

DBSRC 变换器开关管开路故障检测策略研究

迟宇航^{1,2}, 赵鲁², 葛琼璇², 刘学^{1,2}, 成实^{1,2}

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室(中国科学院电工研究所), 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以DBSRC变换器开关管开路故障为研究对象,首先介绍DBSRC的基本工作原理,并分析DBSRC变换器开关管开路故障特性。在此基础上分析了DBSRC变换器开关管开路故障后可用于故障检测与定位的故障特征,提出一种基于谐振电容电压、谐振电流与桥臂间电流的DBSRC变换器开路故障后的故障检测策略。最后,搭建仿真模型对开关管开路故障检测策略的有效性进行验证。

关键词:双向全桥串联谐振变换器;故障检测与定位;开关管开路故障检测策略

中图分类号:TM46 **文献标识码:**B **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25568

Research on Switch Tube Open-circuit Fault Detection Strategy of DBSRC Converter

CHI Yuhang^{1,2}, ZHAO Lu², GE Qiong璇², LIU Xue^{1,2}, CHENG Shi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive(Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Taking the switch tube open-circuit fault of dual bridge series resonant DC-DC converter (DBSRC) as the research object. Firstly, the basic working principle of DBSRC was summarized, and the open circuit fault characteristics of DBSRC converter were introduced. On this basis, the fault characteristics that can be used for fault detection and localization after open circuit faults in DBSRC converters were analyzed. A fault detection strategy based on resonant capacitor voltage, resonant current, and bridge arm current was proposed for DBSRC converters after open circuit faults. Finally, a simulation model was constructed to verify the effectiveness of the open circuit fault detection strategy for switching devices.

Key words: dual bridge series resonant DC-DC converter (DBSRC); fault detection and localization; switch tube open-circuit fault detection strategy

双向全桥串联谐振变换器(dual bridge series resonant DC-DC converter, DBSRC)作为新一代高频车载辅助交流器的主要模块,其可以有效降低单个模块开关管的电压应力与输出电流,同时具有良好的稳态精度、动态性能,可采用多种闭环控制策略,具有较好的软开关特性,易于控制且开关损耗较低^[1-2]。

开关管故障是危害变换器安全运行的主要原因之一。在电力电子变换器故障中,有34%是由半导体开关器件故障造成的。其中常见的故障类型有短路故障与开路故障。针对开关管短

路故障的检测与保护一般通过硬件实现,集成于开关管驱动电路,发生故障时停止运行^[3-4]。开关管开路故障的检测策略则更加多样,文献[5]利用开关信号对双有源桥变换器(dual-active bridge, DAB)的交流侧电压、电感电流进行状态估计,通过对比估计值与实际值之间的状态残差进行故障定位;文献[6]提出针对PWM变换器通用的故障检测策略,该策略需要在原电路中附加绕组,通过对比分析附加绕组电压波形与实际的PWM门级信号的关系来进行故障检测;文献[7-8]利用神经网络实现双有源桥变换器与移相全桥变换

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB4302102-2)

作者简介:迟宇航(2000—),男,硕士,Email:chiyuhang@mail.iee.ac.cn

通讯作者:赵鲁(1984—),男,博士,副研究员,Email:zhaolu@mail.iee.ac.cn

器的开关管开路故障检测。随着级联DC-DC变换器的应用越来越广泛,由于级联变换器中的半导体开关器件较多,因此对于DBSRC开路故障的快速检测也受到越来越多的重视。现有的研究中普遍缺少对于DBSRC发生不同开路故障后能够快速检测的研究。

本文提出了一种通过分析DBSRC变换器开关管开路故障后的典型故障特征与换流过程,基于谐振电容电压、谐振电流与桥臂间电流的故障检测策略,可为级联DC-DC变换器故障检测与定位提供参考。

1 DBSRC变换器的拓扑与基本原理

DBSRC变换器拓扑及等效电路如图1所示。DBSRC变换器由原、副边H桥,高频变压器及 L_r , C_r 组成的谐振支路组成,交流主回路为二阶电路,为了避免较大的回流功率,开关频率 f_s 通常要高于谐振频率 f_r ,谐振回路呈感性阻抗以避免较大的回流功率。图1中, v_{ab} , v_{cd} 为原、副边桥臂中点电压差, v'_{cd} 为副边桥臂中点电压差归算到原边的值, i_p 为原边谐振电感电流,其正方向为从a点流出、b点流入, v_c 为谐振电容电压。DBSRC两侧H桥对角侧开关管同时导通,同一桥臂上、下开关管交替导通,在交流侧形成两个占空比为50%的方波 v_{ab} 与 v_{cd} ,通过控制两者间的相位差实现功率的双向传输^[9-12]。

