
《柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块状态评估方法》

编制说明

(征求意见稿)

一、工作简况

1 主要工作过程

起草(草案、调研)阶段：2021年12月成立西安交通大学、南方电网电力科技股份有限公司、西安西电电力系统有限公司、无锡赛晶电力电容器有限公司等单位组成的工作组，2022年12月完成征求意见稿。

征求意见阶段：2022年12月开始征求意见。

送审阶段：

报批阶段：

2 主要参加单位和工作组成员及其所做的工作

本标准由西安交通大学、南方电网电力科技股份有限公司、西安西电电力系统有限公司、无锡赛晶电力电容器有限公司、国网智能电网研究院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、中电普瑞电力工程有限公司、国网北京电力公司、国网江苏省电力公司、国网山西省电力公司电力科学研究院、特变电工新疆新能源股份有限公司、国网福建省电力有限公司超高压分公司等单位共同负责起草。

主要成员：祝令瑜、占草、张健、涂小刚、雷乔舒、邢照亮、陈德兴、谢文杰、崔焘、刘涛、左强林、王伟丞、郑琳子、刘俊杰、姜鹏、梁基重、王颂、李香龙、吴鹏、盛俊毅等。

二、标准编制原则和主要内容

1、标准编制原则

本文件在遵循技术发展规律、总结大量工程应用经验的基础上，根据以下原则编制：

1) 适用性原则：编制的标准应适应不同电压等级直流工程的应用需求，既要满足新工程的设计要求，也要兼顾已有工程的运行维护需要；既要考虑子模块 IGBT 和金属化膜电容器的共性技术，也兼顾考虑子模块 IGBT 和金属化膜电容器的特殊性需求；

2) 先进性原则：充分吸收借鉴国内相关领域应用的前沿技术、先进标准，反映最新直流工程已取得的先进成果和经验；

3) 成熟性原则，充分反映国内外柔性直流工程已大量投产，子模块 IGBT 和电容器设备制造具有成熟的技术体系；

4) 技术经济比较原则：积极落实国家的技术经济政策，柔性直流工程的相关系统应做到安全可靠、技术先进、经济合理；

5) 节能环保原则：积极落实国家的节能环保政策，在经济合理的前提下提倡采用高效节能设备。

2、标准主要内容

--第 1 部分：范围

--第 2 部分：规范性引用文件

--第 3 部分：术语和定义

--第 4 部分：子模块 IGBT 状态评估.

--第 5 部分：子模块直流支撑电容器状态评价

--第 6 部分：子模块状态评估

第 4 章和第 5 章分别为子模块 IGBT 和子模块直流支撑电容器的状态评价，是子模块的核心元器件状态评价参数，第 6 章为子模块的状态评估方法、状态分级标准及处置建议。在附录中分别列出了柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块拓扑结构、MMC 子模块 IGBT 集射极导通压降在线自感知方法、子模块电容器电容在线评估方法和模块化多电平换流器子模块关键组件状态劣化机理。

3、解决的主要问题

1) 提出子模块 IGBT 和金属化膜电容器状态评估方法；

2) 形成子模块状态劣化特征量和评价判据共识；

3) 为满足子模块状态的在线监测需求，提出 MMC 运行电气参量的测量传感器精度要求。

三、主要试验（或验证）情况

3.1 子模块 IGBT 集射极导通压降在线自感知算法验证与误差分析

搭建了 MMC 快速控制原型仿真平台用于验证 MMC 子模块 IGBT 监测方法可行性。所设计的仿真平台为单相 7 电平逆变电路，子模块拓扑结构采用半桥子模块，系统电路图如图 1 所示。系统由电源部分、子模块部分、电流测量部分、转接板和仿真机部分构成。MMC 平台实物图如图 2 所示。本平台参数选取如表 1 所示。

