

适用于高压直流断路器的多断口串联 高速机械开关同步性研究

陈龙龙¹,周万迪¹,张升¹,李伟²,方春恩²,任晓²

(1. 先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司),北京 102209;

2. 西华大学 电气与电子信息学院,四川 成都 610039)

摘要:多断口串联的高速机械开关作为混合式高压直流断路器的重要组成部分,其多断口间的同步性对高压直流断路器的开断性能有着重要影响。对多断口高速机械开关的拓扑结构和工作原理进行了研究,分析了操动机构的线圈参数、储能电容、环境温度、充电电压、控制系统等因素对同步性的影响规律,并提出了通过控制线圈内阻、储能电容值偏差和工艺等措施保证断口间的同步性。在此基础上,对张北多端柔性直流工程535 kV混合式高压直流断路器用高速机械开关的同步性进行测试,测试结果表明各断口的分散性在 ± 0.2 ms内,为高压直流断路器的可靠开断提供了保证。

关键词:高压直流断路器;高速机械开关;多断口;同步性

中图分类号:TM561

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202302011

0 引言

基于柔性直流输电技术的直流电网是解决新能源并网和消纳问题的有效技术手段之一,而高压直流断路器是直流电网的核心控保设备^[1-2]。在直流系统中,高压直流断路器不仅需要承载直流运行回路中的正常工作电流,而且还要求能够快速开断由各种故障引发的短路电流。目前,高压直流断路器主要存在3种形式:基于传统机械开关的机械式高压直流断路器、基于电力电子的全固态高压直流断路器及迅速发展的混合式高压直流断路器(hybrid high voltage DC circuit breaker, HDCCB)^[3-6]。由于HDCCB集成了机械式和全固态式高压直流断路器的主要优点,具有通态损耗小、分断电流快的特点,是未来高压直流断路器发展的主要趋势。HDCCB通常由高速机械开关和电力电子串联构成的主支路、全固态开关构成的转移支路和避雷器构成的耗能支路组成。高速机械开关作为HDCCB的核心部件,在线路正常时一直导通;而在出现故障时高速机械开关快速运动并动态绝缘,这是保证其可靠开断的关键环节^[7-11]。

目前高压直流断路器通常采用多断口串联的拓扑结构,该结构提高了对分合闸过程中同步性的要求^[12-14]。文献[15]按照 ± 160 kV南澳多端柔性直流

输电系统的要求设计了4个额定直流电压为40 kV的机械开关模块串联构成的高压直流断路器,通过试验得出不加并联均压阻容时每个断口承受的暂态恢复电压可高达79 kV,因此采用了并联均压阻容和均压电阻的形式来实现暂稳态均压。文献[16-17]开展了多断口串联的机械开关的稳态和暂态电压分配特性试验,分析了均压组件参数对断口分配特性的影响。文献[18]开展了多断口光控真空断路器的同步控制系统硬件实现和算法研究。文献[19]提出了多断口HDCCB用于柔性直流电网直流侧故障隔离和重合闸阶段的控制策略,并分析了关键参数的设计方法。但上述研究均未对多断口拓扑结构的高速机械开关的同步性进行分析。

本文提出了一种采用多级单元模块串联形式的535 kV HDCCB,并对高压直流断路器用多断口串联高速机械开关的同步性和分合闸机械特性进行了更全面的研究,分析了线圈电阻、电容容量、环境温度、充电电压的偏差等对直流断路器同步性的影响,提出了保证多断口同步性的措施,最后搭建了平台对开关同步性进行测试验证。

1 拓扑结构及原理

1.1 多断口拓扑结构

图1为适用于535 kV HDCCB的多断口高速机械开关拓扑结构,采用多级单元模块串联的形式,该拓扑结构主要由以下4个部分组成。

1) 高速机械开关。

S_A-S_H 为串联的高速机械开关模块。直流线路正常工况下机械开关闭合同流;系统出现短路故障时,高速机械开关模块同时接收HDCCB的控制指令

收稿日期:2022-08-18;修回日期:2023-01-05

在线出版日期:2023-02-15

基金项目:先进输电技术国家重点实验室开放基金资助项目(GEIRI-SKL-2018-004)

Project supported by the Open Fund of the State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (GEIRI-SKL-2018-004)

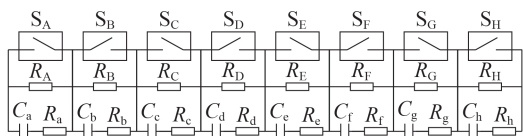


图1 高速机械开关拓扑结构

Fig.1 Topology structure of high-speed mechanical switches

实现高速合分闸操作。

2) 静态均压电阻。

$R_A—R_H$ 为静态均压电阻。在稳态时,高速机械开关的直流电压分布主要由真空断口的绝缘电阻决定。因此,必须考虑断口间绝缘电阻不一致性的影响。为了实现静态均压,需要在各断口两端并联大功率高压电阻实现静态均压。

