

DOI:10.11784/tdxbz202504001

基于能量回收的快速真空开关小型化操动方法与试验

张长虹^{1,2}, 王旭¹, 靳鹤志¹, 温伟杰¹, 黎卫国^{1,2}, 杨旭^{1,2}

(1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津 300072;

2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院, 广州 510620)

摘要: 为解决目前直流转换开关(DCTS)中 SF₆ 开关不环保、动作慢的缺点, 借鉴直流断路器技术方案, 使用快速真空开关替代 SF₆ 开关。然而, 但由于驱动回路薄膜电容能量密度低, 基于汤姆森线圈驱动器的快速开关操动机构效率低、体积大且成本高, 限制了快速真空开关的广泛应用。本文提出了一种基于能量回收的快速真空开关操动方法, 即通过回收薄膜电容器组中的剩余能量完成连续分-合闸操作。首先构建了快速真空开关在连续分合闸操作过程中的数学模型, 开发了额定参数为 3.6 kV/2.5 kA/1 ms 的真空开关样机, 并开展了行程特性测试。研究表明: 采用所提出的方法, 分闸时间为 1 ms, 合闸时间为 19 ms, 同时可使连续分合闸操作所需的电容用量减少 50%, 操动机构的体积和成本降低约 40%, 具有显著的优越性。

关键词: 直流转换开关; 快速真空开关; 汤姆森线圈; 能量回收

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)05-0531-10

Miniaturized Operation Method for an Ultra-Fast Vacuum Switch Based on Energy Recovery and Associated Test

Zhang Changhong^{1,2}, Wang Xu¹, Jin Hezhi¹, Wen Weijie¹, Li Weiguo^{1,2}, Yang Xu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System,

Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Electric Power Research Institute of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: Current SF₆ breakers in direct current transfer switches(DCTSs) are not environmentally friendly and are also slow acting. To address these limitations, ultra-fast vacuum switches(VSs) are used to replace SF₆ switches by leveraging DC circuit breaker technical solutions. However, ultra-fast VSs based on Thomson coil actuators are typically large, costly, and inefficient, and require high capacitance energy storage. These limitations constrain the widespread application of ultra-fast VSs in DCTSs. This paper proposed an ultra-fast VS operation method based on energy recovery, which enabled continuous open and closed operations by recovering residual energy in the capacitor bank. A mathematical model was established to characterize the sequential switching process of the ultra-fast VS, and a prototype with rated parameters of 3.6 kV, 2.5 kA, and 1 ms was developed and subjected to stroke characteristic testing. The results show a breaking time of 1 ms and a closing time of 19 ms using the proposed methods. Notably, this approach reduces the required capacitance for continuous switching operations by 50%, while decreasing the actuator's volume and cost by approximately 40%, thus demonstrating significant technical advantages.

Keywords: direct current transfer switch(DCTS); ultra-fast vacuum switch(VS); Thomson-coil actuator; energy recovery

直流转换开关(direct current transfer switch, DCTS)是高压直流输电系统中的关键设备, 主要用于

进行直流输电系统的各种运行方式及接地系统的转换等, 关系到输电系统的可靠性、可利用率和可维护

收稿日期: 2025-04-01; 修回日期: 2025-05-14.

作者简介: 张长虹(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 183048839@qq.com.

通信作者: 王旭, wang_xu@tju.edu.cn.

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(CGJKJM20240028).

Supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. CGJKJM20240028).

性^[1-3]. 根据安装位置的不同, 直流转换开关可分为金属回线转换开关 (metallic return transfer breaker, MRTB)、大地回线转换开关 (ground return transfer switch, ERTB)、中性母线开关 NBS 和中性母线接地开关 NBGS 等^[4]. 目前, 国内高压直流系统中应用较为成熟的直流转换开关主要采用 SF₆ 开关与 LC 无源振荡技术路线^[5-6]. 然而, SF₆ 开关超程长、触头质量重, 难以快速操动^[7-8]; 同时 SF₆ 气体属于温室气体, 会对环境造成严重污染. SF₆ 开关动作速度慢、不环保的缺点严重限制了直流转换开关的发展. 针对上述问题, 可借鉴直流断路器技术方案^[9-11], 考虑使用快速真空开关替代 SF₆ 开关.

快速真空开关 (vacuum switch, VS) 由真空灭弧室、操动机构本体和操动机构驱动电路构成^[12-14]. 真空灭弧室内部动触头的运动由操动机构驱动来完成分合闸操作. 操动机构本体由电磁斥力机构、永磁保持单元和金属盘构成. 操动机构的驱动电路由预充电容器组、晶闸管和汤姆森线圈构成; 预充电容通过线圈放电产生不同方向的电磁力以完成快速真空开关的分合闸操作.

以单次分闸为例, 基于汤姆森线圈驱动器的快速真空开关主要依赖驱动回路中的一组预充电容放电来提供分闸驱动力加速, 并在末端位置靠另一组电容器放电来提供缓冲力减速. 由此可见, 在单次分闸过程中, 需要两组电容器按照一定时序放电; 同理, 合闸过程也需要另外两组电容器按照时序放电; 快速真空开关驱动回路总共需要 4 组预充电容器来保障真空开关的分闸或合闸操作.

此外, 由于驱动回路放电电流较大, 近似电容经小电感短路放电过程, 常使用金属薄膜电容来保障其可靠性. 然而, 与电解电容相比, 金属薄膜电容能量密度低, 导致快速真空开关整体存在效率低、体积大且成本高的问题^[12,15-16]. 上述问题限制了快速真空开关在直流转换开关中的广泛应用.

针对上述问题, 本文提出了一种基于能量回收的小型化、低成本快速真空开关操动方法, 建立了快速真空开关连续分合闸过程的数学模型并设计了样机进行仿真及实体机试验验证.

1 基于能量回收的快速真空开关操动方法

1.1 传统快速真空开关驱动电路及存在问题

快速真空开关结构如图 1 所示. 以额定参数为 3.6 kV/2.5 kA/1 ms 的试验原理样机为例, 操动机构驱

动电路的体积远大于真空开关本体; 驱动回路中薄膜电容器组是快速真空开关成本的主要来源. 由于电容器的体积和成本与电容储能容量 (电容用量) 成比例, 降低电容用量是降低真空开关体积和成本的主要突破方向.

