

Sepic 变换器的开关管故障诊断

韩 冉¹, 曾广森¹, 王荣杰^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对 Sepic 变换器故障状态的特点, 首先分析负载电压和开关管电流在不同工作状态下所表现的特征, 然后构造一种基于开关管电流和负载电压之间逻辑关系的开关管故障诊断方法, 最后进行了开关管短路和开路以及续流二极管开路和短路的仿真实验。仿真结果表明, 该故障诊断方法可行, 并具有较高诊断准确率。

[关键词] Sepic 变换器; 故障诊断; 逻辑电路; 开关管电流; 负载电压

[中图分类号] TP 206+.3

Switching Fault Diagnosis of Sepic Converter

HAN Ran¹, ZENG Guangmiao¹, WANG Rongjie^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to the characteristics of the fault state of the Sepic converter, firstly, the characteristics of the load voltage and the switching tube current under different working conditions are analyzed, and then a fault diagnosis method based on the logic relationship between the switching current and the load voltage is constructed. Finally, Simulation experiments were carried out on the short circuit of the switch, the open circuit of the switch, the open diode, and the open diode. The simulation results show the feasibility of the fault diagnosis method, and it has higher diagnostic accuracy.

Keywords: Sepic converter; fault diagnosis; logic circuit; switching current; load volta

0 引言

Sepic 斩波电路是开关电源 6 种 DC-DC 变换基本拓扑电路之一, 是一种四阶非线性系统, 具有输入电流脉动小, 输出与输入同极性, 升降压等特点^[1-2], 在新能源汽车、光伏发电、工业设备等领域被广泛应用^[3-4]。但是由于变换器使用频率较高, 其中的功率开关管容易在工作中受到损坏, 一旦产生故障, 有可能会增加系统中其他器件的电压和电流应力, 如果不及时有效地处理, 将会导致二次故障, 最终造成整个系统的崩溃, 因此, 对 Sepic 电路进行故障诊断的研究是非常有必要的。开关故障大致分为开路故障 (TOCF) 和短路故障 (TSCF)。比如二极管短路有可能会造成电源短路, 电路

[收稿日期] 2018-12-17

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51309116, 51879118); 福建省自然科学基金项目 (2016J01736); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划 (B17159); 农业部渔业装备与工程技术重点实验室基金项目 (2016002, 2018001); 人工智能四川省重点实验室基金项目 (2017RJY02); 江苏省输配电装备技术重点实验室项目 (2017JSSPD01)

[作者简介] 韩冉 (1996—), 男, 硕士生, 从事智能信息处理和电力系统故障诊断研究。通信作者: 王荣杰 (1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事智能信息处理和电力系统故障研究。

过流会烧毁电源和负载, 导致电路无法稳定工作^[5-6], 因此对二极管状态的故障检测也是非常重要的。文献 [7] 以 Boost 变换器为对象, 提出一种基于电感电流的故障诊断方法, 分别采集相邻 3 个时刻电流值, 通过比较其大小进行故障诊断, 该方法可以在两个开关周期内实现诊断, 但电流易受到负载扰动的影响。文献 [8] 对这种方法进行了改进, 通过比较开关管驱动信号和电感电流的斜率来实现故障的诊断定位。文献 [9] 的方法可以在单管无变压器型 DC-DC 变换器中使用, 但却不能扩展到多开关管变换器。文献 [10] 针对 Boost 变换器设计了诊断策略, 选择三电平结构特有的输入侧的电容电压作为诊断依据, 但是通用性较差。文献 [11] 中采用分压电阻获得开关管两端电压, 与开关管驱动比较进行诊断, 但其动态特性有待检验。文献 [12-13] 对于传统的降压、升压和升降压电路在监控方案中, 仅对二极管状态进行检测, 从而实现对二极管和开关管的故障诊断。栅极驱动器信号与二极管电压特征相结合, 在不同故障情况下, 二极管电压特征是不同的, 可以作为判断电路产生故障的依据。对于 Sepic 变换器而言, 虽然二极管的故障率相对较低, 但是如果二极管发生故障, 将会对电源开关产生严重的影响, 因此, Sepic 变换器开关管和续流二极管的故障诊断为本文的研究重点。

