

基于FPGA的链式STATCOM阀控系统设计

阀控系统是链式STATCOM控制保护系统和换流链之间的重要接口环节，其核心装置为阀控装置，主要负责控制调节策略中链节直流电压均衡控制功能、功率模块的触发和监测工作，其可靠性对链式STATCOM的长期稳定运行至关重要。本文设计一种应用于链式STATCOM的阀控装置，该装置以FPGA为核心控制，充分利用其强大的并行处理能力及内部RAM资源等，实现了多达70对串行收发通信，采用PWM指令与控制命令统一编码方式，提高了通信通道带宽，满足功率控制的实时性要求。该装置满足35 kV电压等级及以上的大容量STATCOM对阀控系统的应用需求。

詹雄 刘慧文 张佃青 王宇红/南瑞集团中电普瑞科技有限公司



詹雄/高级工程师

关键词/Keywords

- 阀控系统 ·
- FPGA ·
- 链式STATCOM ·
- 阀控装置 ·
- 统一编码 ·

0 引言

近些年来，随着全控型电力电子器件（如IGBT和IEGT）成本的不断降低和技术成熟，静止同步补偿器（Static Synchronous Compensator, STATCOM）^[1]获得了越来越广泛的应用。链式STATCOM（Chain Circuit STATCOM）^[1]以其优秀的性能特别适合高压大功率应用场合^[2]，在电力系统中受到重视，并已经开始在柔性交流输电（Flexible AC Transmission Systems, FACTS）领域快速推广应用^[3]。

阀控系统是链式STATCOM控制保护系统和换流器链节（Link）^[1]之间的重要接口环节，其核心装置为阀控装置（Valve Control Unit, VCU），主要负责接收控制保护系统下发的控制调节命令，监测链节直流电压和相关状态

信息，完成底层控制调节算法，生成IGBT触发脉冲，并负责上报换流链的实时信息，实现冗余控制逻辑和相关保护功能等。阀控系统的设计是一个系统工程，涉及多个方面，其可靠性对链式STATCOM的长期稳定运行至关重要。

本文针对链式STATCOM的特点，提出了一种基于FPGA的链式STATCOM阀控系统设计方案，具有配置灵活、性能可靠的特点，并完成了VCU装置的研制和测试。

1 链式STATCOM阀控系统设计要求

1.1 链式STATCOM的主电路拓扑

链式STATCOM主电路拓扑结构如图1所示^[4,5]，该结构每相由N个H桥换流器链节级联而成。3个单相H桥链式换流器可以通过星形（Y）或三角形（△）联结组成三相链式换流器。

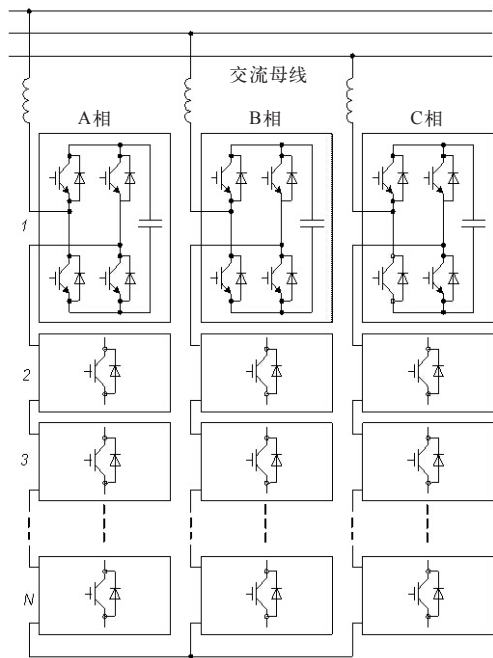


图1 链式STATCOM的主电路拓扑示意图

该拓扑结构具有配置灵活，易于模块化等优点，理论上可以无限增加级联链节单元数量，以适应不同的电压等级，可以根据实际需求决定是否配置网侧耦合变压器，从体积、成本和技术可靠性来说，是较适合于电网应用的拓扑形式。

