

基于真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室串联的 混合断路器技术发展与研究现状

程 显^{1,2}, 廖敏夫¹, 段雄英¹, 葛国伟¹, 邹积岩¹

(1. 大连理工大学电气工程学院, 大连 116024; 2. 河南城建学院电气工程系, 平顶山 467044)

摘要: 在归纳国内外高压开关研究现状的基础上,综述了混合断路器技术的发展历史与研究现状,分析了真空电弧与 SF₆ 电弧的相互作用机理,研究了混合断路器的动态绝缘特性并得到混合断路器中两灭弧室相互作用的关键区间,对比说明了现有混合断路器样机的结构及控制特点,阐明了进一步研究混合断路器技术亟需解决的主要问题。认为应尽快探明两灭弧室触头动作的最优控制策略,得出不同开断容量的 SF₆ 灭弧室与真空灭弧室串联后其开断容量增益曲线,为混合断路器的工业化应用提供重要的理论基础。

关键词: 混合断路器; 真空灭弧室; SF₆ 灭弧室; 动态介质特性; 瞬态恢复电压; 操动机构
中图分类号: TM561 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)07-0114-08

Development and Current Status of Hybrid Circuit Breaker Technology Based on Vacuum Interrupter and SF₆ Interrupter in Series

CHENG Xian^{1,2}, LIAO Min-fu¹, DUAN Xiong-ying¹, GE Guo-wei¹, ZOU Ji-yan¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Electrical Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467044, China)

Abstract: Based on the induction of research status of high-voltage switch, this paper summarizes the development and current status of hybrid circuit breaker technology, analyzes the interaction principle between vacuum arc and SF₆ arc, studies the dynamic insulating property of hybrid circuit breaker and obtains the key interactive region between vacuum arc and SF₆ arc, contrast describes the structure and control features of existing hybrid circuit breaker prototypes, clarifies the major problems of hybrid circuit breaker need to be further researched. The author concludes that the optimal control policy of contacts action should be verified, the breaking capacity gain curve of hybrid circuit breaker should be obtained when different vacuum interrupter and SF₆ interrupter in series, which will provide an important theoretical basis for the industrial application of hybrid circuit breaker.

Key words: hybrid circuit breaker; vacuum interrupter; SF₆ interrupter; dynamic dielectric characteristic; transient recovery voltage; operation mechanism

0 引言

目前,真空断路器在配电网中已经得到了广泛应用,但 110 kV 及以上电压等级仍由 SF₆ 断路器占

据主导地位。SF₆ 断路器需要较高的 SF₆ 气体压力以保证足够的开断能力,增加了工艺成本。同时 SF₆ 气体高达 23 900 的全球变暖潜能值(GWP)被建议限制使用,且其废气一旦泄露对人体有害^[1-2]。各国研究者一直在寻找一种可以替代 SF₆ 断路器的大容量高

收稿日期:2012-06-11; 修回日期:2012-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(50977004);国家“十一五”科技支撑计划(2009BAA19B03;2009BAA19B05);中央高校基本科研业务费专项基金资助(DUT10ZD202)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China (50977004), Supporting Program of the ‘Eleventh Five-year Plan’ for Science & Technology Research of China (2009BAA19B03, 2009BAA19B05), Fundamental Research Funds for the Central Universities(DUT10ZD202).

压开关。

现阶段大容量高压开关的研究主要有 3 个方向:①继续发展真空断路器;②寻找可替代 SF₆ 的气体断路器;③研究可减少 SF₆ 气体使用量的混合断路器(HCB)。真空断口耐压与断口间隙长度的非线性增长关系使真空长间隙绝缘有难以克服的困难,制约了单断口真空断路器向更高电压等级发展;而多断口真空断路器由于同步分断、断口间均压等技术复杂,制造成本较高,限制了真空断路器在高压和超高压领域的实际应用和推广^[2-3]。各国研究者对 SF₆ 气体的可能替代品,如 C-C₄F₈ 气体、CF₃I 气体、惰性气体以及 SF₆/N₂、C₃F₈/N₂、C₂F₆/N₂、O₂/N₂、C₃F₈/C₂HF₅、C₃F₈/CO₂ 等混合气体进行了大量实验研究^[4-10]。但上述气体因为存在开断能力不足只适用于绝缘、同样具有温室效应、需要增大气压或需进行工艺复杂的绝缘涂层处理等不利因素,目前为止尚不能完全作为 SF₆ 气体的替代品应用于大容量高压开关。

HCB 是将真空快速的介质恢复特性与 SF₆ 气体优良的介质绝缘强度相结合以得到更大的短路电流开断能力。国内外对 HCB 技术的研究主要可以归纳为以下 3 个方面:①真空电弧与 SF₆ 电弧相互作用的机理分析;②动态介质恢复特性研究;③控制策略及样机结构设计。笔者就上述内容分别讨论并综述其发展与研究现状,最后提出进一步研究 HCB 技术亟待解决的主要问题。

