



高压大容量变频调速系统关键技术分析与研究

赵争鸣, 白华, 袁立强*

清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: ylq@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-03-26; 接受日期: 2008-06-05

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50737002)和国家自然科学基金项目(批准号: 50707015)资助

摘要 高压大容量变频调速系统是电力电子技术领域的重要研究方向之一, 也是当前我国节能减排的一项重要技术措施. 本文针对高压大容量变频调速系统研发中的一些关键科学技术问题进行分析 and 讨论, 如大容量开关器件应用特性、高压大功率变换器拓扑结构、变换器瞬态过程认识以及用于大容量变换器分析的基础理论方法等. 结合实际的高压大容量变频调速系统, 在系统安全工作区、脉冲优化管理、杂散参数的量化分析及其结构优化设计、系统主电路整体优化设计和多 CPU 协调控制等方面进行了详细分析, 给出相应的实验结果.

关键词

高压大容量变频器
安全工作区
脉冲及其序列

高压大容量变频调速技术在节能降耗中起到重要作用, 已经渗透到国民经济发展中的许多重大技术领域, 它与 DCS、PLC 等控制系统一起构成工业自动化的重大核心设备, 是电气传动与电力自动化产品中最具活力和发展潜力的一项高新技术.

在电力传动中, 通常将驱动 1 kV~10 kV, 300 kW 以上交流电动机的变频器统称为高压大容量变频器. 高压大容量变频器对我国工业发展意义重大. 据统计^[1], 我国 60% 左右的发电量是通过电动机消耗的, 其中 90% 的电机是交流电动机. 在交流电机中, 1 kV 以上的交流电动机, 用电量占电动机总用电量的 65%. 采用高压大容量变频器驱动这部分电机, 在节约能源, 提高控制性能, 解决环境污染等方面具有显著效果.

我国在“十一五”节能工程中, 已将“电机系统变频调速节能”列为重中之重^[2]. 然而, 我国变频调速装置的研发和生产能力仍然较弱, 使得目前我国变频调速系统在工业生产中的应用不到电动机总装机

容量的 15%. 这已成为我国节能减排计划得以完成的一个瓶颈, 也是国家重大急需之一.

高压三电平变频调速系统由于采用高压半导体功率开关器件, 具有所需器件少, 控制相对简单, 能量可双向流动, 体积小, 重量轻, 变频范围宽等优点, 呈现出广阔的应用前景^[3]. 过去十年来, 西门子和 ABB 等公司相继推出了中点箝位式的高压三电平变频器产品. 但由于高压三电平变频调速系统技术属于这些公司的核心技术, 一直对它国严格封锁, 致使我国难以引进和应用该项技术.

为加速我国自主研发高压大容量变频调速技术的步伐, 打破国外企业对该类技术的垄断, 清华大学与国电南自合作, 于 2003 年正式开始了高压三电平变频调速系统技术的研究工作. 2004 年成功研制出 1250 kW/6 kV 基于 IGBT 的高压三电平变频器样机, 2005 年 10 月正式在富拉尔基电厂现场使用, 2006 年制定了相关的企业标准, 2006 年 12 月通过了国家教育部和中国电力企业联合会组织的技术和产品鉴定,

2007 年相关产品全面推向市场. 截止到 2007 年 12 月, 已有十余家电厂, 钢厂和自来水厂安装使用, 对电机系统节能发挥了重要作用, 取得了显著的社会经济效益. 该成果的获得使我国具有自主知识产权的高压变频调速技术的发展向前推进了一大步^[4].

1 自主研发中需解决的科学问题

在开展该项目的研发时, 遇到了以下科技问题的挑战.

(1) 对进口大功率半导体开关器件性能缺乏了解.

大功率半导体开关器件是高压大容量变频调速系统的基础, 目前用于高压大容量变频调速系统中的半导体开关器件主要有绝缘栅极晶体管(IGBT), 普通晶闸管(SCR), 门极可关断的晶闸管(GTO), 大功率高压集成门极换流晶闸管(IGCT)以及电子注入增强型栅极晶体管(IEGT)等. 但是这些器件的容量及性能难以满足实际发展的需要^[5], 尤其在我国的, 采用常规的无串联方式, 无法达到 6 kV 和 10 kV 电压等级的需要. 器件本体研制不属于本研究范畴. 但即使针对已有规格的器件, 仍存在对这些器件的应用特性了解严重不足的问题, 尤其是对它们的失效机理不清楚, 以至于对电力电子装置的可靠性不能把握. 器件生产商给出的一些器件特性, 只能作为定性参考所用, 远远满足不了实际需要.

