DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.335　　**中图分类号**：TM464　　**文献标志码**：A

T 型三电平并网变换器开路故障检测及容错控制

金　楠，夏英巽，郭磊磊，李琰琰，樊武闯

(郑州轻工业大学电气信息工程学院，郑州 450002)

摘要：为提高并网变换器运行的可靠性，针对 T 型三电平并网变换器提出了 1 种开路故障诊断及容错控制策略。功率器件发生开路故障后，通过分析变换器的运行状态，阐明了变换器输出电流及直流侧电容中点流向各相电流的变化关系；计算变换器输出电流平均值和从直流侧电容中点流向各相电流平均值，将这些平均值与设定的诊断阈值比较，定位故障功率器件。根据故障位置，分为Ⅰ类故障(垂直桥臂故障)和Ⅱ类故障(水平桥臂故障)。针对 2 类故障分别设计相应的容错结构，并提出 1 种 T 型三电平并网变换器的故障诊断与模型预测容错控制策略。实验结果验证了所提方法能快速定位变换器故障功率器件位置，实现故障容错连续运行，提高变换器可靠性。

关键词：T 型三电平变换器；故障诊断；容错控制；开路故障；模型预测控制

Open-circuit Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control of T-type Three-level Grid-connected Converter

JIN Nan, XIA Yingxun, GUO Leilei, LI Yanyan, FAN Wuchuang

(College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To improve the reliability of a grid-connected converter under operation, an open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control strategy is proposed for a T-type three-level grid-connected converter. After an open-circuit fault occurs in a power device, through the analysis of the operating state of the converter, the changing relationship between the converter output current and the currents flowing from the midpoint of the DC-side capacitor to each phase is elucidated. The average value of the converter output current and that of the currents flowing from the midpoint of the DC-side capacitor to each phase are calculated, and these values are compared with the preset diagnostic thresholds to locate the faulty power device. According to their locations, the faults are categorized into Class-I (vertical bridge arm fault) and Class-II (horizontal bridge arm fault). The corresponding fault-tolerant structures are designed for the two types of faults, and a fault diagnosis and model predictive fault-tolerant control strategy is proposed for the T-type three-level grid-connected converter. Experimental results verify that the proposed method can quickly locate the position of the faulty power device of the converter, realize fault-tolerant continuous operation and improve the reliability of the converter.

Keywords: T-type three-level converter; fault diagnosis; fault-tolerant control; open-circuit fault; model predictive control

T 型三电平变换器具有效率高、输出谐波含量低、功耗分布更均衡的优点，广泛应用于新能源发电领域。为保证并网发电系统安全可靠运行，许多研究致力于提高并网变换器可靠性，进而提高新能源并网系统稳定性[1]。并网变换器的功率器件故障包括开路故障和短路故障[2-3]。短路故障可使用功率器件驱动电路进行保护。开路故障时，一般不会发生过流现象，保护不容易动作，因此针对并网变换器进行开路故障检测对提高系统可靠性具有重

收稿日期：2023-09-18；**修回日期**：2023-11-01，2023-11-20；
录用日期：2023-11-30；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U2004166)；河南省科技攻关计划资助项目(212102210021, 232102241026)；河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(22IRTSTHN017)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant U2004166; Science and Technology Project of Henan Province under the grants 212102210021 and 232102241026; Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province under the grant 22IRTSTHN017

要意义[4-6]。

开路故障诊断方法主要有 2 类，包括基于电流和基于电压的诊断方法[7-10]。基于电流的方法通常利用相电流、中点电流和电流残差检测故障。文献[7]根据变换器实际输出电流与参考电流的误差确定故障相，在不同并网条件下，输出电流畸变程度不同，该方法可能会造成误诊断；文献[8]利用变换器输出电流误差，根据残差变化率的特点定位故障，该方法需要将特定的控制信号注入系统，降低变换器输出电流质量。基于电压的方法通过额外硬件电路或电压观测器获得暂态故障信息。文献[9]提出 1 种直流母线电压模型，利用残差评估函数和电流相似函数进行故障诊断；文献[10]将模型分解为正、负、零序电压模型，根据不同电压模型确定故障位置。不同功率器件导致相似的故障特征是三电平变换器故障诊断难点，为解决这一问题，文献[11]根据直流侧电容中点电压变化趋势定位故障器件，采用中点电压平衡控制会影响中点电压变化趋势，造成误诊断；文献[12]提出基于电压模型的故障诊断方法，该方法与调制策略有关，只适用于脉宽调制 PWM(pulse width modulation)策略。

变换器故障容错控制的方法主要分为硬件容错和软件容错 2 类[13-14]。文献[13]采用了硬件容错的方法，使用第 4 个冗余桥臂代替故障桥臂进行容错控制，该方法提高了变换器的可靠性，但增加了成本；文献[14]提出了 1 种基于载波调制算法的有源型中性点钳位型 ANPC(active neutral point clamped)变换器容错控制策略，可实现单个或多个器件故障容错的功能，但该方法未考虑电容中点电压，故障后直流侧中点电位不稳定。