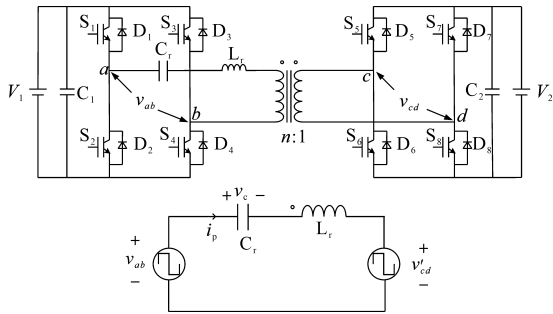


图1 DBSRC变换器拓扑及等效电路

Fig.1 DBSRC topology and equivalent circuit

2 DBSRC开关管开路故障检测策略研究

2.1 DBSRC开关管开路故障模型

根据故障发生位置的不同,可以将DBSRC开关管开路故障分为原边故障与副边故障,以原边为输入侧,副边为输出侧为例进行分析,如图2所示。

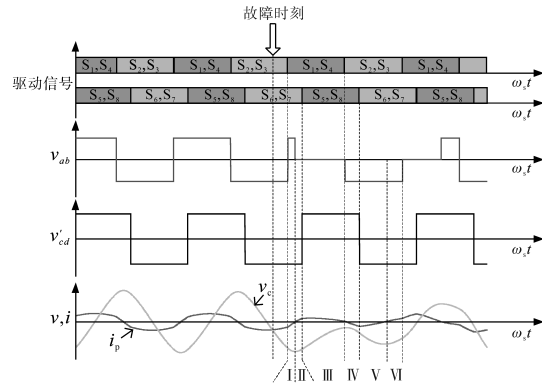


图2 S_1 开路故障时DBSRC的暂态波形

Fig.2 Transient waveforms of DBSRC under S_1 open-circuit fault

以 S_1 开路为例对原边单个开关管开路故障进行分析,故障后当电感电流方向为正时只能通过 D_2, S_4 导通续流,模式II、模式III中 v_{ab} 幅值为零,对比故障前电感电流在负半周期的面积,模式II、模式III中电感电流在正半周期的面积要明显偏小,导致电容电压出现明显的负向直流偏置。到达稳态后,DBSRC存在4种故障模式,以其中一种故障模式举例分析^[13],如图3所示。

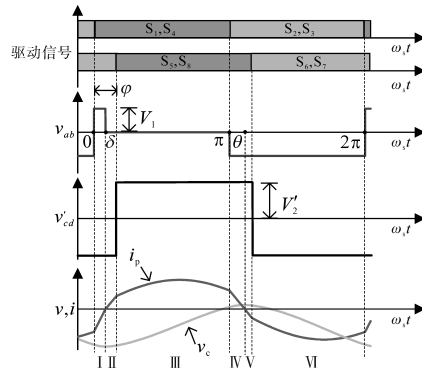


图3 DBSRC S_1 开路故障后的其中一种故障模式

Fig.3 One of the fault modes with S_1 open-circuit fault of DBSRC

在该故障模式中, φ 与 δ 满足:

$$\begin{cases} 0 < \delta < \varphi \\ 0 < \varphi \end{cases} \quad (1)$$

利用模态分析法进行建模分析,该故障模式中有6种不同模态,对每个模态下DBSRC满足的二阶微分方程进行求解。

模态I中有:

$$i_p(t) = \frac{-v_c(0) + V_1 + V'_2}{Z_r} \sin\left(\frac{\omega_s t}{F}\right) + i_p(0) \cos\left(\frac{\omega_s t}{F}\right) \quad (2)$$

$$v_c(t) = [v_c(0) - V_1 - V'_2] \cos\left(\frac{\omega_s t}{F}\right) + i_p(0) Z_r \sin\left(\frac{\omega_s t}{F}\right) + V_1 + V'_2 \quad (3)$$

式中: F 为开关频率与谐振频率之比 f_s/f_r ; Z_r 为谐振回路特征阻抗 $\sqrt{L_r/C_r}$; V_1 为输入电压; V_2 为输出电压归算到原边。

其余模态求解方法类似,不再赘述,根据波形的周期性有:

$$v_c(0) = v_c\left(\frac{2\pi}{\omega_s}\right) \quad (4)$$

$$i_p(0) = i_p\left(\frac{2\pi}{\omega_s}\right) \quad (5)$$

将二阶微分方程的解代入周期性方程中并联立求解可得:

$$v_c(0) = V_1 f_1(M, \delta, \varphi) \quad (6)$$

$$i_p(0) = V_1 f_2(M, \delta, \varphi) \quad (7)$$

式中: M 为DBSRC电压增益 nV_2/V_1 。

根据波形特点有:

$$\frac{-f_1(M, \delta, \varphi) + 1 + M}{Z_r} \sin\left(\frac{\delta}{F}\right) + f_2(M, \delta, \varphi) \cos\left(\frac{\delta}{F}\right) = 0 \quad (8)$$

