

模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力研究

朱铭炼, 姜田贵, 欧阳有鹏, 谢晔源

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:针对模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)在直流侧发生双极短路的故障情况,建立了MMC闭锁后的故障电流回路,给出了二极管以及保护晶闸管的电流分配和结温理论计算方法,考核直流双极短路故障耐受能力。在MATLAB/Simulink下进行了换流阀闭锁后故障电流回路的建模与仿真,并在MMC背靠背试验系统中进行了试验研究。仿真和试验结果表明,所提分析和计算方法准确可行,该方法对校核模块化多电平换流器在实际工程中的直流双极短路故障耐受能力以及器件选型具有重要的理论指导意义。

关键词:模块化多电平电压源型换流器;直流双极短路;故障耐受能力

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)02-0044-05

0 引言

目前,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术已经成功应用于上海南汇直流输电示范工程、浙江舟山多端柔性直流输电示范工程、广东南澳多端柔性直流输电示范工程、厦门柔性直流输电科技示范工程等多个柔性直流输电工程中^[1-3]。世界上第一个基于MMC技术的统一潮流控制器UPFC(unified power flow controller, UPFC)工程也在南京西环网220 kV UPFC工程中成功应用,提升了区域供电能力^[4],而2018年底正式投运的苏南500 kV UPFC工程则是世界上电压等级最高、容量最大的UPFC工程,将在世界范围内首次实现500 kV电网潮流的灵活、精准控制^[5-6]。

直流双极短路故障是MMC最具严重后果的故障之一,针对MMC的直流双极短路故障耐受能力开展研究,对MMC系统电气设计和保护设计具有重要的实用工程价值。从国内外研究现状来看,现有文献着重于MMC双极短路故障电流的暂态分析^[7-10],而对MMC在双极短路故障过程中的耐受能力分析均未见涉及。

本文对MMC直流双极短路故障耐受能力进行研究,首先对MMC闭锁后的故障回路进行理论分析并建立电路模型,给出核心器件所承受的故障电流分配计算方法;其次利用制造商提供的器件参数对器件故障期间的损耗进行计算,并给出瞬时结温计算方法,校核直流双极短路故障耐受能力;然后应用MATLAB搭建仿真模型并通过背靠背试验系统对核心器件的故障电流分配及结温计算方法进行了验证。仿真和试验结果表明,本文所提分析和

计算方法准确可行,为实际工程中MMC直流双极短路故障耐受能力的校核和器件选型提供了理论基础。

1 MMC工作原理

1.1 MMC基本结构

图1(a)所示为苏南UPFC工程所采用的三相MMC主电路拓扑结构示意图,换流器包含6个桥臂,每个桥臂由 n 个相同的半桥型子模块(SM)及一个换流电抗器串联组成。子模块的结构如图1(b)所示,由2个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)T1和T2、2个反向并联二极管D1和D2、子模块电容 C 、保护晶闸管SCR、旁路开关 K 以及均压电阻 R 组成。子模块的保护晶闸管SCR用于故障时分担流经二极管D2的暂态电流,而旁路开关 K 用于子模块故障时的快速切除。

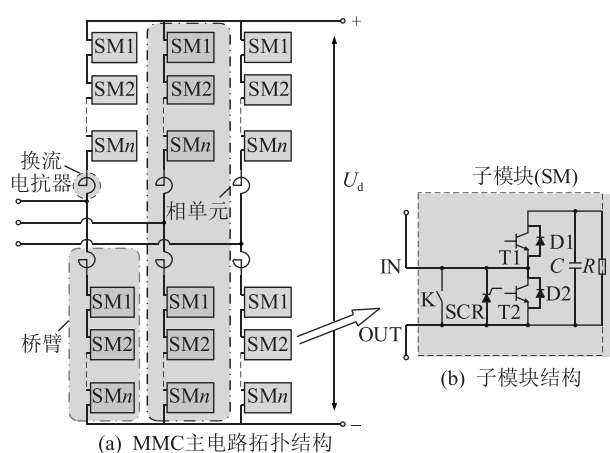


图1 MMC基本结构

Fig.1 Basic structure of MMC

MMC桥臂中的每个子模块均为独立控制,每个相单元中上、下两个桥臂的电压和等于直流母线电

压,在任意时刻相单元中投入的子模块总数为固定值 n ,从而维持直流电压的恒定。

1.2 MMC 直流双极短路故障机制

在直流侧发生双极短路故障时,MMC 承受的故障电流是交流短路电流和子模块电容放电电流的叠加:一部分是交流系统通过子模块的二极管 D_2 向短路点注入短路电流,形成三相短路,电流通路如图 2 中虚线所示;另一部分是 MMC 中投入的子模块通过上管 IGBT T_1 放电,放电回路如图 2 中点划线所示^[11]。