1 Sepic 变换器

Sepic 变换器原理电路如图 1 所示, V_{in} 表示输入电压, V_o 表示输出电压。

当 $S(t) = 1$ 时, 即晶闸管导通, V_{in} 对 L_1 充电, 储能电容 C_1 对 L_2 充电。理想状态下开关管导通时: V_{in} 、 L_1 、 T 和 L_2 、 D 负载回路导通, 其等效电路如图 2 所示。

根据基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL) 可以得出: $V_{in} = V_n$; $V_{c1} = V_{l2}$; $i_{c2} = V_o/R$; $i_{c1} = -i_{l2}$ 。其中: V_{l1} 和 V_{l2} 分别表示电感 L_1 和 L_2 的电压值; i_{c1} 和 i_{c2} 分别表示电容 C_1 和 C_2 的电流值。

当 $S(t) = 0$ 时, 即晶闸管关断, L_1 上的电荷会对储能电容 C_1 放电, L_2 上的电荷通过二极管对由 C_2 和电阻组成的负载放电。也就是在理想状态下开关管关闭时, V_{in} 、 L_1 、 C_1 、 D 、负载和 L_2 、 D 、负载回路导通, 其等效电路如图 3 所示。

同理, 根据 KCL、KVL 回路方程可以得出。 $V_{in} = V_{l1} + V_{c1} + V_o$; $-V_o = V_{l2}$; $i_{c2} = i_{c1} + i_{l2} - (V_o/R)$; $i_{c1} = i_{l1}$ 。

稳态时, 电感两端的电压在一个周期内对时间的积分为零。 T 处于导通状态时, 电感 L_1 的电压等于电源电压 V_{in} , 电感 L_2 的电压为负载电压 V_{c1} ; T 处于关断状态时, 电感 L_1 的电压为 $V_{in} - V_{c1} - V_o$, 电感 L_2 的电压为 $-V_o$ 。

$$\begin{cases} V_{in} \times T_{on} + (V_{in} - V_{c1} - V_o) \times T_{off} = 0, \\ -V_o \times T_{off} + V_{c1} \times T_{on} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

由式 (1) 可得:

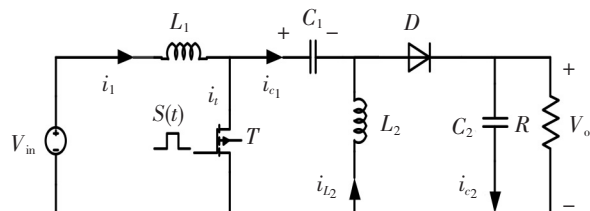


图 1 Sepic 电路原理图

Fig.1 Sepic circuit schematic

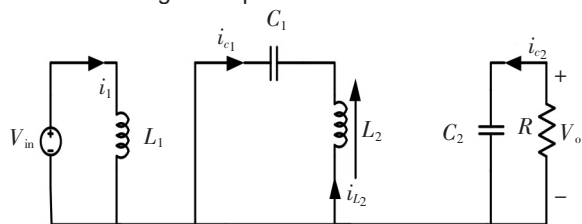


图 2 T 导通等效电路图

Fig.2 T conduction equivalent circuit diagram

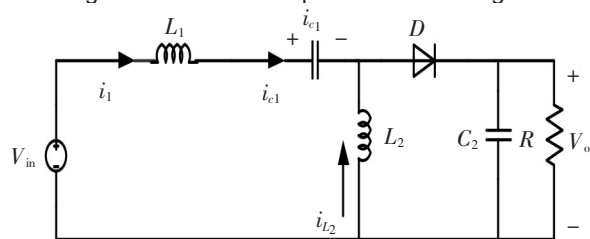


图 3 T 关断等效电路图

Fig.3 T shutdown equivalent circuit diagram

$$\begin{cases} V_o = V_{in} \times T_{on}/T_{off} = V_{in} \times \partial/(1 - \partial); \\ V_{c_1} = V_{in} \circ \end{cases}$$