根据功率等效原则,联立DBSRC故障后的功率表达式有:

$$f_s C_r \{ [f_1(M, \delta, \varphi) - 1 - M] [\cos\left(\frac{\delta}{F}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{F}\right)] + f_2(M, \delta, \varphi) Z_r [\sin\left(\frac{\delta}{F}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{F}\right)] + \cos\left(\frac{\pi - \delta}{F}\right) + 2M \cos\left(\frac{\pi - \varphi}{F}\right) - 2f_1(M, \delta, \varphi) + 1 \} - \frac{M^2}{n^2 R_{load}} = 0 \quad (9)$$

式中: R_{load} 为DBSRC后级等效负载。

由式(8)与式(9)可以共同确定DBSRC故障后的工作状态,从而确定故障后的电压应力、电流应力等特性。

副边开路故障后,DBSRC副边谐振电流出现直流偏置,到达稳态后除副边谐振电流外,其余特性与正常模式相同,该直流偏置将使得副边完全由二极管导通续流。

2.2 故障后谐振电容电压与谐振电流分析

DBSRC的硬件参数如下:谐振电感 $L_r=98$ mH,谐振电容 $C_r=5.5$ μ F,DBSRC开关频率 $f_s=9$ 000 Hz,变压器变比 $n=1.15$ 。以 S_1 开路故障为例对DBSRC原边故障时的谐振电容电压进行分析,如图4所示。

由于 i_p 不具有半波对称性, v_c 极大值与极小值之和不再为零,定义 v_c 极大值和极小值之和与最大电压应力之比为 v_{c_add}/v_{c_max} , v_c 极大值与极小

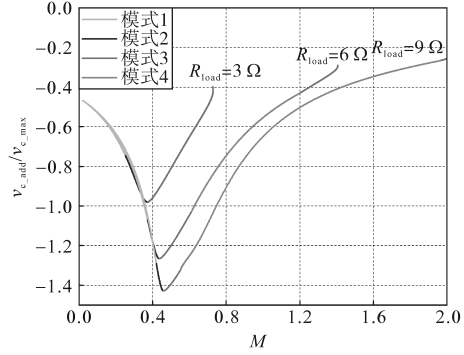


图4 v_{c_add}/v_{c_max} 的变化规律

Fig.4 Variation law of v_{c_add}/v_{c_max}

值在 i_p 的两个过零点 θ 或 δ 角度处取得,则有:

$$\frac{v_{c_add}}{v_{c_max}} = \frac{v_c\left(\frac{\delta}{\omega_s}\right) + v_c\left(\frac{\theta}{\omega_s}\right)}{\max\left\{|v_c\left(\frac{\delta}{\omega_s}\right)|, |v_c\left(\frac{\theta}{\omega_s}\right)|\right\}} \quad (10)$$

正常情况下 $v_{c_add}=0$, S_1 开路故障后 $v_{c_add}/v_{c_max} < 0$,且 v_{c_add}/v_{c_max} 的绝对值受负载影响,随着电压增益的增加先增大后减小,但 v_{c_add}/v_{c_max} 在如图4所示的3种负载范围内均小于零,因此设 $-A_1 > v_{c_add}/v_{c_max}$ 时判断开路故障发生于 S_1 或 S_4 ,为了避免传感器误差等因素导致测量误差,可将该阈值设置为0.2。由于H桥的对称性,当 S_2 或 S_3 发生开路故障时 v_{c_add}/v_{c_max} 将大于零, v_{c_add}/v_{c_max} 的曲线与图4所示曲线关于横轴对称,当 $A_1 < v_{c_add}/v_{c_max}$ 时判断故障发生于 S_2 或 S_3 。实际上,在DBSRC变换器从故障后的暂态恢复到稳态的过程中, v_c 极大值的绝对值小于极小值的绝对值的情况始终存在,运用上述定位方法在DBSRC恢复到稳态之前即可将故障定位于某两个对角侧开关管,但由于H桥内在的对称性,不能精确定位至某个开关管。

