

T型三电平并网变换器电流重构模型预测控制策略

吴振军¹, 谢欢¹, 代东任¹, 郭磊磊¹, 肖晗¹, 李诚帅²

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南九域恩湃电力技术有限公司, 河南 郑州 450052)

摘要: T型三电平变换器是连接新能源和电网的关键设备, 其电流传感器故障会导致控制策略失效, 影响并网系统安全稳定运行。为提高T型三电平并网变换器可靠性, 提出一种基于电流重构的模型预测控制策略。该策略分析相电流和电压矢量之间的关系, 分别用直流电流、正常相电流和预测电流重构故障电流。重构故障电流所需的电压矢量按照重构方法分成两个电压矢量集合。连续使用预测电流重构故障相电流会导致重构电流积累误差。因此需要检测当前时刻电压矢量集合, 确保下一时刻选择不同的电压矢量集合, 避免重构电流积累误差。实验结果表明, 在电流传感器故障后, 所提策略可使T型变换器容错运行且并网电流拥有较低的电流总谐波失真率, 提高了并网系统可靠性。

关键词: T型三电平变换器; 传感器故障; 电流重构; 模型预测; 矢量集合

Model predictive control strategy for current reconstruction of a T-type three-level grid-tied converter

WU Zhenjun¹, XIE Huan¹, DAI Dongren¹, GUO Leilei¹, XIAO Han¹, LI Chengshuai²

(1. School of Electrical Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Jiuyu EPRI Electric Power Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The T-type 3-level converter is key piece of equipment connecting new energy to the grid. If it experiences a current sensor fault, this will lead to the failure of control strategy and affect the safe and stable operation of the grid-tied system. A model predictive control strategy based on current reconstruction is proposed to improve the reliability of the T-type 3-level grid-tied converter. The relationship between phase current and voltage vector is analyzed. Fault current is reconstructed by DC current, normal phase current, and predicted current, respectively. The voltage vectors required for fault current reconstruction are divided into two voltage vector sets according to reconstruction methods. The continuous use of the prediction current to reconstruct the fault phase current will lead to an accumulation error in the reconstruction current. Therefore, it is necessary to detect the voltage vector set at the current moment to ensure that different voltage vector sets are selected at the next moment to avoid current accumulation errors in reconstruction. Experimental results show that the proposed strategy can realize fault-tolerant operation after a current sensor failure of a T-type converter, offers a lower current total harmonic distortion rate, and improves the reliability of the grid-tied system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2004166).

Key words: T-type three-level converter; sensor fault; current reconstruction; model predictive; vector sets

0 引言

提高并网变换系统故障容错运行能力可有效提高电力电子装置的可靠性, 为实现“双碳”目标构建重要保障。在新能源并网应用领域, T型三电平

并网变换器能实现新能源发电到电网的电能转换, 是连接“源-网”的关键设备, 其可靠性对并网变换系统至关重要^[1-7]。T型三电平并网变换器的可靠运行是并网变换系统稳定工作的基础, 一旦发生故障, 会对电网造成严重影响^[8-10]。然而在运行过程中, 电流传感器会受到电流冲击、过热和机械应力二次侧开路等因素影响而出现故障, 威胁并网变换系统的可靠运行^[11-12]。电流传感器故障会降低并网变换系统可靠性, 因此对电流传感器故障后并网变换系

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2004166); 河南省重点研究开发推广专项(科技攻关)项目资助(212102210021); 河南省高等学校科技创新团队基金项目资助(22IRTSTHN017)

统容错运行开展研究是非常迫切的。

目前许多学者对并网变换系统电流传感器故障后容错运行进行研究,提出了容错控制算法^[13-21]。针对两电平并网变换系统,文献[13]通过分解直流电流重构故障电流,并将重构电流和电流传感器采样电流对比判断电流传感器是否故障,若电流传感器故障则用重构电流代替采样电流进行控制。文献[14-20]使用在虚拟矢量作用下的直流母线电流重构故障相电流,但因为直流电流稳定需要时间,所以存在电流重构观测盲区。文献[14]针对直流电流采样振荡问题,提出用延迟电流避开电流振荡。文献[15]在观测盲区采用插入测量脉冲和电压矢量近似的方法实现电流重构。文献[16]通过修改空间矢量脉宽调制占空比对观测盲区进行补偿,进而在观测盲区重构电流。文献[17]根据线电压调制原理计算、调整三相占空比,依据伏秒平衡原则对占空比进行补偿,提出 π 型缓冲电路优化重构电流。文献[18]分析常规脉宽调制技术(Pulse Width Modulation, PWM),通过修正 PWM 信号实现观测盲区电流重构,有效降低重构电流纹波。文献[19]对电压矢量空间观测盲区进行划分,在不同的区域采用不同的调制调整策略实现电流重构。文献[20]定义直流母线最小采样时间,通过插入测量矢量和补偿矢量在观测盲区实现电流重构。

