

基于新型混合式断路器的 IGBT 缓冲电路研究

刘顺炮¹, 郑建勇¹, 查申森¹, 梅 军¹, 吴恒荣², 陈 军²

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;
2. 江苏华厦电气集团, 江苏 扬中 212200)

摘要: 分析了新型混合式断路器的 IGBT 开关特性, 在总结 3 种传统 IGBT 缓冲电路的基础上, 提出一种优化的适合于新型混合式断路器的 IGBT 缓冲电路。该电路能在不降低吸收过电压效果的基础上, 改变充、放电回路的电容, 使放电时间跟随电容改变而改变, 满足具体主电路对 IGBT 导通时间变化的要求和满足不同 IGBT 开关频率的要求。通过仿真和理论分析证明了该优化缓冲电路的有效性和适用性。

关键词: 缓冲电路; IGBT; 混合式断路器

中图分类号: TM 561 文献标识码: A 文章编号: 1006-6047(2006)03-0031-04

绝缘栅极双极晶体管(IGBT)是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种混合型半导体器件。由于具有开关频率高、电压型驱动、驱动功率小和通态压降小等优点, 因此 IGBT 被广泛应用于开关电源、UPS、逆变器、新型混合式断路器、转换开关等领域。而在新型混合式断路器的应用中, 由于断路器装置的体积较大、引线较长, 致使杂散电感较大, 并且在快速开关切换过程中, 电压、电流的变化率很大, 电流变化率在杂散电感和感性负载的共同作用下会形成很大的电压尖峰^[1-2], 使开关器件承受很大的电压应力, 这些现象是导致第 3 代 IGBT 失效的主要原因, 为了避免 IGBT 失效, 需要通过紧凑布线、减少杂散电感和选择合适的缓冲电路等途径改善。本文在深入分析传统 IGBT 缓冲电路的基础上优化出一种新型的 IGBT 缓冲电路。

收稿日期: 2005-08-29; 修回日期: 2005-11-02
基金项目: 江苏省科技攻关项目(BE2003043); 江苏省高技术项目(BG2004038)

1 新型混合式断路器的 IGBT 工作原理和特点

图 1 为文献[3]提出的新型混合式断路器结构。

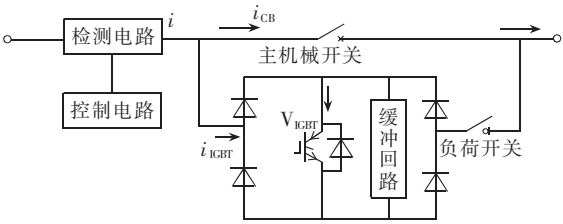


图 1 新型混合式断路器结构

Fig.1 The structure of novel hybrid circuit breaker

由文献[3]对该新型混合式断路器的工作原理和过程的分析可以得出: 当电路正常供电时, 该断路器中的主机械开关处于闭合状态, 而固态开关 IGBT 处于关断状态, 这时候断路器的工作特性主要由所采用的机械式开关决定, 当供电电路发生故障时, 则断路器发生分闸动作, 在分闸过程中, 利用 IGBT 固

态开关快速的动态特性进行换流,即 IGBT 在主机械开关闭合条件下从关断状态变为导通状态,当 IGBT 完全导通时,断开主机械开关,在主机械开关完全断开后关断 IGBT,此时断路器处于断开状态,从而切除故障。当故障消失或清除后,要闭合断路器,恢复供电,在断路合闸过程中,先开通 IGBT,在 IGBT 完全导通时,闭合断路器的主机械开关,确定主机械开关完全闭合后,再关断 IGBT,此时断路器处于合闸状态,恢复供电。从以上断路器的合闸、分闸过程分析,可以清楚知道,IGBT 是在主机械开关完全闭合后关断,因此,在理想状态下,IGBT 是在零电压、零电流的状态下关断,即 IGBT 处于软开关工作,不存在硬开关工作下的浪涌电压冲击问题。

但是在断路器实际合闸过程中由于机械开关触头存在抖动现象和装置检测部分产生的延迟及 IGBT 的驱动信号延迟使 IGBT 在关断时刻仍然存在由于感性负载或杂散电感的影响而造成 IGBT 两端出现过电压和过大的 du/dt 。为说明该现象,可以图 2 的 IGBT 工作电路,根据实际情况设置图 2 中的各个器件参数如下:电源 $U_{dc}=400\text{ V}$,等效电感等效 $L=40\text{ }\mu\text{H}$,负载 $R=20\text{ }\Omega$ 。进行软件平台仿真,仿真过