其中: α 表示脉冲占空比; T 处于导通状态时, 电容 C_1 的电流等于 $-i_{l_2}$, 电容 C_2 的电流为 $-V_o$; T 处于关断状态时, 电容 C_1 的电流值为 i_{l_1} , 电容 C_2 的电流为 $i_{l_1} + i_{l_2} - V_o/R$ 。

$$\begin{cases} (-V_o/R) \times T_{on} + (i_{l_1} + i_{l_2} - (V_o/R)) \times T_{off} = 0, \\ -i_{l_2} \times T_{on} + i_{l_1} \times T_{off} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式 (2) 可得:

$$\begin{cases} i_{l_1} = (V_o/R) \times \partial/(1 - \partial), \\ i_{l_2} = V_o/R. \end{cases}$$

其中: ∂ 为占空比。由此可以得到 Sepic 电路通过控制占空比 ∂ 来控制输出和输入之间的关系。

2 Sepic 电路故障分析

2.1 开关管的故障分析

Sepic 电路与传统升降压电路相比有着较大区别, C_1 电容的存在, 导致输入和输出之间产生隔离, 具有完全的关断功能, 如果开关管关闭, 那么它的输出电压就会变成 0。正常工作时门信号和开关管电流如图 4 所示。

在理想状态下, 当开关管关闭状态时, 通过电流值为零; 当开关管开启时, 电源对 L_1 进行充电, 充电结束时, i_{in} 表示正常工作时通过晶闸管的电流值。

$$\begin{cases} S(t) = 0 \rightarrow i_t = 0, \\ S(t) = 1 \rightarrow i_t = i_{in} > 0. \end{cases}$$

由此可知, 当开关管处于导通状态下, 即 $S(t) = 1$ 时, $i_t = i_{in} > 0$ 。若通过晶闸管的电流 $i_t = 0$, 很显然开关管发生开路故障 TOCF。TN 表示正常工作状态。

$$\begin{cases} S(t) = 1, i_t > 0 \rightarrow (TN), \\ S(t) = 1, i_t = 0 \rightarrow (TOCF). \end{cases}$$

当开关管发生短路 TSCF 时, 在 $S(t) = 0$ 时, 开关管依然有电流流过, 电路中相当于存在一个极小的电阻 r , $i_{in, max}$ 表示开关管正常工作时通过的电流最大值, 显然其开关管电流值会远远大于正常工作下的电流值。开关管发生短路时, 其等效电路如图 5 所示。

$$\begin{cases} S(t) = 0, i_t \gg i_{in, max} \rightarrow (TSCF), \\ S(t) = 0, i_t \leq i_{in, max} \rightarrow (TN). \end{cases}$$

由此可知, 若开关管关断时, 通过其电流值仍大于 0, 则发生开关管短路。

在不同状态下, 通过检测开关管电流值就可以判断开关管是否发生开路或者短路故障, 可得

$$\begin{cases} S(t) = 1, i_t = 0 \rightarrow (TOCF), \\ S(t) = 0, i_t \gg i_{in, max} \rightarrow (TSCF). \end{cases}$$

