Vol.44 No.4 Apr. 2024

基于ARM架构柔性直流控制保护系统的 低链路延时优化设计

黄如海1,董云龙1,张 进2,仲 浩1,邹铁锐3,齐慧文4

(1. 南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2. 国家电网有限公司特高压事业部,北京 100031;

3. 国网经济技术研究院有限公司,北京 102209;4. 国网山西省电力公司经济技术研究院,山西 太原 030021)

摘要:基于进阶精简指令集机器(ARM)架构多核处理器芯片设计了柔性直流控制保护系统新一代平台,提出 适用于柔性直流输电的4层控制系统通用架构,给出新平台控制保护主机配置方案及功能配置原则。建立 换流器高频阻抗简化模型,推导得到负阻尼频率与控制链路延时的数学关系。分析柔性直流控制系统的链 路延时构成,提出一种链路复用的在线延时测试方法;基于多核架构与高速接口,研究控制系统的低延时优 化方案。最后,在基于实际工程参数的实时仿真系统中,对ARM架构新平台开展了功能和性能测试,并验证 了低延时优化方案的有效性。

关键词:柔性直流输电;继电保护;控制保护;ARM架构;控制链路延时;高频阻抗;负阻尼 **中图分类号:**TM77 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202309006

0 引言

近年来,柔性直流输电技术在风电送出、电网互 联、无源网络供电、远距离大容量输电等场景实现了 大量工程应用^[14]。目前欧洲的新建直流输电工程基 本都采用了柔性直流技术,国内已投运柔性直流工 程的总输电容量接近全球的一半,并且在单回输电 容量、输电电压等级、输电距离等方面引领世界^[5]。 柔性直流输电技术在惯量支撑、潮流优化、新能源集 中送出等方面将发挥更多、更大的作用,是打造新型 电力系统的重要技术手段^[6]。国内柔性直流工程的 主要设备多由国内厂商供货^[7,9],但是具体到柔性直 流控制保护装置的核心芯片,如数字信号处理器 (digital signal process,DSP)芯片、大容量的现场可 编程逻辑门阵列等仍依赖进口。

随着国内芯片半导体产业的发展,在特高压直流输电领域已研制出采用国产核心芯片的控制保护功能样机^[10],但在更高性能要求的柔性直流控制保护领域尚未见文献报道。目前国产DSP架构处理器芯片的性能与国外产品相比还存在较大差距,无法直接应用到柔性直流控制保护中以实现芯片级的替代。控制链路延时是造成柔性直流换流器高频阻抗呈现负阻的重要因素之一^[11-14],文献[11-12]针对全频段建立的交流阻抗详细模型较为复杂,高频阻抗与控制延时的数学关系不够直观;文献[14]建立的高频阻抗简化模型仅考虑前馈电压影响,在工业界

收稿日期:2023-02-13;修回日期:2023-07-21 在线出版日期:2023-09-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5100-202256001A-1-1-ZN) Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(5100-202256001A-1-1-ZN) 已解决前馈电压问题后不再适用。减小控制链路延时仍是降低高频谐振风险的有效手段。目前已有文献对阀控系统的链路延时开展了专项分析和研究^[15],但控制保护系统的链路延时尚无优化方案。此外,工程上采用的控制系统链路延时测试方法均为离线测试^[15-16],需要在系统输入施加真实电气量且部分装置运行特殊程序以实现阀全部子模块同步投退,不能在工程现场复验。

本文首先介绍进阶精简指令集机器(advanced risc machine, ARM)架构柔性直流控制保护平台的 软、硬件设计原则,给出新架构主机的典型配置方 案;然后基于该平台设计柔性直流控制保护系统,研 究控制保护系统架构和主机功能配置原则;通过建 立换流器高频阻抗简化模型,推导出负阻尼频率与 控制延时的数学关系;接着开展柔性直流控制链路 延时研究,提出控制系统链路延时在线测试方法和 极控装置链路延时优化方案;最后在实时数字仿真 系统(real time digital simulation system, RTDS)上 对整个平台的功能和性能进行验证。