以上研究需要进行复杂的 PWM 调制,且主要针对两电平并网变换器和电机控制领域,未对三电平并网变换系统深入研究。针对三电平并网变换器,文献[21]在直流侧中点插入级联电阻,通过测量中点电流重构故障电流,但该方法不仅需要精细的分类且每种类型都需要复杂的计算。

有限集模型预测控制(Finite Control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)具有鲁棒性良好、无需 PWM 调制、控制灵活性强等优点^[22-25]。本文使用 FCS-MPC 策略研究并网变换系统电流传感器故障后 T 型三电平并网变换器容错控制方法。分析电流传感器故障后工作机理,利用直流母线电流和预测电流建立电流重构模型和电流预测控制模型,提出一种基于电流重构的模型预测控制策略,使用两个电压矢量集合交替控制,实现电流传感器故障后容错连续运行。实验结果表明,所提控制策略能快速跟踪电流变化,提高了 T 型三电平并网变换器的故障容错能力。

1 基于 MPC 的相电流重构模型

1.1 直流母线电流重构故障相电流模型

如图 1, T 型三电平并网变换器输出端装设两

个电流传感器采样三相电流。一旦电流传感器(以 B 相为例)出现故障,控制系统无法获得 B 相和 C 相电流,导致变换器控制失效,对电网造成严重影响。

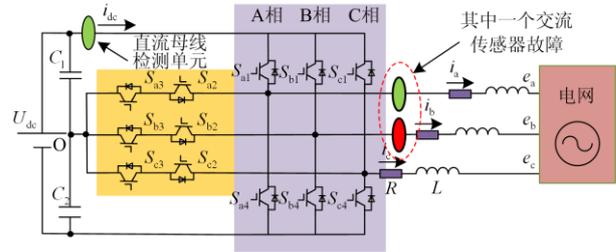


图 1 T 型三电平并网变换器拓扑

Fig. 1 Topology of T-type 3-level grid-tied converter

然而,直流母线电流在不同的开关状态下可以反映相电流信号^[26-27],其对应关系如式(1)。

$$i_{dc} = \frac{(S_a^2 + S_a)i_a + (S_b^2 + S_b)i_b + (S_c^2 + S_c)i_c}{2} \quad (1)$$

式中: i_{dc} 为直流电流; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流; S_a 、 S_b 、 S_c 为三相桥臂开关状态。

根据式(1),故障相电流用式(2)重构。

$$i_b = \begin{cases} \frac{2i_{dc} - (S_a^2 + S_a) - (S_c^2 + S_c)}{(S_b^2 + S_b) - (S_c^2 + S_c)} i_a & B^* \neq 0 \\ \text{无法重构} & B^* = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $B^* = (S_b^2 + S_b) - (S_c^2 + S_c)$ 。

根据式(2),B 相电流传感器故障后,故障相电流可由电压矢量、直流电流和正常相电流重构^[28]。记此类电压矢量为第一类电压矢量,如图 2 所示,组成集合记为电压矢量集合 I 。

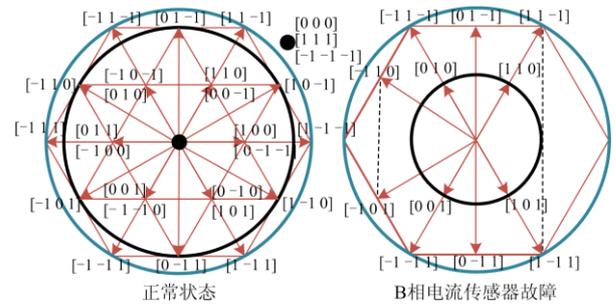


图 2 T 型变换器电压矢量和第一类电压矢量

Fig. 2 T-type converter voltage vectors and type 1 voltage vectors

1.2 预测电流重构故障相电流模型

仅使用电压矢量集合 I 会降低直流侧电压利用率。因此在图 2 中引入 6 个电压矢量((1,0,0), (-1,0,0), (1,0,-1), (1,-1,0), (1,-1,-1)和(-1,1,1))可得图 3,记为第二类电压矢量,和第一类电压矢量组成的集合记为电压矢量集合 II 。引入的 6 个电压矢量使用预测电流重构故障相电流。在引入 6 个电压矢量后直

流侧电压利用率仍为 100%(黑色圆边界)。

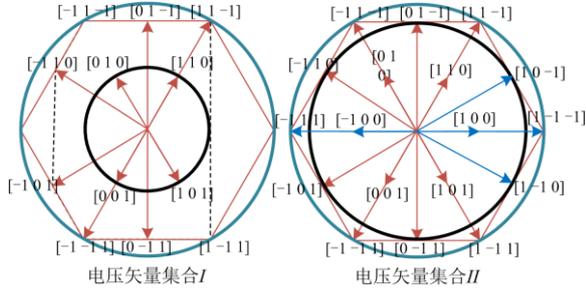


图 3 用于重构电流的电压矢量

Fig. 3 Voltage vector for reconstructing current

根据图 2, 在电流传感器故障后, 故障相电流可在 12 个电压矢量作用下用直流电流和正常相电流重构, 其他电压矢量无法重构故障相电流。因此需要使用预测电流重构故障相电流。

