

研
究
开
发

磁悬浮列车的软开关悬浮斩波器研究

李云钢¹, 王 宁¹, 谈 瑛², 程 虎¹, 董 钟¹

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;
2. 墨尔本大学 工程学院, 澳大利亚 墨尔本 3010)



作者简介: 李云钢(1969-), 男, 博士, 研究员, 长期从事磁悬浮技术研究。

摘 要: 研究磁悬浮列车中基于 AACC 的软开关悬浮斩波器的优化设计问题。在分析电路工作原理的基础上, 通过对谐振过程进行数学分析, 表明该电路的谐振过程与外界条件无关, 因而可减少谐振电路的设计约束; 分析主开关管的开通时刻不准确对软开通效果的影响, 提出采用检测方式来控制其开通时刻, 并探讨具体方法。

关键词: 磁悬浮列车; 斩波器; 软开关; PWM; 谐振; 主动辅助换流电路(AACC)

中图分类号: U292.91+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2014)05-0038-04

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2014.05.011

Research on Soft-switching Choppers in Maglev Trains

LI Yungang¹, WANG Ning¹, TAN Ying², CHENG Hu¹, DONG Zhong¹

(1. College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Melbourne, VIC 3010, Australia)

Abstract: Optimal design for choppers in maglev trains were focused on with active auxiliary commutation circuit (AACC) techniques. Based on the operation principle and mathematical resonance analysis, it was shown that the resonance procedure of the proposed circuit was independent of the operational condition, which simplified circuits design constraints; Imprecise switching-on time on main device soft switches effect was also analyzed, which led to a general detection method to control the switching-on time, moreover, implementation issues were discussed to provide insight for engineers.

Keywords: maglev train; chopper; soft-switching; PWM; resonance; AACC

0 引言

在磁悬浮列车中, 悬浮斩波器是悬浮控制系统的功放单元, 占有悬浮控制器的主要体积、重量、耗能和成本, 其性能对悬浮稳定性和可靠性有重要影响。悬浮斩波器是随着磁浮列车以及电子技术的发展而发展的^[1-3]。实用的悬浮斩波器的输入电源电压在 DC 300~600 V 之间, 输出峰值电流约 DC120 A, 主开关管采用 IGBT, 工作于 PWM 方式, 斩波频率 20 kHz, 采用 H 桥拓扑^[5, 8, 15]。当前的研究重点是如何提高效率和改善电磁兼容性。传统的硬开关方式虽然调节速度快, 但开关损耗大, 开关过程中有很高的电压尖峰, 引发严重的电磁干扰。采用三电平斩波器, 可在不改变电路的前提下, 将 IGBT 的驱动信号错开 180°, 就达到减小开关损耗及减小输出电流纹波的效果, 但不能从根本上解决电磁干

扰问题^[5, 7, 14]。在电力电子技术领域, 软开关技术早在 20 世纪 80 年代就得到了深入广泛的研究^[9], 采用合适的软开关电路, 不仅可以最大限度地减小开关损耗, 而且可以完全消除电压和电流尖峰, 有效降低功率管的应力要求, 提高电路可靠性。1999 年, 文献[4]针对开关磁阻电机的驱动, 提出了一种基于 AACC (Active Auxiliary Commutation Circuit 主动辅助换流电路) 的零转换型三相半桥软开关拓扑, 小功率试验效率达到 96.1%。文献[11]将该电路的单相拓扑用于双管正激变换器, 设计了 250 W/48 V/100 kHz 电源, 效率达到 91%。文献[5]对该电路进行改进, 用 1 个电容代替 4 个电容, 结构清晰, 调试方便, 成功研制磁悬浮列车的实用软开关斩波器, 将效率从 57% 提升到 87%, 消除了斩波器的电磁干扰, 为悬浮控制技术的发展做出了重大贡献。文献[12]和[6]分别采用 2 个反并和反串开关管的辅助谐振支路, 研制四象限软开关斩波器。文献[6]进行了试

收稿日期: 2013-10-19

验,效率较硬开关提高19%,可用于永磁电磁混合悬浮系统。本文研究的软开关斩波器的优化设计问题,主要以二象限斩波器为对象,也兼顾四象限斩波器的特殊问题。通过对谐振过程的严格分析,表明无论负载电感量的大小如何,也无论负载电流大小如何,本结构中的谐振电路都无条件起作用,不必考虑能量平衡条件的限制;研究表明,主开关管的开通时刻必须足够准确,才能达到最好的软开通效果。

1 基于AACC的软开关斩波器原理

基于AACC的二象限软开关斩波器如图1所示^[5],四象限软开关斩波器如图2所示^[6]。斩波器的负载是电磁铁,在本文中表现为一个大电感,电阻可忽略,故用 L_0 表示,若无特别说明,认为是恒流源,电流为 I_{L_0} 。电源电压为 U_d 。不妨设开关器件都是理想元件。图3是该电路的工作时序,详细分析如下。

