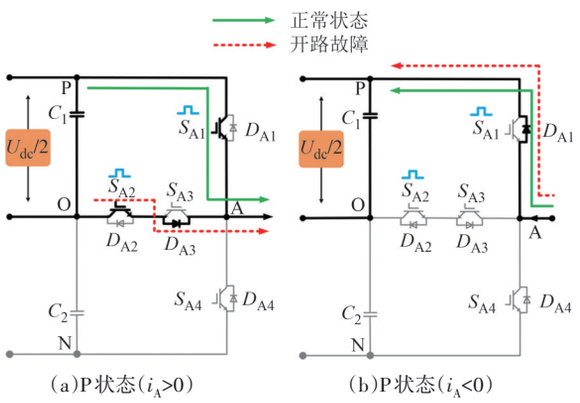
式中:三相电流$\boldsymbol{i}=[i_{\mathrm{A}}\quad i_{\mathrm{B}}\quad i_{\mathrm{C}}]^{\mathrm{T}}$为状态变量;$\boldsymbol{\mu}=[\mu_{\mathrm{A}}\quad\mu_{\mathrm{B}}\quad\mu_{\mathrm{C}}]^{\mathrm{T}}$作为辅助逻辑变量是开关管的通断信号;$\boldsymbol{e}=[e_{\mathrm{A}}\quad e_{\mathrm{B}}\quad e_{\mathrm{C}}]^{\mathrm{T}}$是三相反电动势;$\boldsymbol{A}$是状态系数矩阵;$\boldsymbol{B}_1$是连续状态输入矩阵;$\boldsymbol{B}_2$是离散状态输入矩阵.

1.3 开关管开路故障下电流路径分析

开关管开路故障的精确定位需要分析故障状态下的电流路径分布与端电压特征,为建立逆变器MLD故障模型提供理论基础.

以A相电路为例,阐明开关管开路故障影响该相不同电平状态.由表1推测,S_{A1}故障可能影响P状态;S_{A2}故障可能影响P和O状态;S_{A3}故障可能影响O和N状态,S_{A4}故障可能影响N状态,下面根据电流流向分析开关管开路故障后逆变器的工作状态.

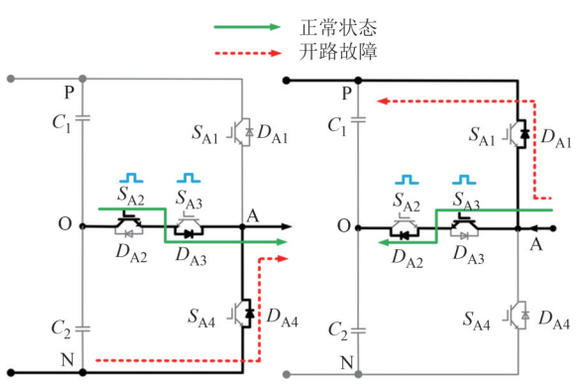
图3为对比P状态在开关管开路故障前后的电流路径.图4为对比O状态在开关管开路故障前后的电流路径.图5为对比N状态在开关管开路故障前后的电流路径.



(a)P状态(i_A>0)　　(b)P状态(i_A<0)

图3　开关管故障前后电流路径对比(P状态)

Fig.3　Comparison of current paths before and after switch fault (P state)



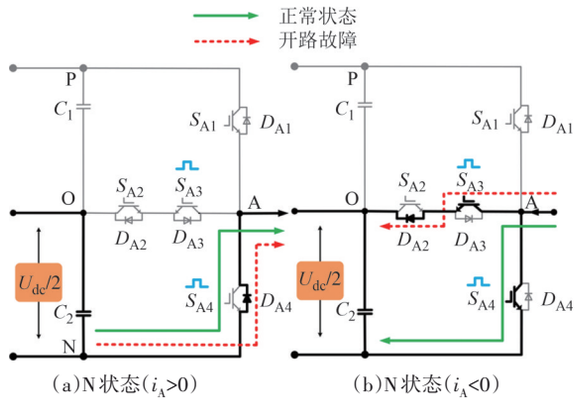
(a)O状态(i_A>0)　　(b)O状态(i_A<0)

图4　开关管故障前后电流路径对比(O状态)

Fig.4　Comparison of current paths before and after switch fault (O state)

如图3(a)所示,当$i_A>0$时,P状态下,S_{A1}、S_{A2}导通,正常工作时,电流从逆变器经S_{A1}流向负载端,S_{A1}开路故障后,电流经S_{A2}、D_{A3}流向负载端;如图3(b)所示,当$i_A<0$时,P状态下,S_{A1}、S_{A2}导通,正常工作时,电流从负载端经D_{A1}流回逆变器端,S_{A1}或S_{A2}开路故障后,电流路径不变.

如图4(a)所示,当$i_A>0$时,O状态下,S_{A2}、S_{A3}导通,正常工作时,电流从逆变器经S_{A2}、D_{A3}流向负载端,S_{A2}开路故障后,电流经D_{A4}流向负载端;如图4(b)所示,当$i_A<0$时,O状态下,S_{A2}、S_{A3}导通,正常工作时,电流从负载端经S_{A3}、D_{A2}流回逆变器端,S_{A3}开路故障后,电流经D_{A1}流回逆变器端.



(a)N状态(i_A>0)　　(b)N状态(i_A<0)

图5　开关管故障前后电流路径对比(N状态)

Fig.5　Comparison of current paths before and after switch fault (N state)

如图5(a)所示,当$i_A>0$时,N状态下,S_{A3}、S_{A4}导通,正常工作时,电流经D_{A4}流向负载端,S_{A3}或S_{A4}开路故障后,电流路径保持不变;如图5(b)所示,当$i_A<0$时,N状态下,S_{A3}、S_{A4}导通,正常工作时,电流从负载端经S_{A4}流回逆变器端,S_{A4}开路故障后,电流经S_{A3}、D_{A2}流回逆变器端.

分析表明,开关管开路故障会重构电流路径并引发输出电压特征畸变.表3和表4系统总结了正常和某相开关管故障状态下电流路径与输出电压特征参数,为故障诊断和容错控制设计提供数据支撑.

