

面向新型电力系统的电力开关装备技术及应用

荣命哲, 吴益飞, 杨爱军, 孙昊, 肖宇, 杨飞, 吴翊, 王小华

(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 电力开关装备是实现电力能源调度、运行模式转换、各类故障切除的核心装备,是电力系统的安全卫士,一旦开断失败,将导致系统瘫痪甚至大面积设备损毁。电力系统的每次技术变革,电力开关装备都是一大瓶颈。西安交通大学荣命哲创新团队以电力开关装备科技自立自强为目标,在交流开关装备技术、直流开关装备技术、数字化设计及新一代开关装备技术 3 个方面取得了开创性成果。首先,颠覆被动等待电流自然过零开断的传统技术,化被动为主动,提出了电弧零区和电流零点主动调控的交流开断新方法,成功研制出 550 kV/80 kA 双断口断路器及全球首台 31.5 kV/210 kA 环保型发电机快速断路器,解决了超大短路电流开断难题;其次,颠覆必须外加装置强迫电流过零的传统技术,化电弧之害为利,首创电弧能量驱动的直流开断新原理,研制了 4 kV/70 kA 及 10 kV/100 kA 中压直流开关装备,占领了大容量直流开断技术领域国际制高点;最后,开发了多组分放电等离子体基础数据库和电力开关装备数字化设计软件,创建了开关装备数字化设计体系,并基于此研制了国内首台 126 kV 高压无氟环保组合电器及电压等级世界最高的 800 kV 智能开关装备,引领了电力开关装备环保化和智能化发展。面向未来电力系统发展,将继续深耕极端条件下的新型开断机理与数字化技术,致力于提升电力装备的经济性与可靠性,为构建新型电力系统提供坚实的技术支撑。

关键词: 电力开关装备;交流开断;直流开断;数字化设计

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604001 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0001-14

Technology and Application of Power Switching Equipment for Future Power Systems

RONG Mingzhe, WU Yifei, YANG Aijun, SUN Hao, XIAO Yu,

YANG Fei, WU Yi, WANG Xiaohua

(Key Laboratory of Electrical insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Power switching equipment serves as the core apparatus for electricity dispatch, operational mode conversion, and fault clearance, acting as the "safety guardian" of the power system. Its failure could lead to system collapse or widespread equipment damage. In each technological transformation of power systems, power switching equipment has been a critical bottleneck. With the objective of achieving technological independence in power switching equipment, the innovation team led by professor Rong Mingzhe at Xi'an Jiaotong University has made groundbreaking advances in three areas: AC switching equipment technology, DC switching equipment technology, and digital design along with next-generation switching equipment technology. First, by overturning

收稿日期: 2025-09-28。 作者简介: 荣命哲(1963—),男,教授,博士生导师;吴益飞(通信作者),男,教授,博士生导师。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U196602,52025074,52377158)。

网络出版时间: 2026-01-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260105.1014.004>

the traditional passive approach that relies on natural current zero-crossing for interruption, a new AC interruption method was proposed that actively regulates the arc zero-region and current zero-point. This enabled the successful development of a 550 kV/80 kA double-break circuit breaker and the world's first 31.5 kV/210 kA environmentally friendly generator circuit breaker, resolving the challenge of interrupting extremely high short-circuit currents. Second, abandoning the conventional technique that requires external devices to force current zero-crossing, a novel DC interruption principle driven by arc energy was pioneered, turning the harmful effects of arcing into an advantage. This resulted in the development of 4 kV/70 kA and 10 kV/100 kA medium-voltage DC switching equipment, establishing a leading international position in high-capacity DC interruption technology. Finally, a multi-component discharge plasma fundamental database and digital design software for power switching equipment were developed, establishing a digital design system for switching equipment. Based on this, China's first 126 kV high-voltage fluorine-free environmentally friendly gas-insulated switchgear (GIS) and the world's highest-voltage 800 kV intelligent switching equipment were developed, leading the trend toward environmental sustainability and intelligence in power switching equipment. Looking forward to the development of future power systems, further research will be devoted to novel interruption mechanisms under extreme conditions and digital technologies, with the aim of enhancing the economy and reliability of power equipment and providing solid technical support for building the new power system.

Keywords: power switching equipment; AC interruption; DC interruption; digital design; eco-friendly and intelligent development

电力开关装备犹如电力系统的外科医生,是快速切除各类故障“病灶”、防止局部故障扩散成灾难性事故的核心装备,其作用覆盖电力系统发电、输电、配电、用电全部场景。一旦功能丧失,将造成电力设施连锁损毁、系统瘫痪、甚至大停电事故。纵观电力系统的发展历程,每一次重大技术变革都伴随着对电力开关装备更高要求的提出,并成为制约电力系统发展和更新换代的瓶颈。

近年来,随着全球能源结构转型和新能源大规模接入,电力系统在电压等级、容量规模、运行方式等方面发生了深刻变化。这一趋势对电力开关装备在交、直流开关装备及其数字化设计方面提出了前所未有的挑战。

在交流开关装备技术方面,随着一次能源加速变革,导致风电、光伏大规模发电并网,核电、水电机组向百万 kW 迈进、电网短路电流超标治理迫切,然而上述重大工程所需的交流开关装备被国外垄断。面对数百 kV 电压、数百 kA 电流、上百个大气压、数万 K 温度、高海拔等极端服役参数和条件,传统单纯抑制电弧的电力开关装备技术局限于灭弧结构优化、操作机构改进等方面,常规的交流开断技术已无法适应新需求,迫切需要开辟新的技术,满足交流电力开关装备极端参数和极端条件的服役要求。

在直流开关装备方面,直流输电和柔性互联需求的快速增长。目前国际上,直流开断的主流方案为 2012 年 ABB 公司提出的混合式高压直流开断方案,通过电力电子器件实现电流的快速转移与关断。该方案机械开关不燃弧,开断速度快。但随着开断容量需求快速增加,电力电子器件关断能力的短板严重制约了混合式直流开断方案容量的提升。大容量直流开断新技术成为未来直流系统亟待突破的核心难题。