1 混合断路器的发展历史

1893 年,美国人 RITTENHAUSE 首先发现真空对交流电流有较强的开断能力;1938 年德国人 GROSSE V 首次提出将 SF₆ 气体作为灭弧介质^[11-12];1966 年日本人 KAMEYAMA S 以专利形式提出 HCB 的概念,他将单个真空灭弧室和单个压气式灭弧室进行串联开断电流^[13];英国的 FLURSCHEIM C H 则于 1967 年提出将单个真空灭弧室与单个油灭弧室串联并将其封闭在绝缘油中^[14];随后,美国西屋公司和通用电气公司分别于 1974 年、1976 年提出将单个真空灭弧室与单个 SF₆ 灭弧室串联构成 HCB,其中通用电气公司进一步提出将一个真空灭弧室与两个并联有低阻抗均压电容的 SF₆ 灭弧室串联扩展到更高电压等级^[15-16];1977 年, VOTTA G A 撰文对真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室串联组成混合式断路器的基本理论及开断机理进行了较为详细的论述^[17];1978 年美国 ITE 帝国公司提出了将一个 15 kV 真空灭弧室和一个 72.5 kV 的 SF₆ 灭弧室串联构成的 HCB 用于承担 121 kV 电压等级暂态恢复电压的

设想,同年提出采用真空灭弧室和旋弧式 SF₆ 灭弧室串联组成混合式断路器的发明专利^[18-19]。

20 世纪 80 年代至 90 年代,美、日、法等国的研究者对 HCB 进行了大量的实验研究:1980 年美国的 DETHLEFSEN R 等人将 15 kV 及以上电压等级的真空灭弧室与 72 kV 及以上电压等级的 SF₆ 灭弧室串联组成模块式 HCB 应用于 145~230 kV 电压等级进行实验^[20];1984 年日本电力发展公司与日本东芝电气株式会社 SENDA T 等人将一个真空灭弧室和一个 SF₆ 灭弧室布置在封闭的接地箱体中,搭建了额定电压 250 kV、额定电流 1 200 A 的 HCB 样机应用于直流电流开断实验。在恢复电压 420 kV、外部反向脉冲电流频率 14.5 kHz、开断电流下降率(di/dt) 195 A/μs、弧后恢复电压上升率为 4.1 kV/μs 时,其可开断的直流电流为 1 440 A,并提出可将样机进一步改进应用于 450 kV 直流输电系统中^[21-23];1988 年日本日立公司 NATSUI K 等人搭建了 HCB 合成回路实验电路研究其弧后暂态电压分布特性,进行了 362 kV 等级 90%、75%、60%近区故障(SLF)63 kA 短路电流开断实验,对两灭弧室两端电压分布进行了分析计算与实验验证^[24];1993 年日本 SATO T 等人通过开断试验研究得出同样情况下 HCB 操动所需能量低于传统的压气式断路器^[25];1994 年法国人 PHAM V D 提出将 2 个压气式断路器串联后(其上并联有几百 nF 均压电容)再与 3 个 SF₆ 断路器串联组成 HCB,运用压气式断路器串联可产生多段较高的电弧电压吸收直流分量的能量使电流趋向零及 SF₆ 断路器的高压开断和绝缘的能力,将其应用于含有高直流分量的电流开断^[26];1999 年法国施耐德电气公司 BERNARD G 等人对 HCB 的连接结构进行了改进,在正常合闸状态下,电流主要流过初级回路,开断时混合断路器负责开断电弧,合闸时混合断路器负责引入电流,当引入电流后电流由 HCB 转移到初级回路^[27]。

进入 21 世纪,随着真空灭弧室开断容量的增加及 SF₆ 灭弧室结构的更加优化,混合式断路器技术的研究主要趋向于将真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室串联。2003 年法国的 PERRET M 等人提出了一新型 HCB 结构,将真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室同轴连接减小了整个气腔的体积^[28];同年瑞士 ABB 公司将 HCB 在配电网中进行了实验^[29];2007 年荷兰 KEMA 实验站 SMEETS R P P 等人成功研制出额定电压 145 kV、额定开断电流 63 kA 的混合式断路器样机,通过实验研究了电流开断过程真空电弧和 SF₆ 电弧的相互作用,并建立了简单的电弧仿真模型分析测量分压

器对测量结果的影响^[30];2010年大连理工大学也投入到 HCB 技术的研究当中,建立了 HCB 仿真模型,计算了其在电流开断过程两电弧的相互作用、暂态电压分布关系,分析得到了 HCB 两灭弧室相互作用的关键区间,并基于此研制了基于协调操动控制技术和操动机构自适应控制技术的 HCB 实验样机,通过实验验证了仿真结果的正确性^[31-33]。

2 真空电弧与 SF₆ 电弧相互作用机理

文[13]、[17]、[24]、[30]、[33]针对真空电弧与 SF₆ 电弧的灭弧特点提出 HCB 开断电流的基本理论及电弧的相互作用机理;文[24]认为在电流过零后电弧熄弧前, SF₆ 弧后阻值由灭弧室内随时间变化的能量平衡关系决定,可由等式(1)表示,式(1)中 R_G 是 SF₆ 的弧后电阻, τ_G 是 SF₆ 电弧的时间常数, P 为燃弧时注入电弧的能量, N 为燃弧时灭弧室散去的能量。而真空灭弧室在触头分离瞬间产生电荷鞘层,故真空弧后电阻与 SF₆ 弧后电阻不同不能用能量平衡关系解释,应利用加在真空灭弧室上电压与弧后电阻的比率计算任意时刻的弧后电流,最后得出真空弧后电阻 R_V, R_V 可由式(2)表示。