表3　开关管正常状态下电流路径及端电压输出

Tab.3　Current paths and terminal voltage output under normal switch conditions

电流方向	正常状态		
	状态	电流路径	端电压
$i_A>0$	P	S_{A1}	$U_{dc}/2$
	O	S_{A2}、D_{A3}	0
	N	D_{A4}	$-U_{dc}/2$
$i_A<0$	P	D_{A1}	$U_{dc}/2$
	O	S_{A3}、D_{A2}	0
	N	S_{A4}	$-U_{dc}/2$

当相电流$i_A>0$时,S_{A1}开路故障使A相P状态转为O状态,端电压从$U_{dc}/2$变为0;S_{A2}开路故障使A相电平的O状态变为N状态,端电压从0变为$-U_{dc}/2$;S_{A3}或S_{A4}开路故障不会改变N状态,端电压保持为$-U_{dc}/2$.

表4 开关管开路故障下电流路径及端电压输出

Tab.4 Current paths and terminal voltage output under open-circuit fault conditions of the switch

电流方向	开路故障			
	故障管	电流路径	状态	端电压
$i_A>0$	S_{A1}	S_{A2}、D_{A3}	O	0
	S_{A2}	D_{A4}	N	$-U_{dc}/2$
	任一	D_{A4}	N	$-U_{dc}/2$
$i_A<0$	任一	D_{A1}	P	$U_{dc}/2$
	S_{A3}	D_{A1}	P	$U_{dc}/2$
	S_{A4}	S_{A3}、D_{A2}	O	0

当相电流 $i_A<0$ 时,S_{A1} 或 S_{A2} 开路故障不会改变P状态,端电压保持为 $U_{dc}/2$;S_{A3} 开路故障使逆变器的O状态转为P状态,端电压从0变为 $U_{dc}/2$;S_{A4} 开路故障使逆变器的N状态转为O状态,端电压从 $-U_{dc}/2$ 变为0.

通过分析开路故障下的电流路径与端电压特性,建立故障态MLD模型的理论基础,并基于该模型提取电流残差特征,实现故障开关管的精确定位.

1.4 开路故障下的MLD模型

本文重点研究三管以内的开路故障(包括单管、双管和三管开路),因其在系统容错能力范围内具有实际分析价值.通过建立典型故障模式的MLD模型及电流残差方程,为故障诊断提供理论依据.

1.4.1 单相单外管开路故障

假设T型三电平逆变器某相外部开关管 S_{x1} 发生开路故障,记电流流向为 δ_x,开关管 S_{x1}~S_{x4} 的通断状态用1表示导通,0表示关断.开路故障后,该相端电压记为 u'_{x0},桥臂的电平状态记为 S_x,其中 x 代表了A、B、C三相.根据1.3节分析得到的开关管故障后电流路径及逆变器的电平状态,列出电流流向 δ_x、开关管 S_{x1}~S_{x4} 的通断状态、故障后的端电压 u'_{x0} 以及故障后的真实电平状态 S_x 之间的逻辑关系表5.

根据表中的各逻辑变量的关系归纳出在 S_{x1} 故障情况下,端电压 u'_{x0} 与各开关管 S_{x1}~S_{x4} 通断状态及电流流向 δ_x 之间的逻辑关系表达式为

表5 S_{x1} 开路电流流向、开关管通断状态、相电压逻辑关系表

Tab.5 Relationship table of S_{x1} open-circuit current direction, switch on/off states, and phase voltage logic

δ_x	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	S_x	u'_{x0}
1	0	1	0	0	O	0
	0	1	1	0	O	0
	0	0	1	1	N	$-U_{dc}/2$
0	0	1	0	0	P	$U_{dc}/2$
	0	1	1	0	O	0
	0	0	1	1	N	$-U_{dc}/2$

$$u'_{x0}=U_{dc}\left(\overline{\delta_x}\,\overline{S_{x1}}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}S_{x4}\right)/2 \tag{9}$$

记 $\mu'_x=\overline{\delta_x}\,\overline{S_{x1}}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}S_{x4}$.

假设T型三电平逆变器某相的外部开关管 S_{x4} 发生开路故障,类比于 S_{x1} 发生开路故障,列出电流流向 δ_x、开关管 S_{x1}~S_{x4} 的通断状态、故障后的端电压 u'_{x0} 以及故障后的真实电平状态 S_x 之间的逻辑关系表6.

表6 S_{x4} 开路电流流向、开关管通断状态、相电压逻辑关系表

Tab.6 Relationship table of S_{x4} open-circuit current direction, switch on/off states, and phase voltage logic

δ_x	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	S_x	u'_{x0}
1	1	1	0	0	P	$U_{dc}/2$
	0	1	1	0	O	0
	0	0	1	0	N	$-U_{dc}/2$
0	1	1	0	0	P	$U_{dc}/2$
	0	1	1	0	O	0
	0	0	1	0	O	0

根据表中的各逻辑变量的关系归纳出在 S_{x4} 故障情况下,端电压 u'_{x0} 与各开关管 S_{x1}~S_{x4} 通断状态及电流流向 δ_x 之间的逻辑关系表达式为

$$u'_{x0}=U_{dc}\left(S_{x1}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\delta_x\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}\overline{S_{x4}}\right)/2 \tag{10}$$

记 $\mu'_x=S_{x1}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\delta_x\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}\overline{S_{x4}}$.

1.4.2 单相单内管开路故障

假设T型三电平逆变器某相内部开关管 S_{x2} 发生开路故障,与开关管 S_{x1} 发生开路故障的分析方法一致,列出电流流向 δ_x、开关管 S_{x1}~S_{x4} 的通断状态、故障后的端电压 u'_{x0} 以及故障后的真实电平状态 S_x 之间的逻辑关系表7.

表7 S_{x2} 开路电流流向、开关管通断状态、相电压逻辑关系表

Tab.7 Relationship table of S_{x2} open-circuit current direction, switch on/off states, and phase voltage logic

δ_x	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	S_x	u'_{x0}
1	1	0	0	0	P	$U_{dc}/2$
	0	0	1	0	N	$-U_{dc}/2$
	0	0	1	1	N	$-U_{dc}/2$
0	1	0	0	0	P	$U_{dc}/2$
	0	0	1	0	O	0
	0	0	1	1	N	$-U_{dc}/2$

根据表中的各逻辑变量的关系归纳出在 S_{x2} 故障情况下,端电压 u'_{x0} 与各开关管 S_{x1}~S_{x4} 通断状态及电流流向 δ_x 之间的逻辑关系表达式为

$$u'_{x0}=U_{dc}\left(S_{x1}\overline{S_{x2}}\,\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}S_{x4}-\delta_x\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}\overline{S_{x4}}\right)/2 \tag{11}$$

记$\mu'_x=S_{x1}\overline{S_{x2}}\,\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}S_{x4}-\delta_x\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}S_{x3}\overline{S_{x4}}$.