最后,绿色低碳发展要求推动开关装备向环保化方向演进,同时数字化、智能化技术的发展,也为开关装备的设计、运维与管理提供了新机遇。电力开关装备是最复杂的电力装备之一,开断过程电弧等离子体放电强烈、输运过程复杂,难以开展电力开关装备数字化仿真设计,产品设计长期依赖专家经验和试验测试迭代,存在研发成本高、周期长等问题。新型电力系统工况复杂多样,交直流共存,电流电压不断提升,短路开断容量大,要求电力开关产品技术迭代快,传统设计手段无法满足新型电力系统建设的需求。国外西门子、日立能源等企业在电力开关数字化设计上积累了丰富的经验,推出了新一代环保化和智能化开关装备,国内研究还存在一定差距。

针对上述挑战,本文作者荣命哲教授团队 30 余年来从事电力开关装备技术研究,提出了电弧零区和电流零点主动调控的交流开断新方法,首创电弧能量驱动的直流开断新原理,创建了产品数字化设计体系,为我国占领该领域世界制高点做出了突出贡献。

1 交流开关装备技术

一次能源加速变革,导致风电光伏大规模发电并网、核电水电机组向百万 kW 迈进、电网短路电流超标治理迫切,然而上述重大工程所需的交流开关装备被国外垄断。其主要原因在于,随着交流开关装备短路开断电流迅速提升,要求交流开关开断性能不断突破极限,仅靠更改结构方案、提高机构速度等研发方式已无法应对,必须从新的角度探索解决方案。本节从电弧零区主动调控方法、耐烧蚀触头材料、零点主动调控方法 3 个角度,论述提升交流短路开断能力的措施,并给出两个最新的装备研究成果作为典型应用案例。

1.1 电弧零区主动调控方法

电弧电流过零阶段的物理演化过程,是决定断路器能否实现有效开断的核心环节^[1-4]。随着电流幅值由数 kA 逐步衰减至零点,电弧内部能量输入与冷却机制之间的平衡关系不断发生转变,从而导致等离子体输运特性和弧隙介质恢复速率出现显著差异^[5-8]。因此,系统揭示电弧零区能量耗散机制的演化规律,并结合喷口材料烧蚀过程对其进行主动调控,成为提升高压交流断路器开断能力的关键科学问题。

1.1.1 能量耗散机制的演化特征

基于多物理场耦合仿真结果,可以定量刻画电流从 1 000 A 衰减至 0 过程中的能量耗散比例变化,如图 1 所示。结果表明,在大电流阶段(约 1 000 A),电弧能量密度极高,能量主要通过辐射(约 40%)与径向热传导(约 50%)的耦合作用得以耗散,使辐射成为主导冷却机制,而径向导热则保证了弧柱外围能量的持续扩散,形成“辐射-导热双主导”的冷却格局。当电流进一步衰减至 10 A 以下,焦耳热输入几乎完全丧失,辐射贡献相对减弱,而径向导热逐渐恢复主导地位(超过 70%)。在电流接近 1 A 时,径向导热的比例甚至接近 87%,成为零区冷却的决定性机制。最终,在电流完全过零时,径向对流耗散快速增加,弧隙能量主要通过径向热传导和径向对流耗散。这一演化过程揭示了电弧零区冷却的物理本质:冷却机制随电流衰减逐步转移,保证了介质在过零阶段的有效恢复。

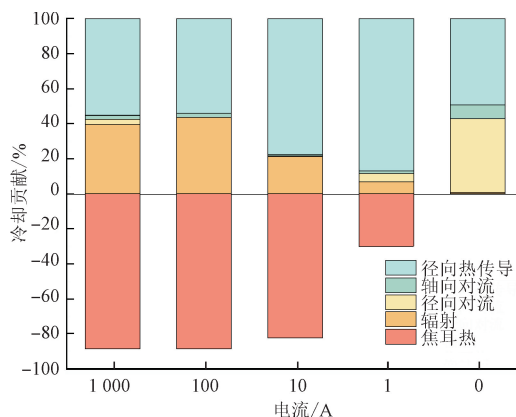


图1 电流衰减至零前各能量耗散机制对电弧温度的相对贡献

Fig.1 Relative contributions of major energy dissipation mechanisms to arc temperature prior to current zero

1.1.2 喷口烧蚀与聚四氟乙烯蒸汽输运建模

在大电流断路器开断中,喷口材料通常采用聚四氟乙烯(PTFE),其烧蚀行为对电弧零区的冷却机制具有重要影响^[9]。电弧高温作用下,PTFE 发生热解和蒸发,生成 CF_2 、C、 F_2 等气相产物,并在电弧区形成高浓度蒸汽羽流^[10]。这些蒸汽一方面通过吸收能量加速弧隙冷却,另一方面改变等离子体输运参数,直接影响电弧电导率与介质恢复特性。

PTFE 蒸汽在电弧区的输运可由对流-扩散方程描述,计算结果如图 2 所示。

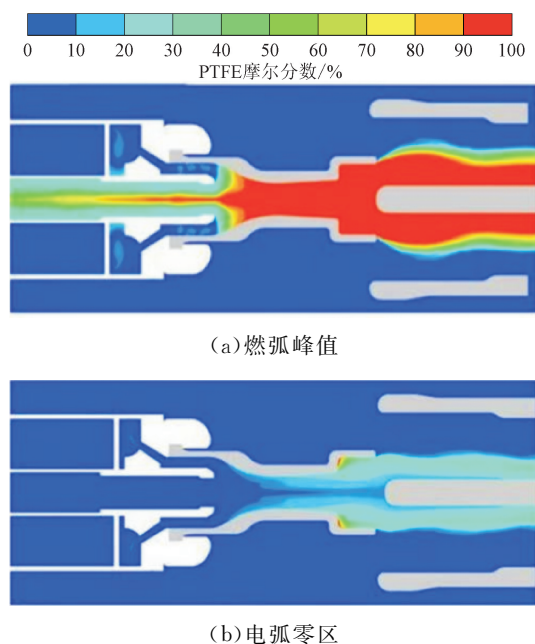


图2 喷口内部 PTFE 烧蚀产物分布示意

Fig.2 Schematic distribution of PTFE ablation products inside the nozzle

由图2可见,在燃弧峰值阶段,喷口烧蚀产生的PTFE蒸汽迅速充满灭弧室,对弧隙气体成分和能量输运产生显著影响。随着电流衰减至零区,尽管蒸汽质量分数有所下降,但残余高温PTFE蒸汽仍存在,持续影响弧隙物性,并对径向导热与气流冷却机制产生间接作用。该结果表明,喷口烧蚀及蒸汽输运过程在零区能量耗散中仍具有重要调控作用。