本文首先分析 T 型三电平并网变换器发生开路故障后的运行情况，根据开关状态计算出直流侧电容中点流向各相的电流。计算变换器输出电流平均值和中点流向各相电流平均值，将其与设定的阈值比较，从而定位故障位置。根据故障位置，分为Ⅰ类故障(垂直桥臂故障)和Ⅱ类故障(水平桥臂故障)。分别建立Ⅰ类故障和Ⅱ类故障的容错结构，基于模型预测控制 MPC(model predictive control)策略对 2 类故障分别进行容错控制。最后，搭建 T 型三电平并网变换器实验平台，验证所提出的故障诊断及容错控制策略的有效性。

1 T 型三电平并网变换器开路故障检测

1.1 开路故障检测方法

T 型三电平变换器的结构如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流侧电压；C_1 和 C_2 为直流侧电容；i_o 为直流侧电容中点流出电流；i_a、i_b 和 i_c 为变换器输出电流；i_{ao}、i_{bo} 和 i_{co} 为直流侧电容中点流向各相的

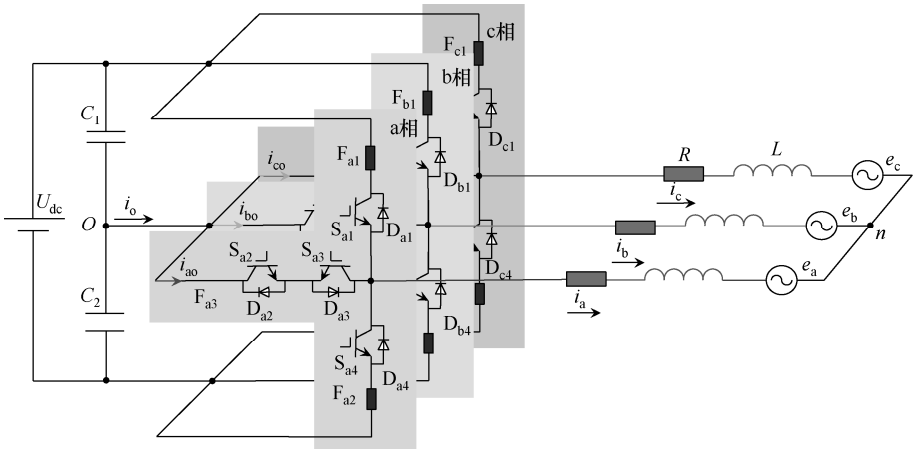


图 1 T 型三电平并网变换器结构

Fig. 1 Structure of T-type three-level grid-connected converter

电流；L 为滤波电感；R 为滤波电感的寄生电阻；e_a、e_b 和 e_c 为网侧电压；F_{k1} 和 F_{k2} 为快速熔断器。T 型三电平并网变换器的每相桥臂由 4 个功率器件构成，分别为 S_{kx}(其中 k=a, b, c；x=1, 2, 3, 4)。每相桥臂有 3 种开关状态，分别为 P 状态(S_{k1} 和 S_{k2} 导通，S_{k3} 和 S_{k4} 关闭)、O 状态(S_{k2} 和 S_{k3} 导通，S_{k1} 和 S_{k4} 关闭)和 N 状态(S_{k3} 和 S_{k4} 导通，S_{k1} 和 S_{k2} 关闭)。因此，T 型三电平并网变换器共有 3^3=27 种开关状态，每种开关状态对应 1 个电压矢量，如图 2 所示。

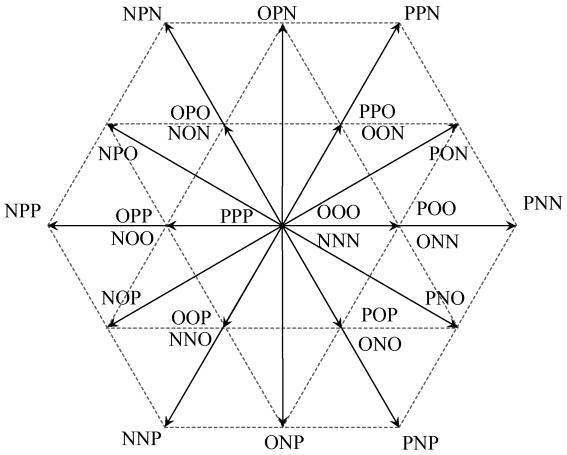


图 2　T 型三电平并网变换器电压矢量

Fig. 2 Voltage vectors of T-type three-level grid-connected converter

根据功率器件故障下变换器的运行情况[15]分析可知，功率器件 S_{k1} 和 S_{k4} 的故障运行情况类似，S_{k2} 和 S_{k3} 的故障运行情况类似。为准确定位故障位置，将各相桥臂分为上半桥臂和下半桥臂，上半桥臂包括 S_{k1} 和 S_{k2} 2 个功率器件，下半桥臂包括 S_{k3} 和 S_{k4} 2 个功率器件(k=a, b, c)。

以 a 相为例，假设故障位置位于 a 相的上半桥臂。若功率器件 S_{a1} 发生开路故障，变换器输出 a 相电流波形如图 3(a)所示。P 状态受到影响，故障相正向电流缺失。由于 u_{OA}>0，电流将通过 S_{a2} 和 D_{a3} 续流，故障后变换器输出 a 相电流在正半波仍有短暂的电流存在。因续流存在的电流 i_a 是从变换器直流侧电容中点流向故障相，变换器输出电流 i_a 与 i_{ao} 重合。

