

团 体 标 准

T/CSEE 0278—2021

基于 MMC 的柔性直流输电系统实时 仿真建模方法导则

Guide for real-time simulation modeling of VSC-HVDC
based on modular multilevel converter



2021-09-17 发布

2021-12-01 实施

中国电机工程学会 发 布

团 体 标 准

基于 MMC 的柔性直流输电系统实时
仿真建模方法导则

T/CSEE 0278—2021

*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天泽润科贸有限公司

*

2022 年 5 月第一版 2022 年 5 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 1.25 印张 32 千字

*

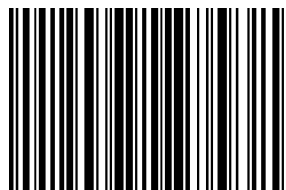
统一书号 155198 • 4184 定价 32.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电机工程学会官方微信



155198.4184

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
5 柔性直流输电系统实时仿真建模的一般要求和应用范围	2
5.1 柔性直流输电系统实时仿真建模的一般要求	2
5.2 柔性直流输电系统实时仿真模型的应用范围	3
6 柔性直流输电系统一次设备的建模要求	3
6.1 模块化多电平换流器	3
6.2 桥臂电抗器	3
6.3 直流电抗器	3
6.4 柔直变压器	3
6.5 交流断路器	4
6.6 启动回路	4
6.7 直流线路及接地极线路	4
6.8 直流场其他设备	4
7 柔性直流输电系统二次控制保护系统的建模要求	5
7.1 控制保护装置硬件在环建模要求	5
7.2 控制保护系统全数字仿真建模要求	6
8 交流系统的建模要求	6
8.1 一般要求	6
8.2 交流系统动态等值建模要求	6
9 故障建模要求	6
9.1 一般要求	6
9.2 交流系统故障建模要求	6
9.3 柔性直流启动回路与换流器区故障建模要求	7
9.4 直流场与直流线路故障建模要求	7
10 柔性直流输电系统实时仿真模型校核	7
10.1 实时仿真系统中控制保护装置接口精度校核	7
10.2 主回路元件参数校验	8
10.3 通过闭环实时仿真试验校核	8
10.4 通过离线电磁暂态仿真模型校验	8
10.5 通过现场试验、运行的录波数据校验主回路元件参数	8
10.6 控制保护程序版本管理与更新	8
附录 A（资料性） 模块化多电平换流器模型示意图	9
附录 B（资料性） 典型的柔性直流控制保护装置硬件在环实时仿真系统结构示意图	12
附录 C（资料性） 故障建模要求	13
参考文献	15

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准管理办法（暂行）》的要求，依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：南方电网科学研究院有限责任公司、中国南方电网电力调度控制中心、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司、国网经济技术研究院有限公司、中国电力科学研究院有限公司。

本文件主要起草人：郭琦、林雪华、饶宏、张星、蒋维勇、陈钦磊、李捷、谢惠藩、郭海平、彭光强、朱喆、陈德扬、刘志江、罗超、李书勇、廖梦君。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条 1 号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

基于 MMC 的柔性直流输电系统实时仿真建模方法导则

1 范围

本文件规定了基于 MMC 的柔性直流输电系统实时仿真建模的一般要求和应用范围，一次设备和二次控制保护系统、交流系统、故障建模要求，提出了柔性直流输电系统实时仿真模型校核方法。

本文件适用于基于 MMC 的柔性直流输电系统试验及研究用的实时仿真建模。基于 MMC 的柔性直流配电系统的实时仿真建模也可参考本文件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 30553 基于电压源换流器的高压直流输电

GB/T 34118 高压直流系统用电压源换流器术语

GB/T 37010 柔性直流输电换流阀技术规范

GB/T 37011 柔性直流输电用变压器技术规范

DL/T 1234 电力系统安全稳定计算技术规范

DL/T 1526 柔性直流输电工程系统试验规程

3 术语和定义

GB/T 30553、GB/T 34118、GB/T 37010、GB/T 37011 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 GB/T 30553、GB/T 34118、GB/T 37010、GB/T 37011 中的某些术语和定义。

3.1

实时仿真 real-time simulation

仿真过程中，仿真结果与实际系统同步，仿真速度满足实时需求。本文件中，实时仿真指实时数字仿真。

3.2

控制保护装置硬件在环 control and protection hardware in the loop

控制保护装置通过相应的输入、输出接口与实时仿真器闭环连接。

3.3

电压源换流器 voltage source converter; VSC

一种交流/直流换流器，由一个集中的直流电容器或换流器各桥臂内的多个分散式直流电容器提供平滑的直流电压。

[来源：GB/T 34118—2017，5.3]

3.4

模块化多电平换流器 modular multilevel converter; MMC

每个 VSC 阀由一定数量的独立单相电压源换流器串联组成的多电平换流器。

[来源：GB/T 30553—2014，3.4.7]

3.5

阀基控制设备 valve base control unit; VBC

处于地电位的电子设备，用于在换流器控制系统和电压源换流器阀之间进行光电转换。

[来源：GB/T 37010—2018，3.19]

3.6

子模块 submodule

模块化多电平换流器标准组件，其中每个开关单元仅由一个 IGBT-二极管对组成。

[来源：GB/T 34118—2017，7.13，有修改]

3.7

旁路开关 bypass switch

故障情况下，将子模块快速旁路退出运行的保护装置。

[来源：GB/T 37010—2018，3.13，有修改]

3.8

均压电阻器 grading resistor

子模块充电启动期间，用于直流电容器静态均压的电阻器。

[来源：GB/T 37010—2018，3.14，有修改]

3.9

保护晶闸管 protective thyristor

用于换流阀子模块（或子单元）过电流保护的晶闸管（适用时）。

[来源：GB/T 37010—2018，3.16]