2.2 二极管故障分析

从模型分析的结论可以看出, 由于 C_2 电容的存在, 负载两端的电压维持不变, 用 $V_{o, N}$ 表示, 正常条件下门信号和输出电压如图 6 所示。

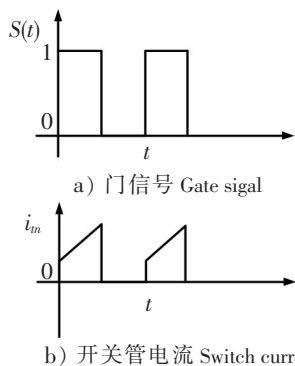


图 4 正常条件下门信号和开关管电流

Fig.4 Gate signal and switch current under normal conditions

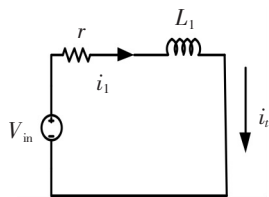


图 5 开关管短路等效电路图

Fig.5 Switch short circuit equivalent circuit diagram

由此可以得出输出电压与门信号之间的关系，

$$\begin{cases} S(t) = 1 \rightarrow V_o > 0, \\ S(t) = 0 \rightarrow V_o = V_{o,N} > 0. \end{cases}$$

如果二极管发生了开路故障（DOCF），由于正常工作（DN）下，负载两端电压的极性和输入是一样的，均大于零。当 $S(t) = 0$ 时，储能电感 L_2 不能向负载放电，导致负载两端电压急剧下降至 0。

$$\begin{cases} S(t) = 0 \rightarrow V_o > 0 \rightarrow (\text{DN}), \\ S(t) = 0 \rightarrow V_o = 0 \rightarrow (\text{DOCF}). \end{cases}$$

如果二极管发生了短路故障（DSCF），当 $S(t) = 0$ 时，等效电路如图 7 所示。

稳态时，正常工作下负载两端的电压由于电容 C_2 的存在，电压数值保持恒定，极性和输入相同，均大于零。若二极管发生开路故障，当 $S(t) = 0$ 时，电感 L_1 向 C_1 放电，电容两端电压为正。即：

$$\begin{cases} V_{in} = V_{L_1} + V_{C_1} - V_{L_2}, \\ V_{L_2} = -V_o, \\ V_{C_1} > 0. \end{cases}$$

如果二极管发生了短路故障，当 $S(t) = 0$ 时，等效电路如图 8 所示。

稳态时，电容 C_1 向 L_2 放电，电容 C_1 两端的电压幅值下降，但是依然是一个正值；当开关管导通时，负载两端的电压值和电容两端电压值大小相同，方向相反。即：

$$\begin{cases} V_{C_1} = V_{L_2}, \\ V_{L_2} = -V_o, \\ V_{in} = V_{L_1}. \end{cases}$$

若二极管发生短路，负载两端的电压小于 0，则 $V_o = -V_{C_1} < 0$ ，

$$\begin{cases} S(t) = 1, V_o > 0 \rightarrow (\text{DN}), \\ S(t) = 1, V_o < 0 \rightarrow (\text{DSCF}). \end{cases} \quad (3)$$

由式（3）可以得出：在开关管导通时，负载两端电压值小于零；二极管正常工作下，当 $S(t) = 1$ 时，负载两端电压 $V_o > 0$ 。

因此在不同状态下，通过检测负载电压值正负就可以判断二极管是否发生开路或者短路故障，即：

$$\begin{cases} S(t) = 0, V_o = 0 \rightarrow (\text{DOCF}), \\ S(t) = 1, V_o < 0 \rightarrow (\text{DSCF}). \end{cases}$$

