

逆变器的缓冲电路

孙晓婷

(福建工程学院电子信息与电气工程系,福建 福州 350014)

摘要:分析了感应加热装置中逆变器的功率器件 IGBT 关断时浪涌电压产生的原因以及 4 种关断缓冲电路中功率器件通断时电路的工作过程和特点,给出了选取缓冲电路的注意事项.

关键词:IGBT;感应加热;缓冲电路

中图分类号:TM 464

文献标识码:B

文章编号:1004-2911(2007)02-0119-04

1 概述

用于感应加热电源的电力半导体器件有多种,一般应根据器件自身的容量、开关速度等特性来选用.众所周知,频率在 10kHz 以下的感应加热电源常用晶闸管并联谐振式逆变器.但由于晶闸管没有自关断能力,用于感应加热装置时,除需设置启动电路和强制换流电路外,还存在效率低及启动易失败等问题.如果采用 IGBT 来代替感应加热装置中的晶闸管,则因其是具有自关断能力的器件,不但不存在晶闸管的上述使用问题,而且还可以使装置小型化、轻量化及效率高,更由于器件本身是电绝缘模块,采用水冷方式时不会发生电腐蚀.

IGBT 的开关速度虽然不及 SIT 和 VMOS,但具有使用方便、损耗低、单个模块容量大等特点,并可用于 10kHz 以下的感应加热装置,其特性详见参考资料 2.

2 晶体管的保护

在三相桥式逆变器变频调速逆变器技术中,像 IGBT 这样的大功率绝缘栅晶体管,开关速度快,开关频率高,动态损耗较大,关断过程中功率管上有时还会出现危险的过电压,造成功率管损坏.为了保证功率管安全工作,逆变器上必须安装关断缓冲电路,即所谓的阻尼吸收电路.

2.1 快速功率管关断时产生过电压的原因及其限制方法

如图 1 所示, T_1 管正常导通工作时流过负载电流 I . 现将 T_1 管关断, T_1 管恢复阻断能力过程中,由于续流二极管 D_1 有延时导通时间 t_{DON} , 同时主电路中有电感存在, 则负载电流 I 不能突变, 在 t_{DON} 时间内迫使负载电流 I 经 T_1 管集电极与发射极间的寄生电容 C_{CE} 流通, 且在功率管上产生关断损耗. 此时 T_1 管两端电压的变化规律为:

$$V_{CE} = \frac{1}{C_{CE}} \int_0^{t_{DON}} I dt = I \cdot t_{DON} / C_{CE}$$

t_{DON} 越大, V_{CE} 也越大. 因此续流二极管 D_1 和 D_2 必须是快速恢复二极管. 当 t_{DON} 大小一定时, 功率管关断过程中, 若能在集电极与发射极两端并接上一个容值较大的电容 C , 则可将部分负载电流从功率管上转到电容 C 上, 降低功率管上的关断损耗, 限制过高 V_{CE} 的出现. 此时:

$$V_{CE} = \frac{1}{C_{CE} + C} \int_0^{t_{DON}} I dt = I \cdot t_{DON} / (C_{CE} + C)$$

由上式可见, 外接并联电容的容值越大, 则 V_{CE} 越小, 从功率管上转过来的负载电流越多, 即从功率管上转移过来的关断损耗越多, 功率管的工作状况将得到改善.

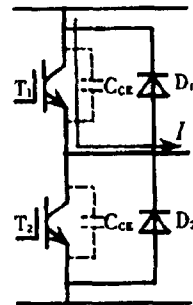


图1 功率模块等效电路图

外接电容并联上去的方法不同,则构成了下面将要讨论的4种不同的缓冲电路. IGBT 加到上的瞬态电压尖峰的幅值,取决于杂散电感,即“直流环”电感 L_s 中存储的能量,采用薄铜板平行贴近敷设的方法,可以减小“直流环”的尺寸,使 L_s 减小,但 L_s 总是存在,因此,缓冲电路也就必不可少. 在具体设置缓冲电路时,可单独选用图2中的一种接法,也可结合其中的两种或三种综合使用.

