

# 三电平逆变器的功率管开路故障诊断

汤清泉<sup>1</sup>, 颜世超<sup>1</sup>, 卢松升<sup>2</sup>, 刘正之<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽省 合肥市 230031;  
2. 中国人民解放军炮兵学院远程火炮和兵器工程系, 安徽省 合肥市 230031)

## Open-circuit Fault Diagnosis of Transistor in Three-level Inverter

TANG Qing-quan<sup>1</sup>, YAN Shi-chao<sup>1</sup>, LU Song-sheng<sup>2</sup>, LIU Zheng-zhi<sup>1</sup>

- (1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui Province, China;  
2. New Star Institute of Applied Technology, Huangshan Road, Hefei 230031, Anhui Province, China)

**ABSTRACT:** Due to the advantages such as low output distortion and low switching losses, three-level inverter attracts great attentions in a long period, in the meanwhile, the diagnosis about the fault of converters is the prerequisite of the reliable and effective operation of converters. Through analysis and simulation, this paper did some research about the open-circuit fault diagnosis of transistors in three-level inverter. Using the three-level diode-clamped inverter as an example, operation mode and behavior patterns of inverter under open-circuit fault situation were analyzed. The concept of fault diagnosis using output PWM voltage and polarity of output current was also introduced. Through simulation and experiment, the validity of this method was testified. Comparing to the former methods proposed, this method has the advantages of quick response to fault and high reliability.

**KEY WORDS:** power electronics; three-level; inverter; open-circuit fault; fault diagnosis; output PWM voltage

**摘要:** 三电平变换器因其输出谐波小、开关应力低等优点而受到广泛关注, 而对变换器故障情况的诊断处理是变换器能可靠、高效运行的前提。该文针对三电平变换器的拓扑, 通过理论分析和仿真实验, 对变换器中的各功率管开路故障诊断进行研究。以二极管钳位三电平半桥逆变器为例, 分析三电平变换器在功率管开路下的电路工作情况及故障表现形式, 并由此提出根据检测逆变器输出侧 PWM 电压和输出电流极性来诊断功率管开路故障的故障识别方案。最后通过仿真和实验验证该方法的正确性和有效性。该方法相对于已往的功率管开路故障诊断方法, 具有诊断迅速、可靠性高的优点。

**关键词:** 电力电子; 三电平; 逆变器; 开路故障; 故障诊断; 交流侧 PWM 电压

## 0 引言

电源在运行过程中, 常出现由于过流、过压、元器件过热等情况造成的电源故障。其中, 由于功率管工作在高频状态, 损耗较大, 发热严重, 发生故障的概率最大, 并且以功率管的开路和直通最为常见。功率管的直通后果是主电路短路, 很大的短路电流会在瞬间产生。因此对于功率管直通的故障, 需要在微秒量级的时间内给予排除。目前的主要手段是检测绝缘门极双极型晶体管发射极与集电极间电压来判断有无短路。若出现短路电流, 则多采用降栅压和慢关断及综合保护法来将故障功率管封锁。而对于功率管的开路故障, 后果则往往不会像短路故障这么严重。但会导致输出波形畸变及功率管工作不正常<sup>[1-3]</sup>。对于三电平电路, 较长时间的功率管开路故障还会导致变换器直流侧电压不平衡, 所以也需尽快地给予识别并排除。

目前大多数的电源故障诊断都是对电源输出电路电压或电流进行复杂的数学计算来得到故障状态, 难以应用到实际的系统中<sup>[4-8]</sup>; 或仅仅是简单的通过传感器得到输出端的过压、过流信号。在这些方法中, 很难确定故障功率开关管的位置。因为根据传统故障诊断方法, 这需要采集每个开关管的电压电流信号。

在一些相关文献中, 提出并总结了一些功率管开路的诊断方法<sup>[9-13]</sup>, 但这些方法基本上都是基于输出电感的电流来进行诊断。而电感电流的变化缓慢, 为保证诊断的可靠性, 往往还需要对判断

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(1998[1303])。

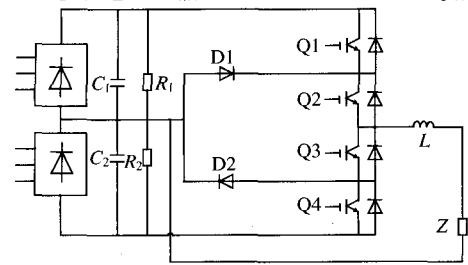
Key Project of the National Ninth-Five Year Research Programme of China(1998[1303]).