从上述分析可以得出，在不同状态下，开关管的电流特征和负载的电压特征可以有效地反映当前开关管和二极管的工作状态。故障诊断流程如图 9 所示。

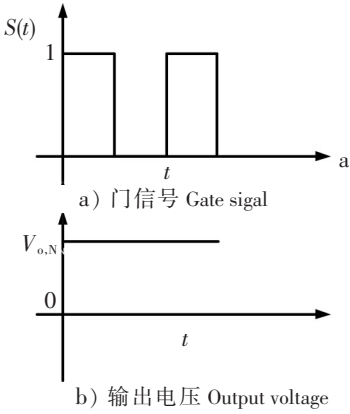


图 6 正常条件下门信号和输出电压

Fig.6 Gate signal and output voltage under normal conditions

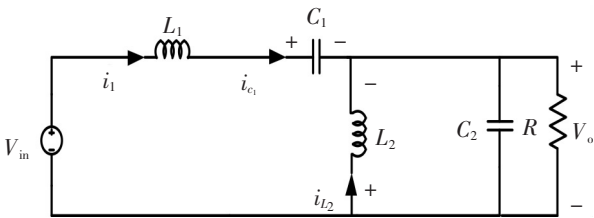


图 7 T 关闭二极管发生短路等效电路图

Fig.7 Short circuit equivalent circuit diagram of working diode when T stops working

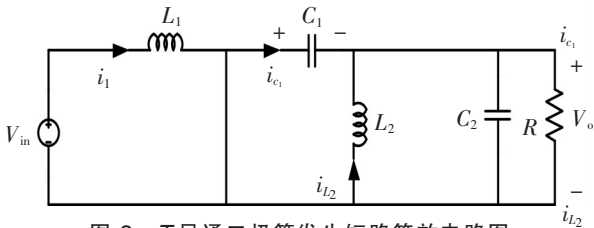


图 8 T 导通二极管发生短路等效电路图

Fig.8 Equivalent circuit diagram of diode short circuit when T is turned on

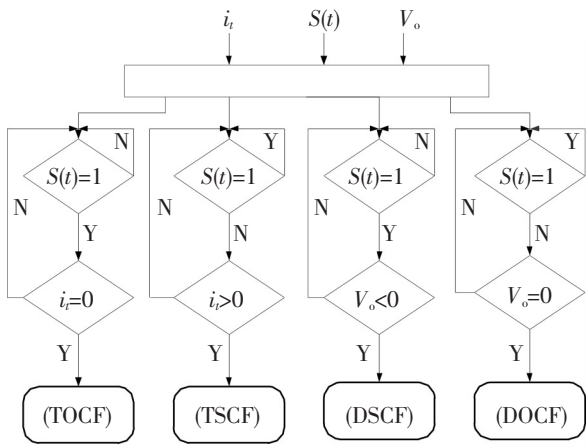


图 9 故障诊断流程图

Fig.9 Troubleshooting flowchart

由 Sepic 变换器本身的特点, 负载两端的电压状态只能反映二极管的状态, 而并不能反映开关管的状态。如果开关管发生短路或者开路故障, 输出电压值均为零, 虽然能够检测出故障的产生, 但是并不能有效判断故障源。值得肯定的时, 如果 $S(t) = 1$ 时, 检测到负载电压值小于零, 那么基本可以确定是发生了二极管短路故障 (DSCF)。当输出电压为零时就需要对开关管电流进行检测, 从而达到准确定位故障源的目的。当 $S(t) = 1$ 时, 若电流为零, 则是开关管开路 (TOCF); $S(t) = 0$ 时, 若电流大于零则是开关管短路 (TSCF), 否则就是二极管发生了开路故障 (DOCF)。因此可以通过它们之间的逻辑关系, 实现对二极管和开关管的故障检测。故障诊断逻辑电路如图 10 所示。

当发生二极管短路故障 (DSCF) 时, 触发信号 FS_1 从原信号 1 变为 0, 故障信号 FS_4 从原信号 1 变为 0; 发生开关管开路 (TOCF) 时, 故障信号 FS_2 从原信号 1 变为 0, 故障信号 FS_4 从原信号 1 变为 0; 发生开关管短路 (TSCF) 时, 故障信号 FS_3 从原信号 1 变为 0, 故障信号 FS_4 从原信号 1 变为 0; 发生二极管开路 (DOCF) 时, 故障信号 FS_4 从原信号 1 变为 0。故障诊断电路中逻辑信号值如表 1 所示。