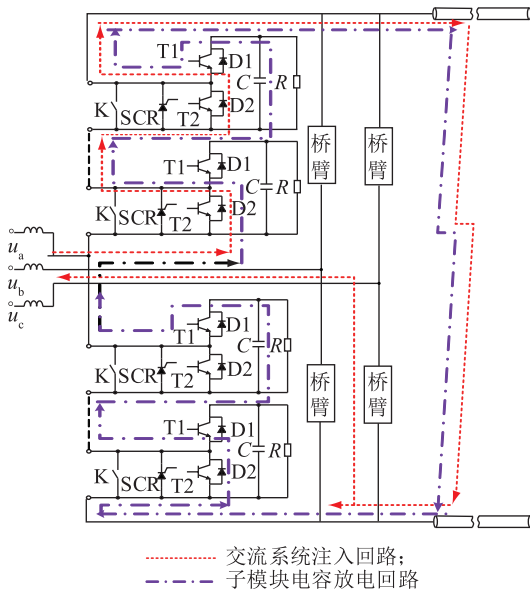


图 2 直流双极短路时的故障电流回路

Fig.2 Path of short-circuit current at the fault of pole-to-pole situation

当 MMC 的控制保护系统在故障发生几毫秒后检测到系统故障时,MMC 立即闭锁,子模块的电容停止放电,但是交流系统注入回路依然存在,直到交流系统的进线断路器成功分闸。

2 直流双极短路故障耐受能力分析

2.1 双极短路故障闭锁后的电流回路

MMC 闭锁后,由于 IGBT 反并联二极管 D_2 为不控器件,无法进行关断,而与 D_2 并联的保护晶闸管的通态电阻小于二极管 D_2 的通态电阻,故在系统发生直流侧短路故障后,触发导通与 D_2 并联连接的保护晶闸管,可以对流过二极管 D_2 的故障电流进行分流,从而实现保护 D_2 的作用。因此,研究 MMC 直流双极短路故障耐受能力,首先对二极管和保护晶闸管的电流分配关系进行分析。

以单相为例,MMC 闭锁后的等效电路如图 3 所示。MMC 闭锁后承受的故障电流为交流系统馈入电流(图 3 中虚线)和子模块电容放电回路中电感

电流续流(图中点划线)两个回路构成。

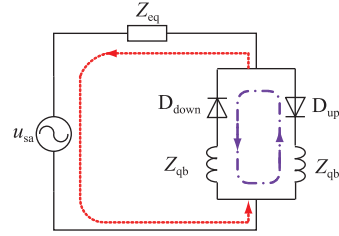


图 3 MMC 闭锁后单相电流回路

Fig.3 Single phase circuit of MMC after blocking the converter

图中: u_{sa} 表示交流电源相电压; Z_{eq} 交流电源与 MMC 之间的等效阻抗; Z_{qb} 是 MMC 单个桥臂的等效阻抗; D_{up} 是上桥臂中所有子模块的下部二极管 D_2 ; D_{down} 是下桥臂中所有子模块的下部二极管 D_2 。

保护晶闸管投入后,流过 MMC 中子模块的故障电流回路如图 4 所示。

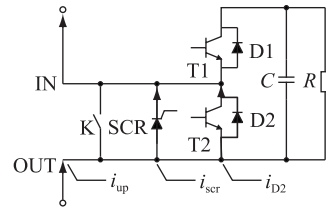


图 4 MMC 闭锁后子模块的故障电流回路

Fig.4 Single phase circuit of sub-module after blocking the converter

2.2 器件电流分配

MMC 闭锁后流经换流阀的双极短路故障电流为:

$$i_{up}(t) = \begin{cases} I_s \cos(\omega_n t + \varphi) + I_c e^{-t/\tau} & t \leq t_d \\ I_c e^{-t_d/\tau} e^{-(t-t_d)/\tau} & t > t_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{up} 为换流阀闭锁后的双极短路故障瞬时电流; I_s 为交流系统馈入电流的幅值; I_c 为 MMC 闭锁时刻子模块电容放电回路的瞬时电流值,即电感电流续流回路的电流初始值; ω_n 为工频角频率; φ 为 MMC 闭锁时刻交流系统馈入电流的初相角; τ 为电感电流续流回路的时间常数; t_d 为 MMC 闭锁后交流系统进线断路器的分闸时间。