将图 1 中三相坐标系转换到 $\alpha\beta$ 坐标系, 其电压方程可表示为式(3), 坐标转换如式(4)^[29-31]。

$$\frac{Ldi_{\alpha\beta}}{dt} = u_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta} - e_{\alpha\beta} \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $i_{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下电流; $u_{\alpha\beta}$ 为变换器三相电压; $e_{\alpha\beta}$ 为电网电压; L 为滤波器电感; R 为滤波器寄生电阻; \mathbf{T} 为坐标转换矩阵。

将式(3)离散可得下一时刻预测电流^[11], 如式(5)。

$$i_{\alpha\beta}(k+1) = \frac{(L - RT_s)i_{\alpha\beta}(k) + T_s[u_{\alpha\beta}(k+1) - e_{\alpha\beta}(k+1)]}{L} \quad (5)$$

式中: $i_{\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻变量 $i_{\alpha\beta}$ 值; $u_{\alpha\beta}(k+1)$ 为 $(k+1)$ 时刻变量 $u_{\alpha\beta}$ 值; $e_{\alpha\beta}(k+1)$ 为 $(k+1)$ 时刻变量 $e_{\alpha\beta}$ 值; $e_{\alpha\beta}(k+1) = e_{\alpha\beta}(k)$; T_s 为采样周期。

根据式(5)可知, 用 $i_b(k-1)$ 预测 $i_b(k)$, 如式(6)所示。

$$i_b(k) = \frac{(L - RT_s)i_b(k-1) + T_s[u_b(k) - e_b(k)]}{L} \quad (6)$$

式中, $i_b(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻变量 i_b 值。

此外根据式(6)可知, 利用 $k-1$ 时刻重构的故障相电流和电压矢量可以预测 k 时刻故障相电流。因此在除电压矢量集合 I 之外的电压矢量作用下, 可用预测电流重构故障相电流。然而由于电流预测模型的存在, 导致 $k-1$ 时刻的 $i_{\alpha\beta}$ 、 $e_{\alpha\beta}$ 和 $u_{\alpha\beta}$ 有偏差。因此使用预测电流重构的故障相电流存在误差, 应尽可能少用。

2 基于重构电流的模型预测控制

根据图 3, 共有 18 个电压矢量用于重构电流。基于图 3 中的电压矢量图, 设计预测电流与故障相电流误差绝对值及直流侧电容电压差值为代价函数 g , 如式(7)。

$$g = |i_{\alpha\text{ref}} - i_{\alpha}(k+1)| + |i_{\beta\text{ref}} - i_{\beta}(k+1)| + p|u_{c1}(k+1) - u_{c2}(k+1)| \quad (7)$$

式中: $i_{\alpha\text{ref}}$ 、 $i_{\beta\text{ref}}$ 为参考电流; p 为电压平衡系数; $u_{c1}(k+1)$ 、 $u_{c2}(k+1)$ 为直流侧电容电压。

$$u_{c1}(k+1) - u_{c2}(k+1) = T(S_b^2(k)i_b + S_c^2(k)i_c) - u_{c1}(k) - u_{c2}(k) + \frac{T(S_b^2(k)i_b + S_c^2(k)i_c)}{C} \quad (8)$$

式中, C 为直流侧电容。

然而由于电流预测模型的存在, 导致 $k-1$ 时刻的 $i_{\alpha\beta}$ 、 $e_{\alpha\beta}$ 和 $u_{\alpha\beta}$ 出现偏差。因此使用预测电流重构的故障相电流存在误差, 连续使用会造成误差积累, 影响系统稳定运行。为解决误差积累问题, 需要检测当前时刻电压矢量集合, 确保不连续使用同一电压矢量集合。

若 k 时刻使用第二类电压矢量, 则在 $k+1$ 时刻必须使用电压矢量集合 I ; 若 k 时刻使用第一类电压矢量, 则在 $k+1$ 时刻可用电压矢量集合 II 进行控制, 控制系统结构如图 4。

基于重构电流的模型预测控制流程如下:

1) 采集电网电压 $e_{abc}(k)$, 电网正常相电流 $i_a(k)$, 直流电流 $i_{dc}(k)$, 直流侧电容电压 $u_{c1}(k)$ 、 $u_{c2}(k)$; 读取历史信号最优电压矢量对应的 B 相逆变器输出电压 $u_b(k)$ 、B 相电流 $i_b(k-1)$ 和最优电压矢量序号 $n(k)$ 。