下面对副边 S_5 发生开路故障时的谐振电流进行分析,如图5所示。

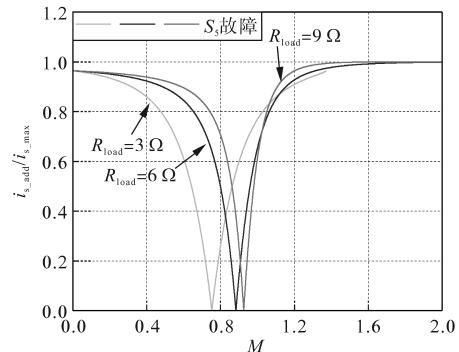


图5 i_{s_add}/i_{s_max} 的变化规律

Fig.5 Variation law of i_{s_add}/i_{s_max}

原边发生单管开路故障后,DBSRC将进入不

对称运行状态,因此原边谐振电流 i_p 不再具有半波对称性,其极大值与极小值的绝对值不再相等,但两者差距很小,不适宜作为故障检测的特征量。副边发生单管开路故障后副边谐振电流 i_s 出现明显直流偏置,这一特征可以用于对副边开路故障进行检测,以 S_5 开路故障为例进行分析,定义 i_s 极大值和极小值之和与最大电流应力之比

$$\frac{i_{s_add}}{i_{s_max}} = \left| \frac{2nV_1}{Z_r} \left\{ \sin\left(\frac{\varphi}{F}\right) + [M - \cos\left(\frac{\varphi}{F}\right)] \tan\left(\frac{\pi}{2F}\right) \right\} \right| / \left\{ \frac{nV_1}{Z_r} \sec\left(\frac{\pi}{2F}\right) \sqrt{1 + M^2 - 2M\cos\left(\frac{\varphi}{F}\right)} + \left| \frac{nV_1}{Z_r} \left\{ \sin\left(\frac{\varphi}{F}\right) + [M - \cos\left(\frac{\varphi}{F}\right)] \tan\left(\frac{\pi}{2F}\right) \right\} \right| \right| \quad (11)$$

正常模式下 i_{s_add} 为零,发生开路故障后 i_{s_add}/i_{s_max} 随着电压增益的增加先降低后升高,其中最低点为零,在最低点时 i_s 完全由二极管导通续流,此时故障不影响 DBSRC 的正常运行, i_s 也不会产生直流偏置, S_6 或 S_7 故障时, i_{s_add}/i_{s_max} 的曲线与图 5 所示曲线关于横轴对称。利用 i_s 对副边开路故障进行检测与定位时,当 $B_1 < i_{s_add}/i_{s_max}$ 时判断故障发生于 S_5 或 S_8 ,当 $-B_1 > i_{s_add}/i_{s_max}$ 时判断故障发生于 S_6 或 S_7 ,由于 H 桥的对称性,无法进一步定位至某一开关管,只能定位至某一对角侧开关管。

2.3 故障后桥臂间电流分析

以 DBSRC 原边开路故障为例,对桥臂间电流特征进行分析。同一对角侧不同开关管发生故障时,谐振电容电压与谐振电流相同,因此不能通过对谐振回路的监测将故障定位至某个开关管,但同一对角侧不同开关管发生故障时,故障 H 桥的换流路径不同,分别在原、副边 H 桥布置 4 个电流传感器,对故障后的 DBSRC 的换流过程进行分析,电流传感器布置如图 6 所示。

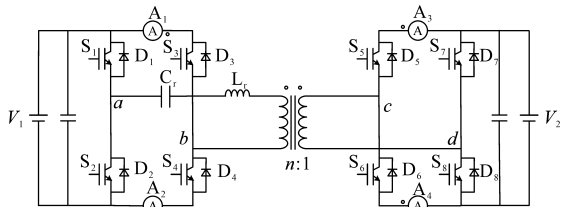


图6 桥臂间电流传感器布置图

Fig.6 Layout of current sensors between bridge arms

原边发生单管故障时电流传感器 A_1 与 A_2 测得的电流值如图 7 与图 8 所示,发生故障后 DBSRC 处于故障模式 4,由于模式 I、模式 II 中 v_{ab} 为

零, i_p 由 S_4, D_2 导通续流,在模式 III 中 i_p 由 D_4, D_1 导通续流,因此在模式 I、模式 II、模式 III 中 i_{A2} 能测量到 i_p ,在模式 IV、模式 V、模式 VI 中 S_2, S_3 或 D_2, D_3 导通,因此在 i_{A1} 能测量到 i_p ,因此当 S_1 发生开路故障时,直观表现为当 $v_{ab} \geq 0$ 时 $i_{A2} = i_p, i_{A1} = 0; v_{ab} < 0$ 时 $i_{A1} = i_p, i_{A2} = 0$ 。当 S_4 发生开路故障时,只有当 D_4 导通时即模式 III 中 i_{A2} 中能测量到 i_p ,其余模式中只有 i_{A1} 中能测量到 i_p ,直观表现为当 $v_{ab} > 0$ 时 $i_{A2} = i_p, i_{A1} = 0; v_{ab} \leq 0$ 时 $i_{A1} = i_p, i_{A2} = 0$ 。同理, S_2 发生故障时当 $v_{ab} > 0$ 时 $i_{A2} = i_p, i_{A1} = 0; v_{ab} \leq 0$ 时 $i_{A1} = i_p, i_{A2} = 0$ 。 S_3 发生故障后,当 $v_{ab} \geq 0$ 时 $i_{A2} = i_p, i_{A1} = 0; v_{ab} < 0$ 时 $i_{A1} = i_p, i_{A2} = 0$ 。

