

基于IGCT的中压制动单元设计

孙传杰,田凯,许纹源,卢贝贝,李楠

(天津电气科学研究院有限公司,天津 300180)

摘要:针对变频器在工业场景中的不同应用,特别是无回馈功能的中压变频系统,设计了一种基于IGCT的制动单元。采用IGCT作为主要功率器件,对IGCT的参数和特性进行了分析。结合目前市场中常见的NPC型中压变频器拓扑,设计了相匹配的制动单元电路,并对系统的工作原理进行了描述。在器件损耗方面,评估了功率器件的结温,设计了散热水冷回路和压装结构。为了不影响直流母线电压的中点平衡,设计了独立的直流母线电压软件控制方法。最后,所设计的中压制动单元已经在工业现场应用于轧制金属复合材料的场合,证实了设计方案的可行性。

关键词:集成门极换流晶闸管IGCT;制动单元;吸收回路;三电平NPC变频器;热损耗

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26071

Design of Medium Voltage Brake Unit Based on IGCT

SUN Chuanjie, TIAN Kai, XU Wen Yuan, LU Beibei, LI Nan

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

Abstract: A brake unit based on IGCT was designed for different applications of frequency converter in industrial scenes, especially the medium voltage frequency conversion system without feedback function. IGCT was used as the main power device, and the parameters and characteristics of IGCT was analyzed. According to the common topology of NPC medium voltage inverter in the market, the matching circuit of brake unit was designed, and the working principle of the system was described. In terms of device loss, the junction temperature of the power device was evaluated, and the water cooling circuit and the press assembly structure were designed. In order not to affect the midpoint balance of the DC bus voltage, an independent software control method was designed. Finally, the medium voltage brake unit designed has been applied to the occasion of rolling metal composite material in the industrial field, which confirmed the feasibility of the design scheme.

Key words: integrated gate-commutated thyristor (IGCT); brake unit; absorbing circuit; three-level NPC inverter; thermal loss

在工业应用中,变频器广泛应用于冶金、矿产等各个领域的电机控制,对于频繁启动、频繁制动或快速制动的系统,需要配置相应的制动单元^[1-2]。在系统无回馈功能的情况下,电机工作在减速或下放重物时,处于再生发电状态,若不配置制动单元,将导致直流母线电压升高,进而可能造成器件的击穿损坏等问题。针对上述应用场景,各类变频产品需要配置制动单元来消耗电机制动产生的能量,防止系统过电压,维持变频器直流母线电压稳定,提高产品可靠性和稳定性^[3-4]。

对于低压变频器来说,基于IGBT的制动单元即可满足设计要求。但对于中压变频器来说,IGBT在耐压等级和电流等级方面受到一定的限制,文献[5]描述了一种用于中压变频器的制动单元,但是目前市场中单只IGBT的最大电流依旧有限,远小于IGCT可承受的通态电流,并且需要多只IGBT进行串联来达到耐压要求,电路相对比较复杂。

基于IGCT的变流器及制动单元设计,国内品牌起步较晚,在IGCT特性分析和应用方面缺少指导。文献[6-7]对IGCT的个别特性进行了解

基金项目:天津电气院科研开发创新基金(YF2024ZL002)

作者简介:孙传杰(1988—),男,硕士,高级工程师,Email:sun_c_j@126.com

析或对 IGCT 驱动本体进行了分析,但对整体的应用解析并不全面,没有做到理论计算与应用相结合。国外某品牌开发了一种 IGCT 作为功率器件的制动单元,配置了 RC 吸收回路,在中小功率电路中 RC 回路的吸收效果往往较好,但是在大功率电路中 RC 吸收回路对功率器件过电压的抑制有限,并且运行损耗较大。

文献[8]提到油改电项目利用 AFE 回馈电网,但在能量回馈不频繁的场所,利用大功率制动单元的方式,可以节约 50% 以上的成本,如能提供可行的制动单元方案,可为用户降低设备成本的投入。根据考察,国内风力齿轮箱试验平台、汽轮机试验平台、城轨系统中,均为中压变频器配置了制动单元^[9-10]。

