

# 高稳定性 IGBT 驱动器保护电路

李凯

(中企太行(北京)电子科技有限公司,北京 100085)

**摘要:**大容量链式高压变频器在运行中需要高稳定性 IGBT 保护电路方案。在多年对链式高压变频器和静止无功发生器的 IGBT 驱动设计技术经验基础上,改进了 IGBT 在高 EMC 环境下误报多问题,实现了 IGBT 的保护快速性与稳定性统一,设计出一种具有快速关断、多次重启、反时序热积累保护的方案,在实际应用中取得了良好的效果。

**关键词:**链节单元;高压变频;静止无功发生器;IGBT 驱动

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20621

## High Stability IGBT Driver Protection Circuit

LI Kai

(China enterprise Taihang (Beijing) Electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** High stability IGBT protection circuit scheme for large capacity chain high voltage converter in operation is demanded. Based on the experience in IGBT drive design of chain high voltage converter and static var generator for many years, the multiple mispositives of IGBT in the environment of high EMC were improved. The unity of protection rapidity and stability of IGBT was realized. A scheme with fast shutdown, multiple restart and anti-sequential heat accumulation protection was designed. Good results have been obtained in practical application.

**Key words:** chain element; high voltage frequency conversion; static var generator(SVG); IGBT drive

现有的链式高压变频器和静止无功发生器(SVG)均是采用链节单元组成的多电平串联拓扑,其中 10 kV 高压变频器的链节单元为 15 个,而 35 kV 的高压无功发生器的链节单元达 120 个。每个链节单元运行均产生方波,链节单元内的 IGBT 就处于多方波串联叠加环境下运行,相对于二电平、三电平的设备,在多电平设备投运中,有时会出现挑网现象,即个别电网中,运行一段时间后,会出现链节单元驱动故障,但在返厂后,在试验台上做各种测试均正常,直接继续使用也正常。在维护中出现这种情况时,常采用倒链方法处理解决,即将在个别电网中不稳定的链节单元调到稳定电网上,将较稳定的单元匹配到这里。但在匹配期间会造成用户多次停机,损失较大。

在设备故障后,对 DSP 中程序内保存的 SOE 事件顺序记录数据,对在线电能质量录波仪的数据进行综合分析,得出结论:电源回路中谐

波含量较大会引起设备挑网;监控到设备输出 PWM 运行正常时,设备某一单元出现 IGBT 故障信号,造成设备误报停机。经过严密的技术分析,归纳其为系统内的杂波信号,通过接地、感应、耦合等不同的路径掺杂到 IGBT 故障信号回路中,引起链节单元误报。

基于多年对链式高压变频器和静止无功发生器的 IGBT 驱动稳定性设计数据,对 IGBT 驱动保护回路进行升级,设计出具有快速关断、多次重启、反时序热积累保护的 IGBT 驱动器保护电路方案。

## 1 链节单元的组成结构

链节单元是多电平变流系统的基础模块,主要由 H 桥拓扑的 IGBT、电容及整流桥组成。

### 1.1 高压变频器的链节单元

高压变频器链节单元的主电路拓扑主要是由功率输入保险、全桥整流模块、输入扼流电感、

电解电容组、IGBT 模块、旁路接触器和旁路扼流电感组成。除主回路外,链节单元还包括控制变压器、智能控制板、光纤接口及 IGBT 驱动、温度报警器等几部分。

高压变频器中,频率变换的核心是链节单元,在高压变频器中换流链节单元的电压等级和输出功率没有改变,但其电平随叠加输出变化而变化,使每个单元均处于对大地飘移的运行状态下,使链节单元的运行环境非常恶劣。

高压变频器链节单元输入接三相交流电,分为 2 路,一路为主功率部分,电流在 100 A 以上,接入功率输入保险;另一路为控制部分,控制电流经隔离变压器隔离后分为多个独立的电压等级的控制电源智能控制板,为整个交流系统提供控制电。