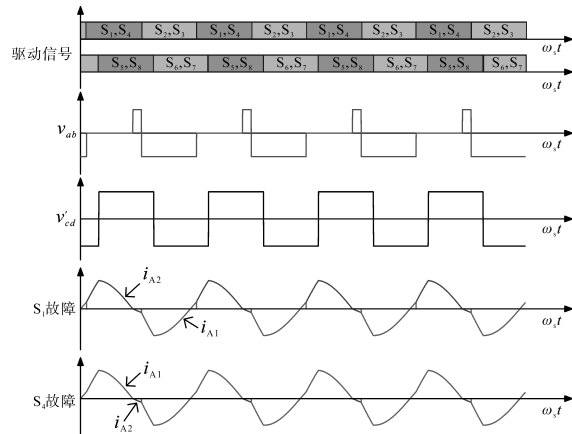


图7 S_1 或 S_4 开路故障时 DBSRC 的稳态波形

Fig.7 Steady waveforms of DBSRC under S_1 or S_4 open-circuit fault

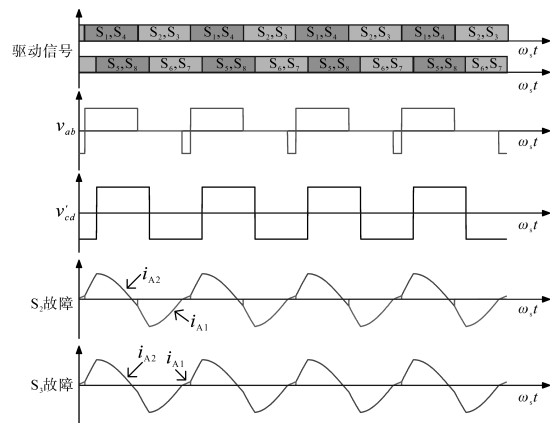


图8 S_2 或 S_3 开路故障时 DBSRC 的稳态波形

Fig.8 Steady waveforms of DBSRC under S_2 or S_3 open-circuit fault

故障发生于不同位置时 i_{A1} 与 i_{A2} 测得的值不同,其中 S_3, S_4 故障时故障特征较为明显,当测得 i_{A2} 的值恒小于零时即可判断为 S_4 故障,而当测得 i_{A1} 的值恒大于零时即可判断为 S_3 故障。当故障发生于 S_1, S_2 时, i_{A1} 与 i_{A2} 各测到一半周期的 i_p ,电流传感器在 S_1 或 S_2 故障时测得的值不完全相同