针对中压 NPC 型三电平变频器,本文采用 IGCT 作为主要开关器件,从电压、电流、阻断特性、开通和关断特性以及热特性等方面分析了 IGCT 的主要参数和特性,从变频器的制动原理出发,设计了一种满足中压三电平变频器实现能耗制动的制动单元,可以满足更高的耐压要求和更大的制动功率,配置了合理的 RCD 吸收回路、水冷散热回路以及控制方法,保证装置的可靠运行。经过出厂测试,证实了本文设计的基于 IGCT 的中压制动单元的有效性。

1 NPC 中压变频器

基于 IGCT 的大功率中压变频器单机功率可以达到十几 MW,通过并联可以达到几十 MW^[11]。

NPC 型三电平电路如图 1 所示,当上桥臂的开关管导通时,输出电压为正状态,当中间两只开关管导通时,输出电压为零状态,当下桥臂的开关管导通时,输出网侧电压为负状态,从而形成三电平电压输出。由于负载是非纯阻性负载,

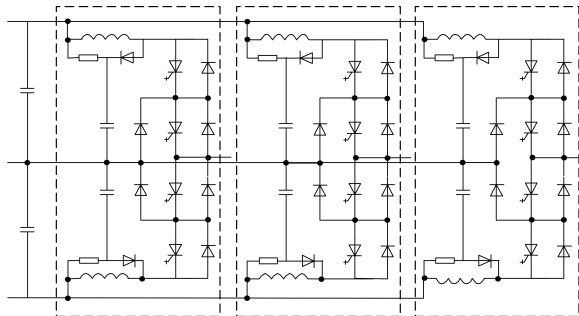


图 1 NPC 型三电平电路

Fig.1 NPC three-level circuit

所以电流回路与电压回路并不相同,尤其当变频器能量回馈时,电流会通过 IGCT 反并联二极管流向直流侧。后文中将结合制动单元的连接进行制动原理分析。

2 IGCT 参数与特性

集成门极换流晶闸管 IGCT 主要可以分为逆导型 RC-IGCT、反向阻断型 RB-IGCT 和非对称型 AS-IGCT,其结合了 IGBT 和 GTO 的优点,具有容量大、开关速度快、通态损耗低、稳定性强以及集成门极等诸多特点,广泛应用于中高压变频器产品^[12-13]。

2.1 阻断特性

IGCT 的门极在通电的情况下,其本体具备正向阻断能力,主要体现参数为最大重复电压 V_{DRM} 、漏电流 I_{DRM} ,当器件承受电压超过该值,会造成漏电流增加、功率损耗增加,最终导致热失控和阻断性下降而使器件损坏。

2.2 开通与关断特性

开通特性:IGCT 由正向阻断状态转换为开通状态的过程,称为开通过程。开通过程中器件通过的电流变化率 di/dt 要保证在最大允许的电流变化率之内。另外,开通过程中,IGCT 会消耗开通能量 E_{on} ,从而产生功率损耗 P_{on} ,在一个开关周期 T_s 内,其关系表达式为

$$P_{on} = E_{on}/T_s \quad (1)$$

器件在通态状态下产生通态损耗,计算公式为

$$P_T = V_{(TO)} \cdot I_T + r_T \cdot I_T^2 \quad (2)$$

式中: P_T 为 IGCT 通态功率; $V_{(TO)}$ 为 IGCT 通态压降; I_T 为流过 IGCT 的通态电流; r_T 为 IGCT 通态电阻。

关断特性:IGCT 由通态状态转换为正向阻断状态的过程,称为关断过程。当 IGCT 器件处于关断过程时,为避免 IGCT 过电压造成器件雪崩击穿,需要配置吸收回路。另外,关断过程中,IGCT 会消耗关断能量 E_{off} ,从而产生功率损耗 P_{off} ,在一个开关周期 T_s 内,其关系表达式为

$$P_{off} = E_{off}/T_s \quad (3)$$

2.3 门极驱动

在工程应用中,IGCT 器件利用光纤信号直接驱动;并且需要符合门极电压范围要求的高频脉冲电源供电;在驱动信号给定时,确保接通时间和关断时间分别大于其最小接通时间和最小关断时间。

