

500 kV 直流断路器快速机械开关典型故障特性及可靠性提升方法研究

魏争^{1*}, 文卫兵¹, 杨勇¹, 张涛¹, 陈争光²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209; 2. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031)

Research on Typical Fault Characteristics and Reliability Improvement Methods of High-speed Mechanical Switch Used in 500 kV DC Circuit Breaker

WEI Zheng^{1*}, WEN Weibing¹, YANG Yong¹, ZHANG Tao¹, CHEN Zhengguang²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China;

2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: DC circuit breaker (DCCB) is an indispensable key equipment for building voltage source converter based high voltage DC (VSC-HVDC) grid. A high-speed mechanical switch (HMS) is the core component of DCCB to carry current, realize fast opening and closing, and withstand opening recovery voltage. HMS has a complex structure, high speed, severe electrical stress, and high-reliability requirements, so its design and development are difficult and any problem in any link of HMS will affect the safe and reliable operation of the DCCB and even the VSC-HVDC grid. However, at present, due to the problems of unreasonable design and selection, lax process control, and imperfect test and assessment, HMS has frequent faults in practical engineering applications of DCCB. The characteristics and causes of typical faults of HMS in the development, commissioning, and operation of 500 kV DCCBs that have been used in the Zhangbei VSC-HVDC grid project are analyzed. On this basis, focusing on the typical faults of HMSs, corresponding reliability improvement methods from the aspects of design and selection, production and manufacturing, test assessment, etc. are proposed, which provides guidance and basis for the design, development, operation, and maintenance of HMSs of 500 kV DCCBs.

Keywords: DC circuit breaker; high-speed mechanical switch; typical fault characteristic; reliability improvement method

摘 要: 直流断路器是构建柔性直流电网不可或缺的关键设备。快速机械开关是直流断路器中承载电流、实现快速分合闸、耐受分闸恢复电压的核心组件, 其结构复杂、动作速度快、电气应力严酷、可靠性要求高, 因而设计研制难度大, 任一环节出现问题均会影响直流断路器乃至柔直电网的安全可靠运行。然而, 目前快速机械开关由于存在设计选型不合理、工艺管控不严格、试验考核不完善等问题, 导致在实际工程应用中故障率较高。针对已应用于张北柔性直流电网试验示范工程的500 kV直流断路器, 分析了直流断路器研制、调试、运行过程中快速机械开关典型故障的特性及原因。在此基础上, 围绕快速机械开关典型故障从设计选型、生产制造、试验考核等方面入手, 有针对性地提出可靠性提升措施, 为500 kV直流断路器快速机械开关设计研制和运维检修提供了指导和依据。

关键词: 直流断路器; 快速机械开关; 典型故障特性; 可靠性提升措施

0 引言

柔性直流电网不仅继承了柔性直流输电技术可控性及灵活性强、可不依赖交流电网强弱独立运行、新能源接入友好等优势, 还可实现多电源供电和多落点受电, 通路冗余性强, 是构建新型电力系统的重要途径^[1-5]。直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)能够快速开断直流短路电流, 选择性隔离故障元件, 是突破柔直电网直流侧故障处理难题的有效技术手段, 因此成为构建柔直电网不可或缺的核心设备^[6-9]。而快速机械开关(high-speed mechanical switch, HMS)是直

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(柔直电网直流断路器可靠性提升关键技术研究及工程应用, 5500-202256391A-2-0-ZN)。

Science and Technology Foundation of SGCC (5500-202256391A-2-0-ZN).

流断路器中承载稳态和暂态电流、实现快速分合闸、耐受分闸恢复电压的核心组件, 其任一环节出现问题均可能导致直流断路器故障、失灵, 甚至损坏, 并可能间接造成柔直电网停运。

相比于普通交流断路器等常规机械开关, 直流断路器快速机械开关具有结构复杂、动作速度快、电气应力严酷、串联一致性和动作可靠性要求高等特点, 设计研制难度大^[10]。因存在设计选型不合理、工艺管控不严格、试验考核不完善等问题, 导致快速机械开关在实际工程应用中故障率较高, 成为直流断路器故障率最高的组部件之一。

由于高压直流断路器技术较新, 已有关于直流断路器的研究大多聚焦于设备拓扑结构、参数设计、试验方法等方面^[11-19], 而对于直流断路器故障特性、质量管控和可靠性的研究相对较少。国外目前尚无高压直流断路器工程应用, 未见其可靠性提升相关研究。国内研究机构针对直流断路器可靠性设计和质量提升方法的研究主要围绕避雷器和供能系统等组部件^[20-25], 鲜有涉及快速机械开关。已有针对直流断路器快速机械开关的研究主要聚焦于操作机构的设计^[26-31], 尚无针对快速机械开关可靠性提升的相关研究。此外, 直流断路器快速机械开关试验考核方法多借鉴交流断路器等其他设备标准, 适用性和针对性较低, 难以有效发现直流断路器快速机械开关的设计质量缺陷。因此, 亟需开展针对该设备的可靠性提升方法研究。

为解决上述问题, 本文针对已应用于张北柔性直流电网试验示范工程(以下简称张北工程)的500 kV直流断路器, 分析快速机械开关技术特点, 梳理直流断路器研制、调试、运行过程中快速机械开关发生的典型故障, 分析故障特性及原因。在此基础上, 围绕典型故障, 从设计选型、生产制造、试验考核等方面入手, 有针对性地提出快速机械开关可靠性提升措施, 为500 kV直流断路器快速机械开关设计研制和运维检修提供指导和依据。

1 直流断路器技术路线及结构原理

目前, 已投入工程应用的500 kV直流断路器主要包含混合式、负压耦合式和机械式三种技术路线, 其拓扑结构如图1所示, 主要区别在于: 混合式直流断路器主支路配有少量电力电子开关; 负压耦合式直流断路器转移支路配有负压耦合装置; 机械式直流断路器转移支路配置储能电容和振荡电感。每种技术路线

