

±500 kV 柔性直流阀段等效试验设计和控制

李建春, 胡兆庆, 殷冠贤, 卢宇, 李海英

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 对±500 kV 柔性直流多电平换流器桥臂的工作原理进行了分析, 在对阀段稳态工况和直流侧短路工况的基本特征进行总结的基础上, 基于稳态和短路状态下电压应力、电流应力和热应力的等效工作原理, 设计了一种功率模块试验装置等效试验电路, 可满足不同功率等级的至少一个功率子模块在稳态工况和短路工况下的试验要求, 针对该等效试验电路, 在模型分析的基础上设计了满足试验要求的控制策略, 以及设计了基于三层结构的阀段控制保护系统。搭建了一个五模块的2组阀段系统组成的2个桥臂, 进行了相关的试验验证。试验结果表明, 所提功率模块试验装置等效试验电路以及阀段控制保护系统能够满足试验要求, 对多组阀段系统的控制方法是有效的。

关键词: 柔性直流输电; 阀段; 等效试验电路; 控制策略; 控制保护; 模块化多电平换流器

中图分类号: TM 721.1; TM 723

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.013

0 引言

柔性直流输电系统具有有功和无功独立控制的特点, 同时能满足孤岛供电、黑启动、快速功率调节要求^[1-2], 得到了越来越广泛的应用。早期柔性直流电压源换流器大多为两电平或三电平换流器, 随着柔性直流输电换流器的需求往电压更高、功率容量更大的方向发展, 模块化多电平拓扑得到了推广应用^[3-4]。

在实际工程应用中, 模块化多电平换流器(MMC)的运行工况复杂, 承受的电压和电流应力高, 因此对换流器中主要由可关断半导体器件组成的子模块 SM(SubModule) 构建与实际工况相同或相近的电压应力、电流应力和热应力等试验环境是提高模块化多电平电压源换流器可靠性的重要试验手段^[5]。

对模块化多电平电压源换流器子模块的电力电子功率模块进行运行试验, 是为了验证在实际工况中长期处于稳态运行的子模块在其所承受的电压应力、电流应力和热应力等作用下是否能够稳定运行, 验证运行在最大连续运行负荷工况、最大暂时过负荷运行工况、最小直流电压工况、过电流关断工况、短路电流工况和抗电磁干扰工况下的子模块在其所承受的电压应力、电流应力和热应力等作用下是否满足设计要求。目前一种测试电路设计方式是建立基于等效的背靠背小型化换流站试验平台^[6], 该试验平台的运行电压按照工程上等效的运行阀段电压

设计, 电流数值按照工程中阀的实际运行电流设计, 但该试验平台存在以下2个问题: ①试验平台受系统参数影响, 对电网系统的额定容量和短路容量要求高, 难以再现换流站发生短路故障时子模块所承受的电压应力、电流应力和热应力; ②需要的电力电子功率模块数量多, 试验风险增大, 特别是随着系统容量增大、单阀体积增大以及设计复杂度和成本增加。因此, 迫切需要设计一种模块化多电平换流阀的简化等效试验电路, 在此等效电路上开展工程用换流阀型式试验^[7-8]。

针对以上需求, 本文首先设计了一种功率模块试验装置等效试验电路, 可满足不同功率等级的至少一个功率子模块在稳态工况和短路工况下的试验; 针对该等效试验电路, 在模型分析的基础上设计了满足试验要求的控制策略, 以一个五模块的阀段系统组成2个桥臂, 进行了相关的试验验证^[9-10]。

1 阀段稳态工况分析

MMC 拓扑中每一相的上、下桥臂由 N 个子模块串联而成, 每个串联的子模块包含储能电容和开关器件, 子模块解锁后的工作状态由不同开关器件的开通、关断状态组合得到。多电平换流器稳态运行桥臂电压如图1所示(以 $N=5$ 为例)。图中, $x=a, b, c$ 。