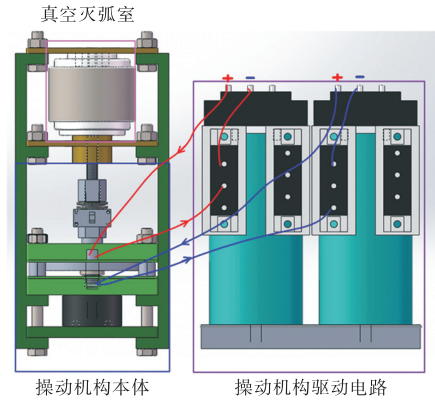
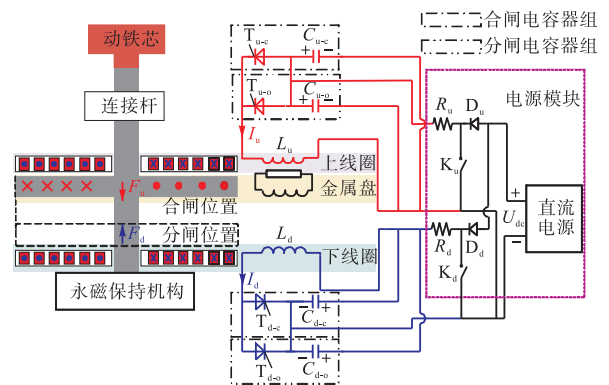


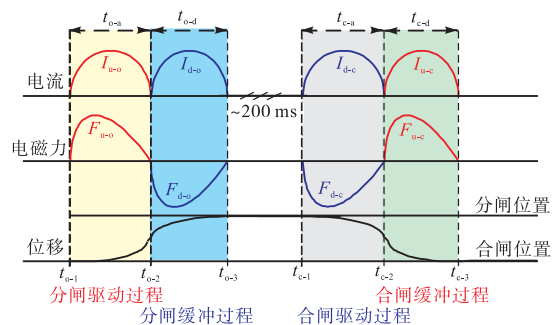
图 1 快速真空开关结构

Fig.1 Structure of the ultra-fast vacuum switch

传统快速真空开关驱动电路结构及其工作特性如图 2 所示.



(a) 操动机构及传统驱动电路



(b) 传统驱动电路工作特性

图 2 传统驱动电路及其工作特性

Fig.2 Conventional drive circuit and its working characteristics

如图 2(a) 所示, 为了实现快速真空开关的连续分合闸操作, 快速真空开关的传统驱动电路中配置了 4 个电容器组. 其工作特性如图 2(b) 所示, 依次触发 T_{u-o} 、 T_{d-o} 、 C_{u-o} 、 C_{d-o} 分别通过 L_u 和 L_d 放电, 从而在金属盘上产生不同方向的电磁力 F_{u-o} 和 F_{d-o} . 驱动力 F_{u-o} 使金属盘加速远离线圈, 构成其运动的驱动过程; 缓冲力 F_{d-o} 使金属盘减速, 构成其运动的缓冲过程, 以避免强烈的机械冲击, 从而平稳地完成分闸操作^[17-20]. 值得注意的是, 由于金属盘中的涡流大小与磁场变化率正相关, 并非与磁场大小正相关, 因此电磁力峰值相位会超前于电流峰值相位. 在需要合闸操作时, 依次触发 T_{d-c} 、 T_{u-c} 、 C_{d-c} 、 C_{u-c} 分别通过 L_d 和 L_u 放电, 产生驱动力 F_{d-c} 和缓冲力 F_{u-c} , 从而平稳完成合闸操作.

已有研究数据^[12]表明, 对于 5 kg 的动触头, 完成在 2.3 ms 内移动超过 13 mm 的操动过程需要配置两个预充电压为 1.3 kV 的 2.5 mF 电容器组 (4.225 kJ). 以动触头的平均速度来表示由预充电能转换而来的动能, 则只有 79.9 J ($0.5 \times 5 \text{ kg} \times (13/2.3 \text{ m/s})^2$) 的能量转化为动能, 能量转化效率仅为 1.89%. 除此之外, 电容器组中的预充电能会完全用于当次快速真空开关的操动中, 多余的电能会在线圈及充电回路电阻中逐渐耗散, 能量转化效率非常低.

1.2 基于能量回收的快速真空开关驱动电路

基于能量回收的快速真空开关驱动电路结构及其工作特性如图 3 所示. 为直观表示其结构及特性, 略去操动机构本体及电源模块, 仅展示与传统驱动电路有差异的部分.

如图 3 所示, 基于能量回收的快速真空开关驱动电路只配置两个电容器组 (C_u 、 C_d), 并同时为晶闸管组 T_{u-o} 、 T_{d-o} 、 T_{d-c} 、 T_{u-c} 反向并联了续流二极管以进行连续分合闸操作. 如图 2(b) 所示, 当 T_{u-o} 、 T_{d-o} 依次触发时, C_u 、 C_d 分别通过 L_u 和 L_d 放电, 产生驱动力 F_{u-o} 和缓冲力 F_{d-o} , 以完成分闸驱动过程和分闸缓冲过程, 从而完成分闸操作. 和传统驱动电路相同, 电磁力的峰值相位会超前于电流峰值的峰值相位. 此时剩余能量返回 C_u 和 C_d , 以负电压的形式 (极性为下正上负) 储存在 C_u 和 C_d 上, 其振幅为初始正电压的 40% ~ 50%. 在等待 200 ms 后, 依次触发 T_{d-c} 、 T_{u-c} , 电压为负的 C_d 、 C_u 再次通过 L_d 和 L_u 放电, 产生如图 3(a) 所示的逆时针方向的脉冲电流. 感应电磁力 F_{d-c} 和 F_{u-c} 总是倾向于将金属盘从 L_d 和 L_u 推开, 且力方向与脉冲电流的方向无关, 即 F_{d-c} 和 F_{u-c} 仍然是金属盘完成合闸操作的驱动力和缓冲力, 从而完成合闸驱

动过程和合闸缓冲过程.