2.4 热特性

IGCT在运行过程中,管芯结点温度不得超过手册中的最大结点温度,并保持一定的温度裕量。管芯结点到器件外壳的瞬态热阻抗的解析函数如下式所示:

$$R_{th(j-e)} = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (4)$$

式中: $R_{th(j-e)}$ 为管芯结点与器件外壳之间的瞬态热阻抗,该热阻抗模拟了恒定功率使结温上升随时间的关系; n 为解析函数中取点的个数; R_i 为不同时间常数下对应的阻抗值,由器件手册提供; t 为器件开关周期; τ_i 为时间常数,由器件手册提供。

2.5 机械特性

机械特性是保障IGCT热稳定的前提,IGCT器件必须组装在标准安装压力下的平整结构中,例如压装压力范围42~46 kN,并使得压力均匀地作用于器件,并且散热器的表面平整度和粗糙度不得高于IGCT器件的表面质量。

2.6 快恢复二极管特性

快恢复二极管的应用过程中,也需要注意电流变化率 di/dt 、功率损耗、热特性和机械特性等参数,不再赘述。

3 制动单元的分析与设计

图2中给出了三种不同的制动单元设计方案,图2a中的IGCT配置了RC吸收回路,图2b和图2c中的IGCT则配置了RCD吸收回路。本方案所设计的制动单元电路图见图2c。RC吸收回路虽然能在一定程度上降低IGCT的损耗,但其自身的损耗非常大,导致系统的总损耗显著增加。而RCD吸收回路对系统总损耗的增加没有明显影响,并且显著降低了IGCT的损耗,从而提高了系统的带载能力。

对比图2b和图2c的两种制动单元电路,可

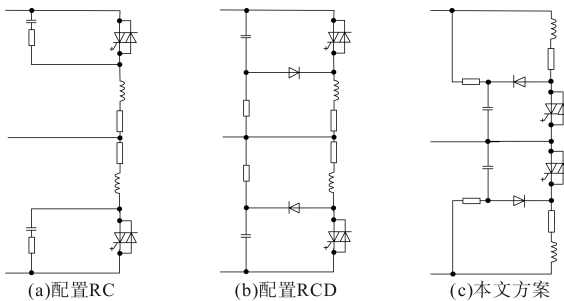


图2 制动单元电路图

Fig.2 Brake unit circuit

以发现,图2b中的IGCT分别紧邻系统的正、负直流母线,图2c中的IGCT集中紧邻零直流母线。当对功率器件进行压装时,图2b的电路拓扑要求制动单元的上下两组回路分别压装,图2c的电路拓扑可以使制动单元的上下两组回路共用一个中间散热器。因此,图2c的制动单元压装结构比图2b更加节省散热器和绝缘件,减少了成本,同时也减小了制动单元的体积。

3.1 制动单元工作原理

将NPC中压变频器的直流回路分为互相独立的上、下两组,结合NPC中压变频器的半组相模块回路进行分析,制动单元回路与NPC三电平变频器的连接关系如图3所示。

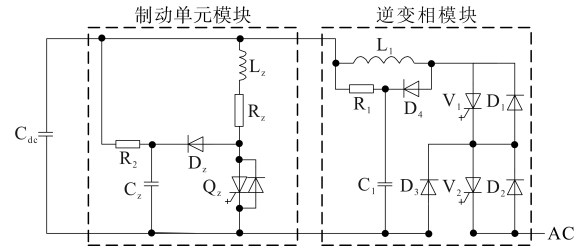


图3 制动单元与相模块的连接关系

Fig.3 Connection relationship between brake unit and phase module

图3中, C_{dc} 为直流母线电容, R_z 为制动单元吸收电阻, C_z 为制动单元吸收电容, D_z 为制动单元吸收二极管, Q_z 为制动单元IGCT, R_z 为制动电阻, L_z 为制动电阻连接回路杂散电感, L_1 为缓冲电感, R_1 为相模块的吸收电阻, C_1 为相模块吸收电容, D_4 为相模块吸收二极管, D_3 为钳位二极管, V_1 , V_2 和 D_1 , D_2 分别为IGCT及其反并联二极管。