1.2 耐烧蚀触头新材料

近年来,随着电力系统向更高电压等级发展,开关装备触头也面临更高的抗电弧烧蚀性能需求^[11-15]。石墨烯因其独特的物理特性^[16],成为金属基复合材料性能提升的理想增强相,为了研究石墨烯掺杂铜钨合金材料的抗烧蚀性能,搭建了用于观察电弧烧蚀行为的原位光学诊断平台,并引入R-C放电回路,组成了气体电弧烧蚀行为的诊断实验平台。

铜钨电极及掺杂石墨烯增强相的铜钨电极在常压下SF₆气体介质中,电极材料烧蚀量随电流等级大小变化的情况如图3所示,其中每次的材料烧蚀量为3次重复实验后的平均值。

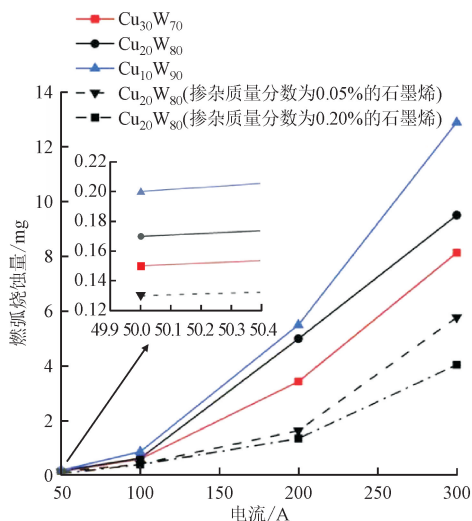


图3 不同电极材料在电流作用下的烧蚀量变化

Fig. 3 Amount of ablation of different electrode materials under the action of electric current changes

在铜钨合金电弧烧蚀行为的研究中,电流强度、钨元素配比及石墨烯掺杂对烧蚀特性的影响呈现显著规律性。实验数据显示,各类铜钨合金电极(涵盖不同钨含量及石墨烯改性样品)的烧蚀量均呈现稳定增长趋势,这源于电弧能量输入与材料损伤程度的正相关关系:高电流条件下,电弧等离子体的能量密度显著增强,推动熔池温度突破钨铜相变临界阈值,诱发更剧烈的蒸发汽化与喷溅损耗。进一步分析表明,钨含量对烧蚀行为具有调控作用:低钨组分

电极因铜比例升高,在相同电流下表现出更高的烧蚀量绝对值与增速,而高钨组分则因钨的高熔点特性抑制了局部过热,烧蚀速率相对较低。

从上述基础规律中发现,石墨烯掺杂带来的差异化影响最为显著。以Cu₂₀W₈₀电极为例,未掺杂样品在50 A电流下烧蚀量为0.17 mg,而掺杂质量分数0.05%石墨烯的改性电极同期烧蚀量减少至0.13 mg;300 A时更从对照组的9.5 mg骤降至5.8 mg降幅约39%,绝对数值与相对比例的双重下降直观体现了石墨烯对全电流区间烧蚀损耗的抑制效果。

1.3 电流零点主动调控新方法

随着百万kW级发电机组的大规模应用,发电机出口短路电流水平及直流分量急剧攀升,传统依赖自然过零的方式已逐渐难以需求。一方面,故障电弧燃弧时间长、电弧能量可达MJ量级,对触头和绝缘系统产生严重烧蚀显著缩短了开关装备寿命;另一方面,传统断路器故障切除时间往往超过60 ms,难以满足快速隔离故障的需求。作者团队提出了电流零点主动调控新方法,发明了真空多断口并联与电流转移限流相结合的断路器新型拓扑结构,提出了基于三相电流故障特征和波形预测的电弧能量主动控制策略,实现了对起弧电流、电弧能量、恢复电压的精准控制,解决了超大电流、高直流分量快速开断难,完成了从不控开断到可控开断的技术跨越。

1.3.1 零点制造及电弧能量主动控制方法

针对百万kW级发电机出口短路故障电流幅值巨大、直流分量高、过零时间不确定的难题,作者团队提出了电流转移、过零与限制一体化的电流注入式断路器新拓扑,如图4所示。断路器拓扑由主支路、转移模块、阻尼模块和辅助支路构成。在检测到故障后,主支路开关分闸并形成电弧,同时转移支路导通,LC振荡注入与系统电流反向的电流,使主支路电流逐步减小直至过零。此后故障电流被引入限流电阻并耗散,辅助真空开关在电流过零时切除残余

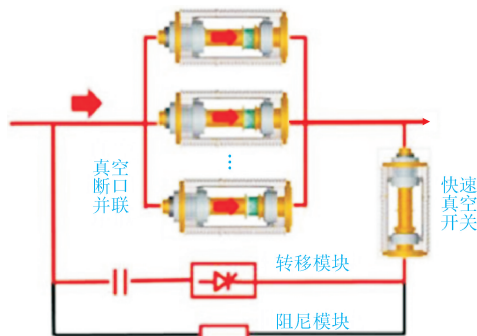


图4 电流主动注入式拓扑结构

Fig. 4 Current active injection topology

余电流,至此完成开断。该方法能在几十 ms 内强迫电流过零,显著缩短燃弧时间,将电弧能量由 MJ 量级降低至 kJ 以下。

上述电流转移式发电机断路器开断对控制精度要求高,为了解决传统相控算法无法应用在发电机短路故障领域的问题,团队提出基于校正决定系数的短路故障判断方法,通过对比实际电流与预测电流波形的拟合程度,能快速准确识别短路故障。同时,结合电流对称系数分析提出相控分闸算法,预测开断的最佳窗口期,实现最优控制。控制系统融合故障判别与相控分闸策略,能够有效适应发电机短路电流幅值大、直流分量高、恢复电压陡峭等苛刻工况。