$$\frac{dR_G}{dt} = \frac{R_G}{\tau_G} \left(1 - \frac{P}{N}\right) \quad (1)$$

$$R_V = R_{V0} \times \exp(t/\tau_v) \quad (2)$$

式(2)中: R_V 为真空灭弧室燃弧电阻; R_{V0} 为定值; τ_v 是真空电弧的时间常数。

文[30]通过简单的电弧模型进行了仿真计算,结果证明真空灭弧室在故障电流开断瞬时承受主要的恢复电压,当弧后电流逐渐减少到零时 SF₆ 灭弧室由热击穿引起的电弧熄灭变为高阻状态承担绝大部分恢复电压;文[31]基于真空电弧的离子扩散方程、离子密度方程和 SF₆ 电弧的克西-迈尔修正模型建立了 HCB 模型,搭建了电磁暂态仿真平台,通过设定更加详细的仿真系统参数量化研究了 HCB 断流容量增益特性。

基于已有理论基础,对比两种不同的灭弧介质特性可知,电流过零后真空中的离子复合与扩散是一个非常快速的过程,它的介质恢复速度远快于 SF₆ 气体;但真空在强电场作用下由于场致击穿和粒子碰撞的原因,其介质强度随着间隙长度的增长出现非线性关系影响绝缘能力,然而 SF₆ 在这方面恰具有较好的特性;真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室同时开断电流情况下, SF₆ 灭弧室的弧后电流远小于真空电弧。 SF₆ 电弧将阻止真空电弧中电荷的流出,使 SF₆ 灭弧室承担大部分初始的暂态恢复电压(TRV),

这不利于 SF₆ 气体的介质强度恢复。分析可知,真空灭弧室的主要作用为承担电流开断后的初始恢复电压, SF₆ 灭弧室应承担恢复电压的峰值。两灭弧室电压分配关系不是定值,二者之间存在一个承担电压的交替区间。这个区间电压交替完成的质量决定开断容量的增益。

根据上述分析建立 HCB 等效电路模型见图 1。在弧后电流过程真空电弧利用快速的介质恢复特性承担绝大部分初始恢复电压,其电弧阻抗为 R_V,此时 SF₆ 介质强度恢复速度较慢仍有较小弧后电流流过(通过杂散电容),电弧阻抗 R_G 较小;但随着其介质强度的恢复 R_G 逐渐增加与真空灭弧室共同完成弧后电流开断。此后,灭弧室间电压分布由其断口间电容 C_V、C_G 的比值决定。

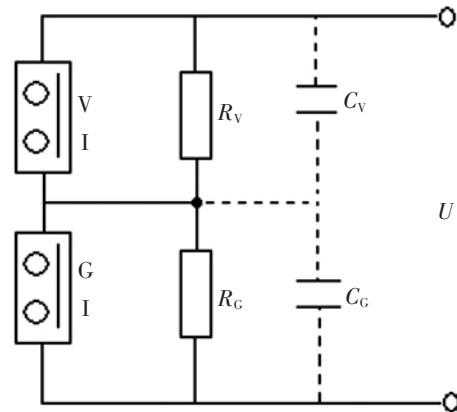


图 1 混合断路器等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of hybrid circuit breaker

3 混合断路器的动态绝缘特性

HCB 的动态绝缘特性主要指其开断电流后两断口的介质强度恢复特性和电压分布特性。文[20]阐明 HCB 在电流分断过程,弧后 TRV 陡峭上升阶段主要由真空灭弧室承担,峰值阶段和静态绝缘阶段大部分电压由 SF₆ 灭弧室承受,见图 2。当两灭弧室未并联均压电容时,真空灭弧室对地电容比 SF₆ 灭弧室小,开断过程后期真空灭弧室两端电压较高出现高频击穿放电,进而影响 HCB 开断特性,在真空两端并联非线性电阻可以有效的限制电压,电流开断后期加在真空灭弧室上的电压如图中虚线所示。

文[22]将传统 72 kV 真空灭弧室与 168 kV SF₆ 灭弧室串联进行开断实验,发现在开断电流过程中,如果开断电流值一定而 di/dt 的值超过某一极限时,开断将会失败,证明不成功的开断在一定程度上取决于 di/dt 比值而非恢复电压。认为真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室串联组成 HCB 比多个真空灭弧室串联组成多断口真空断路器在承担瞬态恢复电压、断口间

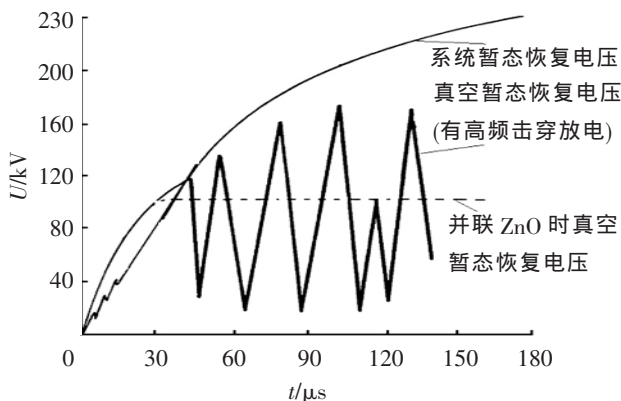


图 2 真空灭弧室 TRV 分布特性

Fig. 2 TRV distribution characteristics of vacuum interrupter

电压分布和操动机构同期性方面都更加经济可行；文[24]同样实验证明 HCB 开断过程中的恢复电压初始值可由真空灭弧室承担，而较高的弧后稳态保持电压可 SF₆ 灭弧室承担；文[30]实验证明在短路电流过零前，SF₆ 灭弧室能够（相比只使用真空灭弧室的情况）减小真空灭弧室的 di/dt 值，在电流过零后的 5~10 μs，真空灭弧室对延迟 SF₆ 灭弧室的瞬态恢复电压有积极作用，开断过程中，开断失败的主要原因是由于电流过零后 10 μs 内真空灭弧室发生重燃。