当系统稳定时,制动单元的IGCT承受直流母线电压,等于制动单元吸收电容两端电压。

当系统制动时,制动电流依次通过 D_z , D_1 , L_1 ,流向直流侧,当制动单元中的IGCT正向导通时,压降约等于零,此时通过制动电阻消耗系统回馈的能量,应满足制动单元中IGCT的电流变化率。在系统制动过程中,当 Q_z 关断时,因为续流的作用使得 D_z 导通,制动单元吸收电容 C_z 的电压将升高,使 Q_z 两端的电压出现过电压,表达式为

$$\begin{aligned} V_z &= V_{DC} + L_{Lz} \frac{dI_{Lz}}{dt} - R_{Rz} \cdot I_{Lz} \\ &= V_{Cz} + V_{Dz} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: V_z 为IGCT两端电压; V_{DC} 为直流母线电压; L_{Lz} 为杂散电感; I_{Lz} 为制动电流; R_{Rz} 为制动电阻; V_{Cz} 为吸收电容两端电压; V_{Dz} 为吸收二极管两端

电压。

当制动单元吸收二极管 D_z 开始承受反压而开始关断后,吸收电容 C_z 的能量通过制动单元吸收电阻 R_z 释放, Q_z 和 C_z 两端的电压逐渐恢复到直流母线电压值。

在缓冲吸收回路参数方面,目前行业内并没有准确的参数计算公式,本文选用的 RCD 吸收回路由图 3 中的 R_z 、 C_z 及 D_z 组成,在工程应用和选型上多采用仿真进行参数确定。主流的方法为先选定缓冲电感值 L ,然后以此为设计起点,参考技术手册中过电压测试的参数 C 和 R ,组成首套缓冲回路参数,对 C 和 R 进行综合调整,原则如下:

- 1) IGCT 过电压不能超过器件最大耐压值,降低电压尖峰的方式,可以采用减小 R 或增大 C 。
- 2) 可通过增加 R ,确保钳位二极管在一个开关周期内关断后不会二次开通。
- 3) 可通过减小 C ,确保在 IGCT 下一次开通前,钳位二极管已经关断,钳位电容已经恢复到静态值。

3.2 制动单元损耗的分析

IGCT 的开通损耗计算式(1)和关断损耗计算式(3)属于典型公式,其中的开通能量和关断能量是基于手册中特性测试条件下的典型值,实际应用时,需要根据选型器件的实际运行条件和手册中特性测试条件进行修正,IGCT 的开通和关断损耗与直流母线电压 V_{DC} 、负载电流 I_T 有关,修正后的 IGCT 开通和关断损耗的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{on_re} = \frac{V_{DC}}{V_{DC_N}} \cdot \frac{I_T}{I_{T_N}} \cdot E_{on}/T_s \\ P_{off_re} = \frac{V_{DC}}{V_{DC_N}} \cdot \frac{I_T}{I_{T_N}} \cdot E_{off}/T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{on_re} 、 P_{off_re} 分别为修正后的开通和关断损耗; V_{DC_N} 、 I_{T_N} 分别为直流电压和负载电流的修正基准值。

综上分析,IGCT 的总损耗 P_{IGCT} 包括导通损耗、通态损耗和关断损耗,如下式所示:

$$P_{IGCT} = P_{on_re} + P_T + P_{off_re} \quad (7)$$

二极管的开关损耗主要指关断过程中的反向恢复损耗。与 IGCT 相似,实际应用时,需要根据选型器件的特性进行公式修正。二极管的关断损耗受二极管关断电流变化率、二极管关断电流以及直流母线电压的影响,修正后的二极管关断损耗公式如下式所示:

$$P_{Doff_re} = \frac{di/dt_{dio}}{di/dt_N} \cdot \frac{V_{DC}}{V_{DC_N}} \cdot \frac{I_F}{I_{F_N}} \cdot E_{Doff}/T_s \quad (8)$$

式中: P_{Doff_re} 为二极管关断损耗; di/dt_{dio} 为二极管关断电流变化速率; I_F 为二极管关断电流; di/dt_N 、 I_{F_N} 分别为二极管关断电流变化率和关断电流的修正基准值。