值设置余量，这就更加减缓了故障诊断时间。而且基于电感电流的故障诊断对于开关管间歇性故障反应不够灵敏，负载的突变对于故障诊断的结果也有较大干扰。

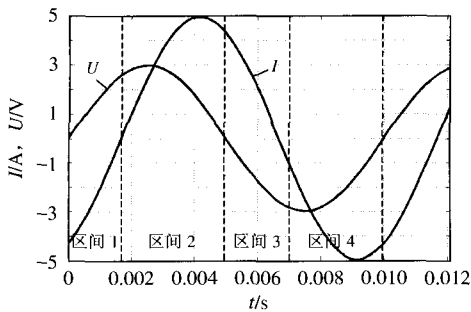
本文针对二极管钳位三电平半桥逆变器的拓扑，介绍一种新的故障诊断方法。该方法是基于变换器交流侧 PWM 电压  $U_{PWM}$  和电流的极性来判断功率开关管的故障及位置。该方法不仅可用于单个逆变器的诊断，还同样适用于逆变器并联系统的故障诊断。同时，该方法可扩展到两电平变换器和多电平变换器。但对于高于三电平的多电平变换器，存在过多开路故障情况而不能精确定位。因此，该方法较适于两电平和三电平变换器。

### 1 三电平逆变器的工作模式分析

以逆变器为例，如图 1 所示，图中  $U$  为调制信号， $I$  为输出电流。其工作过程可按  $U$  和  $I$  的正负分为 4 个区间<sup>[14-15]</sup>： $U>0, I<0$  为第 1 区间； $U>0, I>0$  为第 2 区间； $U<0, I>0$  为第 3 区间； $U<0, I<0$  为第 4 区间。在每个区间内，主电路有 2 种相应的工作回路。故整个工作周期共有 8 种工作回路，因此，可将一个周期再分为 8 种状态，分别为：①状态 1：输出电压  $U>0, I<0, U_{PWM}=+U$ ；②状态 2：输出电压  $U>0, I<0, U_{PWM}=0$ ；③状态 3：输出电压  $U>0, I>0, U_{PWM}=+U$ ；④状态 4：输出电压  $U>0, I>0, U_{PWM}=0$ ；⑤状态 5：输出电压  $U<0, I>0, U_{PWM}=-U$ ；



(a) 三电平逆变器主电路



(b) 三电平逆变器的工作区间

图 1 三电平逆变器的工作区间

Fig. 1 Diagram of the main circuit of three-level inverter and its working range

⑥状态 6：输出电压  $U<0, I>0, U_{PWM}=0$ ；⑦状态 7：输出电压  $U<0, I<0, U_{PWM}=-U$ ；⑧状态 8：输出电压  $U<0, I<0, U_{PWM}=0$ ，其中  $+U, 0, -U$  为逻辑值，数值上  $U=U_{DC}/2, U_{DC}$  为逆变器直流母线电压。其中，状态 1、2 在第 1 区间，状态 3、4 在第 2 区间，状态 5、6 在第 3 区间，状态 7、8 在第 4 区间。

由图 1 所示的逆变器主电路拓扑及所划分的工作区间，在图 2 中示出了 8 种不同状态下的工作回路。从图 2 可看出，每种状态分别对应了特有的输出 PWM 电压值和输出电流极性。而每种状态的工作回路所涉及的功率开关管的组合也是不同的。

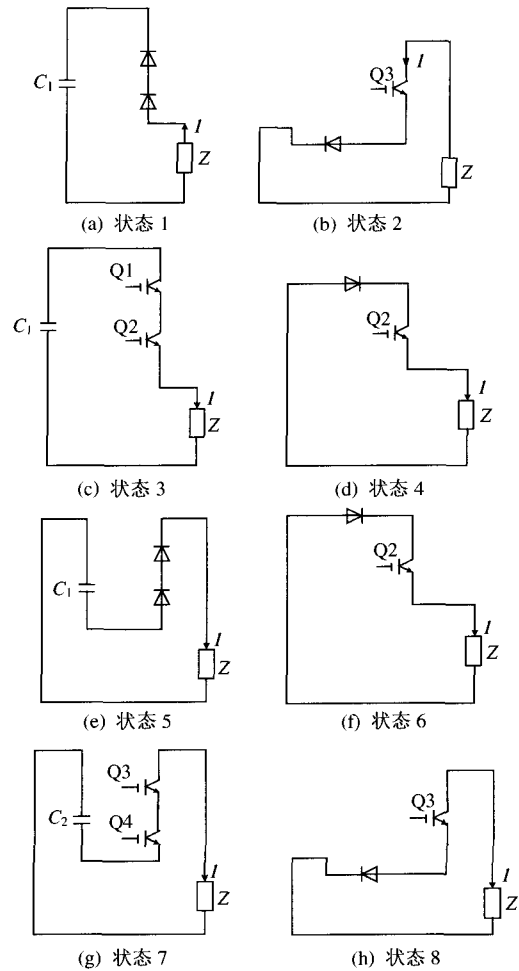


图 2 逆变器主电路在各种状态下的工作回路

Fig. 2 Main circuit working in specific states

### 2 逆变器主电路可能出现各种开路故障的分析及诊断方法介绍

三电平逆变器在正常工作状态下，其工作模式按图 2 所示的 8 种状态有规律地变换，其交流侧 PWM 电压的变化也正与这 8 种状态的变化一一对应。因为工作在不同状态下主电路的工作回路是不

