

基于H桥级联的STATCOM换流模块驱动保护电路设计

驱动保护电路是电力电子装置重要的组成部分，关系到电力电子装置的安全可靠运行。针对H桥级联的STATCOM，为其设计了驱动保护电路。该电路能够实现死区的灵活设置、工作状态的自检、本地分级保护以及详细故障状态上报等功能，大大提高了STATCOM工作的可靠性。最后通过电力电子仿真软件（Simulation Program with IC Emphasis, PSPICE）和实验对该电路的性能进行了测试和分析。结果表明，该电路能够很好地实现对H桥电路的驱动和控制，并且能够实现对故障的快速处理，可靠性高。

魏孟刚^{1,2} 王 轩^{1,2} 王小星³ 但 峰⁴ 喻劲松^{1,2} / 1.南瑞集团公司（国网电力科学研究院） 2.中电普瑞科技有限公司 3.北京交通大学电气工程学院新能源所 4.中铁八局集团电务工程有限公司

0 引言

目前静止同步补偿器（Static Synchronous Compensator, STATCOM）是无功补偿系统中比较好的补偿装置，也是柔性直流输电的一部分^[1-3]。其基本原理是通过IGBT、MOSFET等全控型电力电子器件组成换流电路，来控制其向电网输送电流的幅值和相位，从而达到补偿电网无功的作用。

对于全控型器件，驱动保护电路是其应用的关键技术和难点之一。目前针对全控型器件，其驱动和保护电路的方案很多，许多公司设计制造了专用的驱动芯片，但驱动电路的设计者往往只针对本公司的产品，通用性差，在驱动保护等功能配置方面也不完善，许多芯片直接驱动功率小，而大功率的驱动保护电路价格昂贵。并且在实际应用中，需

要考虑多路信号的隔离，死区设置、外部保护接口及短路或过载检测等^[4-6]。

针对上述问题，本文提出了一种适用于大规模H桥级联STATCOM的驱动保护电路，该驱动电路用于1个H桥模块4只IGBT的驱动和保护，便于模块化设计。另外该电路采用电源和电池双电源供电，并采用光纤作为输入接口，在信号输出侧，利用光耦与隔离电源进行驱动信号的二次隔离，大大提高了驱动电路的工作可靠性。在保护方面，该电路可实现故障的快速定位，并对故障进行编码和分类，实现了对开关器件有效的保护。

1 H桥级联的STATCOM

H桥链式级联电路与其他链式结构不同，这种方式是由相同结构的H桥串联而成，每个链节直接联系不大，这使装置很容易扩展，H桥级联STATCOM电路如图1所示。STATCOM采用星形联结，通过电抗器并联于电网与负载之间，STATCOM通过注入与负载类型相反的无功电流，补偿负载的无功，提高电网输电质量，使电网只提供有功电流。每相桥臂由 N 个H桥逆变单元级联而成。H桥子模块由4只开关器件和1个电容器构成。正常工作时，每个H桥子模块有3种工作模式：正投入、负投入和切除（旁路）^[7-8]。

对于H桥构成的STATCOM，为了使其能够可靠地工作，驱动电路的设计至关重要。通常，驱动电路必须满足以下几点要求^[9-10]。



魏孟刚/工程师

关键词/Keywords

驱动 ·
保护 ·
H桥模块 ·
故障编码 ·

国家电网公司科技项目项目（52466F150008）。

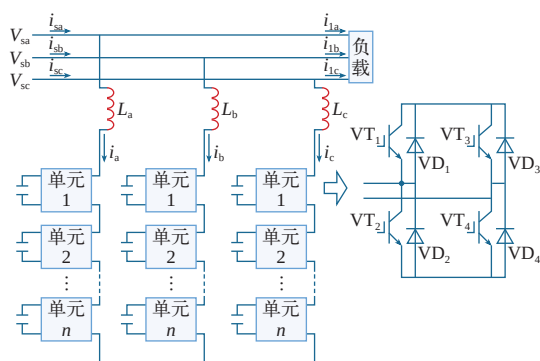


图1 H桥级联STATCOM的主电路拓扑

1) 需要设置死区。IGBT这种功率器件存在寄生电容,会造成器件导通和关断延迟的现象。因此,为了使IGBT可靠工作,避免由于开通或关断延时造成的上下开关管同时导通的现象,必须设置死区。