由图1可知, 当 MMC 稳态运行时, 上、下桥臂的电压可以看作由直流偏置电压 $u_d/2$ 叠加正弦交流分量得到, 上、下桥臂交流分量的相位相反, 直流分量相等, 上、下桥臂通过桥臂电抗器连接, 输出交流电压的幅值 U_{a_peak} 取决于调制比 M 的大小, 如式(1)所示。

$$U_{a_peak} = \frac{u_d}{2} M \quad (1)$$

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-09-21

基金项目: 国家电网公司科技项目(±500 kV/3 000 MW 高压大容量模块化电压源型换流器关键技术研究及样机研制)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(Key Technology Research and Prototype Development of ±500 kV/3 000 MW High Voltage and Bulk Capacity Modular Voltage Sourced Converter)

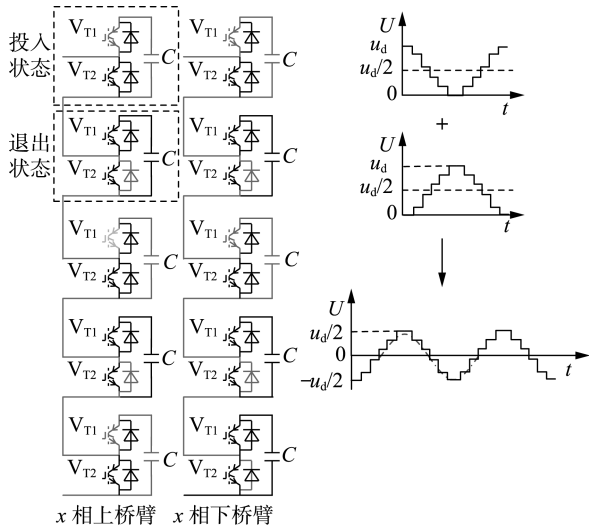


图1 MMC 稳态运行桥臂电压

Fig.1 Bridge-arm voltage of MMC in steady state

桥臂电压 u 为:

$$u = \frac{u_d}{2} + \sqrt{2} U_{rms} \sin(\omega t) \quad (2)$$

桥臂电流 i 是由直流分量 I_d 和幅值为 I 的交流分量叠加而成,如式(3)所示。

$$i = I_d + \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

其中, θ 为桥臂电压 u 和桥臂电流 i 中交流成分的相位差。

2 直流侧短路工况分析

等效试验电路是基于换流阀在异常工况下所承受的电压和电流应力设计的,其中直流侧短路为电压源换流阀面临的最恶劣的工作状态。

2.1 直流侧短路等效分析

电压源换流器桥臂在直流侧短路的情况下可以分为2个阶段:闭锁前阶段和闭锁后阶段。桥臂闭锁前的等效电路如图2所示。图中, L 、 R 分别为桥臂电感和等效电阻; L_1 、 R_1 分别为短路等效直流侧电感和电阻; C 为单模块电容大小; N 为等效的投入子模块个数。

当直流侧发生短路、桥臂闭锁前,直流侧阻抗突变,投入状态的子模块电容放电引起电流增大,该电流提供了初始短路电流,故障电流的大小与子模块电容值、桥臂子模块数量和桥臂电感值有关。可以证明该阶段的暂态过程实际为一个二阶欠阻尼振荡过程^[11]。

后续保护检测到发生直流短路故障后,为了保护换流器,将立即闭锁换流器内的所有子模块,同时投入子模块并联晶闸管,进入子模块闭锁后阶段。在子模块闭锁后、桥臂电流衰减到0之前,故障桥臂电流主要由两部分组成:交流侧电源馈流和桥臂电

