

一种级联H桥多电平逆变器故障诊断方法

于晶荣, 张刚, 邱均成, 王益硕, 孙健文

(中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:为了诊断级联H桥多电平逆变器的开关管开路故障,提出一种基于载波层叠调制(LSPWM)技术的故障诊断方法,直接对H桥输出电压、负载电流和驱动信号的输出特性曲线进行分析。当部分驱动信号断开后,相应的电流和电压出现部分缺失和波动,从而推出故障情况下三者之间的对应关系。依据调制波和负载电流的方向,将系统运行分为4种工作模式,并在特定模式下诊断故障。对故障情况下负载电流过零处的特性曲线进行分析,用以识别H桥中对角开关故障。与现有方法相比,该方法扩展基于LSPWM下的故障范围为双管故障,诊断逻辑易于理解且不需要添加额外的硬件电路。通过仿真证明了所提故障诊断方法的正确性和有效性。

关键词:级联H桥;多电平逆变器;故障诊断;开路故障;载波层叠调制

DOI:10.15938/j.emc.2023.09.013

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2023)09-0119-07

Fault diagnosis method for cascaded H-bridge multilevel inverter

YU Jingrong, ZHANG Gang, QIU Juncheng, WANG Yishuo, SUN Jianwen

(College of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A fault diagnosis method based on level-shifted pulse width modulation (LSPWM) technique was proposed to diagnose the switch open circuit fault of cascaded H-bridge multilevel inverter. The output characteristic curves of H-bridge output voltage, load current and driving signal were analyzed directly. When part of the driving signal is disconnected, the corresponding current and voltage have partial loss and fluctuation so as to deduce the corresponding relationship among the three in the case of failure. According to the direction of modulation wave and load current, the system was divided into four working modes, and faults were diagnosed in the specific mode. The characteristic curve of load current crossing zero was analyzed in order to identify the fault of diagonal switch in H-bridge. Compared with the existing methods, the fault range of the proposed method is extended to double tube fault based on LSPWM, and by the diagnostic logic it is easy to understand without additional hardware circuits. Simulation results show correctness and effectiveness the proposed fault diagnosis method.

Keywords: cascaded H-bridge; multilevel inverter; fault diagnosis; open-circuit fault; level-shifted pulse width modulation

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 湖南省自然科学基金(2022JJ30742);长沙市自然科学基金(kq2202103)

作者简介: 于晶荣(1981—),女,博士,副教授,研究方向为电能质量分析与控制技术;

张刚(1995—),男,硕士研究生,研究方向为多电平逆变器故障诊断和容错策略等;

邱均成(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电能质量治理和逆变器故障穿越等;

王益硕(1998—),女,硕士研究生,研究方向为新能源电能质量控制策略;

孙健文(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电网阻抗的系统辨识。

通信作者: 张刚

0 引言

级联 H 桥多电平逆变器 (cascaded H-bridge multilevel inverter, CHBMLI) 因其具有易于模块化、高压大容量和谐波失真低等优点,已广泛应用于电气化铁路与城市轨道交通的牵引系统、电动汽车、光伏并网发电系统、高压直流输电、交流电机驱动和无功补偿等场合^[1-4]。

由于 CHBMLI 采用了大量的半导体开关来获得高质量的输出功率,因此它面临的主要困境是开关失效的概率升高^[5]。根据相关统计和调查,开关故障大约占整个逆变器系统故障的近三分之一^[6]。开关管的故障通常可以分为开路故障 (open-circuit fault, OCF) 和短路故障 (short-circuit fault, SCF)。SCF 造成的影响非常迅速,通常由硬件方案解决^[7]。在 OCF 情况下,由于固有的开关冗余,CHBMLI 可以继续运行,但其输出质量降低。然而,这可能使其他健康开关的电压应力增加,并可能导致整个系统损坏。所以,OCF 诊断速度与准确性对于系统持续可靠运行十分关键^[8-9],也直接关系到容错控制策略的选择。