2) 隔离。驱动电路主要以一些模拟器件、数字芯片等组成的低压信号电路,而IGBT工作在主电路的高压母线上,并且位置不同的IGBT所处的电位不同,因此必须提供一定的电气隔离,主要包括:控制信号的隔离和驱动电源的隔离。并且隔离耐压必须足够大,避免绝缘击穿漏电等,同时需要确保隔离信号的传输无延时或延时较小。

3) 要能够快速地检测到IGBT的故障,并将故障类型进行分类,作不同的处理,从而实现对IGBT保护的快速性。

2 驱动保护电路设计

2.1 电路基本结构

H桥的驱动保护电路如图2所示,该电路主要由6部分组成,分别为供电电路、光纤接口电路、故障反馈电路、脉冲输出与检测电路、显示电路以及CPLD控制电路。其中,CPLD是该电路的核心,主要实现对整个驱动电路的控制与保护。

对于H桥驱动保护电路,其供电可靠性十分重要,为了实现对驱动电路的可靠供电,本电路设计了由电源和电池双电源供电的电路结构。在供电电源正常的情况下,由电源为整个电路供电,并且当电池处于未充满状态时,电源也给电池充

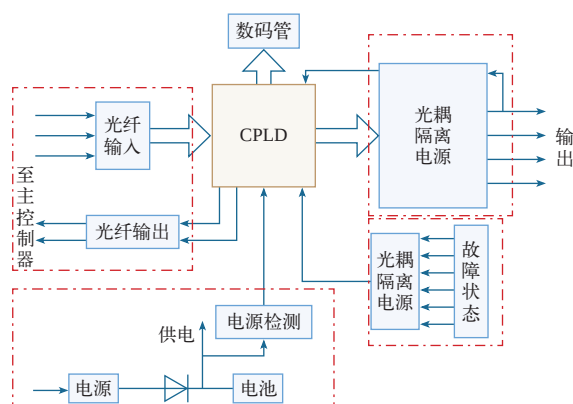


图2 驱动保护电路结构图

电。当电源出现故障时,电池将代替电源给驱动电路供电,并且电源检测电路会根据检测到的电源故障,将故障信号输出到CPLD。

对于驱动信号,其由主控制器下发到CPLD中,考虑到H桥的驱动信号的对称性(同一桥臂的IGBT驱动信号互补),主控制器下发三路信号到CPLD中,其中两路为驱动信号,CPLD将接受到的两路驱动信号分为四路,并在驱动信号中加入死区,通过光耦隔离电路,将驱动信号分别供给IGBT。另外一路为主控制器给驱动电路的脉冲闭锁信号,在待机或故障情况下,该位为低电平,脉冲被封锁;在正常运行情况下,该位为高电平,驱动电路正常工作。对于不同类型的开关管,其寄生电容会有所差异,导致开通和关断延时时间也有所不同,因此,在对死区进行设置时,可根据开关管的相关参数,对死区进行设置,避免了传统驱动电路死区不可调的缺点。为保证驱动脉冲的正确性,将供给IGBT的脉冲信号通过光耦反馈到CPLD中,然后CPLD将供给IGBT的驱动信号和反馈回来的驱动信号作对比,检验供给IGBT的信号是否正常。

IGBT驱动与脉冲检测电路如图3所示,该电路采用隔离电源和光耦,实现了完全隔离。并采用晶体管组成复合管放大电路,输出阻抗低,可有效减少负载变化对电压增益的影响;具备较大的电流增益,基本满足IGBT门极驱动功率要求。驱动电路输出的正向电压由IGBT的栅极驱动电压而定,一般为15 V左右。二极管VD₁用来钳制栅极和