3.10

柔性直流输电用变压器 transformer for VSC-HVDC

在交流系统连接点与一个或多个电压源换流器单元之间传输电能的变压器。

注：柔性直流输电用变压器也简称为柔直变压器。在不同的应用场所，柔直变压器亦称为“电力变压器”或“换流变压器”。

[来源：GB/T 37011—2018，3.1.5]

3.11

脉冲分配屏 VBC trigger signal distribution

阀基控制设备中用于与换流阀直接连接，分发触发脉冲的环节。

4 符号和缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ERTB/ERTS：大地回线转换开关（earth return transfer breaker/earth return transfer switch）

HSS：高速开关（high speed switch）

HVDC：高压直流（high voltage direct current）

IGBT：绝缘栅双极型晶体管（insulated gate bipolar transistor）

MRTB：金属回线转换开关（metallic return transfer breaker）

5 柔性直流输电系统实时仿真建模的一般要求和应用范围

5.1 柔性直流输电系统实时仿真建模的一般要求

5.1.1 考虑仿真资源的合理分配，宜对直流一次回路进行简化，但所做的简化不应影响工程直流控制保护的功能和性能测试。

5.1.2 控制保护装置硬件在环的仿真系统，实时仿真器输出至控制保护装置的数据采集回路的误差不应超过实际工程测量设备的误差。

5.1.3 实时仿真器宜具备外部设备的数字信号接口、模拟信号及光信号接口，以及相关的接口设备与接口模型。

5.1.4 实时仿真器宜具备模拟模块化多电平换流器以及配套的 VBC 接口，并具备配套的仿真模型。

5.1.5 模块化多电平换流器模型的实时仿真步长不宜大于 $2.5\ \mu\text{s}$ ，其他模型的实时仿真步长不宜大于 $100\ \mu\text{s}$ 。宜合理设置不同步长接口元件的参数，以尽量减小解耦误差。

5.2 柔性直流输电系统实时仿真模型的应用范围

柔性直流输电系统实时仿真模型的应用范围，包括但不限于：

- a) 柔性直流输电工程控制保护系统功能试验与动态性能试验。
- b) 柔性直流输电系统的故障分析以及反事故措施验证。
- c) 柔性直流输电系统运行分析与控制保护策略优化验证。
- d) 柔性直流输电系统配套安全稳定控制系统仿真试验及策略优化。
- e) 含柔性直流的交直流系统相互影响、运行分析与决策支持研究。

6 柔性直流输电系统一次设备的建模要求

6.1 模块化多电平换流器

6.1.1 模块化多电平换流器模型子模块拓扑应与实际工程一致。

6.1.2 模块化多电平换流器模型除模拟子模块中的全控开关器件及电容器外，还应包含均压电阻器 [采用电阻模拟，还可包括用于旁路均压电阻器的串联开关（如有）、旁路开关和保护晶闸管（如有），其中子模块旁路开关控制信号宜为持续电平信号。

6.1.3 模块化多电平换流器模型宜具备模拟典型功率模块级故障的功能。

6.1.4 模块化多电平换流器模型设置参数至少包括子模块电容值、子模块电阻值、功率器件缓冲回路参数、子模块的额定电压和额定电流、子模块类型、子模块个数等。

6.1.5 模块化多电平换流器模型宜具备对阀段电压、任意子模块电压、控制脉冲等进行监测的功能。

6.1.6 模块化多电平换流器模型示意图参见附录 A。

6.2 桥臂电抗器

桥臂电抗器可单独采用电感模型模拟，也可与模块化多电平换流器封装在一个模型中模拟。应根据实际工程设置桥臂电抗器的电感参数，宜在模型中设置桥臂电抗器的损耗电阻。

6.3 直流电抗器

直流电抗器应根据工程实际配置位置进行相应的建模，可采用电感模型模拟，应根据实际工程设置直流电抗器的电感参数，宜在模型中设置直流电抗器的损耗电阻。

6.4 柔直变压器

6.4.1 柔直变压器的分接开关通常按三相模拟，也可根据研究需要按三个单相开关模拟。

6.4.2 柔直变压器模型的参数宜包含网侧额定线电压、阀侧额定线电压、联结组别、容量、铜耗、漏抗、分接开关最高档位线电压（折算至一次侧）和最低档位线电压（折算至一次侧）、分接开关级数及调节步长等。

6.4.3 柔直变压器模型宜模拟铁芯饱和特性。

6.5 交流断路器

- 6.5.1 应至少模拟柔直变压器进线断路器。
- 6.5.2 宜模拟保护信号经过操作箱到断路器的实际分/合时间。
- 6.5.3 交流断路器可按分相或三相模拟。
- 6.5.4 应合理设置断路器的通态电阻和断态电阻，如无法获取具体参数，可采用典型参数。
- 6.5.5 交流断路器应根据工程配置情况 and 研究需求配置选相合闸功能或合闸电阻。
- 6.5.6 若需研究与断路器相关的动态性能，则宜精确搭建断路器的并联振荡回路和避雷器泄能回路。
- 6.5.7 应根据实际开关能力，设置交流断路器的灭弧电流参数。

6.6 启动回路

应建立模拟启动回路的电阻模型及其并联的旁路开关模型。启动电阻阻值应与工程实际一致，应根据工程实际设置旁路开关模型的开断电阻及允许开断电流。

6.7 直流线路及接地极线路

- 6.7.1 宜采用分布参数、相域频变模型模拟直流线路及接地极线路。
- 6.7.2 应按实际工程线路类型选择导线类型，一般包括架空线及电缆等类型。
- 6.7.3 应采用实际工程线路参数设置架空线模型参数，至少包括导线数量及位置、避雷线数量及位置、杆塔高度、架空线弧垂、导线直流电阻和线型、分裂导线数量、分裂导线间距、避雷线直流电阻和线型等。
- 6.7.4 应采用实际工程线路参数设置电缆模型参数，应包括线缆敷设参数、层数、每层半径、导体电阻率与相对磁导率、绝缘层介电常数与相对磁导率、大地电阻率与磁导率等参数。
- 6.7.5 直流线路模型应能模拟高次谐波以及故障时的行波特性，且设定线路模型的高低频率参数时，应满足直流和高频特性模拟需求。
- 6.7.6 接地极线路模型应根据实际工程接地极实测电阻值设置接地电阻值；考虑共用接地极时，宜模拟接地极控制开关。
- 6.7.7 宜搭建直流线路及接地极线路监测逻辑，校验线路模型的正确性。