文[32-33]基于大量实验结果认为，弧后电流开断过程，通常承受恢复电压较早的真空灭弧室易发生重击穿，但此时只要 TRV 峰值和上升速度低于 SF₆ 灭弧室介质强度的极限值，整个 HCB 并不会因为真空灭弧室发生重击穿而导致开断失败。图 3 为电流开断过程 HCB 两灭弧室电压和电流波形示意图。图 3 中： I_s 为回路电流， U_v 为真空灭弧室两端电压， U_G 为 SF₆ 灭弧室两端电压。系统在 t_1 点发分断命令给 HCB，真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室在时刻 t_2-t_2' 间开始分离（两灭弧室触头分离时刻应可调节，使其符合真空灭弧室承担初始 TRV，SF₆ 灭弧室承担随后 TRV 峰值的目的）。如图 3 所示，回路电流过零后的 t_2-t_3 时刻，回路的恢复电压主要由真空灭弧室承担，SF₆ 灭弧室上的恢复电压被明显延迟。如 t_3 时刻真空灭弧室重燃时 SF₆ 灭弧室尚不能接替 TRV，则 HCB 被击穿直到下一个电流过零点 t_4 时刻。 t_4-t_5 时刻真空灭弧室再次承担大部分初始 TRV，SF₆ 灭弧室瞬态恢复电压得以延迟， t_5-t_6 时刻 SF₆ 灭弧室介质强度逐渐恢复开始承担大部分 TRV， t_6 时刻 TRV 可完全由 SF₆ 灭弧室独自承担，弧后电流完全开断，电压分布由断口间电容决定。

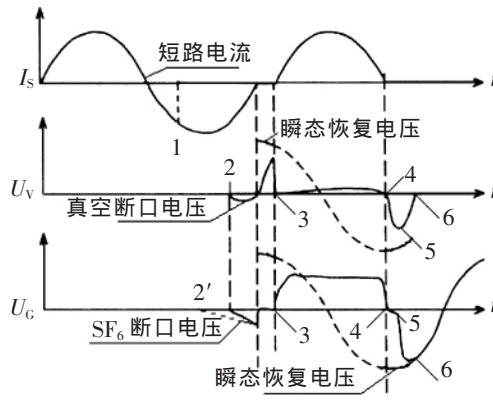


图 3 混合断路器动态介质恢复特性

Fig. 3 The dynamic dielectric recovery of HCB

4 样机结构与控制策略

现有的 HCB 样机可按灭弧室排列方式、操动机构驱动形式和控制策略进行分类。

4.1 灭弧室排列方式

按照灭弧室排列方式主要分为下列几种方式。

4.1.1 两灭弧室水平布置

文[18]、[21-24]中真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室均为水平布置串联组成混合式断路器。文[18]中两灭弧室水平串联，放置在同一低气压 SF₆ 密封箱体内；文[21]将真空灭弧室并联非线性电阻(ZnO)，SF₆ 灭弧室并联分压电容，二者分别布置在两个隔离的 SF₆ 密封箱体中，真空灭弧室所在 SF₆ 密封箱体内气压为 2~3 kg/cm²，低于 SF₆ 灭弧室所在密封箱体内气压，见图 4；文[22-23]将真空灭弧室（并联非线性电阻）、SF₆ 灭弧室（并联分压电容）、换流电路和吸收电路全部封闭布置在气压是 3~5 kg/cm² 的同一 SF₆ 箱体中构成混合式 GIS；文[24]则是将两灭弧室与合成回路电流源的辅助开关同置于一个 SF₆ 密封箱体内构成了 HCB 合成回路试验系统。

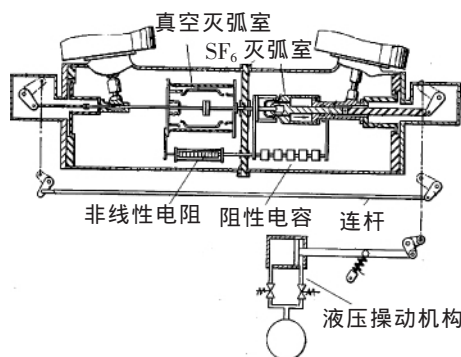


图 4 混合断路器灭弧室水平布置

Fig. 4 Interrupters horizontal layout

4.1.2 两灭弧室垂直布置

文[13]将一个真空灭弧室与一个压气式灭弧室

串联构成混合式断路器,真空灭弧室在上,压气式灭弧室在下;文[15]、[20]将两灭弧室垂直布置串联构成 HCB,真空灭弧室在上, SF_6 灭弧室在下;文[28]将两灭弧室均密封在 SF_6 封闭箱体内, SF_6 灭弧室在上,真空灭弧室在下,见图 5。真空灭弧室两端并有非线性电阻, SF_6 灭弧室两触头均可移动,外壳是环氧树脂绝缘筒。