程中 IGBT 两端不加任何缓冲电路,其仿真结果如图 3 所示。从图 3 的仿真波形可以测量出 IGBT 两端的关断电压有一尖峰电压,该尖峰电压主要是等效电感 L 及 IGBT 本体电容的存在而产生

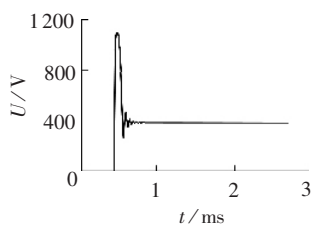


图 3 IGBT 关断时两端电压波形
Fig.3 Voltage waveform of IGBT during turn-off

该尖峰电压最高可达到 1100 V ,且伴随严重振荡现象和极大的 du/dt ,高达 1100 V 的电压远远超过 IGBT 工作的额定电压,容易使 IGBT 过压失效,过大的 du/dt 也会使 IGBT 发生擎住效应而失效,一旦新型混合式断路器的核心构件 IGBT 失效,将造成整个装置的工作瘫痪,且振铃电压的出现也使 IGBT 工作不稳定,因此,选择合适的缓冲电路来保护新型混合式断路器的 IGBT 工作正常运行是十分重要的。

2 传统的 IGBT 无源缓冲电路结构和特点

图 4(a)(b)(c)是常用于 IGBT 的 3 种缓冲电路结构^[4-5],经过理论分析和仿真,图 4(a)的 RC 型能有效抑制震荡的发生,关断浪涌电压抑制效果好,但由于 R 值的限制,该缓冲电路主要用于小容量器件。在图 4(b)所示缓冲电路中,利用快速恢复二极管可有效抑制瞬变电压,从而抑制谐振的发生,能够控制 du/dt 和减小过电压,可用于中大容量器件。但由于 RC 时间常数设计必须满足开关周期的 $1/3$,以保证缓冲电容 C 上吸收的尖峰电压在每个开关周期内通过电阻 R 放掉,因此受开关频率的限制。图 4(c)所示缓冲电路是专门用于 IGBT 两端电压的箝位作用,即减小过电压,但没有控制 du/dt 的效果。

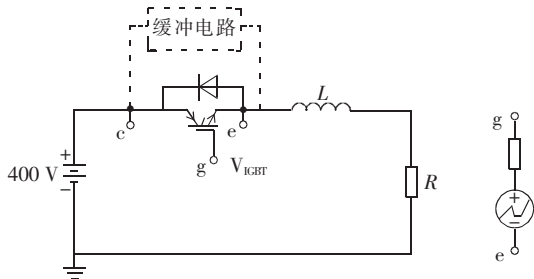


图 2 IGBT 工作等效电路图
Fig.2 The equivalent circuit of IGBT

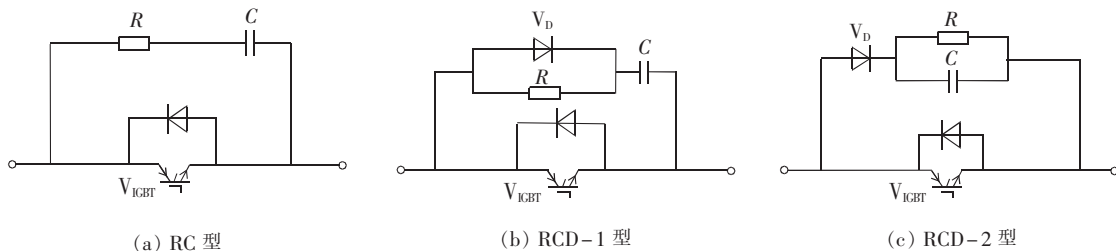


图 4 缓冲电路
Fig.4 Snubber circuit

3 优化 IGBT 缓冲电路设计

3.1 设计 IGBT 缓冲电路基本原则

通常情况下,在设计关于 IGBT 的缓冲电路时,要从 IGBT 应用的主电路结构、器件容量以及要满足主电路各种技术指标所要求的 IGBT 开通特性、关断特性等几个因素综合考虑,根据理论分析和经验总结,IGBT 缓冲电路的设计有 2 个基本的参考特性^[7-8]。