1 ARM 架构柔性直流控制保护平台设计

柔性直流控制保护系统为系统监视与控制层、 控制保护设备层和现场接口(input/output,I/O) 层^[17]3层分布式结构,如附录A图A1所示。其中: 系统监视与控制层主要实现换流站设备的控制和监 视;控制保护设备层实现柔性直流系统的控制和保护 功能;现场I/O层实现与交/直流一次设备的接口。

柔性直流控制保护系统中最为核心的是控制保 护设备层的控保主机装置,新平台应按整体性能不 低于既有平台的要求设计,同时具备后续芯片升级 的高兼容性。由于ARM架构开放性高、性能优异、 生态完善,国内厂商基于ARM架构自研的处理器芯 片已在嵌入式领域具备了一定的市场规模,选用成熟 的ARM架构处理器芯片是目前新平台的较优方案。

1.1 ARM 架构平台的软、硬件设计

基于ARM架构的柔性直流控制保护平台的总体设计原则和实现方案如下。

1)硬件架构可灵活扩展。

柔性直流控制保护主机的接口数量多、形式多 样,需要设计可灵活扩展的主机硬件架构。ARM架 构平台沿用多板卡、分布式的硬件架构,选用多核处 理器降低了板卡数量,并配置光纤接口板卡用来扩 展装置的对外接口,背板总线采用高速总线进行板 间数据交互。

2)选用高性能、高可靠性芯片。

柔性直流控制保护主机的逻辑复杂、实时性要 求高、运算量大,需要选用高性能、高可靠性的芯片。 以ARM处理器为例,选择的某芯片集成有4个64位 核,主频超2GHz,工作温度范围为-40~85℃,片内、 片外内存均支持硬件纠错功能。

3)支持高速通信。

柔性直流控制保护主机与阀控装置传输的数据 量多、实时性要求高,主机应配置高速通信接口以降 低传输时延,详细分析见第3章。针对ARM架构平 台设计支持多个千兆光纤通信口的信号处理板卡, 可满足与阀控和其他重要设备的高速通信需求。

4)完全冗余的通信架构。

柔性直流控制保护主机的通信总线采用冗余化 设计,各类主机间的通信(如站间、极间、主机间、系 统间等)应按照完全冗余的设计原则,将各通道配置 在不同的板卡中,防止单一元件故障导致通信异常。 ARM架构平台采用主从通道设计的方式,从硬件上 确保了数据通道完全独立。2块信号处理板卡分别 接收数据,并通过高速总线进行实时数据交换。

5)软件模块化解耦设计。

柔性直流控制保护主机的软件架构不应依赖具体的硬件,能够较为方便地实现应用程序在不同平台间的移植和适配。ARM架构平台软件沿用已成熟应用的统一高性能控制保护平台(unified advanced platform for protection and control,UAPC)软件,其由系统软件、工具软件和应用层软件3个独立解耦的模块构成。其中:系统软件是板卡的底层驱动;工具软件是应用功能和系统软件的接口;应用层软件是具体控制保护逻辑。各模块功能解耦,易于软件的移植和适配。

1.2 ARM 架构平台主机设计

基于ARM架构平台,柔性直流控制保护主机的 典型配置方案如图1所示,其包含电源板、管理板、 信号处理板和光纤接口板。

$ \frown$					-		
电 源 板 1	管理板	信号 处理 板1	光纤 接口 板1	信号 处理 板2		电 源 板 2	

图1 柔性直流控制保护主机的典型配置

Fig.1 Typical configuration of VSC-HVDC control and protection device

1)装置电源。装置配置有完全冗余的双重化电 源板卡,单一电源失电不影响装置的正常运行。

2)管理板。管理板主要负责对后台的网络通 信、装置录波等功能。

3)信号处理板和光纤接口板。信号处理板负责 实现控制保护算法,光纤接口板用于扩展信号处理 板的接口;当1块信号处理板运算能力不足或需要 通信硬件冗余时,可配置2块信号处理板。