假设T型三电平逆变器某相内部开关管S_{x3}发生开路故障,类比于S_{x2}发生开路故障,列出电流流向δ_x、开关管S_{x1}~S_{x4}的通断状态、故障后的端电压u'_{x0}以及故障后的真实电平状态S_x之间的逻辑关系表8.

表8　S_{x3}开路电流流向、开关管通断状态、相电压逻辑关系表

Tab.8　Relationship table of S_{x3} open-circuit current direction, switch on/off states, and phase voltage logic

δ_x	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	S_x	u'_{x0}
	1	1	0	0	P	$U_{dc}/2$
1	0	1	0	0	O	0
	0	0	0	1	N	$-U_{dc}/2$
	1	1	0	0	P	$U_{dc}/2$
0	0	1	0	0	P	$U_{dc}/2$
	0	0	0	1	N	$-U_{dc}/2$

根据表中的各逻辑变量的关系归纳出在S_{x3}故障情况下,端电压u'_{xo}与各开关管S_{x1}~S_{x4}通断状态及电流流向δ_x之间的逻辑关系表达式为

$$u'_{x0}=U_{dc}\left(S_{x1}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}+\overline{\delta_x}\,\overline{S_{x1}}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}\,\overline{S_{x3}}S_{x4}\right)/2 \tag{12}$$

记$\mu'_x=S_{x1}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}+\overline{\delta_x}\,\overline{S_{x1}}S_{x2}\overline{S_{x3}}\,\overline{S_{x4}}-\overline{S_{x1}}\,\overline{S_{x2}}\,\overline{S_{x3}}S_{x4}$.

基于式(1)和式(2)单管开路故障分析结果,得到关于μ'_x的端电压u'_{x0}的通式为

$$u'_{x0}=U_{dc}\mu'_x/2 \tag{13}$$

分析表明,当x相S_{x1}或S_{x2}开路故障且其他两相正常时,故障管仅影响x相端电压u'_{x0},其他两相端电压不变.

类比1.2节式(6),假设当前x相为A相,得到S_{A1}或S_{A2}开路故障下的各相的相电压与开关管通断状态的逻辑关系式为

$$\begin{bmatrix}u'_{An}\\u_{Bn}\\u_{Cn}\end{bmatrix}=\frac{U_{dc}}{6}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu'_A\\\mu_B\\\mu_C\end{bmatrix} \tag{14}$$

因此开关管S_{A1}或S_{A2}开路故障下的T型三电平逆变器的MLD模型为

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}i'_A\\i_B\\i_C\end{bmatrix}=-\frac{R}{L}\begin{bmatrix}i'_A\\i_B\\i_C\end{bmatrix}+\frac{U_{dc}}{6L}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu'_A\\\mu_B\\\mu_C\end{bmatrix}-\frac{1}{L}\begin{bmatrix}e_A\\e_B\\e_C\end{bmatrix} \tag{15}$$

两相双外管、两相双内管、三相三外管、三相三内管的分析过程皆可类比单相单管开路故障.

2　基于电流残差的开路故障诊断策略

基于前文建立的T型三电平逆变器的MLD模型,构建故障诊断方法如下:系统状态空间模型将三相电流作为连续状态变量,其动态特性受辅助逻辑变量$\boldsymbol{\mu}$调控.

故障发生时,系统会产生特征性的状态偏差.通过构建电流残差信号(实测值与MLD模型估计值之差)及其状态方程,并分析其解与预设故障模型的匹配程度,实现故障的精确诊断与定位.电流残差状态方程形式为

$$\Delta\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_2\left(\boldsymbol{\mu}'_x-\boldsymbol{\mu}_x\right)=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_2\Delta\boldsymbol{\mu}_x \tag{16}$$

因此电流残差方程具体形式为

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{i}_A\\\Delta\dot{i}_B\\\Delta\dot{i}_C\end{bmatrix}=-\frac{R}{L}\begin{bmatrix}\Delta i_A\\\Delta i_B\\\Delta i_C\end{bmatrix}+\frac{U_{dc}}{6L}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\mu_A\\\Delta\mu_B\\\Delta\mu_C\end{bmatrix} \tag{17}$$

式中:Δi_A、Δi_B、Δi_C是三相电流残差;$\Delta\mu_A$、$\Delta\mu_B$、$\Delta\mu_C$是故障状态下辅助逻辑变量μ'_x与正常状态下辅助逻辑变量μ_x的差值.T型三电平逆变器在正常工作时$\begin{bmatrix}\Delta i_A&\Delta i_B&\Delta i_C\end{bmatrix}^T=\boldsymbol{0}$,$\Delta\boldsymbol{\mu}_x=\boldsymbol{0}$,即三相电流残差为0.

2.1　单管开路故障电流残差

在1.4节分析了单相外部开关管开路故障时逆变器的工作特性,以A相开关管S_{A4}开路故障为例,逆变器发生开路故障时的电流残差状态方程为

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{i}'_A\\\Delta\dot{i}_B\\\Delta\dot{i}_C\end{bmatrix}=-\frac{R}{L}\begin{bmatrix}\Delta i'_A\\\Delta i_B\\\Delta i_C\end{bmatrix}+\frac{U_{dc}}{6L}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\mu'_A\\\Delta\mu_B\\\Delta\mu_C\end{bmatrix} \tag{18}$$

初始条件假定三相电流残差的初始值为0,当开关管S_{A4}发生开路故障时,

$$\begin{cases}\Delta\mu'_A=\mu'_A-\mu_A=\overline{S_{A1}}\,\overline{S_{A2}}S_{A3}S_{A4}-\delta_A\overline{S_{A1}}\,\overline{S_{A2}}S_{A3}\overline{S_{A4}}\\\Delta\mu_B=0\\\Delta\mu_C=0\end{cases} \tag{19}$$

对式(16)中开关管开路故障下的微分方程求解得

$$\begin{cases}\Delta i'_A=\dfrac{2U_{dc}\Delta\mu'_A}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\\\Delta i_B=\dfrac{-U_{dc}\Delta\mu'_A}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\\\Delta i_C=\dfrac{-U_{dc}\Delta\mu'_A}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\end{cases} \tag{20}$$

当A相开关管S_{A4}开路故障时,驱动信号无法使S_{A4}导通,因此S_{A4}开关状态恒为0,$\Delta\mu'_A$可简化为$\Delta\mu'_A=-\delta_A\overline{S_{A1}}\,\overline{S_{A2}}S_{A3}$,列出$\Delta\mu'_A$关于开关管通断状态的逻辑关系表9.