(2) 拓扑结构分析理想化.

由于电力电子器件水平的限制以及为了得到更好的输出特性, 国际大型跨国公司在高压大容量变频调速系统中通常采用不同的电路结构, 使得目前在用的适用于高压大容量变频调速系统的电力电子拓扑结构多种多样. 例如, 德国西门子和瑞典 ABB 公司采用二极管中点箝位式结构, 美国 ROBICON 等公司则采用 H 桥级联式多电平结构和美国罗克韦尔自动化(A-B)公司采用器件串联两电平结构等^[6]. 对这些不同类型的大容量电力电子变换拓扑而言, 其应用主要存在两个问题: 一是得不到开关器件过渡过程的任何信息, 致使换流回路只有器件“通态”和“断态”两种, 没有中间过程的拓扑电路; 二是没有给出连接件(导线与接插件等)的杂散参数, 只考虑元器件的集总参数.

事实上, 由于大功率电磁能量在高压大容量变

频调速系统换流过程中的快速变化, 开关器件的瞬态特性和杂散参数对装置运行影响极大. 如在 IGCT 关断时, 快恢复二极管的正向恢复特性和杂散电感会在 IGCT 两端产生电压尖峰, 从而带来电磁干扰, 波形畸变以及电应力增大等问题, 严重时将会导致器件损坏. 显然, 线路中的杂散参数不能忽略, 而一旦考虑杂散参数, 换流回路特性就与原来理想电路拓扑回路迥然不同. 因此, 不能不舍弃对大容量装置的拓扑结构理想化分析的传统方法.

(3) 缺乏对开关瞬态过程的认识.

目前大部分高压大容量变频调速系统中都采用类似 PWM 的调制方法以得到所需的输出特性. 常规 PWM 技术本质上就是从宏观上对变换过程进行调制, 一般将开关器件视为理想开关, 不考虑开关的瞬态过程. 事实上, 在高压大容量变频调速装置运行过程中, 与能量变换相随的开关瞬态过程是不容忽略的. 在常规 PWM 技术应用中, 数字计算误差控制延迟等带来的影响常成为高压大容量变频调速系统失效的主要原因^[7]. 然而, 由于对此认识不足, 以往从电磁脉冲的角度来分析电力电子器件, 拓扑, 控制策略的工作非常少, 这使得大容量电力电子系统这一关键问题的进展一直徘徊不前.

(4) 传统理论分析模型的失真.

高压大容量变频调速系统的本质是实施电磁能量的变换. 在变换过程中, 它必须遵循电磁能量守恒和能量不能突变的原则. 如上所述的高压大容量变频调速系统目前在电力电子领域中主要采用常规电路原理法进行分析, 对器件和线路连接等有些采用理想元件模型, 有些采用近似“实际”器件物理模型, 前者只能进行定性分析计算, 后者则难以考虑一些非线性因素, 如器件内部和连线中的分布电感、电容和电阻随频率和温度的变化而发生的变化等.

另外, 高压大容量变频调速系统是多时间常数系统, 尤其具有纳秒级时间尺度的瞬态过程是实现电磁能量变换的关键环节. 原来采用集总参数, 有效值等来计算功率已不能反映实际情况, 必须采用非线性和分布参数模型, 以便更精确地计算出脉冲功率的瞬变过程^[8,9].

综上所述, 高压大容量变频调速系统与小容量低压系统有很大的不同, 很多在小容量系统中并不

突出的问题被凸现出来,如基于开关器件的安全工作区,瞬态换流回路,线路中杂散参数,脉冲瞬态过程, di/dt 和 dv/dt 的影响,开关损耗以及散热冷却等.这些问题经常使得器件和装置突然失效,它们是目
前大容量变换器研制和应用中亟待解决的问题.

2 若干关键技术问题分析

高压大容量变频器涉及的关键技术很多,本文就几个主要的 key 问题进行分析.

(1) 基于功率开关器件的系统安全工作区的有效设置.