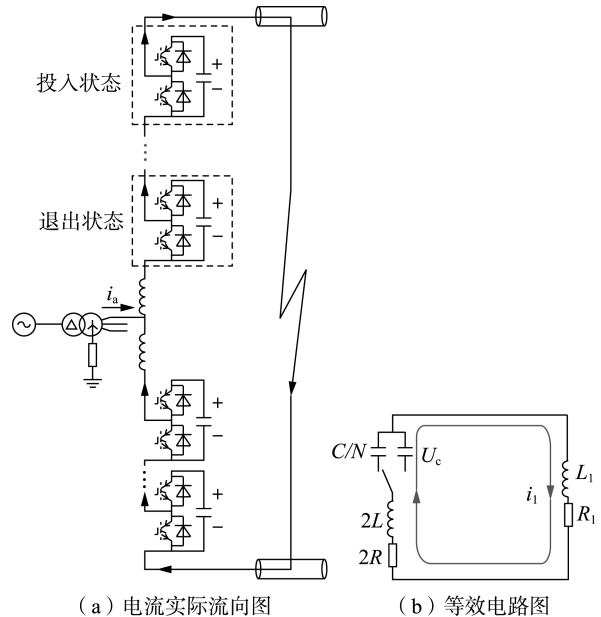


图2 桥臂闭锁前等效电路

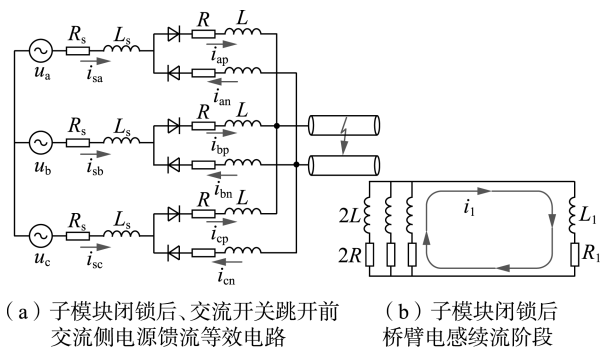
Fig.2 Equivalent circuit of bridge-arm before blocking 感续流,如图3所示^[12]。

图3 桥臂闭锁后等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of bridge-arm after blocking

2.2 直流侧短路电流

如图3(a)所示,交流侧三相电源 u_x ($x=a, b, c$) 相当于经 R_s 、 L_s 、 R 、 L 组成的对称阻抗供给短路电流。图3(b)中桥臂电感续流的初始值是图2所示桥臂闭锁前电流上升的最大值,电流波形示意如图4所示。

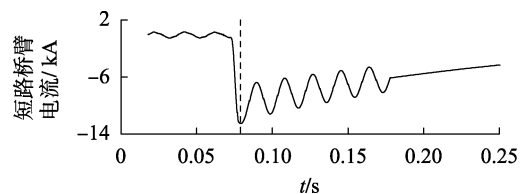


图4 直流侧短路时的桥臂电流

Fig.4 Bridge-arm current with DC side short circuit

3 等效试验设计

根据标准的要求,换流阀的运行需要检验:在重复性电压、电流应力的条件下,开关器件模块以及辅

助电路在工程实际应用工作状态下的适应性。根据上述分析,以 MMC 阀组件在稳态和发生短路后的运行特性为基础,设计等效试验电路如图 5 所示。电路中将测试的 n 组阀段通过负载电感 L_L 相连,由供能回路逆变器 INVC 提供稳态运行损耗功率,控制保护系统实现被测试阀段 1— n 的控制保护。

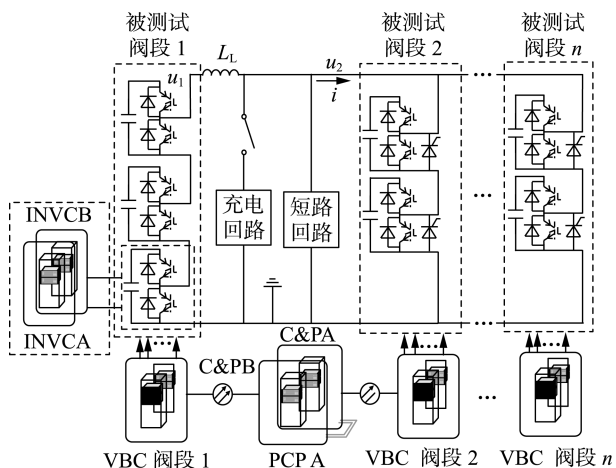


图 5 桥臂阀段等效试验设计电路示意图

Fig.5 Equivalent test design circuit diagram of bridge-arm valve section

在图 5 所示试验系统中,被测试阀段 1— n 实际为图 1 所示的含有 N 个子模块的换流阀桥臂,该阀段按照 MMC 的等效电流和电压参数设计,充电回路在阀段系统稳定运行之前分别对阀段 1— n 进行预充电,短路回路则控制阀段系统在短路期间的电流振荡周期和频率。控制保护系统设备 C&P 提供阀段 1— n 的稳态控制和整个试验电路的保护(VBC 阀段 1— n)。