但差异不大,因此不能有效区分故障具体发生于 S_1 还是 S_2 。

3 基于谐振电容电压、谐振电流与桥臂间电流的DBSRC开关管开路故障检测策略

为了实现对DBSRC开关管开路故障的故障检测与精确定位,本文综合谐振电容电压、谐振电流与桥臂间电流,提出一种快速故障检测策略,如图9所示。

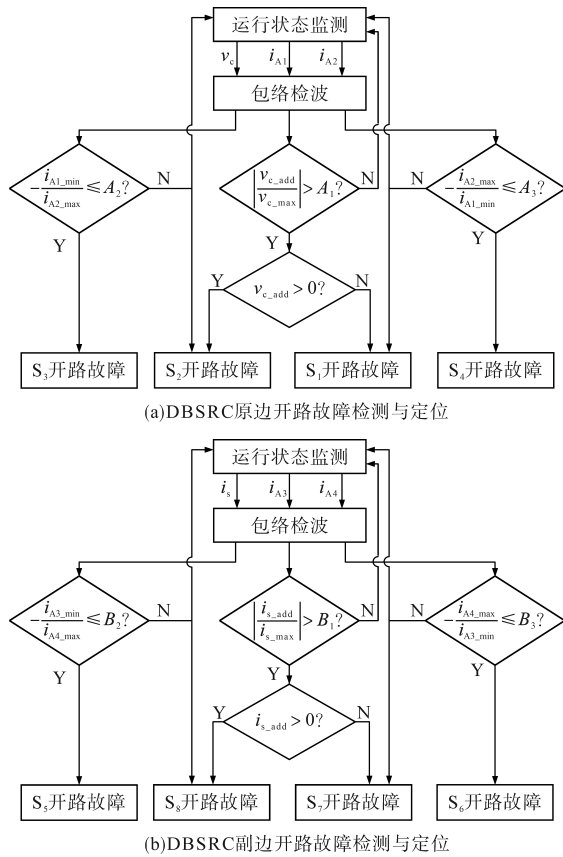


图9 DBSRC开关管开路故障检测策略

Fig.9 Fault detection strategy of switch tube open-circuit of DBSRC

图9中, $i_{A1_min}, i_{A2_max}, i_{A3_min}, i_{A4_max}$ 分别为测得的 $i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}, i_{A4}$ 经包络检波后的上包络线或下包络线。 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ 分别为DBSRC原、副边故障的检测阈值,通过综合谐振电容电压、谐振电流与桥臂间电流实现快速精准的故障检测与定位。

4 仿真验证

利用PSIM软件搭建仿真模型,对故障检测与容错控制策略进行验证,DBSRC参数与上文相同,故障检测参数如下: $A_1=0.2, A_2=0.8, A_3=0.8$,故

障检测采样频率40 kHz。仿真步长为 $1e-7$,进行故障检测仿真时由单个DBSRC与后级的三相逆变器组成。

以DBSRC原边 S_1 或 S_4 开路故障为例,对故障检测策略的有效性进行验证,输入电压750 V,输出电压650 V,输出功率60 kW。

仿真结果如图10所示,在仿真开始0.3 s后切除 S_1 触发信号,模拟开路故障。故障前 v_{c_add}/v_{c_max}

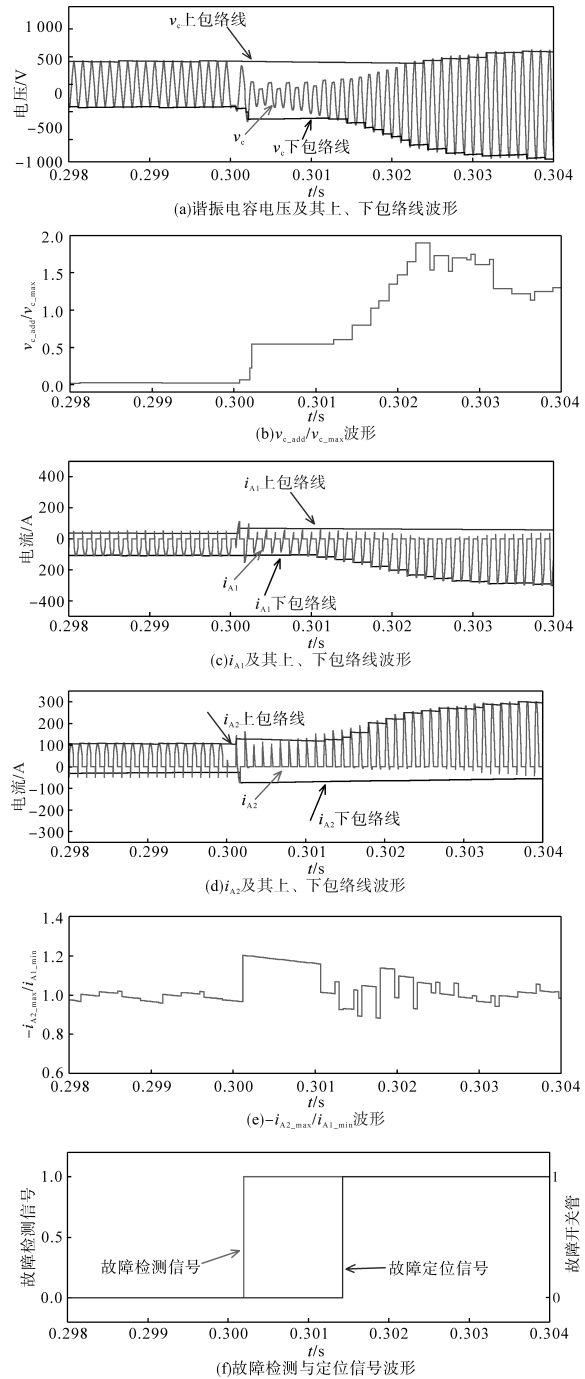


图10 DBSRC S_1 开路故障检测与定位仿真结果

Fig.10 Simulation results of DBSRC S_1 open-circuit fault detection and location

约为零,故障发生后由于波形畸变, v_{c_add}/v_{c_max} 迅速升高,超过设定的阈值范围后故障检测信号由0跳变为1,表明检测到开路故障,随后为了故障定位的准确性,延时0.001 25 s启动故障定位程序,检测到 $-i_{A2_max}/i_{A1_min}$ 未小于阈值,故障定位信号跳变为1,表明故障发生于 S_1 。