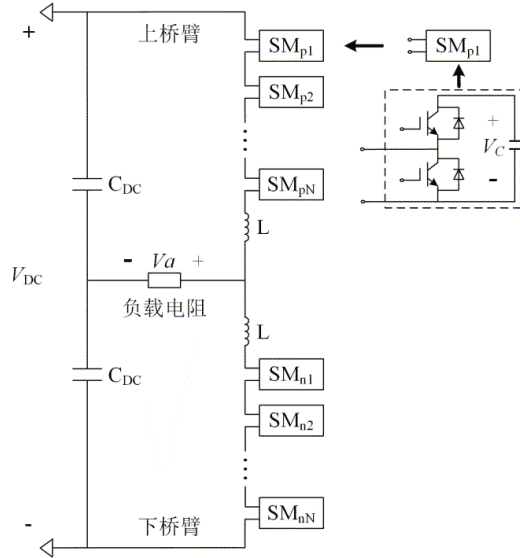


图 1 MMC 快速控制原型仿真系统电路图

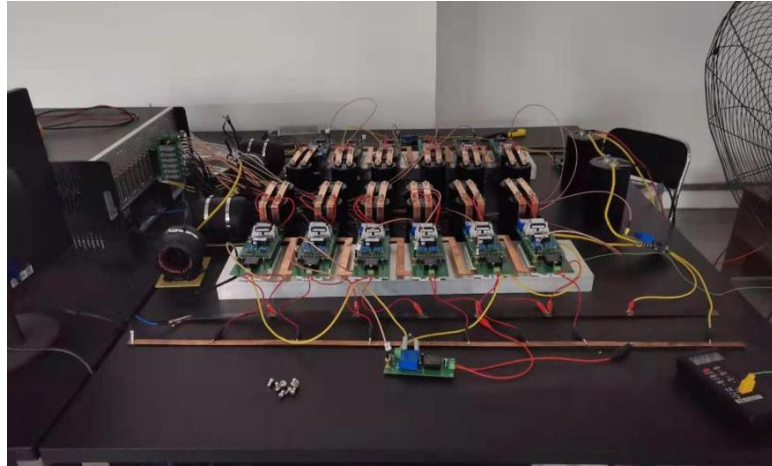


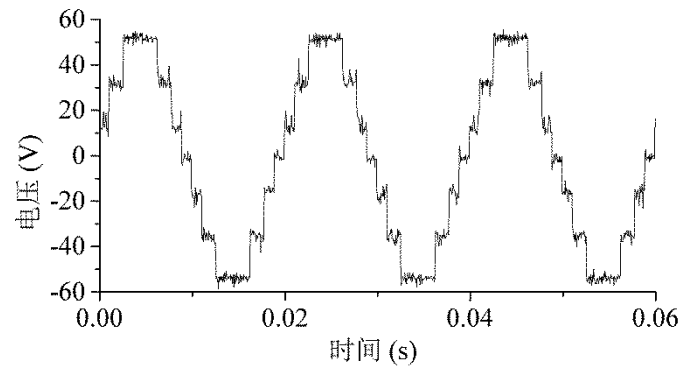
图 2 MMC 快速控制原型仿真系统实物图

表 1 系统参数选取

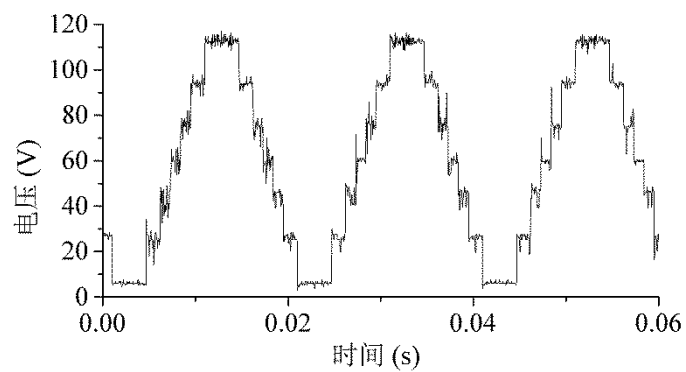
参数	功率等级 (kW)	整流侧电压 (V)	负载电 阻 (Ω)	桥臂电感 (mL)	子模块电容值 (μF)	桥臂电容 (μF)
数值	10	400	2	7	6600	10000

MMC 硬件平台直流侧施加 120 V 直流电压。其运行的输出电压、上桥臂电

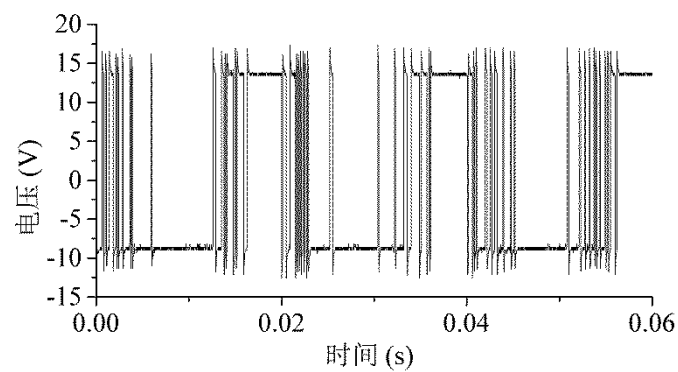
压、上桥臂第一个子模块上 IGBT 的驱动信号、上桥臂第一个子模块电容器电压分别如图 3 (a) (b) (c) (d)所示。