二极管的导通损耗计算公式和 IGCT 的通态损耗计算公式相同,综上分析,二极管的总损耗 P_{DIODE} 包括通态损耗 P_{DT} 和关断损耗,如下式所示:

$$P_{DIODE} = P_{DT} + P_{Doff_re} \quad (9)$$

3.3 机械压装与散热的设计

当功率器件采用单面或双面的散热方式时,热阻是不同的,对于二极管来说,单面散热时,阳极或阴极紧邻散热器的热阻不相同。

根据电路原理,IGCT 在制动过程中通过制动电流,损耗功率大;二极管在制动过程中用于吸收 IGCT 过电压产生的释放电流,损耗功率小。所以本方案中,IGCT 采用双面散热,二极管采用单面散热即可,制动单元的压装结构如图 4 所示。

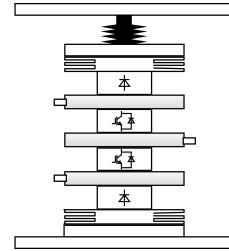


图 4 制动单元的压装结构

Fig.4 Press-fitting structure of brake unit

依据图 4 中的结构方式,可以计算 IGCT 和二极管的总热阻 R_{th} 如下式所示:

$$R_{th} = R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-s)} \quad (10)$$

式中: $R_{th(c-h)}$ 为壳到散热器表面之间的热阻; $R_{th(h-s)}$ 为散热器表面到散热器内部冷却水的热阻。

3.4 制动单元的控制方法

制动单元的控制逻辑如图 5 所示。

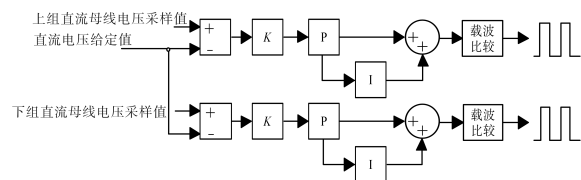


图 5 制动单元的控制逻辑

Fig.5 Control logic of brake unit

为避免对点电压产生影响,禁止对制动单元中上、下桥臂的 IGCT 采取同脉冲控制,而是对制动单元中上、下桥臂的 IGCT 采取分别独立驱

动的方法,驱动脉冲的占空比由各自单独的PI控制器计算所得。除此之外,对上、下半组采用同一个直流电压当作制动单元控制的给定值,而不是采用上、下组直流母线的平均值。

图5中的变比例积分系数 K 可按下式进行在线计算:

$$K = \frac{\Delta U}{U_{\text{ref}}} \quad (11)$$

式中: ΔU 为半组直流母线电压给定值与其对应的半组直流母线电压采样值之差,取绝对值; U_{ref} 为系统最大运行直流母线电压与直流母线电压给定值之差。

4 制动单元的计算与仿真

4.1 制动单元的损耗计算

本设计最大制动功率4 MW,经过仿真选定IGCT型号为5SHX36L4521,为匹配压装压力和技术参数,二极管选型为5SDF20L4520。

方案中的IGCT和二极管热阻参数分别为 $R_{\text{th}(c-h)}=4.2 \text{ K/kW}$, $R_{\text{th}(h-s)}=7.5 \text{ K/kW}$ 和 $R_{\text{th}(c-h)}=11.2 \text{ K/kW}$, $R_{\text{th}(h-s)}=7.5 \text{ K/kW}$ 。 $R_{\text{th}(j-c)}$ 均通过式(4)计算,涉及到的相关数据如表1所示。

表1 热阻数据表

Tab.1 Table of thermal resistance data

i	IGCT		DIODE	
	$R_j/(\text{K} \cdot \text{kW}^{-1})$	τ_j/s	$R_j/(\text{K} \cdot \text{kW}^{-1})$	τ_j/s
1	8.769	0.540 7	3.708	0.533 6
2	1.909	0.079 2	1.426	0.067 0
3	1.218	0.009 1	0.686	0.007 4
4	0.699	0.002 5	0.176	0.001 1

综上所述,可得器件的管芯温度 T_j 的计算公式为

$$T_j = P_{\text{总}} \cdot R_{\text{th}} + T_1 \quad (12)$$

其中

$$P_{\text{总}} = C\rho q(T_2 - T_1) \quad (13)$$

式中: $P_{\text{总}}$ 为器件总损耗; T_1 为散热器的进水水温; T_2 为散热器出水水温; C 为水比热容,取 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$; ρ 为纯水密度,取 1 kg/L ; q 为冷却水流量,本方案流量取 0.1 L/s 。