图11模拟了DBSRC S_4 开路故障时故障检测与定位的过程,在仿真开始0.3 s后切除 S_4 触发信

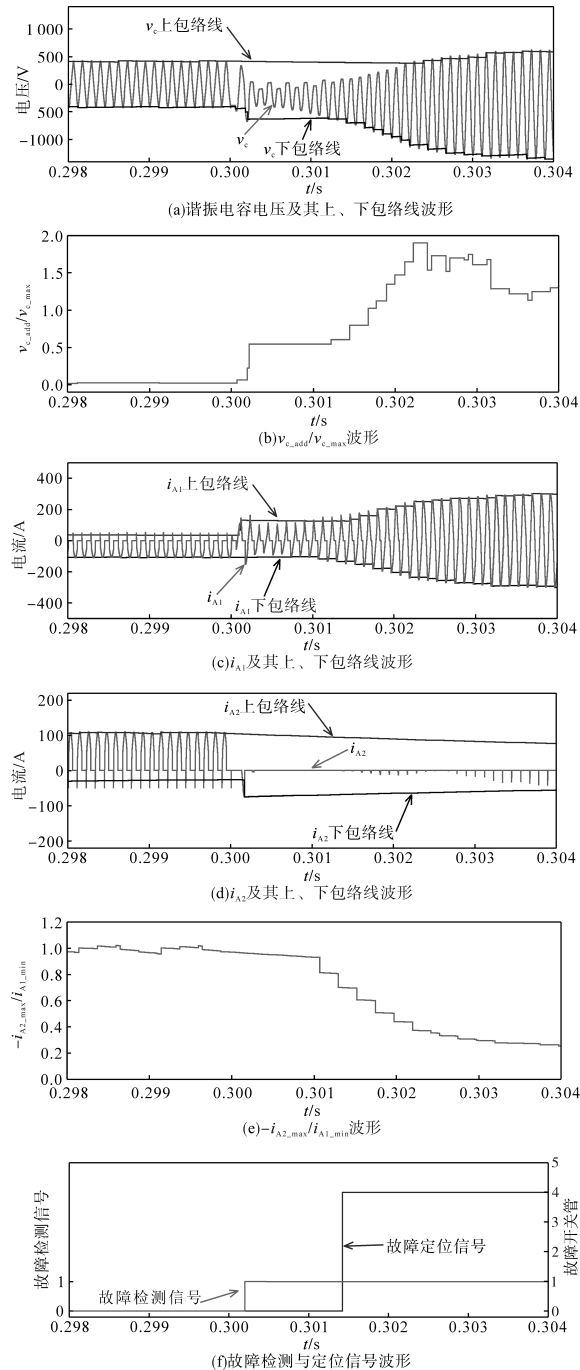


图11 DBSRC S_4 开路故障检测与定位仿真结果
Fig.11 Simulation results of DBSRC S_4 open-circuit fault detection and location

号,模拟开路故障。如图11所示,故障前 v_{c_add}/v_{c_max} 约为零, $-i_{A2_max}/i_{A1_min}$ 约为1,与 S_1 故障相同,故障后 v_{c_add}/v_{c_max} 迅速升高,故障检测信号由0跳变至1,表明发生开路故障,同时由于 i_{A2} 上包络线幅值下降, i_{A1} 下包络线幅值上升, $-i_{A2_max}/i_{A1_min}$ 逐渐减小,并在程序延时结束后检测到超过阈值,因此判断故障发生于 S_4 。仿真结果表明,该故障检测与定位策略能快速有效地检测到开关管开路故障,并将故障定位至单个开关管。仿真结果验证了故障隔离与容错控制策略的有效性。

5 实验验证

为了验证以上提出的故障检测策略,本文搭建一个DBSRC模块实验样机,如图12所示。其中硬件参数如下:变压器变比为1,开关频率为50 kHz,谐振电容为330 nF,谐振电感为29 mH。