直流断路器均由主支路、转移支路和耗能支路三个并联部分组成, 通过三个支路按照设定时序完成内部换流, 实现直流电流的开断。

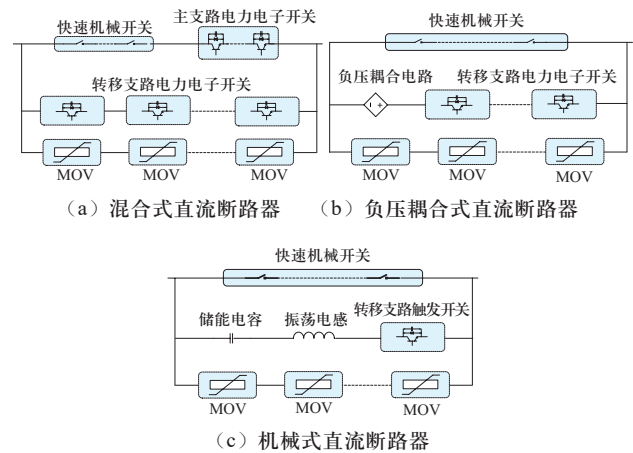


图1 直流断路器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of DCCBs

混合式直流断路器分闸时的电流和电压波形示意图如图2所示。 t_0 时刻故障发生, 随后主支路承受故障电流; t_1 时刻直流断路器收到分闸指令, 主支路电力电子开关闭锁, 电流快速向转移支路转换, 并于 t_2 时刻完成换流; 随后快速机械开关零电压零电流无弧分闸, 同时转移支路承担故障电流; t_3 时刻快速机械开关达到有效开距, 转移支路电力电子开关闭锁, 直流断路器完成开断动作, 随后恢复电压快速建立, 该电压施加于快速机械开关两端; 当恢复电压达到避雷器(MOV)动作电压时, 电流快速向耗能支路转换, 于 t_4 时刻完成换流, 最终避雷器将电流从峰值 i_p 限制到零。

负压耦合式、机械式直流断路器开断原理与混合

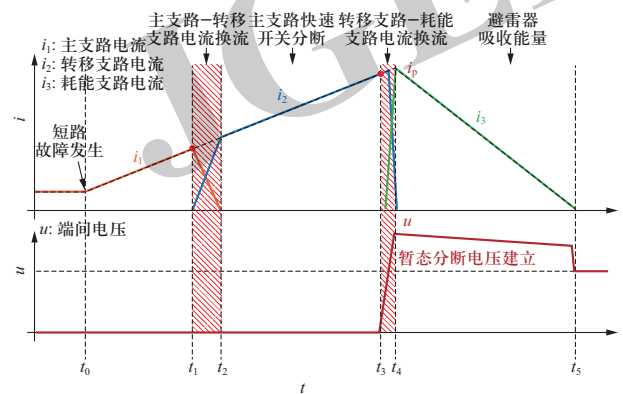


图2 混合式直流断路器分闸时电流和电压波形示意图

Fig. 2 Waveform diagram of current of each branch and voltage during opening of hybrid DCCB

式直流断路器的主要区别在于主支路换流方式不同。负压耦合式直流断路器接到开断指令后,快速机械开关直接有弧分闸,随后负压耦合装置产生反向电流,使快速机械开关电流快速过零熄弧,电流转入转移支路,后续步骤与混合式直流断路器相同。机械式直流断路器收到分闸指令后,快速机械开关直接有弧分闸,在达到有效开距后,转移支路触发开关导通,储能电容放电产生高频振荡电流并与主支路故障电流叠加,使主支路电流过零熄弧,电流转入转移支路,并对转移支路电容充电,恢复电压建立并施加于快速机械开关两端,后续步骤与混合式直流断路器相同。

2 快速机械开关结构原理及特点

2.1 快速机械开关结构原理

张北工程500 kV直流断路器快速机械开关分闸后,端间需要耐受高达800 kV的暂态恢复电压。为此,快速机械开关需要采用多断口串联方式,实现高耐压能力。不同技术路线500 kV直流断路器的快速机械开关断口串联数为8~12个不等。每个机械开关断口包含真空灭弧室、操作机构、均压设备、储能及控制单元、供能系统等组件,如图3所示。各部分均布置于直流高电位平台,通过支撑绝缘子、隔离供能变压器设计达到对地绝缘要求。

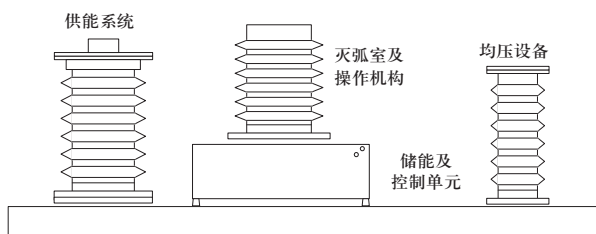


图3 直流断路器快速机械开关单个断口结构示意图

Fig. 3 Structure Diagram of HMS single break of DCCB

真空灭弧室主要实现分合闸操作,承载暂稳态电流及分闸恢复电压。操作机构是开关运动部分的驱动部件,一般采用电磁斥力原理,由动拉杆、斥力盘、分合闸励磁线圈、弹簧保持装置及缓冲机构构成。均压设备主要采用均压电阻和电容与断口杂散电容匹配,实现多串联断口间的均压。储能及控制单元是快速机械开关的驱动电源及控制核心,通过控制储能电容的充放电实现开关的快速动作,在直流断路器分合闸过程中,实现快速机械开关储能电容充电、动作触发、位置检测、内部故障检测和状

态上报等功能。供能系统主要为储能电容、控制单元等进行隔离供电。

2.2 快速机械开关特点

与传统交流断路器等常规机械开关相比,直流断路器快速机械开关动作速度快,行程精度控制要求高,电压和电流等电气应力严酷,需要一次和二次系统严密配合,内部电、磁、力、热多种物理量相互耦合,设计研制和质量管控难度大。以张北工程为例,与常规机械开关相比,直流断路器快速机械开关的主要技术特点及不同设计之处如下。