6.8 直流场其他设备

- 6.8.1 应根据实际直流系统的阻波器配置，建立阻波器模型，设置相应的阻断电抗器、阻断电容器及阻断避雷器等参数。
- 6.8.2 应根据实际直流系统的冲击电容器配置，建立冲击电容器模型。电容元件宜串接一个小电阻（阻值可选 $0.01\ \Omega$ ）以防止暂态工况下可能出现的数值振荡。
- 6.8.3 宜根据实际直流系统的避雷器配置，建立中性母线区的避雷器模型，其中避雷器模型的伏安特性曲线参数可采用分段线性化或指数函数拟合的方式设置。
- 6.8.4 应根据实际直流系统的高速直流转换开关配置，建立详细的高速直流转换开关模型，包括 MRTB、ERTB/ERTS、HSS（如有）等；除了设置高速直流转换开关的通态电阻和断态电阻之外，还应模拟开关振荡回路、设置可开断电流参数。
- 6.8.5 应根据直流工程的直流测点配置，在模型中模拟相应的直流电压和直流电流测点的一次设备。
- 6.8.6 根据直流工程直流侧隔离开关配置、研究范围与内容的需求，应在模型中模拟高压直流母线开关、中性母线开关、阀组旁路开关等开关。开关的分合时间应与实际直流工程保持一致。
- 6.8.7 应根据实际直流系统中直流断路器、直流耗能装置（如有）、故障限流器（如有）的配置情况建立详细模型，包括直流断路器、直流耗能装置、故障限流器的主回路模型及其控制保护模型。宜采用

硬件在环的方式建立直流断路器、直流耗能装置的控制保护模型。

7 柔性直流输电系统二次控制保护系统的建模要求

7.1 控制保护装置硬件在环建模要求

7.1.1 控制保护装置应具有与实时仿真设备交换模拟量、数字量数据的接口，应能接入实时仿真器形成控制闭环，典型的柔性直流控制保护装置硬件在环实时仿真系统结构示意图见附录 B。

7.1.2 柔性直流 VBC 应接入实时仿真系统，宜将脉冲分配屏接入实时仿真系统。

7.1.3 根据研究范围与内容的需求，可考虑配置冗余的直流控制保护装置（含 VBC）。

7.1.4 根据研究范围与内容的需求，可接入交流站控装置，含远端模块及合并单元的直流测量装置。

7.1.5 实时仿真系统与直流控制保护系统接口要求如下：

- a) 实时仿真系统应通过硬接线或光纤等方式与直流控制保护系统连接。
- b) 实时仿真系统应配置数字量输入接口板卡，通过电信号接入直流控制保护系统，用于接收直流控制保护系统输出的开关量信号，包含主要的断路器和隔离开关的分合命令，以及分接头档位升降命令等。开关量输入信号应模拟锁存功能，并应适当增加延时以防抖。
- c) 实时仿真系统应配置数字量输出接口板卡，通过电信号接入直流控制保护系统，用于输出开关量信号至直流控制保护系统，包含主要的断路器和隔离开关的分合状态、分接头档位信号等。
- d) 对于工程实际采自电磁式测量装置的测量量，实时仿真系统应配置模拟量输出接口板卡，测量量经模拟量输出接口板卡后直接以电信号的形式接入直流控制保护系统，用于输出直流系统的交直流电压、电流测量量；也可根据实际研究需求，配置功率放大器，将实时仿真系统输出的小电压信号放大后再接入直流控制保护系统，功率放大器的额定输出电压、电流应与工程实际的互感器输出保持一致。应合理设置模拟量信号的变比和限幅，使模拟量板卡的输出精度和范围满足试验需求。模拟量（小电压信号）信号传输线应合理布置并考虑屏蔽以防止电磁干扰，应控制长度和线径以减少线损。
- e) 对于工程实际采自电子式测量装置的测量量，实时仿真系统应配置模拟量输出接口板卡，测量量经模拟量输出接口板卡后先转成光信号再接入直流控制保护系统，用于输出直流系统的电压和电流等测量量。应合理设置模拟量信号的变比和限幅，使模拟量板卡的输出精度和范围满足试验需求。模拟量（小电压信号）信号传输线应合理布置并考虑屏蔽以防止电磁干扰，应控制长度和线径以减少线损。
- f) 对于工程实际采自纯光式测量装置的测量量，实时仿真系统应配置纯光式测量系统接口板卡，通过光信号形式接入直流控制保护系统，宜采用工程实际通信协议与直流控制保护系统连接。

7.1.6 模块化多电平换流器模型与 VBC 仿真接口要求如下：

- a) 模块化多电平换流器模型与 VBC 仿真接口应采用光信号进行通信，宜采用成熟的高速通信协议，如 AURORA 通信协议等。
- b) 模块化多电平换流器模型与 VBC 仿真接口的通信速率应满足实际工程中 VBC 与柔性直流换流器的通信以及仿真模型计算步长的要求。
- c) 实时仿真系统与 VBC 仿真接口的传输周期可根据应用需求进行调整且相互独立（即上行和下行的传输周期可不同）。
- d) 从实时仿真系统到 VBC 仿真接口所传递的信号量应至少包含各子模块的电容电压、状态信息（包括 IGBT 导通状态、子模块故障状态等）等。
- e) 从 VBC 仿真接口到实时仿真系统所传递的信号量应至少包含各子模块各 IGBT 的触发控制字、旁路开关和保护晶闸管（如有）的触发控制字等。
- f) 实时仿真系统到 VBC 仿真接口应考虑不同桥臂之间采用不同光纤传输数据的同步问题，宜在