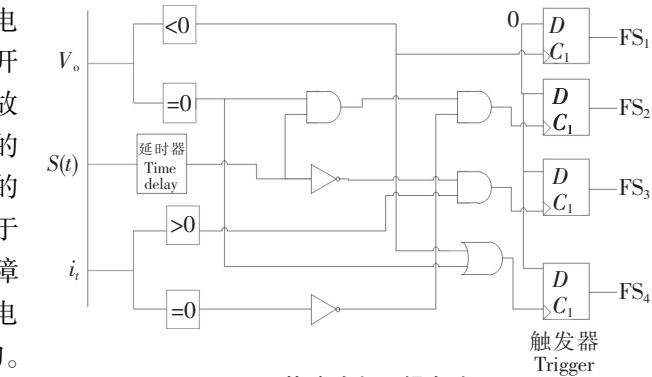


图 10 故障诊断逻辑电路图
Fig.10 Fault diagnosis logic diagram

表 1 不同运行条件下故障诊断电路中逻辑信号的值

Tab. 1 The value of the logic signal in the fault diagnosis circuit under different operating conditions

信号 Signal	DN	DSCF	TOCF	TSCF	DOCF
FS ₁	1	0	1	1	1
FS ₂	1	1	0	1	1
FS ₃	1	1	1	0	1
FS ₄	1	0	0	0	0

3 实验验证

为了证实上述理论和分析, 对 Sepic 电路进行仿真。

参数设置: 直流电压源, $V_{in} = 25\text{ V}$; 脉宽设置为 50%; $L_1 = L_2 = 0.4\text{ mH}$; $C_1 = 28\text{ }\mu\text{F}$; $C_2 = 43\text{ }\mu\text{F}$ ^[14]。

对不同的故障情况进行仿真, 结果如图 11 ~ 图 16 所示。仿真结果发现: 当二极管正常工作时, 其输出电压始终是一个正值; 若二极管发生短路, 在开关管导通时, 输出电压为负值; 若输出电压降为 0, 当触发信号来临时, 开关管电流依然为 0, 说明开关管并没有导通, 开关管发生开路; 当触发信号关闭, 开关管电流不为 0, 产生很大的短路电流, 说明开关管发生短路; 否则就是二极管发生开路故障。

正常工作时, 无论开关管处在什么状态, 输出电压不变, 如图 11 所示。

当续流二极管发生开路时, 无论开关管是否导通, 输出电压始终为 0, 如图 12 所示。当续流二极管发生短路时, 输出电压在开关管导通时, 输出电压为负值, 如图 13 所示。