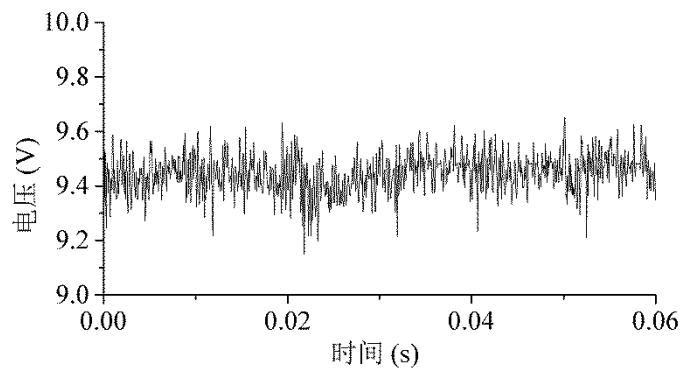
(a) MMC 硬件平台输出电压



(b) MMC 硬件平台上桥臂电压



(c) MMC 硬件平台上桥臂第一个子模块上 IGBT 的驱动信号



(d) MMC 硬件平台上桥臂第一个子模块电容器电压

图 3 MMC 硬件平台重要信号

焊接型 IGBT 功率模块技术手册给出了导通电压的出厂参数，如表 2 所示。流经 IGBT 的电流在 0-8A 范围内，因此 IGBT 的发热并不严重。IGBT 集射极导通压降 V_{CE} 和二极管正向电压 V_F 均使用结温 $T_j=25^\circ\text{C}$ 条件下的参数值作为对照。将计算电压归算到 25°C ，75A 条件下，IGBT 集射极导通压降结果如图 4 所示， V_{CE1-6} 的平均值如表 3 所述。

表 2 IGBT 模块主要参数

主要参数	典型值	备注
IGBT 导通电压 V_{CE}	1.85 V	$I_C=75\text{ A}$, $V_{GE}=15\text{ V}$, $T_j=25^\circ\text{C}$
	2.15 V	$I_C=75\text{ A}$, $V_{GE}=15\text{ V}$, $T_j=125^\circ\text{C}$
	2.25 V	$I_C=75\text{ A}$, $V_{GE}=15\text{ V}$, $T_j=150^\circ\text{C}$
二极管正向电压 V_F	1.70 V	$I_F=75\text{ A}$, $V_{GE}=0\text{ V}$, $T_j=25^\circ\text{C}$
	1.65 V	$I_F=75\text{ A}$, $V_{GE}=0\text{ V}$, $T_j=125^\circ\text{C}$
	1.65 V	$I_F=75\text{ A}$, $V_{GE}=0\text{ V}$, $T_j=150^\circ\text{C}$

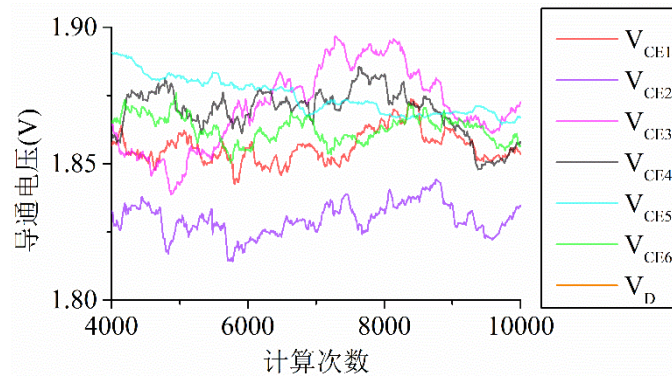


图 4 IGBT 集射极导通压降计算结果

表 3 V_{CE1-6} 的平均值

导通电压	$V_{CE1,25}$	$V_{CE2,25}$	$V_{CE3,25}$	$V_{CE4,25}$	$V_{CE5,25}$	$V_{CE6,25}$
平均值	1.856	1.830	1.870	1.870	1.874	1.863