若功率器件 S_{a2} 发生开路故障，变换器输出 a 相电流波形如图 3(b)所示。O 状态正向电流流通路径受到影响，i_{ao} 的正向电流完全缺失。S_{a2} 发生开路故障不会影响 P 状态和 N 状态，变换器输出 a 相正向电流不会缺失。

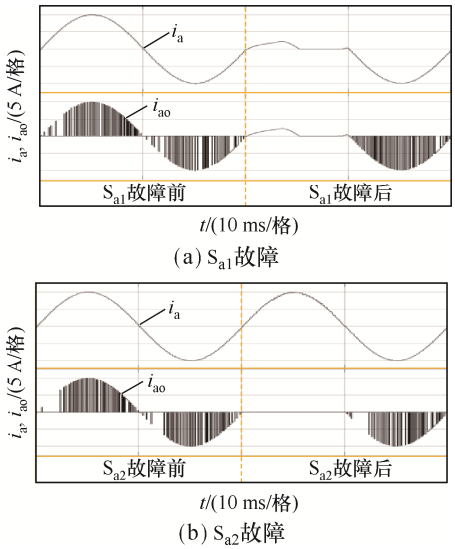


图 3　变换器输出电流 i_a 和中点流向 a 相的电流 i_{ao}

Fig. 3 Converter output current i_a and current flowing from midpoint to phase-a i_{ao}

综上所述，当 a 相上半桥臂发生故障时(S_{a1} 和 S_{a2})，i_{ao} 的正向电流缺失，非故障相的电流 i_{bo} 和 i_{co} 不会缺失。类似地，若开路故障位置发生在 a 相下半桥臂(S_{a3} 和 S_{a4})，i_{ao} 的负向电流缺失，非故障相的电流 i_{bo} 和 i_{co} 不会缺失。

对比直流侧电容中点流向各相的电流 i_{ao}、i_{bo} 和 i_{co} 进而确定故障相，具体步骤如下。

根据基尔霍夫电流定律得出

$$i_o = i_{ao} + i_{bo} + i_{co} \tag{1}$$

变换器开关状态定义为

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{P状态} \\ 0 & \text{O状态} \\ -1 & \text{N状态} \end{cases} \tag{2}$$

式中：k=a, b, c。

根据 i_{ko} 与开关状态的对应关系得出

$$\begin{cases} i_{ao} = (1-|S_a|)i_a \\ i_{bo} = (1-|S_b|)i_b \\ i_{co} = (1-|S_c|)i_c \end{cases} \tag{3}$$

根据式(1)和式(2)，计算 i_{ko}，即

$$\begin{cases} i_{ao}=i_o-[(1-|S_b|)i_b+(1-|S_c|)i_c] \\ i_{bo}=i_o-[(1-|S_a|)i_a+(1-|S_c|)i_c] \\ i_{co}=i_o-[(1-|S_a|)i_a+(1-|S_b|)i_b] \end{cases} \tag{4}$$

1.2 故障桥臂定位

当开路故障位于上半桥臂时，直流侧电容中点流向故障相的正向电流缺失；当开路故障位于下半桥臂时，直流侧电容中点流向故障相的负向电流缺失。通过计算 i_{ko} 的平均电流 $i_{ko,ave}$(其中 k = a, b, c)，并与设置的诊断阈值 I_{thr1} 比较。当 $i_{ko,ave}<-I_{thr1}$ 时，故障位于上半桥臂。当 $i_{ko,ave}>I_{thr1}$ 时，故障位于下半桥臂。

1.3 故障器件定位

当上半桥臂功率器件 S_{a1} 发生开路故障时，变换器输出故障相的正向电流缺失，如图 3(a)所示。若上半桥臂功率器件 S_{a2} 发生故障，与功率器件 S_{a1} 发生开路故障时相比，参考电流与输出电流的误差减小，如图 3(b)所示。计算 i_a 的平均值 $i_{a,ave}$，并与诊断阈值 I_{thr2} 比较可定位故障器件。当 $i_{a,ave}<-I_{thr2}$ 时，功率器件 S_{a1} 发生开路故障。当 $i_{a,ave}>-I_{thr2}$ 时，功率器件 S_{a2} 发生开路故障。

综上所述，将 i_k 和 i_{ko} 的平均值与诊断阈值比较可实现故障器件的准确定位。所提故障诊断方法的流程如图 4 所示，其中 S_{nx} 表示具体的故障开关器件。