MMC 闭锁后流经换流阀的双极短路故障电流波形如图 5 所示。

从二极管和保护晶闸管的数据规格书中可以获取特定条件下器件的通态压降 $V-I$ 特性曲线,二极管和保护晶闸管可以用串联的通态电压偏置、通态电阻以及理想开关来代替^[12-15],采用下述线性拟合提取二极管和保护晶闸管的 $V-I$ 特性参数。

$$\begin{cases} v_D(i_D) = i_D r_D + V_{D0} \\ v_{SCR}(i_{SCR}) = i_{SCR} r_{SCR} + V_{SCR0} \end{cases} \quad (2)$$

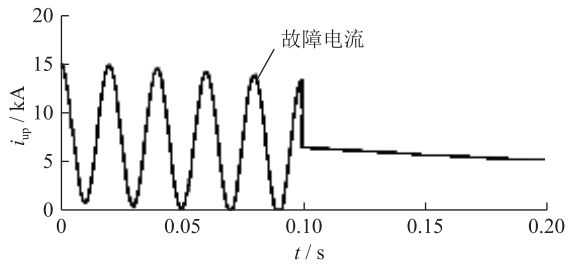


图5 MMC闭锁后的故障电流波形

Fig.5 Current of MMC after blocking the converter

式中: v_D, v_{SCR} 分别为二极管和保护晶闸管导通期间的通态电压; i_D, i_{SCR} 分别为二极管和保护晶闸管导通期间流过的电流; r_D, r_{SCR} 分别为二极管和保护晶闸管的通态电阻; V_{D0}, V_{SCR0} 分别为二极管和保护晶闸管的通态电压偏置。

MMC 闭锁后,子模块中的二极管和保护晶闸管并联共同承受双极短路故障电流,计算可得二极管和保护晶闸管所承受的电流分别为:

$$\begin{cases} i_D = i_{up}(t) \frac{r_{SCR}}{r_{SCR} + r_D} + \frac{V_{SCR0} - V_{D0}}{r_{SCR} + r_D} \\ i_{SCR} = i_{up}(t) \frac{r_D}{r_{SCR} + r_D} + \frac{V_{D0} - V_{SCR0}}{r_{SCR} + r_D} \end{cases} \quad (3)$$

2.3 二极管和晶闸管的瞬时损耗

二极管和保护晶闸管在 MMC 闭锁后的损耗主要来自故障电流通流过程中的通态损耗,其正向截止损耗、开通/关断损耗可以忽略不计,综合式(2),可得二极管和保护晶闸管的瞬时损耗为:

$$\begin{cases} P_D = v_D i_D = i_D^2 r_D + i_D V_{D0} \\ P_{SCR} = v_{SCR} i_{SCR} = i_{SCR}^2 r_{SCR} + i_{SCR} V_{SCR0} \end{cases} \quad (4)$$

2.4 二极管和晶闸管的双极短路故障耐受能力校核

二极管和保护晶闸管所承受的双极短路故障电流为暂态短路电流,电流峰值可至数十千安,该短路电流产生的损耗积累为热量使二极管和晶闸管内部硅片温度急剧上升^[16-17]。针对暂态温升计算,二极管和晶闸管技术手册中均给出了器件暂态温升曲线,以晶闸管为例,其暂态热阻抗曲线如图6所示。

器件数据规格书中给出的暂态热阻抗表示为:

$$Z_{th(j-e)}(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (5)$$

可得到二极管和保护晶闸管的结温计算方法如下:

$$\begin{cases} T_{j,D}(t) = P_D Z_{th(j-e)_D}(t) + T_{e,D} \\ T_{j,SCR}(t) = P_{SCR} Z_{th(j-e)_{SCR}}(t) + T_{e,SCR} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $T_{j,D}$ 和 $T_{j,SCR}$ 分别为二极管和保护晶闸管的结

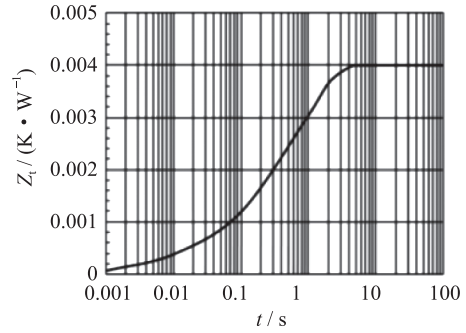


图6 晶闸管暂态热阻抗曲线

Fig.6 Transient thermal impedance of thyristor

温; P_D 和 P_{SCR} 分别为二极管和保护晶闸管的损耗; $Z_{th(j-e)_D}$ 和 $Z_{th(j-e)_{SCR}}$ 分别为二极管和晶闸管的暂态热阻抗(内部芯片到基板); $T_{e,D}$ 和 $T_{e,SCR}$ 为 MMC 闭锁时刻二极管和晶闸管的外壳温度。