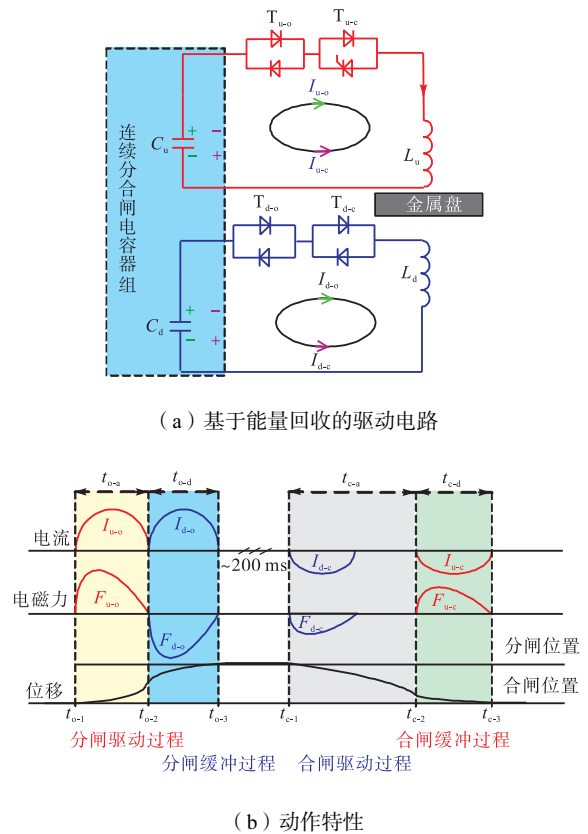


图 3 基于能量回收的快速真空开关驱动电路及其工作特性

Fig.3 Drive circuit of ultra-fast VS based on energy recovery and its working characteristics

由于合闸操作中电容器组上的负电压幅值低于分闸操作的正电压幅值, 因此合闸操作中的脉冲电流和电磁力也小于分闸操作所对应的脉冲电流和电磁力, 即在合闸操作过程中, 金属盘运动的时间更长 (即 $t_{c-a} + t_{c-d} > t_{o-a} + t_{o-d}$), 导致合闸操作比分闸操作慢. 由于在直流转换开关中对合闸操作的时间要求较低, 因此使用本文所提出的基于能量回收的快速真空开关操动方法不会牺牲直流转换开关的任何快速分断和重合闸性能.

对比图 2(a) 和图 3(a) 可知, 在所提出的基于能量回收的快速真空开关驱动电路中, 通过使用两个与二极管反向并联的晶闸管, 可以实现双向电流开断功能. 分闸操作完成后电容器组中的剩余能量可以用于后续的合闸操作, 图 2(a) 中两个专门为合闸操作配置的电容器组可以完全省去. 因此, 与传统驱动电路相比, 使用基于能量回收的快速真空开关驱动电路, 快速真空开关的连续分合闸操作只需要 50% 的预充电能, 操动机构的能量利用率和运行效率得到了显著提高.

2 数学模型

2.1 连续分合闸操作的数学模型

通过电磁斥力机构和金属盘之间的电磁耦合完成驱动和缓冲过程中,金属盘可以看作 m 个并联的环形 LR 串联电路^[12]. m 越大,仿真越精确,同时金属盘内涡流的不均匀分布也可计算在内.但是,当金属盘中的脉冲电流频率小于 1 kHz 时,涡流的不均匀分布对仿真结果的影响很小.因此,为简化数学模型,仅需设置 $m = 1$,简化后的仿真模型依然有较好的精度和速度.因此,在快速真空开关的数学模型中金属盘仅用 1 个 LR 环路等效.

从等效电路的角度来看,电磁斥力机构由 3 个相互耦合的环路组成.第 1 个是 C_u 和 L_u 串联的上线圈回路;第 2 个是由无源 LR 电路组成的金属盘回路;第 3 个是由 C_d 和 L_d 串联下线圈回路.其中,金属盘可以在分闸位置和合闸位置之间的任何位置移动;而上线圈和下线圈在整个过程中保持静止.

如图 3(b) 所示,根据回路中是否有电流,整个连续分合闸操作过程可分为 5 个阶段: $[t_{0-1}, t_{0-2})$, $[t_{0-2}, t_{0-3})$, $[t_{0-3}, t_{c-1})$, $[t_{c-1}, t_{c-2})$, $[t_{c-2} \sim t_{c-3}]$.

第 1 阶段: $[t_{0-1}, t_{0-2})$ (金属盘在分闸操作中的加速阶段), C_u 通过上线圈 L_u 放电,上线圈回路电流 (I_u) 和金属盘回路电流 (I_{md}) 的初始值为零,状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_u}{dt} = U_{C_u} - R_u I_u \\ \frac{d\psi_{md}}{dt} = 0 - R_{md} I_{md} \\ \frac{dU_{C_u}}{dt} = -\frac{C_u}{I_u} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{F_{u-o} - f_{\text{holding}} - f_{V1}}{m_{\text{load}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_u 和 ψ_{md} 分别为上线圈回路和金属盘回路的磁通量,其变化反映了金属盘与上线圈的距离变化. U_{C_u} 为 C_u 的电压,其初始值为 C_u 的预充电压; R_u 和 R_{md} 分别为上线圈回路和金属盘回路的等效电阻; F_{u-o} 为线圈回路和金属盘回路之间的感应电磁力,在分闸过程中使金属盘加速远离上线圈; z 为金属盘远离上线圈电路的位移; f_{V1} 为真空灭弧室的触头电磁力,在相对数据表中给出; f_{holding} 为永磁保持单元提供的保持力; m_{load} 为所有运动部件的总质量.由于 ψ_u 和 ψ_{md} 是场量,可以用电感和电流简化表示为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_u}{dt} = L_u \frac{dI_u}{dt} + M_{u,md} \frac{dI_{md}}{dt} + I_{md} \frac{\partial M_{u,md}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ \frac{d\psi_{md}}{dt} = M_{u,md} \frac{dI_u}{dt} + L_{md} \frac{dI_{md}}{dt} + I_u \frac{\partial M_{u,md}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ F_{u-o} = \frac{dM_{u,md}}{dz} I_u I_{md} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_u 和 L_{md} 分别为上线圈回路和金属盘回路的等效电感; $M_{u,md}$ 为上线圈回路和金属盘回路之间的互感.随着金属盘的运动, L_u 和 L_{md} 的位移 z 保持恒定,只有 $M_{u,md}$ 随 z 变化而变化.