近些年,OCF 故障诊断方法被广泛研究^[10-18]。现有多电平逆变器的 OCF 故障诊断方法包括基于模型、基于智能算法和基于信号三类方法。文献[10]中每个 CHB 支路都用一个电流传感器和一个电压传感器监测支路的电流和输出电压,将测量的电压与预期的电压进行比较,并根据偏差的大小和电流向确定开路故障的位置。文献[11]基于计算的平均桥臂极电压与误差自适应阈值,将平均桥臂极电压偏差作为故障检测与识别的诊断变量,实现电压源逆变器单、多管开路故障诊断。文献[12]采用一个电压传感器测量 CHB 的网侧电压,通过对 CHB 网侧电压估计值与实测值的比较来定位故障。基于此类方法的开关故障诊断,由于开关器件多且非线性的影响导致建模较为困难。

为了避免建模带来的困难,相关学者采用基于智能算法的故障诊断方法。文献[13]通过特征分析选取正常模式和 8 种故障模式下的 7 个电压谐波参数作为故障特征向量,构造一个三层神经网络,其中 7 个特征向量为神经网络的输入层,从而可以在一个调制周期内准确地识别故障位置。文献[14]利用 d-q 变换将三相电压信号转换为两相来减少故障信息的维数,建立一个 4 层的神经网络进行故

障诊断。文献[15]提出一种基于小波包变换和支持向量机的故障诊断方法,提取小波包能量作为故障特征向量,并把该故障特征向量作为支持向量机的输入量。该类方法虽然能够避免诊断精度对系统模型的依赖性,但是计算量大且不能用于实时的在线诊断。

为了实现实时的在线诊断,相关学者采用基于信号的故障诊断方法。文献[16]介绍了一种 CHB 三电平逆变器故障诊断方法,该方法利用输出电压和负载电流对应的波形特征进行故障诊断,解决了 H 桥中对角开关因故障特征相似难以识别的问题。文献[17]中的故障诊断不仅考虑单管故障,也考虑了单个二极管故障以及开关管和对应二极管同时故障的情况。文献[18]中将电平数增加至五电平,提出了一种精确识别 8 个开关管的单管故障诊断方法。这类方法与前两类方法相比,实现简单且容易理解,并且不需要额外的硬件电路,具有较高的实用性。

由此可见,对于 CHBMLI 的故障诊断,基于信号的方法有更大的发展潜力。然而当双管同时发生故障,对系统的影响更为严重,但是以上方案均考虑单管 OCF,对于双管 OCF 的诊断仍有很大的局限。目前对双管故障的研究主要集中于三相桥式逆变器,虽然文献[18]中的方法可以应用于三相级联逆变器中双管故障诊断,但 2 个开关管需要在不同相中分布,而在同一相中每个 H 桥均有一个开关管发生故障的双管故障情况下,该方法便得不到较好的诊断效果。

为了克服以上方案的不足,本文通过分析双管故障下输出电压电流以及驱动信号的特征,提出一种可以精确识别同相不同 H 桥双管故障的诊断方法。

1 CHB 五电平逆变器的工作原理

图 1 为单相 CHB 五电平逆变器的整体拓扑结构,其采用电压源型逆变单元(H 桥)串联组成以实现高压大功率输出,谐波分量少、波形畸变小。它包括:2 个 H 桥(H 桥 1 和 H 桥 2)、8 个带有反并联二极管($D_1 \sim D_8$)的 IGBT 开关($S_1 \sim S_8$)、滤波电容 C 、直流电源 U_{dc} 、LC 滤波器和感性负载。 $G_1 \sim G_8$ 是相应的驱动信号。交流输出端顺序连接,即各单元输出电压叠加,进而形成一个总的多电平输出电压。实际系统中级联模块的数量 N 是由设备的工作电