4 控制系统设计

4.1 运行控制原理

图 5 所示电路中,充电电路两侧的换流阀采用梯形波调制方式,根据图 1 所示阀段稳态工况分析,被测试阀段 1、2 在解锁运行时输出的电压是带有直流偏置的交流电压,分别如式(4)、式(5)所示。

$$u_1 = \frac{u_d}{2} + \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$u_2 = \frac{u_d}{2} + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t - \delta) \quad (5)$$

其中, $u_d = N_e U_c$, U_c 为单模块输出电压, N_e 为正常解锁运行时每个阀段有效投入个数,不考虑冗余情况时, N_e 即为桥臂模块总数; δ 为 u_1 、 u_2 之间的相位差; U_1 、 U_2 为交流电压幅值。

交流有功功率通过负载电感 L_L 从阀段 1 传递至阀段 2、3、 $\dots$ 、 n ,以 $n=2$ 为例,阀段 1 的输出瞬时功率和阀段 2 的注入瞬时功率分别为:

$$p_1 = \frac{u_d I_d}{2} + U_1 I \cos \theta + \frac{u_d I}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \theta) + \sqrt{2} U_1 I_d \sin(\omega t) - U_1 I \cos(2\omega t + \theta) \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{u_d I_d}{2} + U_2 I \cos(\delta + \theta) + \frac{u_d I}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \theta) + \sqrt{2} U_2 I_d \sin(\omega t - \delta) - U_2 I \cos(2\omega t - \delta + \theta) \quad (7)$$

由式(6)、(7)可以看出,输出、注入瞬时功率中包含直流功率分量(式(6)、(7)等号右侧的前 2 项)、基频分量以及 2 倍频分量,当系统稳定运行时,对于每个阀段而言,由于实际有功消耗除去网损基本为 0,所以直流功率分量在稳态运行工况下近似为 0,此时回路电流中将产生稳定的直流分量。基频分量和 2 倍频分量实际为每个桥臂的充放电电流,其中 2 倍频分量代表的是 2 个阀段的充电功率,仅参与各自模块的电容充放电物理过程,不参与有功交换^[13-14]。

因此,输送的直流功率可以简化为:

$$P_1 = \frac{u_d I_d}{2} = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (8)$$

其中, $X = \omega L_L$ 为 2 个阀段的中间连接电抗。

式(3)中交流电流幅值可以由式(9)计算。

$$I = |I| = \left| \frac{U_1 \angle \delta - U_2}{jX} \right| \quad (9)$$

由式(9)可以看出,通过控制阀段 1、2 侧电压的相角差 δ 和幅值大小,可以改变从阀段 1 通过负载电感到阀段 2 的功率大小和交、直流电流大小,改变相角差 δ 的正负就可以改变功率的传送方向^[15]。

4.2 控制系统设计

控制系统设计示意图分为 3 层结构^[16-17],如图 6 所示,上层运行人员控制系统通过后台操作进行阀段系统解锁顺控流程以及所有真空接触器和刀闸操作;控制保护层包括整个回路的阀段控制保护设备以及变频电源控制设备 INVCA、INVCB,阀段控制保护设备 C&P 采用双套冗余配置 C&PA、C&PB;下层 IO 包括开关刀闸操作接口、测量和阀控 VBC 以及水冷接口设备等^[18]。

阀段控制保护设备的主要功能如下:

- 为变频电源控制系统输出直流电压指令;
 - 提供阀段 1、2 的输出参考电压,控制桥臂电流大小;
 - 实施短路试验顺控流程,实现短路回路中放电和谐振的配合,输出短路电流。
- 变频电源控制设备的主要作用为:
- 接收到直流电压指令后按照一定的斜率输出直流电压;
 - 实现接入阀段系统的供能。

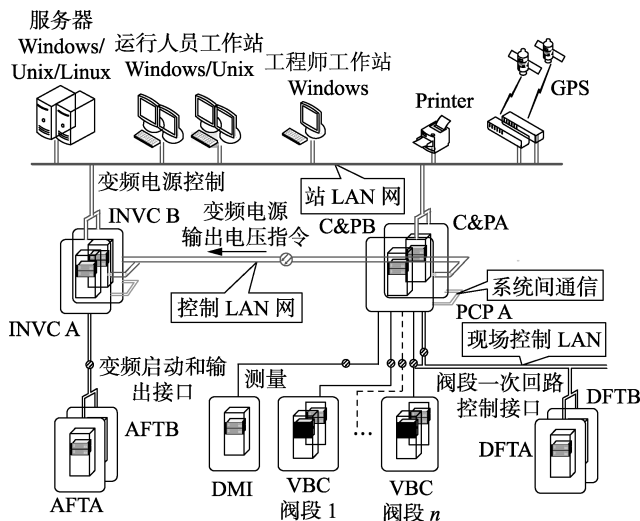


图6 桥臂阀段控制保护系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of control and protection system for bridge-arm valve section