1.3.2 真空多端口并联均流技术

为了实现大电流的承载能力,断路器采用真空多断口并联结构。传统并联电抗方式能改善均流,但体积大、耗能高,针对此问题团队提出基于循环通道的涡流磁场实现支路电流自均衡的均流方法,如图 5 所示。通过设计电磁屏蔽结构,有效削弱相间磁场耦合,提升三相断路器均流效果,使静态均流系数超过 95%。

针对多断口并联结构在开断时的动态电流分配不均,导致部分断口过载甚至失效问题,适当增加支路自感、优化弧压特性均有助于改善动态均流与过零一致性。此外,稳定阶段的正伏安特性有利于电流分配均衡,基于此,发明了快速操动与杂散参数联合调控的多断口电弧电流转移抑制方法,通过快速操动机构与杂散参数联合调控,可将多断口并联的开断同期性由 ms 级缩短至 μs 级,解决了多断口并联电弧同步开断的难题。

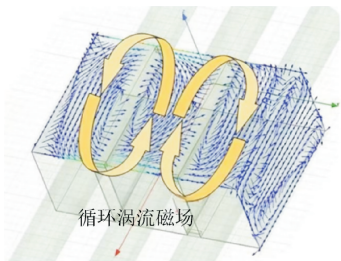


图 5 循环通道涡流磁场均流技术示意图

Fig.5 Circulating channel eddy-current magnetic field current-sharing technology

1.4 典型应用案例

1.4.1 550 kV/80 kA 双断口断路器

随着电网容量攀升和新能源大规模接入,我国 220、330、500、750 kV 乃至 1 000 kV 电网已经全面面临电网短路电流超标问题,而现役的高压交流断

路器开断能力无法满足电网保护要求,成为制约电网容量提升的一大瓶颈,亟需攻克 80 kA 短路开断的技术难题。目前,作者团队联合多方单位,已研制出国际首台 550 kV/80 kA 和 800 kV/80 kA 大容量交流断路器(如图 6 所示),标志着我国打破了 ABB、西门子公司在 80 kA 高压断路器的产品垄断。此类产品的应用无需改变网架结构即可实现短路电流超标治理,是目前解决电网短路电流超标问题最直接简单的方案。



图 6 550 kV/80 kA 断路器

Fig.6 550 kV/80 kA circuit breaker

1.4.2 31.5 kV/210 kA 发电机快速断路器

发电机断路器是保障百万 kW 级发电机组安全运行的核心装备。长期以来,我国在该领域缺乏自主技术,市场完全依赖于日立能源等国外厂商的 SF₆ 产品,制约了大型核电、水电等重大工程建设。作者团队成功研发全球首台 31.5 kV/210 kA 环保型发电机快速断路器成套装置,如图 7 所示。该产品采用真空灭弧替代 SF₆ 气体灭弧,且故障切除时间缩短约 50%,显著提升了断路器的开断能力与可靠性。

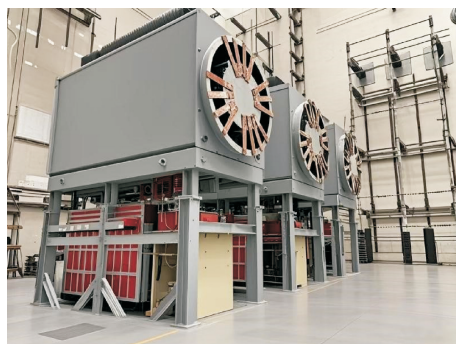


图 7 31.5 kV/210 kA 发电机快速断路器成套装置样机

Fig.7 31.5 kV/210 kA generator fast circuit breaker prototype equipment

2 直流开断关键技术

直流电力系统占地面积小、线路损耗低,已成为舰船某系统升级换代、新能源城市电网、特高压远距离输电等重大工程的必然选择。然而,直流电流无自然过零点、要求故障切除时间短,直流开断被国际电工权威组织 CIGRE 认为是世界挑战。本节从空气式开断和电流转移式开断两种主流技术路线展开分析。

2.1 舰船用大容量直流开断技术研究

舰船用空气式直流断路器的典型结构如图 8 所示,包含触头系统、灭弧室和机械驱动模块,其电流开断过程包括触头分闸产生电弧、电弧沿跑弧道运动、电弧在灭弧室中切割几个过程。故障开断时,电弧受到气流场和磁场的共同驱动从触头区域进入灭弧系统,使电弧被充分拉长并被栅片切割,在增大近极压降的同时冷却电弧,从而将电弧电压提升至数百 V 至数千 kV。空气式直流断路器具有工作可靠性高,短路电流分断能力大(可达百 kA),并且成本相对较低的优势。

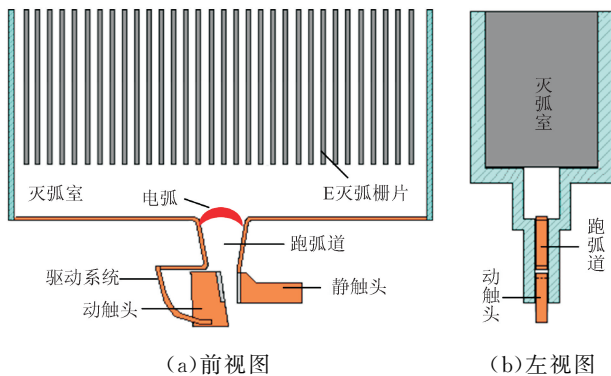


图 8 空气式直流断路器典型结构图
Fig. 8 Schematic of arc circuit breaker

然而,由于舰船直流供电系统短路电流峰值高,开断速度快,导致大容量直流开断电弧调控极其困难。针对上述困难,作者团队对直流空气断路器中的电弧运动特性、灭弧室栅片设计、器壁烧蚀及金属蒸汽对电弧影响等问题开展了系列研究^[17-23],在此基础上发明了自能式气吹和自能式磁吹相结合的直流电弧调控方法及具有循环气流通道的电弧电压励磁单元的灭弧室新结构,如图 8 所示。一方面,利用电弧自身能量加热气体,实现自能式循环气流加速电弧运动和能量耗散;另一方面,利用电弧电压激励线圈磁场吹弧,实现自能式磁场吹弧,进而加速电弧跑弧和切割。在此基础上,研制了 4 kV