校核计算得到的二极管和晶闸管结温是否超过半导体的本征温度极限 250 °C,如果任一结温超过本征温度,则 MMC 无法耐受直流双极短路故障。

3 仿真与试验验证

3.1 建模与仿真验证

本节以 ABB HiPak™ IGBT 模块 5SNA 1500E-330305 及晶闸管 5STP 28L4200 为例进行 MMC 直流双极短路故障耐受能力计算及仿真说明。使用曲线拟合技术,得到下表所示拟合结果(器件技术手册中对应结温 125 °C 曲线得到的数据)。

表1 器件通态压降与导通电阻

Tab.1 On-state voltage drop and resistance of thyristor and diode

器件	通态电压偏置 / V	通态电阻 / Ω
二极管	0.845	1.025×10^{-3}
晶闸管	0.966	1.278×10^{-4}

利用 MATLAB/Simulink 软件,搭建了 MMC 闭锁后的子模块故障电流回路仿真模型,验证本文所述 MMC 双极短路的二极管和晶闸管器件电流分配算法的正确性。在该模型中,设置 MMC 闭锁时刻桥臂电流峰值为 15 kA,其中交流系统馈入电流幅值为 7 kA,子模块电容放电电流值为 8 kA,设置交流系统进线断路器的分闸时间为 100 ms。

图7给出了 MMC 闭锁后 200 ms 内的故障总电流、二极管电流、保护晶闸管电流波形的计算波形和仿真波形,计算波形和仿真波形基本吻合,说明本文所提的双极短路器件电流分配计算方法是可行的。

依据式(6)所述结温计算方法,搭建二极管和保护晶闸管的福斯特网络结温仿真模型,验证二极

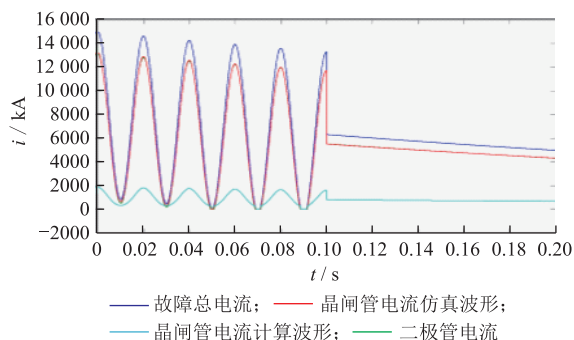


图7 MMC 闭锁后的器件计算电流和仿真电流

Fig.7 Short-circuit current of diode and thyristor by calculation and simulation after blocking the converter

管和保护晶闸管在 MMC 双极短路闭锁后承受故障电流时的结温是否安全。设二极管和保护晶闸管外壳初始温度分别为 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 图 8 是根据式 (6) 所仿真得到的二极管和保护晶闸管承受双极短路故障电流时的结温情况, 根据仿真结果可知, 二极管和保护晶闸管最高结温分别为 $101\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $123\text{ }^{\circ}\text{C}$, 两者结温均安全且有足够的安全裕量, 说明 MMC 能够耐受此双极短路故障电流。

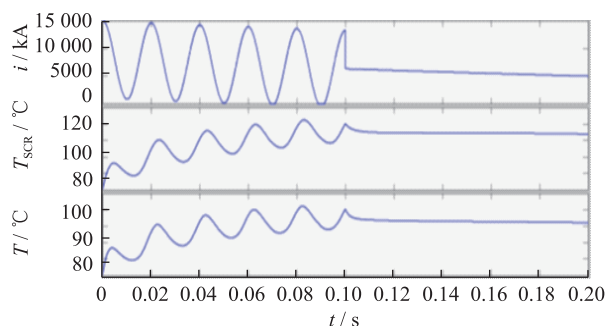


图8 结温仿真结果

Fig.8 Simulation results of junction temperature

3.2 试验验证

为了验证文中所提出的 MMC 直流双极短路故障耐受能力计算方法的正确性, 在两端 MMC 背靠背试验系统中进行了直流侧双极短路试验验证, 试验系统直流电压 $\pm 10\text{ kV}$, 额定容量 $30\text{ MV}\cdot\text{A}$, 二极管以及保护晶闸管为整体封装结构, 内部结温无法进行实测, 所以试验时测量 MMC 双极短路故障总电流及保护晶闸管的电流, 试验波形如下图所示。