要提高高压大容量变频调速装置的可靠性,需要特别关注半导体开关器件的特性,同时研究器件的应用特性与高压大容量变频调速系统中其它元素之间的关系,由此来设计和优化装置的拓扑,结构和控制策略等.通常器件应用手册中关于器件各类电特性的约束往往是基于特定的单管测试电路,其中某些关键参数(如杂散电感)在实际应用中由于结构设计的问题,很难保证与测试电路完全一致.而且,实际电路拓扑与半导体测试电路差异较大,往往涉及到多个开关管之间的相互作用和相互联系.同时,运行工况,负载特性以及器件参数的差异,使得性能优良的器件运行在特定装置中时并不一定会提升装置的可靠性,即通常意义下单个开关器件的安全工作区(以下简称SOA)并不总是适用于整个装置,甚至在实际应用中要作较大的修正^[10].

为此,特提出变频调速系统全运行范围安全工作区定义,即从系统安全运行的角度,突破原来的器件安全工作区的概念,如图1所示,其中浅灰色为器件安全工作区,深灰色为系统安全工作区.该定义以开关器件的安全工作区为基础,给出器件安全运行与系统安全运行的量化关系.它包括三方面的内容:静态全保护,即对系统中器件静态电压和电流的限制;动态全保护,即对器件电压和电流变化率的限制;驱动全保护,即对门极驱动信号的限制.

器件安全工作区主要以器件最大可承受的断态电压,最大可承受的重复开关电流以及最大可承受的结温升作为运行边界来形成其安全工作区.而器件在系统中,受线路杂散参数,器件开关频率,系统保护参数和系统暂态过程等诸多因素的影响,

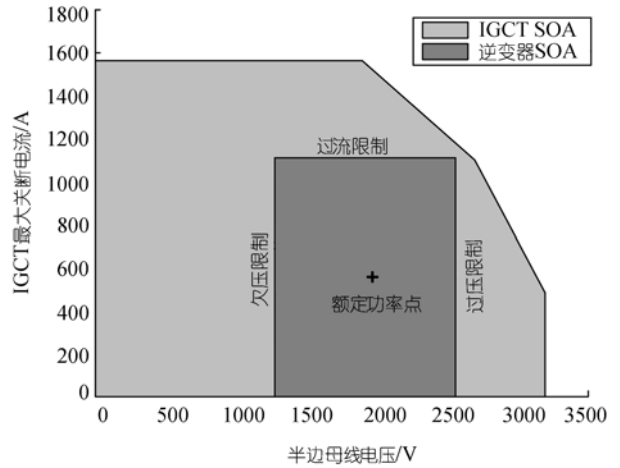


图1 全运行范围安全工作区定义

使得原来器件的安全工作区的边界发生改变.因而,直接采用变频调速系统的额定工作点,控制方式,保护措施,结构杂散参数要求以及损耗和系统效率等指标求出器件与系统之间安全运行区的量化关系,从而形成系统全运行安全工作区.

根据系统全运行范围安全工作区的定义,可直接使用器件最大可承受电压,器件最大承受可重复开关电流,母排杂散参数,系统最大温升以及器件电应力等多项参数对系统安全运行区域进行优化,优化示意图如图2所示,其中浅灰色为器件安全区,深灰色为系统安全区,星点为额定运行点.优化的结果既能充分发挥器件的全部能力,又能保证器件与系

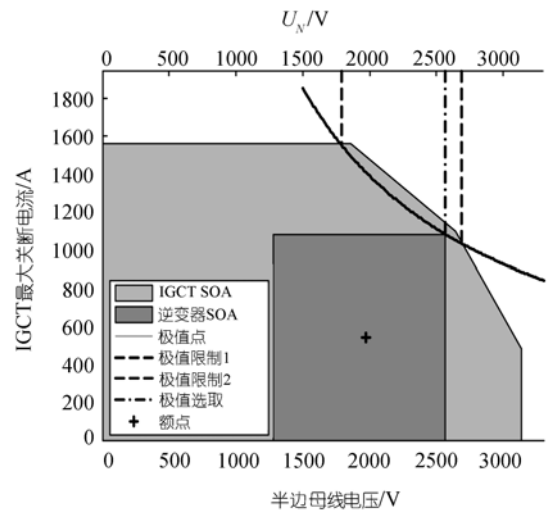


图2 全运行范围安全工作区优化

统的安全运行,从而大大提高了装置的可靠性,解决了长期以来困扰大容量电力电子应用技术中的器件容量极限应用与系统安全可靠运行之间的矛盾.

(2) 基于瞬态过程分析的脉冲优化管理技术.