1.2 链式STATCOM控制系统架构

链式STATCOM的控制系统图如图2所示，主要由处于低电位的控制保护系统、阀控系统VCU装置和处于高电位的换流器组成，三者之间通过光纤进行信息交互。

链式STATCOM在电网的应用中，一般控制保护系统为双套配置，实现主从控制和保护冗余；阀控VCU装置为分相配置，与处于高电位的换流链一一对应，并同时与控制保护（主从）系统进行实时通信。

1.3 链式STATCOM阀控系统功能需求

根据上文对链式STATCOM主电路拓扑和控制系统架构的分析，阀控系统需具备以下几个功能：

1) 与控制保护系统通信：主要指阀控系统能

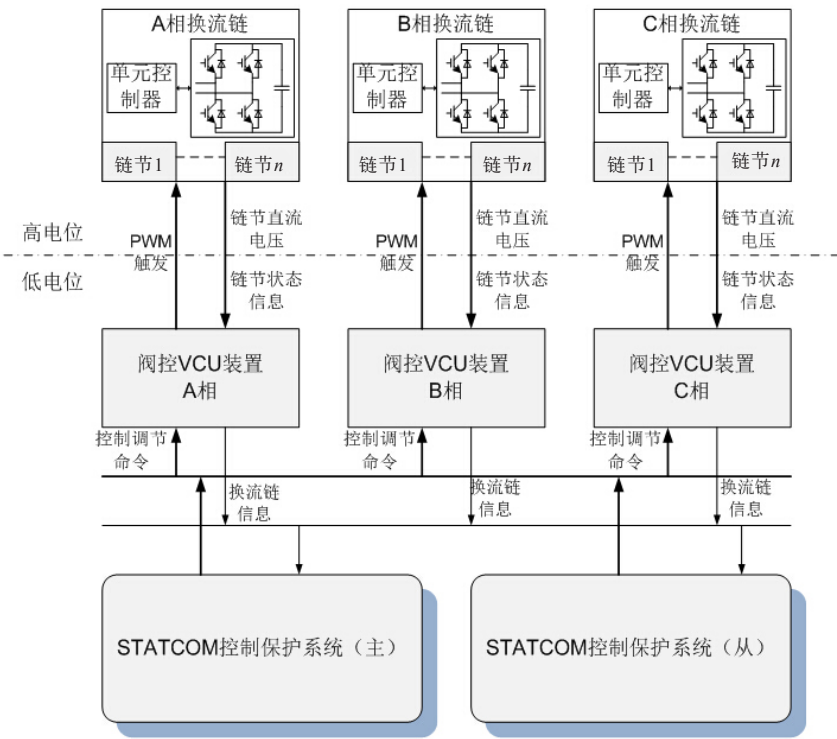


图2 链式STATCOM的控制系统

够接收来自控制保护（主从）系统的控制调节命令，并将换流链状态等信息汇总发送给控制保护系统。

2) 与换流链通信：每相应完成与至少48个链节单元控制器进行通信，采用两光纤方式，接收来自单元控制器的链节直流电压和链节状态信息，并进行相应的逻辑判断，给单元控制器下发封锁、解锁、旁路和复位等命令，下发PWM触发信号。