4)开入/开出板。在一些集成度要求高的应用 场合,主机还可选配开入/开出板以接入重要的开 关量信号。高压/特高压柔性直流工程中一般配 置有独立的I/O装置,开入/开出板默认不配置。

2 ARM 架构控制保护系统配置方案

2.1 控制系统配置方案

柔性直流控制系统按"将控制功能尽量放在较 低层次,避免上层控制故障对下层控制影响"的思 路,同时满足高压直流输电和特高压直流电网的功 能要求^[18],设计为站间协调控制(station coordination control, SCC) 层、双极控制层、极控制(polar control and protection, PCP) 层和换流器控制(converter control and protection, CCP) 层的4层通用结 构,如图2所示。其中:站间协调控制层的主要功能 是对多站进行总的协调,包括直流电压范围控制、直 流电网潮流优化控制、线路过负荷控制、控制模式、 接地方式选择等;双极控制层的主要功能是产生极 控制层的控制指令,包括极功率分配、站顺序控制、 孤岛控制等;极控制层的主要功能是产生换流器控 制层的控制指令,包括多阀组协调控制、裕度下垂控 制、极顺序控制等:换流器控制层的主要功能是实现 换流器的基本控制策略,包括阀组顺序控制、启停控 制、过负荷控制、内环电流控制等。

按照柔性直流拓扑的不同,控制系统配置的主 机类型和数量也不同,且1台主机可集成多个层级 的功能。换流器控制层的功能配置在与阀组一一对 应的CCP主机(多阀组/极)或集成在PCP主机(单 阀组/极)中,双极控制层和极控制层的功能集成配 置在PCP主机中,SCC层的功能集成在PCP主机(两 端)或者SCC主机(多端)中。控制系统的所有主机 均采用主备双套冗余配置,各装置可按1.2节所述的 典型配置方案进行配置。



图2 柔性直流控制系统通用架构



2.2 保护系统配置方案

220

柔性直流保护系统按保护区域可划分为联接变 保护、交流联络区保护、换流器区保护、极区保护和 直流线路区保护,其中联接变保护配置单独的元件 保护,其余保护均配置在直流保护中。直流保护也 可1台主机覆盖多个区域保护。在特高压柔性直流 应用场合,直流保护一般配置有换流器保护(converter protection, CPR)、极保护(polar protection, PPR)和直流线路保护(DC line protection, DLP)。

直流保护按工程广泛采用的三取二或完全双重 化2种方案进行设计。

以PPR为例,当采用三取二方案时,配置有三重 PPR主机和2套极三取二(polar 2 of 3,P2F)装置: 3套保护均运行时,同时有2套保护动作才能出口; 1套或2套保护退出时,剩余任一套保护动作即出 口。该方案下,PPR主机装置可采用1.2节所述的典 型配置方案。

当采用完全双重化方案时,配置2套PPR 主机: 每套保护采用"启动+保护"的出口逻辑,任一套运行 的保护动作即可出口。该方案下,PPR 主机装置需 在1.2节所述的典型配置方案基础上新增光纤接口 板2,信号处理板1和光纤接口板1构成启动板卡, 信号处理板2和光纤接口板2构成保护板卡,从而实 现启动和保护回路的硬件完全独立。

2.3 程序功能配置原则

ARM 架构平台与现有平台的主机按一对一兼 容替换设计,2个平台主机配置的功能完全一致且 程序能够互相转换。以移植既有平台工程程序为 例,ARM 架构控制保护主机的程序功能配置遵循以 下原则:

1)各个功能模块整体移植、不做拆分,分散至不同的核或板卡中;

2)逻辑关联紧密的功能模块分配至同一核内,

逻辑关系较弱的功能模块可分配至不同的核或板 卡中;

3)分配至同一核内的多个功能模块,各模块执行的先后顺序应保持与现有平台一致;

4)各核的程序执行量尽可能均匀,降低装置的 整体负载率;