信号脉冲与功率脉冲是实施交流变频调速的基础. 基于对驱动及主电路中的脉冲和脉冲序列的瞬态过程进行分析,对系统中换流过程的动态过程进行定量研究,掌握死区,单管最小脉宽,相间最小脉宽等对换流过程的影响,进而提出对脉冲优化管理的方法,包括安全封脉冲,预励磁技术,死区,最小脉宽等. 特别针对单个开关器件动作时间过短而使单个器件承受全边直流母线电压现象提出了安全封脉冲的方法,解决了器件参数离散性与控制脉冲时间同步性之间的矛盾.

脉冲优化的基本原理是根据不同的电压/频率调制比,把整个空间电压矢量区域按调制比分成几个环形区域,针对脉宽调制在这几个区域的特点和不同程度的影响,分别采用调整脉冲序列作用顺序,减小开关频率,非最近矢量合成等不同的方法,增加受脉宽影响的矢量的作用时间,达到减小最小脉宽影响,抑制异常脉冲及其减小死区影响的目的,原理如图 3 和表 1 所示,其中 T_s 为开关周期, M 为调制比.

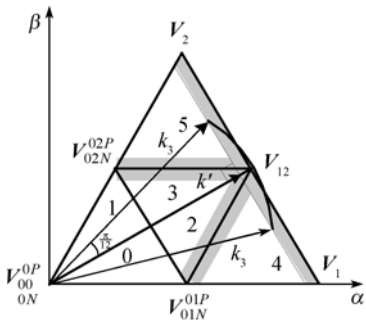


图 3 按不同调制比减小最小脉宽影响的第一扇区示意图

表 1 按不同调制比减小最小脉宽影响的解决方案

调制比区间	解决方案	相关参数
$k < k_0$	回避	$k_0 = 2M_1 / T_s$
$k_0 \leq k < k_1$	改进的矢量类型转换法	$k_1 = 2M_2 / T_s$
$k_1 \leq k < 0.5$	正常	
$0.5 \leq k < k_2$	回避	$k_1 = \frac{M_2}{T_s} + 0.5$
$k_2 \leq k < 1 - k_1$	正常	
$1 - k_1 \leq k < k_3$	同步调制法	$k_3 = 1.035 \times \left[1 - \frac{M_1}{T_s} \right]$
$k > k_3$	回避	

实际应用结果表明^[10]: 加强了对驱动脉冲和功率脉冲的最优控制,抑制了异常脉冲,减小了谐波分量,提高了输出电压电流的正弦度. 空载输出电压的总谐波畸变率(THD)大大降低. 同时,曾经在封脉冲时引起的单管承受全部母排电压致使开关器件过压击穿的现象再也没有发生过.

(3) 杂散参数的量化分析及其结构优化设计.

由于高频效应,系统中的分布参数影响非常突出,严重时损坏整个系统. 为此需要获得大尺寸母排等连线上的杂散参数,建立变频器系统瞬态分析模型,为瞬态换流研究提供有效的工具. 同时,研究杂散电感对变换器瞬态换流特性的影响,进而提出杂散参数对瞬态换流特性影响的评估方法和杂散电感的设计原则,提出基于IGCT的三电平变换器低感和低影响母排的布局设计和分配设计方法^[11].

高压大容量变频系统中的各种连线母排和元器件上都存在各种不同数值大小的分布参数,这些参数决定了器件和系统的电磁瞬态过程,尤其对电应力(dv/dt 和 di/dt)影响很大. 定量提取杂散参数值是一大难点,为此分别采用部分等效电路法和有限元法计算和提取线路中的分布电感和电容数值,然后用其建立模型定量分析它们对器件和系统的影响,据此反过来对主电路结构进行评价,进而提出优化结构. 图 4 为该方法的实施原理及其过程: 从实际的结构演化为三维模型,提出参数进而转化为系统瞬态电路模型.

杂散参数在高压大容量变频器的瞬态换流过程中具有重要的影响. 严重时直接损坏器件及其装置. 采用该技术对基于IGCT的高压大容量三电平变频调速系统母排结构和缓冲电路参数进行了优化,使器件上的浪涌电流减小了 50%,同时相间换流动态过程的时间减小了约 30%^[11].

(4) 输出少谐波的混合调制.

