

基于 PSPICE 仿真的 IGBT 功耗计算

李 强,林明耀,胡敏强,曹永娟
(东南大学 电气工程系,江苏 南京 210096)

摘要: 结合无刷直流电机控制器的设计,提出了基于 PSPICE 仿真的绝缘栅双极型晶体管 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 功率损耗的估算方法。建立了 IGBT 电路仿真模型,给出了 IGBT 功率损耗与开关频率和栅极电阻阻值之间关系的仿真结果。最后,给出了功率损耗的计算方法,对不同开关频率和不同栅极电阻时的功率损耗进行了定量计算。结果表明,增大开关频率和栅极电阻会使 IGBT 的功率损耗增加。

关键词: 功耗; 绝缘栅双极型晶体管; PSPICE 仿真

中图分类号: TP 391.9; TN 710.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)01-0031-03

随着电力电子技术的发展,在电机控制等领域大量采用功率晶体管作为逆变器件,其中,绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)由于其优良的性能更是获得了十分广泛的应用^[1~7]。

对于设计者,为了优化电路,不仅需要了解功率晶体管一般的工作特性,还需要了解电路参数对其运行特性的影响以及功率损耗等方面的信息。

本文结合无刷直流电机控制器的设计,使用 PSPICE 9.2 仿真软件,定量计算了 IGBT 功率损耗与开关频率和栅极电阻之间的关系^[8]。

1 IGBT 电路仿真模型

图 1 所示是三相星形连接的无刷直流电机的三相全控电路, $V_{T1} \sim V_{T6}$ 为 6 只 IGBT, $S_1 \sim S_6$ 为 6 个控

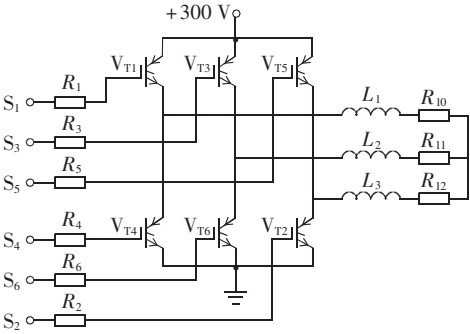


图 1 三相全控电路图

Fig.1 The three-phase circuit

制信号。本电路采用两两导通六状态运行方式,同时脉宽调制(PWM)采用上桥臂调制下桥臂恒通的调制方式,这样可以降低逆变器的开关损耗。通过控制上桥臂 PWM 波形的占空比改变加到电机绕组上的

电压,从而控制电机的转速。为了缩短仿真时间,在本文中将三相电路简化为如图 2 所示的一相绕组电路进行仿真。

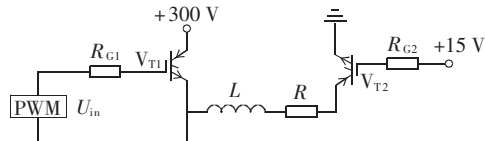


图 2 一相绕组仿真电路图

Fig.2 The single-phase simulative circuit

设定 PWM 信号的高电压为 +15 V,为了确保 IGBT 可靠关断,设定低电压为 -5 V;下桥臂直流源为 +15 V;栅极电阻暂取为 100 Ω ,加至 IGBT 的电源为 +300 V,负载为电感性。

2 仿真结果

图 3 所示为加在 V_{T1} 的 G,E 间控制上桥臂晶体管 V_{T1} 导通与关断的 PWM 信号波形。由于下桥臂晶体管 V_{T2} 始终导通,负载为电感性,并且由于集电极间电压的变化通过极间电容耦合的作用,所以控制电压 PWM 波形略有失真。

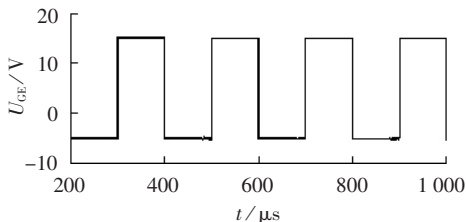


图 3 门极控制电压波形图

Fig.3 The gate control voltage waveform

图 4 所示为 V_{T1} 集射间电压 U_{CE} 波形。当 U_{CE} 为 15 V 时, V_{T1} 导通, U_{CE} 为饱和压降,大约为 0.7 V。当 U_{CE} 降为 -5 V 时, V_{T1} 关断,关断过程中集射电压 U_{CE} 的变化情况与负载性质有关, U_{CE} 上升到 700 多伏。在电感性负载情况下, U_{CE} 会突然上升而产生过冲现象, V_{T1} 将承受较高的 du/dt 冲击。