压、直流侧电压和制造成本等决定。

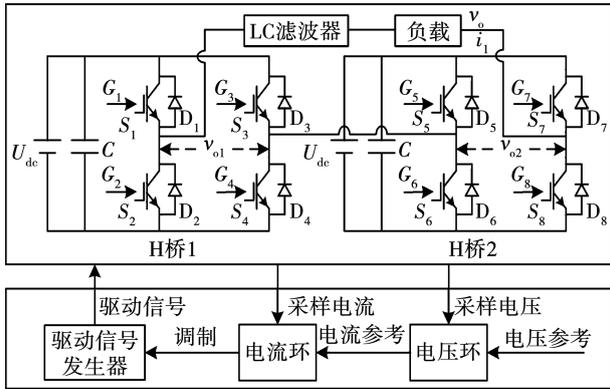


图1 电路拓扑结构

Fig.1 Circuit topology

2个H桥的输出电压分别为 v_{o1} 和 v_{o2} ,输出电压为 v_o ,从图中可以得出输出电压为

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} \quad (1)$$

控制方法采用电压电流双闭环控制,2个H桥输出电压和负载电流作为采样变量。CHBMLI常用的调制方法包括载波层叠调制(level-shifted pulse width modulation, LSPWM)和载波移相调制(phase-shifted pulse width modulation, PSPWM),与PSPWM相比,LSPWM在高电平与低电平场合都适用,而且具有开关损耗易优化和谐波特性好等优势。LSPWM包括同向层叠(phase disposition, PD)、正负反向层叠(phase opposition disposition, POD)和交替反向层叠(alternate phase opposition disposition, APOD)。

相比于其他两种方法,PD的谐波性能最好,因此采用PD-LSPWM作为调制技术,PD-LSPWM信号的产生如图2所示,其中 $v_m(t)$ 为正弦调制波信号, $c_1(t) \sim c_4(t)$ 为4个幅值不同的高频三角载波信号。基于PD-LSPWM的输出电压 v_o 和各个开关 $S_x(x=1 \sim 8)$ 之间的关系如表1所示,1和0分别表示开通和关断状态(对驱动信号也适用)。

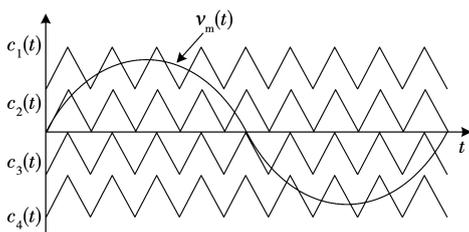


图2 PD-LSPWM信号

Fig.2 Signal of PD-LSPWM

表1 v_o 和 S_x 的关系

Table 1 Relationship between v_o and S_x

v_o	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
$2U_{dc}$	1	0	0	1	1	0	0	1
U_{dc}	1	0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0	1	0	1
$-U_{dc}$	0	1	1	0	0	1	0	1
$-2U_{dc}$	0	1	1	0	0	1	1	0

2 CHB 五电平逆变器的故障特征分析

为了便于分析故障信号的特点,选取CHB五电平逆变器作为分析和仿真的对象,主要考虑位于同相不同H桥中双开关同时发生故障的情况。单相五电平逆变器共有8个开关,因此上述故障情况总共有16种,如表2所示。

表2 故障情况

Table 2 Fault condition

序号	故障	序号	故障
1	S_1 和 S_5 故障	9	S_3 和 S_5 故障
2	S_1 和 S_6 故障	10	S_3 和 S_6 故障
3	S_1 和 S_7 故障	11	S_3 和 S_7 故障
4	S_1 和 S_8 故障	12	S_3 和 S_8 故障
5	S_2 和 S_5 故障	13	S_4 和 S_5 故障
6	S_2 和 S_6 故障	14	S_4 和 S_6 故障
7	S_2 和 S_7 故障	15	S_4 和 S_7 故障
8	S_2 和 S_8 故障	16	S_4 和 S_8 故障

现定义如下变量: S_{xoc} 表示开关 $S_x(x=1 \sim 8)$ 发生故障,故障下2个H桥输出电压和负载电流分别表示为 v_{o1oc} 、 v_{o2oc} 和 i_{loc} 。根据调制波和负载电流的方向,带有感性负载的CHBMLI在正常情况下可以分为4种工作模式,如表3所示,对于其他负载,上述工作模式不再适用。特定的开关故障只在一定的工作模式下表现出故障特征,而且H桥中对角开关在相同的工作模式下表现出故障特征,即 S_1 、 S_4 、 S_5 、 S_8 和 S_2 、 S_3 、 S_6 、 S_7 分别在模式1和模式2中表现出故障特征,从而减少检测计算量。

