

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413129

非线性负载下的三相逆变器开路 and 电流传感器同时故障的诊断*

孙源, 陈杰, 卫梦龙, 邱瑞昌

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要:目前三相逆变器故障诊断的负载类型多是线性负载,随着非线性负载越来越广泛的应用,原有的方法难以解决故障时由非线性负载引起的谐波问题。此外,现有的故障诊断方法多是针对开关管或者传感器的,没有综合考虑上述故障。为了解决上述问题,提出了一种带非线性负载的两电平三相逆变器开路故障和电流传感器故障同时诊断方法。建立了逆变器三相电流状态空间方程并推导了实际占空比函数,用连续占空比函数代替离散开关函数,使状态空间方程满足观测要求。设计了基于复合控制的离散滑模观测器,复合控制采用了零相移重复控制和比例积分控制串联的结构,可以对谐波电流进行有效跟踪。设计了可调节因子检测变量和自适应阈值,通过调整调节因子可以实现快速准确的故障诊断。搭建实验台并通过实验验证了开路故障诊断时间小于3 ms,传感器故障诊断时间小于6 ms。所提故障诊断方法可以在非线性负载下实现开路故障和传感器故障的同时快速诊断。

关键词:复合控制滑模观测器;开路故障;电流传感器故障;非线性负载;故障诊断

中图分类号: TM464 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Simultaneous fault diagnosis of three-phase inverter open-circuits and current sensors under nonlinear load

Sun Yuan, Chen Jie, Wei Menglong, Qiu Ruichang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Currently, the types for fault diagnosis of three-phase inverters are mostly linear loads. As nonlinear loads are more and more widely used, the original methods make it difficult to solve the harmonic problems caused by nonlinear loads during faults. In addition, the existing fault diagnosis methods are mostly for switches or sensors, without comprehensive consideration of the above faults. To address the aforementioned problems, a simultaneous diagnostic method for open-circuit faults and current sensor faults in two-level three-phase inverters with nonlinear loads is proposed in this article. The inverter three-phase current state-space equation is formulated and the actual duty cycle function is derived. The continuous duty cycle function is used instead of the discrete switching function. Therefore, the state-space equation meets the observation requirements. A discrete sliding mode observer based on composite control is designed. It adopts the structure of zero-phase-shift repetitive control and proportional integral control in series, which can effectively track the harmonic current. Adjustable factor detection variables and adaptive thresholds are designed. The fast and accurate fault diagnosis can be realized by adjusting the adjustment factors. A test bench is established and experimentally evaluated that the diagnosis time for open-circuit faults is less than 3 ms, and the diagnosis time for sensor faults is less than 6 ms. The proposed fault diagnosis method can realize fast diagnosis of both open-circuit faults and sensor faults under nonlinear loads.

Keywords: compound control sliding mode observer; open-circuit fault; current sensor fault; nonlinear load; fault diagnosis

0 引言

目前,两电平三相逆变器广泛应用于分布式发电^[1]、有源功率滤波器^[2]、轨道交通辅助供电系统^[3]等工业场景。复杂的工业环境可能导致电力电子逆变器发生故障。据统计,开路故障和传感器故障是电力电子逆变器最常见,也是危害最大的故障^[4]。开路故障主要分为短路故障触发硬件保护造成的开路故障^[5]和键合线断裂^[6]造成的开路故障。开路故障容易导致储能电容、电感老化,使用寿命减少,影响系统稳定运行。因此,快速可靠的诊断开路故障对降低经济损失、提高驱动系统的稳定性等方面具有重要意义。

目前,开路故障诊断方法主要分为数据驱动和电路驱动。数据驱动主要是使用新颖的人工智能类方法来处理采集到的故障数据,实现故障诊断^[7-10]。这类方法通常需要大量的数据和繁琐的数据处理,并且在线故障诊断时间一般在一个周波以上。电路驱动方法一般分为电压驱动和电流驱动。电压驱动主要是利用系统精确模型得到的参考电压和测量电压之间的电压偏差来进行故障诊断^[11-14],它在系统运行于轻载和空载的情况下诊断效果较差且鲁棒性较差。电流驱动主要是利用观测器或者估计器得到的参考电流与采样电流之间的电流偏差来进行故障诊断^[15-17]。

逆变器除了开关管发生故障外,传感器也极易发生故障。电流传感器故障可能会导致闭环系统失控。目前,已经有很多学者对电流传感器故障进行了研究^[18-21],其研究方法 with 开关管开路故障相似。

由于开路故障和电流传感器故障在某些情况下特性相似,应当考虑两种故障同时发生的相互影响。所以已经有一些研究同时考虑了开路故障和电流传感器故障。通过基于电流的归一化 Park 向量方法实现开路故障和电流传感器故障诊断^[22],但其采用固定阈值进行故障诊断,容易造成误诊断和漏诊断。文献[23]介绍了一种基于降阶观测器的同步诊断策略,将电流传感器故障转换为广义状态向量,应用矩阵变换将开路故障与逆变器系统状态和电流传感器故障解耦,实现绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT)和电流传感器故障诊断,但其故障诊断方法复杂度高且只能应用于电阻负载。利用定子磁链实现速度传感器故障诊断,将基于电流模型的定子磁链观测器与基于电压模型的定子磁链观测器相结合,实现直流链路电压传感器故障诊断,基于矢量空间分解的电流估计方法实现 IGBT 和电流传感器故障诊断^[24]。上述将多种故障诊断方法相组合的方式使故障诊断变得复杂。文献[25]提出了一种基于矩阵变换器的永磁同步

电机驱动系统的开路故障和电流传感器故障诊断方法,采用有限控制集模型预测控制提取开路故障和电流传感器故障的不同故障特征。将开路故障与电流传感器故障分离后,采用基于误差电压的开路开关故障诊断策略来定位故障开关。由于其使用固定阈值进行故障诊断,容易受噪声和负载波动影响。通过设计降阶滑模观测器,文献[26]可以识别开路故障和传感器故障,但其不能诊断同时发生的开路故障和传感器故障。

上述提到的负载都是感应电机或者纯阻性负载,但随着电力电子负载或者整流桥负载越来越多的使用,使得逆变器的电压和电流产生大量谐波^[27-28]。当逆变器发生开路故障时,与线性负载相比,带非线性负载的逆变器非故障相电压和电流也会发生严重畸变。这种情况容易造成误诊断,影响系统运行,对逆变器危害极大。此外,上述论文虽然能够辨别并诊断开路或传感器故障,但不能识别诊断同时发生的开路和传感器故障。所以,非常有必要研究在非线性负载下的开路和传感器故障的同时诊断问题。

针对上述问题,提出了基于复合控制器的滑模观测器故障诊断方法,可以在三相整流桥负载下同时诊断逆变器开路故障、电流传感器故障。主要贡献如下:

1) 建立了三相交流电流的状态空间方程,在双采样模式下考虑死区时间、上升时间和关断时间影响,推导了实际占空比函数,并用连续占空比函数代替离散开关函数,使状态空间方程满足观测要求。

2) 根据状态空间方程设计了滑模观测器,为了在非非线性负载下实现良好的交流电流、直流电压跟踪效果,设计了基于零相移重复控制器串联比例积分(proportional integral, PI)控制器的复合控制器的滑模面,即使在小滤波电感下也能实现谐波电流的良好跟踪。设计了兼顾快速跟踪和抖振抑制的趋近律并分析了离散滑模观测器的稳定性条件。