以表 3 所示 IGBT 集射极导通压降典型值 1.85 V 为参考，IGBT 集射极导通压降计算结果的误差小于 3%。此外，研究测试了其他时间段内的所测数据，计算结果显示出良好的重复性。考虑到器件本身分散性，可以认为本方法的计算精度能够满足 IGBT 的在线状态监测。

3.2 金属化膜电容器状态监测算法验证与误差分析

利用阀段实验对金属化膜电容器状态监测算法进行了验证。阀段运行实验平台由补能系统、陪试阀段和被试阀段组成。其结构如图 5 所示，试验平台的关键参数如表 4 所示，桥臂电流和子模块电压数据如图 6 和图 7 所示。

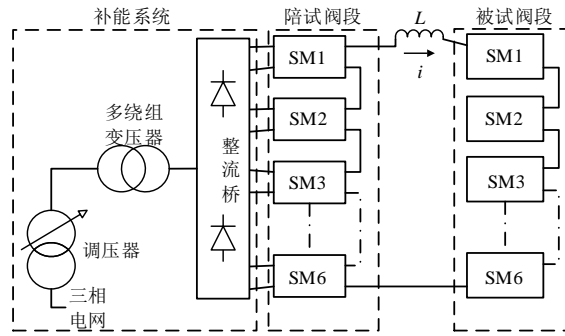


图4 阀段实验平台结构原理图

表4 阀段实验平台关键参数

电气参数	数值
负载电感	4.5 mH
直流侧最大电压	10.2 kV
子模块电容器电容值	18 mF
阀段级数	6

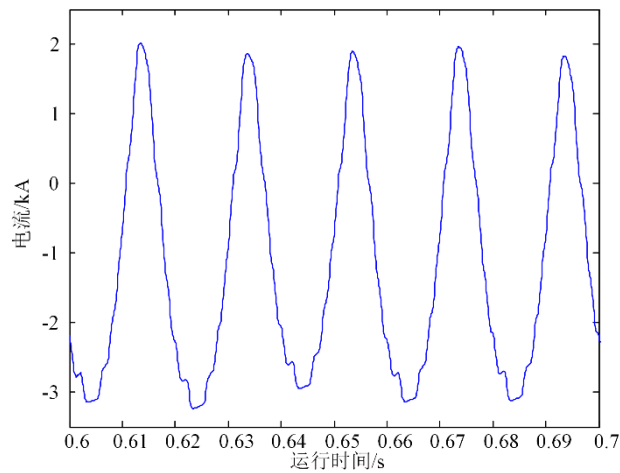


图6 桥臂电流

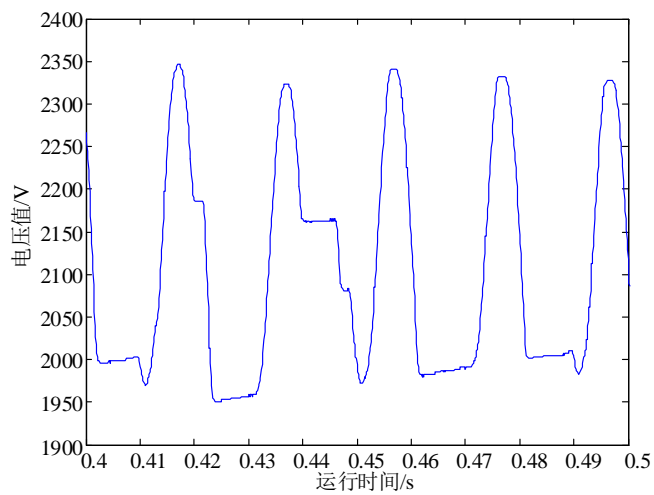


图7 子模块电容器电压

子模块电容器滤波后计算结果及误差如图 8、图 9 所示。由下图可见，阀段实验中对电容值的计算误差可以保持在 1% 以内，满足在线监测的要求。

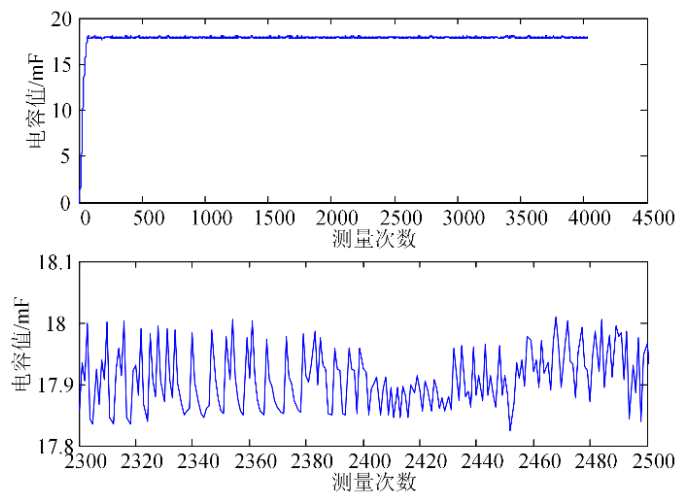


图 9 滤波后根据阀段实测数据计算得到的电容值

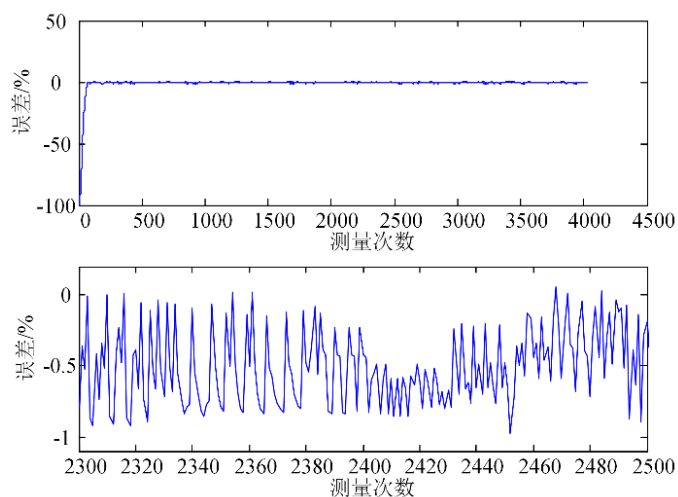


图 10 利用阀段试验数据计算子模块电容值的计算误差

四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

高压直流输电用 MMC 子模块数量众多，对子模块的状态维护提出了高要求。现阶段无明确标准规定子模块的监测方法和规范。制定柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块状态评估方法标准，保证 MMC-HVDC 系统的可靠运行，可促进海上风电接入等新兴领域的发展，具有显著的社会效益。

本标准的制定可填补柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块状态