第 2 阶段: $[t_{0-2}, t_{0-3})$ (分闸操作中金属盘的减速阶段),电流在下线圈回路 (I_d) 和金属盘回路 (I_{md}) 中流动.状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = U_{C_d} - R_d I_d \\ \frac{d\psi_{md}}{dt} = 0 - R_{md} I_{md} \\ \frac{dU_{C_d}}{dt} = -\frac{C_d}{I_d} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{F_{d-o} - f_{\text{holding}} - f_{V1}}{m_{\text{load}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_d 的初始值为零; I_{md} 的初始值是第 1 阶段的终值; ψ_d 、 ψ_{md} 和 F_{d-o} 的表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = L_d \frac{dI_d}{dt} + M_{d,md} \frac{dI_{md}}{dt} + I_{md} \frac{\partial M_{d,md}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ \frac{d\psi_{md}}{dt} = M_{d,md} \frac{dI_d}{dt} + L_{md} \frac{dI_{md}}{dt} + I_d \frac{\partial M_{d,md}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ F_{d-o} = \frac{dM_{d,md}}{dz} I_d I_{md} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ψ_d 为下线圈回路的磁通量; U_{C_d} 为 C_d 的电压,其初始值为 C_d 的预充电压; R_u 为下线圈回路的等效电阻; F_{d-o} 为下线圈所在回路和金属盘回路之间的感应电磁力,使金属盘减速运动,以防止其对下线圈产生强烈的机械冲击.

第 3 阶段: $[t_{0-3}, t_{c-1})$ (金属盘保持在分闸位置的静止阶段),电流仅流过金属盘回路 (I_{md}),并根据 LR 电路的零输入响应随时间衰减,状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{md}}{dt} = 0 - R_{md} I_{md} \\ \frac{d\psi_{md}}{dt} = L_{md} \frac{dI_{md}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

第 4 阶段: $[t_{c-1}, t_{c-2})$ (金属盘在合闸操作中的加速阶段),晶闸管 T_{d-c} 导通,电压为负的 C_d 通过下线圈 L_d 放电,下线圈回路和金属盘回路再次流过电流,其状态方程与第 2 阶段式 (3) 和式 (4) 相同,但状态变

量 U_{cd} 、 I_d 、 I_{md} 和 $v(dz/dt)$ 的初值与第 2 阶段不同,其初值为第 3 阶段结束后的终值。

第 5 阶段: $[t_{c-2} \sim t_{c-3}]$ (金属盘在合闸操作中的减速阶段), 晶闸管 T_{u-c} 导通, 电压为负的 C_u 对线圈 L_u 进行放电, 状态方程与第 1 阶段式(1)和式(2)相同, 状态变量的初始值与第 1 阶段不同。

通过有限元法计算静态磁场可得到线圈 L_d 、线圈 L_d 和金属盘的自感以及金属盘在不同位移下与线圈之间的互感 (L_{u-d} 、 L_{md-d} 、 L_{d-d} 、 M_{u-md} 、 M_{d-md}), 如果 f_{holding} 已知, 则 5 个阶段的微分方程可以很容易地通过荣格-库塔方法求解, 如何计算得到 f_{holding} 将在第 2.2 节中给出。

2.2 永磁保持单元 (PM-HU) 的工作特性及设计

对于分闸状态的快速真空开关, 需要分闸保持力来使动触头保持在分闸位置; 对于合闸状态下的快速真空开关, 需要合闸保持力来保证触头间紧密接触, 以获得 $\mu\Omega$ 级的低传导电阻。因此, 能够提供双向保持力的保持单元对于快速真空开关至关重要。保持力应根据真空灭弧室触头可能流过的浪涌电流来设计^[12]。考虑到直流转换开关中流过快速真空开关的浪涌电流通常不超过 20 kA, 根据商用真空灭弧室的数据表^[21], 保持力在 0.8 ~ 1.0 kN 区间即可。

由于低压快速真空开关的行程 (约 5 mm) 远小于高压快速真空开关的行程 (20 ~ 30 mm), 与双稳态弹簧单元相比, 永磁-液压单元具有结构简单、运动部件轻、易于安装和惯性小等优点, 因此, 基于永磁-液压单元的永磁保持单元更适用于低压快速真空开关。

本文提出的永磁保持单元详细结构如图 4 所示, 它由 4 个部分组成, 分别是连接杆 (7075 航空铝合金)、静铁芯和动铁芯 (纯铁 DT4) 以及永磁体 (钕铁硼 N48 SH)。

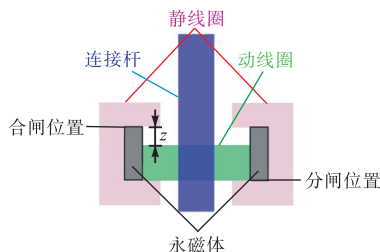


图 4 永磁保持单元的结构

Fig.4 Structure of PM-HU

静铁芯和动铁芯之间的保持力 f_{holding} 可表示为

$$f_{\text{holding}} = \int \frac{BH}{\mu_0} dS \quad (6)$$

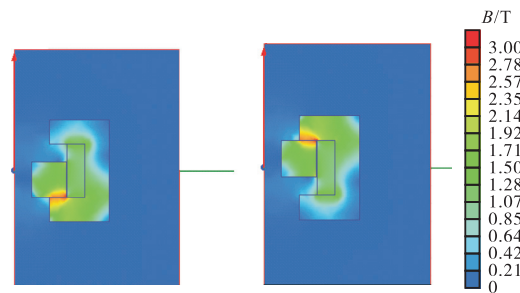
式中: B 和 H 分别为动铁芯表面附近气隙的磁感应强度和磁场强度; μ_0 为动铁芯和静铁芯之间气隙的磁

导率; S 为动铁芯和静铁芯之间的接触面积。

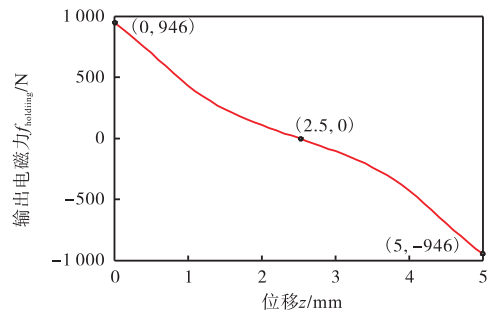
为了计算得到 f_{holding} , 在 Ansoft Maxwell 中基于有限元法建立了永磁保持单元的静态磁场模型。由于连杆的磁导率几乎与空气相等, 因此它对磁场分布没有影响, 在仿真模型中可以忽略不计。永磁钕铁硼磁体的关键参数是 H_c (1 000 kA/m) 和 B_r (1.38 T), 这些参考于钕铁硼的数据表^[22]。静铁芯和动铁芯的主要特性是磁化曲线 ($B-H$ 曲线), 可从该材料的数据表中查得。图 5 (a) 示出了合闸位置和分闸位置动铁芯的模拟磁场分布, 它们是完全对称的。