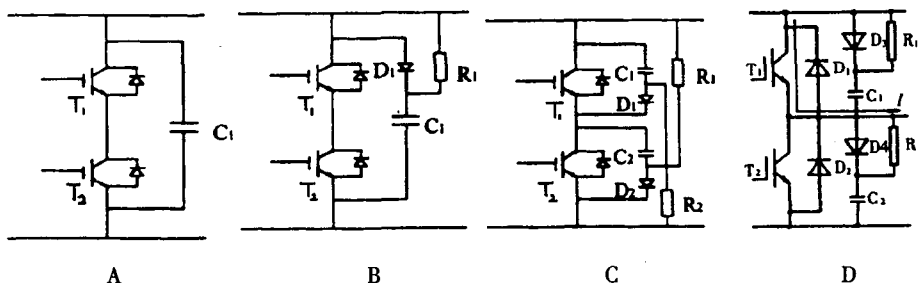


图2 各种缓冲电路

2.2 缓冲电路A

图2 A 中的缓冲电路最简单. 当 IGBT 工作时, 跨接在紧靠 IGBT 的直流母线两端的电容 C_1 , 可以吸收 L_s 中存储的能量, 使 IGBT 集射极间瞬态尖峰电压受到抑制. 这个电路的缺点是不适用于负载为并联谐振的装置. 这是因为当负载发生谐振时, 电路相当于断路, 存储在电容中的电流只能通过 T_1 和 T_2 放电, 使管子两端产生过电压导致 IGBT 损坏.

2.3 缓冲电路B

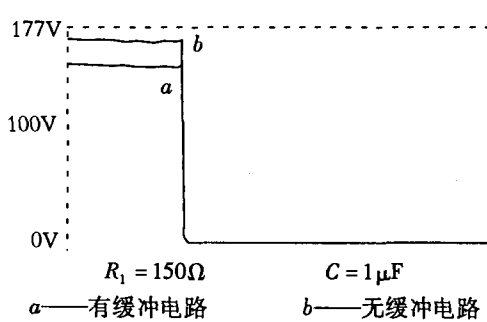
图2 B 中的缓冲电路是在 A 的基础上, 加接了电阻 R_1 和二极管 D_1 , 吸收电容 C_1 通过二极管 D_1 充电, 通过 R_1 放电. 这种电路在 IGBT 关断时, 抑制瞬态电压的效果好, 抑制开通时的 IGBT 瞬态电压的效果稍差, 但因有 R_1 的阻尼能消除 C_1 放电造成的电流振荡, 使 IGBT 开关时处于更平静状态. 这个电路的缺点在于保护电路的附加元件(即二极管)增加了缓冲电感, 而且这个电路不能用小电感电容.

2.4 缓冲电路C

图2 C 为典型的大功率缓冲电路. 下面将详细分析这个电路的开通和关断过程.

当下桥臂 IGBT(T_2) 开通时, 随着其电流的上升, 由于杂散电感 L_s 的作用, 使得总线两端电压 U_{ab} 下降到 $U_{cc} - L_s di/dt$. 这时, 前一工作周期已被充电到 U_{cc} 的缓冲吸收电容 C_1 , 将通过上桥臂 T_1 的反并联二极管、下桥臂 T_2 及缓冲电阻 R_2 放电, 流过 IGBT 两端反并联二极管的瞬时导通电流 I_{D1} 为流过杂散电感的电流 I_{Ls} 及流过缓冲吸收电容 C_1 的电流 I_c 之和, 即 $I_{D1} = I_{Ls} + I_c$, 也即 I_{Ls} 和 di/dt 相对于无缓冲电路时要小得多.

当 T_1 关断时, 由于杂散电感的作用, 使 U_{ce} 迅速上升, 并大于母线电压 U_{cc} , 此时, 缓冲二极管 D_1 正向偏置, 杂散电感 L_s 中的储能($L_s I^2/2$) 向缓冲电路转移, 即由缓冲电路吸收了贮能, 不会引起 U_{ce} 明显上升. 图3 是 T_1 开通时的 U_{ce} 仿真波形, a 为有缓冲电路的 U_{ce} 波形, b 为无缓冲电路的 U_{ce} 波形, 由图可以看出由于 T_1 的反向恢复作用及电路中的影响, 引起两端的瞬态电压 U_{ce} 增高. 图中 b 为带缓冲电路的开通时的 U_{ce} 工作波形, 可见, 它消除了一部分瞬态电压, 消除了瞬态电压, 也减少了开通时的电路的振荡. 图4 示出无缓冲电路与有缓冲电路的 T_1 关断特性的比较, a 为有缓冲电路的 U_{ce} 波形, b 为无缓冲电路的 U_{ce} 波形, 从图中可以看出, 过电压显著减小.