高压变频器链节单元的电气原理图如图 1 所示。

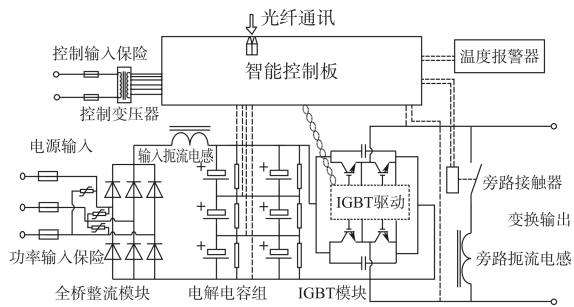


图 1 链节单元原理图

Fig. 1 Schematic of chain cell

### 1.2 静止无功发生器的链节单元

静止无功发生器(SVG)的链节单元组成示意图如图 2 所示,主要由 IGBT、二极管、电容及控制板等组成。

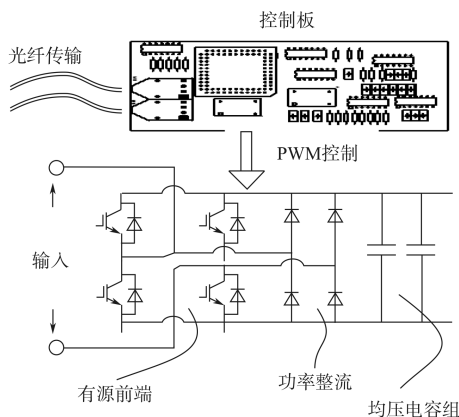


图 2 SVG 链节单元

Fig. 2 Chain cell of SVG

链节单元内部的控制电路接收控制单元的通讯信号,经过调制变为 IGBT 的驱动脉冲信号,驱动 IGBT 的运行。信号与控制单元的光纤通信,将链节单元内的电容电压状态实时上传,用于对换流链内的电压平衡调整。在内部配置相关的保护电路,当出现故障时,及时关断或直通,确保换流链的稳定。

### 1.3 链节单元的机械结构

2 个半桥结构的 IGBT 组合成 1 个 H 桥的 IGBT 的逆变结构如图 3 所示,IGBT 模块连接铜排用于 IGBT 的正负极端子的连接,其采用丁字转折结构,使其在空间位置上其尽量平行,且其围起的空间面积最小,消除对周围元件的电磁干扰。在转折处加有固定绝缘子,使双丁字结构稳定,并消减开关电流引起的铜带振动。

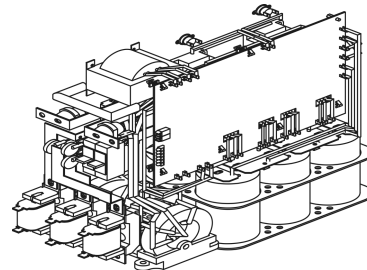


图 3 链节单元结构

Fig. 3 Chain cell structure

## 2 链节的组合方式

### 2.1 高压变频器的链节单元组合

图 4 为高压变频链节单元组合原理图。

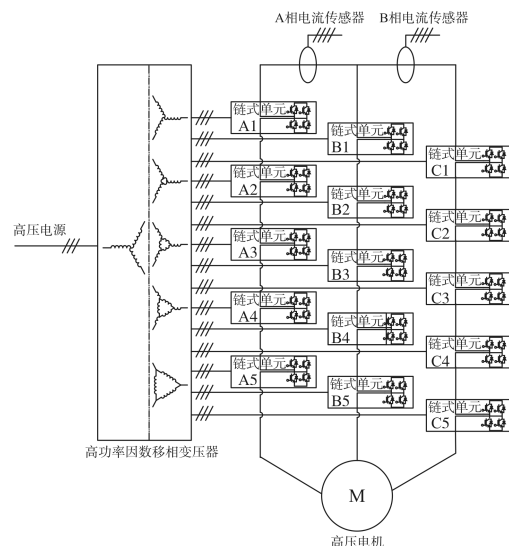


图 4 高压变频原理图

Fig. 4 Schematic of high voltage converter

高压变频器由输入移相变压器、链节单元、控制系统组成。输入移相变压器是一台特殊结构的二次移相变压器,为链节单元供电和实现多脉冲整流。相同链节单元连接成三相高压的逆变换流链。其结构原理图如图 4 所示,通过对 IGBT 逆变桥进行正弦 SPWM 控制。

### 2.2 静止无功发生器的链节组合

链式 SVG 将 3 个单相链条逆变器以星形或三角形的结构连接,连接电抗器接入电网。在三角形连接的 SVG 中相与相之间相互独立,可以等效成 3 个单相结构,每相承受的电压值为系统的线电压值。其结构如图 5 所示。