发射极之间的电压，确保IGBT安全可靠的工作； VD_2 由6个稳压管组成，用于过电压保护， R_2 为5.1 k Ω 电阻，用来泄放IGBT结电容的电压。该驱动电路比较简洁，抗干扰性强，可靠性高。

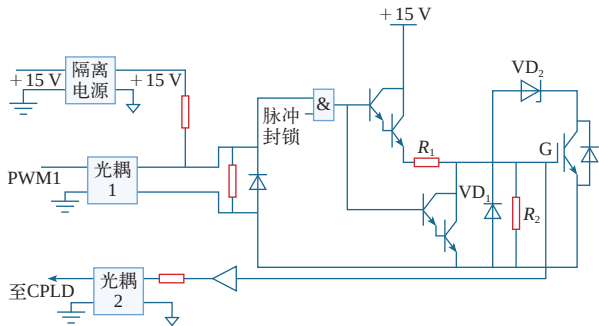


图3 IGBT驱动与脉冲检测电路

故障状态反馈电路主要作用是检测驱动电路是否故障，如果发生故障，则将故障信号上传给CPLD，由CPLD对故障信号进行处理，并通过数码管显示电路，将故障信息显示出来。对于需要上传到主控制器的故障信号，则通过光纤上传到主控制器。

过电流、过电压故障检测电路如图4所示，该电路主要由迟滞比较器和外围的电阻电容元件组成。 U_1 为采集到的IGBT集电极和发射极两端之间的电压或经过IGBT的电流所对应的电压信号， R_1 和 C_1 组成低通滤波电路，滤除电压信号中的高频分量。 R_2 、 R_3 和 R_4 用于设置门限电压，不同的阻值，可以实现不同的门限电压。对于该电路，未出现故障时，该电路输出为高电平，若出现故障，则输出低电平。CPLD检测到该故障后，会根据优先级来处理，具体处理方式下节将介绍。

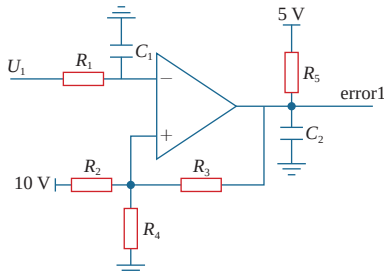


图4 故障检测电路

对于数码管显示电路，考虑到成本以及CPLD的资源问题，本设计中采用共阴极七段式数码显

示电路。显示单元显示两位数，其中，第一位为故障IGBT的编号，第二位为故障类型、编号规则。

2.2 故障保护处理

为了实现对IGBT的保护，驱动保护电路需要对故障进行快速定位，并由CPLD对故障信号进行本地处理，对需要上传的故障信号则上传到主控制器中。

对于IGBT，其故障大致可以分为5类，分别为欠电压、过温、过电压、过电流和驱动电源故障。另外还需要对供电电源的状态进行监控。考虑到CPLD不能同时响应所有故障，因此，根据故障对IGBT的损坏程度，将故障进行优先级的排序，其排序结果如下表所示。如果某一时刻同时出现多个故障，则CPLD会根据故障的优先级按从高到低的顺序作出响应。

表 故障编码电路

开关管	编号	故障类型	编号	优先级
VT_1	00	过电流	000	1
VT_2	01	过电压	001	2
VT_3	10	驱动电源故障	010	3
VT_4	11	过温	011	4
		欠电压	100	5
		供电电源故障	1	6

当硬件电路检测到故障信号时，会产生一个脉冲信号，CPLD检测到该脉冲的上升沿后，根据输入端口的信息，会对故障类型进行判断，作出相应的处理。对于驱动电源故障（4路中任意一路）和过电流、过电压等故障，极易造成IGBT的损坏，为严重故障，因此，CPLD检测到这3类故障，会立刻封锁开关管的脉冲，实现对IGBT的保护，同时CPLD将故障信息以编码形式传给主控制器，主控制器会根据故障信息进一步采取故障处理措施，如旁路模块、启用冗余模块或进入容错运行状态。对于供电电源故障，考虑到电池的存在，则由CPLD上报主控单元并显示，本地只进行报警显示不处理；同样，欠电压和过温故障，由CPLD将故障信息上传到主控制器中，本地只显示故障，由主控制器根据故障的程度，作出相应的处理。