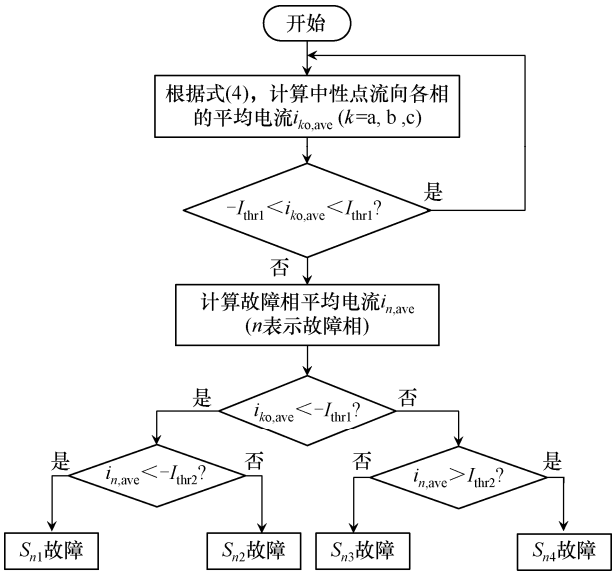


图 4 功率器件开路故障检测方法流程

Fig. 4 Flow chart of power device open-circuit fault detection method

2 T 型三电平变换器故障容错控制策略

通过功率器件发生开路故障后的运行情况分析可知，功率器件 S_{a1} 和 S_{a4} 发生开路故障对变换器的影响类似，功率器件 S_{a2} 和 S_{a3} 发生开路故障对变换器的影响类似。根据故障位置，将故障类型分为 2 类，分别是Ⅰ类故障(功率器件 S_{x1} 和 S_{x4})和Ⅱ类故障(功率器件 S_{x2} 和 S_{x3})发生故障。并分别对 2 种类型的故障进行容错控制。

T 型三电平并网变换器数学模型为

$$L\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}-R\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}-\boldsymbol{e}_{\alpha\beta} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}=[i_\alpha \quad i_\beta]^{\mathrm{T}}$，$i_\alpha$ 和 i_β 为变换器输出电流在 $\alpha\beta$ 轴的分量；$\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}=[u_\alpha \quad u_\beta]^{\mathrm{T}}$，$u_\alpha$ 和 u_β 为变换器输出电压在 $\alpha\beta$ 轴的分量；$\boldsymbol{e}_{\alpha\beta}=[e_\alpha \quad e_\beta]^{\mathrm{T}}$，$e_\alpha$ 和 e_β 为电网电压在 $\alpha\beta$ 轴的分量。

将式(5)进行欧拉离散，得到

$$\frac{L}{T}[\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K+1)-\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K)]=\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}(K)-R\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K)-\boldsymbol{e}_{\alpha\beta}(K) \tag{6}$$

式中：T 为控制周期；$X(K)$和 $X(K+1)$分别为变量 X 在 K 时刻和 K+1 时刻的值。

化简式(6)，得到 K+1 时刻的预测电流为

$$\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K+1)=\left(1-\frac{RT}{L}\right)\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K)+\frac{T}{L}[\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}(K)-\boldsymbol{e}_{\alpha\beta}(K)] \tag{7}$$

2.1 Ⅰ类故障容错结构电压矢量分析

当 T 型变换器发生Ⅰ类故障时，故障相通过功率器件 S_{k2} 和 S_{k3} 直接连接到直流侧电容中点。以 a 相为例，Ⅰ类故障后的容错结构如图 5 所示。

变换器发生Ⅰ类故障后，故障相仅有 O 状态，非故障相各有 3 种状态，共有 9 个开关状态。故障后可用电压矢量如图 6 所示。

2.2 Ⅱ类故障容错结构电压矢量分析

变换器发生Ⅱ类故障时，故障相 O 状态受到影响。以 a 相为例，发生Ⅱ类故障后功率器件 S_{a2} 和 S_{a3} 一直保持关断状态，如图 7 所示。

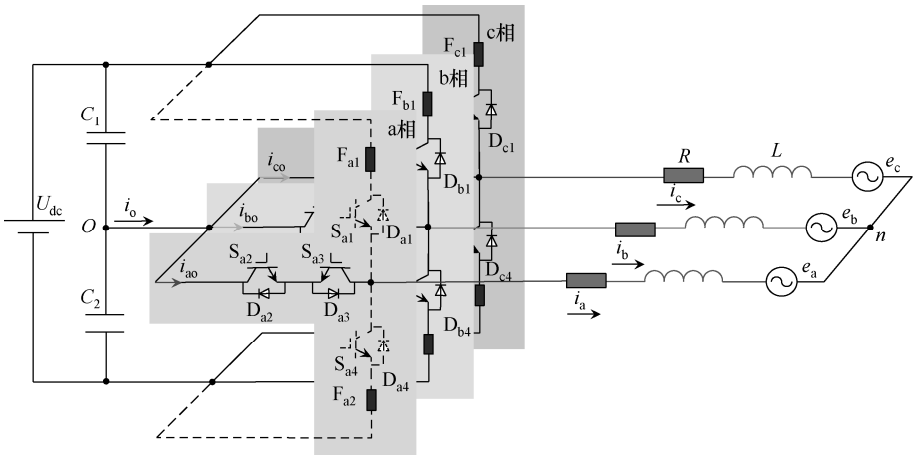


图 5　Ⅰ类故障 T 型三电平变换器容错结构

Fig. 5 Fault-tolerant structure of T-type three-level converter under Class-Ⅰ fault