试验波形中第一个波头处故障总电流为 15.0 kA , 保护晶闸管电流为 13.9 kA , 该电流点处的保护晶闸管分流理论计算值为 13.2 kA , 二极管分流为 1.8 kA , 理论计算值与试验实测值基本一致, 可见, 本文所提 MMC 双极短路的二极管和晶闸管器件电流分配算法是可行的。

利用文中所提出的 MMC 双极短路的二极管和

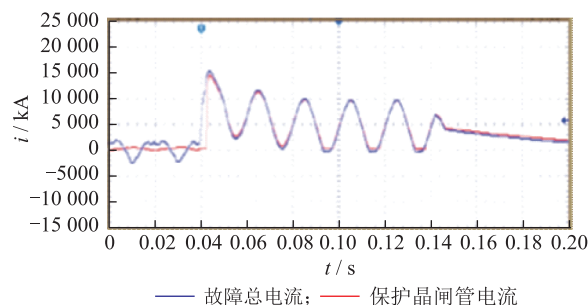


图9 试验波形

Fig.9 Test waveforms

晶闸管器件电流分配算法得到的结果与实际试验结果存在微小差异, 原因在于: 一方面本文采用通态电压偏置、通态电阻进行保护晶闸管及二极管的 $V-I$ 特性拟合, 存在一定的误差; 另一方面, 考虑实际 MMC 内二极管和保护晶闸管在工作时, 其真实结温小于 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而本文计算参数中假定的是结温等于 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况, 计算结果必然存在影响。考虑计算结果与仿真及试验结果差距不大, 所以本文所提 MMC 直流双极短路故障耐受能力校核方法具有较高的工程价值。

4 结语

为了快速有效地进行模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力校核, 本文给出了 MMC 闭锁后的故障电流回路, 并给出了二极管和保护晶闸管的电流分配及结温计算方法。仿真和试验结果表明, 所提模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力校核方法准确有效, 对校核模块化多电平换流器在实际工程中的直流双极短路故障耐受能力以及器件选型具有重要的理论指导意义。

参考文献:

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊, 等. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan, et al. R&D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [2] 胡航海, 李敬如, 杨卫红, 等. 柔性直流输电技术的发展与展望[J]. 电力建设, 2011, 32(5): 62-66.
HU Hanghai, LI Jingru, YANG Weihong, et al. The development and prospect of HVDC flexible technology [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(5): 62-66.
- [3] 汤广福, 贺之渊, 庞辉, 等. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37