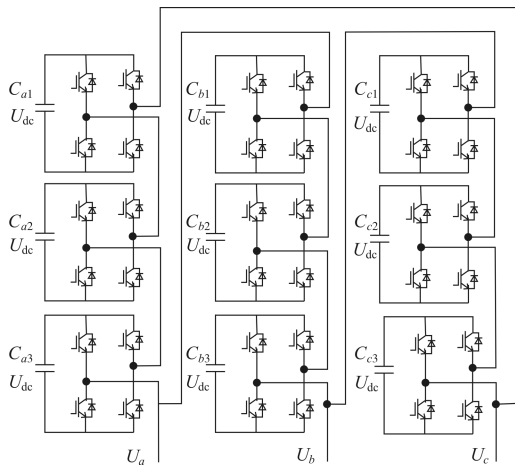


图 5 SVG 结构图

Fig. 5 The structure diagram of SVG

## 3 链节单元内 IGBT 的电磁环境

链节单元内本身就是高压、低压混合系统,从电压等级来讲,IGBT 的主回路电压达 35 kV 的等级,而 IGBT 驱动回路电压为 15 V 电压等级。相差 1 000 倍以上,而主路的电流为 kA 等级、控制回路为 mA 等级。链节单元的 IGBT 就在这种环境下运行,主电路的电压和电流波上充满着开关尖峰,示波测量如图 6 所示。

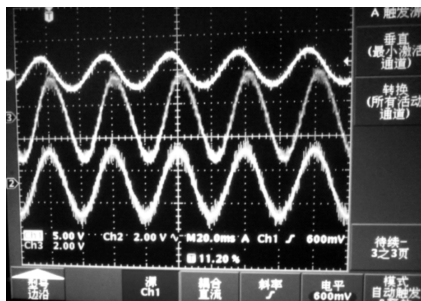


图 6 链式逆变器的输出波形

Fig. 6 Output waveforms of chain-type inverter

### 3.1 经典的 IGBT 的驱动保护设计

对于 IGBT 驱动保护,以用量较多的 2SC0435 的保护进行说明,其保护阈值曲线如图 7 所示。每一个通道都有 VCE 监控电路,推荐电路中,电阻  $R_{thx}$  用于定义关断的参考值,流过  $R_{thx}$  的电流源的典型值是  $150 \mu A$ ,推荐选取的门槛水平大约为 10 V,在这种情况下,驱动器可以对 IGBT 实施安全的短路保护。

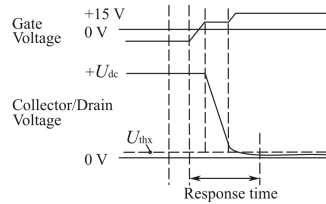


图 7 保护阈值曲线

Fig. 7 Threshold curves of protection

IGBT 的保护执行运行环境如下:35 kV 电压,上 kA 的电流,采用直连的方式对 IGBT 的漏源极电压 10 V、电流  $150 \mu A$  的信号作为保护,对其的电磁环境、布线环境、信号缓冲吸收都提出了极高的要求。

### 3.2 链节单元内 IGBT 的高屏蔽电磁环境

对于链节单元,根据单元中元件运行电压的不同,分为多个空间模块,单元的空间爆炸结构图如图 8 所示。空间模块分为“高压整流空间”、“高压平波储流空间”、“高压逆变空间”、“输出旁路空间”、“低压智能屏蔽空间”。链节单元内所有器件的空间排布均以工作核心电压为基准,同一电压等级的器件安排在同一个空间模块中,形成了电压空间模块排布技术,使 IGBT 驱动器处于最好的电磁环境下运行。

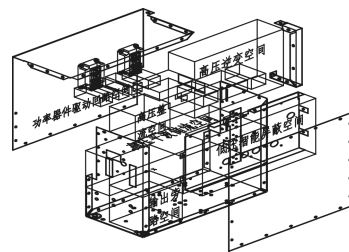


图 8 链节空间布置爆炸图

Fig. 8 Exploded view of the space layout of the chain links

### 3.3 链节单元内 IGBT 驱动保护现状

在采用国外的 CONCEPT 公司的驱动器,最优电磁环境设计等措施采取后,设备的挑网现象减少,但用电环境中的突发谐波时,还会出现误

报现象。通过大量的运行数据统计,突发谐波的现象出现较少,平均年度发生概率不到 0.5,但在发电机组类的高等级运行环境下,就对设备的稳定性提出质疑。

### 4 高稳定性 IGBT 保护设计

在大量的高压变频器投运中,经常与高压电机相互配合,从其中了解到,高压电机在电厂中属于关键设备,对其保护要求也相当高,其采用的策略为反时限过负荷保护,其算法如下:

$$t = \frac{Q_1 \times T_m}{k_1 \times (\frac{I_1}{I_{V1}})^2 + k_2 \cdot (\frac{I_2}{I_{V1}})^2 - 1.05^2}$$