高压变频器由于变换功率大,开关频率一般比较小,因而输出谐波比较大. 采用常规的正弦 PWM (SPWM)和空间矢量 PWM(SVPWM)都难以解决输出谐波大的问题. 特定消谐 PWM(SHEPWM)属于优化 PWM,通过优化开关时刻,可以用较少的开关次数得到较好的谐波特性^[12]. 其主要优点是: 在同样的

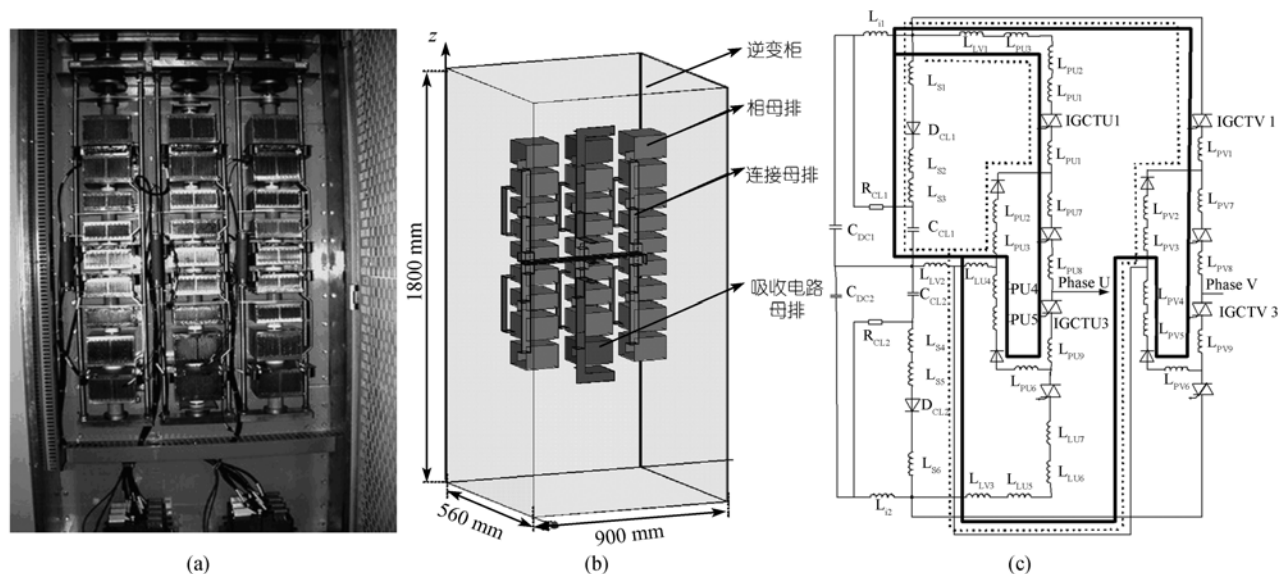


图4 分布参数提取及其瞬态电路模型
(a) 实际结构; (b) 三维模型; (c) 电路模型

开关次数下, 输出波形质量高, 转矩和电流脉动小; 降低了对滤波器的要求, 可以减小滤波器体积; 在同样的波形质量下, 开关次数低, 损耗小, 尤其适合采用 GTO 和 IGCT 等对开关频率有限制的高压大功率场合; 直流母线电压利用率高. 缺点是开关角度固定, 需要离线计算, 难以在线实现, 控制不够灵活, 尤其是低频时由于开关角度较多, 对存储量要求较高.

采用混合PWM方法,即低频时采用异步SVPWM,高频时采用SHEPWM,可以避免高频时SVPWM谐波特性变差和SHEPWM在低频时存储量大的缺点,充分发挥了二者的优点,使变频器在整个工作范围内都可以有效抑制低次谐波,得到较好的输出波形.实现的难点在于衔接问题,需要确保二者间的平滑过渡以保证混合调制的适用性.为了解决这个问题,采用固定角度切换的方法.假定切换时刻的运行频率为45 Hz,对于SVPWM,开关频率为600 Hz,在参考矢量频率为45 Hz时,在一个周期内参考矢量在360°空间内采样 $600/45=13.33$ 次,其中必定有一次落入0~28°区间,仅当参考矢量落入这个区间内时才由SVPWM切换至SHEPWM.而从SHEPWM切换至SVPWM时,也仅当相位落入某一固定角度区间时才切换至SVPWM.由于切换位置固定,其现象和行为是可重复的,在理

论分析的基础上,通过实验对其进行微调,可以得到满意的结果.试验结果如图 5 所示^[13].

(5) 集成式滤波升压系统设计.