改变动铁芯的位移 z 从 0 到 5 mm, 步长为 0.1 mm, 仿真得到永磁保持单元的输出特性如图 5 (b) 所示。根据金属盘的位移 (z) 索引对应的 f_{holding} , 可以成功求解式 (1) ~ (5) 所示的数学模型。

动铁芯的物理尺寸如下: 内半径为 5 mm, 外半径为 30 mm, 高度为 10 mm。动铁芯的质量密度为 7.8759 g/mm^3 , 质量仅为 50 g, 远小于文献^[12]中用于长行程高压快速真空开关的双稳态弹簧单元 (200 g), 更加有利于低压快速真空开关的高效快速运行。



(a) 合闸 (左) 和分闸 (右) 位置的动铁芯磁场分布



(b) 永磁保持单元的输出特性

图 5 永磁保持单元仿真和输出特性

Fig.5 Simulation and output characteristics of PM-HU

2.3 整机参数与仿真结果分析

为验证上述设计方法的正确性, 本文设计了一台额定参数为 3.6 kV/2.5 kA/1 ms 的快速真空开关样机用于试验验证。额定参数中, 3.6 kV 是额定电压, 2.5 kA 是额定电流, 1 ms 是额定分闸时间, 即真空灭

弧室的触头从动作到间距足以承受 1.5 p.u.的暂态开断电压 (transient interrupt voltage, TIV) 的时间. 根据第 2.1 节中的数学模型, 使用在文献[12]中提出的优

化方法设计试验样机的结构和电气参数, 设计得到的参数列于表 1 中.

表 1 快速真空开关样机参数

Tab.1 Prototype parameters of ultra-fast vacuum switch

电容参数		几何参数								其他参数			
C/mF	U_0/V	h_c/mm	h_p/mm	R_a/mm	R_b/mm	R_1/mm	R_2/mm	s/mm	z_1/mm	m_{load}/kg	$\rho_1/(\Omega \cdot m)$	$\rho_2/(\Omega \cdot m)$	n
1.04	900	6	8	0	50	12.5	50	3	5	1	1.75×10^{-8}	2.83×10^{-8}	48

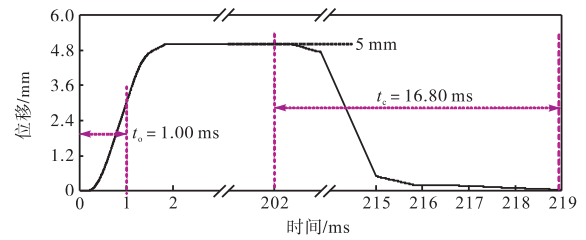
表 1 中, C 是电容器组 C_u 、 C_d 的电容; U_0 为 C_u 、 C_d 的初始预充电压; h_c 、 R_1 、 R_2 分别为线圈的高度、内半径和外半径; n 为线圈的匝数; h_p 、 R_a 、 R_b 分别为金属盘的高度、内半径和外半径; m_{load} 为运动部分的质量; s 为金属盘和线圈之间的初始距离; z_1 为快速真空开关的全行程; ρ_1 和 ρ_2 分别为铜和 7075 航空铝合金的电阻率. 根据线圈和金属盘的结构参数, 通过有限元法可求解得到自感与互感值 (L_u 、 L_{md} 、 L_d 、 $M_{u,md}$ 、 $M_{u,md}$). 又已知第 3.2 节中的 $f_{holding}$, 则可求解第 3.1 节中的数学模型, 结果如图 6 所示.

如图 6 所示, 连续分合闸操作操作的仿真运行特性与图 3(d) 中的理论分析一致. 对于分闸过程, 在金属盘加速阶段 (0 ~ 1 ms), C_u 通过 L_u 放电, 产生幅值为 2.4 kA 的脉冲电流 I_{u-o} 和幅值为 13.6 kN 的驱动力 F_{u-o} . C_u 放电结束后, C_u 的电压 U_{C_u} 从 900 V 变为 -373 V, 约 17% 的能量返回至 C_u . 随后, 在金属盘的减速阶段 (1 ~ 2 ms), C_d 通过 L_d 放电, C_d 的电压 U_{C_d} 从 900 V 变为 -408 V.

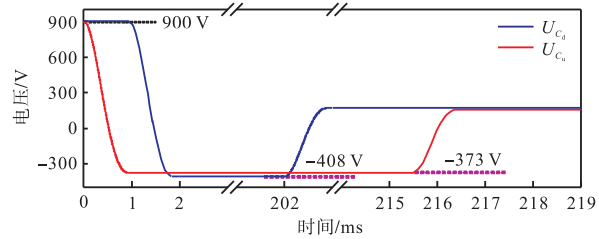
在分闸操作之后, 设置 200 ms 等待时间, 在此期间 (2 ~ 202 ms), 金属盘在 $f_{holding}$ 的作用下保持在分闸位置, 其内部的涡流根据 LR 电路的零输入响应逐渐衰减至 0, 如图 6(e) 所示.

合闸操作过程中, C_d 和 C_u 的剩余电压分别为 -408 V 和 -373 V, 分别通过 L_d 和 L_u 反向放电, 产生图 6(c) 中的脉冲电流 I_{d-c} 和 I_{u-c} 以及图 6(d) 中的电磁力 F_{d-c} 和 F_{u-c} , 其振幅小于分闸操作过程中的振幅. 金属圆盘在 17 ms 内从分闸位置移动到合闸位置.

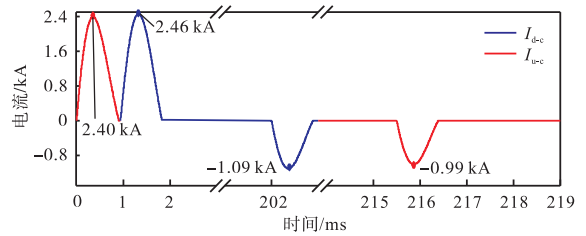
快速真空开关的分闸时间定义为从触头开始分离到触头间距足以承受 TIV 的距离. 由于真空间隙的击穿场强约为 30 kV/mm^[23], 在满足安全裕度的前提下, 耐压开距设置为全行程的 1/2, 即 2.5 mm. 行程的另一半用于运动部分的减速过程. 快速真空开关的合闸时间定义为从运动全行程到合闸位置所需的时间. 如图 6(a) 所示, 快速真空开关的分闸时间为 1.0 ms, 合闸时间为 16.8 ms, 满足样机额定参数要求.