2) 根据最优电压矢量序号 $n(k)$ 判断当前电压矢量是否属于第一类电压矢量集合。若是, 则用 $i_b(k-1)$ 重构故障相电流 $i_{b2}(k)$, 且下一时刻电压矢量集合 $M(k+1)$ 选用电压矢量集合 II ; 若否, 则用 $i_{dc}(k)$ 和 $i_a(k)$ 重构故障相电流 $i_{b1}(k)$, 且下一时刻电压矢量集合 $M(k+1)$ 选用电压矢量集合 I 。

3) 根据 A、B 两相电流计算 C 相电流 $i_c(k)$, 用直流侧电容电压 $u_{c1}(k)$ 、 $u_{c2}(k)$ 预测 $u_{c1}(k+1)$ 、 $u_{c2}(k+1)$ 。

4) 将电网电压 $e_{abc}(k)$ 、电网电流 $i_{abc}(k)$ 和变换器输出电压 $u_{abc}(k)$ 经 Clark 变换到 $\alpha\beta$ 坐标, 经电流预测模型得到预测电流 $i_{\alpha\beta}(k+1)$ 。

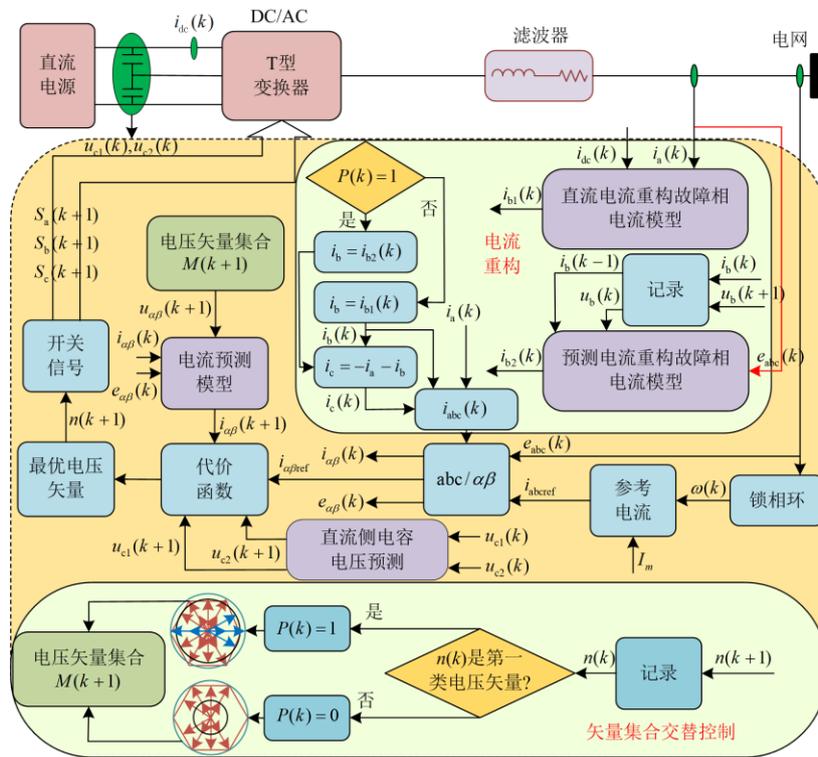


图 4 基于重构电流的模型预测控制结构

Fig. 4 Model predictive control structure based on reconstructed current

5) 根据下一时刻电压矢量集合 $M(k+1)$ ，选择使代价函数最小的电压矢量作为最优电压矢量应用于下一时刻。

6) 将 B 相(故障相)输出电压 $u_b(k)$ 、B 相电流 $i_b(k)$ 和最优电压矢量序号 $n(k+1)$ 存储记录，以便下一时刻选用。

3 仿真验证

为验证所提基于电流重构的模型预测控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真，系统参数如表 1，采样频率为 20 kHz。

表 1 仿真和实验参数

Table 1 Simulation and experimental parameters

参数	值
直流侧电压 U_{dc}	400 V
电网相电压有效值 e	110 V
滤波电感 L	10 mH
寄生电阻 R	0.05 Ω
电网频率 f	50 Hz
电压平衡系数 p	0.71
直流侧电容 C_1, C_2	2020 μF

3.1 稳态仿真

为验证所提控制策略，将电压矢量分为 3 类：

- 1) 仅用电压矢量集合 I;
- 2) 仅用电压矢量集合 II;
- 3) 使用电压矢量集合 I 和 II 交替控制。其对应的重构三相电流和快速傅里叶变换分析结果如图 5。

由于连续使用预测电流重构故障相电流会积累电流误差，所以当仅用电压矢量集合 II 控制时，并网电流总谐波失真率(Total Harmonic Distortion, THD)