1) 触头运动速度快。快速机械开关接到分闸指令后需在2 ms内分闸至有效开距,速度远高于常规机械开关,通常需采用斥力机构,并根据动作特性要求对斥力线圈结构、参数进行精确设计。

2) 触头冲击力大。快速机械开关触头瞬时速度可达10 m/s以上,约为常规机械开关速度的10倍。常规机械开关触头的材料选型和结构强度设计方案难以满足要求,需对触头设计选型进行优化,并设计相应的缓冲吸收装置。

3) 多断口一致性要求高。常规机械开关仅需考虑单断口特性,而快速机械开关为多断口串联,为避免分闸不同期导致单断口击穿,各断口分闸到有效开距时间的分散性需控制在 $-0.2\text{ ms}\sim 0$,控制系统设计和操作机构工艺精度控制难度大,需配置高准确度位置传感器。

4) 触头运动过程中断口需要耐受高电压。快速机械开关断口分闸过程中,需耐受高达800 kV恢复电压,与传统机械开关静态耐压不同,该电压产生时各串联断口的触头处于分闸运动中,这对串联断口动作一致性和均压电路设计提出了极高要求。

5) 过电流耐受要求高。直流断路器分闸失灵时,需依靠柔直电网中下级直流断路器开断故障电流,故障清除前,失灵断路器快速机械开关需耐受短时过电流。因柔直电网储能元件多、故障电流发展极快,失灵断路器承受的短时电流应力严酷(波形如图4所示),快速机械开关主通流回路和连接部位组部件设计选型、装配精度及可靠性要求高。

6) 储能及控制单元可靠性及抗电磁干扰要求高。为保证快速机械开关动作准确性,储能及控制单元中的电容、电感等元件参数需要具有较高精度。同时,储能及控制单元位于500 kV高电位阀塔上,电磁环境恶劣,抗电磁干扰设计要求高。

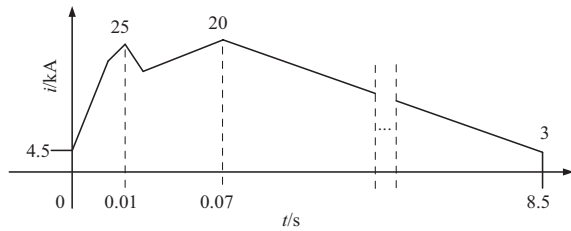


图4 直流断路器快速机械开关短时过电流波形示意图
Fig. 4 Waveform diagram of short time overcurrent of HMS of DCCB

3 快速机械开关典型故障特性

3.1 固封极柱故障

固封极柱采用环氧树脂将真空灭弧室和上、下出线基座等载流元件封装成一个整体, 其典型故障主要涉及灭弧室和封装紧固件两个方面。由于固封极柱电、力、热应力严酷, 其典型故障主要因设备机械强度、通流性能不足导致。

快速机械开关灭弧室触头运动速度快, 冲击力远大于传统交流断路器。张北工程直流断路器部分批次快速机械开关完成开断试验后, 触头出现碎裂、变形情况, 如图5所示。图5所示触头采用了粉末冶金工艺, 其机械强度低于采用锻、铸工艺制成的产品, 难以耐受快速机械开关反复分合闸冲击, 最终导致触头碎裂。

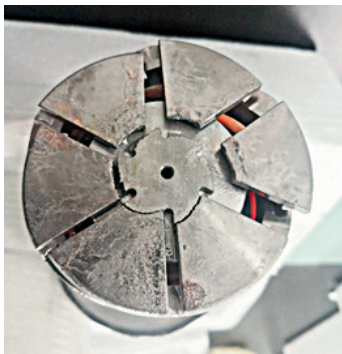


图5 灭弧室触头碎裂

Fig. 5 Contact fragmentation of arc-extinguishing chamber

此外, 张北工程某直流断路器进行最大连续运行试验时, 快速机械开关固封极柱发生爆炸, 如图6所示。快速机械开关电流应力严酷, 图6所示固封极柱灭弧室静端与出线座交界面出现接触不良, 使得接触电阻增大和温升急剧升高, 极柱内部烧蚀产生的 CO_2 等气体在高温下急剧膨胀, 导致灭弧室塌陷, 最终造成极柱断裂。



图6 固封极柱断裂

Fig. 6 Crack of sealed pole

3.2 操作机构故障

操作机构故障主要涉及主体结构和位置传感器两个方面。由于快速机械开关操作机构具有速度快、承受冲击大、行程短、结构配合精度要求高等特点, 其典型故障主要是因组件抗冲击性、结构稳定性、制造和安装精度不足导致。

张北工程某直流断路器因快速机械开关2个断口的缓冲器均发生刚度偏移(如图7所示), 导致开关分闸失败。该直流断路器快速机械开关的缓冲器采用了可调式结构, 刚性较低。快速机械开关多次操作后, 缓冲器受冲击严重, 发生刚度偏移, 造成开关分闸后大幅反弹, 最终导致分断失败。

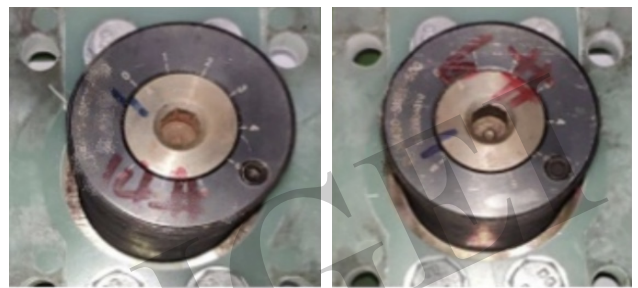


图7 试验后发生刚度偏移的可调阻尼缓冲器

Fig. 7 Adjustable damping buffer with stiffness offset after test

此外, 张北工程多台直流断路器发生快速机械开关位置传感器光纤信号被遮光板误遮挡(如图8和图9所示), 导致分合闸状态误判, 最终造成开关合闸失败。图8所示传感器的安装位置不准确, 导致开关合闸后传感器未能对准遮光板开窗, 被开窗边缘遮挡。图9所示传感器遮光板因安装时两侧缓冲器未调整至对称, 导致遮光板倾斜, 误将位置传感器光纤信号遮挡。