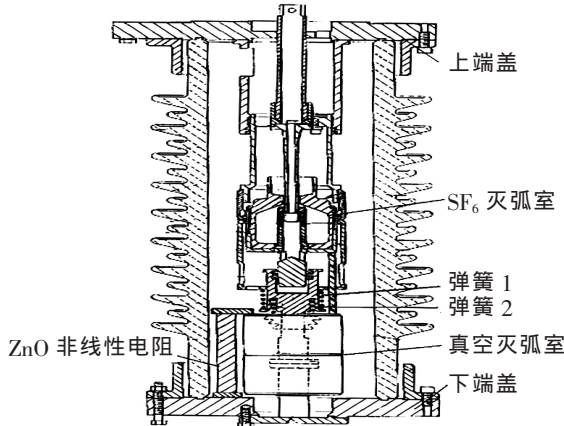


图 5 混合断路器灭弧室垂直布置
Fig. 5 Interrupters vertical layout

4.1.3 L型布置及II型布置

文[14]搭建的断路器为 L 型布置,油断路器在上,真空断路器在下,二者浸在变压器油中;文[27]、[30]中混合式断路器也为 L 型布置, SF_6 灭弧室在上垂直放置,真空断路器在下水平放置,两灭弧室通过连杆由一操动机构控制;文[27]中真空灭弧室在金属箱体中,其静触头与金属箱体电气连结, SF_6 灭弧室封闭绝缘瓷瓶内,金属箱体与绝缘瓷瓶连结在一起并以 SF_6 作为绝缘介质,见图 6;文[16]中真空灭弧室与 SF_6 灭弧室以 II 型平行布置,见图 7。

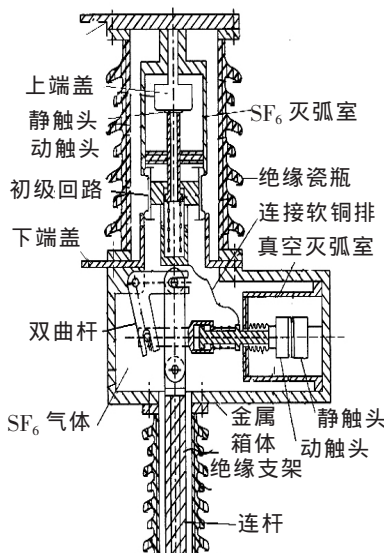


图 6 混合断路器灭弧室 L 型布置
Fig. 6 Interrupters L-shaped layout

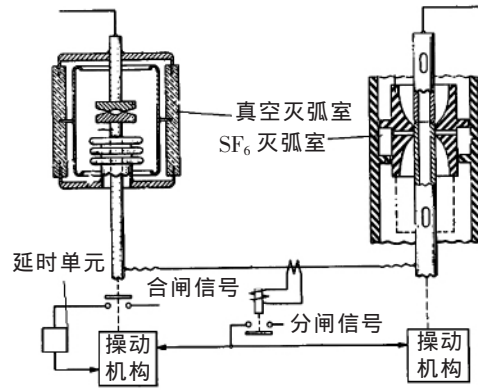


图 7 两个操动机构分别驱动真空灭弧室和 SF_6 灭弧室
Fig. 7 Two actuators drive two interrupter respectively

4.2 操动机构驱动形式

按照操动机构驱动形式主要分为以下几类。

4.2.1 两个机构分别控制真空灭弧室与 SF_6 灭弧室

文[16]中采用两个操动机构分别驱动真空灭弧室和 SF_6 灭弧室,见图 7。真空灭弧室操动机构带有合闸动作延时单元,在两灭弧室分闸到位后的 2~20 个工频周期内真空灭弧室重新合闸,可以调节真空灭弧室重新合闸的时间,使 SF_6 灭弧室承受 TRV 以免真空击穿高频放电;文[24]采用两操动机构,其中 SF_6 由油压操动机构驱动;文[32]中两灭弧室分别采用永磁机构驱动。

4.2.2 单个操动机构同时驱动真空灭弧室与 SF_6 灭弧室

文[13]采用气压传动机构驱动压气式灭弧室和真空灭弧室合闸,合闸过程中真空灭弧室的弹簧机构储能为分闸储能,分闸时由电磁装置控制气压传动机构驱动压气式灭弧室并触发脱扣机构使真空灭弧室同时动作;文[14]使用液压机构驱动真空断路器和油断路器动作;文[18]、[20]、[22-23]采用单个操动机构对真空灭弧室和 SF_6 灭弧室构成的 HCB 模块进行驱动分、合闸。操动机构连杆处于两个灭弧室中间,分闸时两灭弧室的动触头均由操动机构通过连杆驱动向中间移动;文[21]中连杆处于两灭弧室两侧,操动时连杆带动灭弧室触头分别向两侧运动分闸,见图 4。

文[28]中 HCB 采用单个操动机构驱动两个灭弧室,静触头固定不能移动,静触头外壳是绝缘的可上下移动,见图 8。合闸时,驱动连杆带动 SF_6 主触头与辅助触头,辅助触头驱动静触头外壳并且压缩弹簧使真空灭弧室动作, SF_6 灭弧室主触头先与静触头闭合,随后当辅助触头与 SF_6 静触头外壳接触时真空灭弧室合闸。分闸时,驱动连杆带动辅助触头先动作,主触头由于重叠长度 d 的存在分离时获得