根据表9可知$\Delta\mu'_A\leqslant 0$,因此在电流残差微分方程的解中$\Delta i'_A\leqslant 0$,$\Delta i_B\geqslant 0$,$\Delta i_C\geqslant 0$,且满足$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C$的数学关系.

表9 $\Delta\mu'_A$关于开关管通断状态逻辑关系表

Tab.9 Logic relationship table for$\Delta\mu'_A$ switch on/off states

δ_A	S_{A1}	S_{A2}	S_{A3}	S_{A4}	S_A	$\Delta\mu'_A$
	1	1	0	0	P	0
1	0	1	1	0	O	0
	0	0	1	0	N	−1
	1	1	0	0	P	0
0	0	1	1	0	O	0
	0	0	1	0	O	0

类比开关管S_{A4}开路故障,得到同相其他三个开关管开路故障时的电流残的数学差关系,并将四组电流残差数学关系归纳为表10.

表10 单管开路故障诊断判据

Tab.10 Single-switch open-circuit fault diagnosis criterion

故障类型	故障位置	电流残差数学关系
无故障	无	$\Delta i_A=\Delta i_B=\Delta i_C$
单管故障	S_{A1}	$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C\geqslant 0$
	S_{A2}	$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C\geqslant 0$
	S_{A3}	$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C\leqslant 0$
	S_{A4}	$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C\leqslant 0$

2.2 双管开路故障电流残差

双相双外管开路故障电流残差的分析以A相开关管S_{A1}、B相开关管S_{B1}开路故障为例,当以上两个开关管开路故障时逆变器的电流残差状态方程为

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{i}'_A\\ \Delta\dot{i}'_B\\ \Delta\dot{i}'_C\end{bmatrix}=-\frac{R}{L}\begin{bmatrix}\Delta i'_A\\ \Delta i'_B\\ \Delta i_C\end{bmatrix}+\frac{U_{dc}}{6L}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\ -1&2&-1\\ -1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\mu'_A\\ \Delta\mu'_B\\ \Delta\mu_C\end{bmatrix}\tag{21}$$

假定三相电流残差的初始值为0,当开关管S_{A1}、S_{B1}开路故障时

$$\begin{cases}\Delta\mu'_A=\overline{\delta_A}\,\overline{S_{A1}}S_{A2}\overline{S_{A3}}\,\overline{S_{A4}}-S_{A1}S_{A2}\overline{S_{A3}}\,\overline{S_{A4}}\\ \Delta\mu'_B=\overline{\delta_B}\,\overline{S_{B1}}S_{B2}\overline{S_{B3}}\,\overline{S_{B4}}-S_{B1}S_{B2}\overline{S_{B3}}\,\overline{S_{B4}}\\ \Delta\mu_C=0\end{cases}\tag{22}$$

对式(18)中开关管S_{A1}、S_{B1}开路故障下的微分方程求解得

$$\begin{cases}\Delta i'_A=\dfrac{U_{dc}\left(2\Delta\mu'_A-\Delta\mu'_B\right)}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\\ \Delta i'_B=\dfrac{U_{dc}\left(-\Delta\mu'_A+2\Delta\mu'_B\right)}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\\ \Delta i_C=\dfrac{U_{dc}\left(-\Delta\mu'_A-\Delta\mu'_B\right)}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\end{cases}\tag{23}$$

将以上类型的双管开路故障特点归纳为表11.

表11 双管开路故障诊断判据

Tab.11 Dual-switch open-circuit fault diagnosis criterion

类型	故障位置	残差幅值	电流残差数学关系	残差符号
无故障	无	0	$\Delta i_A=\Delta i_B=\Delta i_C$	无
双管故障	S_{A1}、S_{B1}	A、B同幅值	$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)\geqslant 0$	$\Delta i'_A\geqslant 0$ $\Delta i'_B\geqslant 0$ $\Delta i_C\leqslant 0$
	S_{A2}、S_{B2}	A、B同幅值	$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)$	正负不定
	S_{A3}、S_{B3}	A、B同幅值	$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)$	正负不定
	S_{A2}、S_{B3}	A、B异幅值	$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)$	正负不定
	S_{A4}、S_{B4}	A、B同幅值	$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)\leqslant 0$	$\Delta i'_A\leqslant 0$ $\Delta i'_B\leqslant 0$ $\Delta i_C\geqslant 0$

2.3 三管开路故障电流残差

三相三外管开路故障电流残差的分析以A相开关管S_{A1}、B相开关管S_{B1}、C相开关管S_{C1}发生开路故障为例,当以上三个开关管发生开路故障时逆变器的电流残差状态方程为

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{i}'_A\\ \Delta\dot{i}'_B\\ \Delta\dot{i}'_C\end{bmatrix}=-\frac{R}{L}\begin{bmatrix}\Delta i'_A\\ \Delta i'_B\\ \Delta i'_C\end{bmatrix}+\frac{U_{dc}}{6L}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\ -1&2&-1\\ -1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\mu'_A\\ \Delta\mu'_B\\ \Delta\mu'_C\end{bmatrix}\tag{24}$$

假定三相电流残差的初始值为0,因此当开关管S_{A1}、S_{B1}、S_{C1}发生开路故障时

$$\begin{cases}\Delta\mu'_A=\overline{\delta_A}\,\overline{S_{A1}}S_{A2}\overline{S_{A3}}\,\overline{S_{A4}}-S_{A1}S_{A2}\overline{S_{A3}}\,\overline{S_{A4}}\\ \Delta\mu'_B=\overline{\delta_B}\,\overline{S_{B1}}S_{B2}\overline{S_{B3}}\,\overline{S_{B4}}-S_{B1}S_{B2}\overline{S_{B3}}\,\overline{S_{B4}}\\ \Delta\mu'_C=\overline{\delta_C}\,\overline{S_{C1}}S_{C2}\overline{S_{C3}}\,\overline{S_{C4}}-S_{C1}S_{C2}\overline{S_{C3}}\,\overline{S_{C4}}\end{cases}\tag{25}$$

对式(21)中开关管S_{A1}、S_{B1}、S_{C1}开路故障下的微分方程求解得

$$\begin{cases}\Delta i'_A=\dfrac{U_{dc}\left(2\Delta\mu'_A-\Delta\mu'_B-\Delta\mu'_C\right)}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\\ \Delta i'_B=\dfrac{U_{dc}\left(-\Delta\mu'_A+2\Delta\mu'_B-\Delta\mu'_C\right)}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\\ \Delta i'_C=\dfrac{U_{dc}\left(-\Delta\mu'_A-\Delta\mu'_B+2\Delta\mu'_C\right)}{6R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\end{cases}\tag{26}$$

将以上类型的三管开路故障特点归纳为表12.