同的,而每种工作回路对应的功率管也不同。因此,分析出电路在正常状态及各功率管的故障时输出状态的变化,即可迅速判断出故障及其位置。表 1 示出所有电路在正常状态及各功率管的故障时交流侧 PWM 电压的状态。

由表 1 可见, D1 和 D2 故障状态与 Q2 和 Q3 状态完全相同。故可将 D1 和 D2 与 Q2 和 Q3 合并考虑。由此可总结出各个功率管故障特征区及在相应特征区输出特征,如表 2 所示。

由表 2 可看出, Q2 和 Q3 的故障状态比较复杂,

表 1 功率管开路故障状态表  
Tab. 1 State of transistor open-circuit fault

| 故障功率管             | 状态 1                   | 状态 2            | 状态 3           | 状态 4            | 状态 5                   | 状态 6            | 状态 7           | 状态 8            |
|-------------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Q1 开路             | 不变(+U)                 | 不变(0)           | 由+U变0          | 不变(0)           | 不变(-U)                 | 不变(0)           | 不变(-U)         | 不变(0)           |
| Q2 开路             | 不变(+U)                 | 不变(0)           | 由+U变-U<br>(或0) | 由0变-U<br>(或维持0) | 不变(-U)                 | 由0变-U<br>(或维持0) | 不变(-U)         | 不变(0)           |
| Q3 开路             | 不变(+U)                 | 由0变+U<br>(或维持0) | 不变(+U)         | 不变(0)           | 不变(-U)                 | 不变(0)           | 由-U变+U<br>(或0) | 由0变+U<br>(或维持0) |
| Q4 开路             | 不变(+U)                 | 不变(0)           | 不变(+U)         | 不变(0)           | 不变(-U)                 | 不变(0)           | 由-U变0          | 不变(0)           |
| D1 开路             | 不变(+U)                 | 不变(0)           | 由+U变-U<br>(或0) | 由0变-U<br>(或维持0) | 不变(-U)                 | 由0变-U<br>(或维持0) | 不变(-U)         | 不变(0)           |
| D2 开路             | 不变(+U)                 | 由0变+U<br>(或维持0) | 不变(+U)         | 不变(0)           | 不变(-U)                 | 不变(0)           | 由-U变+U<br>(或0) | 由0变+U<br>(或维持0) |
| Q1、Q2 反并<br>二极管开路 | 出现强制关断, Q3 击穿。出现极高电压尖峰 | 不变(0)           | 不变(+U)         | 不变(0)           | 不变(-U)                 | 不变(0)           | 不变(-U)         | 不变(0)           |
| Q3、Q4 反并<br>二极管开路 | 不变(+U)                 | 不变(0)           | 不变(+U)         | 不变(0)           | 出现强制关断, Q2 击穿。出现极高电压尖峰 | 不变(0)           | 不变(-U)         | 不变(0)           |

表 2 功率管开路故障输出特征区间及故障特征表现  
Tab. 2 Characteristic range and corresponding performance of transistor open-circuit fault in three-level inverter

| 故障功率管       | 故障输出特征区间                   | 故障特征表现   |
|-------------|----------------------------|--|
| Q1          | 第 2 区间状态 3                 | 第 2 区间正常时应为+U 和 0, 故障时全为 0   |
| Q2          | 第 2 区间状态 3、4<br>第 3 区间状态 6 | 第 2 区间正常时应为+U 和 0, 故障时全为-U 或全为 0 或先维持-U 再变恒 0;<br>第 3 区间正常时应为-U 和 0, 故障时全为-U 或全为 0, 或先维持-U 再变恒 0 |
| Q3          | 第 1 区间状态 2<br>第 4 区间状态 7、8 | 第 1 区间正常时应为+U 和 0, 故障时全为+U 或全为 0 或先维持+U 再变恒 0;<br>第 4 区间正常时应为-U 和 0, 故障时全为+U 或全为 0, 或先维持+U 再变恒 0 |
| Q4          | 第 4 区间状态 7                 | 第 4 区间正常时应为-U 和 0, 故障时全为 0   |
| Q1、Q2 反并二极管 | 第 1 区间状态 1                 | 第 1 区间正常时应为+U 和 0, 故障时由于电感电流能量无释放通路,<br>$U_{PWM}$ 出现极高尖峰   |
| Q3、Q4 反并二极管 | 第 3 区间状态 5                 | 第 3 区间正常时应为-U 和 0, 故障时由于电感电流能量无释放通路,<br>$U_{PWM}$ 出现极高尖峰   |