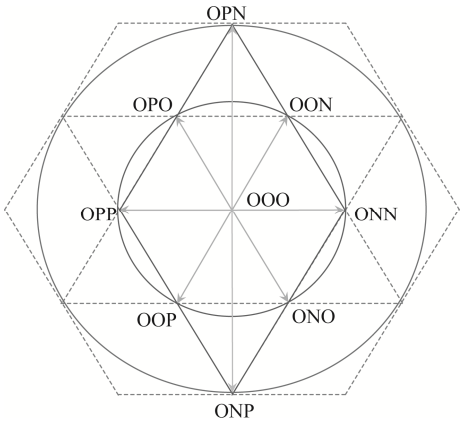


图 6　a 相桥臂Ⅰ类故障时电压矢量分布

Fig. 6 Voltage vector distribution of phase-a bridge arm under Class-Ⅰ fault

a 相桥臂Ⅱ类故障时，故障相只有 P 状态和 N 状态，非故障相各有 3 种状态，共有 18 个开关状态。电压矢量分布如图 8 所示。

2.3　模型预测容错控制策略

根据有限控制集模型预测控制理论，将不同故障后可用电压矢量代入式(7)得到预测电流，评估代价函数，选择使其最小的电压矢量作为最优电压矢量并应用于下一时刻。

故障后，直流侧电流经电容中点直接流入故障相，加剧了直流侧中点电压不平衡的问题。通过开关状态预测直流侧上下两电容的电压差，并在代价函数中加入预测结果，实现中点电压平衡。

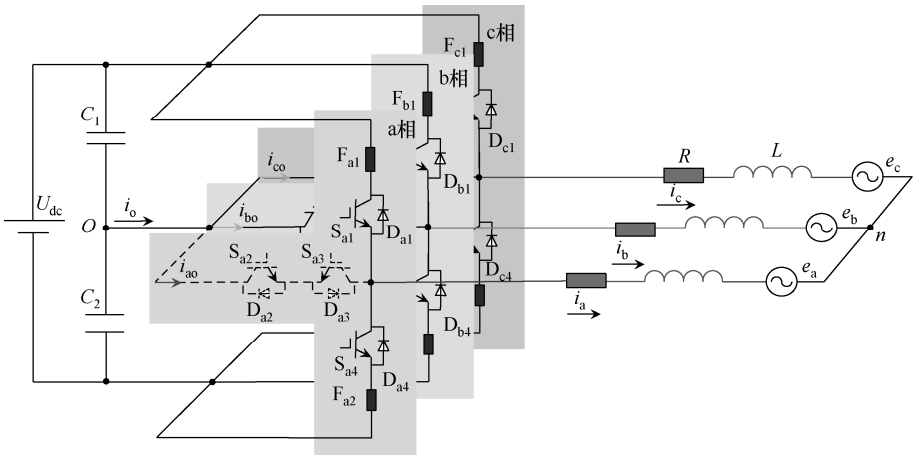


图 7　Ⅱ类故障 T 型三电平变换器容错结构

Fig. 7 Fault-tolerant structure of T-type three-level converter under Class-Ⅱ fault

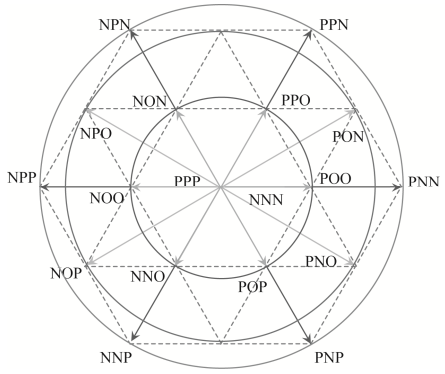


图 8 a 相桥臂Ⅱ类故障时电压矢量分布

Fig. 8 Voltage vector distribution of phase-a bridge arm under Class-Ⅱ fault

直流侧电容电压的表达式为

$$\begin{cases} i_{C_1}=C_1\dfrac{\mathrm{d}u_{C_1}}{\mathrm{d}t} \\ i_{C_2}=C_2\dfrac{\mathrm{d}u_{C_2}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{8}$$

式中：i_{C_1}和i_{C_2}分别为流过直流侧电容 C_1和 C_2的电流；u_{C_1}和u_{C_2}分别为直流侧电容C_1和C_2的电压。

将式(8)离散化得到第 K+1 时刻的电容电压为

$$\begin{cases} u_{C_1}(K+1)=u_{C_1}(K)+T\dfrac{i_{C_1}}{C_1} \\ u_{C_2}(K+1)=u_{C_2}(K)+T\dfrac{i_{C_2}}{C_2} \end{cases} \tag{9}$$

直流侧 2 个电容值相等，电容电压差为

$$\begin{aligned} \Delta u_C(K+1)&=u_{C_1}(K+1)-u_{C_2}(K+1)= \\ &[u_{C_1}(K)-u_{C_2}(K)]+T\frac{i_{C_1}-i_{C_2}}{C}= \\ &[u_{C_1}(K)-u_{C_2}(K)]+T\frac{i_{\mathrm{o}}}{C} \end{aligned} \tag{10}$$

式中，C为电容C_1和C_2的值。

由式(1)和式(3)得出

$$i_{\mathrm{o}}=(1-|S_{\mathrm{a}}|)i_{\mathrm{a}}+(1-|S_{\mathrm{b}}|)i_{\mathrm{b}}+(1-|S_{\mathrm{c}}|)i_{\mathrm{c}} \tag{11}$$