通信协议中增加同步数据信号，避免由于数据不同步导致的仿真精度问题。

- g) 根据研究范围与内容的需求，可将 1 个或多个桥臂的脉冲分配屏接入实时仿真系统，VBC 与实时仿真系统的接口宜适应脉冲分配屏接入与不接入的工况。当需要进行脉冲分配屏接入/不接入切换时，应无须重新修改 VBC 与实时仿真系统的接口程序。

7.2 控制保护系统全数字仿真建模要求

7.2.1 可在实时仿真器中实现柔性直流输电系统的主要控制保护功能建模，或基于通用计算机等实现控制保护功能自定义建模并闭环接入实时仿真系统。

7.2.2 柔性直流输电系统控制保护系统全数字仿真模型应按工程实际直流控制保护系统功能及参数定值建模，其核心控制保护功能应与工程实际保持一致，功能详细程度可根据实际研究需要确定。

8 交流系统的建模要求

8.1 一般要求

8.1.1 在直流控制保护功能研究中，交流系统可采用戴维南等值电压源模型模拟，模型的阻抗结构与阻抗参数根据系统运行方式及短路电流水平合理设置。

8.1.2 在直流控制保护动态性能研究中，宜建立详细的交流系统模型；在交直流相互影响的研究中，应建立详细的交流系统模型。若受仿真资源等条件限制，则可对交流系统进行动态等值。

8.2 交流系统动态等值建模要求

8.2.1 输电主干网架、变电站与发电厂模型应与方式数据一致。

8.2.2 等值前后母线电压水平、保留机组出力、系统总出力、总负荷及输电主干网架潮流分布应保持基本一致。系统的动态响应特性，如振荡模式、阻尼比、短路电流水平等，应保持基本一致。

8.2.3 在研究某些特定问题时，应保留相关区域的关键设备模型。

8.2.4 交流系统运行方式应从直流工程设计所采用的运行方式、电网年度运行方式与短期规划年的各种典型运行方式中选取，宜包括直流送受端电网所有 220 kV 及以上厂站、线路、负荷等元件，220 kV 以下电压等级元件宜归算至 220 kV 厂站母线。若柔性直流输电工程所接入交流系统的电压等级在 220 kV 以下，则应对所接入电压等级的电网进行建模。

8.2.5 在实际电网故障实时仿真分析中，应选取故障前电网运行方式。

8.2.6 交流系统元件模型与参数应符合 DL/T 1234 的规定。

9 故障建模要求

9.1 一般要求

9.1.1 故障类型宜覆盖工程可能出现的故障点和故障形式，结合直流工程保护配置及保护范围，建立故障模拟模型，模拟各类型故障以测试相应保护功能和定值。

9.1.2 可根据测试及研究需求，设置不同的故障类型、可变的故障持续时间、可变的故障接地电阻等。其中接地故障，分为经电阻接地和金属接地，金属接地故障一般可经 $0.1\ \Omega$ 电阻接地模拟。

9.1.3 宜建立故障触发时刻控制逻辑，以对比多次故障结果。

9.2 交流系统故障建模要求

如附录 C 中的图 C.1 所示，模拟的故障类型包括但不限于：

- a) 交流网侧单相接地（A、B、C 任意一相接地）。
- b) 交流网侧两相相间短路（AB、AC、BC 任意两相短路）。

- c) 交流网侧两相接地短路 (AB、AC、BC 任意两相接地)。
- d) 交流网侧三相接地短路 (ABC 三相接地)。
- e) 交流网侧多重故障或相继故障, 如 A 相接地 100 ms 后 AB 两相接地。

9.3 柔性直流启动回路与换流器区故障建模要求

如附录 C 中的图 C.2 所示, 模拟的故障类型包括但不限于:

- a) 柔直变压器网侧两相短路。
- b) 柔直变压器网侧单相或三相接地短路。
- c) 柔直变压器阀侧两相短路。
- d) 柔直变压器阀侧单相或三相接地短路。
- e) 换流阀桥臂电抗短路, 或匝间短路。
- f) 换流阀桥臂相间短路。
- g) 换流阀模块短路。
- h) 换流阀桥臂短路。
- i) 换流阀阀组短路。
- j) 换流阀桥臂接地短路。
- k) 换流阀上下桥臂中点接地短路。
- l) 子模块短路、子模块电容短路、子模块电容电压测量异常、子模块旁路开关拒动或误动、子模块脉冲触发故障等。
- m) 柔直变压器分接开关故障, 如分接开关拒动、档位信号异常等。
- n) 阀组旁路开关、阀组旁路隔刀等拒分或拒合。

9.4 直流场与直流线路故障建模要求

如附录 C 中的图 C.2 和图 C.3 所示, 模拟的故障类型包括但不限于:

- a) 高压直流母线阀侧接地 (直流电抗器靠阀侧)。
- b) 高压直流母线直流线路侧接地 (直流电抗器与直流线路电压 U_{DL} 测点间)。
- c) 低压直流母线阀侧接地 (直流电抗器靠阀侧)。
- d) 低压直流母线直流线路侧接地 (直流电抗器与直流中性母线电压 U_{DN} 测点间)。
- e) 低压直流母线至接地极线路出口处开路。
- f) 低压直流母线至接地极线路出口处接地。
- g) 接地极引线开路。
- h) 接地极引线接地, 接地电阻可调。
- i) 转换母线接地。
- j) 直流线路接地, 接地电阻可调, 直流线路可分段, 应能设置线路中不同位置故障点。
- k) 直流线路遭受雷击。
- l) 双极直流线路极间短路, 极间的过渡电阻可调。
- m) 若直流线路有汇流母线区, 则应设置汇流母线区接地故障, 接地电阻可调。
- n) 高压直流母线开关、中性母线开关拒分或拒合。