- (15):3-14.
- [4] 黄志高,潘磊,祁万春,等. 南京 UPFC 示范工程人工接地短路试验分析[J]. 江苏电机工程,2016,35(6):32-35.
HUANG Zhigao, PAN Lei, QI Wanchun, et al. Analysis of artificial grounding test for Nanjing UPFC pilot project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016,35(6):32-35.
- [5] 张栋,欧阳有鹏,尚慧玉,等. 电压源型换流阀在绝缘型式试验下电场仿真计算[J]. 江苏电机工程,2017,36(2):25-30.
ZHANG Dong, OUYANG Youpeng, SHANG Huiyu, et al. Electric field simulation and calculation of voltage sourced converter valve in insulation type test [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017,36(2):25-30.
- [6] 李鹏,林金娇,孔祥平,等. 统一潮流控制器在苏南 500 kV 电网中的应用[J]. 电力工程技术,2017,36(1):20-24.
LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping, et al. Application of UPFC in the 500 kV southern power grid of Suzhou [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(1):20-24.
- [7] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 模块化多电平换流器主回路参数设计[J]. 高电压技术,2015,41(8):2514-2527.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. Design of main circuit parameters of modular multilevel converters [J]. High Voltage Engineering, 2015,41(8):2514-2527.
- [8] 罗雨,饶宏,许树楷,等. 级联多电平换流器的高效仿真模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(15):2346-2352.
LUO Yu, RAO Hong, XU Shukai, et al. Efficient modeling for cascading multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(15):2346-2352.
- [9] 宋强,刘文华,李笑倩,等. 模块化多电平换流器稳态运行特性的解析分析[J]. 电网技术,2012,36(11):198-204.
SONG Qiang, LIU Wenhua, LI Xiaoqian, et al. An analytical method for analysis on steady-state operating characteristics of modular multilevel converter [J]. Power System Technology, 2012,36(11):198-204.
- [10] 张哲任,徐政,薛英林. 基于分段解析公式的 MMC-HVDC 阀损耗计算方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):109-116.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Valve loss calculation of MMC-HVDC based on piecewise analytical formula [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(15):109-116.
- [11] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(1):1-7.
- [12] DROFENIK U, KOLAR J W. A general scheme for calculating switching-and conduction-losses of power semiconductors in numerical circuit simulations of power electronic systems [C]. Proceedings of 5th International Power Electronic Conference, 2005, Niigata, Japan.
- [13] 薛英林,徐政,张哲任,等. 采用不同子模块的 MMC-HVDC 阀损耗通用计算方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):20-29.
XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. General method of valve loss calculation for MMC-HVDC with different submodules [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(1):20-29.
- [14] 王海田,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平换流器的损耗计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):112-118.
WANG Haitian, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Power losses calculation of modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(2):112-118.
- [15] 李强,庞辉,贺之渊. 模块化多电平换流器损耗与结温的解析计算方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):85-91.
LI Qiang, PANG Hui, HE Zhiyuan, et al. Analytic calculating method for loss and junction temperature of modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(4):85-91.
- [16] 杨俊,汤广福,曹均正,等. HVDC 阀晶闸管结温计算等效电路模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):156-163.
YANG Jun, TANG Guangfu, CAO Junzheng, et al. Study on equivalent circuit model for HVDC valve thyristor junction temperature calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(15):156-163.
- [17] 张哲任,徐政,薛英林,等. 基于分段解析公式的 MMC-HVDC 阀损耗计算方法[J]. 电力自动化设备,2013,37(15):109-116.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Valve loss calculation of MMC-HVDC based on piecewise analytical formula [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,37(15):109-116.

作者简介:



朱铭炼

朱铭炼(1985—),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电技术研究工作;

姜田贵(1984—),男,硕士,高级工程师,从事柔性直流输电技术研究工作;

欧阳有鹏(1985—),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电和无功补偿技术研究工作(E-mail:ouyangyp@nrec.com)。

A Steady-state Calibration Method of Electronic Transformer Based on Improved Digital Filter Algorithm

GU Qiang¹, LIU Haowu^{1,2}, XU Xiaomeng³, LI Xiaohui¹, CHEN Bin¹, GE Leijiao²

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company Research Institute, Tianjin 300384, China;

2. School of Electrical Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300055, China)

Abstract: The traditional calibration method of electronic transformer usually uses the electromagnetic transformer as the standard source. This method is easy to cause low efficiency and low accuracy of the calibration of electronic transformer, due to the problems of the electromagnetic transformer, which including ferromagnetic resonance, magnetic saturation, difficulties of increasing capacity, complicated two wire connection and the hazard of two open circuit high voltage. And this method faces the problem of direct contrast between analog signals and digital signals. Therefore, a steady-state calibration method of electronic transformer based on the improved digital filtering algorithm is proposed. First of all, the calibration process of electronic transformer is introduced, and this paper analyzes the shortcomings of traditional calibration method of the electronic transformer. Secondly, the paper describes the improved digital filtering algorithm in detail, and proposes a steady-state calibration method of electronic transformer based on the improved digital filter algorithm. Finally, a case verifies the feasibility of the proposed steady-state calibration method, and provides the reference for the large-scale popularization of electronic transformers.

Key words: electronic transformer; improved digital filter algorithm; steady-state calibration method; standard source

(编辑 方 晶)

(上接第 48 页)

Current Distribution and Junction Temperature Calculation of Protective Thyristor for MMC Valve

ZHU Minglian, JIANG Tiangui, OUYANG Youpeng, XIE Yeyuan

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Aiming at the fault of pole-to-pole situation in the DC side of MMC, the fault current circuit of the MMC is established and the current distribution and junction temperature calculation of the diode and protective thyristor in the MMC are given for evaluating bipolar DC short circuit fault tolerance. The model and simulation of the fault current loop of the MMC is carried out under MATLAB/Simulink, and the experiment is carried out in the MMC back-to-back test system. Simulation and experimental results show that the proposed method is accurate and effective. The proposed method has important theoretical significance for checking the tolerance of pole-to-pole short-circuit fault and device selection in practical engineering in MMC.

Key words: modular multilevel voltage sourced converter; DC bipolar short circuit; fault tolerance

(编辑 钱 悦)