3) 动态均压电容。

$C_a—C_h$ 为均压电容。由于每个真空开关断口的动触头、静触头和屏蔽罩之间存在杂散电容,当转移支路关断后,断口两端所承受的暂态开断电压(transient interrupting voltage, TIV) 主要根据断口间的杂散电容值进行分配,从而导致串联断口间的动态电压分配不均匀。为了实现动态均压,需要在各断口两端并联均压电容实现动态均压。

4) 阻尼电阻。

$R_a—R_h$ 为均压电容串联阻尼电阻。在开断过程中, TIV 的峰值为几百 kV, 均压电容中会出现幅值很高的 di/dt , 产生较高的电应力。因此需要通过串联阻尼电阻来降低均压电容流过的电流峰值, 实现对均压电容的保护。

1.2 多断口高速机械开关子模块

1.2.1 子模块结构

多断口串联的高速机械开关单元模块的结构如图2所示,其主要由环氧固封的真空灭弧室、金属盘型电磁斥力机构、双稳弹簧保持装置、驱动电路等组

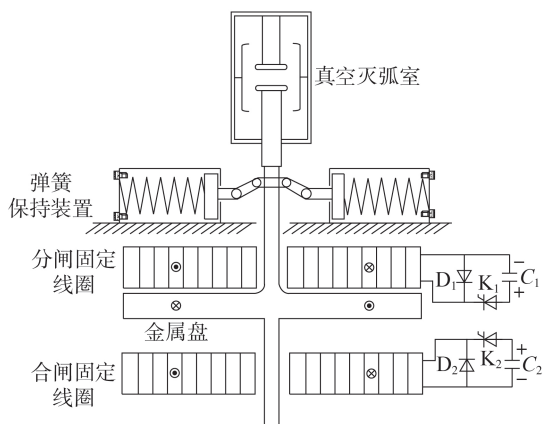


图2 子模块结构

Fig.2 Structure of sub-module

成,其中驱动电路包含储能电容 C_1 、 C_2 和续流二极管 D_1 、 D_2 以及晶闸管 K_1 、 K_2 。

真空灭弧室的作用是长期通流和承受切除故障过程中的 TIV; 电磁斥力机构的作用是为高速机械开关提供驱动,使真空灭弧室的动触头快速运动到耐受 TIV 的绝缘距离; 驱动杆的作用是连接真空灭弧室动触头和电磁斥力机构,当电磁斥力机构动作时带动真空灭弧室的动触头高速运动,因此金属盘的运动位移反映了灭弧室动触头的运动位移; 双稳弹簧保持装置的作用是提供保持力使高速机械开关保持在分合闸位置。

1.2.2 电磁斥力机构工作原理

电磁斥力机构的工作原理如图3所示。图中: B 为磁感应强度; F 为电磁斥力。其工作原理为: 储能电容放电并在分合闸线圈中产生励磁电流; 同时励磁电流产生交变的电磁场,进而在金属盘中产生感应涡流。由于励磁电流和感应涡流之间的方向相反,使得金属盘和线圈之间产生电磁斥力。在电磁斥力的作用下,真空灭弧室的动触头高速运动,从而实现高速机械开关的合分闸动作。

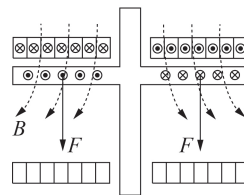


图3 电磁斥力机构工作原理

Fig.3 Working principle of electromagnetic repulsion mechanism

1.2.3 电磁斥力机构数学模型

图4为电磁斥力机构励磁回路等效电路。图中: R_1 和 R_2 分别为励磁线圈和金属盘的等效内阻; L_1 和 L_2 分别为励磁线圈和金属盘的等效电感; M 为励磁线圈和金属盘的互感; u_0 为储能电容 C_1 的初始电压; u_1 为励磁电流电压; u_2 为感应涡流电压; R_{C1} 为储能电容 C_1 的等效电阻; L_{C1} 为储能电容 C_1 的等效电感; i_0 为励磁线圈电流; i_1 为电磁斥力机构中的感应涡流; R_{ar} 、 L_{ar} 分别为电枢绕组电阻、电感。储能电容 C_1 两端并联功率二极管,可以避免电容受到回路反

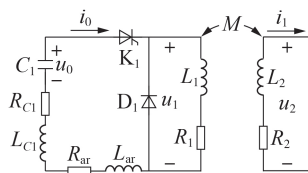


图4 电磁斥力机构放电回路等效电路

Fig.4 Equivalent circuit diagram of electromagnetic repulsion mechanism discharge circuit

向电流而损坏,同时还起到续流作用,有效延长分合闸线圈电流作用时间,进而提高电磁斥力机构的效率,更有利于开关分合闸操作。

用二阶微分方程对电磁斥力机构的放电回路进行表述。根据能量守恒原理,以电磁斥力机构的分闸操作过程为例, dE_c 表示储能电容储存的电能, dW 表示电磁斥力机构的机械做功, dQ 表示热损耗, dE_m 表示磁场能量的变化,其关系可表示为:

$$dE_m = dW + dQ \quad (1)$$

储能电容存储的电能为:

$$dE_c = u_0 i_0 dt + u_1 i_1 dt \quad (2)$$

根据图4,感应涡流电压可表示为:

$$u_0 + i_0(R_1 + R_{C1}) + L_1 \frac{di_0}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + \frac{d\phi_1}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$i_0 R_2 + L_2 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_0}{dt} + \frac{d\phi_1}{dt} = 0 \quad (4)$$