一定的速度。当驱动连杆运动死冲程 D 后真空触头在压缩弹簧的作用下分离。文[30]中两个灭弧室的动触头由同一操动机构驱动, 通过连杆分别按各自的速度和行程同时运动。

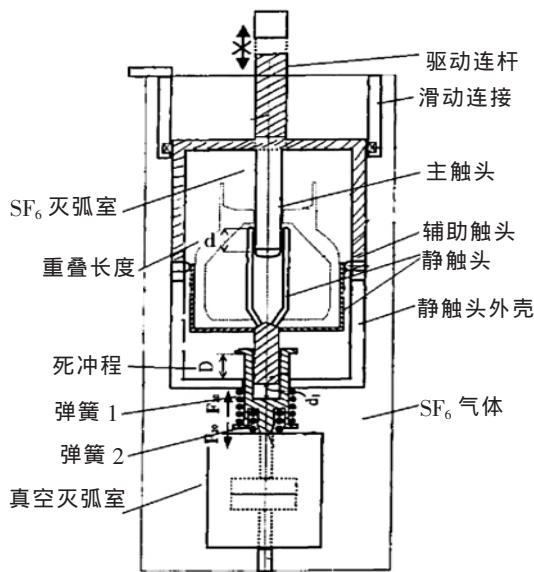


图 8 单个操动机构驱动真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室
Fig. 8 One actuator drive vacuum interrupter and SF₆ interrupter

4.3 控制策略

按照控制策略分类主要分为两灭弧室触头同时动作、真空触头先动作及可协调控制 3 类。

4.3.1 两灭弧室触头同时动作

文 [13]、[16]、[18]、[20-23]、[30] 中提及的 HCB 中, 真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室均为同时合、分闸; 文 [22-23] 中的 HCB 用于开断直流电路, 在触头动作的同时触发高频电流回路制造人为电流过零点以开断电流。

4.3.2 真空灭弧室触头先动作

文[14]中无论合闸或分闸时, 都是真空灭弧室先动作; 文[15]提及的 HCB 是在真空灭弧室动作完成后, SF₆ 灭弧室才动作, 等同于 SF₆ 主要负责合闸, 真空断路器主要负责分闸。因为合闸过程 SF₆ 灭弧室无熔焊, 触头烧蚀较少, 而真空灭弧室合闸过程中触头烧蚀严重; 分闸过程 SF₆ 灭弧室在开断过程中触头烧蚀严重, 而真空灭弧室在开断过程中由于优越的灭弧性能而熔焊较少, 见图 9。单个操动机构通过连杆驱动动触头 1, 合闸时, 操动机构驱动触头 1 向动触头 2 运动, 当动触头 1 和动触头 2 接触后, 真空灭弧室合闸完成, 然后操动机构驱动动触头 1、2 和 3 继续向下运动, 直到 SF₆ 灭弧室合闸到位; 分闸时, 操动机构脱扣后, 真空灭弧室先分开, 此时由于阻尼器的作用使得 SF₆ 灭弧室分闸滞后。文 [23] 中

HCB 两灭弧室虽同时动作, 但因为真空灭弧室行程小于 SF₆ 灭弧室, 所以真空灭弧室先分开负责开断电流, SF₆ 灭弧室在后开断负责承受较高的 TRV。

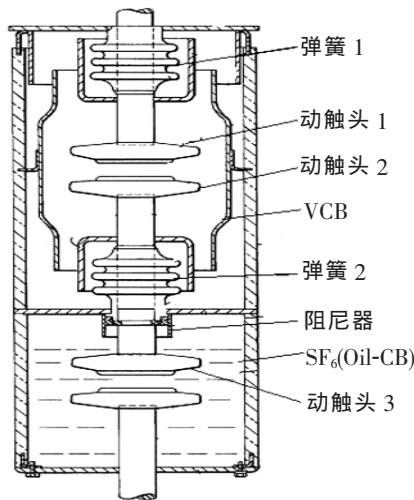


图 9 真空灭弧室触头先动作

Fig. 9 The contacts of vacuum interrupter parting at first
4.3.3 两灭弧室触头可协调控制

文[24]中 HCB 可协调控制两灭弧室的动作时间, 但由于采用传统的油压操动机构, 触头动作分散性较大; 文[28]中 HCB 如图 8 所示, 通过调节 SF₆ 灭弧室主触头的重叠长度 d 的大小可以改变 SF₆ 灭弧室与真空灭弧室触头分闸的协调动作时间。当 $d=D$ 时, 真空灭弧室和 SF₆ 灭弧室同时分离; 当 $d=D-l$ 时, SF₆ 灭弧室主触头提前真空灭弧室动触头运动 l 距离所需时间分离; 当 $d=D+l$ 时, SF₆ 灭弧室主触头滞后真空灭弧室动触头运动 l 距离所需时间分离。文[32-33]中 HCB 样机采用模块式设计, 将真空断路器与 SF₆ 断路器串联, 分别采用永磁操动机构驱动, 并配以协调操动控制单元可任意协调两灭弧室触头动作顺序, 动作精度在 600 μs 以内。