阀控 VBC 的主要功能^[19]如下:

- 提供阀段桥臂模块开关器件的触发导通脉令;
- 实现阀段桥臂模块的电压平衡控制。

5 试验验证

为了验证本文设计的多电平阀段运行试验方法以及控制保护系统的有效性,在搭建的试验系统上对实际工程中的阀段系统进行了试验^[20]。其中,试验系统的参数选取与实际系统运行中模块承受的电压和电流应力相同。

为了简化起见,本文仅选择了2组阀段($n=2$)进行试验,其中阀段1、2的工作工况相同:模块的额定电压为2 400 V,模块级数选择为5,没有冗余模块,负载电感为10 mH,直流电压为 5×2.4 kV(12 kV),直流偏置电压大小为6 kV。试验结果见图7、8。

由以上结果可看出,直流偏置电压大小为 $u_d/2=6$ kV,阀段输出电压满足实际设计电压要求,阀段模块电压为2 400 V,波动峰值达到2 500.2 V,峰值波动率达到4.18%,满足实际工程“小于5%”的要求,基波电流峰值达到2 214 A,达到设计要求。

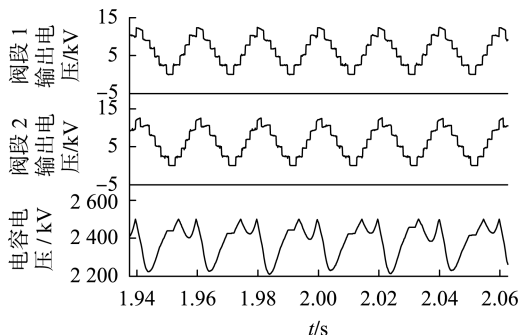


图7 2个阀段的输出电压以及电容电压

Fig.7 Output voltage of two valve sections and capacitor voltage

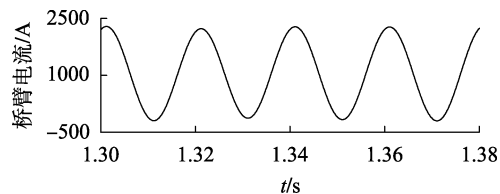


图8 稳态运行时的桥臂电流

Fig.8 Bridge-arm current in steady state operation

采用图5中的短路回路和被测试阀段,例如被测试阀段2构成短路试验回路,通过控制保护设备C&PA、C&PB对开关操作顺序进行控制,可以模拟完成短路工况下的短路电流试验过程,一个典型的±500 kV柔性直流被测试阀段在该等效试验系统上的短路电流波形如图9所示。

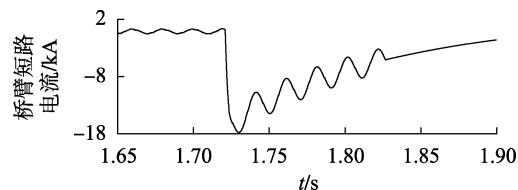


图9 桥臂短路电流

Fig.9 Short circuit current in bridge-arm

在定义桥臂充电电流为电流正方向的情况下,以上桥臂短路电流的放电方向显示为负,最大短路电流的大小达到17.8 kA,振荡5个周期,周期和实际短路振荡电流相同为20 ms,满足不同功率等级的至少一个功率子模块在短路工况下的试验要求。