为了实现STATCOM主控系统对故障的快速定位,本设计中CPLD对故障类型进行编码,方便主控系统的处理,所有编码均采用二进制数。由于需要判断是否故障,并且每个子模块包含4个IGBT,每个IGBT有5种故障,另外还应包括电源故障。因此,故障类型的反馈量由6位数据位组成,数据的表达形式如图5所示。数据位的编码见上表。

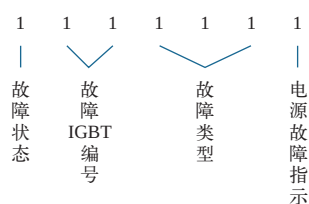


图5 数据位故障编码

CPLD通过两根光纤将故障信号返回给主控制器。当出现故障时,CPLD输出的一路光纤跳变为持续的低电平信号,同时另外一路同步开始发送波特率为115200的信号给主控制器。主控制器会根据保护驱动电路返回的信号对故障类型进行判断,并进行处理。

3 实验测试

为了验证电路的性能是否满足设计的要求,首先利用电力电子仿真软件PSPICE对该电路进行了仿真,仿真结果如图6所示。其中图6a分别为开关频率为10 kHz时,死区时间 $t_{\text{deadtime}} = 4 \mu\text{s}$ 和 $t_{\text{deadtime}} = 6 \mu\text{s}$ 的波形图。图6b~d为故障测试的波形图,其中,上边波形为故障信号,下边为驱动脉冲信号。图6b中,在 t_1 时刻,驱动电路检测到IGBT有过

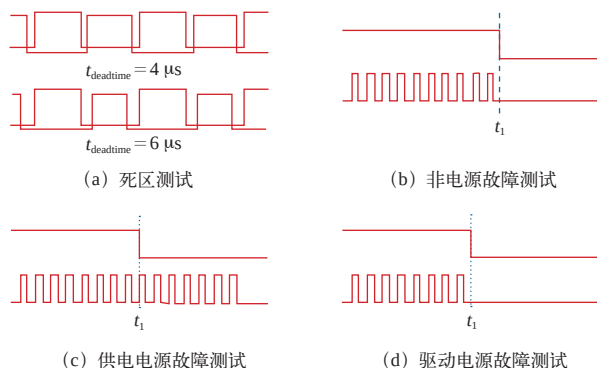


图6 驱动电路工作仿真波形图

电流或过电压等严重故障,此时,由CPLD对脉冲信号进行封锁,所有脉冲信号均置低,使IGBT处于闭锁状态。图6c为供电电源故障测试波形图,在 t_1 时刻,CPLD检测到电源故障,并将故障信号上报给主控制器,但驱脉冲未被封锁。图6d为驱动电源故障波形测试图,在 t_1 时刻,驱动电源发生故障,CPLD检测到该故障,会立即封锁脉冲。

为了进一步验证电路的可靠性,对制作好的硬件电路进行了测试,驱动脉冲信号测试结果如图7a所示:其中, VT_1 和 VT_4 共用一路脉冲信号, VT_2 和 VT_3 共用一路脉冲信号。在 t_1 时刻, VT_1 和 VT_4 关断; t_3 时刻, VT_2 和 VT_3 开始导通。由于杂散电容的存在,使得开关器件并不能立即导通,因此,在确定 VT_1 和 VT_4 可靠关断以后,再触发 VT_2 和 VT_3 导通,而 t_2 和 t_3 之间的时间就是死区。为了验证死区可调,实验中分别测试了死区时间为 $4 \mu\text{s}$ 和 $6 \mu\text{s}$ 的波形图。