式中: ϕ_1 为励磁电流磁链。电压与励磁电流、感应涡流的关系可分别表示为:

$$u_1 = \frac{d\phi_1}{dt} + i_0 R_1 \quad (5)$$

$$u_2 = \frac{d\phi_2}{dt} + i_0 R_2 \quad (6)$$

式中: ϕ_2 为感应涡流磁链。励磁电流磁链和感应涡流磁链方程可分别表示为:

$$\phi_1 = i_0 L_1 + i_1 M \quad (7)$$

$$\phi_2 = i_1 L_2 + i_0 M \quad (8)$$

由励磁线圈和金属盘之间的耦合关系可得:

$$dE_c = i_0^2 R_1 dt + i_1^2 R_2 dt + i_0 L_1 di_0 + i_0 M di_1 + i_1 L_2 di_2 + i_1 M di_1 + 2i_0 i_1 dM \quad (9)$$

励磁电流和感应涡流磁能 E_m 为:

$$E_m = \frac{1}{2} i_0^2 L_1 + \frac{1}{2} i_1^2 L_2 + i_0 i_1 M \quad (10)$$

可将励磁线圈等效电感 L_1 和金属盘等效电感 L_2 视作常数,则对式(10)求微分可得:

$$dE_m = i_0 L_1 di_0 + i_1 L_2 di_1 + i_0 M di_1 + i_1 M di_1 + i_0 i_1 dM \quad (11)$$

热损耗为:

$$dQ = i_0^2 R_1 dt + i_1^2 R_2 dt \quad (12)$$

由式(12)整理可得电磁斥力机构机械能为:

$$dW = i_0 i_1 dM \quad (13)$$

由式(13)可知,励磁电流、感应涡流大小以及互感大小皆是影响电磁斥力机构机械做功的因素,且与回路通电的时间无关。整理可得电磁斥力 F 的表达式为:

$$F = \frac{dW}{dx} = i_0 i_1 \frac{dM}{dx} \quad (14)$$

式中: x 为线圈与金属盘间的垂直距离。由式(14)可知,电磁斥力 F 与励磁电流 i_0 、金属盘中的感应涡流 i_1 以及互感 M 随位置变化率 dM/dx 紧密相关。

高速机械开关的机械运动学方程为:

$$\begin{cases} F_a - F_f - F_x = ma \\ v = \int_0^t a dt \\ s = \int_0^t v dt \end{cases} \quad (15)$$

式中: F_a 为金属盘在运动方向受到的电磁斥力; F_f 为电磁斥力机构受到的反力(包括运动时的摩擦力和真空灭弧室的自闭力); F_x 为弹簧保持机构保持力; m 为运动部分质量; a 为开关运动加速度; v 为运动速度; s 为运动位移。

2 操作机构同步性分析

本文所提的适用于高速机械开关的多断口串联拓扑结构对开关端口同步性要求增加。由电磁斥力机构工作原理可知,电磁斥力 F 决定了高速机械开关动态性能,而电磁斥力 F 主要由 i_0 、 i_1 和 dM/dx 决定。改变电磁斥力机构的各项结构参数和放电回路参数都将引起 i_0 、 i_1 和 dM/dx 的改变,导致开关动态性能改变,从而影响高速机械开关开断的同步性。

2.1 线圈电阻偏差的影响

线圈电阻偏差会导致线圈电流 i_0 、感应涡流 i_1 发生变化,改变电磁斥力的同时影响高速机械开关开断的同步性。线圈电阻对高速机械开关的运动特性影响如图5所示,图中 t_0 为高速机械开关断口的分闸绝缘到位时间。线圈电阻在5、10、15 mΩ变化时,随着线圈电阻的增大,电流峰值逐渐减小,电磁斥力峰值分别约减小了4.7%和9.1%,分闸绝缘到位时间逐渐增大。由图5(d)可知,线圈电阻在此范围内变化时,所设计的电磁斥力机构的分闸动作满足2 ms运动到绝缘距离10 mm的要求。但要满足分闸时运动到10 mm绝缘距离时间分散性在±0.2 ms以内,则要求加工制作过程中对线圈尺寸进行控制,使得