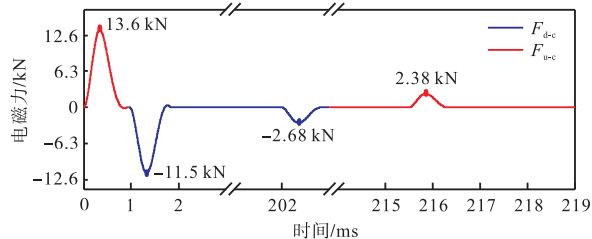
(a) 动铁芯位移变化



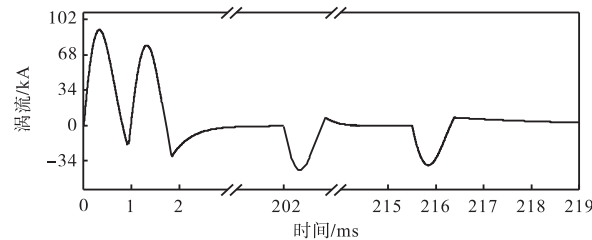
(b) 电容电压变化波形



(c) 线圈电流变化波形



(d) 电磁力变化波形



(e) 涡流变化波形

图 6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

3 实体样机试验

3.1 试验平台搭建

根据图 3(a) 所示的驱动电路和表 1 中列出的参数, 搭建 3.6 kV/2.5 kA/1 ms 快速真空开关样机如图 7 所示。

在试验平台中, 电流信号由两个罗氏线圈 (CWT140B/4/1000) 测量, 电压信号由两个高压差分探头 (S19010A) 测量, 电压电流信号由示波器记录 (DL950)。金属盘的移动轨迹由高速摄像机 (FASTCAM Mini) 记录, 该摄像机的拍摄速度为 100 μ s/张。

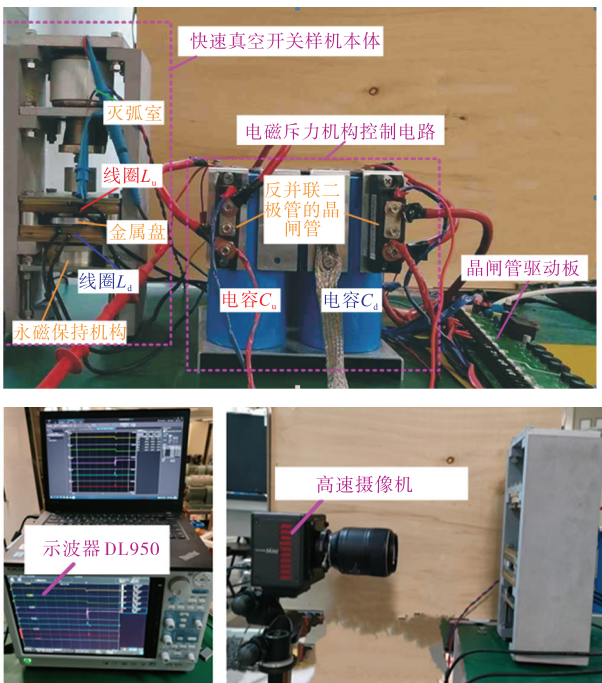


图 7 试验平台

Fig.7 Test platform

为了准确获得样机动、静触头分离及闭合时刻, 设计了如图 8 所示的动、静触头测试电路。

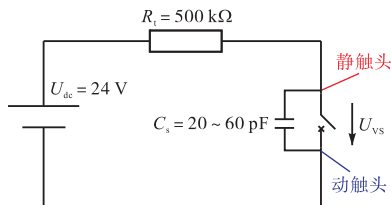


图 8 触头测试电路

Fig.8 Test circuit of contacts

如图 8 所示, 在测试电路中, 真空灭弧室内的动、静触头之间串联一个 24 V 直流电压源和一个 500 k Ω 电阻。当快速真空开关处于合闸状态时, 动、

静触头被压缩在一起, 等效电阻仅为 $\mu\Omega$ 级, 触点间的电压 U_{VS} 为 0。在分闸过程中, 当动、静触头分离时, U_{dc} 经由 R_t 对动、静触头间的寄生电容 C_s 进行充电, U_{VS} 逐渐增大至 24 V, 当 U_{VS} 从零开始增加的时刻即为触头开始分离的时刻。当快速真空开关完成分闸操作时, 动、静触头完全分离, $U_{VS} = 24$ V。在合闸操作过程中, U_{VS} 从 24 V 开始下降的时刻即为动、静触头开始接触的时刻。

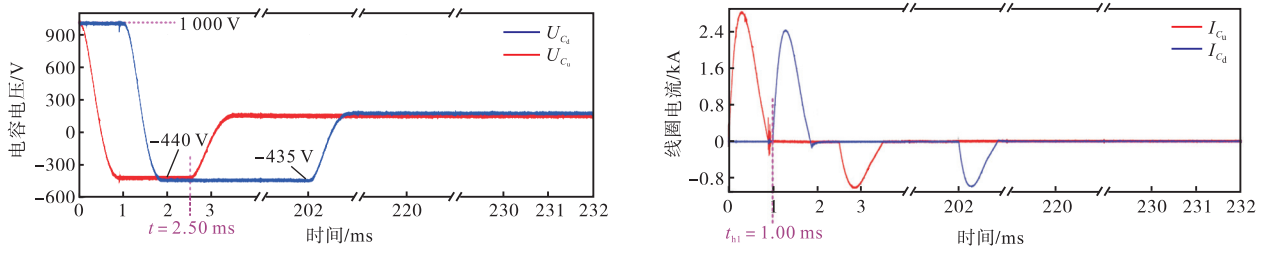
3.2 试验结果

用第 3.1 节中搭建的实体样机试验平台进行连续分合闸操作测试, 试验结果见图 9 和图 10。

如图 10(a) 所示, 当 $t = 0$ 时, 动触头处于合闸位置, U_{VS} 为零; U_{C_u} 和 U_{C_d} 为 990 V。分闸操作时, 分别在 $t = 0$ ms 和 $t = 0.94$ ms 时触发 T_{u-o} 和 T_{d-o} 。如图 9 所示, 在分闸过程的加速阶段 (0 ~ 0.94 ms), C_u 通过 L_u 放电, 产生幅值为 2.8 kA 的脉冲电流 I_{u-o} 。放电后结束, C_u 的剩余电压为 -420 V。在分闸过程的减速阶段 (0.94 ~ 2.00 ms), C_d 通过 L_d 放电, 产生幅值为 2.38 kA 的脉冲电流 I_{d-o} 。放电后, C_d 的剩余电压为 -446 V, 约为初始电压的 45%, 约 20% 的初始能量返回至 C_u 。如图 9(c) 所示, 由于动触头存在惯性, U_{VS} 在 $t = 0.185$ ms 时开始增加, 触头分离存在一定的时间延时。如图 10(b) 所示, 金属盘在 $t = 2.00$ ms 时已经移动到分闸位置, 分闸操作时间 $t_0 < 2.00$ ms, 满足对样机分闸速度的要求。