10 柔性直流输电系统实时仿真模型校核

10.1 实时仿真系统中控制保护装置接口精度校核

10.1.1 采用控制保护装置硬件在环的方式进行直流控制保护系统建模时, 应开展接口精度校核。

10.1.2 应根据接线图校核每一路开关量的信号通断，以免接错或漏接线。

10.1.3 应根据实时仿真器与控制保护系统（包括 VBC）的输入和输出范围，校核相应的电压、电流等模拟量，误差不应超过实际测量设备的误差。

10.2 主回路元件参数校验

10.2.1 应对照主回路设计图纸，核实模型是否都已经包含主回路主要元件，以免漏搭建元件。

10.2.2 应对照各元件的说明书或设计规范书，核实模型中各元件的参数是否正确。

10.3 通过闭环实时仿真试验校核

为检验柔性直流系统实时仿真模型整体功能和性能，根据待研究系统与研究内容，宜开展包括但不限于以下仿真试验：

- a) 换流器闭锁/解锁试验。
- b) 直流功率调整试验。
- c) 交流系统故障试验。
- d) 金属/大地回线转换试验（如有）。
- e) 直流保护试验。
- f) 直流线路故障试验。

10.4 通过离线电磁暂态仿真模型校验

可开展离线电磁暂态仿真模型与实时仿真模型的试验结果对比，宜开展包括但不限于以下仿真试验：

- a) 换流器闭锁/解锁试验。
- b) 直流功率调整试验。
- c) 交流系统故障试验。
- d) 金属/大地回线转换试验（如有）。
- e) 直流保护试验。
- f) 直流线路故障试验。

10.5 通过现场试验、运行的录波数据校验主回路元件参数

为了进一步确保模型仿真精度，可结合现场试验、实际运行故障暂态录波数据，开展同工况下的结果比对分析、校核。现场试验内容应符合 DL/T 1526 的规定。

10.6 控制保护程序版本管理与更新

为确保实时仿真系统中控制保护装置程序版本与实际工程中控制保护装置版本的同步性，保证实时仿真模型的准确性，宜开展柔性直流仿真试验系统的直流控制保护系统程序（包括 VBC 程序）版本的管理与定期追踪、更新。

附录 A
(资料性)