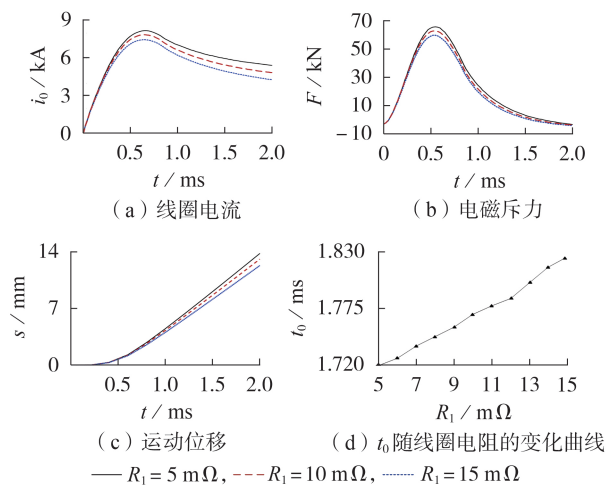


图5 线圈电阻变化时的运动特性曲线

Fig.5 Motion characteristic curves with coil resistance variation

线圈电阻偏差控制在 $4\text{ m}\Omega$ 以内,并尽量减小连接导线杂散电阻偏差对电磁斥力机构时间同步性的影响。

2.2 电容值偏差的影响

电磁斥力机构多采用金属化膜脉冲电容器作为机构供能电源,但脉冲电容实际生产过程中难以保证同一规格电容容值的绝对一致。本文以 $3700\text{ }\mu\text{F}$ 的标准电容作为基准,使电容容值在标准电容值的 $-5\%\sim 5\%$ 以内变化取值,对误差每变化 1% 的 11 个电容值进行仿真分析。电容偏差对高速机械开关的运动特性影响如图 6 所示。

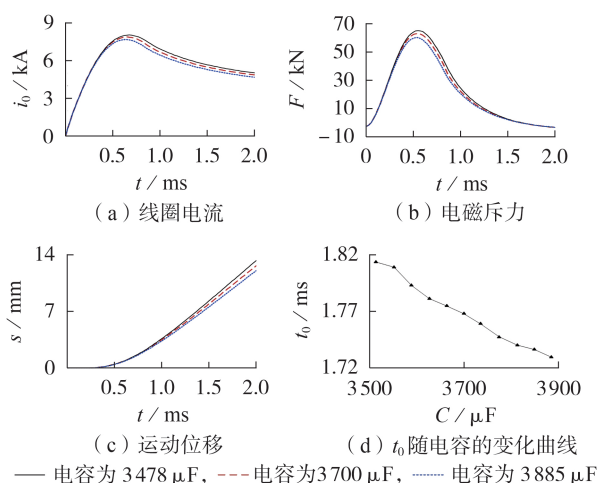


图6 电容值变化时的运动特性曲线

Fig.6 Motion characteristic curves with capacitance variation

由图 6 可知,储能电容的容值在 $-5\%\sim 5\%$ 内变化时,随着电容值的增大,线圈电流 i_0 峰值增大,电磁斥力也随之增大,分闸绝缘到位时间相应减小。为了满足运动到 10 mm 绝缘距离的运动时间分散性在 $\pm 0.2\text{ ms}$ 以内,则设计时要求储能电容值的偏差应控制在 $0\sim 3\%$ 以内。因此,为了保证储能电容的偏差在允许范围,主要采取以下措施:①采用同一批金属化薄膜,薄膜厚度偏差小于 5% ,薄膜宽度偏差小于 0.5 mm ;②采用同一台卷绕机进行卷绕,保证电容器的卷绕张力一致和卷绕均匀;③每台电容在封装前对电容值进行测试;④电容降额使用,即实际工作电压为额定工作电压的 60% 。

2.3 环境温度变化的影响

由于高速机械开关的励磁线圈采用铜材质,金属盘采用航空铝材质,励磁线圈和金属盘的内阻 R 可表示为:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (16)$$

式中: R_0 为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 室温下的电阻; α 为线圈或金属盘的温度系数; ΔT 为温度变化。

由式(16)可知,当环境温度变化时,励磁线圈和

金属盘的直流电阻会变化,线圈励磁电流 i_0 、感应涡流 i_1 和电磁斥力 F 也相应变化。因此,环境温度变化会在一定程度上影响快速机械开关模块的分闸绝缘到位时间。图 7 为考虑环境温度变化对高速机械开关运动特性影响曲线。由图可知,随着温度 T 的升高,线圈电流峰值降低,电磁斥力减小,分闸绝缘到位时间增加。但是,多断口串联的高速机械开关子模块放置在高压直流断路器的同一个阀塔中,断口间不会存在显著温差(通常小于 $10\text{ }^\circ\text{C}$),温度变化对断口间动作时间影响在 $\pm 0.05\text{ ms}$ 以内。

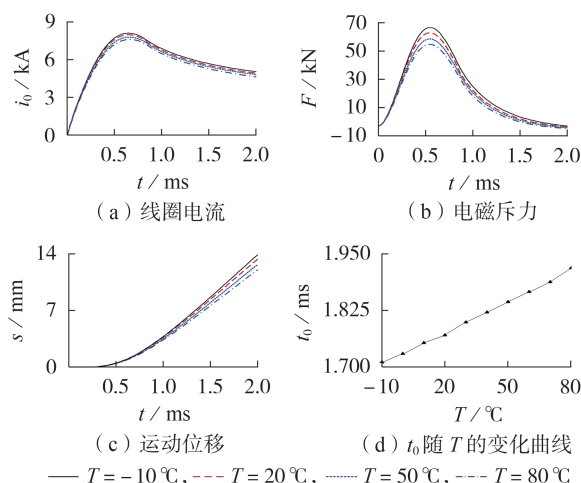


图7 环境温度变化时的运动特性曲线

Fig.7 Motion characteristic curves with ambient temperature variation

2.4 充电电压变化的影响

由电磁斥力机构的工作原理可知,储能电容的初始充电电压影响着在工作过程中对分合闸线圈放电的电流大小和电磁斥力大小,因此初始充电电压对高速机械开关的合分闸时间和同步性产生影响。图 8 为储能电容初始充电电压变化对高速机械开关的分闸特性影响。由图可知:随着初始充电电压增加,线圈电流增加,对应的电磁斥力和开关触头运动位移增加;同时,储能电容初始电压变化 $\pm 15\text{ V}$ 使得动态分闸绝缘到位时间约变化 $\pm 0.1\text{ ms}$ 。