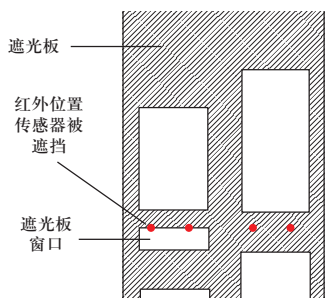


图8 传感器安装位置不准确

Fig. 8 Inaccurate installation position of sensors

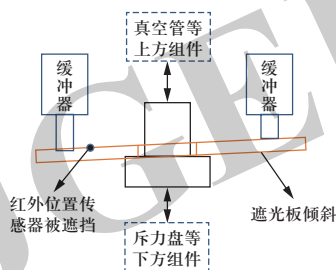


图9 传感器遮光板倾斜

Fig. 9 Tilt of shutter of sensor

3.3 储能及控制单元故障

快速机械开关储能及控制单元故障主要涉及储能回路和控制单元两个方面。快速机械开关触头的动能主要由储能回路电能转化而来，储能回路参数设计不合理、分散性管控不严格，易导致触头动作特性异常，是造成快速机械开关分合闸动作失败的主要原因之一。而快速机械开关控制单元故障的主要原因为控制策略不完善，未充分考虑快速机械开关各类组部件、装置异常工况下的应对策略。

在储能回路方面，张北工程多台直流断路器因储能电容电压设置不合理，导致合闸失败。例如，某直流断路器快速机械开关储能电容合闸电压设置偏小，未能完全克服开关最严苛情况下的最大机械阻力，导致在图10所示的机械开关机构“机械死点”位置出现卡滞。张北工程另一直流断路器快速机械开关储能电容电压过高，导致机械开关触头因动能过大而出现较大回弹，最终触头未能到达正确位置，产生合闸间隙，如图11所示，造成开关合闸失败。

目前对于直流断路器机械开关储能电容电压允许范围的设计和管控缺乏统一标准，电压值的调节较为盲目，导致电压易超限，从而造成隐患或故障。缺乏对储能电容电压的有效监控和告警策略，也是导致故障的重要原因之一。此外，储能电容容值对快速机械开关分合闸能量的储存及转化有着重要影响。储能电

容值易随运行时间发生衰减。然而目前缺乏对于储能电容容值及其分散性的统一管控标准，对在运直流断路器储能电容容值缺乏监控和检测，使得能量转化的精度难以保障。

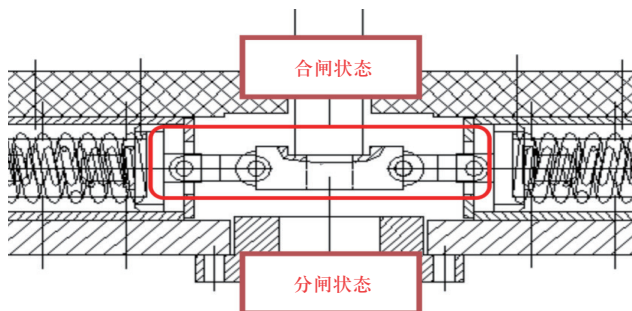


图10 快速机械开关机构卡滞位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of stagnation position of HMS operation mechanism

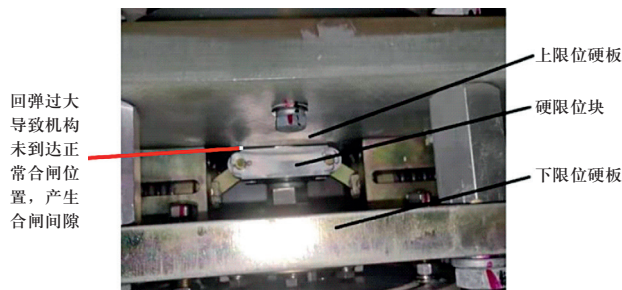


图11 快速机械开关合闸回弹过大导致合闸失败

Fig. 11 Closing failure caused by excessive closing rebound of HMS

在控制单元方面，张北工程某直流断路器曾在分闸过程中发生快速机械开关拒动，导致整机分闸失败。直流断路器快速机械开关指令通道连接方式如图12所示。该断路器控制系统下发分闸指令的逻辑为：当系统自检正常时，则指令出口；当系统自检异常时，则指令不出口。而快速机械开关控制器执行分闸指令逻辑为：不区分断路器控制系统的值班状态信

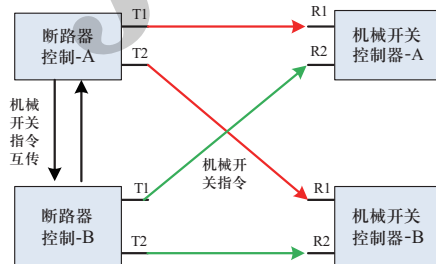


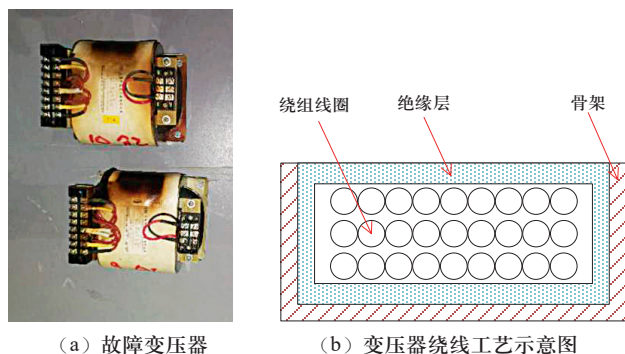
图12 快速机械开关指令通道连接方式示意图

Fig. 12 Schematic diagram of connection mode of command channel of HMS

号, R1和R2接收通道均通信正常时, 仅执行R1通道接收到的指令; R1接收通道故障时, 则执行R2通道接收到的指令。基于上述逻辑, 直流断路器分闸失败原因为: 断路器控制系统A自检异常、通信正常, 控制系统B自检和通信均正常, 因此仅控制系统B下发了分闸指令; 而机械开关控制器因控制系统A、B均通信正常, 根据通道指令优先级逻辑, 未执行控制系统B指令, 导致分闸失败。