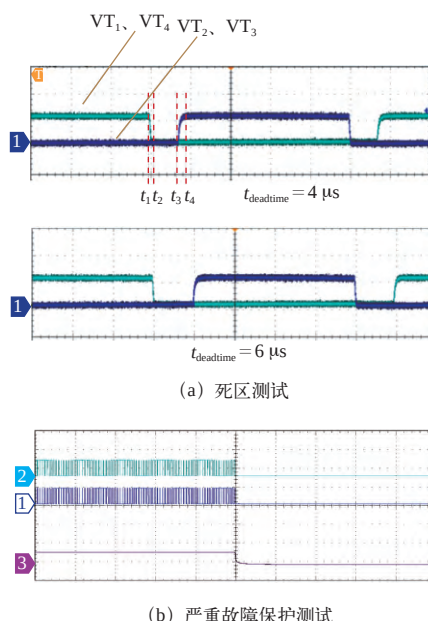
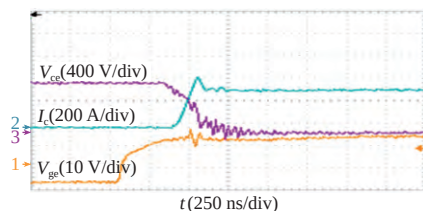


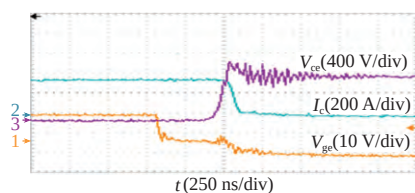
图7 严重故障保护测试

为了验证对故障处理的及时性,对该驱动电路进行了故障测试,如图7b所示。图7b中的波形由上到下分别为 VT_1 的驱动信号、 VT_2 的驱动信号和封锁脉冲信号。在 t_1 时刻,发生严重故障(过电压、过电流及驱动电源故障),则CPLD根据故障的类型,对脉冲信号进行封锁。图8为驱动电路连

接主电路后,驱动1 200 V/600 A的IGBT的导通和关断的电压电流波形图,实验中直流电压850 V,负载电流350 A。其中 V_{ce} 为集电极和发射极之间的电压; V_{ge} 为门极和发射极之间的电压; I_c 为发射极的电流。由图8可以看出,该驱动电路可以有效地驱动IGBT的通断。



(a) IGBT导通波形



(b) IGBT关断波形

图8 对IGBT驱动能力测试

4 结束语

本文对IGBT器件驱动脉冲的要求进行了分析,详细地研究了H桥链式STATCOM的驱动电路的设计要求,并对驱动电路进行了设计,该电路克服了现有驱动电路通用性差、保护性能不完善及价格昂贵等缺点。最后经过仿真和实际电路的实验表明,所设计的电路完全可以实现对H桥变流器进行有效的驱动、控制和保护。

参考文献

- [1] 赵成勇,李丹,刘羽超,等.含有STATCOM的高压直流输电系统控制方法[J].高电压技术,2014,40(8):2440-2448.
- [2] 李圣清,唐琪,白建祥,等.电网电压不平衡下链式STATCOM控制方法[J].电力电子技术,2016,50(7):32-33,47.
- [3] 孙毅超,赵剑峰,季振东,等.基于d-q坐标系的单相链式STATCOM直流电压平衡控制策略[J].电网技术,2013,37(9):2500-2506.
- [4] 张博敏.大功率IGBT驱动模块的设计与研究[D].成都:电子科技大学,2015.
- [5] 任义龙.基于STATCOM的IGBT驱动保护电路的研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [6] 丁祖军,郑建勇,梅军,等.基于EXB841的IGBT驱动电路设计及优化[J].电力自动化设备,2004,24(6):37-40.
- [7] 陈丽兵.基于级联H桥的STATCOM及其控制策略研究[D].北京:中国矿业大学,2014.
- [8] 林志勇,江道灼,周月宾,等.基于级联H桥换流器的APF-STATCOM的控制与调制[J].电力系统保护与控制,2014,42(7):91-96.
- [9] 邱光,王巍,蒋明,等.IGBT驱动电路:中国,CN 205232017 U[P].2015-12-11.
- [10] 孙加忠,单任仲,刘建军,等.一种IGBT驱动保护电路:中国,CN 204190736 U[P].2014-11-29.

(收稿日期:2017-01-08) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告