因此,为了减少储能电容初始电压对快速机械开关分闸绝缘到位时间和同步性影响,应控制断口间的电容充电电压在 $\pm 10\text{ V}$ 以内。

为保证电容电压偏差在允许范围内,采用附录 A 图 A1 所示的电流和电压反馈控制的 AC/DC 电源给储能电容充电,同时设计中采取以下措施:①电流反馈的取样电阻采用温度系数为 $2.5 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}$ 、精度为 0.2% 的精密电阻;②电压反馈的分压电阻的工作电压和功率降额使用,保证电压反馈回路的长期稳定性。

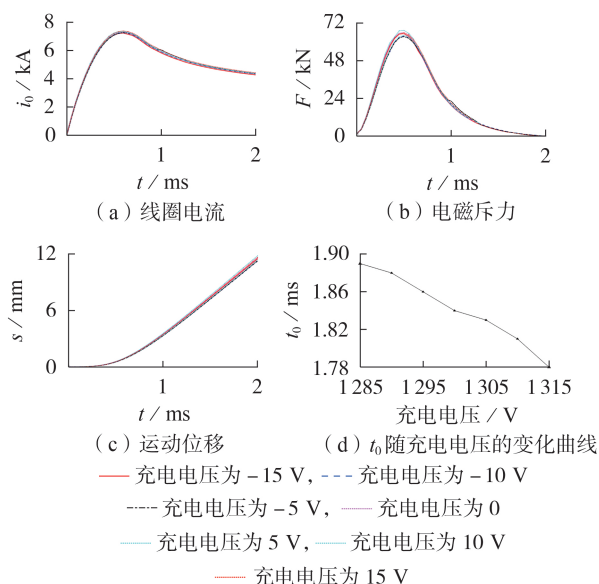


图8 充电电压变化对分闸特性影响

Fig.8 Influence of charging voltage variation on opening characteristics

3 控制系统同步性分析

535 kV 高速机械开关采用8个单元模块串联,每个子模块需采用独立控制系统,且各模块放置在阀塔不同平台上。因此控制命令的传输延迟、每个子模块接收处理控制指令的延时、放电回路的差异都会直接影响各串联模块的分合闸时间,从而造成各断口间的同步性差异。

3.1 总体架构

为满足分合闸操作的同步性要求,多断口高速机械开关采用了附录A图A2所示的点对多链路控制系统架构。该系统架构采用直流断路器装置(DC breaker device, DBC)进行总体控制,DBC分别与高速机械开关各子模块控制装置(fast mechanical control device, FMC)进行信息交互。由于开关子模块放置于高电位平台上,因此DBC与FMC之间采用多模光纤通信,不仅满足子模块的对地绝缘,而且具有高速通信及高抗干扰的能力,为多断口间的同步控制提供了基础。

3.2 控制系统通信的影响

多断口机械开关控制系统的2种触发模式,即电平触发和报文触发如附录A图A3所示。为了避免接收错误信息而发生误动,电平触发模式通常进行多阶数字滤波或模拟滤波,滤波器带来毫秒级的信号传输延迟及时间波动。因此,FMC和DBC间的通信采用IEC60044-8的FT3格式通信报文触发模式。该通信报文采用曼彻斯特编码,数据帧由帧头0x0564、8个字用户数据和1个字CRC校验码组成。为了减小通信延迟导致时间偏差,报文采用10 Mbit/s的通信波特率,现场可编程门阵列采用频率稳定性为

$2.5 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的晶体振荡器。子模块间通信报告接收和解析导致的时间偏差 t_m 为:

$$t_m = 2R_{\text{bode}} L_f f_d \quad (17)$$

式中: R_{bode} 为通信波特率; L_f 为报文帧的比特数; f_d 为晶振频率稳定度。因此,子模块之间通信报文接收和解析导致的最大时间偏差为 $\pm 0.8 \text{ } \mu\text{s}$ 。

另一方面,DBC到各FMC的光纤链路长度不同导致的通信延迟时间差异 t_d 为:

$$t_d = nL/c \quad (18)$$

式中: n 为光纤折射率,对于波长820 nm的多模光纤, $n=1.5$; L 为子模块间光纤长度差; c 为光速。因此,子模块之间光纤最大长度差20 m对应的通信延迟时间为 $\pm 0.1 \text{ } \mu\text{s}$ 。

综上所述,考虑高速机械开关子模块的通信报文接收和解析、光纤长度以及晶闸管触发延迟导致的断口间的操作分散性小于 $\pm 10 \text{ } \mu\text{s}$ 。