6 结论

a. 本文设计了一种功率模块试验装置等效试验电路,可在至少一个功率子模块上等效再现实态工况和暂态工况下的电压应力、电流应力和热应力等,可满足不同功率等级的至少一个功率子模块在稳态工况和短路工况下的试验;

b. 针对该等效试验电路,在模型分析的基础上设计了满足试验要求的控制策略,设计了基于3层结构的阀段控制保护系统,实现了阀段控制和保护功能,满足应用要求;

c. 在一个有5个模块的阀段等效试验电路进行了稳态试验验证,结果表明阀段输出电压符合实际电平要求,其中阀段模块电压为2 400 V,波动峰值达到2 500.2 V,波动率达到4.18%,满足实际工程“小于5%”的要求,基波电流峰值达到2 214 A,满足设计要求;

d. 在一个有5个模块的阀段等效试验电路进行了短路试验验证,短路电流至少振荡5个周期,周期为20 ms,最大短路电流达到17.8 kA,满足不同功率等级的至少一个功率子模块在短路工况下的试验要求。

参考文献:

- [1] 文安,邓旭,魏承志,等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):99-106.
WEN An,DENG Xu,WEI Chengzhi,et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):99-106.
- [2] 管敏渊,徐政. MMC型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):1-5.
GUAN Minyuan,XU Zheng. Direct voltage control of MMC-based VSC-HVDC system for passive networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):1-5.
- [3] 文俊,张一工,韩民晓,等. 轻型直流输电:一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术,2003,27(1):47-51.
WEN Jun,ZHANG Yigong,HAN Mingxiao,et al. HVDC based on voltage source converter a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology,2003,27(1):47-51.
- [4] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化,2003,27(4):77-81.
LI Gengyin,LÜ Pengfei,LI Guangkai,et al. Development and prospects for HVDC Light[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(4):77-81.
- [5] 高冲,贺之渊,王秀环,等. 厦门±320 kV 柔性直流输电工程等效试验技术[J]. 智能电网,2016,4(3):257-262.
GAO Chong,HE Zhiyuan,WANG Xiuhuan,et al. Equivalent test technology for ±320 kV Xiamen flexible HVDC transmission project [J]. Smart Grid,2016,4(3):257-262.
- [6] 刘栋,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):68-73.
LIU Dong,TANG Guangfu,HE Zhiyuan,et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):68-73.
- [7] 吴亚楠,汤广福,查鲲鹏,等. 模块化多电平 HVDC 换流阀运行试验主回路数学模型及参数设计[J]. 电网技术,2013,37(1):65-70.
WU Yanan,TANG Guangfu,ZHA Kunpeng,et al. Mathematical model and parameter design of main circuit for operational test of modular multi-level HVDC converter valves[J]. Power System Technology,2013,37(1):65-70.
- [8] 汤广福,温家良,贺之渊,等. 大功率电力电子装置等效试验方法及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(36):1-9.
TANG Guangfu,WEN Jialiang,HE Zhiyuan,et al. Equivalent testing approach and its application in power system for high power electronics equipment[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(36):1-9.
- [9] 查鲲鹏,汤广福,温家良,等. 灵活用于 SVC 阀和 HVDC 阀运行试验的新型联合试验电路[J]. 电力系统自动化,2005,29(17):72-75.
ZHA Kunpeng,TANG Guangfu,WEN Jialiang,et al. A new synthetic test equipment for the operational test of SVC and HVDC valves [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(17):72-75.
- [10] 吴亚楠,吕天光,汤广福,等. 模块化多电平 VSC-HVDC 换流阀的运行试验方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):8-15.
WU Yanan,LÜ Tianguang,TANG Guangfu,et al. Operational test method for VSC-HVDC valves based on modular multi-level converter[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(30):8-15.
- [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] 张国驹,祁新春,陈瑶,等. 模块化多电平换流器直流双极短路故障特性分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):151-157.
ZHANG Guojun,QI Xinchun,CHEN Yao,et al. Characteristic analysis of module multilevel converter under DC pole-to-pole short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):151-157.
- [13] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术,2010,36(2):547-552.
TU Qingrui,XU Zheng,ZHENG Xiang,et al. Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based HVDC[J]. High Voltage Engineering,2010,36(2):547-552.
- [14] 丁冠军,汤广福,丁明,等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报,2009,29(36):1-8.
DING Guanjin,TANG Guangfu,DING Ming,et al. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(36):1-8.
- [15] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略[J]. 电力系统自动化,2005,29(1):39-44.
HU Zhaoqing,MAO Chengxiong,LU Jiming. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(1):39-44.
- [16] 董云龙,包海龙,田杰,等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):89-92.
DONG Yunlong,BAO Hailong,TIAN Jie,et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(19):89-92.
- [17] 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.
- [18] 梁少华,田杰,曹冬明,等. 柔性直流输电系统控制保护方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):59-65.
LIANG Shaohua,TIAN Jie,CAO Dongming,et al. A control and protection scheme for VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):59-65.
- [19] 韩坤,吴金龙,刘欣和,等. 大规模多节点模块化多电平柔性直流输电换流阀控制周期优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):36-41.
HAN Kun,WU Jinlong,LIU Xinhe,et al. Optimized design of converter valve control period for large-scale multi-node MMC-based HVDC-flexible[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):36-41.
- [20] 董云龙,杨勇,田杰,等. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电动态模拟系统[J]. 电力系统自动化,2014,38(11):74-78.
DONG Yunlong,YANG Yong,TIAN Jie,et al. Dynamic simulation system for modular multiterminal converter based VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(11):74-78.