表 12　三管开路故障诊断判据

Tab.12　Three power switching tubes open-circuit fault diagnostic criteria

类型	故障位置	残差幅值	电流残差数学关系	残差符号
无故障	无	0	$\Delta i_A = \Delta i_B = \Delta i_C$	无
三管故障	S_{A1}、S_{B1}、S_{C1}	ABC同幅值	$\Delta i'_A = -(\Delta i'_B + \Delta i'_C)$	正负不定
	S_{A4}、S_{B4}、S_{C4}	ABC同幅值	$\Delta i'_A = -(\Delta i'_B + \Delta i'_C)$	正负不定
	S_{A2}、S_{B2}、S_{C2}	ABC同幅值	$\Delta i'_A = -(\Delta i'_B + \Delta i'_C)$	正负不定
	S_{A3}、S_{B3}、S_{C3}	ABC同幅值	$\Delta i'_A = -(\Delta i'_B + \Delta i'_C)$	正负不定
	S_{A2}、S_{B2}、S_{C3}	ABC异幅值	$\Delta i'_A = -(\Delta i'_B + \Delta i'_C)$	$\Delta i'_A \leqslant 0$ $\Delta i'_B \leqslant 0$ $\Delta i_C \geqslant 0$

3　开路故障诊断策略验证

为验证开路故障诊断策略的有效性,采用仿真与实验双重验证方法:首先在Matlab/Simulink中构建T型三电平逆变器驱动PMSM的MLD仿真模型;其次将基于该逆变器的电机驱动系统部署至硬件测试平台进行故障诊断测试,如图6所示.通过仿真与实验结果的波形一致性验证诊断策略的正确性,并严格保持实验与仿真参数完全一致.

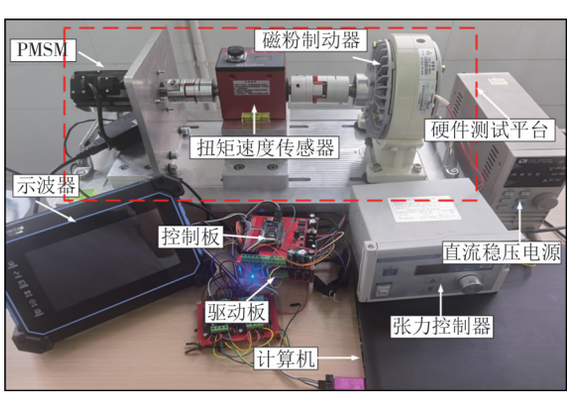


图6　电机驱动系统硬件平台测试图

Fig.6　Motor drive system hardware platform test diagram

其中整个测试系统包含了计算机、硬件测试平台、示波器、直流稳压电源、控制板、驱动板、张力控制器等,其仿真和实验参数见表13.

基于模型的开路故障诊断方法在嵌入式系统中可通过模型轻量化和硬件适配实现:低复杂度模型适用于STM32F1/F3系列控制器,而中复杂度模型则需要STM32F4/H7等配备硬件加速单元的平台.通过模型降阶和定点量化进行优化,本文所涉及的模型维度较低,控制器采用STM32F1结合IQmath库替代浮点运算即可完成故障诊断功能.

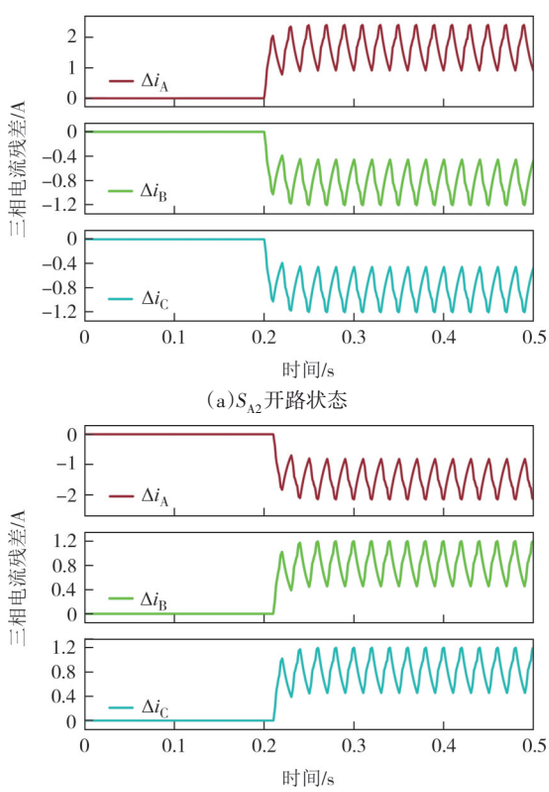
表 13　仿真与实验参数表

Tab.13　Simulation and experimental parameters table

参数名称	仿真/实验参数值
直流侧电压 U_{dc}	48 V
采样周期 T_S	0.1 ms
直流侧电容 C_1/C_2	100 μF
控制器	STM32F103RCT6
定子电阻 R_s	0.5 Ω
定子电感 L_s	5.2 mH
阈值 W_1/W_2	0.1/3 A

3.1　单管开路故障

1)单管开路故障仿真分析.如图7所示为单相单内管开路故障即S_{A2}和S_{A3}发生开路故障后系统输出的三相电流残差仿真波形图.



(a)S_{A2}开路状态

(b)S_{A3}开路状态

图7　单相单内管开路故障电流残差

Fig.7　Current residuals for single-phase single inner-tube open-circuit fault

由图7可知,未发生故障时,逆变器输出正常三相电流,电流残差保持为0.当S_{A2}故障发生后,三相电流发生畸变,三相电流残差满足$\Delta i'_A = -2\Delta i_B = -2\Delta i_C \geqslant 0$的数学关系.同理当$S_{A3}$故障发生后,三相电流发生畸变,三相电流残差满足$\Delta i'_A = -2\Delta i_B = -2\Delta i_C \leqslant 0$的数学关系.为与单相外管故障相区分,观察到三相电流残差的幅值都小于阈值$W_2 = 3$ A.因

此可以判断为内管故障,再结合残差极性确定上下桥臂即可.