由于故障情况较多,以 S_{2oc} 和 S_{8oc} 的分析为例。在 S_{2oc} 和 S_{8oc} 下,每个H桥及负载电流输出波形如图3所示。对于H桥1:当 $G_4=1, G_1=G_2=G_3=0$

时, $0 < v_{o1oc} < U_{dc}$, $i_{loc} \approx 0$; 当 $G_3 = 1, G_1 = G_2 = G_4 = 0$ 时, $v_{o1oc} \approx 0, i_{loc} < 0$, H 桥 1 中电流流通方向为 D_1 到 S_{3o} 。对于 H 桥 2: 当 $G_5 = 1, G_6 = G_7 = G_8 = 0$ 时, $v_{o2oc} \approx 0, i_{loc} > 0$, H 桥 2 中电流流通方向为 D_7 到 S_5 ; 当 $G_6 = 1, G_5 = G_7 = G_8 = 0$ 时, $v_{o2oc} \approx -U_{dc}, i_{loc} > 0$, H 桥 2 中电流流通方向为 D_6 到 D_7 。

表 3 工作模式

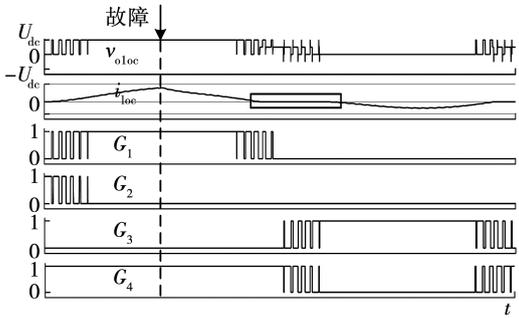
Table 3 Working mode

工作模式	v_m	i_l
模式 1	+	+
模式 2	-	-
模式 3	+	-
模式 4	-	+

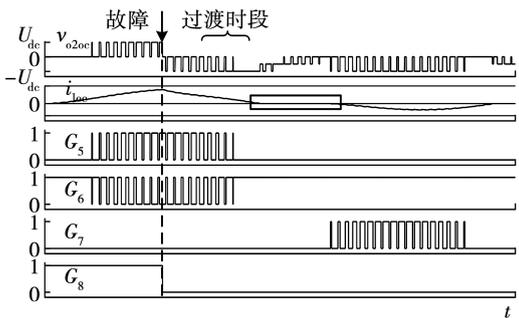
表 4 故障特征表

Table 4 List of fault characteristic

故障	v_{o1oc}	i_{loc}^1	v_{o2oc}	i_{loc}^2	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8
S_{1oc} 和 S_{5oc}	0	1	0	1	0	1/0	0	1	0	1/0	0	1
S_{1oc} 和 S_{6oc}	0	1	1/0	1/0	0	1/0	0	1	0	0	0	1
S_{1oc} 和 S_{7oc}	0	1	0	1	1	1/0	0	1	0	1	0	1
S_{1oc} 和 S_{8oc}	1/0	1/0	1/0	1/0	0	0	0	1	1/0	1/0	0	0
S_{2oc} 和 S_{5oc}	1/0	1	0	1	0	0	1/0	1/0	0	1/0	0	1
S_{2oc} 和 S_{6oc}	1/0	1	0	1	0	0	1/0	1/0	0	0	0	1
S_{2oc} 和 S_{7oc}	1/0	1/0	0	1	0	0	1/0	1/0	0	1	0	1
S_{2oc} 和 S_{8oc}	1/0	1/0	1/0	1	0	0	1/0	1/0	1/0	1/0	0	0
S_{3oc} 和 S_{5oc}	1/0	1	0	1	0	1	0	1/0	0	1/0	0	1
S_{3oc} 和 S_{6oc}	1/0	1	0	1	0	1	0	1/0	0	0	0	1
S_{3oc} 和 S_{7oc}	1/0	1	0	1	0	1	0	1/0	0	1	0	1
S_{3oc} 和 S_{8oc}	0	1	1/0	1	0	1	0	1/0	1/0	1/0	0	0
S_{4oc} 和 S_{5oc}	1/0	1	0	1	1/0	1/0	0	0	0	1/0	0	1
S_{4oc} 和 S_{6oc}	1/0	1	1/0	1/0	1/0	1/0	0	0	0	0	0	1
S_{4oc} 和 S_{7oc}	1/0	1	0	1	1/0	1/0	0	0	0	1	0	1
S_{4oc} 和 S_{8oc}	1/0	1/0	1/0	1/0	1	0	0	0	1/0	1/0	0	0