3) 底层控制调节算法：主要实现每个链节的电容器直流电压均衡实时控制和冗余逻辑。

4) 载波移相SPWM调制：主要实现不同链节

的载波水平移相和每个链节的二重化PWM调制，从而在主电路输出端叠加得到多电平PWM波形，有效地减小输出谐波。

此外，为了便于现场故障分析，还需具备故障录波功能，记录故障时各链节直流电压波形及相关状态信息。

2 阀控系统设计和实现

2.1 VCU装置整体设计

依据前面对链式STATCOM阀控系统的功能需求，设计的VCU装置硬件原理示意图如图3所示，主要由阀控CPU板、光接口板、电源板和总

线背板4种板卡构成，装置机箱尺寸大小为标准6U机箱。

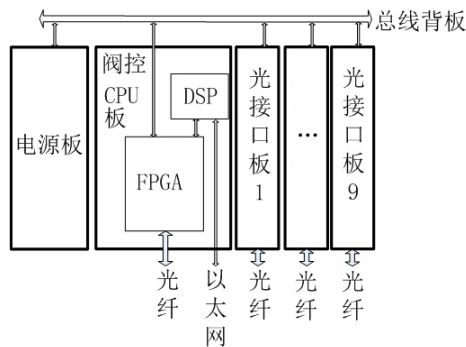


图2 链式STATCOM的控制系统图

阀控CPU板是VCU的核心部件，它通过光纤与控制保护系统实现串行同步通信，通信速率达20 Mbit/s。一方面，阀控CPU板接收控制保护系统下发的控制命令，通过FPGA完成命令解析、链节直流电压均衡控制、载波移相及PWM产生及编码，并以串行同步通信方式输出PWM指令；另一方面，阀控CPU板汇总由光接口板通过背板总线上传的链节直流电压信息和状态信息，将这些信息通过光纤上报给控制保护系统，必要时产生PWM保护动作命令。此外，阀控CPU板还负责故障录波。

光接口板是VCU与链节单元控制器的连接通道，每块光接口板配有8对收发光纤，可以控制8个单元控制器，每台VCU最多可以配置9块光接口板，最多可以控制72个单元控制器。光接口板的主要工作是接收来自阀控CPU板的下发的串行同步通信信号，将其转换为光信号从光纤发出；同时接收单元控制器上传的直流电压和状态信息光信号，将其转换为电信号送给阀控CPU板。

电源板为VCU装置提供工作电源。电源板设计为独立双电源，形成双电源冗余备份供电，以此来提高装置的运行稳定性。

总线背板是VCU装置各板卡间互联信号总线通道，主要是负责阀控CPU板与光接口板之间的点对点通信。为了保证众多通信信号的信息完整性，在各插件板卡上的背板端子附近设计了端接电路，各路信号通路通信速率最高可达10 Mbit/s。

2.2 阀控CPU板硬件设计

阀控CPU板采用DSP+FPGA架构，主要包

括一块FPGA芯片、一块DSP芯片、7对光电转换器、电平转换及端接电路、以太网接口芯片、看门狗电路、大容量FLASH芯片和PROM配置芯片等。其中FPGA芯片选用Xilinx公司的XC3S5000芯片^[7]，DSP芯片选用TI公司的TMS320F28335^[8]。板卡的硬件原理示意图如图4所示。

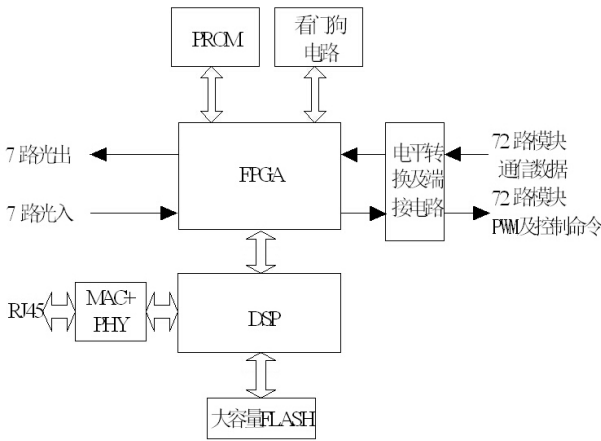


图4 硬件原理示意图

阀控CPU板FPGA部分主要功能：通信的编解码，进行链节单元控制器通信故障判断，链节直流电压均衡控制，PWM波产生，看门狗处理等。

DSP部分主要功能：接收FPGA传输过来的实时状态量，实现出口逻辑和冗余逻辑处理，实现故障录波功能，并完成与上位机的通信等。

2.3 VCU装置主要软件设计

VCU装置的核心软件功能由FPGA程序实现，程序逻辑模块如图5所示，主要包括：光纤串行通信解码及信息解析模块、串行通信编码输出模块、主从逻辑判断模块、PWM计算模块、命令编码模块和双口RAM通信模块。