2)单管开路故障实验分析.如图8所示为S_{A2}开路时的三相电流残差.

由图8可知A相电流残差大于0,B、C两相电流残差皆小于0,满足表10中S_{A2}开路时残差间的数学关系即$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C\geqslant 0$.A相残差峰值维持在2.5 A左右,BC两相残差峰值维持在1.2 A左右.三相残差皆小于阈值3 A,可判断出当前S_{A2}发生开路故障.同理,如图9所示为S_{A3}开路时的三相电流残差.

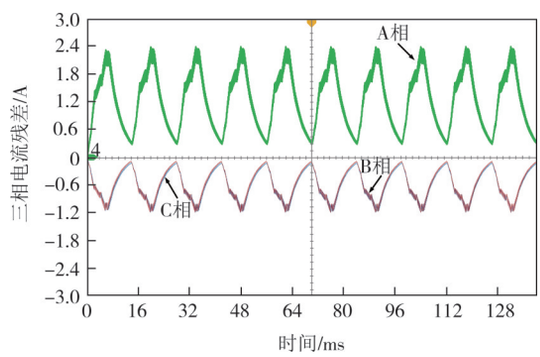


图8 S_{A2}开路电流残差

Fig.8 S_{A2} open-circuit current residuals

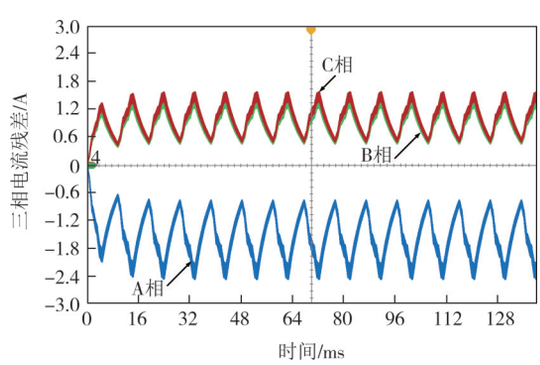


图9 S_{A3}开路电流残差

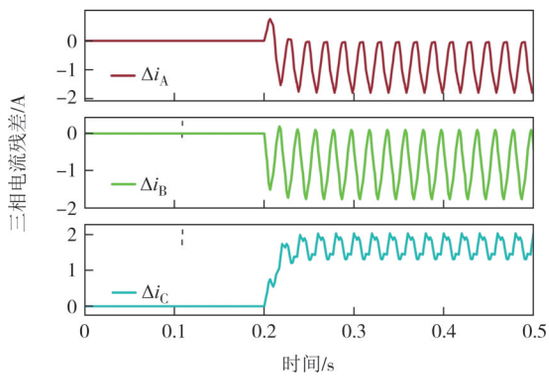
Fig.9 S_{A3} open-circuit current residuals

由图9可知A相电流残差小于0,B、C两相电流残差皆大于0,满足表10中S_{A3}开路时残差间的数学关系即$\Delta i'_A=-2\Delta i_B=-2\Delta i_C\leqslant 0$.A相残差峰值维持在2 A左右,BC两相残差峰值维持在1.2 A左右.三相残差皆小于阈值3 A,可判断出当前S_{A3}发生开路故障.

3.2 双管开路故障

1)双管开路故障仿真分析.如图10所示为两相双内管发生开路故障后系统输出的三相电流残差仿真波形图.

由图10可知,未发生故障时,逆变器输出正常三相电流,电流残差保持为0.当S_{A2}、S_{B2}发生开路故障后,三相电流发生畸变,三相电流残差满足$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)$的数学关系,$\Delta i'_A$、$\Delta i'_B$、$\Delta i_C$的符号正负不定,故障条件下故障相的电流残差幅值也是相同的.同理当S_{A3}、S_{B3}故障发生后,三相电流发生畸变,三相电流残差满足$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)$的数学关系,$\Delta i'_A$、$\Delta i'_B$、$\Delta i_C$的符号正负不定,故障条件下故障相的电流残差幅值也是相同的.



S_{A2}、S_{B2}开路故障

图10 两相双内管开路故障电流残差

Fig.10 Current residuals for two-phase dual inner switch open-circuit fault

2)双管开路故障实验分析.如图11所示为开关管S_{A2}、S_{B2}开路故障时的三相电流残差.

由图11可知A、B两相电流残差同幅值但正负不定,同时满足表11中的数学关系$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i_C\right)$.三相残差皆小于阈值3 A,可判断出当前$S_{A2}$、$S_{B2}$发生开路故障.

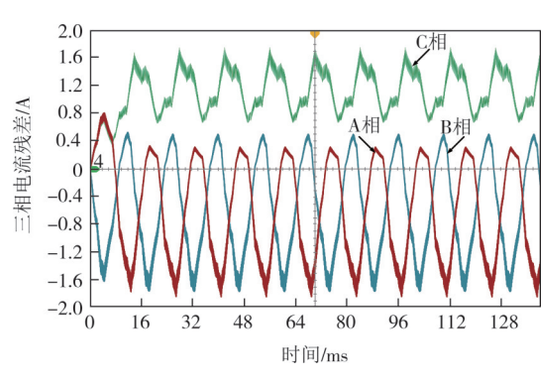


图11 S_{A2}、S_{B2}开路电流残差

Fig.11 S_{A2}、S_{B2} open-circuit current residuals

3.3 三管开路故障

1)三管开路故障仿真分析.如图12所示为三相异侧三内管开路故障即S_{A2}、S_{B2}、S_{C3}发生开路故障系统输出的三相电流残差仿真波形图.

当三相有开关管发生故障后,三相电流发生畸变,三相电流残差满足$\Delta i'_A=-\left(\Delta i'_B+\Delta i'_C\right)$的数学关系.