(a) S_{2oc} 和 S_{8oc} 下 H 桥 1 输出电压、负载电流和驱动信号



(b) S_{2oc} 和 S_{8oc} 下 H 桥 2 输出电压、负载电流和驱动信号



(c) 放大的负载电流过零处(即(a)和(b)中矩形部分)

图 3 S_{2oc} 和 S_{8oc} 下的输出波形

Fig. 3 Output waveform under S_{2oc} 和 S_{8oc}

其他开关的故障情况分析类似,故障特征表如表 4 所示,其中 i_{loc}^1 和 i_{loc}^2 分别表示在诊断 H 桥 1 和 H 桥 2 中的故障开关时所采集的不同时刻的负载电流。

3 基于信号特征的故障诊断方法

根据以上分析及故障表提出如图 4 所示的故障诊断方法,该故障诊断方法以 H 桥电压、负载电流以及相应驱动信号为诊断变量,主要通过对双管故障下 H 桥中对角开关进行诊断达到不同 H 桥下任意双管故障的诊断。图 5 中变量定义如下: v_{e1} 和 v_{e2} 分别代表 2 个 H 桥实际电压和参考电压之间的差值,正常情况下通常在一个范围内波动, v_{e1} 在 δ_{vo1l} 至 δ_{vo1h} 范围内变化, v_{e2} 在 δ_{vo2l} 至 δ_{vo2h} 范围内变化;为了提高可靠性,引入 w_1 和 w_2 两个变量,分别表示 2 个 H 桥对应的误差变化百分比,取为 2.5% 和 3%; T_s 为图 3(b) 中过渡时段的起始时间,与开关频率和滤波器参数等有关; f_1, f_2 和 f_3 为相应电压电流的参考阈值。