由图2C可得: $V_{CE} = V_{CC} + 1/C \int i dt$, $V_{CE} = V_{CC} - L_s di/dt$,

图3 开通 U_{ce} 仿真波形

从以上两式可得:

$$di/dt = -1/L_s C \int idt \Rightarrow i = I_0 \cos(t/\sqrt{L_s C} V_{CE} \text{ 在 } t/\sqrt{L_s C} = 2\pi \text{ 时达到最大值, 因此: } V_{PK} = V_{CC} + I_0 \cdot \sqrt{L_s/C}.$$

$$\text{从上式可得缓冲电容: } C_s = L_s I_0^2 / (V_{PK} - U_{CC})^2 \quad (2-4-1)$$

$$\text{缓冲电阻: } R_s = 1/(6C_s f_{sw}) \quad (2-4-2)$$

$$\text{缓冲电阻功率损耗: } P_{RS} = \frac{1}{2} C_{sn} (V_{PK}^2 - V_{CC}^2) \cdot f_{sw} \quad (2-4-3)$$

式中 f_{sw} ——开关频率, I_0 ——关断时的负载电流, t_r ——开通电流上升时间, V_{PK} ——瞬态电压峰值. 缓冲二极管应选用快速软恢复类型, 以避免关断时的严重振荡. 缓冲电阻应选用无感电阻, 以避免开通时发生振荡.

2.5 缓冲电路 D

图2 D所示电路也是一种十分典型的大功率缓冲电路. 下面将详细的分析这个电路的开通和关断过程. 当 T_1 开通时, 首先 T_1 与 D_2 间进行换流, T_1 上电流增大, D_2 上电流减小; 同时 C_1 、 R_1 和 T_1 构成的放电回路, 电源、 T_1 、 D_4 和 C_2 构成的充电回路. T_1 与 D_2 间换流完成, T_1 上流过负载电流 I , C_1 放电电流及 C_2 充电电流依然存在, 则三个电流在 T_1 中同方向, 造成功率率瞬时电流过大, 形成功率管导通附加损耗. C_1 放电和 C_2 充电过程结束后, T_1 进入稳态, 流过负载电流 I , $V_{C2} = V_{DC}$.

T_1 上施加关断控制信号, T_1 转入恢复阻断能力过程. U_{CE} 升高, D_3 导通, 部分负载电流转移为 C_1 的充电电流, T_1 上电流减小, C_2 经 R_2 、负载和电源负端构成的放电回路放电, 放电过程可能延续较长时间, 放电时间由时间常数 RC 决定. 当 T_1 完全恢复关断能力时, U_{CE} 高于 U_{DC} , D_2 正向偏置, 开始续流, 负载电流 I 由上桥臂向下桥臂换流. 当 C_2 放电完毕时, $V_{CE1} = V_{DC}$, $V_{C2} = 0$.

图5是 T_1 开通时的 U_{CE} 仿真波形, a 为有缓冲电路的 U_{CE} 波形, b 为无缓冲电路的 U_{CE} 波形, 由图可以看出由于 T_1 的反向恢复作用及电路中的影响, 引起两端的瞬态电压 U_{CE} 增高. 图中 b 为带缓冲电路的开通时的 U_{CE} 工作波形, 可见, 它消除了一部分瞬态电压, 消除了瞬态电压, 也减少了开通时的电路的振荡.

图6示出无缓冲电路与有缓冲电路的 T_1 关断特性的比较, a 为有缓冲电路的 U_{CE} 波形, b 为无缓冲电路的 U_{CE} 波形, 从图中可以看出, 过电压显著减小.

由图2D可知, 加在 IGBT 集射极上的尖峰电压为:

$$U_{PK} = U_{CC} + L_s \frac{di_c}{dt}, \text{ 式中 } U_{PK} \text{——瞬态电压峰值, } U_{CC} \text{——直流电源尖峰电压, } L_s \text{——杂散电感,}$$