a. 参考功率开关的关断特性。RCD 参数选取过程如下:功率开关 IGBT 在关断时间 t_{off} 的关断损耗

能量为

$$E = C U_{ce}^2 / 2 = I_c U_{ce} t_{off} / 2 \quad (1)$$

功率开关 IGBT 在导通时间 t_{on} 内充电电容 C 经放电电阻 R 按指数规律放电,即

$$U_c = U_{ce} e^{-t_{on}/RC} \quad (2)$$

R 的取值必须确保在 IGBT 的最小导通时间内 C 全部放电,所以 R 必须满足下式:

$$R \leq t_{on} / [(3 \sim 5) C] \quad (3)$$

为了 C 放电时不过多增加 IGBT 的负担,通常将缓冲电容的放电电流 I 限制在 $25\% I_c$ (IGBT 的集电

极电流)以内,所以 R 的取值满足式(3)的同时必须满足下式:

$$R \geq 0.25U_{ce} / I_c \tag{4}$$

b. 认为功率开关截止时杂散电感 L_s 能量全部转移到 C 中,则有经验公式:

$$C = L_s I_c^2 / U_{ce}^2 \tag{5}$$

3.2 新型 IGBT 缓冲电路设计过程

经过对新型混合式断路器 IGBT 的开关特性及新型混合式断路器实际工作状况的分析可知:新型混合式断路器中对 IGBT 的导通时间要求很高,即新型混合式断路器的 IGBT 缓冲电路的目标要求是在实现过电压的抑制和 du/dt 的控制基础上满足 IGBT 符合整个装置技术指标的导通时间。在分析以上 3 种缓冲电路优缺点的基础上可设计一种符合新型混合式断路器的 IGBT 缓冲电路,在设计过程中,根据以上 IGBT 缓冲电路设计原则可见:要满足新型混合式断路器的 IGBT 导通时间的要求,而不增加缓冲电容的放电电流 $I = U_{ce} / R$ 和减小过电压的抑制效果,只有通过不同的方式设计出新的缓冲电路拓扑来改变 IGBT 关断和开通时的缓冲电容值,而本文设计的图 5 为新的 IGBT 缓冲电路拓扑,可满足以上新型混合式断路器对缓冲电路的技术要求。其中的关键是通过二极管 V_{D2} 改变关断和导通的充放电电容。

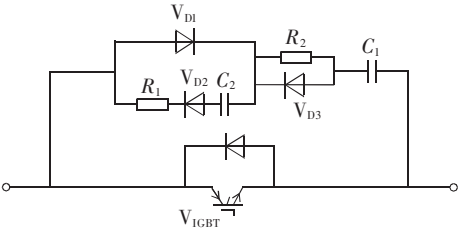


图 5 新型 IGBT 无源缓冲电路
Fig.5 Novel passive snubber of IGBT

3.3 新型缓冲电路的理论分析

3.3.1 IGBT 关断

当 IGBT 关断时负载电流通过二极管 V_{D1} 和充电电阻 R_2 形成回路对电容 C_1 充电见图 6(a),此时 IGBT 的缓冲电路能够有效抑制震荡发生,且关断浪涌电压抑制效果好。

根据充电等效电路可得出电路方程式:

$$U_{dc} = L (di/dt) + R_s i + U_c \tag{6}$$

$$C (dU_c/dt) = i \tag{7}$$

初始条件是: $i_{L0} = I_c, U_{c0} = 0$, 求解

$$U_c = \frac{(U_{dc} + I_c)}{LC} \frac{1}{MN} (e^{-N} - e^{-M}) \tag{8}$$

$$M = \frac{-R_s + \sqrt{(R_s^2 C - 4L)/C}}{2L}$$

$$N = \frac{-R_s - \sqrt{(R_s^2 C - 4L)/C}}{2L}$$

根据式(8)可定性的得出 C 越大,则 U_c 越小,所以选择大电容可实现 IGBT 关断浪涌电压的抑制。

3.3.2 IGBT 闭合

当 IGBT 导通时,充电电容 C_1 通过二极管 V_{D3}, V_{D2} ; 电容 C_2 、放电电阻 R_1 放电,如图 6(b)所示,此放电回

路增加电容 C_2, C_2 和 C_1 串联构成放电等效电容。等效电容 $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ 。