3) 基于观测电流设计了可调节检测变量和自适应阈值变量。可以通过调节因子调节检测变量从而快速准确的实现故障诊断并且检测时间小于 3 ms。

4) 设计了传感器容错控制方案,当系统诊断发生了电流传感器故障后,利用非故障传感器可以重构出故障传感器波形,保证传感器故障下系统正常运行。

1 三相逆变器建模

三相逆变器的典型拓扑如图 1 所示。其中, L_f 为滤波电感, R_f 为电感寄生电阻, C_f 为滤波电容, C 为直流侧电容。此外,有 3 个交流电压传感器, 3 个交流电流传感器, 1 个直流电压传感器分别测量三相交流电压 u_a 、 u_b 、

u_c , 三相交流电流 i_a, i_b, i_c , 直流侧电容电压 u_{dc} 。下面是三相逆变器建模和状态矩阵分析。

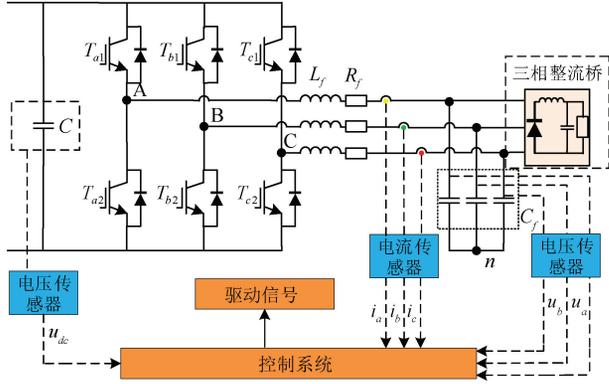


图1 三相逆变器典型拓扑

Fig. 1 Typical topology of a three-phase inverter

1.1 逆变器模型

如图1所示,根据基尔霍夫定律得到逆变器正常工作下的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ab} \\ \dot{i}_{bc} \\ \dot{i}_{ca} \end{bmatrix} = -[\mathbf{a}_{3 \times 3}] \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} - [\mathbf{b}_{3 \times 3}] \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} + [\mathbf{c}_{3 \times 1}] u_{dc} \quad (1)$$

$$\text{式中: } \begin{bmatrix} \dot{i}_{ab} \\ \dot{i}_{bc} \\ \dot{i}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i}_a - \dot{i}_b \\ \dot{i}_b - \dot{i}_c \\ \dot{i}_c - \dot{i}_a \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - i_b \\ i_b - i_c \\ i_c - i_a \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} u_a - u_b \\ u_b - u_c \\ u_c - u_a \end{bmatrix}; \mathbf{a} = \text{diag}[R_f/L_f \quad R_f/L_f \quad R_f/L_f];$$

$$\mathbf{b} = \text{diag}[1/L_f \quad 1/L_f \quad 1/L_f]; \mathbf{c} = \begin{bmatrix} A_1 \&\& B_2 - A_2 \&\& B_1 \\ B_1 \&\& C_2 - B_2 \&\& C_1 \\ C_1 \&\& A_2 - C_2 \&\& A_1 \end{bmatrix} / L_f;$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ B_1 & B_2 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{s}_{a2}(s_{a1} + \bar{s}_{a1}\bar{\delta}_a) \bar{s}_{a1}(s_{a2} + \bar{s}_{a2}\delta_a) \\ \bar{s}_{b2}(s_{b1} + \bar{s}_{b1}\bar{\delta}_b) \bar{s}_{b1}(s_{b2} + \bar{s}_{b2}\delta_b) \\ \bar{s}_{c2}(s_{c1} + \bar{s}_{c1}\bar{\delta}_c) \bar{s}_{c1}(s_{c2} + \bar{s}_{c2}\delta_c) \end{bmatrix}.$$

以A相为例, $s_{a1}=1$ 代表开关管 T_{a1} 导通, $s_{a1}=0$ 代表开关管 T_{a1} 关断, $\delta_a=1$ 表示A相电流从逆变器流出, $\delta_a=0$ 表示A相电流流入逆变器。式(1)可以表示为:

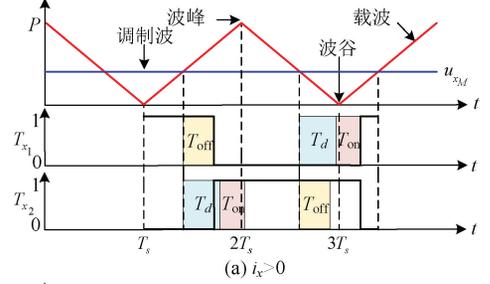
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\text{其中, } \dot{\mathbf{x}} = [i_{ab} \quad i_{bc} \quad i_{ca}]^T, \mathbf{A} = -[\mathbf{a}_{3 \times 3}],$$

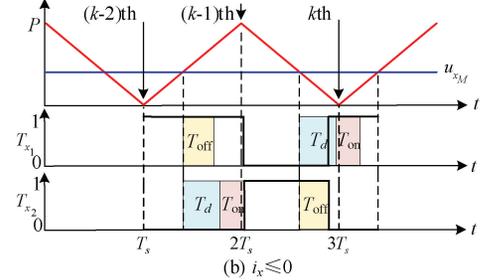
$$\mathbf{B} = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1], \mathbf{u} = -[\mathbf{b}_{3 \times 3}] \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} + [\mathbf{c}_{3 \times 1}] u_{dc}.$$

1.2 状态矩阵分析

由状态矩阵 \mathbf{A} 可知, 当 $S_1=1, S_3=1, S_5=1$ 或 $S_1=0, S_3=0, S_5=0$ 时, 即开关管处于“111”或“000”的零矢量状态时, 状态矩阵 \mathbf{A} 不满秩, 此时状态变量不能被观测。为了解决上述问题, 采用连续的占空比函数来代替不连续的开关函数, 其中一个开关周期的开关管实际占空比如图2所示。



(a) $i_x > 0$



(b) $i_x \leq 0$

图2 控制系统实际占空比

Fig. 2 Control system actual duty cycle

图2中考虑上升时间 T_{on} , 关断时间 T_{off} , 死区时间 T_d 和电流方向, 得到波峰、波谷处的实际占空比。

$$\begin{cases} d_{x1}[k] = u_{xM}[k]/P + T_{off}/T_s \\ d_{x1}[k] = u_{xM}[k]/P - (T_{on} + T_d)/T_s \\ d_{x1}[k] = u_{xM}[k]/P + (T_{on} + T_d)/T_s \\ d_{x1}[k] = u_{xM}[k]/P - T_{off}/T_s \\ d_{x2}[k] = 1 - d_{x1}[k] \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{xM} 为调制波, P 为载波峰值。

$$\text{定义 } \text{sign}(i_x[k]) = \begin{cases} 1, & i_x > 0 \\ -1, & i_x \leq 0 \end{cases}, \text{step}(i_x[k]) =$$

$$\begin{cases} 1, & i_x > 0 \\ 0, & i_x \leq 0 \end{cases}, \begin{cases} M = 1 (\text{波峰}) \\ M = 0 (\text{波谷}), \end{cases} \text{式(3)可以表示为:}$$

$$\begin{cases} d_{x1}[k] = u_{xM}[k]/P + (\text{step}(i_x[k]) \odot \bar{M}) \times \\ \text{sign}(i_x[k]) T_{off}/T_s - (\text{step}(i_x[k]) \odot M) \times \\ \text{sign}(i_x[k]) (T_{on} + T_d)/T_s \\ d_{x2}[k] = 1 - d_{x1}[k] \end{cases} \quad (4)$$

用占空比函数替代开关函数后的矩阵 \mathbf{A} 是满秩的, 也就是状态变量是可观测的。

2 故障诊断方法

故障诊断的第 1 个核心是得到准确的观测电流,需要设计能够跟踪快速基波和谐波电流的观测器且稳态时观测误差尽可能小。由于需要在微处理器实现故障诊断,应当对观测器进行离散化。由于非线性负载的存在,导致电流中存在 $6K \pm 1$ ($K=1,2,3,\dots$) 次谐波。观测器的设计核心是滑模面的设计,滑模面不仅包含基波也应当包含谐波。设计的观测器应当满足稳定性条件。故障诊断的第 2 个核心是应当设计合适的阈值,要求既能实现快速故障诊断也能抵御参数和负载变化的影响。这就要求阈值不是固定的,应当是自适应的。除了上述要求,还应当对传感器故障进行容错控制。这样既可以避免传感器故障对逆变器的影响,也可以实现开路和传感器故障的同时诊断,而不仅仅是区别这两种故障。综合上述分析,所提出的故障诊断方法包括离散滑模观测器的设计、基于复合控制器的滑模面设计、观测器稳定性分析、故障诊断和传感器故障容错控制。