将式(11)代入式(10)，得到预测电容电压差为

$$\begin{aligned} \Delta u_C(K+1)=&[u_{C_1}(K)-u_{C_2}(K)]+ \\ &T\frac{(1-|S_{\mathrm{a}}|)i_{\mathrm{a}}+(1-|S_{\mathrm{b}}|)i_{\mathrm{b}}+(1-|S_{\mathrm{c}}|)i_{\mathrm{c}}}{C} \end{aligned} \tag{12}$$

将预测电流和预测直流侧电容电压差代入代价函数，即

$$g=\left|\boldsymbol{i}_{\alpha\beta\mathrm{ref}}(K+1)-\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K+1)\right|+\lambda\left|\Delta u_C(K+1)\right| \tag{13}$$

式中：$i_{\alpha\beta\mathrm{ref}}=[i_{\alpha\mathrm{ref}}\quad i_{\beta\mathrm{ref}}]^{\mathrm{T}}$，$i_{\alpha\mathrm{ref}}$和$i_{\beta\mathrm{ref}}$分别为参考电流在$\alpha\beta$轴的分量；$\lambda$为权重系数。

有限控制集模型预测控制策略存在时间延迟，可通过预测的 K+1 时刻的值进一步预测 K+2 时刻的最优电压矢量，进行补偿。具有延时补偿功能的代价函数为

$$g=\left|\boldsymbol{i}_{\alpha\beta\mathrm{ref}}(K+2)-\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}(K+2)\right|+\lambda\left|\Delta u_C(K+2)\right| \tag{14}$$

3 实验验证

为了验证所提 T 型三电平并网变换器故障诊断及容错控制策略的有效性，搭建如图 9 所示的 StarSim 硬件在环实验平台，控制电路由快速控制原型 RCP(rapid control prototyping)完成，硬件电路部分由硬件在环 HIL (hardware-in-the-loop)测试平台完成，实验参数见表 1。

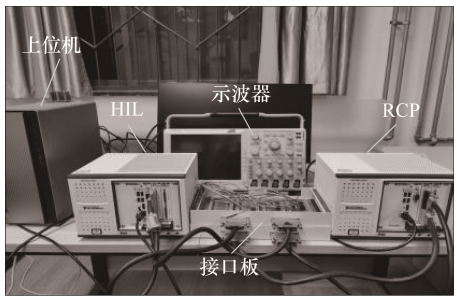


图 9 T 型三电平并网变换器故障容错硬件在环实验平台

Fig. 9 T-type three-level grid-connected converter fault-tolerant HIL experimental platform

表 1 T 型三电平并网变换器故障容错实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of fault-tolerant structure for T-type three-level grid-connected converter

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	600
电容 C_1, C_2/μF	1 200
电感 L/mH	10
电阻 R/Ω	0.02
相电压有效值 e/V	110
电网频率 f/Hz	50
采样频率 f_{s}/kHz	10
权重系数 λ	1
开关频率 f_{sw}/Hz	1 340

3.1 功率器件开路故障检测实验验证

图 10 为 T 型三电平变换器 a 相桥臂发生开路故障的变换器输出电流及故障诊断结果。图 10(a)表明，当功率器件 S_{a1} 发生开路故障后，由于 $u_{OA}>0$，a 相正向电流通过 S_{a2} 和 D_{a3} 续流直到电流降为 0，D_{a3} 承受反向电压关断，此时故障相的输出正向电流为 0。故障发生后，flag 由 0 跳变为 1，表明 S_{a1} 发生故障。图 10(b)表示功率器件 S_{a2} 发生开路故障后变换器输出电流及故障诊断结果。T 型三电平并网变换器对Ⅱ类故障具有一定的自容错能力，当功率器件 S_{a2} 发生开路故障后，故障后变换器输出电流波形为正弦波，故障相电流纹波增大。故障发生后，flag 由 0 跳变为 2，表明 S_{a2} 发生故障。图 10(c)和(d)分别表示功率器件 S_{a3} 和 S_{a4} 发生开路故障后的变换器输出电流波形和故障诊断结果。功率器件 S_{a3} 发生开路故障后，a 相负向电流纹波增大，flag 由 0 跳变为 3，表明 S_{a3} 发生故障。功率器件 S_{a4} 发生开路故障后，故障相输出负向电流降为 0，flag 由 0 跳变为 4，表明 S_{a4} 发生故障。