设定最大进水水温为 40 °C 时,根据式(13)可以仿真计算出IGCT水冷散热器的出水水温为 46.67 °C ,二极管散热器的出水水温为 43.04 °C ,此时IGCT管芯温度变化曲线和二极管管芯温度变化曲线如图6所示。

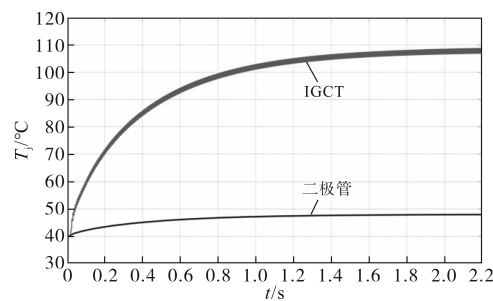


图6 管芯温度波形

Fig.6 Waveform of junction temperature

4.2 缓冲吸收回路的选择

本方案设计吸收电阻为 2Ω ,吸收电容为 $8.5 \mu\text{F}$,最大功率条件下IGCT两端过电压如图7所示,其动态恢复时间小于 $40 \mu\text{s}$ 。

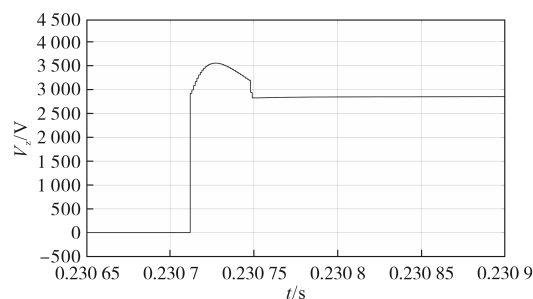


图7 IGCT过电压波形

Fig.7 Waveform of IGCT overvoltage

4.3 IGCT驱动保护的判断逻辑

在门极驱动方面,设置IGCT最小开通时间和最小关断时间均为 $40 \mu\text{s}$,并且对IGCT的门极驱动进行故障判断,判断逻辑为:IGCT的门极输入端CS为发送到IGCT的触发脉冲信号,SF为IGCT的状态返回信号,正常情况下SF与CS的逻辑状态相反,但SF信号响应滞后于触发信号,滞后时间手册提供为不大于 $7 \mu\text{s}$,考虑到控制器硬件上到IGCT驱动门极硬件上的传输延时,单程延时 $2 \mu\text{s}$,则从发送触发脉冲到接收到状态返回信号的总延时为 $4 \mu\text{s}$ 。综上分析,SF信号取反后与CS进行信号进行“异或”逻辑运算,再延时 $11 \mu\text{s}$,正常结果应为逻辑“0”态。

5 成柜与测试

5.1 制动单元模块与成柜

依照上文所述方案完成了制动单元的生产制造,制动单元模块的实物如图8所示。制动单元成柜与中压三电平变频器的匹配成柜设计如图9所示,成柜后,制动电阻柜与制动单元柜之间按照图3原理进行电气连接。

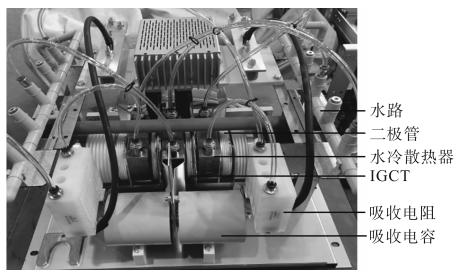


图 8 制动单元实物图

Fig.8 Physical picture of brake unit

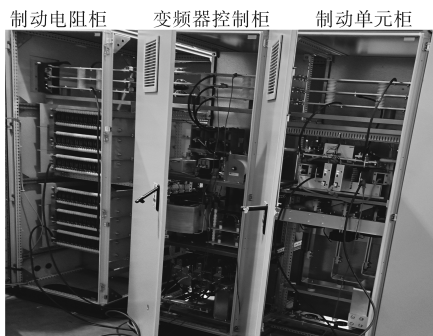


图 9 制动单元成套布局图

Fig.9 Cabinet layout diagram of brake unit

5.2 测试验证

前文介绍了 IGCT 驱动故障保护原理,本文将光纤信号转换电信号进行测量,IGCT 在开通和关断的过程中,其驱动信号与返回信号的延迟时间分别为 $4\ \mu\text{s}$ 和 $3.5\ \mu\text{s}$,满足软件设计要求。测试波形如图 10 所示,图中 V_{gate} 为 IGCT 门极信号。