直流样机,其分断能力达到 70 kA,如图 9 所示。通过德国 IPH 试验站权威检测,分断容量比国际最先进的产品提高了近 1 倍,为当时世界同类产品最高指标。



图 9 空气式直流断路器样机
Fig. 9 Prototype of air-type DC circuit breaker

2.2 电弧电压增强的电流零点制造新方法

由于空气介质本身绝缘耐压能力的限制,单个灭弧室电压等级较低,空气灭弧室直流断路器通常应用于 5 kV 及以下的直流配用电系统。因此,对于 10 kV 及以上的直流电力系统,通常采用基于电流转移的直流开断方法。传统机械式人工过零或依靠电力电子强制过零的方案,必须采用外加装置,成本高、体积大,无法规模化推广应用,成为制约中高压直流电力系统发展的一大瓶颈问题。

2.2.1 传统混合式开断方法

2012 年 11 月 ABB 公司研制出基于 IGBT 器件直接串联的混合式直流断路器,其拓扑结构如图 10 所示,其额定电压 80 kV,额定电流 2 kA,最大开断电流 9 kA,开断时间 5 ms,并通过了试验验证^[24]。

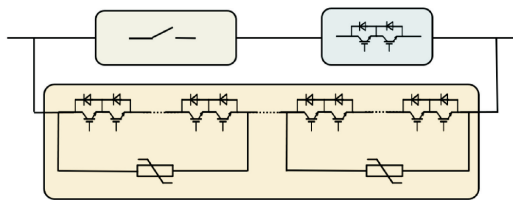
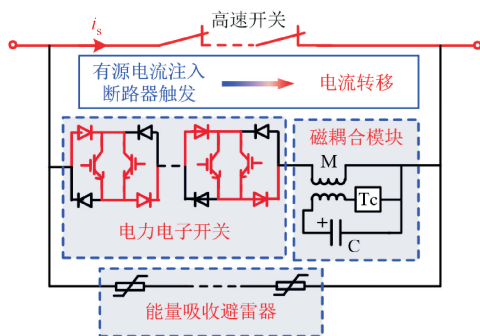


图 10 ABB 所提出混合式直流断路器拓扑结构^[24]
Fig. 10 Topology of hybrid DC circuit breaker proposed by ABB

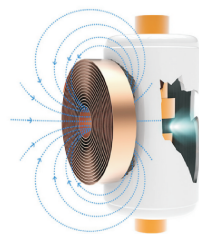
清华大学、西安交通大学等单位进一步提出了磁耦合型混合式开断方案,通过磁耦合模块产生的负压实现电流快速转移,优化主电流支路的辅助固态开关,大幅降低了断路器导通损耗^[25-28]。基于该方案开发了 500 kV 混合式直流断路器样机,其拓扑图如图 11 所示。该断路器开断能力达 26 kA,目前已应用于张北四端柔性直流电网工程。

图 11 磁耦合-电力电子直流断路器拓扑图^[25]Fig. 11 Topology of magnetically coupled-power electronic DC circuit breaker^[25]

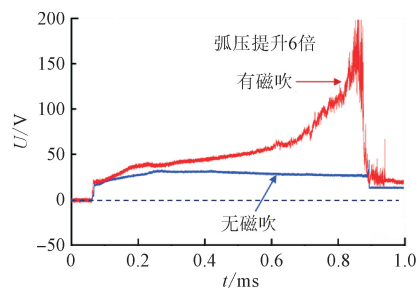
2.2.2 弧压增强直流开断方案

为解决传统的混合式直流开断方案电流转移必须依赖辅助模块、成本高等难题,作者团队发明了弧压增强电流转移新方法,如图 12 所示,通过外置磁场驱动真空电弧快速运动,数百 μs 内电弧电压可以提升至普通断口的 6 倍以上,进而实现电流快速转移^[29-33]。基于弧压增强真空断口,进一步提出了弧压增强式直流开断新方案与磁控振荡式直流开断新方案。

(1)弧压增强混合式直流开断技术。对于弧压增强式直流开断方案,采用外部横向磁场(ETMF)驱动真空电弧运动,以提高电弧电压实现电流从主断口支路向电力电子转移支路的换流,代替了传统的 LCS,实现了低导通损耗和低成本,同时缩短电流转移和开断时间。



(a) 真空断口示意图

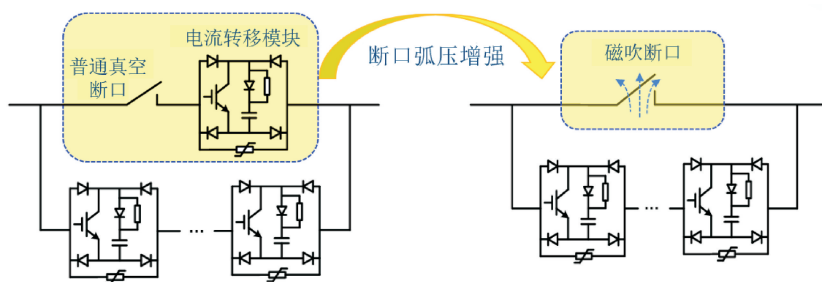


(b) 电弧电压波形

图 12 横磁弧压增强真空断口及电弧电压波形图

Fig. 12 ETMF-enhanced vacuum interrupter

图 13 为提出的基于外加横向磁场的电力电子转移方案拓扑^[26],主要由弧压增强真空断口与并联电力电子开断支路,当系统发生故障时,快速机械开关分闸产生电弧,在外部横磁的作用下,电弧被快速拉长,电弧电压迅速升高,驱使故障电流从主支路快速转移至电力电子支路,最后由电力电子器件主动关断故障电流。