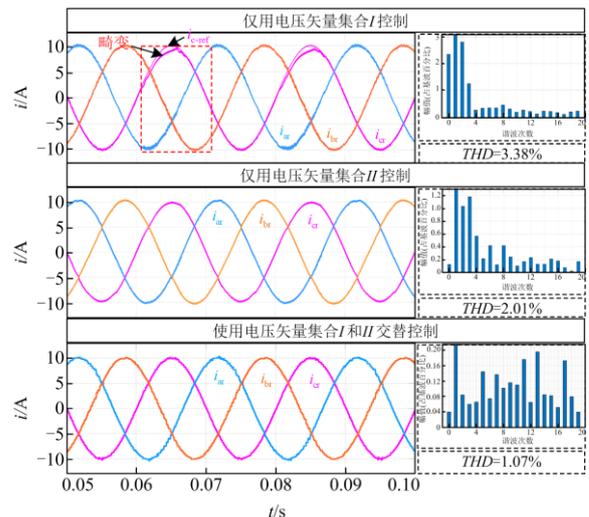


图 5 电流传感器故障后不同电压矢量集合控制效果对比
Fig. 5 Comparison of control effects of different voltage vector sets after current sensor fault

为 2.01%。使用电压矢量集合 *I* 和 *II* 交替控制, 并网系统稳定运行, 并网电流 THD 为 1.07%, 直流侧电压利用率为 100%。因此使用电压矢量集合 *I* 和 *II* 交替控制既能保证高直流侧电压利用率, 又能避免电流误差积累, 降低电流 THD。

在图6中, 正常状态下的并网电流 THD 为 0.98%, 输出电流稳定。在 B 相电流传感器故障后, 并网电流 THD 为 16.92%, 输出电流发生严重畸变且不稳定, 可能发生过流对变换器造成损坏。在使用所提容错控制策略后, 变换器进入容错状态, 并网电流 THD 为 1.07%, 正弦度良好, 满足并网要求。证明所提控制策略能在 T 型三电平并网变换器电流传感器故障后保持容错连续运行。

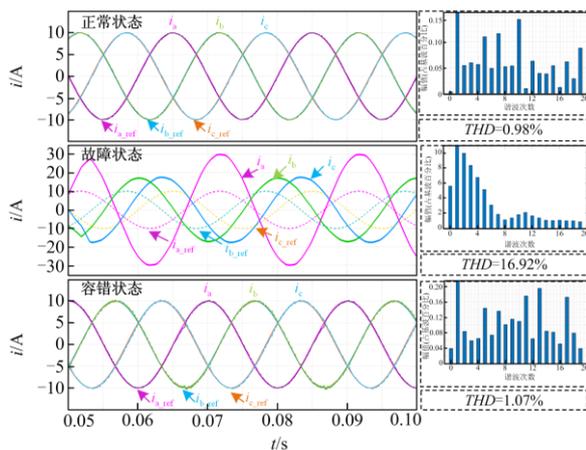


图 6 电流传感器故障后稳态波形

Fig. 6 Waveform of steady-state after current sensor fault

3.2 动态仿真

为验证所提控制策略的动态性能, 图 7 给出了初始参考电流 $i_{ref} = 10\text{ A}$, 参考电流在 0.05 s 时降至 5 A, 参考电流在 0.1 s 时升至 10 A 的仿真波形。图 7 的模拟波形显示电流快速且稳定。输出电流变化平稳。仿真结果表明, 并网变流器的动态性能良好, 验证了所提控制策略的有效性。

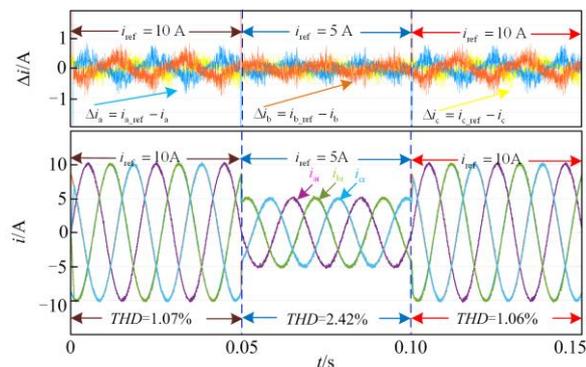


图 7 电流传感器故障后动态仿真波形

Fig. 7 Dynamic simulation waveform after current sensor fault

给定初始参考电流 $i_{ref} = 10\text{ A}$, 并网变换系统稳定运行, 三相并网电流波形如图 8。在 0.05~0.1 s, 并网变换系统工作正常; 在 0.1~0.15 s, 并网变换系统 B 相电流传感器故障; 在 0.15~0.2 s, 并网电流和参考电流的误差小于 0.8 A, THD 小于 1.07%, 输出电流稳定, 确保系统能在容错状态下连续运行。