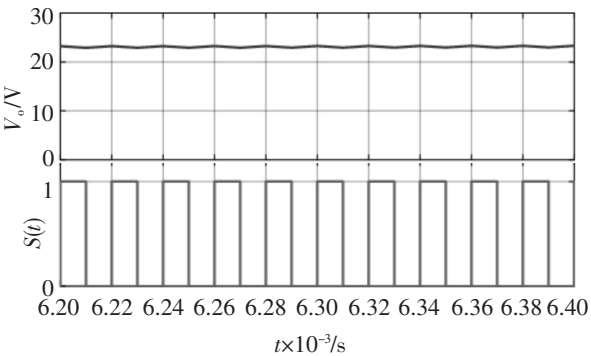


图 11 正常工作时 $S(t)$ 与 V_o 。
Fig.11 $S(t)$ and V_o during normal operation

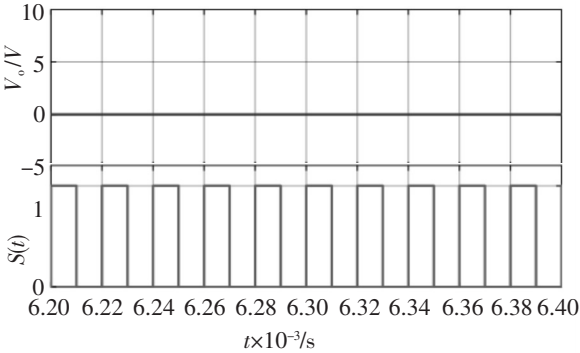


图 12 二极管开路时 $S(t)$ 与 V_o

Fig.12 $S(t)$ and V_o during DOCF operation

由仿真结果可以得出，当开关管导通时，若输出电压为负值，则发生二极管短路故障；若输出电压为 0，则发生二极管开路故障。正常工作时，当开关管导通时，电流值逐渐增加，开关管关闭时，电流降为 0，如图 14 所示。

当开关管开路时，开关管导通时电流始终为 0，如图 15 所示。当开关短路时，开关管关断是，其电流值大于 0，如图 16 所示。

由图 12 ~ 图 16 可以看出，不同的故障类型，负载电压和开关管电流所表现出来的特征有所不同，因此可以通过它们之间存在的逻辑关系，构造用于诊断开关和二极管故障的指示器，通过逻辑电路引出 4 种信号端，并分别用来表示不同的故障信号。正常运行状态下 4 种信号端分别为 1111；若发生二极管短路，信号端变为 0110；若发生开关管开路，信号端变为 1010；若发生开关管短路，信号端变为 1100；若发生二极管短路，信号端变为 1110。