2.1 离散滑模观测器设计

根据式(2),考虑扰动影响,逆变器状态方程可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \\ \mathbf{D}(k)v(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{y}(k) = [\mathbf{y}_i(k)]_{3 \times 1}$ 为系统输出变量; $v(k)$ 为系统不确定扰动; $\mathbf{C}(k) = \text{diag}[1 \ 1 \ 1]$, $\mathbf{D}(k) = \text{diag}[1 \ 1 \ 1]$, 且 $\mathbf{C}(k)$, $\mathbf{D}(k)$ 为单位矩阵。那么离散滑模观测器可以设计为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \\ \mathbf{D}(k)v(k) + \mathbf{E}(k)\mathbf{S}(k) + n_1 |\mathbf{S}(k)|^{n_2} \cdot \\ \tanh(n_5 \mathbf{S}(k)) + n_3 |\mathbf{S}(k)|^{n_4} \cdot \\ \tanh(n_5 \mathbf{S}(k)) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}(k) = [\mathbf{E}_i(k)]_{3 \times 3}$; $0 < n_1$; $0 < n_2 < 1$; $0 < n_3$; $1 < n_4$; $0 < n_5$ 为常数。滑模面为:

$$\mathbf{S}(k) = [\mathbf{S}_i(k)]_{3 \times 1} = [\mathbf{G}(k)(y_i(k) - \mathbf{C}(k)\hat{x}_i(k))] \quad (7)$$

式中: $\mathbf{G}(k) = [\mathbf{G}_i(k)]_{3 \times 3}$ 为复合控制器。自适应趋近律为:

$$N_i(k) = E_i(k)\mathbf{S}_i(k) + n_1 |\mathbf{S}_i(k)|^{n_2} \cdot \tanh(n_5 \mathbf{S}_i(k)) + n_3 |\mathbf{S}_i(k)|^{n_4} \cdot \tanh(n_5 \mathbf{S}_i(k)) \quad (8)$$

其中,无论观测变量距离滑模面多远, $E_i(k)\mathbf{S}_i(k)$ 可以保证观测变量快速向滑模面移动。

当 $|\mathbf{S}_i(k)| < 1$, 即观测变量靠近滑模面时, $n_1 |\mathbf{S}_i(k)|^{n_2} \cdot \tanh(n_5 \mathbf{S}_i(k))$ 可以确保变量快速到达滑模面。 n_2 越小,动态性能越好。当变量远离滑模面,即 $|\mathbf{S}_i(k)| > 1$ 时,其影响可以被忽略。

当 $|\mathbf{S}_i(k)| > 1$, 即观测变量远离滑模面时, $n_3 |\mathbf{S}_i(k)|^{n_4} \cdot \tanh(n_5 \mathbf{S}_i(k))$ 可以确保变量快速到达滑模面。 n_4 越大,动态性能越好。当变量靠近滑模面,即 $|\mathbf{S}_i(k)| < 1$ 时,其影响可以被忽略。

用双曲正切函数代替传统的符号函数和饱和函数,不仅可以提高电流跟踪速度,还可以减小震颤,减轻观测电流的抖动。

2.2 基于复合控制器的滑模面设计

图 3 为基于复合控制器的滑模面设计框图,包括零相移重复控制器以及串联的比例积分控制器。基于内模原理的重复控制技术^[29],其通过对误差的逐周期累加跟踪,可以有效地实现对基波和谐波电流信号的高精度跟踪。

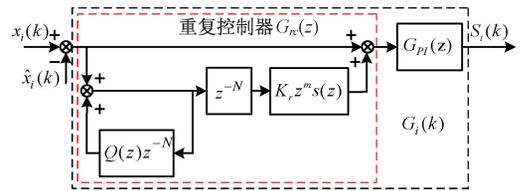


图 3 基于复合控制器的滑模面

Fig. 3 Sliding surface based on compound control

离散重复控制器的表达式为:

$$G_i(k) = G_{rc}(z)G_{pi}(z) = \frac{Q(z)z^{-N}}{1 - Q(z)z^{-N}}K_r z^m s(z)G_{pi}(z) \quad (9)$$

其中, $Q(z)$ 为重复控制器内模滤波器,用于改善系统的稳定性和鲁棒性; N 为每个周期的延迟拍数,且 N 为采样频率与基波频率的比值; z^m 为相位超前补偿; $s(z)$ 为补偿器。

$Q(z)$ 一般取为低通滤波器或者小于 1 的常数,可以增加系统的鲁棒性,当然同时也牺牲了理想积分型内模所具有的无静差特性。为了减小低通滤波器造成的相位延迟,将其设计为截止频率 1 kHz 的零相位低通滤波器:

$$Q(z) = \frac{z + 2 + z^{-1}}{4} \quad (10)$$

其中,补偿器 $s(z)$ 通常选为普通低通滤波器或低阶巴特沃斯低通滤波器,以进一步衰减高频段开环增益。由于普通低通滤波器具有较宽的过渡带,且比同阶数的巴特沃斯低通滤波器具有更大的相位滞后,而巴特沃斯低通滤波器具有比普通低通滤波器更小的过渡带。由于系统电感和电容滤波器的截止频率为 950 Hz,所以将巴

特沃斯低通滤波器截止频率为设计为 1 kHz。不同阶数的巴特沃斯低通滤波器的频率特性如图 4 所示。

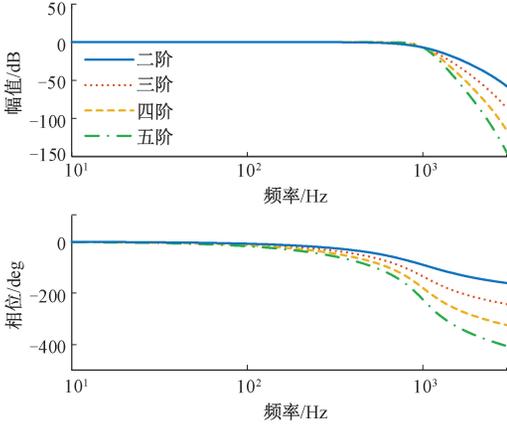


图 4 不同阶数的巴特沃斯低通滤波器的频率特性

Fig. 4 Frequency characteristics of Butterworth low-pass filters of different orders

由图 4 可知,阶数越高,过渡带越窄,但相位滞后越严重。综上,本文选用截止频率为 1 kHz 的四阶巴特沃斯低通滤波器为

$$s(z) = \frac{0.0048z^4 + 0.0193z^3 + 0.029z^2 + 0.0193z + 0.0048}{z^4 - 2.3695z^3 + 2.324z^2 - 1.0547z + 0.1874} \quad (11)$$

其中,相位超前补偿器用来补偿由补偿器 $s(z)$ 造成的相位滞后,特别是高频区域的相位滞后,补偿器 z^m 提供一个角度为 $\theta = m(\omega_N/\omega_s) \times 2\pi$ 的超前角度, ω_N 为基波角频率, ω_s 为采样角频率,设计 $m = 4$ 。为了提高观测器增益和响应速度,实现快速准确的电流谐波观测。在零相移重复控制器的基础上,串联了比例积分控制器。那么,设计后的复合控制器增益如图 5 所示。

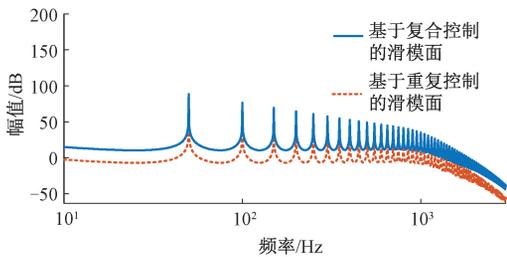


图 5 重复控制器和复合控制器的观测器对比

Fig. 5 Comparison of sliding surface based on compound control and repetitive control