式中:  $T_m$  为电机发热时间常数;  $Q_1$  为反时限时间系数;  $I_{V1}$  为相电流反时限电流定值,一般设为电动机额定电流;  $k_1, k_2$  分别为正、负序电流发热系数;  $I_1, I_2$  分别为电流正、负序分量。

新的保护设计将按多次信号校验与反时序热积累综合考虑设计。

#### 4.1 典型 IGBT 反时序热积累安全时间

以常用的 FZ1200R17 型号 IGBT 为标准设计,依据规格书,确定短路耐受时间。规格参数表如表 1 所示。

表 1 规格参数表  
Tab. 1 Specification

IGBT, 逆变器 最大额定值	初步数据	
集电极-发射极电压	$T_{vj} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125\text{ }^\circ\text{C}$	$U_{ces}$ 1 700 V
连续集电极直流电流	$T_c = 80\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{vjmax} = 150\text{ }^\circ\text{C}$ $T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{vjmax} = 150\text{ }^\circ\text{C}$	$I_{nom}$ 1 200 A $I_c$ 1 950 A
集电极重复峰值电流计时	$t_p = 1\text{ ms}$	$I_{CRM}$ 2 400 A
总功率损耗	$T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{vjmax} = 150\text{ }^\circ\text{C}$	$P$ 9.60 kW
栅极-发射极峰值电压		$U_{CES}$ +/-20 V

计算 IGBT 检测电压为 10 V 时电流为

$$I_c = \frac{I_{CRM} \times U_{CEth}}{U_{CEsat}} = \frac{2\ 400 \times 10}{3.1} = 7\ 742\text{ A}$$

式中:  $I_{CRM}$  为 IGBT 重复峰值电流;  $U_{CEth}$  为峰值电流时的集电极-发射极电压;  $U_{CEsat}$  为 IGBT 额定电流的集电极-发射极电压。

计算 IGBT 耐受时间为

$$t = \frac{2\ 400^2}{7\ 742^2} = 0.096\text{ ms}$$

确定反时序积累安全时间小于 96  $\mu\text{s}$ 。

采用 RC 电路对保护时间进行计时设计,反时序电路原理图如图 9 所示。

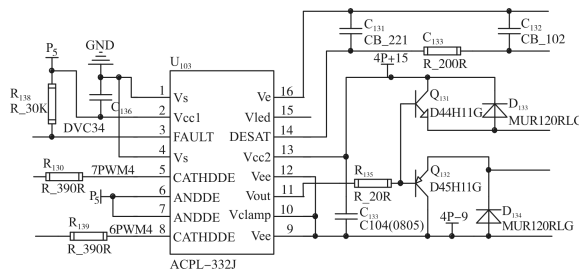


图 9 反时序电路原理图

Fig. 9 Circuit diagram of reverse sequence circuit

#### 4.2 多次 IGBT 重启验证技术

链节单元内的 IGBT 保护时经过录波确认为误信号,从系统分析,高压变频器与静止无功发生器所驱动的设备都是大惯量系统,ns 等级的关断对整个系统影响是可容忍的,故将安全与稳定相结合,有故障信号,先关断,再开通测试,对故障进行二次以上的确认。

采用瞬时故障恢复芯片,当关断后立即延时开通,有故障就继续关断,当关断的时间达到 IGBT 耐受时间后,锁定故障,向主控发出故障信号。

#### 4.3 反时序热积累与多次重启验证结合

在 IGBT 的耐受时间内多次重启,故障的时间短,重启次数多;故障时间长,重启次数少,实现了稳定与安全的结合,当设计故障信号小于耐受时间,IGBT 不报故障,维持导通。图 10 为反时序信号电平波形图。

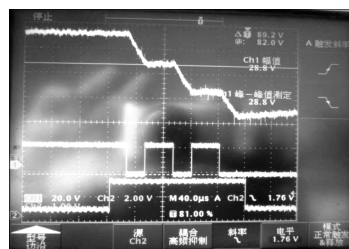


图 10 反时序信号电平波形图

Fig. 10 Level waveforms of inverse sequence signal

当每次的故障脉冲小于 20  $\mu\text{s}$ ,故障的发生周期大于 1 ms 时,保护系统的故障锁定达不到触发阈值,IGBT 将保持连续运行,其波形如图 11 所示。

