

基于电压矩形的单相PWM逆变器 开关管短路故障诊断技术研究

杨云虎, 费湘, 刘晓东

安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243032

摘要: 针对电压源型单相PWM逆变器开关管短路故障, 本文提出了一种基于电压矩形的新颖故障检测方法。相比于常规的故障检测方法需要同时采集相电流, PWM门控信号等信号, 而所提出的方法仅需采集逆变器输出电压。在非故障情况下, 利用开关状态值的变化构造电压矩形平面。为了识别哪个开关故障, 提出了故障线概念。故障检测时间仅需一个载波周期, 明显快于传统的方法。故障检测结果与负载, PWM开关频率, 以及反馈回路无关。仿真结果验证了所提出方法的有效性。

关键词: 电压矩形, 短路故障, 故障检测, 电压源型PWM逆变器

1 引言

在调速系统、新能源电力接口、飞轮能量存储系统、离(并)网 PWM 逆变器、电动及混合电动汽车能量变换系统等高性能、安全级别高的工业应用场合, 电力电子装置扮演着一个重要的角色。电力电子装置的任何故障将导致系统严重的后果。因此, 提高电力电子装置的可靠性, 成为当前研究的热点之一^[1]。

由于开关器件老化、过载、误操作等原因, 电力开关故障率占电力电子装置故障的 70%。其中, 短路故障是一种最常见的故障^[2]。

目前, 报道开关管故障检测方法的文献有很多, 也取得了可喜的成果。故障检测方法需要监控相电流^[3-7]、相电压^{[3][5]}、开关管门控信号^[4]、电机转矩^[5]、电机速度^[8]以及这些信号的组合等。虽然方法简单, 但实际应用中, 存在成本高、体积大等不足。更为担心的是, 过多监控器和传感器的使用, 会明显增加系统的故障率。

文献[7][9]的故障检测时间需要若干个正弦周期($>20\text{ms}$), 而目前制造生产的开关管(IGBT, MOSFETs)仅能短时间内忍耐 2-10 倍的工作电流。大工作电流在短时间内会使器件本体温度快速升高, 可能损坏开关器件。因此, 提高检测时间是避免电力器件故障的有效方法。

基于以上分析, 本文提出了一种基于电压矩形的快速

故障检测方法。因为仅仅分析开关信号, 所以所提出的故障检测方法明显快于传统的方法, 故障检测时间小于一个载波周期。

2 单相 PWM 逆变器建模

图 1 所示为电压源型单相恒压恒频 PWM 逆变器电路。其中, E_n 为恒定的直流电压, N 为串联电容的中点, A 和 B 分别为 A 相桥臂和 B 相桥臂串联 IGBT 的中点, d_1, \dots, d_4 为 IGBT 门控触发信号, 它是由参考信号与三角载波信号调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)得到。当 $d_1=1, d_2=0$ 时, A 点对 N 点的电压为 $E_n/2$; 当 $d_1=0, d_2=1$ 时, A 点对 N 点的电压为 $-E_n/2$ 。

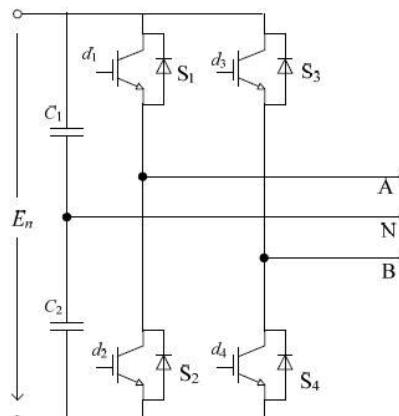


图 1 电压源型单相恒压恒频 PWM 逆变器

设一相桥臂的上与下开关器管的内电阻分别为 R_u 和 R_l 。例如, 对 A 相桥臂 S_1 开关对应的内电阻为 R_u , S_2 开关对应的内电阻为 R_l 。理想非故障情况, 当 $d_1=1, d_2=0$ 时, $R_u \approx 0, R_l \approx \infty$; 当 $d_1=0, d_2=1$ 时, $R_u \approx \infty, R_l \approx 0$ 。

由图 1 可得, 节点 A 和 B 对中点 N 的电压为,

$$V_{A \text{ or } B} = \frac{E_n}{2} \frac{R_l - R_u}{R_l + R_u} = \frac{E_n}{2} \frac{1 - R_u/R_l}{1 + R_u/R_l} \quad (1)$$

假设开关管处在理想非故障状态下,

$$V_A = \begin{cases} E_n/2 & d_1 = 1 \text{ and } d_2 = 0 \\ -E_n/2 & d_1 = 0 \text{ and } d_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

那么, 在任意时刻 t 的每相电压 $V(t)$ 的变化,

$$\begin{aligned} V(t) &= [V_B(t) \ V_A(t)] = e \cdot Q(t) \\ &= [E_n/2 \ -E_n/2] \begin{bmatrix} q_3(t) & q_1(t) \\ q_4(t) & q_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $Q(t)$ 为在 t 时刻的开关管开通和关断状态。当开关管开通 (或短路故障) $q(t)=1$, 开关管关断 (或开路故障) $q(t)=0$ 。