由图 5 可知,基于复合控制器的观测器在要求频段内增益较基于重复控制器的观测器增益大且在要求频段内增益大于 0 dB,可以实现更小的观测误差。在高

频段增益迅速减小,避免由开关次纹波引起的振荡。所以,所设计的观测器具有优异的谐波跟踪和振荡抑制能力。

2.3 滑模观测器稳定性分析

由式(5)、(6)得到误差状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}(k) = (\mathbf{a} - \mathbf{E}(k)\mathbf{G}(k)\mathbf{C}(k))\mathbf{e}(k) - \mathbf{M}(k) \\ \mathbf{M}(k) = (n_1 |\mathbf{G}(k)\mathbf{C}(k)\mathbf{e}(k)|^{n_2} + \\ n_3 |\mathbf{G}(k)\mathbf{C}(k)\mathbf{e}(k)|^{n_4}) \cdot \\ \tanh(n_5 \mathbf{G}(k)\mathbf{C}(k)\mathbf{e}(k)) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\dot{\mathbf{e}}(k) = \dot{\mathbf{x}}(k) - \dot{\hat{\mathbf{x}}}(k) = [\dot{e}_{i_{ab}}(k) \dot{e}_{i_{bc}}(k) \dot{e}_{i_{ca}}(k)]^T$ 。根据李雅普诺夫方程:

$$\dot{V}(k) = \dot{e}_{i_{ab}}(k)\mathbf{e}_{i_{ab}}(k) + \dot{e}_{i_{bc}}(k)\mathbf{e}_{i_{bc}}(k) + \dot{e}_{i_{ca}}(k)\mathbf{e}_{i_{ca}}(k) \quad (13)$$

其中,只有 $\dot{V}(k)$ 是负定的,滑模观测器才能稳定。矩阵 \mathbf{a} 、 $-\mathbf{M}(k)\mathbf{e}(k)$ 是非正的,那么只需要 $\mathbf{E}(k)\mathbf{G}(k)\mathbf{C}(k)$ 是正定矩阵。 $\mathbf{C}(k)$ 为单位矩阵, $\mathbf{G}(k)$ 为复合控制器,其增益如图 5 所示,在要求的观测范围内,其增益大于 0 dB,可以增强观测器稳定性。那么只要 $\mathbf{E}(k)$ 是正定矩阵,观测器即可稳定。

2.4 故障判断与传感器容错控制

利用逆变器实际电流与观测器估计电流,构造故障特征检测量。当发生开路故障或者传感器发生离线故障时,逆变器电流会发生变化。利用电流的上述变化,构造基于电流的逆变器故障检测特征量 O_{xy} 为:

$$O_{xy} = \frac{\arctan(\delta_y + \delta_x \tan(i_{xy}^{RMS}/i_p^{RMS}))}{\delta_y + \delta_x \tan(i_{xy}^{RMS}/i_p^{RMS})} \quad (14)$$

式中: $xy = ab, bc, ca$; i_{xy}^{RMS} 为输出电流的有效值; i_p^{RMS} 为控制系统的电流保护值。设计 \tan 函数可以增加故障发生时电流的变化率,引入 RMS 是为了减轻纹波电流的影响,其中 RMS 计算长度为半基波周期。 δ_x 为电流调节因子,可以调节 O_{xy} 的变化速度, δ_y 为小常数,避免 O_{xy} 因分母为零造成溢出。

利用复合滑模观测器的观测值与采样值的差值来构造检测特征量 O_{xy} 的自适应阈值 P_{xy} 为:

$$P_{xy} = \frac{\arctan(\delta_y + \tan((\hat{i}_{xy} - i_{xy})^{RMS}/i_p^{RMS}))}{\delta_y + \tan((\hat{i}_{xy} - i_{xy})^{RMS}/i_p^{RMS})} \quad (15)$$

其中,逆变器正常工作时,可知 $O_{xy} \ll 1$, P_{xy} 趋近于 1。然而,当逆变器发生开路故障或者电流传感器发生故障时,相电流会发生一定程度的畸变,导致 $\tan((\hat{i}_{xy} - i_{xy})^{RMS}/i_p^{RMS})$ 增大,使得故障检测特征量 O_{xy} 迅速超过阈值 P_{xy} ,故障标志位 F_{xy} 置 1,从而实现逆变器故障检测。

为了区分开关管故障和电流传感器故障,使用测量的三相电流之和作为判断变量。

$$T_m = i_a + i_b + i_c \quad (16)$$

其中,逆变器正常运行或者发生开路故障时, $T_m < \gamma$, γ 为故障阈值。当电流传感器发生故障时, $T_m > \gamma$ 。

发生开关管故障时,可以通过 O_{xy} 和 P_{xy} 确定故障相,为了进一步确定故障开关管的位置,利用电容电压引入了判断故障位置的变量 W_x

$$W_x = \text{sign}\left(\frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_x dt\right) \quad (17)$$

其中,当上管发生开路故障时, $W_x < 0$, 故障标志位 U_{x1} 置 1; 当下管发生开路故障时, $W_x > 0$, 故障标志位 U_{x2} 置 1。根据上述分析,以 A 相为例, T_{a1} 、 T_{a2} 开路故障、A 相电流传感器故障判断标准分别为:

$$\begin{aligned} U_{a1} = 1: & O_{ab} > P_{ab} \&\& O_{ca} > P_{ca}, |T_m| < \gamma, W_a < 0 \\ U_{a2} = 1: & O_{ab} > P_{ab} \&\& O_{ca} > P_{ca}, |T_m| < \gamma, W_a > 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$Y_a = 1: O_{ab} > P_{ab} \&\& O_{ca} > P_{ca}, |T_m| > \gamma \quad (19)$$

当系统发生传感器故障时,为了保证系统正常运行,需要利用非故障传感器来构造故障传感器信号。用构造后的信号代替故障信号,确保系统正常运行。假设 A 相传感器发生故障,那么构造后的 A 相电流为:

$$i'_a = -i_b - i_c \quad (20)$$

图 6 为基于复合控制滑模观测器 (compound control sliding mode observer, CCSMO) 的故障诊断方法原理图,控制方法采用 ABC 坐标系下的双闭环控制,控制器为比例谐振 (proportional resonant, PR) 控制器^[30],故障诊断的结果通过以太网传输到上位监控机。

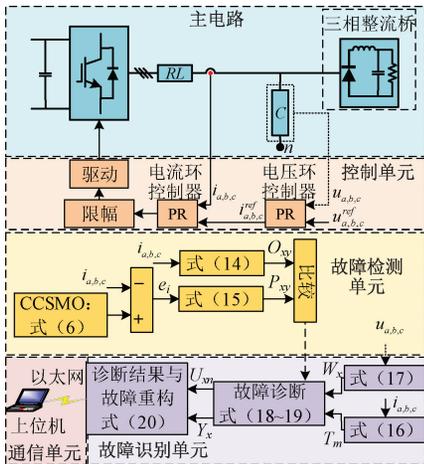


图 6 CCSMO 故障诊断原理

Fig. 6 CCSMO fault diagnosis schematic

3 实验证

3.1 实验验证

为了验证上述故障诊断方案,搭建了带三相二极管整流桥负载的三相四线制逆变器实验平台,包括功率电源、智能功率模块 (intelligent power module, IPM)、数字信

号处理器 (digital signal processor, DSP)、复杂可编程逻辑器件 (complex programmable logic device, CPLD)、三相滤波电感 and 滤波电容、直流链路电容、三相整流桥负载、监控机和各类传感器、接触器,如图 7 所示。其中,IPM 型号为 6MBP50RU2A120, DSP 型号为 TMS320F28377S, 中央处理器 (central processing unit, CPU) 实现控制功能及与监控机通信功能,控制律加速器 (control law accelerator, CLA) 完成故障诊断功能。各项故障信号由监控机通过指令下发到 CPU 执行。CLA 通过 CPU 调用,其运行频率为 10 kHz。电源板网口通过网线与监控机连接,以 10 kHz 频率往监控机发送中间变量数据,并在 MATLAB 绘制了故障时的电流波形、中间变量以及诊断结果。