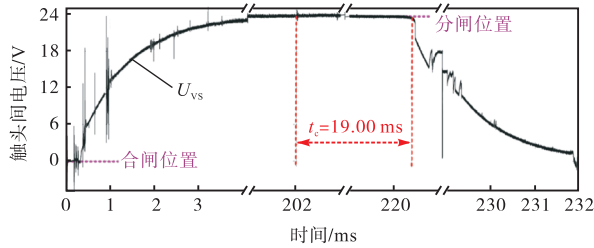
经过约 200 ms 的等待时间, 样机开始进行合闸操作, 分别在 $t = 202.00$ ms 和 $t = 230.00$ ms 触发晶闸管 T_{d-c} 和 T_{u-c} 。在金属盘的加速阶段 (202.00 ~ 202.94 ms), 剩余电压为 -446 V 的 C_d 通过 L_d 放电, 产生幅值为 -0.97 kA 的脉冲电流 I_{d-c} 。加速阶段结束 (202.94 ~ 215.60 ms), 金属盘以匀速向合闸位置移动。当金属盘靠近合闸位置时, C_u 通过 L_u 放电, 金属盘开始减速。如图 9(c) 所示, U_{VS} 在 $t = 218.10$ ms 时开始减小, 标志着合闸操作完成。如图 10(e) 所示, 金属盘在 $t = 218.10$ ms 时处于合闸位置, 说明快速真空开关的合闸操作需要 16.10 ms, 比分闸操作所需时间更长。

由于摩擦力、线圈电阻以及线圈和金属盘的加工误差等因素, 仿真结果和试验结果之间存在一定误差。例如, 脉冲电流的仿真时间和试验时间分别为 1.00 ms 和 0.94 ms, 这种误差是由线圈的加工误差引起的, 处于偏差允许范围内, 因此本文所提出驱动电路的快速真空开关样机满足设计需求, 可完成连续分合闸操作。



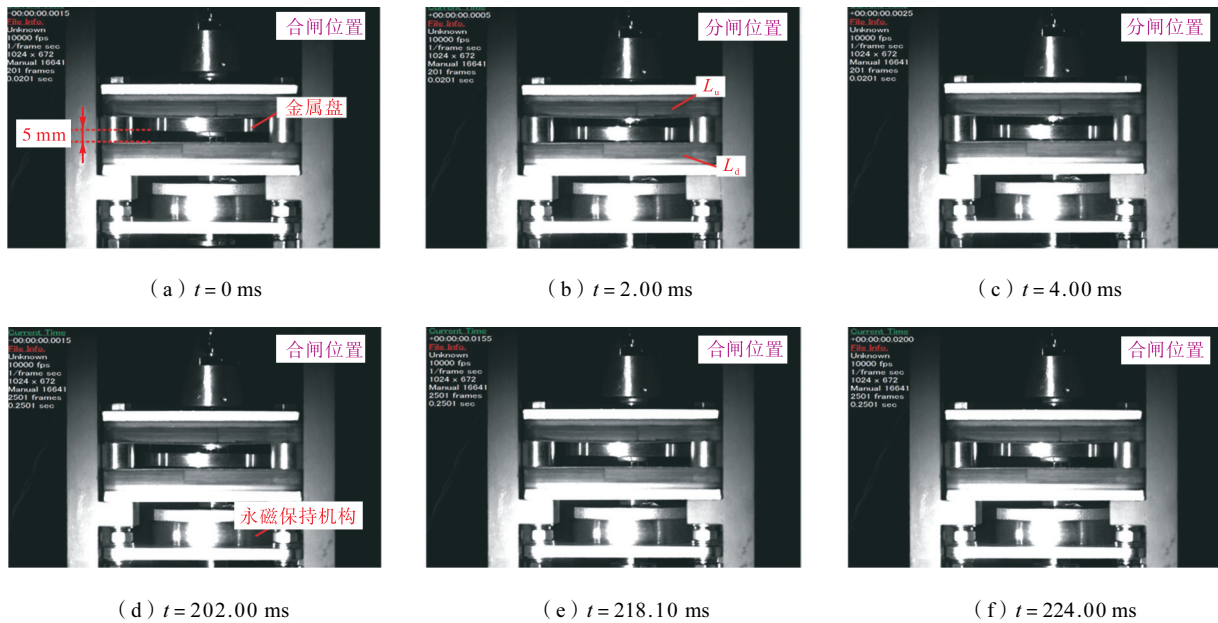
(a) 电容电压波形

(b) 线圈电流波形



(c) 触头间电压波形

图 9 试验结果
Fig.9 Test results



(a) $t = 0$ ms

(b) $t = 2.00$ ms

(c) $t = 4.00$ ms

(d) $t = 202.00$ ms

(e) $t = 218.10$ ms

(f) $t = 224.00$ ms

图 10 高速摄像机记录的试验结果

Fig.10 Test results recorded by high-speed camera

3.3 性能对比

为验证本文所提基于能量回收的快速真空开关小型化操动方法相较于传统操动方法的优越性,本节从电容容量、体积及成本和操作能量 3 个维度对快速真空开关的性能进行对比分析,如表 2 所示。

电容容量方面,传统驱动电路的连续分合闸操作需配置 4 组电容器组;而采用本文所提驱动电路,仅需 2 组电容器组即可完成,电容器用量减少 50%。根据表 1 中的样机参数, $C_u = C_d = 1.04$ mF, $U_{c_u} = U_{c_d} = U_0 = 990$ V,两种操动方法所需能量如表 2 所示。

体积与成本方面:本文提出的操动方法主要通过优化操动机构驱动电路部分降低体积及成本,而真空灭弧室与操动机构本体保持不变。根据样机所用电容器与晶闸管参数,晶闸管模块体积相对于电容器可忽略不计。改进后,储能单元体积缩减约 50%,电容器与晶闸管的综合成本由 1.00 p.u.降至 0.55 p.u..