模块化多电平换流器模型示意图

典型的模块化多电平换流器模型结构示意图如图 A.1 和图 A.2 所示。半桥、全桥子模块拓扑结构示意图如图 A.3 和图 A.4 所示。

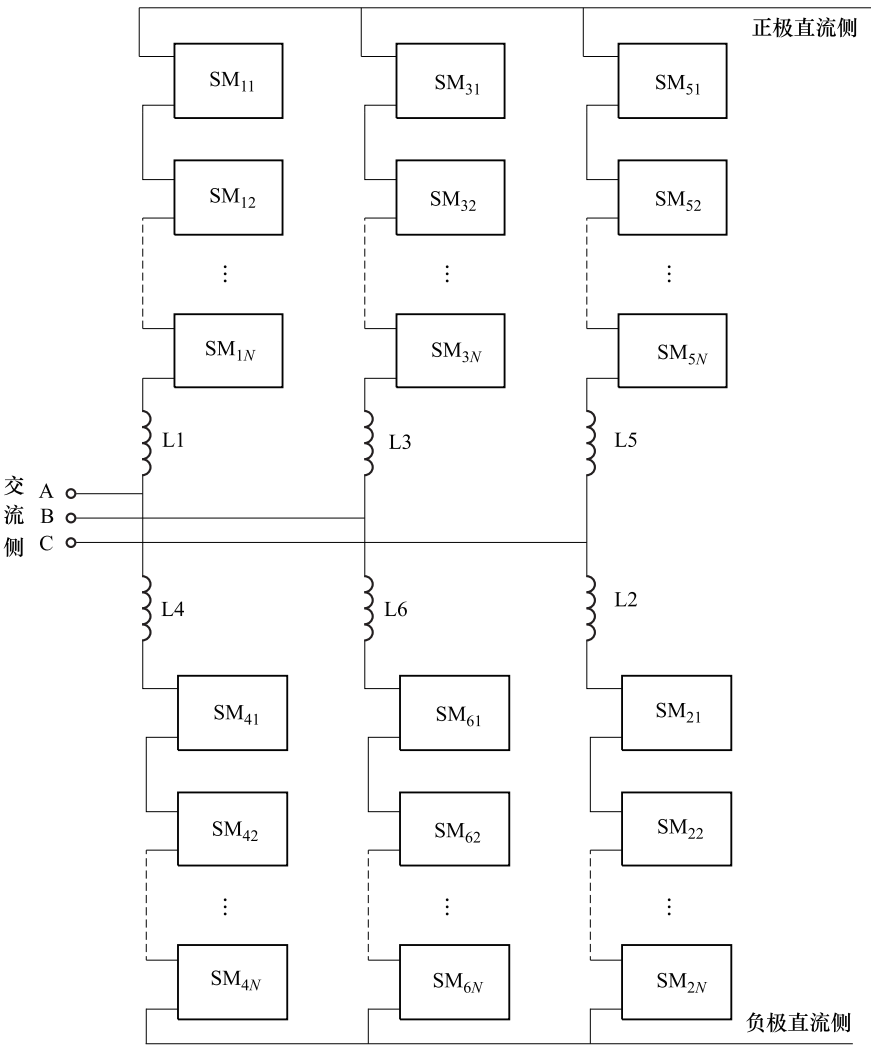


图 A.1 桥臂电抗器在交流侧的模块化多电平换流器模型结构示意图

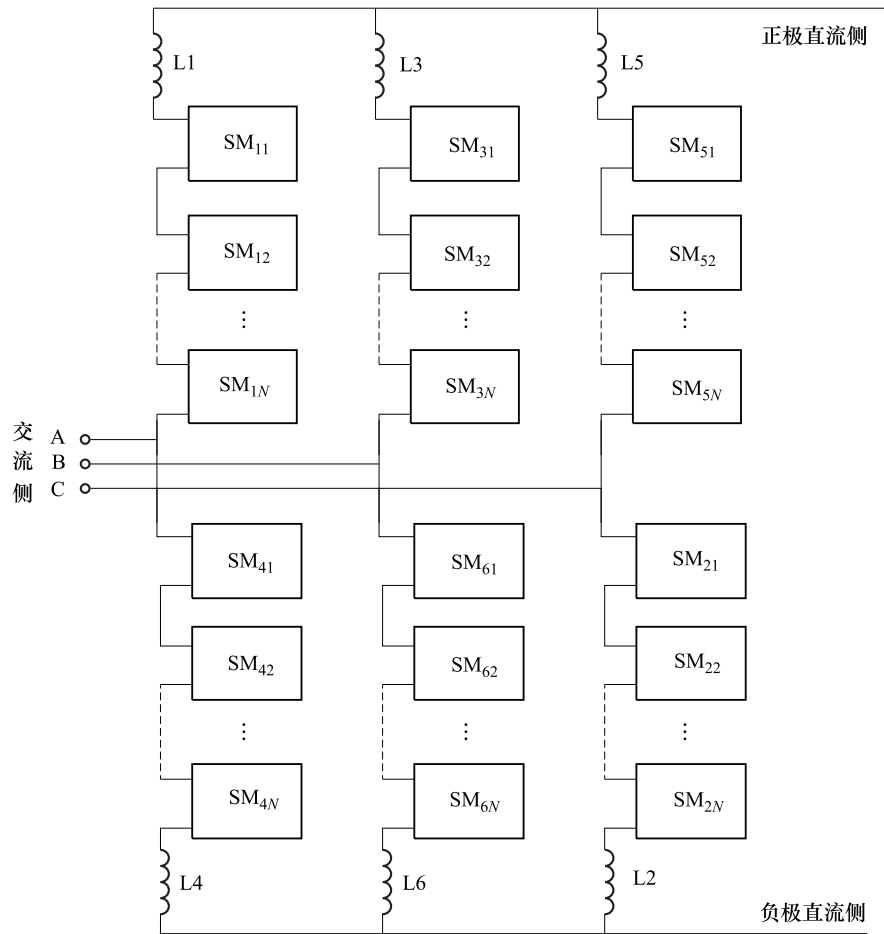


图 A.2 桥臂电抗器在直流侧的模块化多电平换流器模型结构示意图

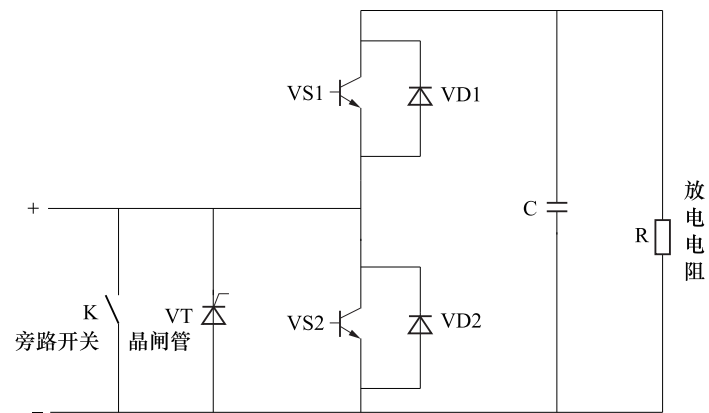


图 A.3 半桥子模块拓扑结构示意图

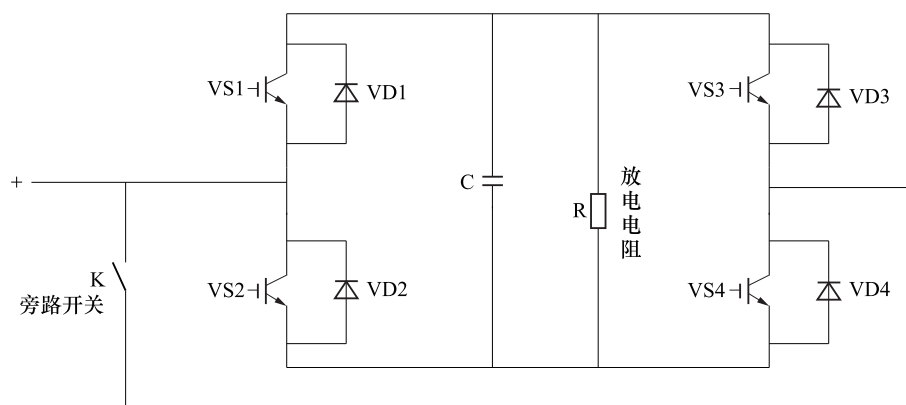


图 A.4 全桥子模块拓扑结构示意图

附 录 B
(资料性)