出现了几种故障表现。这是因为,根据输出电流的情况不同,如电感电流为 0,无需续流时,因为 Q2 和 Q3 的故障可能发生于非特征区,在非特征区内,输出状态无变化,而非特征区进入特征区时,电感电流都是刚好过零点,这时即会出现本身故障特征之外的第 2 种故障特征,即对应输出电压的 PWM 波形幅值为 0。正是这种情况造成了多电平变换器多种故障无法精确定位,因为此时 Q2 在第 2 区间输出特征与 Q1 故障时的输出特征基本相同;而 Q3 在第 4 区间的输出特征又与 Q4 的情况基本相同。

反并二极管的开路会造成电感电流无续流回路,从而产生瞬间高压将其他功率管击穿,所以需特别注意反并二极管的故障。

假设在 Q1、Q2 反并二极管发生开路故障,在区间 1 内,因电感电流小于 0,当 Q3 关闭, Q1、Q2 导通时,电感电流无回路。此时产生的高压势必瞬间击穿 Q3。此时若 Q3 被击穿短路, Q1、Q2、Q3 将与  $C_1$  形成短路。迅速增加的电流将引起过流保护动作,将该逆变器从直流输入侧切断。若 Q3 被击穿成开路,则在随后到来的第 4 区间可诊断出 Q3 故障。

根据以上分析,可得出故障诊断的规则,如表 3 所示。

在实际应用中,可不必把整个区间的电压波形变化做为判据,而可将判断时间减小到数个开关周期。这就为功率管间歇性开路故障的准确诊断提供了可能。因为故障诊断判据的关键是逻辑电平的变化

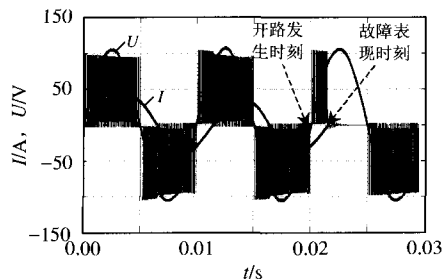
表 3 故障诊断规则表  
Tab. 3 Rules of fault diagnosis

| 故障表现                  | 诊断结果                 |
|-----------------------|----------------------|
| 第 1 区间输出 PWM 电压全为 +U  | Q3 或 D2 开路           |
| 第 1 区间输出 PWM 电压全为 0   | Q3 或 D2 开路           |
| 第 2 区间输出 PWM 电压全为 0   | Q1 开路(也可能是 Q2、D1 开路) |
| 第 2 区间输出 PWM 电压全为 -U  | Q2 或 D1 开路           |
| 第 3 区间输出 PWM 电压全为 -U  | Q2 或 D1 开路           |
| 第 3 区间输出 PWM 电压全为 0   | Q2 或 D1 开路           |
| 第 4 区间输出 PWM 电压全为 +U  | Q3 或 D2 开路           |
| 第 4 区间输出 PWM 电压全为 0   | Q4 开路(也可能是 Q3、D2 开路) |
| 第 1 区间输出 PWM 电压出现极高尖峰 | Q1、Q2 反并二极管开路        |
| 第 3 区间输出 PWM 电压出现极高尖峰 | Q3、Q4 反并二极管开路        |

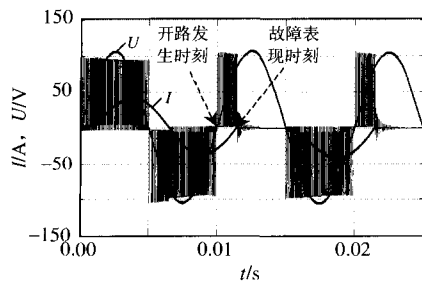
化, 诊断的可靠性并不会随诊断速度的提高而下降。所以只需提供几个开关周期的时间来防止噪声或毛刺的干扰, 就可获得快速、可靠的故障诊断结果。

采用 Matlab 进行仿真, 由图 3 所示的仿真结果可看出, 仿真的故障波形与分析所得结果完全一致。

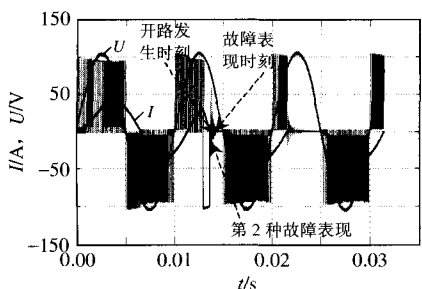
由图 3 可见, 如果 Q2 的故障开始时刻不在故障特征区, 那么输出 PWM 电压波形不会出现 -U, 因为 Q2 不通道, 输出电流不会再变为正值, 而是维持



