

单相 PWM 变换器传导 EMI 的分析与抑制

王光明 重庆通信学院研究生队 钱希森 重庆通信学院电力工程系

在开关电源中，储能元件（变压器、电感和电容）的尺寸随着开关频率的增加成近似线性的减小。因而，高度集成开关电源一般需要高开关频率和快速半导体设备。但是，高开关频率将伴随电压和电流的变化率（ dv/dt 和 di/dt ）增加，这将直接影响开关电源的电磁兼容性。与此同时，EMI 滤波器的效能会因为高频寄生参数的影响而削弱，导致不能有效地滤出电源回路产生的高频 EMI 噪声。近年来，随着 EMC 标准的不断严格，对 EMI 的考虑也变得非常重要。目前，关于 PWM 变换器的 EMI 噪声的理论分析的文章有很多。但是，对于 EMI 噪声的产生和传导途径并没有比较全面而深入的研究。因而，EMI 噪声，尤其是经过旁路电容流向系统地的共模干扰电流很值得我们研究。

本文通过寄生电感和电容来建立变换器电路模型，对共模和差模干扰的基本模型进行了分析。详细讲述了降低 PWM 变换器 EMI 的 CM 和 DM 滤波器的设计方法。

一、变换器的高频寄生参数模型

图 1 为基于 IGBT 的全桥 PWM 变换器电路。为了简化分析过程，变压器没有在图 1 中表示出来。为了对 EMI 滤波器进行预测和计算，必须建立准确的高频模型。其模型具体包括元器件模型、滤波器模型和导线模型。

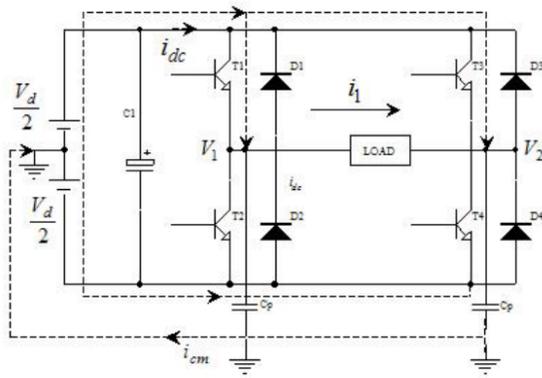


图 1 PWM 变换器电路图

1. 元器件模型

图 2 为完整的 IGBT 等效电路。由图可知，电路包括了内部和外部导线电感和 IGBT 集电极与模型金属底座之间的电容。这些电容导致高频漏电流流向连接散热设备的金属底座。散热设备一般是良好接地以确保安全。IGBT 设备是通过小的电子绝缘材料安放在金属底座上。为了使温度电阻尽可能小，其绝缘层要尽可能的薄，并且 IGBT 集电极与模型金属底座之间的旁路电容要尽可能的大。

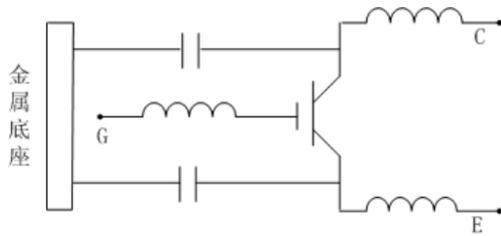


图 2 IGBT 寄生参数等效电路

2. 滤波器模型

滤波器效率不仅受滤波器的类型影响，也受滤波器组成阻抗与附近器件阻抗不同的影响。为了提高滤波器效率，本身的阻抗与附近器件阻抗必须有很大的不同。例如，如果滤波器有较小的容性阻抗，较多的高频噪声电流将通过。如果滤波器有较大的感性阻抗则较多的高频噪声电压将被分开。但是，滤波器在高频状态下的阻抗往往不是我们所想象的这样的。