5 结语

综上所述, 各国研究者对 HCB 断路器技术已进行了大量的研究, 充分证明了 HCB 中两灭弧室在电流开断过程积极的相互作用, 真空灭弧室首先承担 TRV 有利于 SF₆ 灭弧室的介质强度恢复, 其能够有效增加 HCB 的开断容量。但仍存在一些问题需要进一步研究, 如 HCB 中两灭弧室的静态电场分布情况尚未见详细报道, 应建立仿真平台对两灭弧室静态电场分布进行研究, 并通过电场分布计算进一步优化 HCB 结构; 电流开断过程真空电弧与 SF₆ 电弧的最佳配合方式尚未得出, 应搭建触头动作具有高可控性的 HCB 样机进行实验测试得出两灭弧室动作配合的最优控制策略, 并将结果通过仿真计算进行

普遍性验证;不同开断容量的真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室串联后的断流容量增益特性尚未量化,不利于引起电器行业对其开发的广泛关注,为将其推向工业化应用需通过大量实验得出不同容量或电压等级的真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室串联后断流容量增益规律及相对准确的容量增益倍数。这些研究需要各国同行的共同努力以及政府、企业的资金支持。

HCB 技术开发始于 20 世纪 60 年代,受当时技术条件落后、制造成本高昂、市场需求不强烈的影响未能实现工业化应用。但随着人们环保意识的日益增强、制造技术的大幅提高及电网容量的不断扩大使 HCB 技术推向工业化应用成为可能,主要原因是:

1)SF₆ 是一种具有很强温室效应的气体,从环境保护的角度考虑世界范围内达成共识要减少温室气体的使用量,使高压断路器必然朝着低含量 SF₆ 的研究方向进展;

2)单断口真空灭弧室的额定电压不能经济的增加到 52~72.5 kV,但近十年来低电压等级的真空灭弧室技术取得快速进步,在大容量短路电流开断上能力越来越强,能够承受非常高的 TRV 上升率,同时体积更加小型化;

3)SF₆ 断路器较低的充气压力,难以开断短路电流,但却足以承受 TRV 峰值及系统稳态电压。而较高的充气压力要求较高的制造工艺提高了制造成本,同时使其无法工作在寒冷地区。

4)SF₆ 断路器自能技术取得进展允许对其灭弧室的气吹部分进行优化设计。两者结合可以降低 SF₆ 灭弧室的充气压力、减少 SF₆ 气体用量。HCB 应用于高压领域相对于多断口真空开关在断口均压、同步操动方面具有一定优势。

参考文献:

- [1] 李建基. SF₆ 气体在高压开关设备中的用量在减少[J]. 电气应用, 2009, 28(20):18.
LI Jian-ji. The using of SF₆ gas is reduced in high voltage switch equipment[J]. Electrotechnical Application, 2009, 28(20):18.
- [2] 程显, 廖敏夫, 段雄英, 等. 基于永磁操动机构的混合断路器开断能力的探讨[J]. 高压电器, 2011, 47(9):107-112.
CHENG Xian, LIAO Min-fu, DUAN Xiong-ying, et al. Discussion on breaking capacity of hybrid circuit breaker based on permanent operation mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 107-112.
- [3] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 多断口真空开关技术的发展与研究现状[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 456-459.
LIAO Min-fu, DUAN Xiong-ying, ZOU Ji-yan, et al. Development and current status of vacuum switch with multiple breaks[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 456-459.
- [4] YAMAMOTO O, TAKUMA T, HAMADA S. Applying a gas mixture containing C-C₄F₈ as an insulation medium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1075-1081.
- [5] WU Bian-tao, XIAO Deng-ming, LIU Zhang-sheng. Analysis of insulation characteristics of C-C₄F₈ and N₂ gas mixtures by the Monte Carlo method [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2006, 39(19): 4204-4207.
- [6] OKUBO H, YAMADA T, HATTA K. Partial discharge and breakdown mechanisms in ultra-dilute SF₆ and PFC gases mixed with N₂ gas[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2002, 35(21): 2760-2765.
- [7] TOSHIOKI R, YOSHITAKA Y, FUMIHIRO E. Development of 72 kV high-pressure air-insulated GIS with vacuum circuit breaker[J]. Electrical Engineering in Japan, 2006, 157(4):1270-1278.
- [8] De URQUIJO J. Is CF₃I a good gaseous dielectric a comparative swarm study of CF₃I and SF₆[J]. Radicals and Non-equilibrium Processes in Low-temperature Plasmas, 2007, 86 (1):1-10.
- [9] LARIN A V, MEURICE N, GENTILS F. Theoretical and experimental analyses of the synergism in the dielectric strength for C₃F₈/C₂HF₅ mixtures [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(8): 1-14.
- [10] HIKITA M, OHTSUKA S, OKABE S. Breakdown mechanism in C₃F₈/CO₂ gas mixture under non-uniform field on the basis of partial discharge properties[J]. 2009, 16(5): 1413-1419.
- [11] 王季梅. 真空开关理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
WANG Ji-mei. Vacuum switch theory and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [12] 林立生. 高压 SF₆ 断路器综述[J]. 华北电力技术, 1997(5):45-49.
LIN Li-sheng. Summarize of high voltage SF₆ circuit breaker[J]. North China Electric Power, 1997(5): 45-49.
- [13] KAMEYAMA S, OHKURA T. Circuit interrupter [P]. US: 3244842, 1966.
- [14] FLURSCHEIM C H. Series connected switches of different types[P]. US: 3303309, 1967.
- [15] HARROLD R T. Hybrid circuit breaker[P]. US: 3814882, 1974.
- [16] PORTER J W, MEDIA P. High-voltage electric circuit breaker comprising series-connected vacuum interrupter and fluid blast interrupter[P]. US: 3982088, 1976.
- [17] VOTTA G A. Novel concepts of interruption for distribution and transmission circuit breakers[C]//Symposium Proceedings New Concepts in Fault Current Limiters and Power Circuit Breakers.[S.l.]:IEEE, 1977:1124-1131.