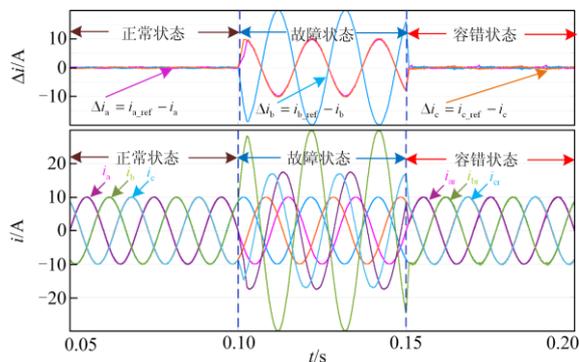


图 8 电流传感器故障前后电流波形

Fig. 8 Current waveform before and after current sensor fault

4 实验验证

为验证所提控制策略, 构建硬件在环实验平台, 基于 Simulink 软件搭建主电路模型, 利用 Starsim HIL 软件使主电路运行于 PXI 机箱内的 FPGA 板卡上; 采用 PXIe-1071 作为控制器, 控制芯片 Xilinx K7-160T FPGA, 示波器为横河 DLM4000, 采样频率为 10 kHz, 实验参数如表 1。

4.1 稳态实验

当参考电流为 10 A 时, 正常状态、故障状态和容错状态 3 种状态下 T 型三电平并网变换器电流控制效果如图 9。

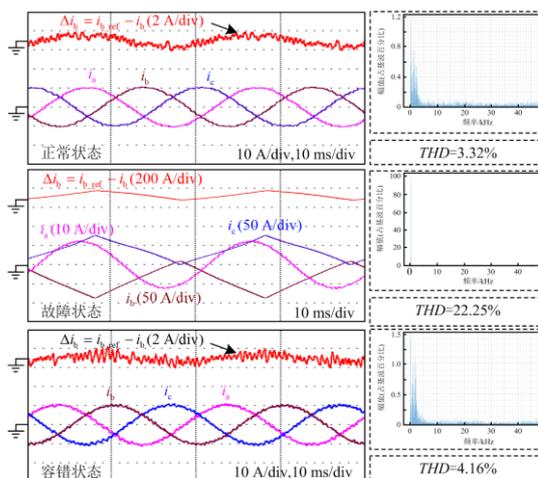


图 9 电流传感器故障前后稳态电流

Fig. 9 Steady state current before and after current sensor fault

在图 9 中,当参考电流为 10 A 时,正常状态下电流 THD 为 3.32%,输出电流稳定,电流误差小于 8%。当 B 相电流传感器故障后且未使用容错控制时,变换器输出电流发生严重偏移,电流 THD 为 22.25%,电流误差超过 10 A。在使用所提容错控制策略后,变换器进入容错状态,并网电流 THD 为 4.16%,正弦度良好,电流误差在 9%以内,满足并网要求。因此所提控制策略能在 T 型三电平并网变换器电流传感器故障后保持容错连续运行。

4.2 动态实验

图 10 为电流传感器故障后动态电流波形。图 11 显示了电流传感器从故障前到电流重构的动态过程。

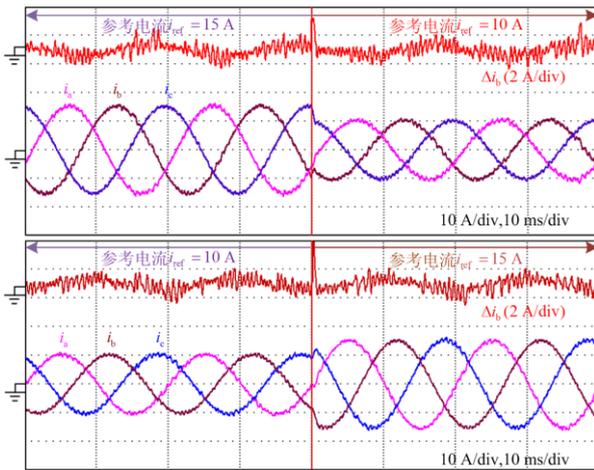


图 10 电流传感器故障后动态电流

Fig. 10 Dynamic state current after current sensor fault

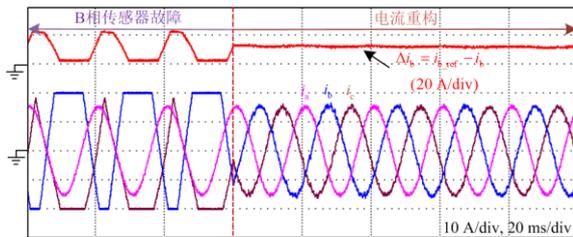


图 11 电流传感器故障前后电流实验波形

Fig. 11 Experimental current waveform before and after current sensor fault

在 B 相电流传感器发生故障后,三相电流有明显的畸变,利用基于电流重构的模型预测控制策略能快速地将变换器调整到正常工作状态。当参考电流突变时,所提电流重构方法能够在 2 ms 内快速跟随参考电流,待稳定后电流误差保持在 6.7%以内。进一步验证了所提控制策略的有效性,提高了 T 型