$\frac{di_c}{dt}$ ——IGBT 的集电极电流变化率. 从能量守恒定律可知, 缓冲电容器 C_s 吸收的能量与杂散电感 L_s 中

$$\text{的储能相等, 因此便有: } L_s I_0^2 / 2 = \frac{1}{2} C_s (U_{PK} - U_{CC})^2$$

$$\text{故缓冲电容: } C_s = L_s I_0^2 / (U_{PK} - U_{CC})^2 \quad (2-5-1)$$

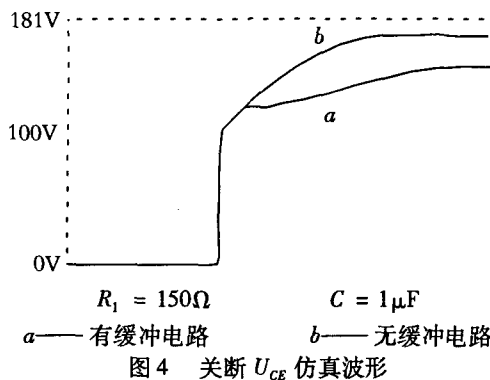


图4 关断 U_{CE} 仿真波形

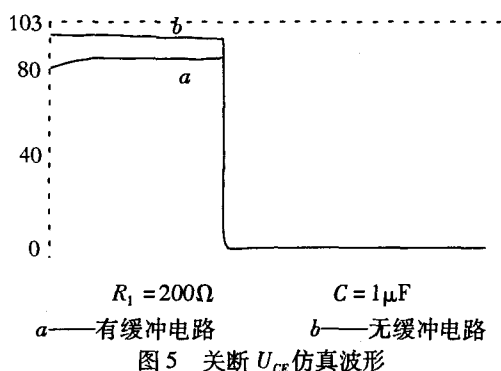


图5 关断 U_{CE} 仿真波形

式中 I_0 ——关断时的负载电流.

缓冲电阻可按下面两式计算:

$$R_S \leq \frac{1}{(2C_s f)} \quad P_{RS} \geq \frac{1}{2} L_s I_0^2$$

故缓冲电阻: $R_S = 1/(6C_s f_{sw})$ (2-5-2)

缓冲电阻功率损耗: $P_{RS} = \frac{1}{2} C_{sn} V_{PK}^2 f_{sw}$ (2-5-3)

式中 f_{sw} ——开关频率, t_r ——开通电流上升时间.

式(2-5-3)与式(2-4-3)比较, (2-5-3)的损

耗要高于(2-4-3). 所以, 这种关断缓冲电路能有效地限制功率管关断时的浪涌电压, 减小功率管关断损耗, 但会引起功率管导通附加损耗. 电容 C_1 和电容 C_2 放电时, 其储能分别耗在电阻 R_1 和电阻 R_2 上, C_1 和 C_2 充放电频率与功率管开关频率相同, 总能耗为 $f C V_{DC}$. 开关频率越高, C 值越大, 阻尼吸收电路损耗越高, 会造成 R_1 和 R_2 过热.

缓冲电路 D 的优点是: 吸收电路因二极管 D_3 旁路了电阻 R_1 上的充电电流, 克服了过冲电压较高的缺点. 吸收电路因直接并联在 IGBT 的 C、E 极两端, IGBT 关断时吸收电容 C_1 的电压从零开始上升, 因而具有较好的过电压吸收效果.

3 小结

缓冲吸收电路的要点是: (1) 尽量减小主电路的布线电感; (2) 吸收电容应采用低感吸收电容器, 为了减小吸收电容的杂散电感, 它的引线应尽量短, 最好直接接在 IGBT 的端子上; (3) 吸收二极管应选用快开通与快软恢复二极管, 以免产生开通过电压和反向恢复引起较大的振荡过电压.

参考文献:

- [1] 潘天明. 工频和中频感应炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [2] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 田健, 等. 大功率 IGBT 瞬态保护研究[J]. 电力电子技术, 2000(4): 29-30.
- [4] 卫三民, 李发海. 一种大功率 IGBT 使用驱动及保护电路[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(9): 55-58.
- [5] Trivedi M. Internal Dynamics of IGBT During Short Circuit Switching[J]. Proc. IEEE BCT M'96: 77-80.

The snubber circuit on Inverter

SUN Xiao-ting

(Department of Electromechanical and Automation Engineering,
Fujian University of Technology, Fuzhou Fujian 350014, China)

Abstract: This paper discusses the cause that makes surge voltage in main power components of inverters, and analyzes on - and - off process and characters of the main power components with four various types of buffer circuit, and a principle of choosing capacitance - resist - trance components for buffer circuit is also given out.

Key words: IGBT; induction heating; snubber

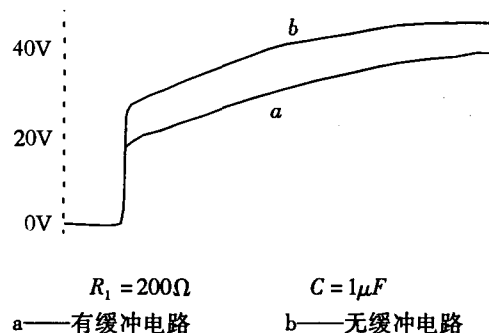


图6 关断 U_{CE} 仿真波形