- [18] VOTTA G A. Development of distribution and subtransmission SF₆ circuit breaker and hybrid transmission interrupter [M]. Philadelphia: The Electric Power Research Institute, 1978.
- [19] WESTON D E. Hybrid power circuit breaker [P]. US: 4087664, 1978.
- [20] DETHLEFSEN R. Hybrid circuit breaker with varistor in parallel with vacuum interrupter [P]. US: 4204101, 1980.
- [21] YANABU S. Hybrid-type interrupting apparatus [P]. US: 4434332, 1984.
- [22] SENDA T, TAMAGAWA T, HIGUCHI K, et al. Development of HVDC circuit breaker based on hybrid interruption scheme [J]. IEEE Trans. Power App. Syst., 1984, PAS-103(3):545-552.
- [23] TADASHI H, KEN M. Hybrid circuit breaker [P]. US: 4458119, 1984.
- [24] NATSUI K, KUROSAWA Y, HAKAMATA Y, et al. Voltage distribution characteristics of series connected SF₆ gas and vacuum interrupters immediately after a large AC current interruption [J]. IEEE Trans. on Power Del., 1988, 3(1): 241-247.
- [25] SATO T, ARITA H, TSUKUSHI M, et al. Interrupting characteristics of series connection of thermal puffer gas circuit breaker and vacuum circuit breaker [J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1993, 113-B(12): 1439-1445.
- [26] VANDOAN P, JEANJEAN R. Hybrid circuit breaker for high voltage DC currents-comprises compressed air circuit breaker in parallel with sulphur hexafluoride unit [P]. US: 5296661, 1994.
- [27] BERNARD G, EGREVE S, CHEVRIER P. High voltage hybrid circuit-breaker [P]. US: 5905242, 1999.
- [28] PERRET M, DUFOURNET D. High-voltage interrupter device having combined vacuum and gas interruption [P]. US: 6593538, 2003.
- [29] POHLE M, KRIEGEL M, KRIGER M. Polyphase electrical power distribution network has hybrid circuit breaker with vacuum switching chamber that is designed to cope with comparatively high initial gradients of returning voltage [P]. US: 2003173831, 2003.
- [30] SMEETS R P P, KERTESZ V, DUFOURNET D. Interaction of a vacuum arc with an SF₆ arc in a hybrid circuit breaker during high-current interruption [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2007(35): 933-938.
- [31] 程显, 段雄英, 廖敏夫, 等. 混合断路器大电流开断过程中真空电弧与 SF₆ 电弧相互作用的仿真研究 [J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 11519-11526. CHENG Xian, DUAN Xiong-ying, LIAO Min-fu, et al. Simulation study on interaction of vacuum arc and SF₆ arc in hybrid circuit breaker during high-current interruption [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 11519-11526.
- [32] 程显, 段雄英, 廖敏夫, 等. 真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室串联的混合断路器开断容量增益特性分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(3): 201-207. CHENG Xian, DUAN Xiong-ying, LIAO Min-fu, et al. Analysis on breaking capacity gain characteristics of hybrid circuit breaker based on the vacuum interrupter and SF₆ interrupter in series [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(3): 201-207.
- [33] 程显, 廖敏夫, 段雄英, 等. 基于真空灭弧室与 SF₆ 灭弧室串联的混合断路器动态介质恢复特性研究 [J]. 电力设备自动化, 2012, 32(5): 68-73. CHENG Xian, LIAO Min-fu, DUAN Xiong-ying, et al. Study on dynamic dielectric recovery characteristics of hybrid circuit breaker based on the vacuum interrupter and SF₆ interrupter in series [J]. Electric Power Equipment Automation, 2012, 32(5): 68-73.

程显(1982—)男, 讲师, 博士生, 现主要从事智能化高压电器及高电压新技术研究, 着重研究混合断路器技术、多断口真空开关技术。

廖敏夫(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 现主要从事智能化高压电器及高电压新技术的研究, 着重研究多断口真空开关技术、真空触发开关技术。

葛国伟(1987—), 男, 硕士生, 从事开关电源设计。

段雄英(1974—), 女, 副教授, 博士生导师, 现主要从事电力设备在线检测与绝缘诊断、高电压新技术及其应用、数字变电站技术的研究。

邹积岩(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 现主要从事智能化高压电器及高电压技术的研究。

简讯

“十二五”分布式光伏发电有望达 1 000 万 kW

国家应对气候变化战略研究和国际合作中心主任李俊峰昨日在第二届北京国际储能大会上表示, 目前国家发改委和国家能源局正在制定新能源发展规划, “十二五”时期, 我国将大幅度提高风力发电和太阳能发电的分布式发展比例, 例如, 到 2015 年, 太阳能光伏发电装机容量, 仅分布式一项就超过 1 000 万 kW, 2015 年之后, 太阳能发电每年或超 2 000 万 kW, 其中一大部分是分布式太阳能发电。