(a) 传统混合式开断拓扑

(b) 弧压增强式开断拓扑

图 13 弧压增强式开断拓扑与传统混合式拓扑对比

Fig. 13 Topology of ETMF-enhanced DC hybrid circuit breaker

基于上述拓扑图,西安交通大学开发了一种基于外部横向磁场的混合式断路器样机。根据实验结果,所提出的新型混合式直流断路器可以在 2 ms 内实现 10 kV/15 kA 的故障电流开断。该方案颠覆了必须外加电力电子装置强迫电流过零等传统技术,数百 μs 内弧压提升 6 倍,故障切除时间

缩短 33%。

(2)磁控振荡式直流开断方案。弧压增强真空断口的电弧电压同时拥有幅值高和高频振荡两个特性。针对电弧电压振荡特性,作者团队进一步提出了磁控振荡式直流开断方案,如图 14 所示,整个断路器包括 3 条支路,即通流支路,由真空开关

组成;谐振支路,由电容、电感组成;耗能支路,由氧化锌避雷器组成^[29]。该直流开断方案避免了电力电子器件的大量使用,极大的降低了直流断路器成本。

该方案通过对真空电弧施加外部横向磁场,引起真空电弧电压的升高和高频振荡,通过对谐振支路参数进行合理优化,促使故障电流在真空断口与谐振支路之间发生高频谐振,并最终完成故障电流的转移开断。

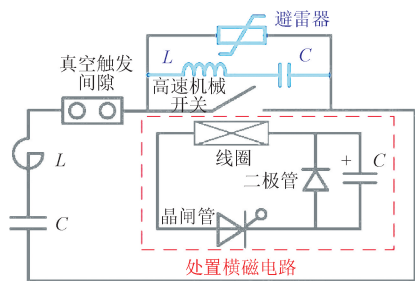


图 14 横磁弧压增强振荡式直流断路器拓扑

Fig. 14 Topology of ETMF-enhanced oscillating DC circuit breaker

整个开断过程为:真空断口分闸,产生真空电弧;当真空断口触头开距达到一定值时,真空电弧在外加横磁场的作用下,电弧电压迅速升高,推动故障电流在真空断口与谐振支路之间发生谐振,且谐振电流幅值逐渐增大;真空断口电流过零,真空电弧熄灭,谐振电容电压逐渐升高至故障电流完全流入耗能支路。

基于上述原理,开发了 10 kV、35 kV 磁控振荡式断路器样机。该方案在满足电流开断需求的基础上大幅降低了成本与体积,为未来经济型直流断路器装备的开发提供崭新的技术思路。

2.3 直流开关装备开发及示范应用

面向新能源并网、城市直流配电等国家重大需求,与西安西电高压开关有限责任公司、平高集团有限公司、国网江苏电科院等单位合作,开发了 10 kV、35 kV 系列直流断路器装备,并通过了第三方权威检测机构的型式试验。

所开发的 10 kV 直流断路器装备,在国网江苏直流配电示范工程设备招标中,获得广泛认可并成功夺标,在国内外率先实现了 10 kV 直流断路器在城市直流电网的批量应用,支撑了如图 15 所示城市直流配电系统的建设。

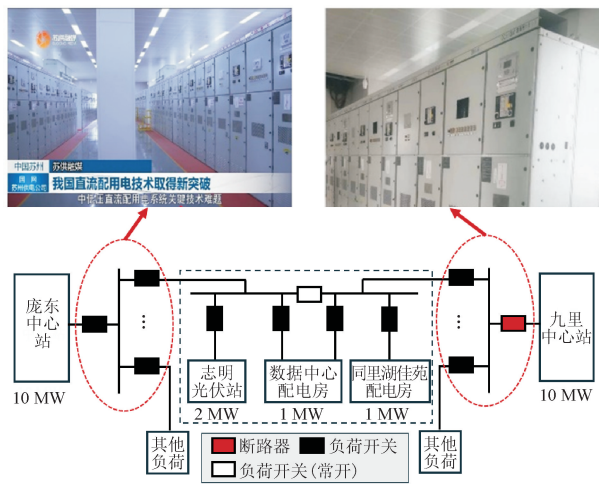


图 15 苏州直流配电示范工程应用

Fig. 15 Application of DC circuit breakers in Suzhou MVDC demonstration project

3 数字化设计及新一代电力开关装备

SF₆ 因其优异的灭弧和绝缘能力在 110 kV 以上的高压开关设备中起着不可替代的作用,但是温室效应严重。逐步减少 SF₆ 使用和排放已迫在眉睫,开展电力开关 SF₆ 环保替代研究势在必行。电磁热力等多重因素作用下,操作机构、灭弧室、绝缘子等关键部件的机械性能和电气性能会逐渐劣化,严重时会导致拒分、拒合、误分和误合,进而引发停电和电气设备损坏等事故。因此,推动电力开关由计划性维护为主转变为基于设备状态精准感知的预测性维护为主,是电力开关装备智能化的必然趋势。新型电力系统对电力开关装备环保化和智能化的需求迫切,基于物理到数字映射的数字化设计,是新一代开关装备发展的核心引擎。

3.1 电力开关数字化设计

电力开关数字化设计主要包括温升、绝缘、开断等,其中开断设计是最复杂、最关键的。所以,对电力开关开断过程中电弧等离子体进行仿真计算,是实现其数字化设计的前提。目前,基于磁流体动力学模型的电弧数值计算是开关电弧仿真研究的重要手段。电弧等离子体基础参数是建立磁流体动力学模型,并对电弧进行可靠数值仿真的先决条件;电磁-热-力-流多物理场耦合计算中的数据高速交互,是实现电弧快速仿真计算的基础。然而,已有等离子体数据库中缺乏电弧等离子体核心基础参数,已有多物理场耦合工具软件 MpCCI 难以实现电磁场和流场之间的数据高速交互,导致电力开关电弧等离子体算不准、算得慢。