5)冗余通信功能模块分别配置在2块信号处理 板卡内,实现冗余通道的硬件独立。

3 低控制链路延时

3.1 控制链路延时的影响分析

柔性直流系统的功率外环截止频率较低,在高频阻抗建模时可以忽略,简化后仅考虑电流内环的换流器阻抗 Z_{MMC}的s域通用传递函数如式(1)所示^[14]。

$$Z_{\rm MMC} = \frac{sL_{\rm eq} + Z_{\rm base}G_{\rm delay}(s)G_{\rm if}(s)G_{\rm i}(s)}{1 - G_{\rm delay}(s)G_{\rm vf}(s)}$$
(1)

式中: L_{eq} 为控制点至阀中点之间的等效电感(忽略电阻); Z_{base} 为基波额定阻抗; $G_{delay}(s)$ 为控制链路总延时环节; $G_{if}(s)$ 为内环电流的滤波环节; $G_{i}(s)$ 为内环电流的滤波环节; $G_{i}(s)$ 为内环电流的滤波环节。

由式(1)可以看出,前馈电压的滤波环节位于分母,对阻抗影响较大,早期部分柔性直流工程即因前 馈电压未加滤波或滤波不足出现了高频谐振。目前 工程中 *G_{vf}(s)*一般设置有数字二阶低通滤波器或非 线性滤波器,高频段可忽略;*G_{if}(s)*一般不设置数字 滤波器以提高动态响应速度,采样硬件滤波对控制 带宽内的频段影响可忽略;*G_i(s)*采用比例积分调节 器,其积分环节在高频段所起的作用很小。各环节 的传递函数在高频段如式(2)所示。

$$\begin{cases}
G_{delay}(s) = e^{-sT_d} = \cos(\omega T_d) - j\sin(\omega T_d) \\
G_i(s) = k_p + k_1 / s \approx k_p \\
G_{vf}(s) \approx 0 \\
G_{if}(s) \approx 1
\end{cases}$$
(2)

式中: T_a 为控制链路总延时; k_P 和 k_1 分别为内环电流 控制器的比例系数和积分系数; ω 为角频率。

将式(2)代入式(1),简化后的换流器阻抗计算 公式如式(3)所示。

$$Z_{\rm MMC} = sL_{\rm eq} + k_{\rm P}Z_{\rm base} e^{-sT_{\rm d}} = k_{\rm P}Z_{\rm base} \cos(\omega T_{\rm d}) + j[\omega L_{\rm eq} - k_{\rm P}Z_{\rm base} \sin(\omega T_{\rm d})]$$
(3)

式(3)的实部为负,则柔性直流系统呈现负阻尼 特性。因此,柔性直流系统出现负阻的频率 f_i满足:

$$f_z \in \left(\frac{4N+1}{4T_d}, \frac{4N+3}{4T_d}\right) \quad N=0, 1, 2, \cdots$$
 (4)

根据式(3),不同链路延时下的阻抗幅频曲线如 图3所示。由图3和式(4)可知,控制链路延时越低, 柔性直流系统出现负阻的频率越高。如控制系统的 链路延时 T_d 从250 µs降至150 µs,柔性直流出现负 阻的最低频率由1000 Hz提高至1667 Hz,即可能振 荡的谐波次数(基波50 Hz)由20次推高至33次以 上,大幅降低了系统高频谐振的风险。此外,系统的 振荡频率点高,控制系统只需通过设计合理的闭环 控制带宽或在 $G_{if}(s)$ 中增加简单的低通滤波器即可 有效抑制,避免配置复杂的附加阻尼控制器。



图3 不同链路延时下换流器高频阻抗特性

Fig.3 Characteristics of VSC high-frequency impedance under different link delay

柔性直流的控制链路延时与控制保护系统架构 和装置性能密切相关。本节结合ARM架构平台硬 件,对控制链路延时性能开展专项优化,从源头降低 系统高频谐振风险。

3.2 控制链路延时构成

柔性直流输电系统完整的控制链路延时如图4 所示,包括测量单元延时、控制单元(含极控单元、阀 控单元和子模块控制板)处理延时、换流阀转换延 时,以及各单元间的传输延时等,具体为:测量单元 采样及模数转换延时T₁;测量单元与极控单元间通