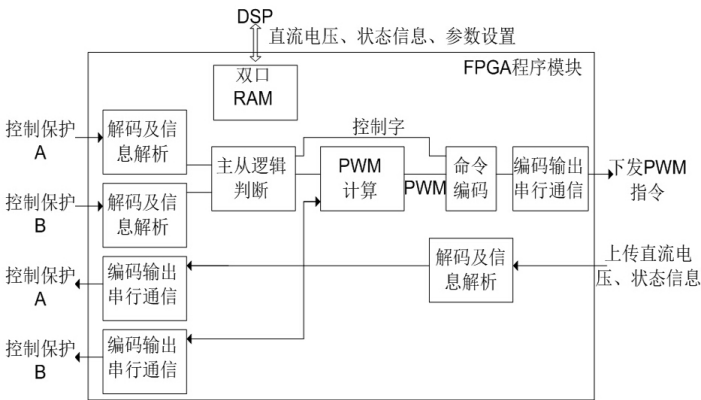


图5 程序逻辑模块示意图

光纤串行通信解码、信息解析和编码输出模块共同构成了光纤串行同步通信收发器，用以实现与控制保护系统和链节系统的通信，采用曼切斯特编解码方式：①控制保护系统通信，主要负责接收控制保护系统下发的控制命令报文，并实时解析获取指令电压值、控制字等信息，同时汇总直流电压和状态信息，组成数据报文上传给控制保护系统；②换流链通信，主要负责接收链节单元控制器上送的电容直流电压采集数据和链节状态信息，同时将计算出的PWM指令等信息进行编码以串行通信方式下发给单元控制器。光纤串行同步通信采用点对点模式，数据报文透明传输，每帧数据均采用CRC校验，同时对帧头、帧长度和帧的完整性进行实时判断，并且依据通信异常情况采取告警、封锁等措施，保证了阀控装置与控制保护系统、链节系统之间报文传输的实时性和高可靠性。

PWM计算模块接收主从逻辑判断模块解析得出的调制电压信息，综合链节直流电压信息，完成链节的直流电压均衡控制，通过计算和时序逻辑产生H桥臂的PWM脉冲波形。其中，链节H桥的PWM调制方式采用文献[6]中提到的二重化PWM调制方式，即H桥的左桥臂开关触发指令由调制波指令与三角载波比较产生，而右桥臂开关触发指令由反相调制波指令与三角载波比较产生。

命令编码模块主要是将H桥链节功率模块的PWM输出、控制指令进行统一编码，通过4位二进制数据位来表示10种控制指令，见表。这种通过命令编码，并通过串行同步通信方式传递控制指令的方式，相比FSK方式，具有带宽利用率高的特点，同时可对数据的正确性进行实时的判断，具有更高的可靠性。同时串行通信接收和发送端均采用FPGA等逻辑器件，其编解码过程所产生的延时是固定的，且较小。

3 实验结果

该VCU装置应用于35 kV STATCOM中，补偿容量为±60 Mvar，换流链IGBT功率模块开关频率300 Hz。图6是低压物理模型试验过程中的测试波形，其中，通道1为阀控PWM指令编码后下发

表 链式STATCOM的控制系统

编码	指令
0001	封锁
0010	封锁+复位
0100	封锁+放电
0110	封锁+旁路
1000	封锁+旁路+放电
1001	封锁+旁路+复位
1010	解锁+左上开通+右上关断
1100	解锁+左上关断+右上开通
1101	解锁+右上开通+左上开通
1110	解锁+右上关断+左上关断

的串行命令数据波形，通道2为阀控输出的左桥臂PWM指令波形，通道3、通道4分别为链节单元控制器解析的左右桥臂PWM波形。

可以看到，链节单元控制器可以正确还原出PWM波形。通过比较通道3和通道2的波形，可以看到单元控制器解析出的PWM波形与VCU理论输出的PWM波形之间延时小，固定为8 μs。从通道3和通道4的波形可以看到获得的左右桥臂PWM波形符合二重化PWM波形特征。