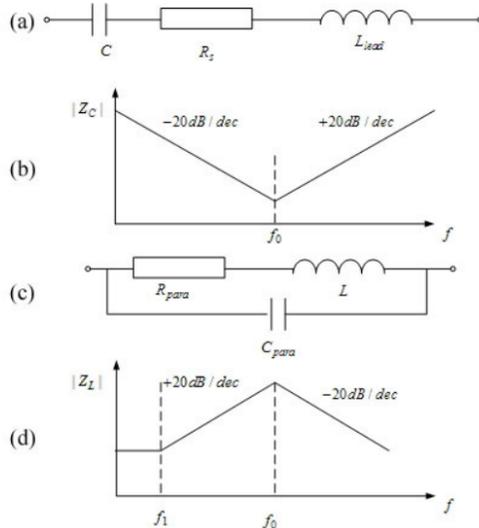


图 3 滤波器寄生参数

有很多寄生参数将对滤波器产生影响，首先讨论电容的寄生参数对滤波器的影响。图 3(a) 是一个简单的等效电路，电感 L_{lead} 为电路的导线电感， R_s 为等效电阻。图 3b 是电容阻抗大小的波德图，频率 f_0 ($f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_{lead}C}$) 是电容的自适应频率。当频率从 dc 逐渐增大时，电容 C 的阻抗将线性减小 -20dB/dec ，在 f_0 以上，电感的阻抗将线性增大 $+20\text{dB/dec}$ 。因此，如果电容的 f_0 越大，导线电感将越小，则对于固定电容值的电容将有更好的效果。为了提高电容的效能，电容的引脚应尽可能的短。如果将电容值增大不但不能减小 EMI，反而增加电路的 EMI，其自适应频率是主要的原因。典型的频率如下：电解电容为 1KHz，陶瓷电容为 100KHz，聚脂薄膜电容为 1MHz，塑胶电容为 10MHz，聚脂陶瓷电容为 100MHz。

电感上的寄生参数对 EMI 滤波器的影响也是很大的。典型的等效电路如图 3(c) 所示。 C_{para} 和 R_{para} 表示电感的寄生电容和等效串联电阻。图 3(d) 是阻抗大小的波德图。在小于 f_1 时电感表现为电阻性，在 f_1 与 f_0 ($f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC_{para}}$) 表现为感性，大于 f_0 表现为容性。因此可以得出结论，电感 f_0 越大，频率带越宽。类似于电容，寄生电容值越小，电感将有更好的性能。

3. 导线模型

导线模型包括支线和母线。支线有导线电感，大约为 $1\mu\text{H/m}$ 。如果支线较短，其寄生电容可以不用考虑。因此，连接线应该是越短越好。从实验结果可知，当输入输出电缆长度超过 5m 时，寄生电容将不能忽视。母线经常是用于联结直流电源与两 IGBT 引脚。其引线电感 L 一般比较小，但 di/dt 常常比较大，因此 $L \frac{di}{dt}$ 会非常大，这就是导致差模干扰的主要原因。

二、EMI 噪声

EMI 噪声主要包括两个部分：差模干扰和共模干扰。差模干扰电流一般是由导线流向中性点或者由中性点流向导线，共模干扰电流通常流入电路与保护地之间的寄生电容上^[4]。由于输入端一般加有输入差模滤波器，共模 EMI 一般比差模 EMI 要大很多。

1. 差模干扰

高频差模电流一般是由输出的线电压突变引起的，这些差模电流流过变换器的输出端。一部分经过 DC 端电容，一部分将被直流电源吸引。同时差模干扰电流也是一个辐射 EMI 源。其传播途径能通过安装在变换器 dc 桥附近的差模滤波器来变化。

变换器输出端电流 i_{dc} 由开关状态来决定。假定当支路为感性时，支路电流方向为正方向，电流大小为 i_1 ，则差模电流能通过表 1 描述的三种状态来决定。其它状态的高频电流与这三种状态是一样的。