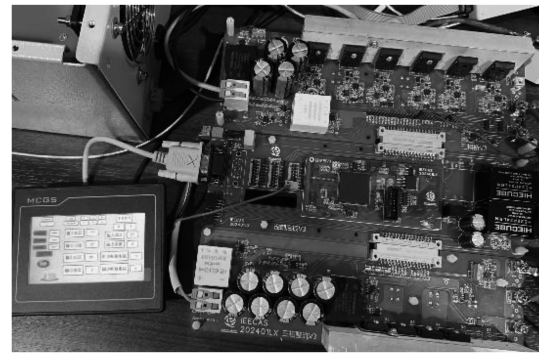


图12 DBSRC模块实验样机

Fig.12 DBSRC module experimental prototype

本文以上文故障模式为例,进行实验验证,当样机进入稳态后,通过MCGS显示屏对 S_1 造成手动故障,故障后的波形如图13所示。

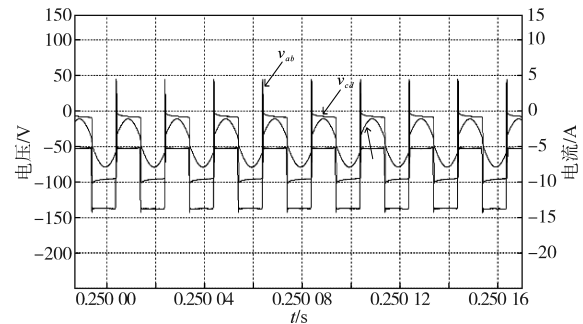


图13 故障模式下 S_1 故障波形

Fig.13 S_1 fault waveforms in fault mode

由图13可以看出,实验故障波形与理论分析保持一致。当 S_1 发生故障时,样机内的电压传感器与电流传感器将数据传输到DSP中,并根据以上策略进行故障检测与定位,在确定故障为 S_1 后,通过对显示屏中的故障检测信号进行赋值,

检测结果如图14所示。



图14 S_1 开路故障后的故障检测

Fig.14 Fault detection after S_1 open circuit fault

6 结论

本文以DBSRC变换器开关管开路故障为研究对象,提出了基于谐振电容电压、谐振电流与桥臂间电流的故障检测策略,通过对理论分析进行仿真与实验,结果表明该故障检测策略能快速精确地定位开关管开路故障,易于实现,所提容错控制策略针对不同的故障情况选择相应最优的处理方式,实现了对DBSRC变换器的快速平滑故障隔离保护,并为级联DC-DC变换器故障检测与容错控制策略研究提供了参考。

参考文献

- [1] 杨博,葛琼璇,赵鲁,等.基于输入串联输出并联的双向全桥串联谐振DC-DC变换器系统控制策略研究[J].电工技术学报,2020,35(12):2574-2584.
YANG Bo, GE Qiongxuan, ZHAO Lu, et al. Control strategy of dual bridge series resonant DC-DC converter system based on input series output parallel connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2574-2584.
- [2] 杨博.基于双向全桥串联谐振DC/DC变换器的动车组高频隔离辅助变流器优化及控制策略研究[D].北京:中国科学院大学,2020.
YANG Bo. Research on optimization and control strategy of high frequency isolation auxiliary converter for EMU based on dual bridge series resonant DC/DC converter[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [3] CHOI U, BLAABJERG F, LEE K. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2517-2533.
- [4] BAKEER A, CHUN A, VINNIKOV D. Short-circuit fault detec-

tion and remedial in full-bridge rectifier of series resonant DC-DC converter based on inductor voltage signature[C]//2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), IEEE, 2020.

- [5] RIBEIRO E, CARDOSO A, BOCCALETTI C. Fault analysis of dual active bridge converters[C]//38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2012.
- [6] PEI X, NIE S, CHEN Y, et al. Open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant strategies for full-bridge DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2550-2565.
- [7] CHEN Y, PEI X, NIE S, et al. Monitoring and diagnosis for the DC-DC converter using the magnetic near field waveform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1634-1647.
- [8] 赵莹莹,何怡刚,邢致恺,等.基于信息融合与深度残差收缩网络的DAB变换器开路故障诊断方法[J].电力自动化设备,2023,43(2):112-118.
ZHAO Yingying, HE Yigang, XING Zhikai, et al. Open-circuit fault diagnosis method of DAB converter based on information fusion and DRSN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 112-118.
- [9] CHOUDHARY V, LEDEZMA E, AYYANAR R, et al. Fault tolerant circuit topology and control method for input-series and output-parallel modular DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 402-411.
- [10] HAYASHI Y, MATSUGAKI Y, NINOMIYA T, et al. Active gate controlled SiC transfer switch for fault tolerant operation of ISOP multicellular DC-DC converter[C]//2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016: 1-6.
- [11] ZHAO Biao, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. High-frequency-link DC transformer based on switched capacitor for medium-voltage DC power distribution application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4766-4777.
- [12] ZHANG Jiepin, LIU Jianqiang, YANG Jingxi, et al. A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2119-2133.
- [13] 马呈瑶,赵鲁,范恩泽,等.应用于高频辅助变流器的DBSRC变换器IGBT开路故障分析及容错运行研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):67-80.
MA Chengyao, ZHAO Lu, FAN Enze, et al. IGBT open-circuit fault analysis and fault-tolerant operation research of DBSRC converter applied to high-frequency auxiliary converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 67-80.

收稿日期:2023-12-20

修改稿日期:2024-06-17