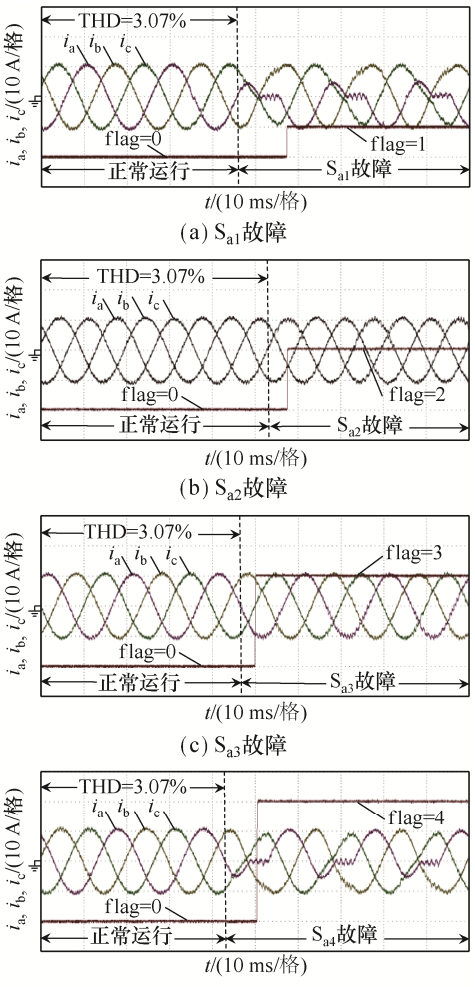


图 10　a 相开路故障时变换器输出电流及故障诊断结果

Fig. 10 Output current and fault diagnosis results of converter when open-circuit fault occurs in phase-a

诊断阈值 I_{thr1}=0.35 A、I_{thr2}=1.00 A。故障诊断的实验结果与理论分析一致，所提方法能够快速定位故障发生的位置。

3.2 故障容错控制策略实验验证

图 11 表示 a 相发生Ⅰ类故障后的变换器输出电流和上、下两电容电压。S_{a1} 故障后 a 相正向电流缺失，非故障相电流畸变。采用所提出的容错控制策略前，可用电压矢量为 27 个，采用所提出的容错控制策略后，共有 9 个开关状态，可用电压矢量为 9 个，三相电流接近正弦波，THD=4.02%。Ⅰ类故障进行容错控制后，未采用中点电压平衡策略时上、下两电容电压差较大，中点电压平衡后上、下两电容电压基本保持一致。

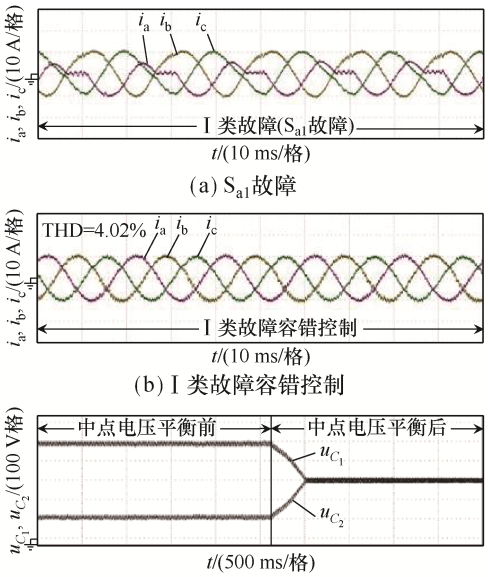
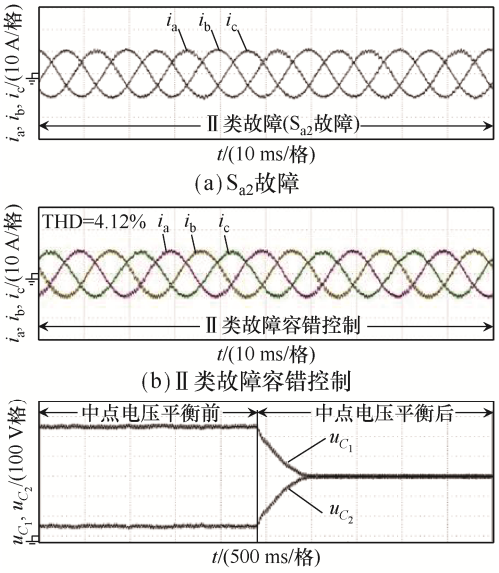


图 11　a 相Ⅰ类故障时(S_{a1} 故障)变换器输出电流和直流侧电容中点电压

Fig. 11 Converter output current and midpoint voltage of DC-side capacitor when Class-Ⅰ fault (S_{a1} fault) occurs in phase-a

图 12 表示 a 相发生Ⅱ类故障下的变换器输出

电流波形，采用所提出的容错控制策略后，可用电压矢量为 18 个，THD=4.12%。T 型三电平并网变换器对Ⅱ类故障具有一定的自容错能力，故障后变换器输出电流波形良好。Ⅱ类故障进行容错控制后，未采用中点电压平衡策略时上、下两电容电压差较大，中点电压平衡后两电容电压基本保持一致。



(a) S_{a2}故障

(b) Ⅱ类故障容错控制

(c) 采用中点电压平衡策略前后的电容电压

图 12 a 相Ⅱ类故障时(S_{a2}故障)变换器输出电流和直流侧电容中点电压

Fig. 12 Converter output current and midpoint voltage of DC-side capacitor when Class-Ⅱ fault (S_{a2} fault) occurs in phase-a

4 结论

本文分析了 T 型三电平并网变换器发生开路故障后的运行状态，提出了 1 种开路故障诊断及故障容错控制方法。主要得出以下结论。

(1)T 型三电平并网变换器发生故障后，直流侧电容中点流向故障相的电流和变换器输出电流缺失。通过计算直流侧电容中点流向各相电流平均值，并与阈值 I_{thr1} 比较后，确定故障桥臂。