根据放电等效回路可得出电路方程式为

$$U_c = R_1 I_{c1} \tag{9}$$

$$I_{c1} = -C (dU_c/dt) \tag{10}$$

根据初始条件 $U_{c0} = U_p$ 可得电容两端的电压为

$$U_c = -(U_p t / R_1 C) + U_p \tag{11}$$

由式(11)可得:

$$t = [(U_p - U_c) / U_p] R_1 C \tag{12}$$

当 C_1 放电到其两端电压为 IGBT 导通时的两端电压时才表明 C_1 完全放电,由式(12)可见:减小 C 的值可以减小 C_1 的放电时间 t 。

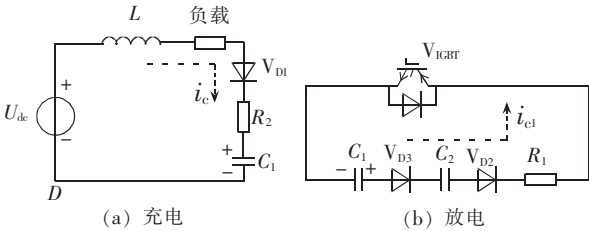


图 6 C_1 充、放电等效电路

Fig.6 Equivalent circuit and diagram of circuits of C_1

3.4 新型 IGBT 缓冲电路作用的仿真^[9]

对图 2 的 IGBT 工作等效原理图加 RCD-1 型缓冲电路和新型缓冲电路进行仿真比较,证明新型 IGBT 缓冲电路的优化性,仿真结果如图 7, 8 所示。在仿真过程中通过在实验电路图 2 中的 IGBT 两端的缓冲电路分别采用新型的缓冲电路和传统的 RCD-1 型缓冲电路,其仿真参数的设置原则是:

- a. 主电路的器件参数不变;
- b. 2 种不同结构缓冲电路的 C_1 根据选取原则取同样的值 $0.15 \mu F$, 实现 IGBT 两端关断电压为 $400 V$;
- c. 新型缓冲电路中 C_2 取 $0.1 \mu F$ 。

3.4.1 IGBT 带新旧缓冲电路的关断仿真

经过以上参数设定后,仿真时,在 $15 \mu s$ 时刻同时给带新旧缓冲电路结构仿真电路中的 2 个 IGBT 加驱动信号,使 IGBT 关断,由图 7 仿真结果波形可见:在 C_1 取值一样的条件下,新型的缓冲电路(波形 2)把 IGBT 的两端关断电压限制在预定的 $400 V$,而传统的 RCD-1 型缓冲电路(波形 1)只把 IGBT 两端关断电压限制在 $450 V$,且传统的 RCD-1 型缓冲电路抑制 du/dt 比新型缓冲电路的效果差,还出现一定的震荡,所以新型缓冲电路比传统的 RCD-1 型缓冲电路能更有效抑制关断电压和震荡。

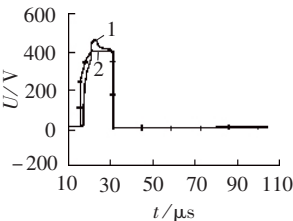


图 7 关断时 IGBT 两端电压波形

Fig.7 Voltage waveforms of IGBT during turn-off

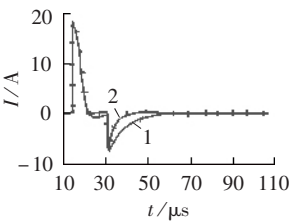


图 8 电容 C_1 的充、放电两端电流波形

Fig.8 Current waveforms during C_1 charging and discharging

3.4.2 IGBT 带新旧缓冲电路的闭合仿真

同样的参数设定下,在 $30\ \mu\text{s}$ 时刻同时给带新旧缓冲电路结构的 2 个 IGBT 加驱动信号,使其导通,由图 8 仿真结果波形可见:新型缓冲电路由于通过二极管 V_{D2} 比 RCD-1 型缓冲电路在放电时多串联 1 个电容 C_2 的条件下,由其 C_1 (波形 2) 在 $45.476\ \mu\text{s}$ 时刻完全放电,而 RCD-1 型缓冲电路中的 C_1 (波形 1) 要在 $65.825\ \mu\text{s}$ 时才能完全放电。因此,新型缓冲电路比传统缓冲电路 RCD-1 型所需的完全放电的导通时间要小,提高了 IGBT 的开关频率,满足了新型混合式断路器对缓冲电路的要求。实际应用中,通过改变新型缓冲电路中 C_2 值可以得出 C_1 不同的完全放电时刻 t ,由仿真结果表 1 可见:在同样 C_1 的条件下,采用不同的 C_2 能够实现不同的完全放电时刻。