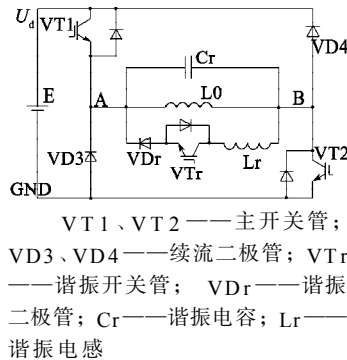


图1 二象限软开关斩波器

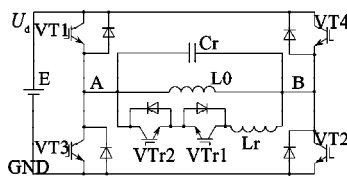


图2 四象限软开关斩波器

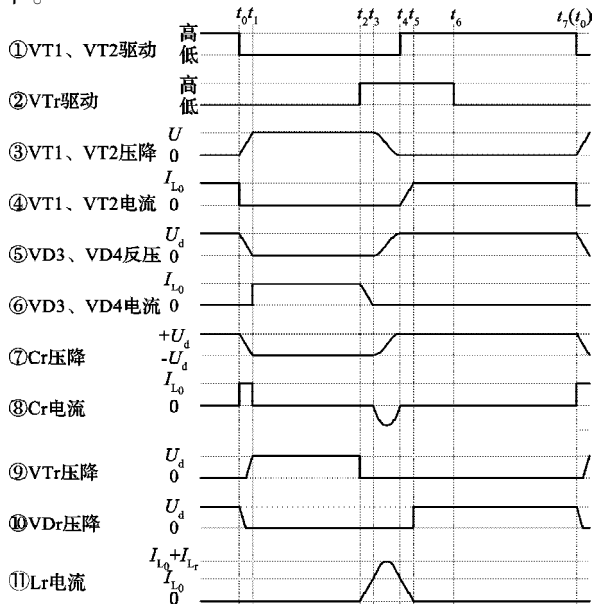


图3 软开关斩波器工作时序图

1) 主开关管关断(t_0)

在 t_0 时刻之前,VT1、VT2导通,VD3、VD4、VD_r、VT_r截止。Cr电压为 U_d ,L_r电流为0。电源经由VT1、VT2给负载 L_0 充电。

在 t_0 时刻,VT1、VT3关断。由于Cr电压为 U_d ,VT1、

VT3是零电压关断。

2) 主开关管与谐振电容换流(t_0)

当VT1、VT2关断时,其电流减小,Cr电流增大,负载 L_0 的电流由VT1、VT2支路转换到Cr支路,转换时间主要由VT1、VT3的电流下降率决定,可认为在 t_0 时刻瞬间完成。

3) 谐振电容供电阶段(t_0, t_1)

VT1、VT2关断后,负载 L_0 的电流流向电容Cr。Cr电压从 U_d 开始线性减小,一直减小到 $-U_d$ 。

4) 谐振电容与续流二极管换流(t_1)

当Cr电压达到 $-U_d$ 时,VD3、VD4导通,电流增加,Cr电流减小,负载 L_0 的电流由Cr支路转换到VD3、VD4支路,转换时间主要由VD2、VD4的电流上升率决定,可认为在 t_1 时刻瞬间完成。

5) 续流阶段(t_1, t_2)

期间,VD3、VD4导通,VT1、VT2、VT_r、VD_r截止,负载能量经续流支路回馈给电源。

6) 谐振开关管开通(t_2)

在 t_2 时刻,VT_r开通。由于L_r的作用,VT_r为零电流开通。VT_r开通之前电压为 U_d 。

7) 续流二极管与谐振电感换流(t_2, t_3)

VT_r开通后,L_r的电压为 U_d ,其电流线性增加,电流变化率为 $di_{L_r}/dt = U_d/L_r$,VD3、VD4电流线性减小,负载 L_0 的电流由D3、D4支路转换到L_r支路。在 t_3 时刻,L_r的电流上升到 I_{L_0} ,VD3、VD4电流减小到0,换流完成,VD3、VD4自然关断。

8) 谐振阶段(t_3, t_4)

在此阶段,VT1、VT2、VD3、VD4截止,VT_r、VD_r导通。在 t_3 时刻,Cr电压为 $-U_d$,电流为0;L_r电压为 U_d ,电流为 I_{L_0} 。之后,L_r电流 i_{L_r} 上升,Cr电压 u_{Cr} 的绝对值下降,开始谐振。谐振方程为(推导见后):

$$u_{Cr} = -U_d \cos(\omega_r t) \quad (1)$$

$$i_{L_r} = I_{L_0} + I_r \sin(\omega_r t) \quad (2)$$

其中: $\omega_r = \sqrt{1/(L_r C_r)}$, $Z_r = \sqrt{L_r/C_r}$, $I_r = U_d/Z_r$ 。

经半个周期后,在 t_4 时刻, $u_{Cr} = U_d$ 。Cr由反向充满状态转换为正向充满状态。期间, i_{L_r} 一直大于 I_{L_0} ,负载电流对谐振回路的影响,仅在于多出直流偏置量 I_{L_0} 。

在这半个周期中,负载上有部分能量参与了谐振。前1/4周期,负载上电压为负,向L_r传送能量;后1/4周期,负载上电压为正,L_r又把能量返给负载。参与谐振的总能量为 $L_r I_{L_0} I_r$,分析见后。

9) 主开关管开通(t_4)

在 t_4 时刻,VT1、VT2开通。由于此时Cr电压为 U_d ,所以VT1、VT2为零电压开通。此时L_r给负载提供的电流为 I_{L_0} ,所以VT1、VT3不需提供电流,所以还是零电流开通。

10) 谐振电感与主开关管换流(t_4, t_5)

VT1、VT2开通后,电源给Cr供电,Cr电压维持为 U_d