操作能量方面:电容器预充电能 $E = 0.5CU_0^2$,电容器数量直接影响总预充能量。采用本文所提出操动方法后,连续分合闸操作所需能量由 2 038 J 降至 1 019 J,减少了 50%,与电容器用量减少幅度一致。

表 2 性能对比

Tab.2 Performance comparison

方法	所需能量/J	电容数量	晶闸管数量	体积	成本(p.u.)
传统操动方法	2 038	4	4	4×2× Φ 85 mm×175 mm	1.00
本文所提操动方法	1 019	2	4	2×2× Φ 85 mm×175 mm	0.55

4 结 论

针对快速真空开关操动机构效率低、体积大、成本高的问题,本文提出了快速真空开关基于能量回收的小型化操动方法,具体结论如下。

(1) 针对传统驱动回路电容利用率低的问题,提出基于能量回收的快速真空开关小型化操动方法,利用两组电容器实现真空开关的连续分闸-合闸操作,构建了整个操动过程的数学模型,并通过原型样机试验进行了验证。

(2) 提出永磁保持单元的物理结构,通过有限元仿真得到了其保持力与行程的关系,相比永磁操动机构,不使用分合闸线圈,保持机构可利用 50 g 的质量产生近千牛的保持力。

(3) 搭建了额定参数为 3.6 kV/2.5 kA/1 ms 的试验原型样机,结果表明其分闸时间为 1.00 ms,合闸时间为 19.00 ms。电容用量降低 50%,大幅降低驱动回路的成本和体积。

参考文献:

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
Jiang Daozhuo, Zheng Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104 (in Chinese).
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
Zhao Wanjun. High Voltage DC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004 (in Chinese).
- [3] 彭畅, 温家良, 王秀环, 等. 特高压直流输电系统的直流转换开关研制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 151-156.
Peng Chang, Wen Jialiang, Wang Xiuhuan, et al. Development of DC transfer switch for ultra high voltage DC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 151-156 (in Chinese).
- [4] 彭畅, 温家良, 马国华, 等. 特高压直流输电系统中直流转换开关的电流转换分析与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 1-7, 236 (in Chinese).
Peng Chang, Wen Jialiang, Ma Guohua, et al. Analysis and simulation on current commutation of the DC transfer switches in UHVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36): 1-7, 236 (in Chinese).
- [5] 程铁汉, 黄瑜珑, 孙珂珂, 等. 高压直流转换开关和试验回路的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 55-59, 65.
Cheng Tiehan, Huang Yulong, Sun Keke, et al. Investigation on current commutation capability of high voltage direct current commutation switch[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 55-59, 65 (in Chinese).
- [6] 厉天威, 王浩, 项阳, 等. 高压直流工程直流转换开关分析与仿真[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 33-36.
Li Tianwei, Wang Hao, Xiang Yang, et al. Analysis and simulation of HVDC project DC current transfer switch[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 33-36 (in Chinese).
- [7] 廖敏夫, 黄金强, 葛国伟, 等. 国内外混合式断路器发展与研究现状[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1688-1694.
Liao Minfu, Huang Jinqiang, Ge Guowei, et al. Development and research of native and foreign hybrid circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1688-1694 (in Chinese).
- [8] 李庆民, 钱家骊, 黄瑜珑, 等. 高压开关操作电磁铁动态特性逆分析的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 127-131.
Li Qingmin, Qian Jiali, Huang Yulong, et al. Converse analysis on dynamic characteristics of operating electromagnets in high voltage circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 127-131 (in Chinese).
- [9] 董文亮, 郭兴宇, 梁德世, 等. 基于电磁斥力机构的直流真空断路器模块[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1068-1075.
Dong Wenliang, Guo Xingyu, Liang Deshi, et al. A DC vacuum circuit breaker based on electromagnetic repulsion actuator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1068-1075 (in Chinese).
- [10] 张国军, 宋飞凡, 李绍明, 等. 三阶段电流转移混合

- 型无弧直流断路器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 87-95.
- Zhang Guojun, Song Feifan, Li Shaoming, et al. Hybrid arc-less DC circuit breaker based on three stage current commutation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 87-95 (in Chinese).
- [11] 史宗谦, 贾申利, 朱天胜, 等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 18-22.
- Shi Zongqian, Jia Shenli, Zhu Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 18-22 (in Chinese).
- [12] Wen W J, Huang Y L, Al-Dweikat M, et al. Research on operating mechanism for ultra-fast 40.5 kV vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2553-2560.
- [13] 黄瑜珑, 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).
- [14] 李丝丝, 方春恩, 阴晓旭, 等. 模块化多电平换流阀子模块用真空旁路开关设计[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 138-147.
- Li Sisi, Fang Chun'en, Yin Xiaoxu, et al. Design on vacuum bypass switch for sub-module of modular multi-level converter[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 138-147 (in Chinese).
- [15] 陆利强, 庄劲武, 柯其琛, 等. 一种新型混合型超导限流器的设计与实验研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 132-142.
- Lu Liqiang, Zhuang Jinwu, Ke Qichen, et al. Design and experimental research on a new type of hybrid superconducting current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 132-142 (in Chinese).
- [16] Sim M-S, Bukhari S S H, Ro J-S, et al. Analysis and design of a Thomson coil actuator system for an HVDC circuit breaker[J]. IEEE Access, 2022, 10: 58354-58359.
- [17] Yang W Y, Meng F S, Huang X M, et al. Soft-landing mechanism design driven by electromagnetic repulsion force with application to bypass switch[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(11): 1-6.
- [18] Jiang J, Wang L J, Ma J W, et al. Research on the coordination of 40.5 kV fast vacuum switch driven by electromagnetic repulsion mechanism and oil damper [C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan, 2019: 652-657.
- [19] Augustin T, Parekh M, Magnusson J, et al. Thomson-coil actuator system for enhanced active resonant DC circuit breakers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 10(1): 800-810.
- [20] Pei X Z, Smith A C, Shuttleworth R, et al. Fast operating moving coil actuator for a vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 931-940.
- [21] ABB. Vacuum Interrupters[EB/OL]. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=DEABB%204068%20EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, 2018-09-10.
- [22] Magnet Z S. The Parameters for Permanent NdFeB [EB/OL]. <http://www.zhongsheng-magnet.com/upload/20170815/2017815143737.pdf>, 2017-08-15.
- [23] Wen W J, Li B, Li B T, et al. No-load dielectric recovery of the ultra-fast vacuum switch in hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 840-847.

(责任编辑: 孙立华)