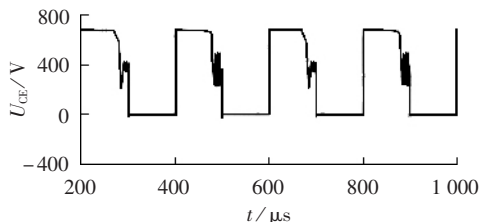


图 4 集射间电压波形图

Fig.4 The collector-emitter voltage waveform

图 5 所示为集电极电流 I_C 随时间变化的仿真波形。如果负载是纯电阻性的,则集射间电压 U_{CE} 就反映了集电极电流 I_C ,集电极电流与集射间电压以同样规律变化。但对于电感性负载,电感中的电流不能突变,故在图 5 中 I_C 呈连续状态。

在图 2 中,电感 $L=6.7$ mH,电阻 $R=1.8$ Ω 。负载阻抗为 $R+j2\pi fL$ (取 $f=5$ kHz),即约为 $1.8+j210$,可见,负载几乎为纯电感性。当 IGBT 导通或关断

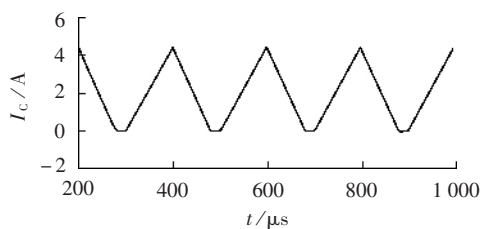


图 5 集电极电流波形图

Fig.5 The collector current waveform

时,电感电流不能突变,呈缓慢上升或下降趋势。

3 功耗计算

功率半导体器件大多数工作于开关形式,在开、关过程和导通工作过程都有功率损耗。IGBT 器件的总功耗 P ,是由开和关瞬时功耗 P_s 和通态功耗 P_f 组成的。

$$P = P_f + P_s \quad (1)$$

3.1 通态损耗

IGBT 开通后,在饱和条件工作,其通态损耗为

$$P_f = U_{on} I_{on} \quad (2)$$

式中 I_{on} 为器件导通时工作的有效电流; U_{on} 为器件导通时工作的有效电压。

3.2 开关损耗

开关损耗取决于 IGBT 的开关特性,与集射间电压及集电极电流有关。其开关损耗分别为

$$P_{soff} = \frac{1}{t_{off}} \int_t^{t+t_{off}} u i dt \quad (3)$$

$$P_{son} = \frac{1}{t_{on}} \int_t^{t+t_{on}} u i dt \quad (4)$$

式中 u, i 分别表示 IGBT 集射间电压瞬时值及集电极电流瞬时值。

总开关损耗为

$$P_s = P_{soff} + P_{son} \quad (5)$$

开通与关断功耗不相同,关断时间比开通时间长,关断损耗明显大于开通损耗,本文忽略开通时的功率损耗。因此,总功率损耗由关断功率损耗和导通时的功率损耗构成。功率损耗计算程序流程图如图 6 所示。

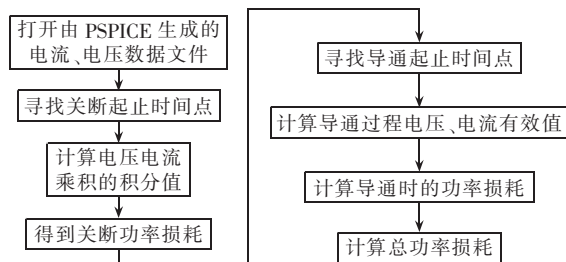


图 6 IGBT 功率损耗计算程序流程图

Fig.6 The flowchart of IGBT power loss calculation

在针对 IGBT 电路模拟的 PSPICE 仿真图形中,提供了功耗计算所需的集射间电压瞬时值和流过集电极的电流瞬时值。利用它们再根据式(1)~(5),进行数值计算,即可求得电路的总能耗。

4 计算结果

改变PWM 脉冲电压的工作频率,即改变 IGBT 的开关频率,分别计算在相同时间内 IGBT 的功率损耗,得出开关频率 f 与功率损耗 P 的对应数值如表 1 所示(对应于 $R_c=100\ \Omega$,占空比 = 50 %)。