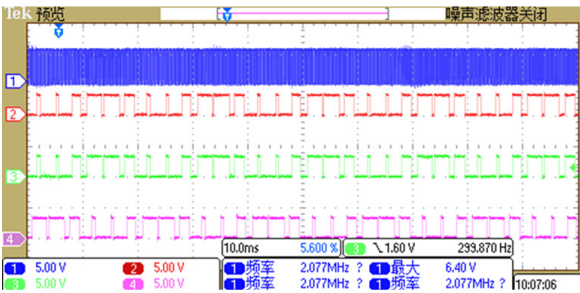


图6 低压物理模型试验过程中的测试波形

图7给出了低压物理模型在开环输出时的系统电压和输出电压波形，其中通道1为系统电压波形，通道3为换流链开环电压输出波形。可以看到输出电压谐波含量小，正弦性好。

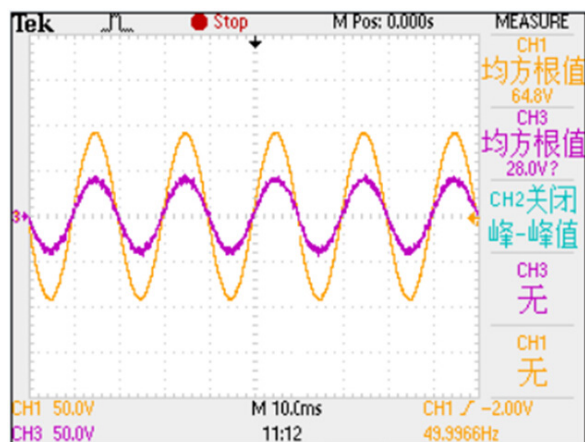


图7 FPGA程序逻辑模块示意图

4 结束语

该VCU装置采用DSP+FPGA架构,以FPGA芯片为控制核心,充分利用其强大的并行处理能力及其内部RAM资源等,实现了多达70多对串行收发通信,可接入多达72个链节单元控制器,满足35 kV电压等级及以上的大容量STATCOM的应用需求。

参考文献

- [1] DL/T 1193-2012, 柔性输电术语[S].1998.
- [2] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [3] 电压源换流器(VSC)技术的最新发展及其在FACTS领域中的应用[D]. 第四届电能质量及柔性输电技术研讨会, 2015:307-314.
- [4] Peng F Z, Lai J S. A multilevel voltage-source inverter

(上接第853页)

- [J].电力系统自动化,2001,25(2):64-65.
- [10]廖轶,刘东.异步调用的SCADA系统海量信息处理方法[J].电力系统自动化,2006,30(20):41-44,107.
- [11]潘国伟,宋玮,王相南,等.发布/订阅模式消息中间件在SCADA系统中的应用[J].电网技术,2008,32(18):77-81.

作者简介

曹志刚(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究电力系统

with separate dc sources for static var generation[J].
IEEE Transation on Industry Application, 1996,
32(5): 1130-1138.

- [5] Jose Rodriguez, Jih Sheng Lai, Peng F Z. Multilevel inverters: a Survey of topologies controls and applications[J].IEEE Transactions on Industry Application, 2002, 49(4): 724-738.
- [6] 周京华, 苏彦民, 詹雄. 多单元串联多电平逆变电源的控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2003, 37(4):49-51.
- [7] Xilinx. Spartan-3 FPGA family datasheet[Z]. DS099. Xilinx,2013,6:27.
- [8] TI. TMS320F28335 datasheet[Z]. ZHCS889M, TI, August, 2012

作者简介

刘慧文(1979-06)，男，硕士，高级工程师，主要研究电力电子及柔性交流输电技术、电力系统继电保护。

詹雄 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力电子及柔性交流输电技术、电力系统继电保护。

张佃青(1984-),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力电子及柔性交流输电技术、电力系统继电保护。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑：朱历)

统自动化、用电。

水乐(1984—),女,本科,助理工程师,主要研究电力系统自动化。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑：朱历)