表 1 不同 C_2 值的仿真数据
Tab.1 simulative data for different C_2

C_2/nF	$t/\mu\text{s}$	C_2/nF	$t/\mu\text{s}$
20	36.905	125	47.500
50	44.221	150	49.286
80	45.119	175	50.476
100	45.476		

4 结语

具体分析了 IGBT 作为一个快速固态开关用于新型混合式断路器的开关特性,在了解 3 种传统 IGBT 缓冲电路特点和原理的基础上,针对 IGBT 在具体主电路结构中的开关特性,设计了一种新型的缓冲电路,理论分析和仿真实验说明该缓冲电路能够在不降低吸收过电压效果的基础上,改变充放电回路的电容,使放电时间跟随电容而改变,满足具体主电路对 IGBT 导通时间变化的要求,满足不同 IGBT 开关频率的要求,该缓冲电路属于无源缓冲电路,工程上比有源缓冲电路容易实现,性价比高于传统的无源缓冲电路,而且该缓冲电路也可以作为 IGBT 单独缓冲电路应用于其他领域,如开关电源、逆变器等。

参考文献:

- [1] PETTERTEIG A,LODE J,UNDELAND T M. IGBT turn-off losses for hard switching and with capacitive snubbers[C]// **Industry Applications Society Annual Meeting**. [S.l.]: IEEE,1991:1501-1507.
- [2] 赵正毅,杨潮,赵良炳. 对三电平 IGBT 变流器两种缓冲电路的研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(12):42-46. ZHAO Zheng-yi,YANG Chao,ZHAO Liang-bing. Research on two snubbers for three-level IGBT converters[J]. **Proceedings of the CSEE**,2000,20(12):42-46.
- [3] 梅军. 基于 IGBT 软关断的混合式限流断路器结构与分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(18):59-72. MEI Jun. Structure and analysis of a hybrid current limiting circuit breaker based on IGBT soft switching[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2004,28(18):59-72.
- [4] 王兆安. 电力电子设备设计 and 应用手册[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2002.
- [5] LIMA F K A,CRUZ C M T,ANTUNES L M. A family of turn-on and turn-off nondissipative passive snubbers for soft-switching single-phase rectifier with reduced conduction losses[C]// **Power Electronics Specialists Conference**. [S.l.]:[s.n.],2004:3745-3750.
- [6] PENG F Z,SU Gui-jia,TOLBERT L M. A passive soft-switching snubber for PWM inverters[J]. **IEEE Trans. on Power Electronics**,2004,19(2):363-370.
- [7] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [8] FINNEY S J,WILLIAMS B W,GREEN T C. RCD snubber revisited[J]. **IEEE Trans. on Industry Applications**,1996,32(1):155-160.
- [9] 陈东. OrCAD 电路设计[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

刘顺炮(1981-),男,福建莆田人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:liushunpao@163.com);
郑建勇(1966-),男,江苏南京人,教授,系副主任,研究方向为电力电子与电力传动;
查申森(1980-),男,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:seuzss@seu.edu.cn);
梅军(1971-),男,江苏淮安人,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

Research on IGBT snubber based on hybrid circuit breaker

LIU Shun-pao¹,ZHENG Jian-yong¹,ZHA Shen-sen¹,MEI Jun¹,WU Heng-rong²,CHEN Jun²
(1.Southeast University,Nanjing 210096,China;

2.Jiangsu Huaxia Electrical Company,Yangzhong 212200,China)

Abstract: The characteristic of IGBT used for novel hybrid circuit breaker is analyzed. Three kinds of traditional IGBT snubber are summarized,based on which an optimized snubber is designed for novel hybrid circuit breaker. With the effect on absorbing over-voltage,its discharge time changes with the changeable capacitor of discharge circuit to meet the requirements of variable conduction time of IGBT by main circuit and variable switching frequency by different IGBTs. Its effectiveness and applicability are proved by simulation and theoretical analysis.

This project is supported by Scientific and Technological Brainstorm Project of Jiangsu Province(BE2003043) and High Technology Project of Jiangsu Province(BG2004038).

Key words: snubber circuit; IGBT; hybrid circuit breaker