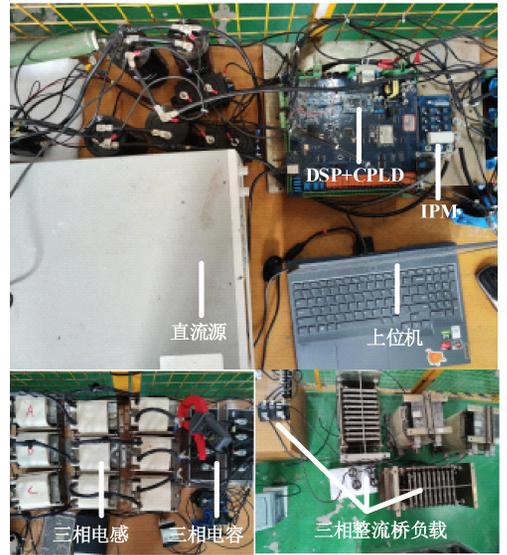


图 7 三相逆变器故障诊断实验台

Fig. 7 Three-phase inverter fault diagnosis experiment platform

三相逆变器的工作状态参数、主要系统参数和故障诊断变量在表 1 中给出。

表 1 三相逆变器主要参数

Table 1 Main parameters of the three phase inverter

参数名称	符号	值
直流电压	U_{dc}	500 V
直流电容	C	2 mF
滤波电感 (寄生电阻)	$L_f (R_f)$	0.3 mH (10 mΩ)
滤波电容	C_f	100 μF
输出电压	$u_{a, b, c}$	200 V
电感电流	$i_{a, b, c}$	15 A
电流调节因子	δ_x	30
防溢出常数	δ_y	0.01
输出频率	f_c	50 Hz
开关频率	f_w	5 kHz
采样频率	f_s	10 kHz

1) 单故障诊断实验结果:图 8 为 T_{a1} 开路故障诊断结果,在开路故障发生前,由于非线性负载的存在,导致电流存在很大的谐波分量,但三相电流仍然对称。

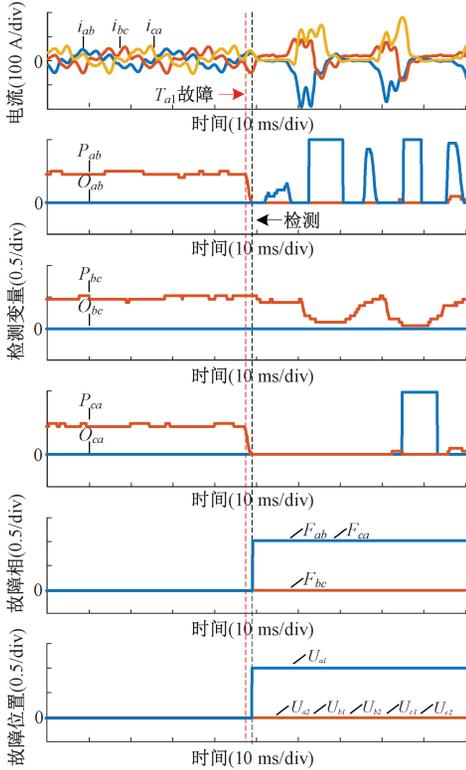


图 8 T_{a1} 开路故障实验结果

Fig. 8 Experimental results for the open-circuit fault of power switch T_{a1}

所设计的滑模观测器截止频率为 1 kHz,所以对电流进行了截止频率为 1 kHz 的低通滤波处理,后续实验按照此处理。由于所设计的滑模观测器拥有良好的跟踪性能,故障检测变量接近于零,自适应阈值大于 0.5。 T_{a1} 发生开路故障后,三相电流发生严重失真,非故障相电流也不再保持对称性。检测变量 O_{ab} 增大,自适应阈值 P_{ab} 迅速减小,当 $O_{ab} > P_{ab}$ 时,判定故障发生, F_{ab} 置 1。同时,检测变量 O_{ca} 增大,自适应阈值 P_{ca} 迅速减小,当 $O_{ca} > P_{ca}$ 时, F_{ca} 置 1。此时可以判断开路故障发生在 T_{a1} 开关管。

B 相电流传感器离线故障实验结果如图 9 所示,当电流传感器发生离线故障时,其采样值变为 0。当电流传感器发生离线故障时,检测变量 P_{ab} 减小,自适应阈值 O_{ab} 迅速增大,当 $O_{ab} > P_{ab}$ 时,判定故障发生,故障标志 F_{ab} 置 1。同时,检测变量 P_{bc} 减小,自适应阈值 O_{bc} 迅速增大,当 $O_{bc} > P_{bc}$ 时,判定故障发生,故障标志 F_{bc} 置 1。此时, $|T_m| > \gamma$,判断发生 B 相电流传感器离线故障。判断电流传感器发生故障后,利用式 (20) 对 B 相电流传感器进行故障重构,系统正常运行,整个过程用时小于 10 ms。

2) 多故障诊断实验结果:图 10 给出了 B 相电流传感

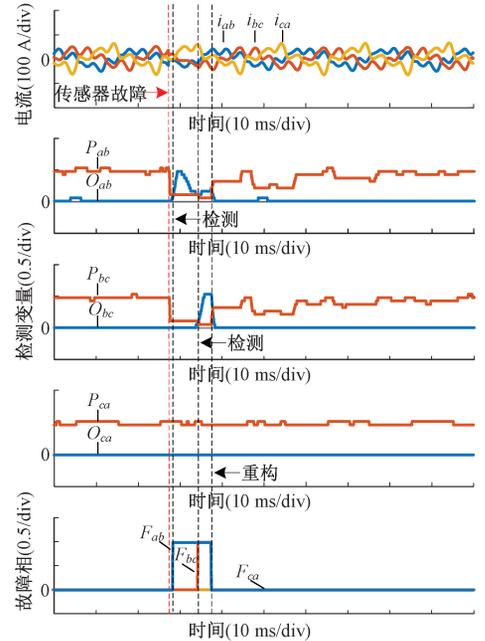


图 9 B 相电流传感器离线故障实验结果

Fig. 9 Experimental results for the B-phase current sensor disconnection fault

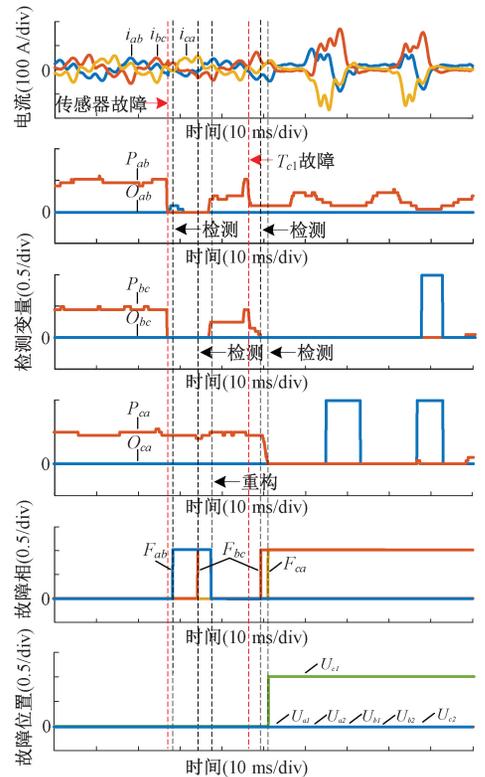


图 10 B 相电流传感器离线和 T_{c1} 开路故障

Fig. 10 Experimental results of B-phase current sensor disconnection and T_{c1} open-circuit fault