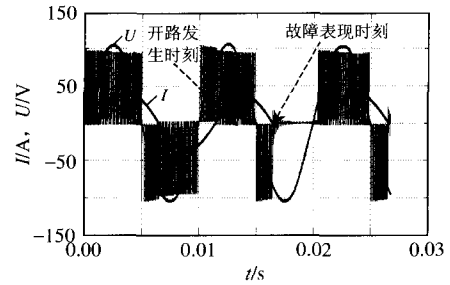
(a) Q1 开路



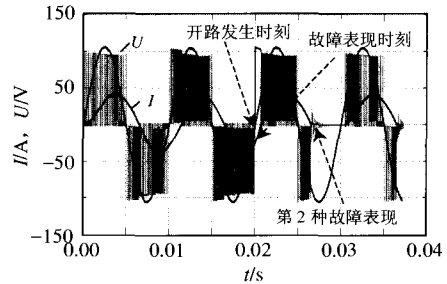
(b) Q2 开路(开路发生时刻位于非特征区)



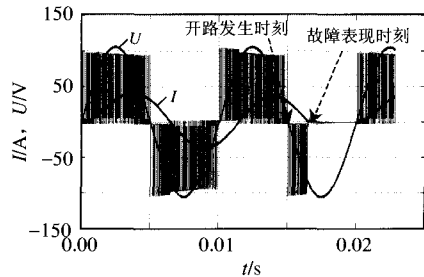
(c) Q2 开路(开路发生时刻位于故障特征区)



(d) Q3 开路(故障发生时刻位于非特征区)



(e) Q3 开路(故障发生时刻位于特征区)



(f) Q4 开路

图 3 三电逆变器功率管开路故障仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms of transistor open-circuit fault

0, 这样续流将不会出现。故障状态会和 Q1 非常类似。如果 Q2 的故障开始时刻位于故障特征区, 则在故障发生时刻后的第 1 个故障特征区, 会出现第 1 种故障表现, 而在之后的故障特征区, 仍然出现第 2 种故障表现。其过程分析同故障发生于非特征区一样。Q3 的故障表现及其分析也类似于 Q2。

超过 3 个功率管同时故障的情况很少出现, 一般来说对于多个功率管同时出现开路的情况为多个故障特征区的单个功率管故障特征表现的总和。但对于 Q1、Q2 及 Q3、Q4 同时故障, 情况会有所不同。

假设 Q1、Q2 同时开路, 若此时不位于第 2 区间, 假设故障发生时刻位于第 3 区间, 则此时会立即出现 Q2 开路的故障特征。此后若电路再进入第 2 区间, Q1 故障表现被屏蔽; 假设故障发生位于第 4 或第 1 区间, 则当电路进入第 2 区间时, 故障表现为 Q2 开路的第 2 种情况, Q1 故障表现仍然被屏蔽; 若故障发生位于第 2 区间, 则因为输出电感电流大于 0, Q3、Q4 反并二极管开通。故障表现如

同 Q2 开路故障的第 1 种故障情况。

根据以上分析, 如果 Q1、Q2 同时故障, 则 Q1 故障特征被屏蔽。因此, 在判断出 Q2 故障后, 需同时检查 Q1 的情况。以免故障检查不彻底。Q3、Q4 同时故障的情况如同 Q1、Q2 同时故障情况, Q4 故障特征被屏蔽。在判断出 Q3 故障后, 需同时检查 Q4 的情况。

### 3 基于电感电流的判别方法与输出电压判别方法的比较

采用输出电压判别方法时, 对于功率管开路故障的响应速度可限定在开关周期的量级, 且由于该方法对开路故障的判别是根据逻辑电平的变化, 所以对于各种情况下的开路故障响应灵敏度基本上是一致的。又由于变换器交流侧电压只与直流侧电压相关, 而与负载无关, 因此, 负载的变化也不会造成开路故障的误判断。

而基于电感电流的诊断方法则会有以上的缺陷, 特别是对于功率管间歇性故障响应不够灵敏, 且对于不同情况下的故障状态响应的灵敏度也会有很大差异。

三电平变换器交流侧可看作输出为 PWM 脉冲的电压源  $U_{PWM}$ , 其电压等于滤波电感  $L$  和负载  $Z$  上的电压之和, 如图 4 所示。

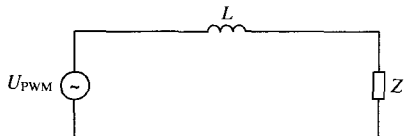


图 4 变换器交流侧等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of converter's AC stage

由分析可知, 在功率管开路故障时, 可视为电压源  $U_{PWM}$  由原值变为恒 0、恒  $+U$ 、恒  $-U$  或先  $\pm U$ , 后恒 0。在这几种情况中, 对电感电流影响最大的是在调制信号正(负)半周时变  $-U(+U)$ , 其余情况则影响较小。第 1 种情况以调制信号正半周变  $-U$  为例, 第 2 种情况以调制信号正半周变恒 0 为例。由于第 1 种情况下电压变化量是第 2 种情况下的两倍, 因此对于第 1 种情况的故障诊断灵敏度是第 2 种情况灵敏度的两倍。只分析第 2 种情况下的诊断灵敏度, 即可知道第 1 种情况的灵敏度。