高压大容量变频调速系统的可靠应用目前更多的受限于半导体器件的制作和组装工艺。如一实际系统的高压三电平NPC变频器中采用IGCT器件的耐压等级为4500 V, 这样的结构最大输出线电压只能为3300 V。

除了输出升压至 6000 V是一个难题外,由于开关频率低,系统输出的电压,电流波形中存在着大量的谐波成分也是一个主要问题. 这些谐波成分引入电机会带来严重的热效应;同时, PWM波形中较陡的上升(下降)沿带来了较大的 dv/dt ,将直接威胁到电机绝缘,并通过线路中的耦合电容产生轴电流和电磁干扰,电压等级越高越严重. 因此,需要引入滤波装置加以滤波,常见的如RLC滤波器^[14].

如何将 3300 V/1250 kW 交流变频调速系统直接应用于 6000 V 系统,除了有效升压外,还要尽量平滑输出电压波形,减小电压 THD. 为此采用升压变压器,并利用其原副边等效漏电感作为滤波电感的新型结构,通过在大、小容量样机中的试验对比验证了此种设计方案的有效性.其关键技术在于: (a) 原、副边等效电感的最优选择,一方面保证原副边电压比值不能

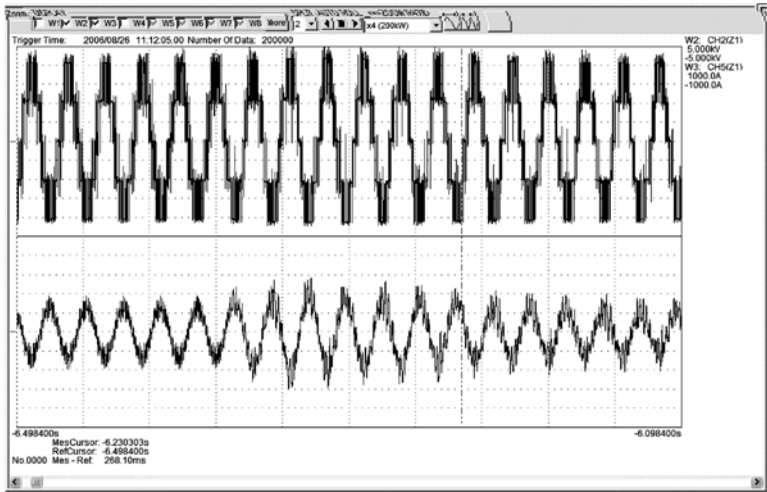


图 5 SHEPWM 和 SVPWM 在 45 Hz 切换时的逆变器输出电压和电流

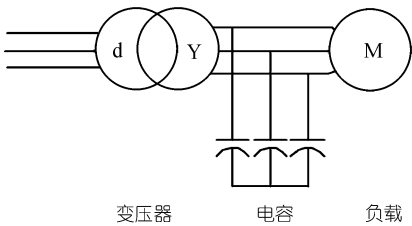


图 6 高压大容量中的滤波升压装置

太小(>0.5), 同时又得考虑其值与滤波电容的匹配; (b) 电机启动特性与该升压变压器参数有紧密关系, 采用预励磁技术要与该变压器磁化曲线相匹配; (c) 电机在甩负荷情况下会产生自激过程, 变压器诸参数起重要作用. 原理结构如图 6 所示. 输出谐波大大减小^[14], 如图 7 所示.

(6) 基于杂散参数计算的最小脉宽设计.

最小脉宽是指为保证开关器件完全安全开通和关断工作而设置的门极控制信号的最小脉宽时间. 最小脉宽除受开关器件本身最高工作频率限制外, 还与外部电路工作状态如吸收电路和均压电路等有关. 通常文献中所说的最小脉宽仅指单管最小脉宽, 包括通态最小脉宽(t_{ONMIN})和断态最小脉宽(t_{OFFMIN})^[15]. 在实际系统中, 由于采用了三相逆变桥臂共用一套吸收电路, 则在两个相邻桥臂的换流过程之间也必须引入相间最小脉宽(t_{MIN}), 以保证在每相桥臂换流之前所共用的吸收电路处于稳定状态. 因此, 最小脉宽的设置是器件和装置安全可靠运行的关键之一. 由于开关过程中影响最大的是换流回路的过渡过程, 其又由回路杂散参数决定. 因此, 最小脉宽的设计必须基于回路的杂散参数计算. 图 8 即为 IGCT 开关过程中的电压电流试验波形. 一般都需要根据大量的