4 同步性能测试

4.1 开关模型性能测试

为了测试验证高速机械开关模块的性能,分别对环境温度和储能电压影响进行了测试。高速机械开关模块TIV绝缘距离测试的原理图如附录A图A4所示。TIV绝缘距离检测传感器由固定在驱动杆上的金属检测片、弹性导体和安装支架构成;弹性导体装配在安装支架中,安装支架紧固在快速开关的机架上,弹性导体与金属检测片的距离通过辅助工装限定为10 mm。试验过程中,通过金属检测片与弹性导体形成的断口上高电平电信号突变实现对耐受TIV绝缘距离运动时间的测量。

为了测试环境温度变化的影响,将高速机械开关模块整体放置在GT-HBTH-S-38F的步入式恒温恒湿房中,并在 $-20 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下分别对线圈电阻和分闸绝缘到位时间进行测试,线圈电阻采用IM₃₅₂₆型LCR测试仪进行测量。表1为高速机械开关模块测试结果。

表1 不同环境温度下的测试结果

Table 1 Test results at different ambient temperatures

序号	环境温度 / $^{\circ}\text{C}$	线圈电阻 / $\text{m}\Omega$	分闸绝缘到位时间 / ms
1	-20	13.2	1.72
2	-10	13.4	1.73
3	0	13.8	1.76
4	10	14.1	1.78
5	20	14.5	1.82
6	25	15.0	1.83
7	30	15.2	1.84
8	40	15.9	1.85
9	50	16.8	1.89

从测试结果可知,在 $-20 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内,线圈电阻变化小于 $4 \text{ m}\Omega$,分闸绝缘到位时间的

变化在 ± 0.1 ms内,与理论分析一致。

为了测试储能电容初始充电电压的影响,在改变快速机械开关模块充电电压条件下测试分闸绝缘到位时间,充电电压采用多功能万用表UT₈₉₂进行测量。表2为不同充电电压下开关模块的分闸绝缘到位时间测试结果。

表2 不同初始充电电压下的测试结果

Table 2 Test results under different initial charging voltages

序号	电压偏差 / V	分闸绝缘到位时间 / ms
1	-15	1.89
2	-10	1.87
3	-5	1.85
4	0	1.83
5	5	1.82
6	10	1.76
7	-15	1.79

从测试结果可知,储能电容初始充电电压偏差在-15 V~15 V范围内时分闸绝缘到位时间的分散性小于 ± 0.1 ms,与理论分析一致。同时,由于快速机械开关模块的充电电源采用恒流闭环控制,可有效保证分闸绝缘到位时间的分散性在允许范围内。

4.2 多断口同步性能测试

为了验证535 kV高速机械开关断口间的合分闸同步性,本文搭建了附录A图A5所示测试系统,该系统由检测装置、3台4通道数字存储示波器TDS2024C和上层控制装置组成。

进行同步分闸时间测试时,由主控制器与通过光纤与每个高速机械开关模块连接;主控制器同时向快速机械开关模块发送命令执行快速分闸操作,并输出信号触发示波器进行信号捕捉;每台高速机械开关模块的TIV绝缘距离检测传感器与数字存储示波器相连。高速机械开关断口快速分闸运动到TIV绝缘距离10 mm时,4个高速机械开关模块的传感器断口电压波形见附录A图A6。由测试结果可知,断口间的分闸绝缘到位时间偏差小于80 μ s。

高速机械开关应用于张北柔性直流输电工程535 kV HDCCB现场测试多断口高速机械开关分闸过程中时,断口分闸绝缘到位时间测试波形如附录A图A7所示。从现场测试结果可知:在0.5106 s高压直流断路器上层控制器发出触发命令,经过约1.8 ms主支路串联的各个断口运动到TIV绝缘距离,高速机械开关模块的红外传感器检测并返回分闸绝缘到位时间;其中分闸绝缘到位时间的最小值为1.75 ms,最大值为1.84 ms,分闸绝缘到位时间分散性在 ± 0.2 ms内,满足同步性要求。

5 结论

根据高压直流断路器对多断口高速机械开关的

性能要求,对断口的同步性开展了仿真分析和试验验证研究,得出如下结论:

1)高速机械开关的同步性主要受操动机构的线圈参数、储能电容、环境温度、充电电压、控制系统等因素影响,设计过程中考虑这些因素的影响并采取优化措施可以实现断口分合闸操作的同步性要求;