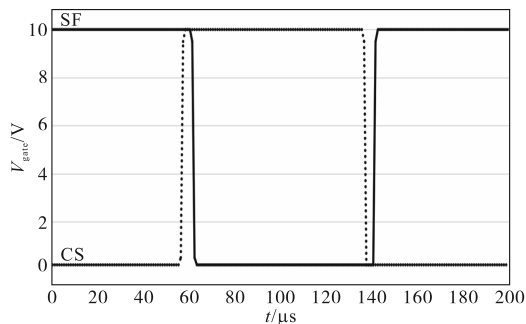


图 10 IGCT 的 CS 与 SF 信号

Fig.10 CS and SF signals of IGCT

当启动电压为 $2\ 800\ \text{V}$,负载电流为 $200\ \text{A}$ 时,制动单元中 IGCT 的端电压和制动电流的波形如图 11 所示,符合设计预期。

对制动单元的直流侧施加持续上升的直流电压,当达到制动单元启动电压时,制动单元开始工作,动态过程中测量直流电压最大波动为 $20\ \text{V}$,制动单元稳态工作时,测量直流母线电压波动为 $4\ \text{V}$,直流母线电压波形变化趋势与 IGCT 的 PWM 驱动波形如图 12、图 13 所示,达到了预期的控制效果。

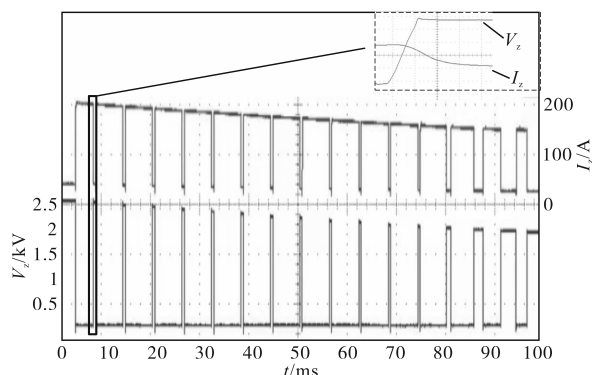


图 11 IGCT 端电压和制动电流波形

Fig.11 Waveforms of IGCT voltage and brake current

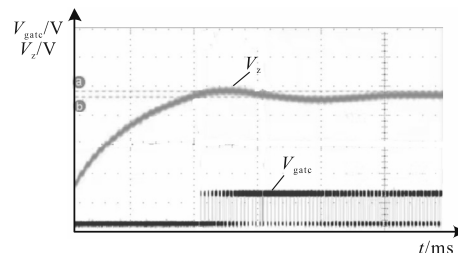


图 12 暂态过程电压波形

Fig.12 Voltage waveforms of transient state

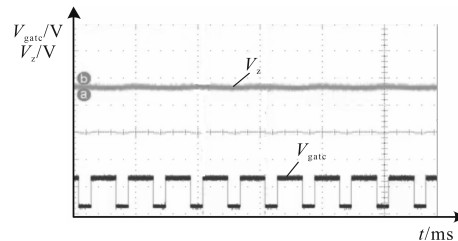


图 13 稳态过程电压波形

Fig.13 Voltage waveforms of steady state

6 结论

1) 本文从 IGCT 的参数和特性入手,详细介绍了 IGCT 在应用时应该特别关注的重点参数和特性,并且给出了相关的特性曲线和计算公式,为基于 IGCT 的各类变流装置的设计提供了参考基础。

2) 在电气原理上,将制动单元的工作原理进行了分析,为 IGCT 器件配置合理的缓冲吸收回路,使 IGCT 的电流变化率和过电压得到有效抑制;从散热方面,大功率压装型器件采用水冷散热,给出了不同器件的损耗修正计算公式,重点说明了压装结构对热阻的影响,通过计算器件的损耗和热阻,设计合理的水路连接,保障器件可靠运行;在控制方式上,上、下两组直流电压分别独立控制,有利于直流电压的稳定。