器发生离线故障和 C 相 T_{c1} 发生开路故障的诊断结果。B 相电流传感器发生离线故障后,检测变量 P_{ab} 减小,自

适应阈值 O_{ab} 迅速增大,当 $O_{ab} > P_{ab}$ 时,判定故障发生,故障标志 F_{ab} 置 1。同时,检测变量 P_{bc} 减小,自适应阈值 O_{bc} 迅速增大,当 $O_{bc} > P_{bc}$ 时,判定故障发生,故障标志 F_{bc} 置 1。立即进行故障重构,对传感器故障进行容错处理,故障重构完成后,系统继续运行。B 相电流传感器发生离线故障一个基波周期内, T_{c1} 发生开路故障,检测变量 O_{bc} 增大,自适应阈值 P_{bc} 迅速减小,当 $O_{bc} > P_{bc}$ 时,判定故障发生, F_{bc} 置 1。同时,检测变量 O_{ca} 增大,自适应阈值 P_{ca} 迅速减小,当 O_{ca} 大于 P_{ca} 时, F_{ca} 置 1。

3) 诊断方法鲁棒性测试:图 11 和 12 分别是 50% 负载投入和切除的实验波形。由实验结果可知,当负载投入时,故障检测变量 Q_{xy} 略有增加,当负载切除时,故障检测变量 Q_{xy} 略有减小,但上述变化很小,不会产生因负载变化导致的故障误诊断。由此可以看出,所提故障诊断方法对负载波动也有很强的鲁棒性。

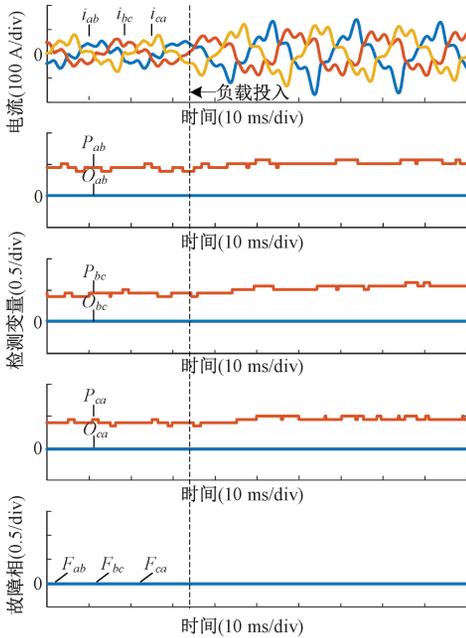


图 11 50% 负载投入对故障诊断方法影响实验
Fig. 11 Experiment on the effect of 50% load input on fault diagnosis methods

图 13 给出了在三相电感参数严重不平衡时 T_{a1} 发生开路故障的诊断结果。实验中, A、B、C 三相的滤波电感分别设置为 0.1、0.2、0.3 mH, A 相不平衡度高达 66.6%。 T_{a1} 发生开路故障后,检测变量 O_{ab} 增大,自适应阈值 P_{ab} 迅速减小,当 $O_{ab} > P_{ab}$ 时,判定故障发生,故障标志 F_{ab} 置 1。同时,检测变量 O_{ca} 增大,自适应阈值 P_{ca} 迅速减小,当 $O_{ca} > P_{ca}$ 时,故障标志 F_{ca} 置 1。整个故障诊断时间小于 3 ms,非故障自适应阈值 P_{bc} 没有受到电感参数变化影响,其波动很小。从实验结果可以看出,即使在电感参数由于制造工艺或者参数退化导致严重不平衡的情况下,所提故障诊断方法几乎不受影响。

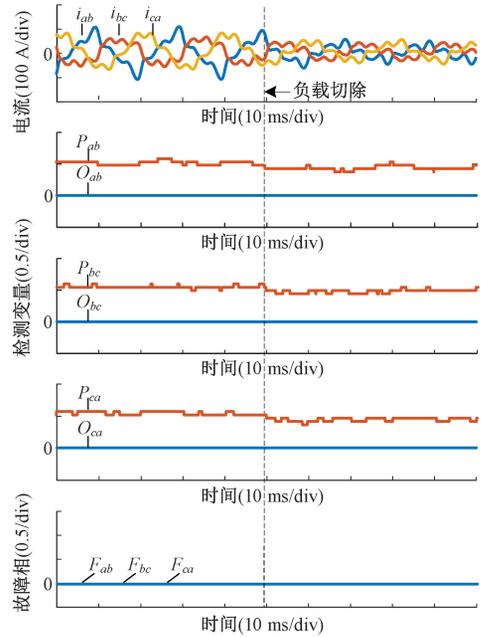


图 12 50% 负载切除对故障诊断方法影响实验
Fig. 12 Experiment on the effect of 50% load shedding on fault diagnosis methods

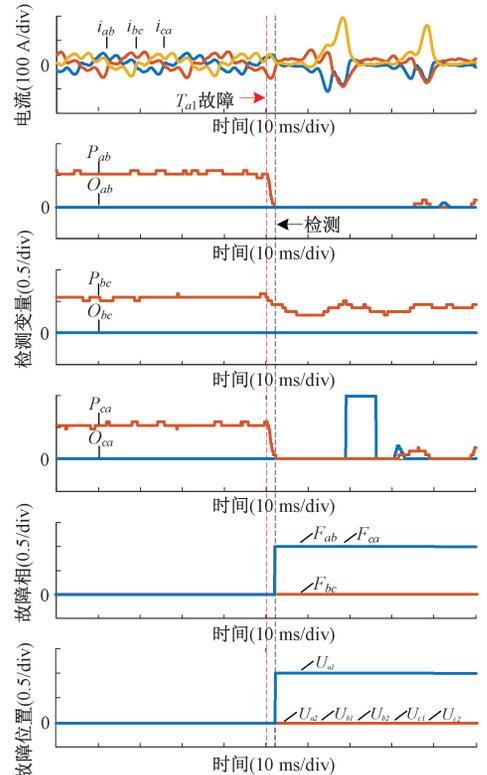


图 13 三相电感不平衡下的 T_{a1} 开路故障实验结果
Fig. 13 Experimental results of T_{a1} open-circuit fault under three-phase inductance unbalance

图 14 为对一个基波周期进行 20 等分后发生开路故障、电流传感器故障的故障诊断时间。在正半周期开始

和中间阶段发生开路故障的诊断时间小于 3 ms,故障发生在负半周期时,检测时间较长。此时 T_{a1} 开路对负半周期电流影响较小,需要在下一个正半周期开始才能检测。当发生电流传感器故障时,一个基波周期的多数时间下检测时间小于 4 ms,但当在电流过零点附近发生故障时,检测时间变长,最长时间小于 6 ms。因为此时电流变化较慢,导致故障检测变量和自适应阈值变化较慢,造成诊断时间变长。由此可以看出,所提出的故障诊断方法性能比较优异。

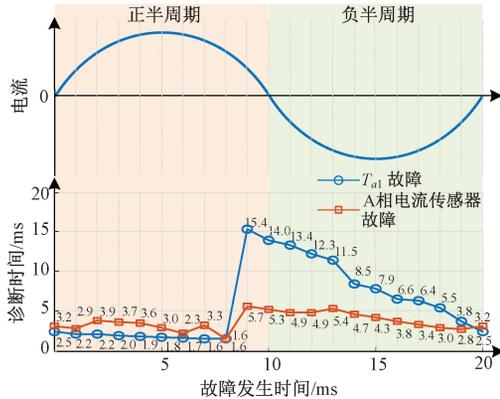


图 14 一个基波周期内故障诊断时间

Fig. 14 Fault diagnosis time at different times within a fundamental cycle

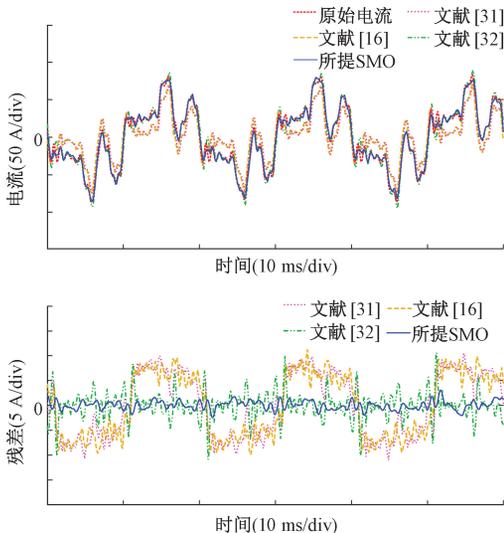


图 15 滑模观测器性能对比

Fig. 15 Comparison of sliding mode observer performance

3.2 性能对比

为了体现所提出的 CCSMO 的优越性,图 15 对比了传统滑模观测器 (sliding mode observer, SMO)^[31]、区间 SMO^[16] 和积分 SMO^[32]。从残差可以看出,提出的 CCSMO 不仅可以快速跟踪电流,而且极大的减弱了抖振。