设功率管故障时刻由  $T_0$  开始, 故障持续时间为  $\Delta T$ 。定义功率管开关周期为  $T$ , 调制信号周期为  $\bar{T}$ , 调制度为  $M$ 。令  $T_0 = (m/2)\bar{T} + T'_0$ ,  $\Delta T + T'_0 \leq \bar{T}/2$ , 其中:  $m=1,2,3,\dots,N$ ;  $T'_0$  为故障表现时刻。

在第 2 种情况下, 有

$$\Delta U_{PWM} = \sum_{i=1}^k M \sin(nT + iT) \cdot T \cdot \frac{U_{DC}}{2} = \frac{1}{2} T U_{DC} M \left[ \sum_{i=1}^k \sin(nT + iT) \right] \quad (1)$$

$$\Delta I = \frac{\Delta U_{PWM}}{sL + sZ} = \frac{\frac{1}{2} T U_{DC} M \left[ \sum_{i=1}^k \sin(nT + iT) \right]}{sL + sZ} \quad (2)$$

式中:  $k = \lfloor \Delta T / T \rfloor$ ;  $n = \lfloor T'_0 / T \rfloor$ 。

可推知, 该类诊断方法对故障响应的灵敏度和单位故障时间内的电流变化量成正比, 与电流有效值成反比。因此, 定义诊断灵敏度为:  $W = \frac{\Delta I / \Delta T}{I}$ , 则有

$$W = \frac{\Delta I / \Delta T}{I} = \frac{\frac{1}{2} T U_{DC} M \left[ \sum_{i=1}^k \sin(nT + iT) \right] / kT}{(\sqrt{2}/4) U_{DC} M \frac{\sqrt{2} \left[ \sum_{i=1}^k \sin(nT + iT) \right]}{4k}} = \quad (3)$$

由式(3)可知, 基于电感电流诊断方法的灵敏度不仅与故障持续时间  $kT$  有关, 同时还和故障发生时刻  $nT$  有关, 当  $\Delta T + T'_0$  接近调制信号过零时刻, 而  $\Delta T$  又不是很大时, 则开路故障很难从电感电流表现出来。

基于电感电流诊断方法的故障检测灵敏度还与  $T_0(0-)$  时刻电感电流斜率的正负及故障发生后的  $\Delta I$  究竟是增大电感电流还是减小电感电流有关。在故障特征第 1 区间, 不论电感电流增加或减小, Q3 故障的检测灵敏度都会比其他故障情况小, 因为  $\Delta I$  的变化与电感电流本身变化趋势相同, 这就需要更大的故障时间才能在电感电流上体现出来。其余的类似情况为: 在故障特征第 2 区间, 若电感电流减小, 对于 Q1、Q2 故障的检测灵敏度都会比其他故障情况小; 在故障特征第 3 区间, 不论电感电流增加或减小, Q2 故障的检测灵敏度都会比其他故障情况小; 在故障特征第 4 区间, 若电感电流增大, 对于 Q3、Q4 故障的检测灵敏度都会比其他故障情况小。

负载的变化可参见公式:

$$I = \frac{U_{PWM}}{sL + s(Z + \Delta Z)} = \frac{\frac{1}{2} U_{DC} M \sin t}{sL + s(Z + \Delta Z)} \quad (4)$$

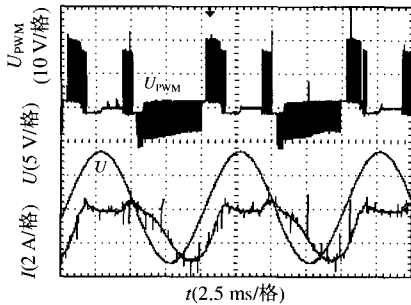
当不期望的负载变大出现时, 电感电流减小, 对发生在故障特征第 1、第 2 区间的交流侧电压变 0 或  $-U$  的开路故障产生干扰; 而不期望的负载减小

则对发生在故障特征第 3、第 4 区间的交流侧电压变 0 或+U 的开路故障产生干扰。

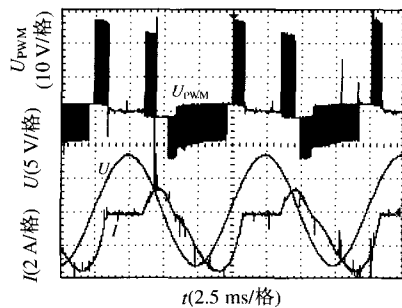
### 4 实验结果

在实验室完成三电平逆变器的功率管开路故障实验。考虑到 Q1、Q2 和 Q3、Q4 的对称性，实验中只观察了 Q1 和 Q2 开路故障的情况，如图 5 所示。

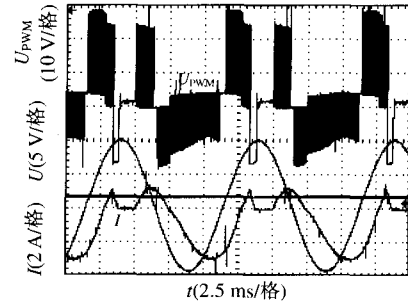
由图 5(a)~(c)可看出，实验波形与仿真波形基本一致。唯一不同的是实验波形中，开路故障发生时，直流侧电压出现不平衡现象，而在仿真中没有。这是仿真中为简化模型，将直流侧电容用直流电源代替的缘故。