在 t 时刻的桥臂上开关管状态值定义为,

$$\begin{cases} s(t) := u \cdot b \\ s \in S \\ S = \{0 \ 1 \ 2 \ 3\} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $u:=[1 \ 0] \cdot Q(t)$, $b:=[2 \ 1]^T$ 。方程 (4) 表明, 二进制式的开关管状态值换成唯一的十进制式的开关状态值。

推论 1, 开关管非故障情况下, 对任何 $m, n \in S$ 且 $m \neq n$, 则 $Q_m \neq Q_n$ 。

证明: 开关管非故障情况下, $q(t)=d(t)$ 。因为, $u:=[1 \ 0] \cdot Q(t)=[d_2(t)d_1(t)]$,

所以, $s(t):=u \cdot b=2d_2(t)+d_1(t)$ 。显然, 对任何 $m, n \in S$ 且 $m \neq n$, 则 $Q_m \neq Q_n$ 。

3 电压矩形理论

图 2 给出了单相 PWM 逆变器的 AB 桥臂中点电压组成的矩形电压平面。其中, 水平轴表示 A 桥臂中点电压 V_A , 左端点电压为 $-E_n/2$, 右端点电压为 $E_n/2$, 中点电压为 0。垂直轴表示 B 桥臂中点电压。其中, $s=0$ 表示 AB 桥臂的上开关管 S_1 和 S_3 关断, 下开关管 S_2 和 S_4 导通。十进制式的开关管状态值 $s=0$, 对应于电压值为 $V_A=-E_n/2, V_B=-E_n/2$ 。其它开关状态可以此类推。

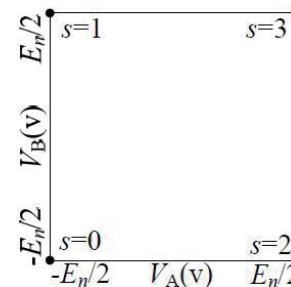


图 2 电压矩形平面和四个非故障开关状态

3.1 开关状态值转移

定义一系列相邻的开关状态值集合,

$$X(t_0) = \langle s(t_0), s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_n), \dots \rangle \quad (5)$$

其中, $t_0 > t_1 > t_2 > \dots > t_n > \dots$, t_n 表示开关状态值变化的时刻。

定义 $s(t_n) \neq s(t_n^-)$, t_n^- 表示无限接近 t_n , 但小于 t_n 。如果开关状态值在相邻时刻不等, 即 $s(t_n) \neq s(t_{n+1})=s(t_n^-)$, 则开关状态发生了转移。

推论 2(证明略): 在开关管非故障情况下, 在 t_A 和 t_B 时刻, 触发脉冲 d_1 和 d_3 分别发生了变化, 则,

$$\begin{cases} d_1(t_A) \neq d_1(t_A^-) \Leftrightarrow s(t_A) \neq s(t_A^-) \\ d_3(t_B) \neq d_3(t_B^-) \Leftrightarrow s(t_B) \neq s(t_B^-) \end{cases} \quad (6)$$

推论 3(证明略): 在开关管非故障情况下, 一个载波周期内, 在不同时刻 t_A 和 t_B , 必定触发脉冲 d_1, d_2, d_3, d_4 变化 $\Leftrightarrow V_A$ 和 V_B 变化。

推论 2 说明了当一相桥臂脉冲信号发生变化, 开关状态值必要发生变化。推论 3 证明了在一个载波周期内不同时刻, 桥臂电压 V_A 和 V_B 必要发生变化。因此, 在开关管非故障情况下, 在一个载波周期内, 桥臂电压 V_A 和 V_B 的两电平变化必定能观测到。

3.2 短路故障线

R_k 和 R_f 分别表示开关管的导通电阻和短路电阻。在短路故障发生时, 满足 $R_k \approx R_f \approx 0$ 。

如果 A 桥臂上开关管 S_1 发生短路故障,

$$V_A^u = \begin{cases} E_n/2 & d_1 = 1 \text{ and } d_2 = 0 \\ 0 & d_1 = 0 \text{ and } d_2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

由方程 (7) 可知, 电压矩形平面 (图 2 所示) 不再出现 $V_A=-E_n/2$ 直线。这条短路故障线两端含有两个开关状态值, 即 $s=0$, 和 $s=1$, 如图 3 (a) 所示。A 桥臂电压平均电压

V_A 只能出现在阴影部分。同理, 如果 A 桥臂下开关管 S_2 发生短路故障, 电压矩形平面 (图 2) 不再出现 $V_A=E_n/2$ 直线。短路故障线两端含有两个开关状态值, 即 $s=2$, 和 $s=3$, 如图 3 (b) 所示。