3.4 供能系统故障

张北工程某技术路线直流断路器调试运行过程中多次出现快速机械开关电子变压器故障、烧毁(如图13所示), 故障原因为该电子变压器的端部绝缘设计存在缺陷。由于次级线圈间的层绝缘仅与线包同宽而未延伸到端圈内部, 未能对各层线圈进行准确、有效限位, 导致线匝绕到端部时易使线匝嵌入端圈与线包的缝隙中, 引起线匝端部错层, 下降层数多达4~5层, 导致线包匝间电位差显著上升, 引起匝间短路。此外, 直流断路器供能变压器也曾出现同类设计缺陷, 导致线圈错层, 引发变压器绝缘击穿。匝间短路是供能系统中变压器的典型故障, 且正常运行时, 匝间短路对变压器外特性影响不大, 不易被发现, 因此容易逐步发展为严重故障。导致上述故障问题的原因主要为变压器线圈设计不合理、绕线工艺管控不严格、试验检测和监控措施不完善。



(a) 故障变压器

(b) 变压器绕线工艺示意图

图 13 快速机械开关电子变压器

Fig. 13 Electronic transformer of HMS

4 快速机械开关可靠性提升管控

快速机械开关是直流断路器中快速实现电气隔离并耐受恢复电压的主要装置, 直流断路器的各种运行工况不应导致快速机械开关的故障或损伤。围绕现有直流断路器快速机械开关在固封极柱、操作机构、储

能和控制单元、供能系统方面存在的设计隐患及质量管控薄弱环节, 从设计、制造、试验等方面提出针对性的可靠性提升措施。

4.1 固封极柱可靠性提升

固封极柱中真空灭弧室触头材料选型应充分考虑其导电性和机械强度, 宜采用电弧熔炼、真空熔铸等方法, 不建议采用粉末冶金。导电杆应综合考虑其机械强度及散热性能。如采用纯无氧铜结构, 需充分考虑机械强度特性; 如采用无氧铜内嵌钢芯结构, 需充分考虑散热特性及导杆的通流能力, 钢芯结构不能削弱无钢芯结构的通流能力。针对快速机械开关分闸冲击力较大的特点, 应采用有限元等方法对灭弧室波纹管进行加固设计, 如图14所示, 对波纹管波半径、波距、波数和壁厚等参数进行优化, 改善波纹管的应力分布, 提高其机械寿命。需要结合快速机械开关结构特性, 针对均压电容及相应的均压电路进行合理化设计, 将动态电压差值控制在 $\pm 5\%$ 以内, 从而保证机械开关可靠耐压。

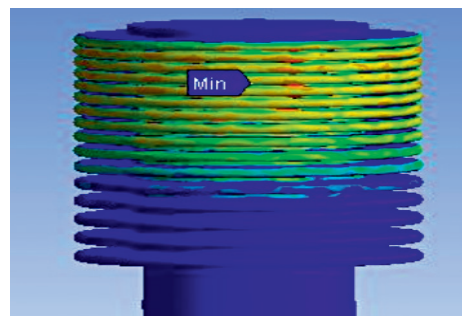


图 14 波纹管机械特性仿真分析

Fig. 14 Simulation analysis of mechanical characteristics of bellows

针对电气连接不可靠导致的固封极柱内部接触电阻过大、发热严重等问题, 固封极柱螺栓紧固应全部采用力矩扳手, 采用自检和专检两道工序, 以及“两道力矩线”标记。波纹管入炉前应检查焊料、动导电杆、端部连接件相对位置。

所有快速机械开关在出厂前应进行不少于300次的磨合试验, 磨合前后测量单断口总回路电阻, 如果单断口总回路电阻超过额定值的110%, 应及时进行更换处理。在快速机械开关通流试验前后应进行单断口总回路电阻测量, 如果单断口总回路电阻超过额定值的110%, 应及时进行更换处理。直流断路器每台快速机械开关应进行常温条件下的通流试验, 试验温升应小于45 K。抽取1台快速机械开关进行50 °C条件

下的通流试验,试验温升应小于50 K。针对在分闸过程中需要燃弧的直流断路器,在断路器整机型式试验后应更换快速机械开关灭弧室,更换灭弧室后的快速机械开关应补充进行例行试验和通流试验。

4.2 操作机构可靠性提升

快速机械开关触头达到有效开距时间的分散性应不超过10%,且应为负偏差,应提高串联快速机械开关动作的一致性,确保可靠分断。快速机械开关应设计有导向结构,分合闸保持力实际值与设计值的偏差应不超过设计值的20%,且应为正偏差。分、合闸动作完成后,驱动机构分、合闸到位偏差应不超过0.5 mm。对于油缓冲机构,缓冲器应采用定阻尼孔设计,不应采用可调式结构,液压油应选用航空液压油,并保持-10℃~80℃区间内缓冲特性的稳定性。斥力盘应选用高强度铝合金材料,避免高速运动过程中斥力盘碰撞变形(硬铝、航空铝)。快速机械开关应至少配置分闸位置、有效开距位置、合闸位置三套传感器,如图15所示。位置传感器遮光板的尺寸和布置应至少考虑制造加工偏差和到位偏差等的影响,并预留足够的裕度。当遮光板位置偏离正常位置±2 mm范围内,不应造成误遮挡或位置误报。直流断路器快速机械开关静止和分合闸动作后,遮光板位置偏差应不超过0.5 mm。