表 1 变换器 DC 端输出电流

	T_1	D_1	T_2	D_2	T_3	D_3	T_4	D_4	i_{dc}
1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	i_1
2	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	0
3	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	$-i_1$

另外，因为主电路的寄生参数影响将产生高频谐振，同时增大差模电流。而且，PWM 开关产生的高谐波虽然大部分通过输出滤波器滤出，但仍有部分存在，因此，差模电流也将在输出端形成。

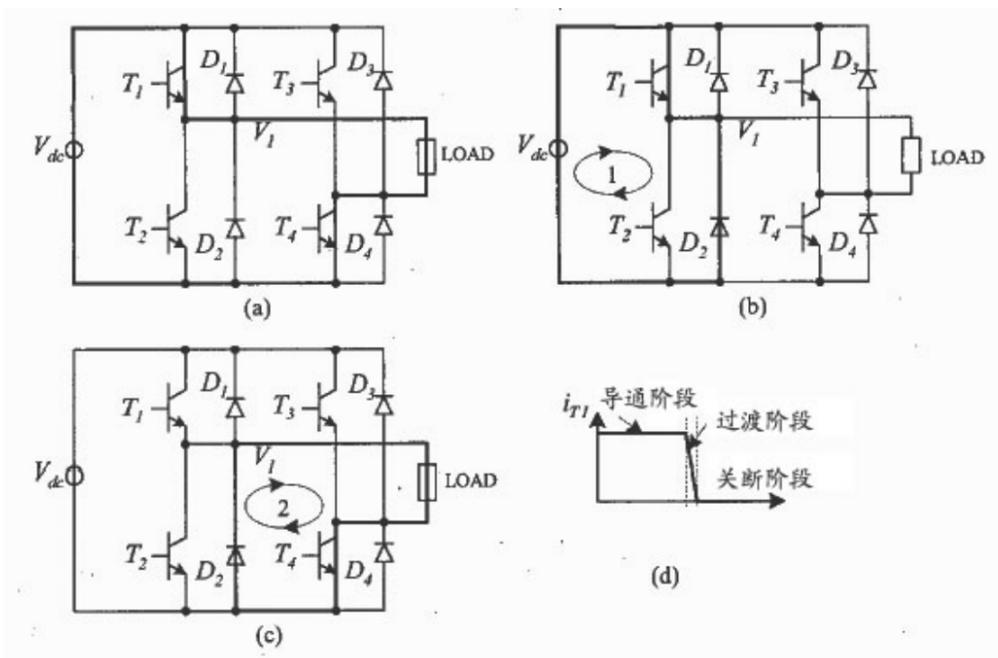
2. 共模干扰

共模干扰是因为输入端与接地系统之间电流形成的。在 PWM 变换器系统中，因为存在快速的开关转换输出电压和输出端各种与地的旁路电容，共模干扰是主要的干扰。IGBT 集电极与金属底座寄生电容 C_p ，它是由图 1 中的与地之间的虚线引起的。这些电容将导致高频漏电流流入连接散热片的金属底座。这些散热片因为安全原因一般都良好接地的。IGBT 一般是通过薄的绝缘材料安放在金属底座上。为了减小温度电阻，绝缘层通常是尽可能的薄，并且集电极与金属底座的旁路电容要偏大一些。

在单相变换器中，共模电压 V_1 和 V_2 是潜在桥臂中点与直流端点之间。寄生电容为

$$C_p = \frac{i_{cm}}{dv/dt}$$

在开关动作时，共模电压对等效寄生电容进行充放电，因而， dv/dt 和共模电流会很大，共模电流的路径由图 1 的虚线表示。由图可以清楚的看到，共模电流回路面积相比差模电流回路面积要大一些。因此对于辐射 EMI 相当于一