2)利用535 kV多断口高速机械开关样机、HDCCB完成了断口间同步性现场测试,试验和理论分析取得了良好的验证效果,为更高电压等级直流断路器用的多断口高速机械开关同步性设计提供了方法及理论指导和依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐政,薛英林,张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062. XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [2] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-11. RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [3] 魏晓光,周万迪,张升,等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):2038-2047. WEI Xiaoguang, ZHOU Wandu, ZHANG Sheng, et al. Research and application of modular hybrid high voltage DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2038-2047.
- [4] 韩乃峥,樊强,贾秀芳,等. 一种具备限流能力的多端口直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2019,39(17):5172-5181,5298. HAN Naizheng, FAN Qiang, JIA Xiufang, et al. A multi-port DC circuit breaker with current limiting capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5172-5181, 5298.
- [5] 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.
- [6] 魏晓光,杨兵建,汤广福. 高压直流断路器技术与工程实践[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.
- [7] 张宁,陈龙龙,丁晓,等. 基于涡流感应原理的快速机械开关电磁缓冲影响因素研究[J]. 高压电器,2021,57(11):66-75. ZHANG Ning, CHEN Longlong, DING Xiao, et al. Research on electromagnetic buffering influence factor of fast mechanical switch based on eddy current induction principle[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 66-75.
- [8] 周雁南,黄瑜珑,刘慧,等. 110 kV快速SF₆机械隔离开关断口的优化设计[J]. 高电压技术,2020,46(9):3325-3333. ZHOU Yannan, HUANG Yulong, LIU Hui, et al. Optimization design of break in 110 kV SF₆ ultra-fast mechanical disconnector[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3325-3333.
- [9] 温伟杰,李斌,李博通,等. 基于双向电磁斥力机构的高压快速开关缓冲特性研究[J]. 电工技术学报,2019,34(7):1449-1458.

- WEN Weijie, LI Bin, LI Botong, et al. Research on the buffering characteristics of high voltage fast mechanical switch based on bi-directional electromagnetic repulsion mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1449-1458.
- [10] 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.
- [11] 田阳, 田宇, 李志兵, 等. 高速机械开关单元多场耦合仿真优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1273-1280.
- TIAN Yang, TIAN Yu, LI Zhibing, et al. Multi-field coupling simulation optimization of high-speed mechanical switch unit [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1273-1280.
- [12] 邹积岩, 梁德世, 黄翀阳, 等. 110 kV 直流真空断路器模块串联开断的同步控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2627-2634.
- ZOU Jiyang, LIANG Deshi, HUANG Chongyang, et al. Synchronous control of module series connection interruption in 110 kV DC vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2627-2634.
- [13] 刘彬, 石亲民, 吕玮, 等. 多断口真空快速隔离开关试验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 56-61.
- LIU Bin, SHI Qinmin, LÜ Wei, et al. Experimental study on vacuum fast disconnectors with multi breaks [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 56-61.
- [14] 陈龙龙, 张宁, 汤广福, 等. 混合式高压直流断路器例行试验方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3193-3199.
- CHEN Longlong, ZHANG Ning, TANG Guangfu, et al. Routine test method for hybrid high voltage direct current breaker [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3193-3199.
- [15] 张祖安, 黎小林, 陈名, 等. 160 kV 超快速机械式高压直流断路器的研制[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2331-2338.
- ZHANG Zuan, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research and development of 160 kV ultra-fast mechanical HVDC circuit breaker [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2331-2338.
- [16] 黄道春, 王华清, 全万霖, 等. 考虑混合式直流断路器整机结构的
- 的多断口串联机械开关均压设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2407-2416.
- HUANG Daochun, WANG Huaqing, QUAN Wanlin, et al. Voltage sharing design of series multi-break mechanical switch considering the whole structure of hybrid DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2407-2416.
- [17] 刘彬, 刘国伟, 许元震, 等. 超多断口 500 kV 快速隔离开关均压设计及试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2459-2464.
- LIU Bin, LIU Guowei, XU Yuanzhen, et al. Voltage-sharing design and test of 500 kV fast isolation switch with multi-break [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2459-2464.
- [18] 邱进, 陈轩恕, 陈江波, 等. 多断口光控真空断路器的同步控制系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 150-154.
- QIU Jin, CHEN Xuanshu, CHEN Jiangbo, et al. Design and implementation of synchronization control system for multi-break vacuum circuit breaker [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 150-154.
- [19] 张烁, 邹贵彬, 魏秀燕, 等. 适用于柔性直流电网的新型多端口混合式直流断路器[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 99-105.
- ZHANG Shuo, ZOU Guibin, WEI Xiuyan, et al. Novel multi-port hybrid DC circuit breaker suitable for flexible DC grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 99-105.

作者简介:



陈龙龙

陈龙龙(1985—),男,博士研究生,研究方向为高压直流输电换流阀和直流断路器(E-mail: chenlong_003@163.com);

周万迪(1985—),男,高级工程师,硕士,通信作者,研究方向为大功率电力电子技术、大容量直流开断及试验技术(E-mail: wandou2007.go@163.com);

方春恩(1975—),男,教授,博士,研究方向为智能化电器理论及应用(E-mail: fangchunen@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Research on synchronization of series multi-break high-speed mechanical switch for HVDC circuit breaker

CHEN Longlong¹, ZHOU Wandu¹, ZHANG Sheng¹, LI Wei², FANG Chun'en², REN Xiao²

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology

(State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209;

2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The series multi-break high-speed mechanical switch is an important part of hybrid high voltage direct current (HVDC) circuit breaker, and the synchronous performance between multi-breaks of high-speed mechanical switch has an important impact on the breaking performance of HVDC circuit breaker. The topology structure and working principle of multi-break high-speed mechanical switch are studied. The influence law of coil parameters, energy storage capacitance, ambient temperature, charging voltage, control system and other factors of the operating system on the synchronism is analyzed, and the measures to ensure the synchronism between multi-breaks by controlling the internal resistance of the coil, the deviation of the energy storage capacitance value and the process are proposed. On this basis, the synchronization of the high-speed mechanical switch of 535 kV hybrid DCCB in Zhangbei multi terminal flexible DC project is tested. The test results show that the dispersion of each fracture is within ± 0.2 ms, which provides a guarantee for the reliable breaking of the hybrid HVDC circuit breakers.