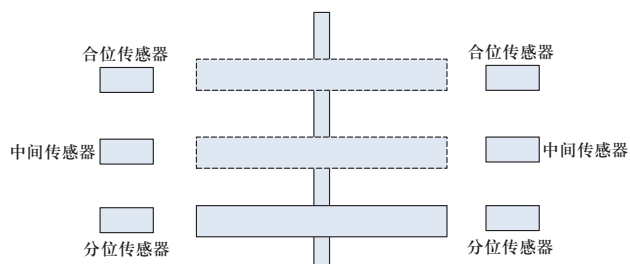


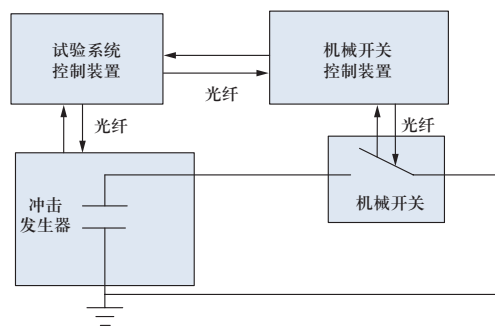
图 15 快速机械开关位置传感器布置图

Fig. 15 Position sensor layout of HMS

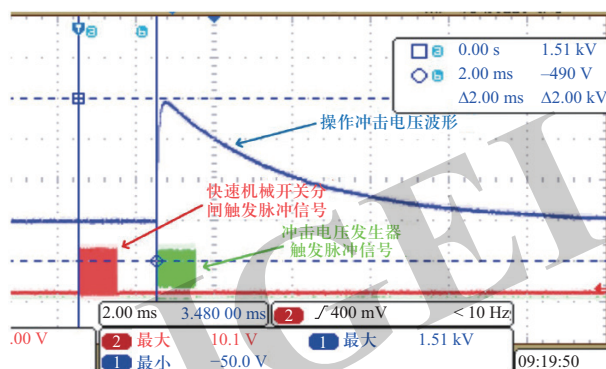
线圈与绝缘板间应固化为一体化结构,具备较强的抗冲击、振动能力,避免产生变形或位移。斥力盘与线圈间隙控制应采用专用工装定位。应严格控制斥力盘与线圈间隙的分散性对有效开距时间的影响,避免间隙分散性控制不合理引起有效开距时间差异大。为保证满足同心度设计要求,应严格控制关键原材料组部件的参数分散性,在入厂检验时进行逐个检测,建议每条弹簧力矩偏差不超过5%,弹簧保持机构应动作灵敏,无任何卡滞。线圈盘绕制过程中,铜带需

要均匀,并保证线圈盘的平面度。试制装配时需要根据对中情况进行力值调整,确保同心度。安装时应注意开关配合是否过松或过紧。

快速机械开关应进行动态绝缘试验,验证多台开关的动态绝缘性能、同期性、均压性能,试验回路如图16所示。所有快速机械开关都应进行行程曲线测试,分闸回弹应控制在总行程的20%以内,合闸回弹应控制在现场的10%以内。行程曲线测试建议采用非接触式,测试应考虑整个机构振动对测试结果的影响,保证测试精度。每台开关出厂前,至少进行5次分闸、5次合闸试验。每次分、合闸动作完成后,检查分、合闸到位偏差,应不超过0.5 mm。每台快速机械开关出厂前,在进行300次磨合过程中观察开关特性是否发生变化。直流断路器年度检修时,每台快速机械开关应进行合闸试验,检查合闸间隙,应不超过0.5 mm。



(a) 试验回路示意图



(b) 试验波形

图 16 快速机械开关动态冲击绝缘试验

Fig. 16 Dynamic impact insulation test of HMS

4.3 储能和控制单元可靠性提升

快速机械开关储能电容电压在额定值的±1.3%范围内波动时,仍应能够满足分、合闸时间及分闸时2 ms动态绝缘要求,以保证快速机械开关在电压波动较大情况下的稳定性。应确保储能电容电压实际波动范围

不超过额定值的 $\pm 0.75\%$ 。分、合闸触发回路应采用双晶闸管串联设计,如图17所示,需同步触发开关方可动作,以防止误动作。每只晶闸管采用多脉冲触发控制,保证晶闸管可靠触发导通,避免出现拒动情况。

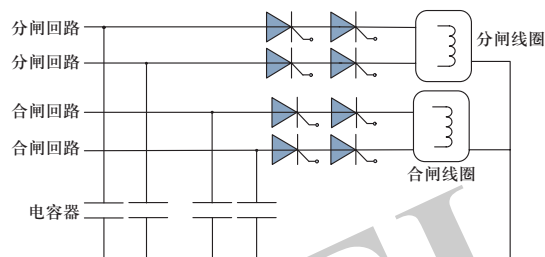


图 17 快速机械开关动分合闸触发回路示意图

Fig. 17 Schematic diagram of trigger circuit of HMS

快速机械开关控制板功能结构典型配置方案如图18所示。板卡供电电源应采用两个独立的电源模块,配置双电源监测电路,设置心跳监视及反馈信号,用于监视快速机械开关控制单元状态是否正常。控制板卡还应配置电源异常保护、下行通信异常保护、电容充电回路异常保护、电容电压储能异常保护、开关位置异常保护等保护。控制板卡上送直流断路器控制单元的信号应至少包括机械开关控制板故障、开关故障、储能电容状态、快速机械开关位置状态、分合闸电容电压、机械开关动作次数等信号。若机械开关控制板卡同时接收断路器A、B两路控制系统的分合闸指令,应根据其值班状态完成指令选取,在断路器值班控制系统与机械开关控制板通信正常时优先执行该通道指令,否则维持当前状态。

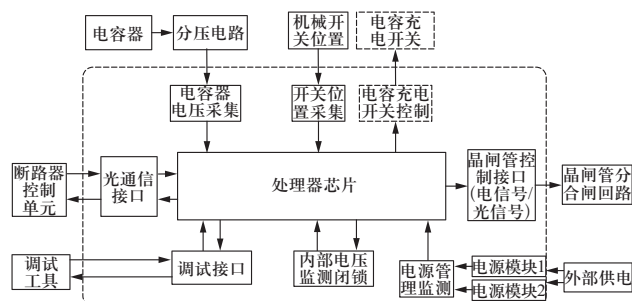


图 18 快速机械开关控制板卡结构示意图

Fig. 18 Structure Diagram of the control board card of HMS

控制分合闸电压的稳压电源上的调压旋钮,应在电压调试完毕后进行点胶等永久性固定处理,避免旋钮松动导致电压偏离。快速机械开关控制板光纤接口应采取有效的防灰尘、异物等进入的设计,提升光纤通信的可靠性。光纤及线缆可采用去应力护套、密封