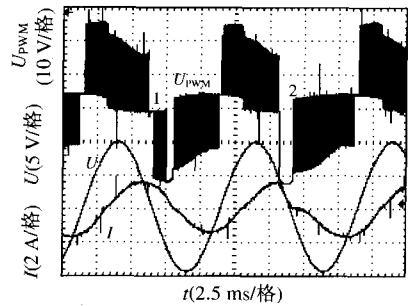
(a) Q1 开路故障



(b) Q2 开路故障(开路发生时刻位于非特征区)



(c) Q2 开路故障(开路发生时刻位于特征区)



(d) 不同故障时间的 Q2 间歇性开路故障比较

图 5 Q1 和 Q2 的开路故障实验波形  
Fig. 5 Experimental waveforms of Q1 and Q2's open-circuit fault

由图 5(d)可看到，故障 1、2(故障发生时刻分别如图中“1”、“2”所示)在两个周期中对电感电流的影响是不同的。故障 1 持续时间短，且故障发生时刻更接近于调制信号的过零点，所以对电感电流影响很小。对于像故障 1 这样的间歇性开路故障，基于电感电流的诊断方法将难以给予识别。而采用交流侧电压的诊断方法则不受此影响。

### 5 开路故障识别程序图

可总结出开路故障诊断的程序图，如图 6 所示。

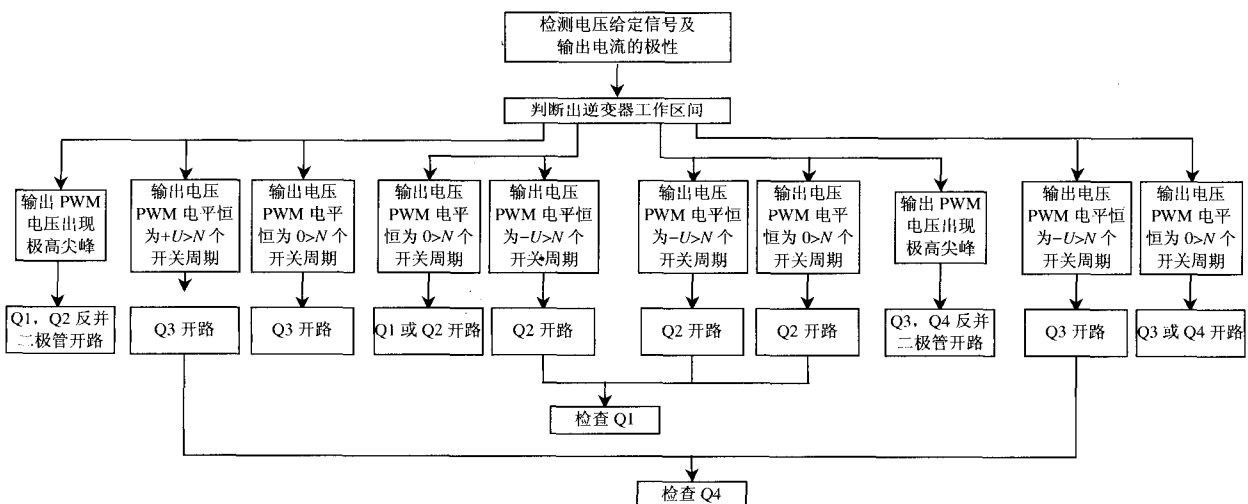


图 6 开路故障诊断程序图  
Fig. 6 Program of open-circuit fault diagnosis

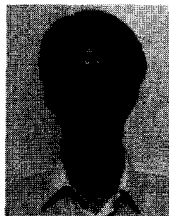
## 6 结论

采用交流侧 PWM 电压的逻辑量变化来对开路故障进行诊断, 相对于基于模拟量的诊断方法, 其抗干扰能力和可靠性得到了提高, 因此, 其诊断时间的余量可大大减小, 而且对于不同的开路故障情况, 其诊断灵敏度始终维持在一个较高的水平, 而基于电感电流的诊断方法, 其诊断灵敏度则要低于基于电压检测的方法, 而且灵敏度会随故障情况的变化而变化。且由于输出 PWM 电压波形对故障反应的速度可提高到几个开关周期, 因此, 相对于以往的路故障诊断方法(往往需要一个基波周期以上诊断时间), 这种方法的判断速度也大大地提高了。需要注意的是, 在实验中, 对于调制信号的极性往往也需要判断, 且对于调制信号的过零时刻需加入一个小的故障诊断死区, 这是为防止过零时的误诊断。然而即使加入此死区, 诊断死区仍远比基于电感电流的诊断方法小的多。而且, 因输出电流传感器在绝大多数逆变器中是必不可少的, 因此只需在逆变器输出侧增加一个电压传感器即可, 所以这种诊断方法也是非常容易实现的。