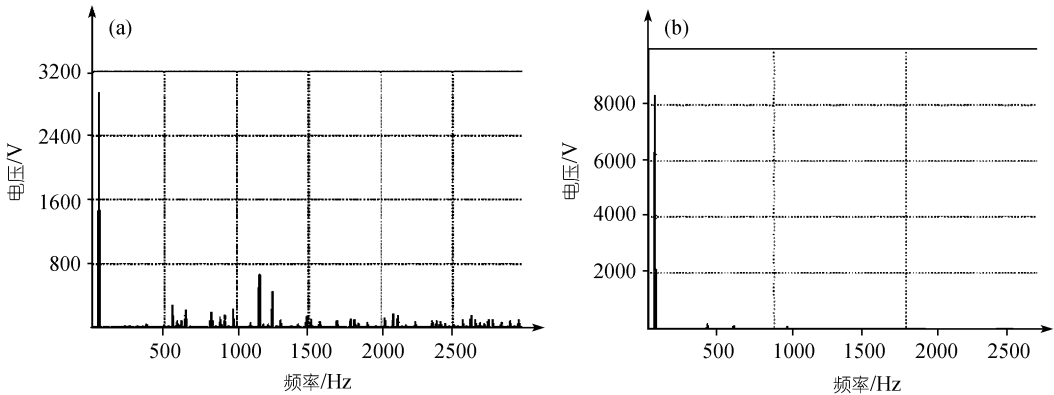


图 7 高压大容量 LC 滤波效果仿真评估

(a) 滤波前线电压频谱; (b) 滤波后线电压频谱

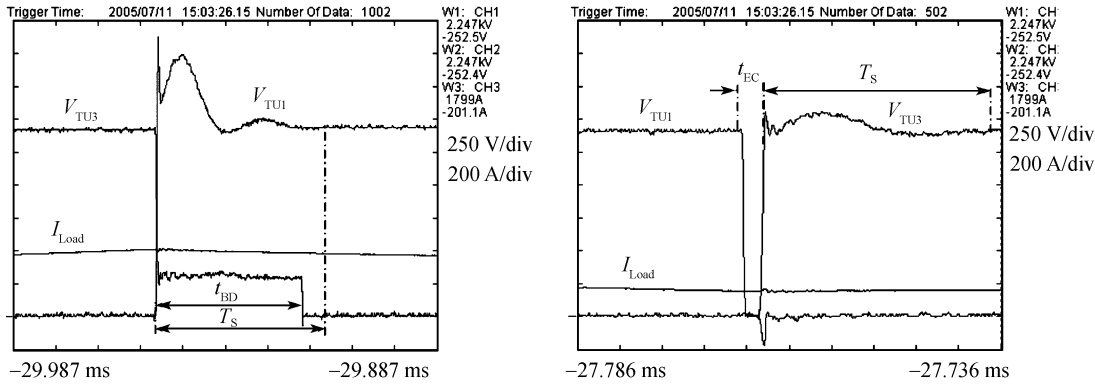


图 8 IGCT 电压和负载电流实测波形
(a) IGCT 关断时波形; (b) IGCT 开通时波形

试验波形来确定最小脉宽的设置。

(7) 基于多重校验的高可靠性 CAN 总线光纤通讯的多 CPU 协调控制。

由于高压变频调速系统外围设备较多, 输入输出关系复杂, 且自身保护和功能较多, 因而其控制系统也比较复杂。实际系统中, 它们由分工不同的子系统单元组成, 如由多个控制版(主控板, I/O 板, 手控盘, AD 板等)构成的多 CPU 系统。各单元之间的通信通过 CAN 总线完成, CAN 总线集中分布在主控制单元附近。除了主控制单元之外, 其余各单元的 CAN 控制器与 CAN 收发器之间均采用光纤作为通信介质。实际应用中, 通讯的实时性和可靠性成为关键问题之一。

可编制快速发送流程, 以使中断程序在最短的时间内启动发送, 保证了保护动作信号通信的实时性; 编制的发送流程还考虑了对上层程序配置的邮箱数据域的保护和恢复, 对于发送失败的情况进行重新发送, 保证了程序逻辑的严密性及通信的可靠

性。优化后的通信系统在长时间运行中稳定可靠, 保护信号传送快速及时。系统运行时 CAN 总线上的波形如图 9 所示。

从图 9(a)中可看到数据采集单元定时发送给主控制单元包含电压电流采样值的数据帧, 图中较密集处还可看到 IO 单元不定时发送的数据帧及主控制单元返回的数据帧。从图 9(b)中可观察到, 保护动作时 CAN 总线通信比较频繁, 保护时的外围继电器动作对 CAN 总线造成了明显的干扰, 但 CAN 通信还能正常进行。