典型的柔性直流控制保护装置硬件在环实时仿真系统结构示意图

典型的柔性直流控制保护装置硬件在环实时仿真系统结构示意图如图 B.1 所示。

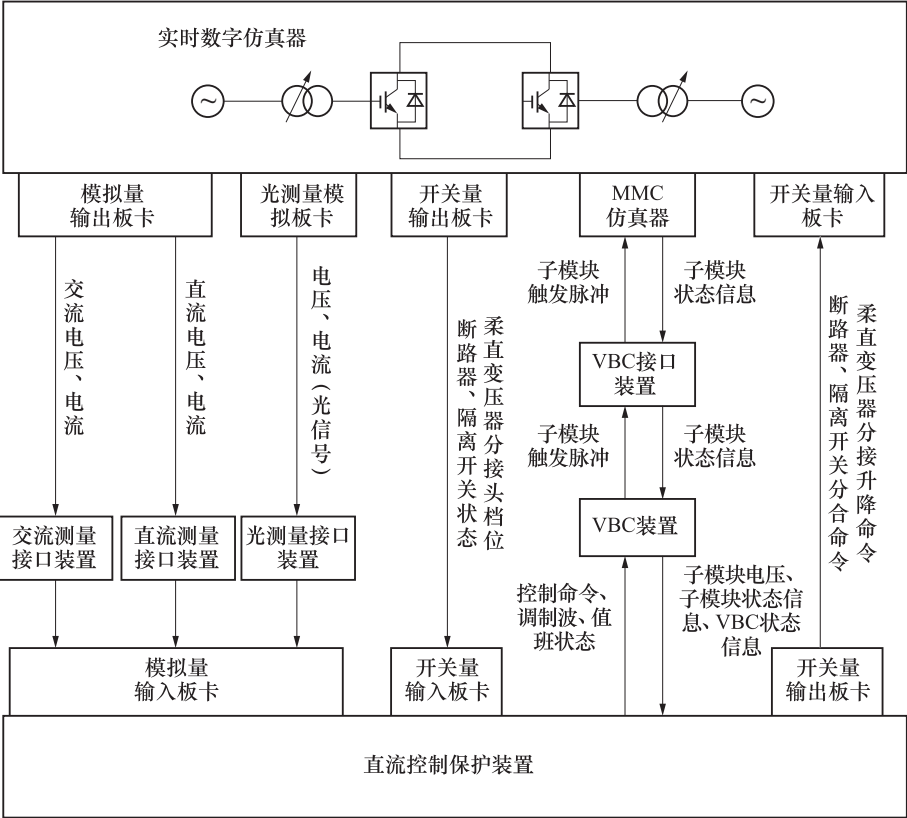


图 B.1 典型的柔性直流控制保护装置硬件在环实时仿真系统结构示意图

附录 C

(资料性)

故障建模要求

C.1 交流系统故障点示意图如图 C.1 所示,即单相接地故障 (F30)、相间短路故障 (F31)、两相接地故障 (F32)、三相接地故障 (F33)。

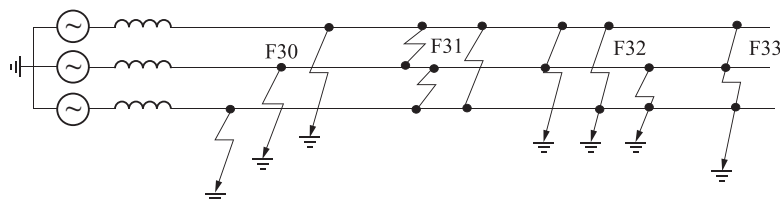


图 C.1 交流系统故障点示意图

C.2 柔性直流启动回路与换流器故障点示意图如图 C.2 所示,即柔直变压器网侧两相短路(F5H、F5L);柔直变压器网侧单相接地短路(F1H、F1L);柔直变压器阀侧两相短路(F2H、F2L);柔直变压器阀侧单相或三相接地短路(F4H、F26H、F4L、F26L);换流阀桥臂电抗短路或匝间短路(F23H、