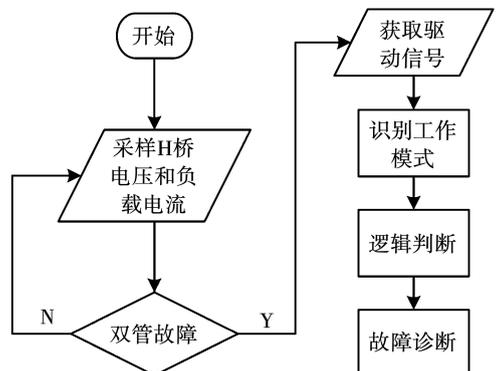


图 4 诊断过程

Fig. 4 Diagnostic process

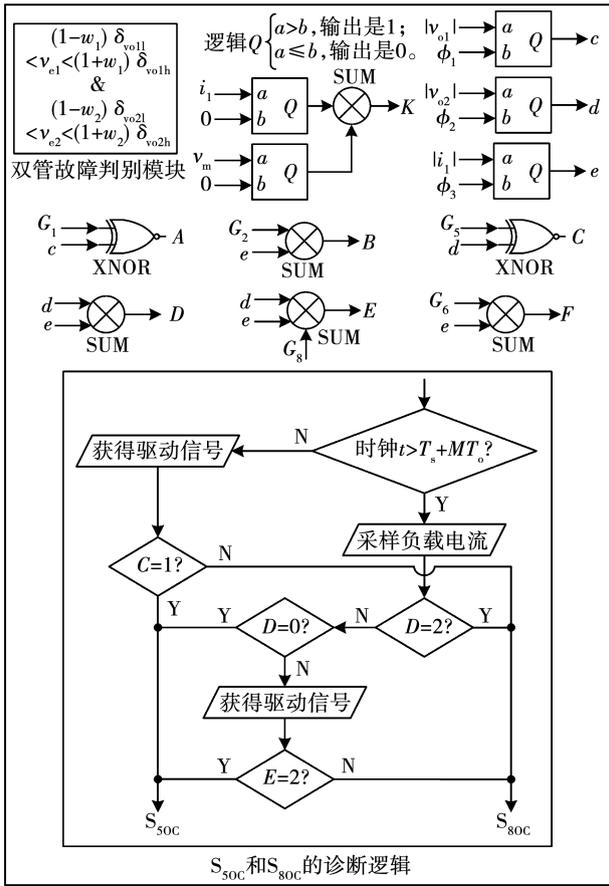


图5 相关变量的定义

Fig.5 Definition of related variables

诊断方法具体过程:假定同相不同H桥下的2个开关同时发生故障,分别检测2个H桥电压,通过实际电压与正常参考电压的比较判定2个H桥是否同时发生故障,当发生故障后在相应的工作模式下采集所需故障信号,进而通过诊断逻辑确定H桥中故障开关的具体位置。变量A、B和F分别用来诊断开关 S_1 与 S_4 、 S_2 与 S_3 以及 S_6 与 S_7 下的故障。对于 S_5 和 S_8 的识别还需进行信号采集时刻的判断,因此在图5中单独标出。除了采集驱动信号,对于开关 S_1 和 S_4 只需要采集H桥1的输出电压,而其余对角开关的判定均需采集相应H桥电压和负载电流。

4 仿真验证

4.1 仿真分析

基于MATLAB/Simulink仿真平台对故障诊断方法进行验证,仿真参数如表5所示。给定故障规定如下:对于2个故障开关均在正半周的开关以及正负半周各有一个开关发生故障在正半周期给定故

障,对于2个故障开关均在负半周的开关发生故障,在负半周期给定故障。以 S_{10c} 和 S_{60c} 为例进行验证,仿真结果如图6所示。

表5 仿真参数

Table 5 Simulation parameters

参数	数值
直流电压 U_{dc}/V	40
基频 $f_o (=1/T_o)/Hz$	50
载波频率 f_c/kHz	3
滤波器电感 L_f	9.5 mH, 0.35 Ω
滤波器电容 C_f	10 mF, 0.03 Ω
直流侧电容 C/mF	20
调制指数 M	0.9
负载阻抗 Z_l/Ω	8
电压环比例调节增益 K_{vp}	0.1
电压环积分调节增益 K_{vi}	4.5
电流环比例调节增益 K_{ip}	0.01
电流环积分调节增益 K_{ii}	0.01

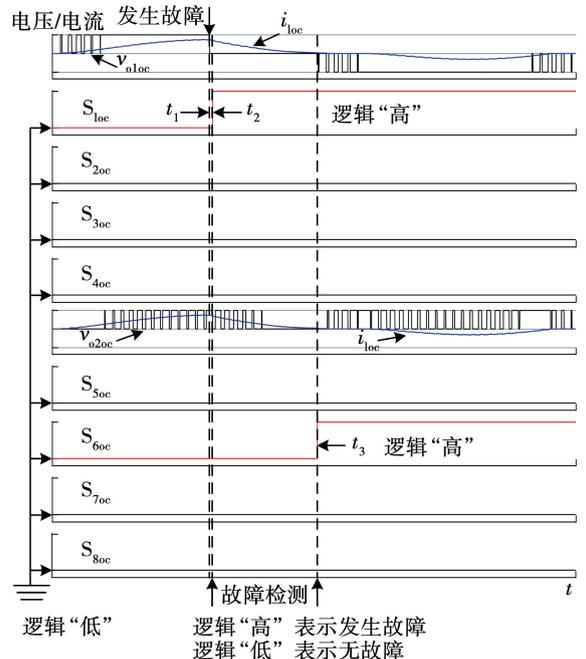


图6 S_{10c} 和 S_{60c} 下的仿真结果

Fig.6 Simulation result under S_{10c} and S_{60c}

在 t_1 时刻对开关 S_1 和 S_6 给定故障,在 t_2 时刻检测到开关 S_1 故障,在 t_3 时刻检测到开关 S_6 故障,在 t_3 时刻 S_1 和 S_6 双管故障均得到有效诊断。全部开关故障的诊断时间如表6所示,由表6可以看出,当2个故障开关都在同一个半周内,诊断时间均在