Fig.4 Delay composition of control link

信延时 T_2 ;极控单元控制算法执行延时 T_3 ;极控单元 与阀控单元间通信延时 T_4 ;阀控单元算法执行延时 T_5 ; 阀控单元与功率子模块控制 (submodule control, SMC)板通信延时 T_6 ;功率模块开关器件的开通 / 关 断延时 T_7 ;换流阀将控制信号转成模拟量的固有延 时 T_8 ,其可等效为零阶保持器(zero-order hold,ZOH)。

控制链路总延时 T_{d} 和控制系统全链路延时 T_{s} 的计算公式如式(5)所示。

 $\begin{cases} T_{d} = \sum_{i=1}^{8} T_{i} \\ T_{s} = \sum_{i=1}^{7} T_{i} \end{cases}$ (5)

控制系统的全链路延时并不包含换流阀转换延时 *T*_s,但其任务周期决定了 *T*_s的大小,*T*_s约为换流阀控制周期的一半。

3.3 控制系统链路延时在线测试方法

本文提出一种柔性直流控制系统链路延时在线 测试方法如图5所示,具体的实现步骤如下:

1)测量单元在其输出数据中增加一路自产正弦测试量;

2)极控单元检测该测试量的正向过零点,当过 零点值小于检测阈值时,生成固定时长的脉冲信号;

3)极控单元在其输出给阀控单元的数据中增加 生成的脉冲信号;

4)阀控单元检测该脉冲信号的上升/下降沿, 生成虚拟子模块驱动信号,通过阀控接口装置的专 用测试口输出;

5)链路延时测试装置接入含测试量信号和虚拟 子模块信号,将测试量和虚拟子模块驱动信号均转 换成同相位的电平信号输出至示波器观测。



本节所提方法新增的测试量和脉冲量均占用原数据中的备用位,新增的检测逻辑算法简单,对链路延时的影响可以忽略。整个控制系统仅需引出2根光纤至测试设备,测试过程不改变实际控制逻辑,因此不会影响柔性直流系统正常运行。

控制系统全链路延时T。如式(6)所示,本节所提

方法通过在线测量得到的链路延时 T_{online} 只包含一部分延时;由于测量单元与 SMC 驱动程序相对固定, T_{online} 可通过离线测量得到。

$$\begin{cases} T_{s} = T_{online} + T_{offline} \\ T_{online} = \sum_{i=3}^{6} T_{i} \\ T_{offline} = T_{1} + T_{2} + T_{7} \end{cases}$$
(6)

将步骤2)改为极控单元检测实际测量值的正向过零点,同时将阀控接口装置的测试口接至功率 SMC测试板卡,本节所提方法即可用于全链路延时的离线测试,从而实现控制系统链路延时测试方法的统一化。

3.4 极控单元延时优化

在图4所示的控制链路环节中,仅极控单元属 于控制保护系统设备,其他单元均属于I/O层设 备。本文重点研究控制保护系统设备(极控单元)相 关链路的延时优化方法。

优化前的极控单元控制链路延时构成如图6(a) 所示,*T*₃为从接收完测量数据时刻到发送调制数据 时刻的总时间,具体包括:接收完测量数据到任务周 期开始的耗时*T*₃₀、读取测量数据耗时*T*₃₁、执行控制 算法耗时*T*₃₂和等待发送耗时*T*₃₃。一般而言,极控 单元在周期结束时向阀控系统发送调制数据,能够 保证发送的数据已更新至最新。

对上述各个耗时环节开展专项优化,优化后的 极控单元链路延时构成如图6(b)所示,具体方法 如下。

1)任务周期和执行优化。

换流阀控制周期取决于所有控制装置的最慢任 务周期。因此各装置与链路延时相关的逻辑程序宜 配置在最快任务周期,且满足板卡负载率要求。考 虑到阀控单元的计算量大,极控单元的任务周期设 置与阀控任务周期一致。