Key words: HVDC circuit breaker; high-speed mechanical switch; multi-break; synchronization

附录 A

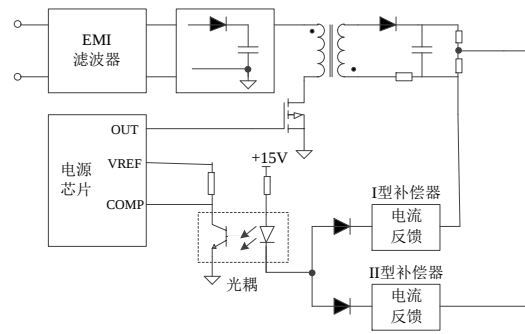


图 A1 电容器充电电源原理

Fig.A1 Principle of charging power supply for capacitors

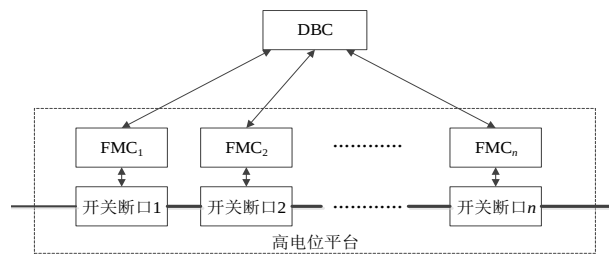
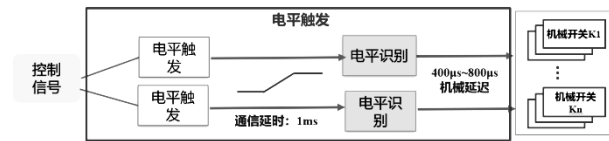
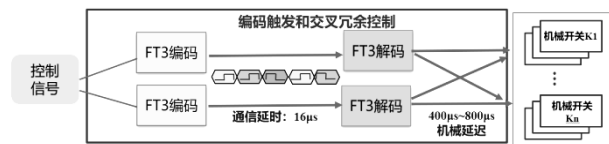


图 A2 高速机械开关控制系统架构图

Fig.A2 Architecture of high-speed mechanical switch control system



a) 电平触发



b) 报文触发

图 A3 多断口机械开关触发模式

Fig. A3 Trigger mode of multi-break mechanical switches

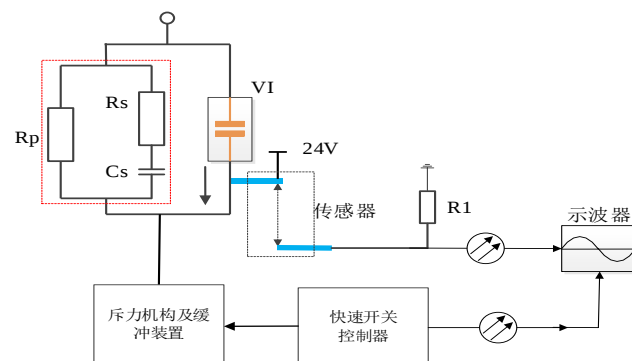


图 A4 高速机械开关分闸测试原理图

Fig.A4 Opening test principle of high-speed mechanical switch



图 A5 试验平台

Fig. A5 Experimental platform

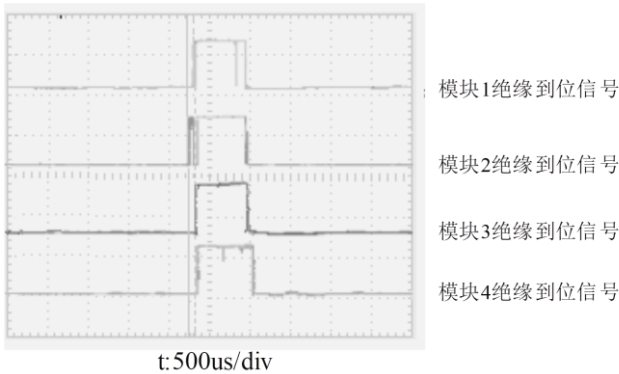
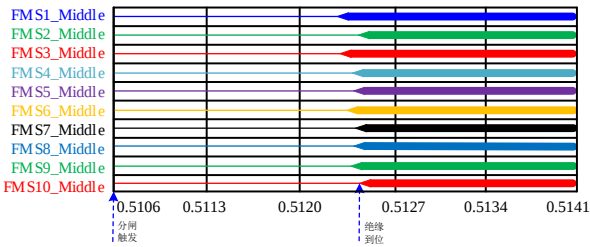


图 A6 分闸同步性测试波形

Fig.A6 Test waveforms of opening synchronization



a) 535 kVHDCCB



b) 分闸绝缘到位时间波形

图 A7 张北工程分闸同步性测试

Fig. A7 Opening synchronization test of Zhangbei project