表 1 功率损耗与开关频率关系
Tab.1 The relationship between power loss and switch frequency

f/kHz	P/W	f/kHz	P/W
3	1.926 2	8	4.138 8
4	2.253 3	9	4.585 4
5	3.623 1	10	5.910 0
6	3.812 9	11	6.417 1
7	3.894 7	12	6.814 0

对表 1 数据分析可知,随着开关频率的增大,在相同时间内 IGBT 的开关次数增多,开关损耗也增大,功率损耗随之变大。上述分析表明,在逆变器的设计中,从降低功率器件开关损耗的角度考虑,应降低 PWM 波的工作频率。但过低的 PWM 工作频率会明显增大电机的噪音。故设计中需综合考虑,在 PWM 波工作频率上升的同时,应适当增大散热器的有效面积。

改变栅极电阻 R_c 值,分别计算 IGBT 在一个周期内的功率损耗,得功率损耗与栅极电阻 R_c 的对应数值如表 2 所示(对应于 $f=5\ \text{kHz}$,占空比 = 50 %)。

表 2 功率损耗与栅极电阻阻值关系
Tab.2 The relationship between power loss and grid resistance

R_c/Ω	P/W	R_c/Ω	P/W
20	2.084 7	110	3.930 3
40	2.502 8	120	4.010 0
60	2.809 2	140	4.239 1
80	3.395 1	160	4.556 6
100	3.623 1	180	4.726 3

对表 2 数据分析可知,随着栅极电阻的增大,开关时间增大,功率损耗随之变大。为了降低开关损耗,在选择栅极电阻时,阻值应尽量小。但同时要考虑功率器件对 $du/dt, di_c/dt$ 的承受能力,以免超出其承受范围,造成损坏。

5 结语

在 PSPICE 中建立 IGBT 电路的仿真模型,结合 IGBT 功耗计算公式,从具体电路的 PSPICE 仿真波形中提取所需的 IGBT 的相关数据,配之以相应的算法,可以分析出 IGBT 的功率损耗与开关频率和栅极电阻之间的关系。仿真结果表明,增大开关频率和栅极电阻,将使 IGBT 的功率损耗增加。

参考文献:

[1] 张 立,黄两一. 电力电子场控器件及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
ZHANG Li,HUANG Liang-yi. The application of power electric devices[M]. Beijing: China Machine Press,1995.

[2] 苏开才,毛宗源. 现代功率电子技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
SU Kai-cai,MAO Zong-yuan. Modern power electric device technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1995.

[3] 黄家善. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社,1999.
HUANG Jia-shan. Technique of power electronics[M]. Beijing: China Machine Press,1999.

[4] 华 伟. 现代电力电子器件及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
HUA Wei. Modern power electronics device and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2002.

[5] 贾好来. EXB 841 对 IGBT 的过流保护研究[J]. 太原理工大学学报,1999,27(3):610-613.
JIA Hao-lai. Research on overcurrent protection of IGBT by EXB 841[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,1999,27(3):610-613.

[6] 卫三民,李发海. 一种大功率 IGBT 实用驱动及保护电路[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(9):55-58.
WEI San-min,LI Fa-hai. High power IGBT drive and protection circuit[J]. Journal of Tsinghua University (Sci. and Tech.),2001,41(9):55-58.

[7] CHOKHAWALA R S,CATT J,PELLY B R. Gate drive considerations for IGBT modules [J]. IEEE Trans. on Industry Applications,1995,31(3):603-611.

[8] 谭浩强. C 程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
TAN Hao-qiang. C language programming [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1991.

(责任编辑:戴绪云)

作者简介:

李 强(1969-),男,江苏南京人,博士研究生,研究方向为电机及其控制(E-mail:chnliqiang@163.com)。

IGBT power loss estimation based on PSPICE simulation

LI Qiang,LIN Ming-yao,HU Min-qiang,CAO Yong-juan
(Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: Combined with the design of brushless DC electric motor controller,a method to estimate power loss of IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) based on PSPICE simulation is proposed. The circuit model for IGBT simulation is provided. The relationships between IGBT power loss and the switch frequency and between IGBT power loss and grid resistance are presented. The calculation method is offered and the power losses under different switch frequencies and grid resistances are quantified. The results show that the power loss will rise as switch frequency or grid resistance increased.

Key words: power loss; IGBT; PSPICE simulation