个好的天线。

3. 电压尖峰

在 PWM 变换器中，直流电压与电源开关通过母线和需要的输出电压延长线连接。简单的电路如图 4 所示。例如，图 4(a) 表示负载电压 $V_{load} = V_{dc}$ 的情况。当开关状态变化时如负载电压为 0 时，负载电流仅通过图 4(c) 所示的回路 2。当 T_1 关断时， D_2 完全导通（负载电流因为感性负载而不发生变化）。因为 D_2 处于导通状态，因此在转换时间内，回路 1 将满足以下表达式

$$V_{T1} = V_{dc} - L \frac{di}{dt}$$

L 表示回路 1 的旁路电感，包括引线电感和 IGBT 内部电感， V_{T1} 表示开关 T_1 的电压。图 4 不同时间的电流回路 (a) $I_{T1} = I_{load}$ ，(b) 转换时间，(c) $I_{T1} = 0$ ，(d) 通过 T_1 的电流因而，由上式可知，当 T_1 关断时，回路 1 的旁路电感将导致较大电压通过 T_1 。共模电压的电压尖峰将因开关关断而产生，即 dv/dt 将增大，因而共模电流也将增大。

三、传导 EMI 的抑制

对于普通的 PWM 变换器，通常采用通用电源滤波器。低频部分（从 15kHz 到 1MHz）包括 DM 和 CM。DM 和 CM 部分均可以通过 DM 和 CM 滤波器滤出。高频部分（1MHz 以上）是共模干扰，要抑制就很困难。包括共模滤波器在内很多方法被使用来消除共模干扰。图 5 所示是滤波器的结构，包括输入端的 DM 和 CM 滤波器。

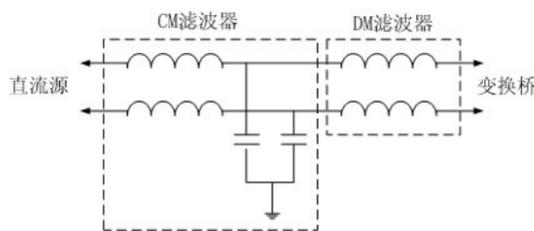


图 5 共模和差模干扰滤波器结构

1. DM 滤波器的设计

CM 滤波器的电感对 DM 电流一说近似于短路，而且，CM 滤波器的漏感对 DM 的 EMI 抑制有很大的作用。输入 DM 滤波器通常用于削弱变换器桥臂直流纹波电流。因为变换器桥臂是谐波源。直流输出电流必须抑制以符合 EMC 标准。变换桥输出电流包括直流部分和基频与开关频率的谐波部分。直流部分通过差模滤波器不能得到抑制，而谐波部分将得到大大的抑制。图 6 所示为谐波电流的等效电路。 L 和 C 是差模滤波器的等效电感和电容。 R 是电感 L 的等效串联电阻 (ESR)。 V_{dc} 为直流电压，对谐波电流来说是短路的。 I_k 为变换桥的等效谐波电流源。 I_1 为通过差模滤波器的 DM 电流。从等效电路可得如下表达式

$$I_1 = \frac{I_k}{s^2 LC + sRC + 1}$$

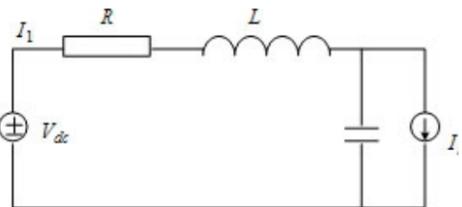


图 6 差模干扰电流等效电路

2. CM 滤波器设计

在开关导通的瞬间，共模电流通过寄生的分布电容流向保护地。因为很难计算出共模电流的大小，因此 CM 滤波器的设计非常的困难。CM 电感大小、电容的大小和位置一般通过实验来确定。为了提高系统的高频性能，将使用共模滤波器、RDC 缓冲器和屏蔽等办法。

四、结论

本文论述了 PWM 变换器的高频特性包括 CM 和 DM 噪声，也对 EMI 噪声的产生原理和传播途径进行了分析。EMI 滤波器的作用是抑制变换器直流输入和交流输出端产生的共模和差模干扰。