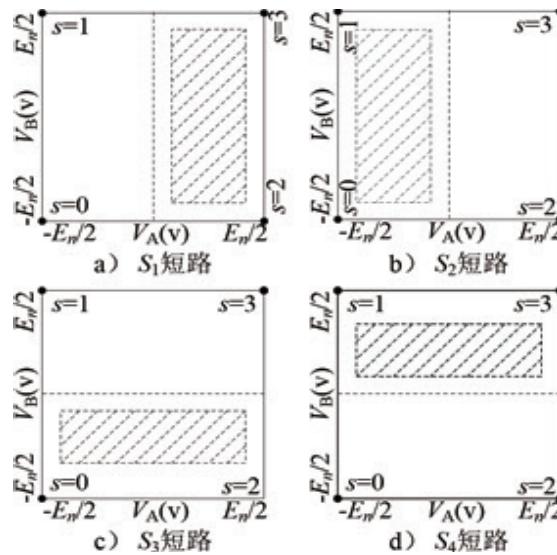


图 3 各开关管的故障线

表 1 给出了单相 PWM 逆变器各个开关管短路时对应的故障线。

表 1. 故障线

短路故障开关	短路故障线
S_1	$F_1=\{0, 1\}$
S_2	$F_2=\{2, 3\}$
S_3	$F_3=\{0, 2\}$
S_4	$F_4=\{1, 3\}$

在 t 时刻的桥臂下开关管状态值定义为,

$$\bar{u} := [0 \ 1] \cdot Q(t) \quad (8)$$

$$u = [1 \ 1] - \bar{u} \quad (9)$$

$$\bar{s}(t) := u \cdot b = \{[1 \ 1] - \bar{u}\} \cdot b \quad (10)$$

在开关管非故障状态时, $s(t) = \bar{s}(t)$ 。在短路故障出现时, $s(t) \neq \bar{s}(t)$ 。利用这种开关状态不同, 可以判别故障线 $F_j (j=1, 2, 3, 4)$ 。

$$F_j := Z_j^u \cup Z_j^l - Z_j^u \cap Z_j^l \quad (11)$$

$$Z_j^u = \{s(t) | q_j(t) = 1, \forall d_i(t) \in \{0 \ 1\}\}$$

$$Z_j^l = \{\bar{s}(t) | q_j(t) = 1, \forall d_i(t) \in \{0 \ 1\}\} \quad (12)$$

4 仿真

为了评价所提出方法的正确性, 在 MATLAB/Simulink 环境下, 搭建了一个电压源型的恒压恒频单相 PWM 逆变器仿真模型, 如图 4 所示。其中, S_1, \dots, S_4 是 4 个相同的开关管, 用于模拟理想的 IGBTs, 或者 MOSFETs。每个开关的内电阻为 $R_k=1m\Omega$, $R_g=100k\Omega$ 。为了模拟短路故障, 一个合闸内阻为 $1m\Omega$ 的断路器 B_1 并联在开关管 S_1 处。当 B_1 合闸, 即模拟开关管短路故障。其它参数如表 2 所示。

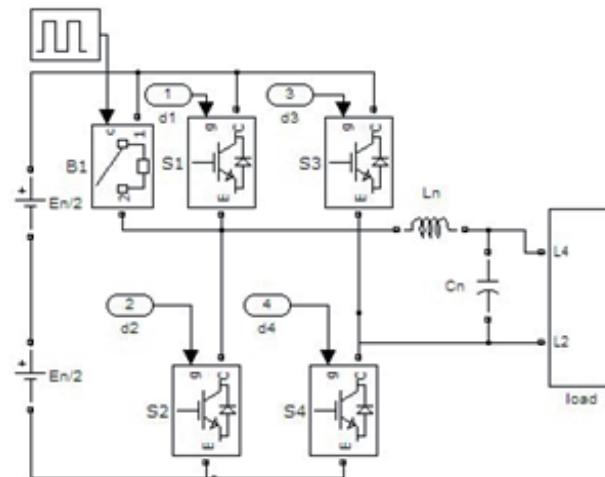


图 4 仿真模型拓扑部分

表 2. 仿真参数

参数	数值	参数	数值
直流电源 E_n	200V	滤波电感 L_n	5mH
开关 / 采用频率 f	10kHz	滤波电容 C_n	50mF

图 5 给出了开关管短路故障仿真分析波形。其中, 上图为 A 桥臂电压 V_A 仿真波形, 中图为 B 桥臂电压 V_B 仿真波形, 下图为开关管十进制状态值 s 仿真波形。在 $t=0.2s$, 断路器 B_1 闭合, 模拟开关管 S_1 短路故障。从图中可以清晰地看出, 在 $t=0.2s$ 之前, 桥臂电压 V_A 和 V_B 成 $\pm 100V$ 两种变化; 开关状态值 s 在 0~3 之间变化。在 $t=0.2s$ 时刻, 开关管 S_1 短路故障发生, 桥臂电压 V_A 在 0 和 100V 两种电压变化, 而桥臂电压 V_B 没有发生变化。开关管状态值 s 只在 2 和 3 值变化。对照表 1, 可知故障线是 F_1 。发生短路故障的开关器件就是 S_1 。从图中清楚看到, 故障检测时间在一个载波周期内。

另外, 仿真也验证了在负载变化, PWM 开关频率变化以及控制器变化的情况下, 故障检测有效性不会改变。

下转149页