## 参考文献

- [1] 徐德鸿, 马皓. 电力电子装置的故障自动诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 刘凤君. 正弦波逆变器[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 王正仕, 陈辉明, 吴益良, 等. IGBT 过流保护方法的研究[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 1997, 31(1): 42-49.  
Wang Zhengshi, Chen Huiming, Wu Yiliang, et al. The study of IGBT overcurrent protection methods[J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1997, 31(1): 42-49(in Chinese).
- [4] 吴小华, 史忠科, 张晓斌. 基于 DSP 三相逆变电路在线故障诊断研究设计[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2): 37-39.  
Wu Xiaohua, Shi Zhongke, Zhang Xiaobin. On-line fault diagnosis research and design for 3-phase inverter based on DSP[J]. Power Electronics, 2004, 38(2): 37-39(in Chinese).
- [5] 吴小华, 史忠科. 三相 SPWM 逆变电源故障检测与诊断的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1512-1515.  
Wu Xiaohua, Shi Zhongke. Simulation study of fault detection and diagnosis on three-phase sine-PWM inverter[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(7): 1512-1515(in Chinese).
- [6] 马皓, 韩思亮. 电力电子设备远程监控与故障诊断系统设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 50-55.  
Ma Hao, Han Siliang. Design of remote monitoring and fault diagnosis system for power electronic equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 50-55(in Chinese).
- [7] 梁虹, 王艳秋. 基于粗糙集-神经网络的三相 SPWM 逆变电路故障诊断研究[J]. 辽宁工学院学报, 2005, 25(6): 351-353.

- [8] Liang Hong, Wang Yanqiu. Study of fault diagnosis on three-phase sine-PWM inverter based on rough set-neural network system [J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2005, 25(6): 351-353(in Chinese).
- [9] Filippetti F, Franceschini G, Tassoni C, et al. Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 994-1004.
- [10] 肖岚, 李睿. 逆变器并联系统功率管开路故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 99-104.  
Xiao Lan, Li Rui. Research on open-circuit fault diagnosis of transistor in inverter paralleling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 99-104(in Chinese).
- [11] Peugeot R, Courtine S, Rognon J P. Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(6): 1318-1326.
- [12] 王胜东. 一种基于电流矢量轨迹的 PWM 逆变器故障诊断方法[J]. 变频器世界, 2004, (3): 41-43.  
Wang Shengdong. Fault diagnose on a PWM inverter based on current trajectories[J]. The World of Inverters, 2004, (3): 41-43(in Chinese).
- [13] 赖才金, 姜建国. ASVG 主回路 GTO 或续流管故障诊断方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(3): 107-110.  
Lai Caijin, Jiang Jianguo. Novel scheme for fault diagnosis of GTOs and diodes in ASVG main circuit[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 1999, 39(3): 107-110(in Chinese).
- [14] 崔博文, 周继华, 谢琳. PWM 逆变器主电路故障诊断研究[J]. 电工技术杂志, 2001, (7): 4-7.  
Cui Bowen, Zhou Jihua, Xie Lin. Fault diagnose study on PWM inverter[J]. Electrotechnical Journal, 2001, (7): 4-7(in Chinese).
- [15] 刘正之, 李瑞来, 卢松升, 等. EAST 超导托克马克核聚变试验装置高功率快速控制电源[C]. 第三届特种电源技术学术交流会论文集, 中国, 绵阳, 2006.  
Liu Zhengzhi, Li Ruilai, Lu Songsheng, et al. The high-power fast control power supply in EAST superconducting Tokamak[C]. Proceedings of the 3rd Conference of Special Power Technology, Mianyang, China, 2006(in Chinese).
- [16] 宋文祥, 陈国呈. 三电平中点箝位式逆变器 SVPWM 方法的研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(4): 30-33.  
Song Wenxiang, Chen Guocheng. Study on SVPWM method for three-level neutral-point-clamped(NPC) inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy, 2004, 23(4): 30-33(in Chinese).



汤清泉

收稿日期: 2007-12-23.

作者简介:

汤清泉(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术, keentang@ipp.ac.cn;

颜世超(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为并联逆变器控制;

卢松升(1967—), 男, 博士, 主要从事电力电子系统检测控制与诊断等方面的研究;

刘正之(1943—), 男, 中国科学院研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率脉冲电源技术。

(编辑 谷子)