3.1.1 电弧等离子体基础参数计算

电弧等离子体基础参数主要包括粒子组分、热力学参数(质量密度、比焓、比定压热容等)、动力学输运系数(电导率、黏性系数、热导率、混合扩散系数等)、辐射系数等。

粒子组分是其他基础参数计算的第一步。Saha 方程被最早用于计算高温稀有气体等离子体的粒子组分^[34],但 Saha 方程不能描述非气态粒子的相变,因而也就无法处理多相态电弧的组分计算问题。随后发展的 Gibbs 自由能最小化方法克服了这一缺陷^[35],使得多相粒子组分计算成为可能。考虑到 SF₆ 电弧中可能混入来自触头烧蚀或喷口烧蚀产生的杂质,Chervy 等^[36]、Coufal 等^[37]在研究 SF₆ 电弧等离子体时,将铜蒸气和 PTFE 蒸气对 SF₆ 电弧粒子组分的影响考虑进来。然而,上述计算均未考虑非气态相粒子的存在,这种忽略在纯 SF₆ 电弧中是合理的,但是一旦有金属蒸气掺杂进来,在高温电弧逐步恢复到室温的情况下,就会出现非气态粒子。鉴于此,团队提出了考虑非气态粒子的多相态电弧等离子体粒子组分计算方法^[38-39],获得了 SF₆-Cu、CO₂-Cu 等不同体系的粒子组分。

在获得粒子组分的基础上,根据标准热力学函数的定义可以直接计算统计热力学参数。不过,上述计算的前提是电弧等离子体符合理想气体状态方程。然而,电弧等离子体中有大量的带电粒子,带电粒子之间通过库仑力相互作用,使得理想气体状态方程在一定程度上出现偏差,这种现象被称为 Debye-Hückel 效应。鉴于此,团队提出了考虑 Debye-Hückel 效应的电弧等离子体统计热力学计算方法,研究显示该效应对比热的影响要大于对其他热力学参数的影响,且该影响随气压的升高显著增大。

输运系数包含电导率、粘性系数、热导率、混合扩散系数等,用于描述粒子的质量、动量及能量输运过程。微观粒子的输运由粒子的随机运动及碰撞完成,通常由 Boltzmann 方程来描述。该方程是一个复杂的多重微积分方程,直接求解相当困难。Chapman-Enskog 理论对平衡态条件下的方程求解提供了思路,即通过 Sonine 多项式展开来近似获得输运系数的表达式^[40]。在 Chapman-Enskog 理论中,描述粒子间相互作用的碰撞积分是所有输运系数求解的前提。碰撞积分由粒子间的相互作用势积分得到,因此作用势函数的精度决定了碰撞积分的准确度。团队使用唯象作用势描述中性粒子之间以及中性粒子与离子之间的相互作用,建立了 SF₆-

Cu、CO₂-Cu 等考虑非气态相粒子的电弧等离子体输运系统计算模型,首次获得了 SF₆-Cu 电弧的 4 种混合扩散系数^[41],部分计算结果见图 16。

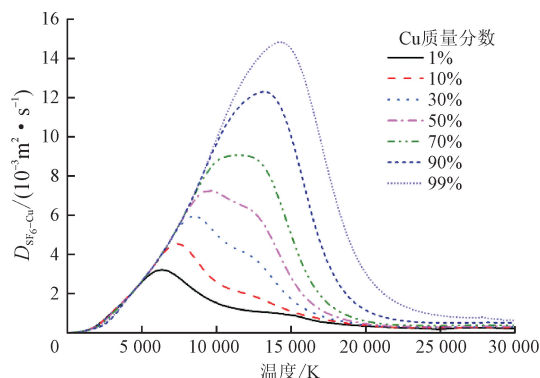


图 16 SF₆-Cu 电弧等离子体在 1 个大气压下的混合扩散系数

Fig. 16 Combined diffusion coefficients of SF₆-Cu mixtures at 1 bar

辐射是电弧等离子体中能量输运的关键过程。净辐射模型被广泛用于开关电弧数值模拟。在净辐射模型中,辐射损耗的估计被最终归结为净辐射系数(NEC)的计算。净辐射系数的计算主要包含 2 个部分,即线状谱吸收系数和连续谱吸收系数的计算。平均辐射吸收系数计算,将辐射波长划分为若干个波长群,在每个群里把所有光子都当作完全一样,即假设这些光子具有平均性质。以往学者研究过程中,为了简化计算,辐射输运计算模型一般只考虑原子及其离子的各类谱线。鉴于此,作者团队充分考虑分子带状谱和分子连续谱的影响,建立了考虑金属蒸气的电弧等离子体辐射系数计算模型,能够较好地反映低温区间分子辐射对电弧辐射输运过程的贡献,计算结果见图 17。

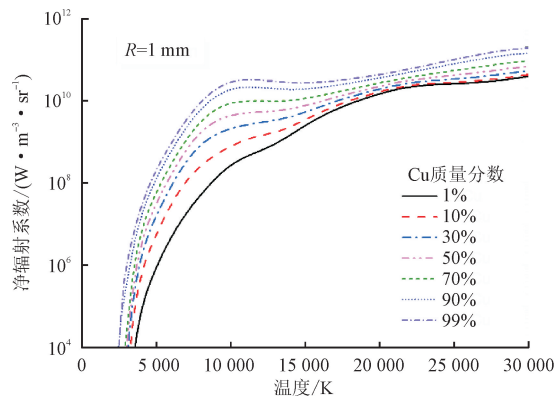


图 17 SF₆-Cu 电弧等离子体的净辐射系数
(1 bar, 电弧半径 1 mm)

Fig. 17 Net emission coefficients of SF₆-Cu mixtures
(1 bar, arc radius=1 mm)

3.1.2 开关电弧仿真计算

开关电弧是电力开关开断过程中的特有现象,从宏观上看是一团有粘性、可压缩、且伴有激波和湍流的跨音速磁流体,受气流场、温度场、压力场、电场和磁场的共同作用。开关电弧仿真计算是电力开关从经验设计到数字化设计跨域的最关键环节。磁流体动力学是研究等离子体导电流体与电磁场相互作用的理论。该理论将流体力学与 Maxwell 电磁场理论相结合,通过耦合 Navier-Stokes 流体方程组和 Maxwell 电磁场方程组来建立等离子体磁流体模型,是目前研究开关电弧的最成熟仿真手段。

基于以上理论,团队自主开发开发了开关电弧仿真专用软件模块,具体包括流体计算模块、电磁计算模块和网格数据传递模块。流体计算模块和电磁计算模块之间的网格映射与数据传递,通过自主编程实现。具体流程如图 18 所示。