0.12 ms 以内,而对于在正负半周内都有分布的故障开关,诊断时间相对要长,主要是因为发生故障后

2 个开关的故障特征并不会在同一个半周内表现出来。整体而言,仿真达到预期效果。

表 6 全部故障的诊断时间

Table 6 Diagnosis time of all faults

故障	故障时 间/ms	诊断时 间/ms									
S_{1oc} 和 S_{5oc}	6	0.118	S_{2oc} 和 S_{5oc}	6	4.109	S_{3oc} 和 S_{5oc}	6	4.111	S_{4oc} 和 S_{5oc}	6	0.117
	6.5	0.119		6.5	3.611		6.5	3.611		6.5	0.113
	7	0.114		7	3.117		7	3.115		7	0.115
	平均值	0.117 0		平均值	3.612 3		平均值	3.612 3		平均值	0.115 0
S_{1oc} 和 S_{6oc}	6	4.117	S_{2oc} 和 S_{6oc}	16	0.117	S_{3oc} 和 S_{6oc}	16	0.119	S_{4oc} 和 S_{6oc}	6	4.116
	6.5	3.614		16.5	0.120		16.5	0.119		6.5	3.614
	7	3.113		17	0.117		17	0.117		7	3.116
	平均值	3.614 7		平均值	0.118 0		平均值	0.118 3		平均值	3.615 3
S_{1oc} 和 S_{7oc}	6	4.118	S_{2oc} 和 S_{7oc}	16	0.115	S_{3oc} 和 S_{7oc}	16	0.118	S_{4oc} 和 S_{7oc}	6	4.114
	6.5	3.616		16.5	0.115		16.5	0.115		6.5	3.611
	7	3.112		17	0.118		17	0.115		7	3.120
	平均值	3.615 3		平均值	0.116 0		平均值	0.116 3		平均值	3.615 0
S_{1oc} 和 S_{8oc}	6	0.117	S_{2oc} 和 S_{8oc}	6	4.114	S_{3oc} 和 S_{8oc}	6	4.113	S_{4oc} 和 S_{8oc}	6	0.111
	6.5	0.110		6.5	3.615		6.5	3.619		6.5	0.110
	7	0.112		7	3.115		7	3.109		7	0.117
	平均值	0.113		平均值	3.614 7		平均值	3.613 7		平均值	0.112 7

4.2 对比分析

对于基于 LSPWM 技术的 CHBMI,与文献[16-18]相比,所提方法考虑了 2 个位于同相不同 H 桥的开关管同时发生故障的情况,当发生故障的 2 个开关管位于同一个半周时的诊断时间和文献[18]基本一致,对于双管故障能够进行准确诊断。主要不足是对于 2 个不在同一个半周内的开关管(即 S_1 和 S_6 、 S_1 和 S_7 、 S_2 和 S_5 、 S_2 和 S_8 、 S_3 和 S_5 、 S_3 和 S_8 、 S_4 和 S_6 、 S_4 和 S_7)发生故障后诊断时间相对较长,而且开关管对应的所有二极管均正常工作。与现有方法^[19]相比,减少了计算量且可以实现在线诊断。

5 结论

针对 CHBMI 中同相不同 H 桥双管同时发生故障的问题,本文分析了双管故障下各故障信号的特征,提出了一种双管故障诊断方法。该方法能够利用以 H 桥电压、负载电流和驱动信号为采样变量的信号处理方法实现有效诊断,与现有方法相比,该方法扩展了双管故障下的拓扑为级联逆变器,提高了