并网变换器的故障容错能力。

5 结论

T 型三电平并网变换器的控制需要网侧电流信号。一旦电流传感器发生故障,变换器产生的电流将严重畸变。针对网侧电流传感器故障,提出一种基于电流重构的模型预测控制策略,实现变换器在电流传感器故障后的容错连续运行。在电流传感器发生故障后,利用直流母线电流、正常相电流和预测电流重构故障相电流。重构故障电流所需的电压矢量按照重构方法分成两个电压矢量集合。通过检测当前时刻电压矢量集合,保证下一时刻选择不同的电压矢量集合,避免积累电流误差。容错变换器输出电流波形具有较好的正弦度以及良好的稳态和动态性能,实验结果验证了所提控制策略的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 郭利辉. T 型三电平逆变器无差拍电流预测和中点平衡控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 127-132.
- [2] GUO Lihui. Deadbeat predictive current and neutral voltage balancing control method parallel three-level T-type inverters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 127-132.
- [3] 任兆文, 宋书中, 黄景涛, 等. 单相三电平并网逆变器多状态模型预测控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 19-28.
- [4] REN Zhaowen, SONG Shuzhong, HUANG Jingtao, et al. Research on multi-state model predictive control for a single-phase three-level grid-tied inverter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 19-28.
- [5] 李琰琰, 潘超, 曹宏, 等. 组合开关状态的 NPC 三电平模型预测不平衡治理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 97-106.
- [6] LI Yanyan, PAN Chao, CAO Hong, et al. Combined switching state of model predictive control for unbalance regulation strategy for three-level NPC inverter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 97-106.
- [7] 李华取, 肖劲松, 舒展, 等. 一种基于点估计的风电并网位置和容量优化方法[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 109-116.
- [8] LI Huaqu, XIAO Jinsong, SHU Zhan, et al. Point-estimation based method for optimizing both location and capacity of grid-connected wind farm[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 109-116.
- [9] 闫寒, 黄萌, 唐英杰, 等. 电网频率扰动下并网变换器系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2021,

- 45(18): 78-84.
YAN Han, HUANG Meng, TANG Yingjie, et al. Transient stability analysis of grid-connected converter system considering frequency disturbance of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 78-84.
- [6] 李磊, 陶骏, 朱明星, 等. 基于超级电容储能型 MMC 的控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 15-22.
LI Lei, TAO Jun, ZHU Mingxing, et al. Control strategy for MMC based on super-capacitor energy storage[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 15-22.
- [7] 张树楠, 罗海云, 程晓绚, 等. 基于双 dq 变换正负序提取及锁相环的 FPGA 实现[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 182-189.
ZHANG Shunan, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Realization of positive & negative sequence component picking up and phase locked loop using FPGA based on dual-dq transform[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 182-189.
- [8] 张传金, 李雨潭, 张晓, 等. T 型三电平变流器开路故障容错控制研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 124-128.
ZHANG Chuanjin, LI Yutan, ZHANG Xiao, et al. Research on open-circuit fault tolerant control of T-type three-level converter[J]. Power Electronics, 2021, 55(5): 124-128.
- [9] XIA Y, GOU B, XU Y, et al. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 364-372.
- [10] 邱继浪, 何英杰, 焦乾明, 等. 非隔离型三电平逆变器漏电流抑制与中点电位平衡控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 161-170.
QIU Jilang, HE Yingjie, JIAO Qianming, et al. Leakage current suppression and balance control of neutral point potential for three-level transformerless inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 161-170.
- [11] 邵庆祝, 谢民, 王同文, 等. 带有自供电功能的电流测量传感器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 155-162.
SHAO Qingzhu, XIE Min, WANG Tongwen, et al. Design of a current measuring sensor with self-power supply function[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 155-162.
- [12] 夏金辉, 郭源博, 张晓华. 单相脉宽调制整流器传感器故障诊断与容错控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 160-170.
XIA Jinhui, GUO Yuanbo, ZHANG Xiaohua. Sensor fault diagnosis and fault tolerant control for single-phase PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 160-170.
- [13] 傅晓锦, 叶航, 张舟云, 等. PMSM 的电流传感器故障诊断与容错控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2370-2376.
FU Xiaojin, YE Hang, ZHANG Zhouyun, et al. Current sensor malfunction diagnosis and fault-tolerant control of PMSM[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2370-2376.
- [14] 罗斌, 周红. 一种单电阻电流采样方法及其应用[J]. 电力电子技术, 2017, 51(4): 118-121.
LUO Bin, ZHOU Hong. An single shunt current sensing method for frequency converter[J]. Power Electronics, 2017, 51(4): 118-121.
- [15] 黄科元, 伍瑞泽, 黄守道, 等. 单电阻采样的永磁同步电动机相电流重构策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 114-120.
HUANG Keyuan, WU Ruizhe, HUANG Shoudao, et al. Phase current reconstruction strategy for PMSM using one-shunt current sampling[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 114-120.
- [16] 魏海峰, 陆彦如, 江廷宇, 等. 考虑非观测区补偿的永磁同步电机单电阻采样重构[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2695-2702.
WEI Haifeng, LU Yanru, JIANG Tingyu, et al. Single resistor sampling reconstruction of permanent magnet synchronous motor considering non-observation area compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2695-2702.
- [17] 程明, 姜云磊, 王伟, 等. 线电压调制的 PWM 逆变器相电流重构策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(2): 9-16.
CHENG Ming, JIANG Yunlei, WANG Wei, et al. Phase current reconstruction strategy for PWM inverter based on line voltage modulation[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(2): 9-16.
- [18] 谷明月, 何媛媛. 基于半 PWM 移相的单电阻电流重构策略研究[J]. 微电机, 2019, 52(6): 62-66.
GU Mingyue, HE Yuanyuan. Research on single-shunt current sensing method based on half PWM phase shift[J]. Micromotors, 2019, 52(6): 62-66.
- [19] 章勇高, 秦盛, 刘鹏. 一种基于多调整策略的电机相电流重构技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 63-72.
ZHANG Yonggao, QIN Sheng, LIU Peng. A motor phase current reconstruction technology based on multiple adjustment strategies[J]. Power System Protection and