针对ARM架构平台处理器多核且主频高的特点,将极控单元中与控制链路延时相关的核心逻辑 (读取内环电流数据和执行内环控制)布置在同一个 专用核上串行,可以有效缩短 T₃₁和 T₃₂;在内环控制 算法执行后,留一定防抖时间后即发送调制数据,保 证发送周期稳定的同时又可大幅降低 T₃₃。其他的 测量量读取和控制逻辑布置在该核发送调制数据后 执行,或者布置在其他核执行,从而降低核负载率。

2)装置同步和通信优化。

极控单元和测量单元是异步系统,极控单元周 期开始时刻与接收完测量数据时刻的时间差*T*₃₀是 波动的,最大为一个测量发送周期。一般测量单元 的发送频率远高于极控单元的处理频率且可能采用 多装置分相采集数据,极控单元无法直接跟随测量 数据进行同步。采用与极控单元反向同步的方式 (需从极控单元引入同步信号给测量单元),可实现 多个测量单元和极控单元的同步,从而降低延时*T*₃₀ (留一定的防抖时间)。

装置间的数据传输延时 T_{tran} 可由数据长度 L_{data} 和通信速率I计算得到,如式(7)所示。

$$T_{\rm tran} = L_{\rm data} / I \tag{7}$$

以某工程为例,采用电力系统常用的IEC60044-8 协议,极控单元发给阀控单元的数据总帧长为 38 byte,通信速率为20 Mbit / s,通信耗时为15.2 μs; 将通信协议升级为千兆以太网协议,数据总帧长 120 byte,通信速率为1.25 Gbit / s,通信耗时为0.8 μs, 可显著降低传输延时 T₄。此外,阀控单元也应与极 控单元保持同步,从而降低阀控单元的延时 T₅₀

在有条件的应用场合,测量单元发送给极控单 元的数据也建议采用千兆通信,缩短测量单元与极 控单元的传输延时T₂。

4 系统验证

采用的某公司最新 UAPC 平台的某工程系统 (参数如附录 A 表 A1 所示),在 ARM 架构平台的控 制保护样机上对该工程的程序进行了完整移植和适 配,并在 RTDS上开展了 2 个平台控制保护系统的仿 真对比试验。经测试, ARM 架构平台相比 UAPC 平 台,主机最大负载率降低了 17%,支持更快的任务周





期和实现更多逻辑功能。

相关的控制保护试验波形如附录A图A2所示。 由图可见,按照本文的功能配置原则进行主机程序 移植和适配后,2个不同架构平台的控制保护性能 基本一致。

在测量单元和极控单元输出数据的备用位分别 设置自产正弦信号和解析该信号产生的方波信号 (解析参数与离线测量保持一致),从阀控接口装置 的最后一个光口输出虚拟子模块信号,在链路延时 测试装置的2个光口分别接入测量单元输出信号 (可切换选择真实采样数据或自产测试量)和阀控输 出信号。在ARM架构平台上应用本文提出的控制 链路延时在线测试方法和常规离线测试方法得到的 试验波形如附录A图A3所示。由图可知,两者测试 结果完全一致。

受制于阀控系统,极控主机的任务周期与阀控 主机设置一致,为50 µs。按照阀控传输延时15.2 µs 和3.4节中的方法进行计算可知,极控主机延时在未 优化前最短为65.2 µs。

在2个平台分别本文实施研究的优化措施以比较2个平台的主机性能差异,极控主机链路延时测试波形如图7所示。图中每格对应的时间为5μs。 ARM架构平台的极控制主机延时约为24μs,相比未优化前降低了约63%,相比优化后的UAPC平台降低了约41%,由此可见采用ARM架构平台的主机延时更短。