作者简介:



李建春

李建春(1979—),男,福建龙岩人,工程师,硕士,主要研究方向为特高压直流输电、柔性直流输电以及电力系统仿真技术(E-mail:lijc@nrec.com);

胡兆庆(1976—),男,湖北荆门人,高级工程师,博士,通信作者,主要从事特高压直流输电及柔性直流输电方面的研究工

作(E-mail:huzq@nrec.com);

殷冠贤(1986—),男,海南万宁人,工程师,硕士,主要从事柔性直流输电技术及大功率电力电子技术方面的研究工作;

卢宇(1977—),男,湖北宜昌人,高级工程师,硕士,主要从事特高压直流输电及柔性直流输电方面的研究工作;

李海英(1973—),男,内蒙古赤峰人,教授级高级工程师,硕士,主要从事特高压直流输电及柔性直流输电方面的研究工作。

Design and control of ±500 kV flexible HVDC valve section equivalent test

LI Jianchun, HU Zhaoqing, YIN Guanxian, LU Yu, LI Haiying

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

Abstract: The working principle of multilevel converter arm bridge in ±500 kV flexible HVDC is analyzed, and the basic features of valve section steady-state operating conditions and the DC-side short circuit operating conditions are summarized. Based on the above analysis and the equivalent working principle of voltage stress, current stress and thermal stress of valve section in the steady-state and the short circuit operation conditions, a kind of equivalent test device circuit of power module is designed, which satisfies the requirement of the test with at least one power module of different power levels in steady-state and the short circuit operation conditions. In view of the equivalent test circuit, its control strategy is designed based on the analysis of model, and the protection and control system of the valve section based on a three-layer structure is designed. Two bridge arms composed of a five-module two-valve section system are built, and relevant tests are carried out. The test results show that the proposed equivalent test circuit of the power module test device and protection and control system of the valve section meet the test requirements, and the control method of the multi-valve section system is effective.

Key words: flexible HVDC power transmission; valve section; equivalent test circuit; control strategy; control and protection; modular multilevel converter

(上接第83页 continued from page 83)

Transient stability assessment of power system based on XGBoost algorithm

ZHANG Chenyu¹, WANG Huifang¹, YE Xiaojun²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Huizhou Power Supply Company of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516003, China)

Abstract: The TSA (Transient Stability Assessment) is carried out based on the improved XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) algorithm according to the characteristics of TSA problem. The feature set that can reflect the stable operation state of power system is defined based on the physical characteristics of power grid. The TSA process with XGBoost is researched. Since the severities of two mistakes in TSA process are different, a logarithmic loss function containing the attention coefficient is defined to reduce the mistaken prediction situations of the model to unstable samples. The Logistic function is introduced to transform the model output into a probabilistic form, which is used to measure the reliability of model output to prevent part of mistaken prediction. A method to generate sample sets for any power system is given. The simulative results of IEEE 39-bus power system show that the accuracy of XGBoost is higher than that of other commonly used machine learning methods, the misclassification probability of unstable samples is reduced by the loss function after optimization, which makes the recall rate of the proposed algorithm better than other methods, and the probabilistic output format is helpful for evaluating the reliability of model output and reduces the probability of mistaken prediction.

Key words: transients; stability; XGBoost algorithm; machine learning; artificial intelligence; Logistic function