级联逆变器双管故障下的电平数目。此外,提高双管故障检测时间、拓展到更高电平等级和应用到其他调制技术将是未来的研究重点。

参考文献:

- [1] 张琦,李江江,孙向东,等.单相级联七电平逆变器拓扑结构及其控制方法[J].电工技术学报,2019,34(18):3843.
ZHANG Qi, LI Jiangjiang, SUN Xiangdong, et al. Topology structure and control method of single-phase cascaded seven-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3843.
- [2] MHIESAN H, WEI Y Q, SIWAKOTI Y P, et al. A fault-tolerant hybrid cascaded H-bridge multilevel inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 12702.
- [3] YU Jingrong, ZHANG Gang, PENG Mingkai, et al. Power-matching based SOC balancing method for cascaded H-bridge multilevel inverter[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 352.
- [4] 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,2020,56(2):284.
CHEN Shi, ZHANG Xinggan. Fault diagnosis of cascaded H-bridge multilevel inverter based on wavelet packet energy entropy

- and random forest[J]. Journal of Nanjing University, 2020, 56(2): 284.
- [5] 彭丽维, 张彼德, 孔令瑜, 等. 级联H桥七电平逆变器的边际谱与DELM故障诊断[J]. 电力电子技术, 2020, 54(1): 92. PENG Liwei, ZHANG Bide, KONG Lingyu, et al. Marginal spectrum and DELM fault diagnosis of cascaded H-bridge seven-level inverter[J]. Power Electronics, 2020, 54(1): 92.
- [6] CHOI U M, BLAABJERG F, LEE K B. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2517.
- [7] WANG Zhiqiang, SHI Xiaojie, TOLBERT L M, et al. A di/dt feedback-based active gate driver for smart switching and fast over-current protection of IGBT modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3720.
- [8] ANAND A, VINAYAK A, RAJ N, et al. A generalized switch fault diagnosis for cascaded H-bridge multilevel inverters using mean voltage prediction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1563.
- [9] 周晨阳, 沈艳霞. 基于小波分析的三重三相电压型逆变器开路故障诊断[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(9): 65. ZHOU Chenyang, SHEN Yanxia. Open circuit fault diagnosis of dual three-phase voltage inverter based on wavelet analysis[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(9): 65.
- [10] LAMB J, MIRAFZAL B. Open-circuit IGBT fault detection and location isolation for cascaded multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4846.
- [11] LI Zhan, MA Hao, BAI Zhihong, et al. Fast transistor open-circuit faults diagnosis in grid-tied three-phase VSIs based on average bridge arm pole-to-pole voltages and error-adaptive thresholds [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8040.
- [12] GORLA N B Y, KOLLURI S, CHAI M, et al. Fault detection and localization scheme for cascaded H-bridge stage of a three-stage solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8713.
- [13] HAN Pengcheng, HE Xiaoqiong, REN Haijun, et al. Fault diagnosis and system reconfiguration strategy of a single-phase three-level neutral-point-clamped cascaded inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3863.
- [14] 王丽华, 方旭东, 韩素敏, 等. 基于BP神经网络的三电平逆变器开路故障诊断研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(9): 187. WANG Lihua, FANG Xudong, HAN Sumin, et al. Research on open circuit fault diagnosis of three-level inverter based on BP neural network[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(9): 187.
- [15] 时维国, 吴宁. 基于小波包变换和SVM的三电平逆变器故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 91. SHI Weiguo, WU Ning. Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet packet transform and SVM [J]. Electric Machines and Control Application, 2021, 48(2): 91.
- [16] KUMAR M. Open circuit fault detection and switch identification for LS-PWM H-bridge inverter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(4): 1363.
- [17] KUMAR M. Time-domain characterization and detection of open-circuit faults for the H-bridge power cell [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2152.
- [18] ZHANG Gang, YU Jingrong. Open-circuit fault diagnosis for cascaded H-bridge multilevel inverter based on LS-PWM technique [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(3): 201.
- [19] 杨俊杰. 基于多特征融合CNN的级联H桥七电平逆变器故障诊断[D]. 成都: 西华大学, 2021.

(编辑: 刘琳琳)