防护套等增强防护性能,防止损伤。合闸电容器应严格控制容值误差范围,偏差应控制在正偏差3%。

每种技术路线直流断路器应抽取1台快速机械开关断口,在储能电容极限电压下进行分合闸试验,分合闸时间应满足设计要求。建议年度检修期间对开关分合闸时间进行检测,对分合闸时间偏离正常允许范围的开关分合闸充电电压进行调整。

4.4 供能系统可靠性提升

快速机械开关供能变压器内外绝缘设计时,应考虑直流耐压要求,防止电荷积累导致击穿。供能变压器绝缘材料应具有高导热特性,散热性能良好。对于 SF_6 层间变压器,应安装三只密度表,通过三取二信号,确保密度表信号能真实反应产品内部气体压力,避免误动作。快速机械开关二次供电部分,建议采用输入范围更宽的稳压电源模块,减少电压波动对后续供电回路造成的影响。供电线路应采用屏蔽双绞线,宜在线路上配置屏蔽磁环,抑制电源侧干扰传入。

为减少绝缘材料承受直流耐受电压,宜采用引线管悬挂结构,将二次线圈悬挂在引线管上。引线管应有足够的强度,保证产品在运输和运行过程的稳定性。为避免变压器线圈中导线匝绕到端部时嵌入端圈与线包的缝隙中引起线匝端部错层,变压器绕组层间绝缘层的宽度应大于线包宽度、与骨架同宽,同时线圈在端部绕制时上一层线圈相对下一层线圈建议缩减2~3圈,如图19所示。

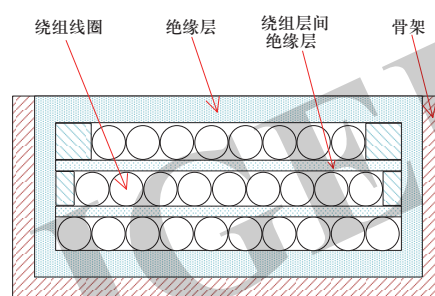


图 19 优化的电子变压器绕线工艺示意图

Fig. 19 Schematic diagram of optimized winding process of electronic transformer

供能变压器感应耐压试验前后应进行空载电流及空载试验,对空载损耗、空载电流大小及分散性进行严格控制,前后偏差不大于5%。额定电压下应无局放,进行72 h 1.5倍空载感应耐压试验。为及时发现供能变压器匝间短路隐患,断路器年度检修时,应对供能变压器进行变比测试,并进行初级绕组和次级绕组

的直阻测量,各测量值与设计值的偏差应不超过设计值的 $\pm 5\%$ 。为避免机械开关电力电子变压器因匝间短路等原因过热,于直流断路器年检时对其进行红外温升检测,温升应不超过40 K。

5 结论

本文依托张北工程,分析了500 kV直流断路器快速机械开关技术特点,提出快速机械开关典型故障特性及原因。快速机械开关固封极柱典型故障主要因设备机械强度、通流性能不足导致。操作机构典型故障主要是因组件抗冲击性、结构稳定性、制造和安装精度不足导致。储能回路典型故障原因为参数设计不合理、分散性管控不严格。控制单元故障的主要原因为控制策略不完善,未完全考虑机械开关各类组部件异常工况下的应对策略。供能系统故障的主要原因为变压器线圈设计不合理、绕线工艺管控不严格、试验检测和监控措施不完善。

在此基础上,本文围绕现有直流断路器快速机械开关在固封极柱、操作机构、储能和控制单元、供能系统四个方面存在的设计隐患及质量管控薄弱环节,从设计、制造、试验三个方面提出针对性的可靠性提升措施。研究成果已应用于张北工程直流断路器的升级改造,为500 kV直流断路器快速机械开关可靠性提升和运维检修提供了指导和依据,为直流断路器及柔性直流电网可靠稳定运行提供了保障。

参考文献

- [1] 郭贤珊,李探,李高望,等.张北柔性直流电网换流阀故障穿越策略与保护定值优化[J].电力系统自动化,2018,42(24): 196-202.
GUO Xianshan, LI Tan, LI Gaowang, et al. Fault ride-through strategy and protection setting optimization of converter valve for Zhangbei VSC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 196-202(in Chinese).
- [2] 郭贤珊,梅念,李探,等.张北柔性直流电网盈余功率问题的机理分析及控制方法[J].电网技术,2019,43(1): 157-164.
GUO Xianshan, MEI Nian, LI Tan, et al. Study on solution for power surplus in Zhangbei VSC-based DC grid mechanism analysis and control method[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 157-164 (in Chinese).
- [3] 孙栩,曹士冬,卜广全,等.架空线柔性直流电网构建方案[J].电网技术,2016,40(3): 678-682.
SUN Xu, CAO Shidong, BU Guangquan, et al. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 678-682 (in Chinese).
- [4] HE J H, CHEN K A, LI M, et al. Active injection protection scheme for flexible HVDC grids based on amplitude of input impedance[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 532-542.
- [5] 王子文,张英敏,李保宏,等.柔性直流电网潮流转移特性及安全运行影响分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(3): 103-113.
WANG Ziwen, ZHANG Yingmin, LI Baohong, et al. Analysis of power flow transfer characteristics and influence on the safety operation of a flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 103-113 (in Chinese).
- [6] 王国英,Arman Hassanpoor,邓娜,等.应用于高压直流电网充电启动的混合式直流断路器[J].全球能源互联网,2018,1(4): 430-436.
WANG Guoying, HASSANPOOR A, DENG Na, et al. Hybrid HVDC breaker for HVDC grid energization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 430-436 (in Chinese).
- [7] 陈名,黎小林,许树楷,等.机械式高压直流断路器工程应用研究[J].全球能源互联网,2018,1(4): 423-429.
CHEN Ming, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. Engineering application research for mechanical HVDC circuit breaker[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 423-429 (in Chinese).
- [8] 张翔宇,余占清,黄瑜珑,等.500 kV耦合负压换流型混合式直流断路器原理与研制[J].全球能源互联网,2018,1(4): 413-422.
ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, HUANG Yulong, et al. Principle and development of 500 kV hybrid DC circuit breaker based on coupled negative voltage commutation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 413-422 (in Chinese).
- [9] 陈羽,石巍,杨兵,等.混合式高压直流断路器控制保护系统[J].电力工程技术,2021,40(5): 164-170.
CHEN Yu, SHI Wei, YANG Bing, et al. Hybrid HVDC circuit breaker control and protection system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 164-170 (in Chinese).
- [10] 李乐乐,汪涛,李汉杰,等.一种提高高压直流断路器机械开关触发回路可靠性的方法[J].浙江电力,2020,39(5): 107-112.
LI Lele, WANG Tao, LI Hanjie, et al. A reliability improvement method for trigger circuit of mechanical switch of high-voltage DC breaker[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(5): 107-112 (in Chinese).
- [11] BELDA N A, SMEETS R P P. Test circuits for HVDC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 285-293.
- [12] MAJUMDER R, AUDDY S, BERGGREN B, et al. An alternative method to build DC switchyard with hybrid DC breaker for DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 713-722.
- [13] 魏晓光,杨兵建,汤广福.高压直流断路器技术发展与实践[J].电网技术,2017,41(10): 3180-3188.
WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, TANG Guangfu. Technical development and engineering applications of HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3180-3188 (in Chinese).
- [14] XIANG B, LIU Z Y, GENG Y S, et al. DC circuit breaker using superconductor for current limiting[J]. IEEE Transactions