图 7 极控制主机延时测试波形

Fig.7 Testing waveforms of PCP device delay

5 结论

本文基于ARM架构平台设计了柔性直流控制 保护系统,建立了换流器高频阻抗简化模型,对控制 主机的链路延时开展了优化研究,并在RTDS上完 成了系统的功能和性能验证,所得结论如下:

1)ARM架构柔性直流控制保护主机对外接口 完全兼容已有平台,能够实现装置级替换,功能和性 能与已有平台基本一致,在链路延时和装置负载率 上更优;

2)换流器负阻尼频率与控制链路延时成反比,

缩短控制链路延时仍是降低高频振荡风险的有效 手段;

3)提出的控制链路延时在线测试方法不影响柔 性直流系统运行,并可实现在线/离线测试方法统 一化,所提延时优化措施可有效降低极控主机的链 路延时。

ARM 架构的低延时柔性直流控制保护系统已 具备工程化条件,运行可靠性还需在实际工程应用 中进一步检验。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22): 1-8.

XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22):1-8.

- [2] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
 RAO Hong,ZHOU Yuebin,LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(1):1-11.
- [3] 李国庆,王延旭,辛业春,等. 基于附加级联陷波滤波器的 MMC-HVDC多频段谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2023, 43(4):10-15.

LI Guoqing, WANG Yanxu, XIN Yechun, et al. Multi-band resonance suppression strategy for MMC-HVDC based on additional cascaded notch filters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4):10-15.

[4] 李清,孟潇潇,王强钢,等.柔性直流输电系统接入交流电网的 高频谐振风险运行方式辨识[J].电力自动化设备,2022,42 (8):206-214.

LI Qing, MENG Xiaoxiao, WANG Qianggang, et al. Identification of high-frequency resonance risk operation mode for flexible DC transmission system connected to AC grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 206-214.

- [5] 蔡旭,杨仁炘,周剑桥,等.海上风电直流送出与并网技术综述
 [J].电力系统自动化,2021,45(21):2-22.
 CAI Xu,YANG Renxin,ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(21):2-22.
- [6] 饶宏,黄伟煌,郭知非,等.柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J].高电压技术,2022,48(9):3347-3355.
 RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhifei, et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid[J]. High Voltage Engineering,2022,48(9):3347-3355.
- [7] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
 DONG Yunlong,LING Weijia,TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J].
 Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):169-175.
- [8]陈东,乐波,梅念,等.±320 kV厦门双极柔性直流输电工程系 统设计[J].电力系统自动化,2018,42(14):180-185.
 CHEN Dong,YUE Bo,MEI Nian, et al. System design of Xiamen bipolar VSC-HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(14):180-185.

- [9]姚宏洋,文卫兵,谢晔源,等.±800 kV柔性直流换流阀阀塔均 压优化设计[J].电力工程技术,2021,40(2):178-184.
 YAO Hongyang, WEN Weibing, XIE Yeyuan, et al. Optimization design of electric field distribution for ±800 kV VSC valve
 [J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(2):178-184.
- [10] 沈天骄,仲浩,王永平,等. 自主可控特高压直流控制保护系统 设计与研发[J]. 电气技术,2022,23(3):50-56.
 SHEN Tianjiao,ZHONG Hao,WANG Yongping, et al. Design and development of autonomous and controllable UHVDC control and protection system[J]. Electrical Engineering,2022,23 (3):50-56.
- [11] 王宇,刘崇茹,李庚银,等.考虑电网阻抗耦合的模块化多电平 换流器交直流侧阻抗通用计算方法[J].中国电机工程学报, 2022,42(1):302-319.
 WANG Yu,LIU Chongru,LI Gengyin,et al. Generic AC / DCside impedance calculation method for modular multilevel converters considering grid impedance coupling [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1):302-319.
- [12] ZHU Jianhang, HU Jiabing, LIN Lei, et al. High-frequency oscillation mechanism analysis and suppression method of VSC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(9):8892-8896.
- [13] 邹常跃,陈俊,许树楷,等.长控制链路延时特征下柔性直流输 电系统动态性能改善方法[J].电网技术,2017,41(10):3216-3222.