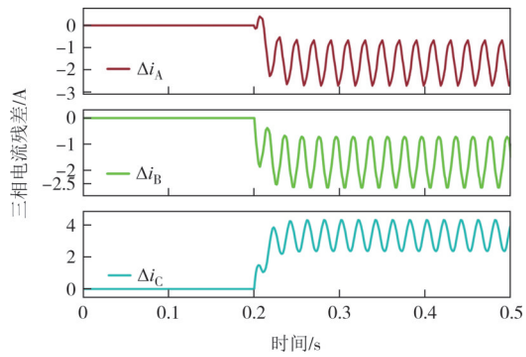


图 12　三相异侧三内管开路故障电流残差

Fig.12　Current residuals for three-phase cross-side three inner-tube open-circuit fault

由图 12 可知,当三相异侧三内管发生故障时,如 S_{A2}、S_{B2}、S_{C3} 发生开路故障,此时三相电流残差符号确定 $\Delta i'_A \leqslant 0$,$\Delta i'_B \leqslant 0$,$\Delta i_C \geqslant 0$,A 相电流残差幅值大于 $W_2 = 3$ A,BC 两相电流残差幅值相等且大于阈值 $W_1 = 1$ A 小于阈值 $W_2 = 3$ A.

2)三管开路故障实验分析.如图 13 所示为开关管 S_{A2}、S_{B2}、S_{C3} 开路故障时的三相电流残差.

由图 13 可知 ABC 三相电流残差异幅值,同时满足表 12 中的数学关系 $\Delta i'_A = -\left(\Delta i'_B + \Delta i'_C\right)$.三相残差皆小于阈值 3 A,可判断出当前 S_{A2}、S_{B2}、S_{C3} 发生开路故障.

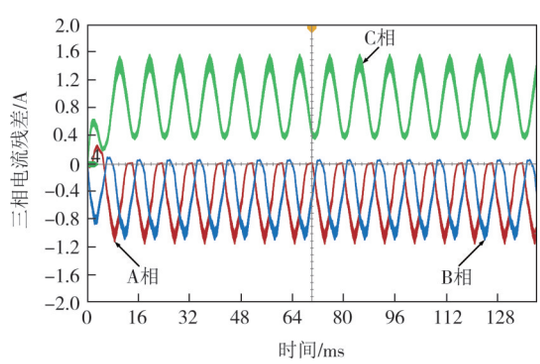


图 13　S_{A2}、S_{B2}、S_{C3} 开路电流残差

Fig.13　S_{A2}、S_{B2}、S_{C3} open-circuit current residuals

仿真与实验结果表明,单管及多管开路故障对应的三相电流残差具有显著特征差异.通过解析残差幅值与极性的数学关联特性,可精准判定开关管故障类型及故障位置,验证了基于模型的残差分析法在故障诊断中的有效性.

针对电机运行过程中的参数摄动特性,需开展故障诊断算法鲁棒性验证.电机驱动系统持续运行 30 min(绕组温度由 20 ℃升至 48 ℃)后停机,测得定子电阻由初始值 5.0 Ω 增至 5.3 Ω(增幅 6%),定子电感由 5.2 mH 降至 4.7 mH(降幅 10%),磁链值保持稳定.当 S_{A2} 发生开路故障时,实验残差幅值仅出现轻微波动,但残差符号及其数学关系仍与理论模型一致,可准确判定故障类型.

在故障诊断过程中,还需验证负载突变工况下的算法鲁棒性.设置电机初始负载转矩为 0.1 N·m 并稳定运行,随后当 S_{A3} 发生开路故障期间(维持初始转矩条件下),将负载转矩阶跃增至 0.13 N·m.通过分析图 14 所示的残差特征表明,在负载动态扰动条件下,所提方法仍能有效保持故障类型的准确辨识能力.

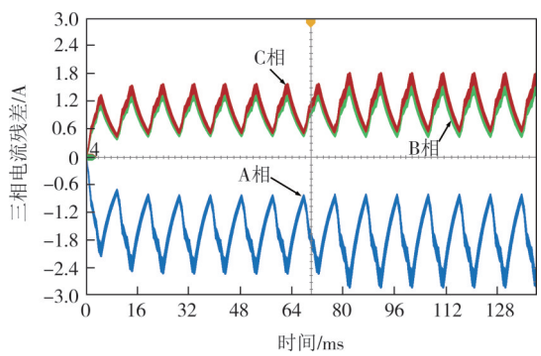


图 14　负载突增三相电流残差

Fig.14　Three-phase current residual under load surge

为评估故障诊断算法的速度,以单管故障为例,实验测得从开关管 S_{A2} 故障发生到系统完成诊断的响应时间为 18 ms,如图 15 所示.

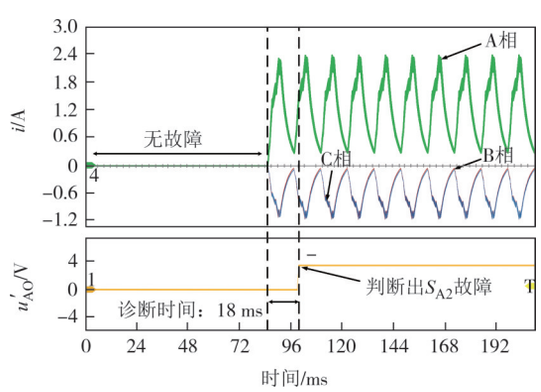


图 15　单管故障诊断速度

Fig.15　Single-switch fault diagnosis speed

鉴于故障类型多样性,不能展示各类故障诊断的速度图,但提供了基于模型的诊断方法与其他两种方法在诊断速度与准确度的对比数据(见表 14).为验证本文所提故障诊断算法的可行性,选取三种典型方法(数据驱动方法中的 SVM/RBF、信号分析方法中的 FFT 以及本文提出的模型方法)进行对比实验.通过文献调研获取前两种方法的基准数据,同时针对单管及多管故障各开展 100 次实验获取模型法的实测数据.

表 14 三种算法平均诊断时间与准确率对比表

Tab.14 Comparison table of average diagnosis time and accuracy for three algorithms

诊断方法	平均诊断时间	平均诊断准确率/%
基于模型	10~30 ms(电流残差)	单管开路:98 多管开路:91
数据驱动	16~20 ms(SVM/RBF)	单管开路:97 多管开路:93
信号分析	60~100 ms(FFT)	单管开路:99 多管开路:87

表 14 的实验结果表明:在典型方法对比中,模型方法与数据驱动方法的平均诊断时间基本持平,而信号分析法耗时显著高于前两类方法;在诊断准确率维度,模型法的单管故障识别能力优于数据驱动方法,但多管并发故障场景下的准确率较后者略有下降.需特别说明的是,表中对比的现有方法仅作为性能基准参照,本研究核心目标在于验证模型法在诊断效率与准确度层面的综合可行性.

需指出模型法在硬件需求上介于数据驱动(低)和信号分析(高)之间,表 15 是三种方法具体的硬件需求及所用典型控制器.