为了进一步验证所提故障诊断方法的快速诊断性能,采用文献[16]的方法进行实验对比。文献[16]采用区间滑模观测器得到三相观测电流,并采用周期平均平方和的形式构造电流形态因子 D_x 和 K_x , 分别见式(33)和(37)。图 16 为基于本实验平台的 T_{a1} 开路故障诊断结果,开路故障实验条件与本文中图 9 的实验条件一致。首先采用文献[16]的电流形态因子构造出的检测变量和阈值在正常运行状态时非常接近,极易发生误诊断。发生 T_{a1} 开路故障后, D_a 、 K_a 、 D_c 和 K_c 缓慢增加。由于其谐波电流跟踪效果差,一个周波后才检测出故障发生,非故障阈值略有变化。通过对比可以发现,所提故障诊断方法不受谐波电流的影响,对非线性负载下的开路故障诊断效果很好。

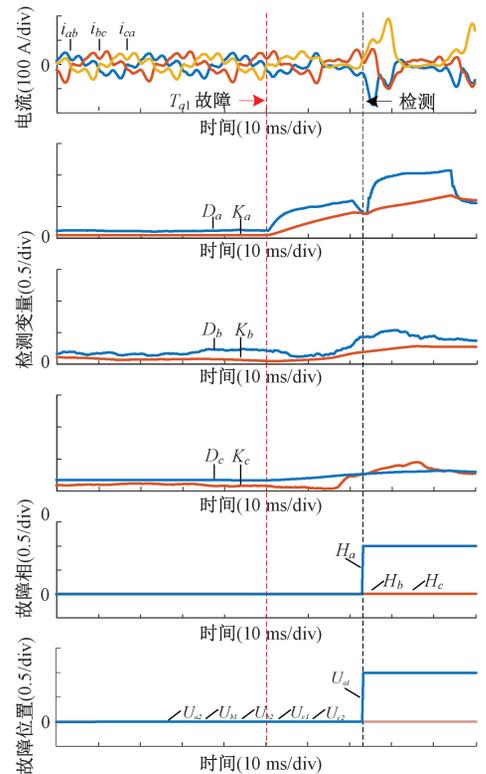


图 16 基于区间 SMO 的 T_{a1} 开路故障实验结果
Fig. 16 Experimental results of T_{a1} open-circuit fault based on interval SMO

为了进一步证明所提出的故障诊断方法的性能,将其与之前的方法在多个方面进行了对比,如表 2 所示。文献[16, 33]的研究对象为三电平 NPC 逆变器,文献[16]采用的是区间 SMO,可以诊断开关管和电流传感器的多种故障,但是其难以跟踪非线性负载产生的谐波电流并且只能用于大滤波电感场景,其电流跟踪效果如图 15 所示。文献[33]提出了一种改进的卷积神经网络和样本放大方法,可以识别多种开路故障,但需要采集大

表 2 不同故障诊断方法对比
Table 2 Comparison with different diagnosis methods

故障诊断方法/文献	研究对象	故障模式	检测变量	电感/mH	负载类型	检测时间/FP	复杂度	诊断所需数据
[16]	三电平 NPC 逆变器	开路故障; 电流传感器故障	三相电流 三相电压	8	电阻	<0.15	中	少
[33]	三电平 NPC 逆变器	开路故障	三相电流	3	电阻	<1	高	多
[34]	三相 逆变器	开路故障	三相电流	330(定子电感)	感应电机	<1.3	高	中
[35]	三相 逆变器	开路故障	三相电流 三相电压	1.1	同步电机	<2	低	少
[36]	三电平 T 型逆变器	开路故障	三相电流 三相电压	2.632	电阻	<0.4	中	少
[37]	三电平 T 型逆变器	开路故障	三相电流 三相电压	3	电阻	<1.5	中	多
所提故障 诊断方案	三相逆变器	开路故障; 电流传感器故障	三相电流 三相电压	0.3	三相整流桥	<0.15	中	少

注:FP 代表一个基波周期

量数据且诊断时间较长。文献[34-35]研究对象为三相两电平逆变器,文献[34]按照季节趋势进行分解,将三相电流分解为趋势分量、季节分量和剩余分量,构造阈值进行诊断,该方法需要一定量的数据、只能诊断开关管开路故障且诊断时间较长。文献[35]通过识别电流波形的特征变化来定义故障检测波形,通过对逆变器每一个阶段中的电流半波进行统计分析来确定故障开关的位置。文献[35]的诊断方法简单需要的数据少但诊断时间过长。文献[36-37]研究对象为三电平 T 型逆变器,采用电压和电流诊断开关管开路故障,但是其负载为阻性负载并且诊断时间较长。通过上述详细对比,可以看出所提故障诊断方法可以在小滤波电感的基础上快速诊断开路和传感器故障,不需要采集大量数据,不需要添加额外的传感器或者采样装置,可以应对非线性负载产生的谐波和负载波动,复杂度适中。

4 结 论

在本文中,提出了一种在非线性负载下同时诊断开关管开路故障和电流传感器故障的故障诊断方法。首先,建立了三相电流的状态空间方程。然后,提出了基于复合控制器的离散滑模观测器实现谐波电流、电压的准确跟踪。为此设计了零相移重复控制器串联 PI 控制器的复合控制器并且分析了观测器的稳定性条件。接下

来,设计了用以诊断故障的可调节检测变量和自适应阈值变量。利用非故障传感器对故障传感器进行故障重构以保证系统稳定运行。

所提故障诊断方案,可以诊断单故障,例如单独的开路故障和传感器故障,也可以诊断多种故障。例如传感器和开关管同时故障。其中,开路故障的诊断时间小于 3 ms,电流传感器故障的诊断时间小于 6 ms。即使在电感参数严重不平衡和负载波动的情况下,所提故障诊断方法几乎不受影响。此外,所提出的方法不需要额外的传感器,不需要采集大量数据,并且诊断速度较快。最后,不同故障下的实验结果证明了所提故障诊断方案的有效性、快速性和鲁棒性。

参考文献

- [1] ÑIGUZE J I, DUARTE J N, CAMACHO A J, et al. Voltage support provided by three-phase three-wire inverters with independent reactive phase-current injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 11806-11816.
- [2] SANTIPRAPAN P, AREERAK K, AREERAK K. An adaptive gain of proportional-resonant controller for an active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 1433-1446.