评估技术的空白,促进产业结构调整与优化升级,提高状态监测产品的制造水平,规范状态监测手段,对保证 MMC-HVDC 系统的安全具有重要意义。

六、与国际、国外对比情况

1. 国外尚无柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块状态评估方法标准,同一技术领域内已有或正在编制的相关标准有:

IEC 62501:2014

IEC TR 62543:2011

IEC 62747:2014

IEC 62751-1:2014

IEC 62751-2:2014

上述标准仅规定了系统试验、例行试验、出厂试验、交接试验项目。对监测技术没有提出可行方案和明确要求。

2. 国内尚无柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块状态评估方法标准,同一技术领域内已有或正在编制的相关标准有:

GB/T 38878-2020 柔性直流输电工程系统试验

GB/T 34139-2017 柔性直流输电换流器技术规范

GB/T 37010-2018 柔性直流输电换流阀技术规范

GB/T 37660-2019 柔性直流输电用电力电子器件技术规范

上述标准仅规定了系统试验、例行试验、出厂试验、交接试验项目。对监测技术没有提出可行方案和明确要求。

GB/T 37014-2018《海上柔性直流换流站检修规范》中要求对换流阀进行定期外观检查,并进行子模块旁路和功能测试,没有状态监测的明确要求。

DLT1833-2018《柔性直流换流阀检修规程》中规定了柔性直流输电换流阀的检修策略、检修条件、检修项目要求,没有给出具体的柔性直流输电换流站模块化多电平换流器子模块状态评估方法。

本标准涉及 MMC 子模块 IGBT 及子模块直流支撑电容器的离线和在线状态评估方法。

3. 本标准水平可确定为国内先进水平。

七、在标准体系中的位置,与现行相关法律、法规、规章及相关标准,特别是强制性标准的协调性

无。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

建议本标准的性质为推荐团体性标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

建议本标准批准发布 7 天后实施。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

无。