- Control, 2021, 49(14): 63-72.
- [20] 申永鹏, 郑竹风, 杨小亮, 等. 直流母线电流采样电压空间矢量脉冲宽度调制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1617-1627.
SHEN Yongpeng, ZHENG Zhufeng, YANG Xiaoliang, et al. A compatible SVPWM method for DC bus current sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1617-1627.
- [21] YOU J, JUNG J, PARK C, et al. Phase current reconstruction of three-level neutral-point-clamped (NPC) inverter with a neutral shunt resistor[C] // 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 26-30, 2017, Tampa, FL, USA: 2598-2604.
- [22] 朱虹, 张兴, 李明, 等. T型三电平逆变器模型预测多目标优化控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 90-96.
ZHU Hong, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Multi-objective optimal control method for T-type three-level inverter based on model predictive[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 90-96.
- [23] WANG S, DEHGHANIAN P, ALHAZMI M, et al. Advanced control solutions for enhanced resilience of modern power-electronic-interfaced distribution systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 716-730.
- [24] 薛花, 邓兴成, 王艳青, 等. 基于优化控制集模块化多电平变流器模型预测控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 9-18.
XUE Hua, DENG Xingcheng, WANG Yanqing, et al. Optimized control set based model predictive control strategy for modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 9-18.
- [25] ABUALKASIM B, S SH, ISTVAN V, et al. Integration of PV system with SMES based on model predictive control for utility grid reliability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 191-203.
- [26] GONG Z F, HUANG D Q, JADOON H U K. Sensor-fault-estimation-based tolerant control for single-phase two-level PWM rectifier in electric traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12274-12284.
- [27] YAO G, LI Y, LI Q. Model predictive power control for a fault-tolerant grid-tied converter using reconstructed currents[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(6): 1181-1190.
- [28] LI H, XIAO H, YANG G. Reconstructed current model predictive control of NPC three-level grid-tied converter with current sensor fault[J]. IEEE Access, 2021, 9: 141098-141106.
- [29] 辛业春, 王延旭, 李国庆, 等. T型三电平并网逆变器有限集模型预测控制快速寻优方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1681-1692.
XIN Yechun, WANG Yanxu, LI Guoqing, et al. Finite control set model predictive control method with fast optimization based on T-type three-level grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1681-1692.
- [30] 汤晏安, 许希元, 王茜茜, 等. 基于 SAADR-PI 的 NPC 三电平容错光伏并网逆变器 FCS-MPC 策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3541-3551.
TANG Min'an, XU Xiyuan, WANG Qianqian, et al. FCS-MPC strategy for NPC three-level fault-tolerant PV grid-connected inverters based on SAADR-PI control[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3541-3551.
- [31] 王永辉, 何帅彪, 冯瑾涛, 等. 考虑中点电压平衡的三相四开关变流器模型预测电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 31-39.
WANG Yonghui, HE Shuaibiao, FENG Jintao, et al. Model predictive voltage control of three-phase four-switch converter in island mode considering capacitor voltage balancing control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 31-39.

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-01-16

作者简介:

吴振军(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变流器模型预测控制; E-mail: wuzhj71@126.com

谢欢(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变流器模型预测控制; E-mail: 1780195656@qq.com

代东任(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变流器模型预测控制。E-mail: 1065410813@qq.com

(编辑 姜新丽)