表 15 三种方法的硬件需求及典型控制器选择

Tab.15 Hardware requirements and typical controller selection for three methods

诊断方法	硬件需求	典型控制器
数据驱动	低主频,无需 FPU	STM32F1/ESP8266
基于模型	中主频,可选 FPU	STM32F1/STM32F4
信号分析	高主频,需 FPU	STM32H7/TI_C2000

基于模型的方法核心优势在于机理可解释性、动态适应性和多模态融合能力:相较于数据驱动方法,其无需依赖大量标注数据,可直接通过物理模型定位故障根源;相较于信号分析方法,其能融合离散与连续系统行为,无需专用硬件支持,并提供机理级诊断.因此本文选择基于模型的方法作为故障诊断方案,是基于对模型复杂度、硬件成本和机理可解释性的综合平衡考量.

4 结 论

针对 T 型三电平逆变器驱动的永磁同步电机系统开关管开路故障诊断问题,本文提出一种基于 MLD 模型的快速诊断方法.通过分析正常与故障工况下的电流路径及桥臂电压逻辑关系,构建包含健康状态与典型故障模式的 MLD 模型.采用双残差策略:实时电流与正常模型预测值的偏差生成实际残差,故障模型与正常模型的输出差异形成理论残差;基于两者的幅值与符号特征构建判别准则,实现单管及多管故障的精准定位.实验表明,基于模型的故障诊断方法无需额外硬件或复杂算法,在嵌入式系统具有可行性,能够显著降低诊断成本与复杂度,具有高精度与强鲁棒性,为逆变器容错控制提供技术支撑.

参考文献

[1] 陈怡薇, 徐永海, 袁敞, 等. 基于切换调制策略的 ANPC 三电平逆变器开路故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025,53(2): 27-37.
CHEN Y W, XU Y H, YUAN C, et al. Research on open-circuit fault diagnosis method of ANPC three-level inverter based on switching modulation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(2): 27-37.(in Chinese)

[2] 许水清, 黄文展, 何怡刚, 等. 基于自适应滑模观测器的中点钳位型三电平并网逆变器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2023,38(4): 1010-1022.
XU S Q, HUANG W Z, HE Y G, et al. Open-circuit fault diagnosis method of neutral point clamped three-level grid-connected inverter based on adaptive sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1010-1022.(in Chinese)

[3] 李兵,崔介兵,何怡刚,等. 基于能量谱熵及小波神经网络的有源中性点钳位三电平逆变器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2020,35(10): 2216-2225.
LI B, CUI J B, HE Y G, et al. Fault diagnosis of active neutral point clamped three-level inverter based on energy spectrum entropy and wavelet neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10): 2216-2225.(in Chinese)

[4] 马铭遥, 凌峰, 孙雅蓉, 等. 三相电压型逆变器智能化故障诊断方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7683-7699.
MA M Y, LING F, SUN Y R, et al. Review of intelligent fault diagnosis methods for three-phase voltage-mode inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7683-7699.(in Chinese)

[5] LIANG Y Q, WANG R K, HU B T. Single-switch open-circuit diagnosis method based on average voltage vector for three-level T-type inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(1): 911-921.

[6] 沈艳霞,吴娟, 吴定会. 基于相空间重构和支持向量机的三电平逆变器故障诊断技术[J]. 电源学报,2017,15(6):108-115.
SHEN Y X, WU J, WU D H. Fault diagnosis technology for three-level inverter based on reconstructive phase space and SVM[J]. Journal of Power Supply, 2017,15(6): 108-115.(in Chinese)

[7] 陈石, 张兴敢. 基于小波包能量熵和随机森林的级联 H 桥多

电平逆变器故障诊断[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(2): 284-289.
CHEN S, ZHANG X G. Fault diagnosis for cascaded H-bridge multilevel inverter based on wavelet packet energy entropy and random forest [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2020, 56(2): 284-289.(in Chinese)

[8] 赵丹阳, 董唯光, 高锋阳. 一种改进卷积神经网络的逆变器故障诊断[J]. 电源学报,2020, 18(3): 124-132.
ZHAO D Y, DONG W G, GAO F Y. Improved inverter fault diagnosis based on convolutional neural network[J]. Journal of Power Supply,2020,18(3): 124-132.(in Chinese)

[9] ZHANG S Q,WANG R J,SI Y P,et al. An improved convolutional neural network for three-phase inverter fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3510915.

[10] 陈丹江, 叶银忠. 基于多神经网络的三电平逆变器器件开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 120-126.
CHEN D J, YE Y Z. Fault diagnosis of three level inverter based on multi neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 120-126.(in Chinese)

[11] SIVAPRIYA A, KALAIARASI N, VERMA R, et al. Fault diagnosis of cascaded multilevel inverter using multiscale kernel convolutional neural network[J]. IEEE Access,2023,11:79513-79530.

[12] SI Y P,WANG R J,ZHANG S Q,et al. Fault diagnosis based on attention collaborative LSTM networks for NPC three-level inverters [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,71:3512416.

[13] 朱琴跃, 刘文龙, 谭喜堂, 等. 基于时域信号的三电平逆变器复合故障诊断[J]. 测控技术, 2018,37(11):5-10.
ZHU Q Y, LIU W L, TAN X T, et al. Composite fault diagnosis for three-level inverter based on time domain signal [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(11): 5-10.(in Chinese)

[14] REYES-MALANCHE J A, VILLALOBOS-PINA F J, CABAL-YEPEZ E, et al. Open-circuit fault diagnosis in power inverters through currents analysis in time domain[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2021,70: 3517512.

[15] SUN X R,SONG C H,ZHANG Y W,et al. An open-circuit fault diagnosis algorithm based on signal normalization preprocessing for motor drive inverter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3513712.

[16] ZHANG W W, HE Y G, CHEN J F. A robust open-circuit fault diagnosis method for three-level T-type inverters based on phase voltage vector residual under modulation mode switching [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5309-5322.

[17] YANG C, GUI W H, CHEN Z W, et al. Voltage difference residual-based open-circuit fault diagnosis approach for three-level converters in electric traction systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(3):3012-3028.

[18] 王霞霞, 陈超波, 杨雪芹, 等. 基于ESO-MLD的逆变器开路故障快速诊断方法[J]. 电源学报, 2021,19(3): 153-162.
WANG X X,CHEN C B,YANG X Q,et al. Fast diagnosis method for open-circuit fault of inverter based on ESO-MLD[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 153-162.(in Chinese)