(2)若故障功率器件位于纵向桥臂，故障相输出电流缺失；若故障功率器件位于横向桥臂，故障相输出电流误差增大。通过计算变换器输出电流平均值，并与阈值 I_{thr2} 比较，确定故障器件位置，实现变换器开路故障检测。

(3)根据故障类型和容错结构，提出 1 种模型预测容错控制策略，无需增加额外的硬件冗余，即可实现故障容错连续运行，提高变换器运行可靠性。

实验结果验证了本文提出方法的有效性。本文中的诊断阈值的选取通过实验试凑法得到，并网条件改变时诊断阈值也会改变，因此需进一步深入研究更合适的诊断阈值的选取方法。

参考文献：

[1] 金楠, 肖晗, 谢欢, 等. NPC 三电平虚拟同步机桥臂故障容错模型预测控制[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 147-157.
Jin Nan, Xiao Han, Xie Huan, et al. Fault-tolerant model predictive control for bridge arm of NPC three-level virtual synchronous generator [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 147-157. (in Chinese)

[2] 朱旭, 胡长生, 董璧韬. 一种基于级联 H 桥多电平变换器的故障容错控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 199-207.
Zhu Xu, Hu Changsheng, Dong Bitao. Fault-tolerant control method for cascaded H-bridge multilevel converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 199-207. (in Chinese)

[3] 周健耀, 王天真, 韩金刚, 等. 一种特定系数小波重构数据增强逆变器故障诊断方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 289-296.
Zhou Jianyao, Wang Tianzhen, Han Jingang, et al. Fault diagnosis method for inverter based on data augmentation with specific coefficients wavelet reconstruction [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 289-296. (in Chinese)

[4] 刘蔚, 李万铨, 王明峤, 等. 复杂工况下的永磁同步电机典型绕组故障在线诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1764-1776.
Liu Wei, Li Wanquan, Wang Mingqiao, et al. Online diagnosis of typical winding faults in permanent magnet synchronous motors under complex working conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1764-1776. (in Chinese)

[5] 朱琴跃, 于逸尘, 占岩文, 等. 基于短时傅里叶变换和深度网络的模块化多电平换流器子模块 IGBT 开路故

障诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3840-3854.
Zhu Qinyue, Yu Yichen, Zhan Yanwen, et al. IGBT open-circuit fault diagnosis of modular multilevel converter sub-module based on short-time fourier transform and deep networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3840-3854. (in Chinese)

[6] 许水清, 许晓凡, 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关管和电流传感器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4066-4078.
Xu Shuiqing, Xu Xiaofan, He Yigang, et al. A diagnosis method for power switch and current sensor faults in grid-connected three-level neutral-point clamped inverters based on adaptive sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4066-4078. (in Chinese)

[7] Choi U M, Lee J S, Blaabjerg F, et al. Open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control for a grid-connected NPC inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7234-7247.

[8] Ge Xinglai, Pu Junkai, Gou Bin, et al. An open-circuit fault diagnosis approach for single-phase three-level neutral-point-clamped converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2559-2570.

[9] Yang Chao, Gui Weihua, Chen Zhiwen, 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.

[10] Wang Ke, Tang Yi, Zhang Chuanjin. Open-circuit fault diagnosis and tolerance strategy applied to four-wire T-type converter systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5764-5778.

[11] Chen Jie, Zhang Chenghui, Xing Xiangyang, et al. An open-circuit fault diagnosis method for T-type three-level rectifiers [C]// 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA, 2019: 5502-5506.

[12] Li Zhan, Zhao Bohui, Zhang Xin, et al. An IGBT open-circuit fault diagnosis method for grid-tied T-type three-level inverters [C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA, 2020: 5324-5327.

[13] Katebi R, He Jiangbiao, Weise N. An advanced three-level active neutral-point-clamped converter with improved fault-tolerant capabilities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6897-6909.

[14] Azer P, Ouni S, Narimani M. A novel fault-tolerant technique for active-neutral-point-clamped inverter using carrier-based PWM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 1792-1803.

[15] 周朋飞, 陈权, 王群京. T 型三电平逆变器开路故障容错控制研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(2): 104-107.
Zhou Pengfei, Chen Quan, Wang Qunjing. Research on fault-tolerant control of open-circuit fault in T-type three-level inverter [J]. Power Electronics, 2018, 52(2): 104-107. (in Chinese)



金楠

作者简介：

金楠(1982—)，男，博士，教授。研究方向：电力电子与电能变换。E-mail：jinnan@zzuli.edu.cn。

夏英巽(1996—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：并网变换器开路故障检测。E-mail：15516918425@163.com。

郭磊磊(1987—)，男，博士，副教授。研究方向：并网逆变器控制。E-mail：2016045@zzuli.edu.cn。

李琰琰(1987—)，女，博士，讲师。研究方向：并网逆变器控制。E-mail：2017069@zzuli.edu.cn。

樊武闯(1995—)，男，硕士研究生。研究方向：并网变换器开路故障检测。E-mail：332101050054@zzuli.edu.cn。

(责任编辑：耿越)