3 结论

(1) 高压大容量变频器的基础是高压大容量开关器件, 一代器件决定一代技术。以器件特性为基础, 以装置应用为牵引, 从原理, 仿真, 单件试验以及系统试验仔细地研究开关器件应用特性, 是研制高压大容量变频器的有效途径。

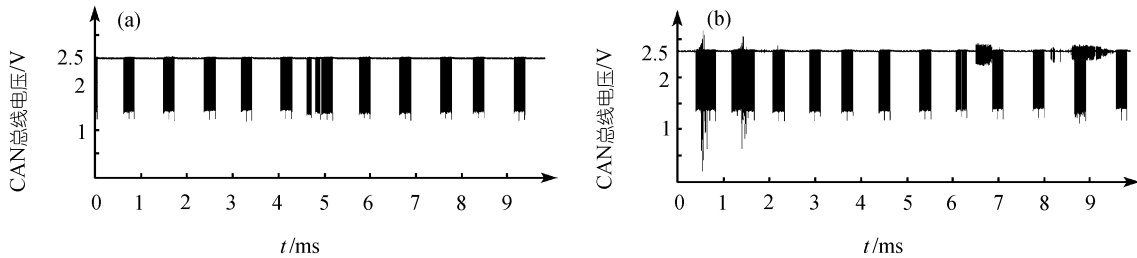


图 9 CAN 总线电压波形
(a) 正常工作时; (b) 保护动作时

(2) 在高压大容量或超大容量电力电子变换装置中, 由于能量变换特征更是明显, 必须对开关过渡过程, 分布参数, 信号及功率延时等特性有清楚的了解^[16].

(3) 将系统可靠性和适应性问题作为研究目标, 并且主要关键技术都是从可靠性的研究中获得是解决适用的高压大容量变频器的关键所在, 也是实施

高压大容量变频调速系统国产化的关键所在.

(4) 高压大容量变频调速系统是实施有效节能的重要装备, 是国家当前社会经济发展的急需. 它对国民经济影响大, 节能减排效果非常明显, 加速发展我国具有自主知识产权的高压大容量变频调速系统刻不容缓.

参考文献

- 1 王正元, 赵争鸣, 李崇坚, 等. 中国电机系统能源效率与市场潜力分析. 北京: 机械工业出版社, 2001
- 2 赵争鸣, 李崇坚. “十一五”国家十大重点节能工程之一——电机系统节能. 电气应用, 2006, (10): 16—20
- 3 Tolbert L M, Fang Z P, Habetler T G. Multilevel converters for large electric drives. IEEE T Ind Appl, 1999, 35(1): 36—44
- 4 赵争鸣, 白华, 袁立强. 1250 kW 高压三电平变频器的研制及其应用. 变频器世界, 2006, (2): 6—10
- 5 王正元. 世纪更迭中的电力电子器件. 电工技术学报, 1999, (14): 22—28
- 6 Kuhn H, Schroder D. A new validated physically based IGCT model for circuit simulation of snubberless and series operation. IEEE T Ind Appl, 2002, 38(6): 1606—1612
- 7 赵争鸣, 张海涛, 袁立强, 等. 基于 IGCT 的高压三电平变频器失效机理及保护策略. 电工技术学报, 2006, 21(5): 1—6
- 8 Ferreira J A, van Wyk J D. Electromagnetic energy propagation in power electronic converters toward future electromagnetic integration. Proc IEEE, 2001, 86(6): 876—889 [\[DOI\]](#)
- 9 Cronje W A, van Wyk J D, Campbell C K, et al. Power electronic interconnects: Skin- and proximity-effect-based frequency selective multi-path propagation. IEEE T Power Electr, 2005, 20(3): 600—610
- 10 张海涛. 基于 IGCT 的三电平变频器的控制系统研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2006
- 11 易荣. 基于 IGCT 的变换器主回路杂散参数及瞬态换流研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2007
- 12 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11—15
- 13 张永昌, 赵争鸣. 基于快速空间矢量调制算法的多电平逆变器电容电压平衡问题研究. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 71—76
- 14 白华. 电力电子变换器中电磁脉冲功率瞬态过程研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2007
- 15 Lee Y H, Suh B S, Hyun D S. A novel PWM scheme for a three-level voltage source inverter with GTO thyristors. IEEE T Ind Appl, 1996, 32(2): 260—268
- 16 赵争鸣, 白华, 袁立强. 电力电子学中的脉冲功率瞬态过程及其序列. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(1): 60—69