3) 在多种工业场合,中压大功率三电平变频

器的可靠运行依赖制动单元的释能作用,通过设计、仿真和测试,验证了本文设计的可行性。目前,该制动单元已经应用于国内某金属复合材料的轧制场合。

参考文献

- [1] 李猛,陶实,纪效波. 基于升降速与惰转研究的风洞高压变频器制动系统设计[J]. 电气应用,2022,41(8):69-75.
LI Meng, TAO Shi, JI Xiaobo. Design of MV variable frequency drives braking system based on the research of windtunnel speed[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(8): 69-75.
- [2] 刘恺,李刚,王鑫. 大功率轴流压缩机电气制动控制策略研究与实现[J]. 电气传动,2023,53(12):47-54.
LIU Kai, LI Gang, WANG Xin. Research and realization of electric braking strategy for large power axial compressor[J]. Electric Drive, 2023, 53(12): 47-54.
- [3] 朱奇先,张贵华,张振中,等. 变频钻机能耗制动系统研究[J]. 电气传动,2015,45(5):75-77.
ZHU Qixian, ZHANG Guihua, ZHANG Zhenzhong, et al. Research on dynamic braking system of variable frequency drilling rig[J]. Electric Drive, 2015, 45(5): 75-77.
- [4] 张润泽,崔扬,王海瑞,等. 三电平城轨能馈装置中点电位平衡控制策略研究[J]. 电气传动,2021,51(22):42-47.
ZHANG Runze, CUI Yang, WANG Hairui, et al. Research on neutral point potential balance control strategy of three-level urban rail energy feedback devices[J]. Electric Drive, 2021, 51(22): 42-47.
- [5] 吴建安. 一种制动单元及电力变换设备:中国, CN201110316763. 3[P]. 2013-12-04.
WU Jianan. A brake unit and power conversion equipment: China, CN201110316763. 3[P]. 2013-12-04.
- [6] 卫伟,葛琼璇,李耀华,等. 大功率牵引变频器IGCT器件损耗模型[J]. 电气传动,2022,52(19):11-18.
WEI Wei, GE Qiongjuan, LI Yaohua, et al. The loss model of the IGCT Device in high power traction converter[J]. Electric Drive, 2022, 52(19): 11-18.
- [7] HE Renwang, QIU Wanying. Design and simulation of RC snubber circuits for igcts in series[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2012: 1-3.
- [8] 王凯. 能量回馈单元在港口龙门吊油改电项目上的应用及价值分析[J]. 电工技术,2021(22):179-184.
WANG Kai. Application and value analysis of energy feedback unit in port gantry crane oil to power project[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021(22): 179-184.
- [9] 刘天军. 高压变频器在重型燃机试验平台的应用[J]. 工程技术研究,2020,5(20):5-7.
LIU Tianjun. Application of high voltage inverter in heavy gas turbine test platform[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(20): 5-7.
- [10] 李静. 升降电机在重载条件下快速制动系统的应用[J]. 工业炉,2023,45(2):38-42.
LI Jing. Application of lifting motor in fast braking system under heavy conditions[J]. Industrial Furnace, 2023, 45(2): 38-42.
- [11] 段志刚,姜一达,张策,等. NPC三电平中压大功率变频器设计[J]. 电气传动,2018,48(3):13-16,74.
DUAN Zhigang, JIANG Yida, ZHANG Ce, et al. Design of NPC three-level medium voltage high power inverter[J]. Electric Drive, 2018, 48(3): 13-16, 74.
- [12] 杨培. 大功率IGCT交直交变频器关键技术的研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2016.
YANG Pei. Research on the key technology of high power IGCT AC-DC-AC converter[D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2016.
- [13] 田凯,李凤生,楚子林,等. IGCT三电平变频器故障识别及状态监测方法[J]. 电气传动,2023,53(4):45-50.
TIAN Kai, LI Fengsheng, CHU Zilin, et al. Fault identification and condition monitoring method for IGCT three-level converter[J]. Electric Drive, 2023, 53(4): 45-50.

收稿日期:2024-07-20

修改稿日期:2024-10-12