- [3] 许明夏, 李长安, 王志强, 等. 基于功率因数自适应的城轨辅助逆变器 DPWM 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 356-365.
XU M X, LI CH AN, WANG ZH Q, et al. DPWM control strategy of auxiliary inverter for urban rail transit based on adaptive power factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 356-365.
- [4] 王敏, 王莹, 陈凯, 等. 绝缘栅双极型晶体管故障检测方法: 综述与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 1-14.
WANG M, WANG Y, CHEN K, et al. Fault diagnostic of insulated gate bipolar transistor: overview and prospect[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 1-14.
- [5] YU Y, LI H, YAO R, et al. Short-circuit capability optimization of press-pack IGBT by improving active edge heat dissipation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6143-6156.
- [6] 耿学锋, 何赉泽, 王广鑫, 等. IGBT 关断时刻的应力波测量优化及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5503-5512.
GONG X F, HE Y Z, WANG G X, et al. Measurement optimization and analysis of influencing factors of IGBT's turn-off stress wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5503-5512.
- [7] 赵莹莹, 何怡刚, 杜博伦, 等. 基于 LSSA 优化 DBN 的双有源桥变换器开路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 56-64.
ZHAO Y Y, HE Y G, DU B L, et al. Open circuit fault diagnosis of dual active bridge converter based on LSSA optimized DBN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 56-64.
- [8] 孙曙光, 丁铭真, 田朋, 等. 基于多特征融合的 APF 中 IGBT 开路故障特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2888-2899.
SUN SH G, DING M ZH, TIAN P, et al. Feature extraction of IGBT open circuit fault in active power filter based on multi-feature fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2888-2899.
- [9] 李冉, 邢砾云, 庞娜, 等. 基于 SMA-VMD 和优化神经网络的逆变器开关故障诊断[J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 1-9.
LI R, XING L Y, PANG N, et al. Fault diagnosis based on SMA-VMD and optimization of neural networks for NPC three-level inverters[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 1-9.
- [10] 唐圣学, 马晨阳, 勾泽. 基于时频特征融合与 GWO-ELM 的棒控电源早期故障状态辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 121-130.
TANG SH X, MA CH Y, GOU Z. Early fault state identification method of the rod control system power equipment based on time-frequency characteristics fusion and GWO-ELM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 121-130.
- [11] 武鸿, 王跃, 薛英林, 等. 适用多功率的最近电平调制下 MMC 子模块开路故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 233-245, 302.
WU H, WANG Y, XUE Y L, et al. A diagnosis strategy for open-circuit submodule faults in MMCs under nearest level modulation suitable for different powers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 233-245, 302.
- [12] 唐圣学, 王维威, 马强, 等. 三电平逆变器 IGBT 器件接线故障在线诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 19-30.
TANG SH X, WANG W W, MA Q, et al. Research on on-line diagnosis method of IGBT device wiring faults in three-level inverter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 19-30.
- [13] ZHANG W W, HE Y G. A hypothesis method for T-type three-level inverters open-circuit fault diagnosis based on output phase voltage model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9718-9732.
- [14] 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.
- [15] 陈铭芸, 何怡刚, 赵莹莹. 基于开关状态的三电平 NPC 整流器开路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 62-71.
CHEN M Y, HE Y G, ZHAO Y Y. Open-circuit fault diagnosis of three-level NPC rectifier based on switching states[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 62-71.
- [16] XU SH Q, HUANG W ZH, WANG H, et al. A

- simultaneous diagnosis method for power switch and current sensor faults in grid-connected three-level NPC inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 1104-1118.
- [17] WANG T, LIANG L L Y, HAO ZH G, et al. LPV model-based fault detection and isolation in DC microgrids through signature recognition[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(4): 2558-2571.
- [18] 杨泽斌, 王丁, 孙晓东, 等. 无轴承异步电机传感器故障容错控制[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5): 99-109.
YANG Z B, WANG D, SUN X D, et al. Fault tolerant control for sensor fault of a bearingless asynchronous motor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(5): 99-109.
- [19] 郁明, 李旺林, 蓝盾. 基于优化自适应阈值的非线性机电系统传感器故障检测和主动容错控制[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 26-37.
YU M, LI W L, LAN D. Sensor fault detection and active fault-tolerant control for the nonlinear mechatronic system based on optimized adaptive threshold[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 26-37.
- [20] 许水清, 刘锋, 何怡刚, 等. 基于自适应滑模观测器的新能源汽车驱动系统电流传感器微小故障诊断[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(18): 7277-7288.
XU SH Q, LIU F, HE Y G, et al. Minor fault diagnosis for current sensor of new energy vehicle drive system based on adaptive sliding mode observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 7277-7288.
- [21] 冯秋峰, 李小波, 张煜. 基于反电动势的地铁牵引电机电流传感器故障检测与容错控制[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(3): 138-144.
FENG Q F, LI X B, ZHANG Y. Fault detection and fault tolerance control of subway traction motor current sensor based on counter electromotive force[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(3): 138-144.
- [22] JLASSI I, CARDOSO A J M. A single method for multiple IGBT, current, and speed sensor faults diagnosis in regenerative PMSM drives[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(3): 2583-2599.
- [23] XU SH Q, HUANG W ZH, HUANG D R, et al. A reduced-order observer-based method for simultaneous diagnosis of open-switch and current sensor faults of a grid-tied NPC inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(7): 9019-9032.
- [24] WANG X Q, WANG ZH, XU ZH X, et al. Comprehensive diagnosis and tolerance strategies for electrical faults and sensor faults in dual three-phase PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(7): 6669-6684.
- [25] DAN H B, YUE W, XIONG W J, et al. Open-switch and current sensor fault diagnosis strategy for matrix converter-based PMSM drive system[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(1): 875-885.
- [26] XU SH Q, XU X F, DU H B, et al. Comprehensive diagnosis strategy for power switch, grid-side current sensor, DC-link voltage sensor faults in single-phase three-level rectifiers[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, 71(7): 3343-3356.
- [27] 杨权, 梁永昌, 魏建荣, 等. 多谐波源下分布式电源并网逆变器的谐波抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(11): 2908-2920.
YANG Q, LIANG Y CH, WEI J R, et al. Research on harmonic suppression strategy of grid connected inverter under multi-harmonic sources[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(11): 2908-2920.
- [28] 李文番, 张国钢, 钟浩杰, 等. 一种高频率分辨率的谐波、间谐波分析模型[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(13): 3372-3379, 3403.
LI W F, ZHANG G G, ZHONG H J, et al. A high frequency resolution harmonic and inter harmonic analysis model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(13): 3372-3379, 3403.
- [29] 刘瑞娟, 聂卓赞, 马亦婧, 等. 基于自抗扰重复控制的压电驱动器高精度跟踪控制[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(11): 197-203.
LIU R J, MIE ZH Y, MA Y J, et al. Sensor fault detection and active fault-tolerant control for the nonlinear mechatronic system based on optimized adaptive threshold[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(11): 197-203.

- [30] 李佳润, 陈勇, 陈光, 等. 基于比例谐振自抗扰控制的电机谐波抑制与噪声优化[J]. 电子测量技术, 2024, 47(9): 18-25.
LI J R, CHEN Y, CHEN G, et al. Harmonic suppression and noise optimization of electric machines based on proportional resonance self-immunity control[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(9): 18-25.
- [31] DE WIT C C, FIXOT N. Robot control via robust estimated state feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1991, 36(12): 1497-1501.
- [32] MOUSAVI M S, DAVARI S A, NEKOUKAR V, et al. Integral sliding mode observer-based ultralocal model for finite-set model predictive current control of induction motor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2912-2922.
- [33] SHEN H L, TANG X, LUO Y F, et al. Online open-circuit fault diagnosis for neutral point clamped inverter based on an improved convolutional neural network and sample amplification method under varying operating conditions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73(3512612): 1-12.
- [34] ZHOU Y, ZHAO J, SONG Y J, et al. A seasonal-trend decomposition based voltage-source-inverter open-circuit fault diagnosis method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15517-15527.
- [35] LUO Y, ZHANG L, CHEN CH Y, et al. Real-time diagnosis of open circuit faults in three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7572-7585.
- [36] WU ZH X, SUN J J, SONG Y J, et al. An open-circuit fault diagnosis method for four-wire T-type three-level rectifier[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 1045-1055.
- [37] WANG R K, SONG L M, CHENG J Q, et al. Open-circuit diagnosis method for T-type three-level inverter based on extracted IMF energy feature[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73(3530413): 1-13.

作者简介



孙源, 2018年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 现为北京交通大学博士研究生。主要研究方向为变流器故障诊断和状态监测。

E-mail: yuansun@bjtu.edu.cn

Sun Yuan received his B. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2018. He is currently a Ph. D. candidate at Beijing Jiaotong University. His main research interests include converter fault diagnosis and condition monitoring.



陈杰(通信作者), 2008年于北京交通大学获得学士学位, 2013年于北京交通大学获得博士学位, 现为北京交通大学副教授, 主要研究方向为牵引传动和故障诊断。

E-mail: jiechen@bjtu.edu.cn

Chen Jie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2008, and received his Ph. D. degree from Beijing Jiaotong University in 2013. He is currently an associate professor at Beijing Jiaotong University. His main research interests include traction drives and fault diagnosis.