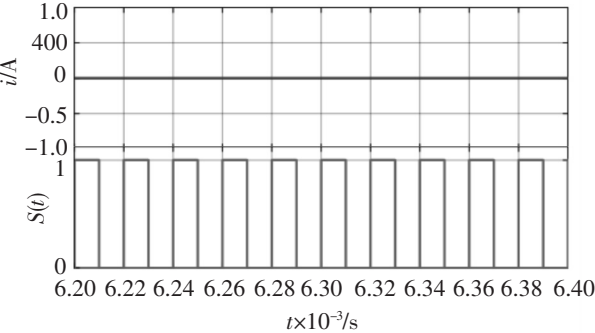


图 15 开关管开路时 $S(t)$ 与 i_t

Fig.15 $S(t)$ and i_t during TOCF operation

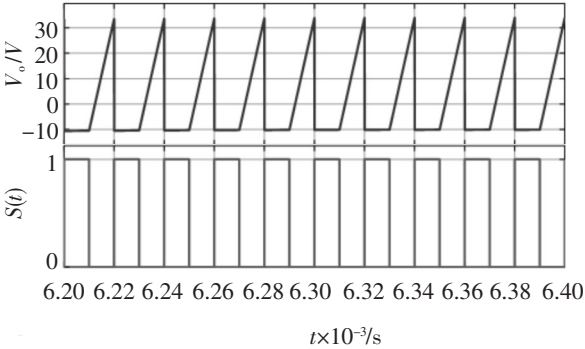


图 13 二极管短路时 $S(t)$ 与 V_o

Fig.13 $S(t)$ and V_o during DSCF operation

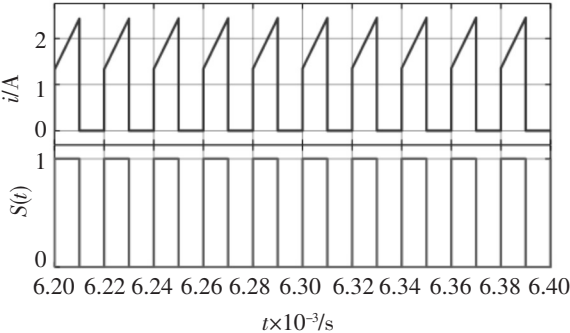


图 14 正常工作时 $S(t)$ 与 i_t

Fig.14 $S(t)$ and i_t during normal operation

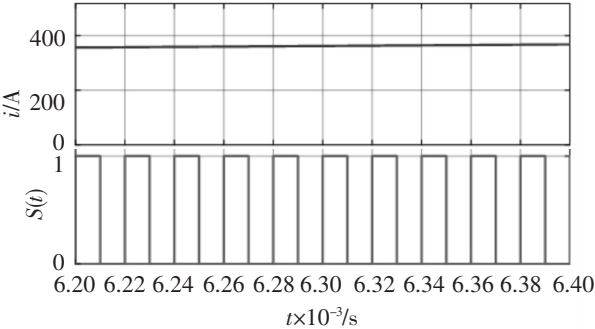


图 16 开关管短路时 $S(t)$ 与 i_t

Fig.16 $S(t)$ and i_t during TSCF operation

4 结论

本文基于 Sepic 变换器的特点提出一种开关管故障诊断方法。首先对 Sepic 变换器进行建模，分析续流二极管和开关管在发生故障时，负载电压和开关管电流在不同栅极信号下，表现出来的故障特征。然后通过与正常工作时的负载电压和开关管电流特征进行对比，找出故障信号与栅极信号之间存在的逻辑关系。最后对开关管短路、开关管开路、二极管开路、二极管短路进行仿真实验，实验结果表明，在不同的故障类型下，故障信号特征差异明显，容易区分，具有较高的故障诊断率。同时该方法在一些微电网 DC - DC 变换器故障诊断中，也同样适用。

[参考文献]

- [1] 孙权,王友仁,姜媛媛. 基于 GPR 的 Sepic 变换器故障预测方法 [J]. 电力电子技术, 2018, 52(6): 17-20.
- [2] MORRIES S S M, D SOUZA A. Comparison of SEPIC and LUO converter for PQ compensation [J]. Social Science Electronic Publishing, 2018, 10(5): 250-263.
- [3] SINGH A K, PATHAK M K. Single-stage ZETA-SEPIC-based multifunctional integrated converter for plug-in electric vehicles [J]. Iet Electrical Systems in Transportation, 2018, 8(2): 101-111.
- [4] 杨超苑红,余岱玲. 变论域模糊 PID 控制在改善 DC-DC 变换器非线性非最小相位系统的性能研究 [J]. 电工电能新技术, 2017, 36(1): 30-37.
- [5] 李思扬. SEPIC 变换器的研究与应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [6] 鲍鑫,张德伟,邓海林. 不同位置二极管串并联方式对射频电路的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(7): 35-42.
- [7] 吴娟,沈艳霞. 电力电子功率变换器故障诊断方法综述 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(11): 48-54.
- [8] GAYEN P K, CHOWDHURY P R, DHARA P K. An improved dynamic performance of bidirectional SEPIC-Zeta converter based battery energy storage system using adaptive sliding mode control technique [J]. Electric Power Systems Research, 2018, 160: 348-361.
- [9] JAMSHIDPOUR E, POURE P, GHOLIPOUR E, et al. Single-Switch DC-DC converter with fault-tolerant capability under open-and short-circuit switch failures [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2703-2712.
- [10] RIBEIRO E, CARDOSO A J M, BOCCALETTI C. Fault-tolerant strategy for a photovoltaic DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 3008-3018.
- [11] DURGADEVI S, UMAMAHESWARI M G. Analysis and design of single phase power factor correction with DC - DC SEPIC Converter for fast dynamic response using genetic algorithm optimised PI controller [J]. Iet Circuits Devices & Systems, 2018, 12(2): 164-174.
- [12] SHAHBAZI M, JAMSHIDPOUR E, POURE P. Open- and short-circuit switch fault diagnosis for nonisolated DC - DC converters using field programmable gate array [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4136-4146.
- [13] ARDI H, AJAMI A. Study on a high voltage gain SEPIC-based DC-DC converter with continuous input current applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 9(9): 255-266.
- [14] MA H, LAI J S, FENG Q. A novel valley-fill SEPIC-derived power supply without electrolytic capacitor for LED lighting application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 3057-3071.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)