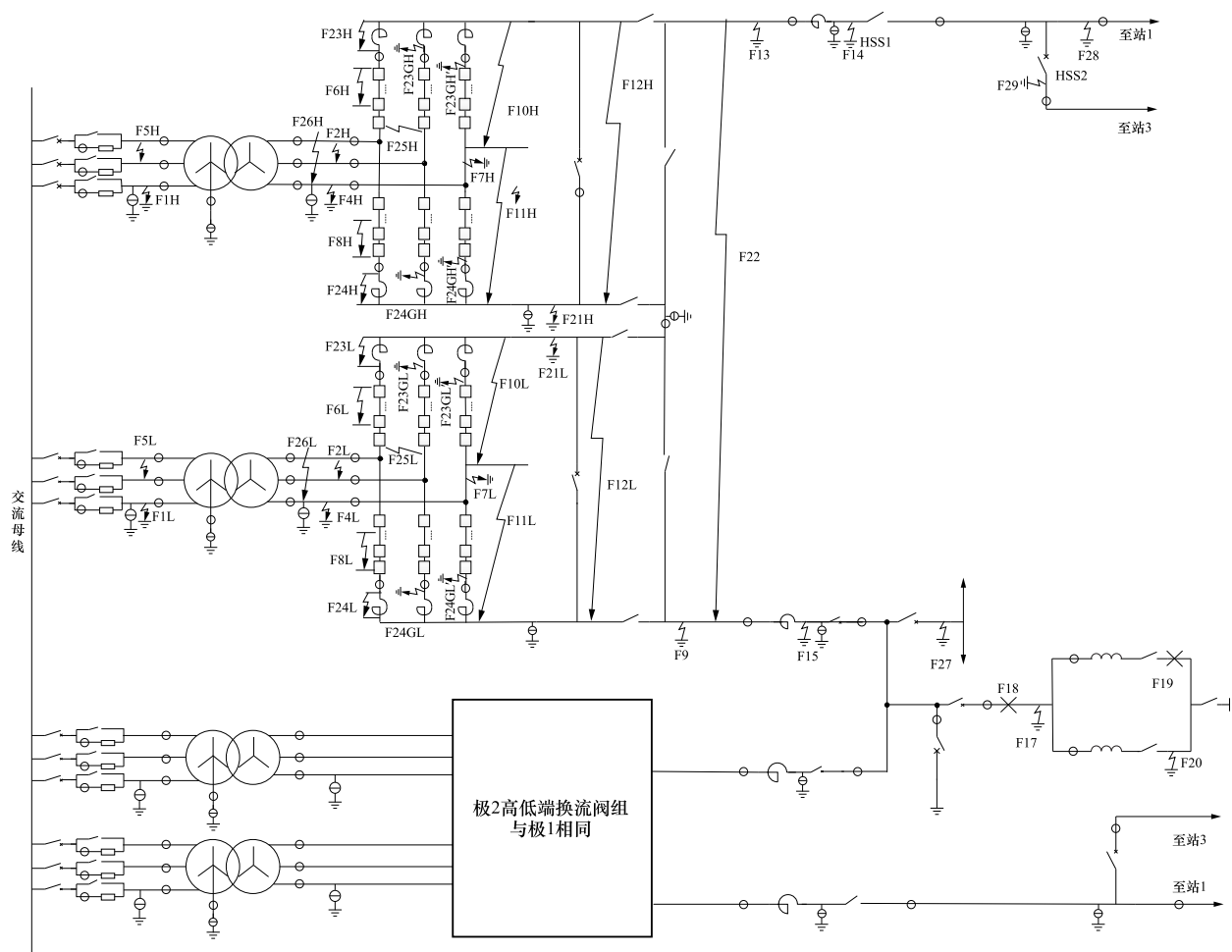


图 C.2 柔性直流启动回路与换流器故障点、直流场故障点示意图

F24H、F23L、F24L)；换流阀模块短路(F6H、F8H、F6L、F8L)；换流阀桥臂短路(F10H、F11H、F10L、F11L)；换流阀阀组短路(F12H、F12L)；换流阀桥臂相间短路(F25H、F25L)；换流阀桥臂接地短路(F23GH、F23GH'、F23GL、F23GL')；换流阀上下桥臂中点接地短路(F7H、F7L)。

C.3 直流场与直流线路、汇流母线故障点示意图如图 C.2 和图 C.3 所示，即高压直流母线阀侧接地(直流电抗器靠阀侧，F13)；高压直流母线直流线路侧接地(直流电抗器与直流线路电压 U_{DL} 测点间，F14)；低压直流母线阀侧接地(直流电抗器靠阀侧，F9)；低压直流母线直流线路侧接地(直流电抗器与直流中性母线电压 U_{DN} 测点间，F15)；低压直流母线至接地极线路出口处开路(F18)；低压直流母线至接地极线路出口处接地(F17)；接地极引线开路(F19)；接地极引线接地(F20)；转换母线接地(F27)；直流线路接地(F16、F16.1、F16.2、F16.3、F16.4)；双极直流线路极间短路(F16.5)；汇流母线区接地(F28、F29)。

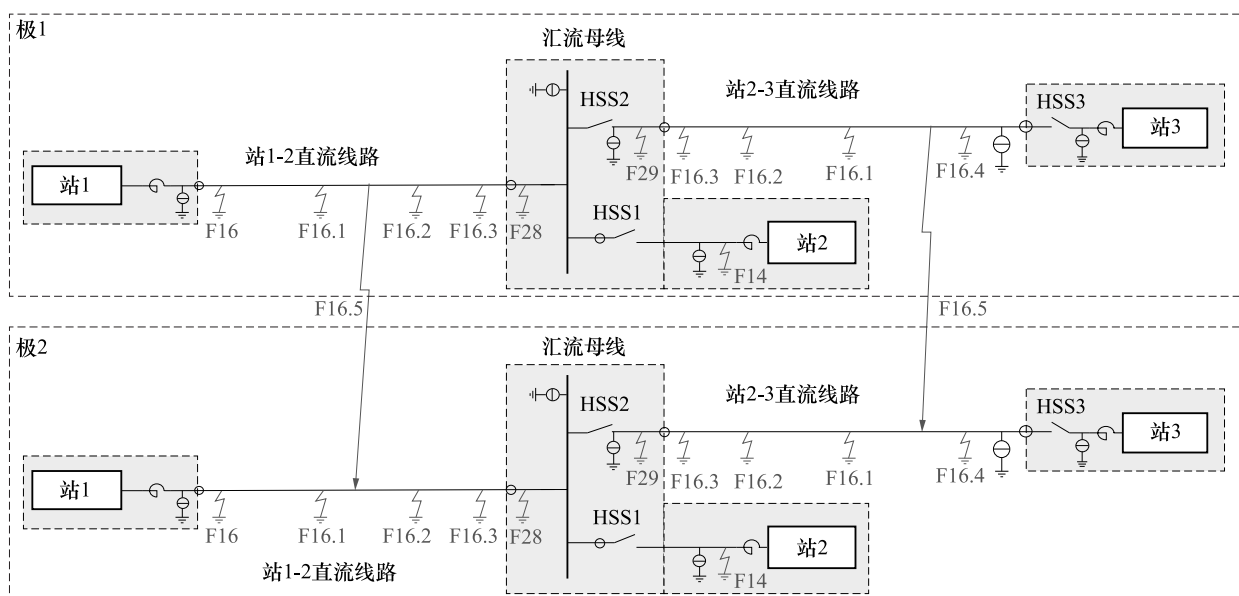


图 C.3 直流线路、汇流母线故障点示意图

参 考 文 献

- [1] GB/T 34139 柔性直流输电换流器技术规范
 - [2] GB/T 35703 柔性直流输电系统成套设计规范
 - [3] GB/T 35745 柔性直流输电控制与保护设备技术要求
 - [4] GB/T 36955 柔性直流输电用启动电阻技术规范
 - [5] GB/T 36956 柔性直流输电用电压源换流器阀基控制设备试验
 - [6] GB/T 37008 柔性直流输电用电抗器技术规范
 - [7] GB/T 37015.1 柔性直流输电系统性能 第1部分：稳态
 - [8] GB/T 37015.2 柔性直流输电系统性能 第2部分：暂态
-