- on Applied Superconductivity, 2015, 25(2): 1-7.
- [15] NGUYEN V V, SON H I, NGUYEN T T, et al. A novel topology of hybrid HVDC circuit breaker for VSC-HVDC application[J]. Energies, 2017, 10(10): 1675.
- [16] CHEN Z Y, YU Z Q, ZHANG X Y, et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 2883-2892.
- [17] YANG K, YANG Y, JUNAID M, et al. Direct-current vacuum circuit breaker with superconducting fault-current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(1): 1-8.
- [18] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361 (in Chinese).
- [19] 何俊佳, 袁召, 赵文婷, 等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15 (in Chinese).
- [20] 刘亚萍, 杨勇, 魏争, 等. 柔性直流输电工程高压直流断路器耗能支路MOV可靠性提升管控[J]. 设备监理, 2021(2): 21-26.
LIU Yaping, YANG Yong, WEI Zheng, et al. High voltage DC circuit breaker energy consumption branch MOV reliability improvement control of flexible DC transmission project[J]. Plant Engineering Consultants, 2021(2): 21-26 (in Chinese).
- [21] 扈梦玥. 高压直流断路器用压接式IGBT器件可靠性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
HU Mengyue. Research on reliability of press-pack IGBT for HVDC circuit breaker[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019 (in Chinese).
- [22] 刘远, 张升, 詹婷, 等. 500 kV直流断路器隔离供能系统均压设计[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4323-4330.
LIU Yuan, ZHANG Sheng, ZHAN Ting, et al. Equalization design of isolated power supply system for 500 kV DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4323-4330 (in Chinese).
- [23] 许元震, 谢晔源, 吕玮, 等. 混合式高压直流断路器供能系统设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3856-3863.
XU Yuanzhen, XIE Yeyuan, LÜ Wei, et al. Design of power supply system in hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3856-3863 (in Chinese).
- [24] 张猛, 马聪, 王红斌, 等. 535 kV耦合负压式直流断路器供能系统设计方案[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2677-2683.
ZHANG Meng, MA Cong, WANG Hongbin, et al. Design scheme for power supply system of 535 kV coupled negative voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2677-2683 (in Chinese).
- [25] 吕玮, 许元震, 曹冬明, 等. 高压直流断路器电力电子器件供能技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2783-2790.
LÜ Wei, XU Yuanzhen, CAO Dongming, et al. Power electronic device power supply technology of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2783-2790 (in Chinese).
- [26] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3809-3818.
HE Junjia, YUAN Zhao, JING Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818 (in Chinese).
- [27] 江壮贤, 庄劲武, 王晨, 等. 基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 172-177.
JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simulation analysis and design of a high speed contact mechanism based on electro-magnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 172-177 (in Chinese).
- [28] 温伟杰, 李斌, 李博通, 等. 电磁斥力机构的参数匹配与优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4102-4112.
WEN Weijie, LI Bin, LI Botong, et al. Parameters matching and optimal design of the electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4102-4112 (in Chinese).
- [29] 张宁, 魏晓光, 高冲, 等. 快速机械开关线圈型电磁斥力机构优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2512-2518.
ZHANG Ning, WEI Xiaoguang, GAO Chong, et al. Research on optimization design of coil type electromagnetic repulsion mechanism for fast mechanical switch[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2512-2518 (in Chinese).
- [30] 田宇, 王利, 田阳, 等. 直流断路器用快速开关多场联合仿真优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 55-62.
TIAN Yu, WANG Li, TIAN Yang, et al. Multi-field Co-simulation optimization method for high-speed switch in DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 55-62 (in Chinese).
- [31] 黄瑜琰, 张祖安, 温伟杰, 等. 高压直流断路器中电磁斥力快速驱动器研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3171-3178.
HUANG Yulong, ZHANG Zu'an, WEN Weijie, et al. Research on an ultrafast driver for HVDC circuit breaker with electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3171-3178 (in Chinese).

收稿日期: 2022-11-19; 修回日期: 2023-01-05。

作者简介:



魏争

魏争(1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为特高压、柔性直流输电技术及应用。通信作者, E-mail: weizhengbj@163.com。

文卫兵(1965), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为特高压、柔性直流输电技术及应用。

杨勇(1984), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为特高压、柔性直流输电技术及应用。

张涛(1974), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为特高压、柔性直流输电技术及应用。

陈争光(1988), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为特高压、柔性直流输电技术及应用。

(责任编辑 李锡)