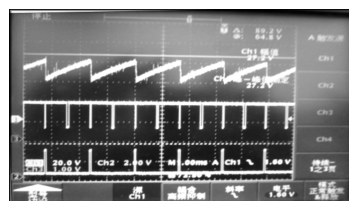


图 11 长间隔短单次故障

Fig. 11 Long interval short single fault

当给定故障时间超过 40  $\mu\text{s}$  时,故障的反时序恢复时间不足以使故障电平归位,累积 3 次即锁定故障保护,图 12 为长间隔、长脉冲故障波形图。

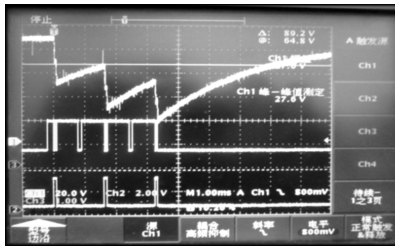


图 12 长间隔长脉冲故障

Fig. 12 Long-interval long-pulse fault

## 5 IGBT 保护电路实测效果

实际的运行检测是技术设计的最好确认,在实验台上,进行高干扰环境稳定运行、短路电流输出保护的带载测试。

### 5.1 强干扰环境的验证

在内部 PWM 信号回路与 IGBT 保护回路主动串入振荡尖峰电压,运行曲线如图 13 所示。经监测,在这种高恶劣环境下,保护电路稳定运行。

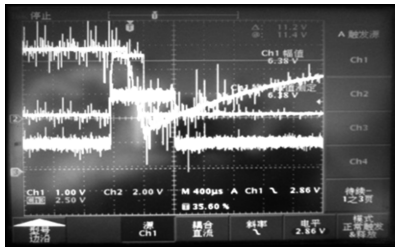


图 13 恶劣环境运行

Fig. 13 Operating in a hostile environment

### 5.2 短路等级电流自动重启的验证

采用 FZ1200F17R 的设备进行 7 000 A 等级测试过于危险,故用 FF100R17 的 IGBT 进行功能验证。测试时将驱动板安装于 100 A IGBT 的链节单元中,进行实际过流与带载测试。

在电流达到短路电流状态时,在检测到 IGBT 关断后重启的 PWM 波形,如图 14 所示。

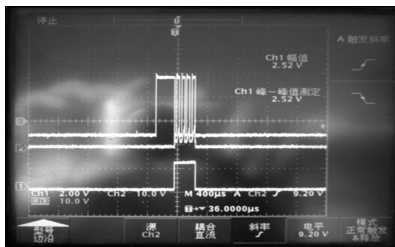


图 14 关断重启 PWM

Fig15 Shut down and restar PWM

### 5.3 电路保护验证安全性

解开全部其它保护,直接加大电流,测试对 IGBT 保护的安全性,保护记录测试结果如表 2 所示。

表 2 保护记录表

Tab2 Protection Record

序号	状态	记录号	保护时 电流有效值 /A
1	一次故障锁定	1-1	160
2	一次故障锁定	1-2	172
3	一次故障锁定	1-3	178
4	多次反时序故障锁定	2-1	231
5	多次反时序故障锁定	2-2	214
6	多次反时序故障锁定	2-3	226
7	多次反时序故障锁定	2-4	217
8	多次反时序故障锁定	2-5	221
9	多次反时序故障锁定	2-6	218

链节单元经过 9 次的浪涌电流冲击测试,IGBT 运行正常。

## 6 结论

现在国内的电力电子技术应用越来越广,但是一些高要求环境下基本上都是被国外的设备所垄断。然而国外的驱动器使用起来比较呆板,设备性能无法进一步提高。通过借鉴其它设备在高稳定环境下的技术方法,引入 IGBT 驱动研究中,提出了高稳定性 IGBT 保护电路方案,使得高恶劣环境下运行链式变流器的稳定性得到了极大的提高。

### 参考文献

- [1] 李凯,白德芳,严冬. 变频器功率单元采用电磁兼容原则的新结构研发. 变频器世界, 2006, (10):104-112.
- [2] 王宁,郑蔚,刘全. 数字式电动机保护反时限过负荷整定计算及实验方法[J]. 冶金动力, 2002(6):4-5,16.

收稿日期:2019-07-28

修改稿日期:2019-11-03