ZOU Changyue, CHEN Jun, XU Shukai, et al. Dynamic performance optimization of VSC-HVDC considering its long delay [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3216-3222.

- [14] 侯延琦,刘崇茹,王宇,等. 柔性直流输电系统高频振荡抑制策 略研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3741-3750.
 HOU Yanqi,LIU Chongru,WANG Yu,et al. Research on the suppression strategy of high-frequency resonance for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(11):3741-3750.
- [15] 胡煜,陈俊,邹常跃,等. 特高压柔直阀控系统链路延时分析与

测试研究[J]. 全球能源互联网,2020,3(2):190-198.

HU Yu, CHEN Jun, ZOU Changyue, et al. Experimental investigation on communication link delay of valve control system of ultra high-voltage VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 190-198.

- [16] 周谷庆,张杰,仲浩,等. 柔性直流控制系统链路延时测量方法 研究[J]. 浙江电力,2021,40(2):33-37.
 ZHOU Guqing, ZHANG Jie, ZHONG Hao, et al. Research on measurement method of link delay in VSC-HVDC control system[J]. Zhejiang Electric Power,2021,40(2):33-37.
- [17] 董云龙,胡兆庆,田杰,等. 多端柔性直流控制保护系统架构和 策略[J]. 南方能源建设,2016,3(2):21-26.
 DONG Yunlong, HU Zhaoqing, TIAN Jie, et al. Frame of control protection system and control strategy implement in multiterminal VSC-HVDC system[J]. Southern Energy Construction, 2016,3(2):21-26.
- [18] 胡兆庆,董云龙,王佳成,等. 高压柔性直流电网多端控制系统 架构和控制策略[J]. 全球能源互联网,2018,1(4):461-470.
 HU Zhaoqing, DONG Yunlong, WANG Jiacheng, et al. Flexible DC grid multi-terminal control and protection system framework and control strategy[J]. Journal of Global Energy interconnection,2018,1(4):461-470.

作者简介:

黄如海(1987—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向 为混合直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术等 (E-mail:huangrh@nrec.com);

董云龙(1977—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研 究方向为高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术 等(E-mail:dongyl@nrec.com);

张 进(1977—),男,教授级高级工程师,博士,主要研 究方向为直流输电等先进输电技术(E-mail:jin-zhang@sgcc. com.cn)。

(编辑 任思思)

Optimization design of low link delay for VSC-HVDC control and protection system based on ARM architecture

HUANG Ruhai¹, DONG Yunlong¹, ZHANG Jin², ZHONG Hao¹, ZOU Tierui³, QI Huiwen⁴

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. UHV Transmission Business Unit of State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

4. State Grid Shanxi Economic and Technical Research Institute, Taiyuan 030021, China)

Abstract: Based on advanced risc machine (ARM) multi-core processor, a new platform of voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) control and protection system is designed. The common structure of four-layer control system for VSC-HVDC is proposed, and the configuration scheme and functional configuration principles of the control and protection devices of new platform are given. Then, a simplified high-frequency impedance model of the converter is established and the mathematical relation-ship between negative damping frequency and control link delay is derived. Then, the link delay composition of VSC-HVDC control system is analyzed, and a link multiplex method for the control link delay online test is proposed. Based on the multi-core architecture and the high-speed interface, the optimization schemes for reducing the control system delay are studied. In the real-time simulation system(RTDS) based on the parameters of a practical project, the function and performance of the new platform are tested, and the effectiveness of the low-latency optimization scheme is verified.

Key words: VSC-HVDC power transmission; relay protection; control and protection; ARM architecture; control link delay; high frequency impedance; negative damping







Fig.A1 Distributed configuration of VSC-HVDC control and protection system











	表 A1	RTDS 仿真系统参数
Table A1	Param	eters of RTDS simulation system

序号	系统参数	额定值
1	直流电压/kV	600
2	直流功率/MW	1500
3	无功功率/MW	450
4	网侧交流电压/ kV	525