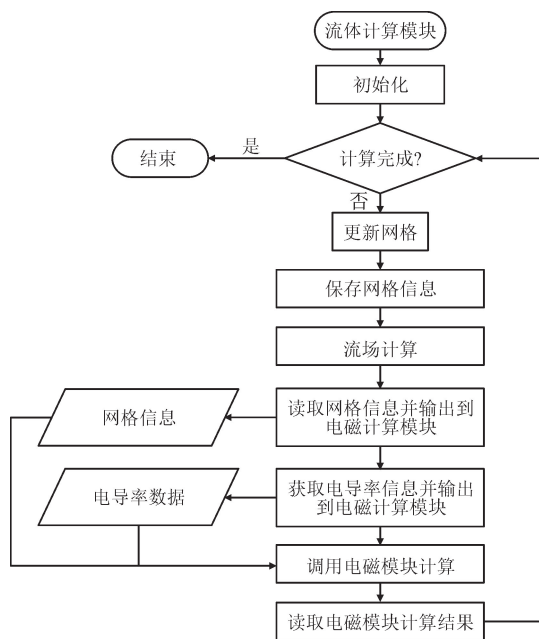


图 18 开关电弧仿真计算流程

Fig. 18 Calculation process of switching arc

在以前的许多仿真工作中,为了简化计算,往往假设触头是静止的,且不考虑烧蚀产生的金属蒸气对电弧特性的影响。团队建立了考虑触头运动和栅片烧蚀三维空气电弧运动及栅片切割数学模型^[42-43],研究了触头运动如何影响电弧运动,以及金属蒸气的存在改变了等离子体热力学参数和输运参数后对电弧行为及特性产生的影响,具体仿真结果见图 19。

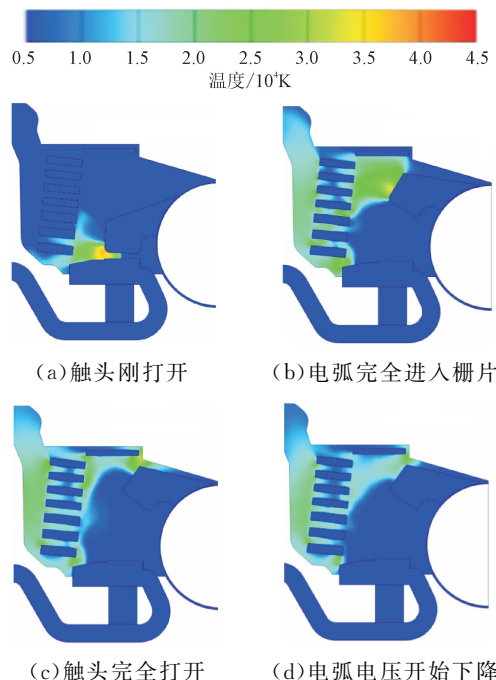


图 19 低压塑壳断路器开断过程中电弧分布分布

Fig. 19 Arc temperature distribution during the breaking process of a low voltage circuit breaker

3.2 新一代电力开关装备研发

3.2.1 环保电力开关装备

从 2015 年起,西安交大与平高集团建立联合攻关团队,采用自主研制的 126 kV 单断口真空灭弧室作为开断单元,将 CO_2 作为 GIS 整体绝缘与隔离、接地开关的单一开断介质,形成环保型 GIS 整体设计方案。通过团队提出的电力开关装备数字化设计方法,对 126 kV 环保型 GIS 的电场、温度场和力学特性进行了优化设计^[44],完成了国内首台 126 kV 无氟环保型 GIS 的研制(如图 20 所示),打破了国外巨头西门子公司的垄断。2022 年 1 月在国内首个高压无氟环保型 GIS 示范项目——河南思德 110 kV 变电站成功投运,并连续无故障运行至今。



图 20 126 kV 无氟环保型 GIS 示范应用

Fig. 20 Demonstration project of 126 kV fluorine-free and environmentally friendly GIS

3.2.2 智能电力开关装备

状态劣化规律是开关智能化的基础,以往研究主要通过实验获取,成本高且周期极长。团队基于前文建立的高压开关电弧仿真模型,提出了基于弧触头单独接触行程的高压开关设备电寿命预测方法,解决了高压开关设备电寿命在线评估的难题;还建立了高压开关操作机构虚拟样机模型,获得了机械特性劣化规律获取难题,实现了机械状态表征曲线的参数化描述^[45],解决了高压开关设备在线机械寿命预测难题^[46]。该成果应用于平高集团、西电集团等行业龙头企业,开发了126~800 kV系列智能高压开关装备,其中800 kV智能开关,电压世界最高,应用于全球首座750 kV智能变电站(陕西洛川),如图21所示。



图21 800 kV智能高压开关示范应用

Fig. 21 Demonstration project of 800 kV intelligent high-voltage switch

4 结 论

面向新型电力系统发展对电力开关装备提出的需求和挑战,在极端条件交流开断技术、大容量直流开断技术、电力开关装备数字化设计及智能环保开关装备3个方面开展了系列研究工作:

(1)在交流开断方面,颠覆了传统被动等待过零的技术,提出电弧零区和电流零点主动调控新方法,成功研制出550 kV/80 kA双断口断路器及全球首台31.5 kV/210 kA环保型发电机快速断路器,解决了超大短路电流开断难题;

(2)在直流开断领域,提出电弧能量驱动开断新原理,调控空气电弧提升电压,攻克了无自然过零点难题,研制出4 kV/70 kA直流开关装备,发明弧压增强真空断口,驱动电流快速转移,研制出10 kV/100 kA直流开关装备;

(3)在数字化设计与新一代装备领域,创建了多

组分放电等离子体数据库及数字化设计体系,建立了电弧等离子体输运系统计算模型,支撑了国内首台126 kV无氟环保GIS及世界最高电压800 kV智能开关的研制。

5 展 望

未来新型电力系统将朝着更环保、更经济、更智能的方向发展,对电力开关装备将提出更大的挑战。在交流开关装备方面,交流开断技术将进一步向着大容量、环保化、快速化方向发展,各类高低压交流开关装备核心指标会不断突破性能极限,相关技术和理论会不断迈入无人区,未来在持续革新现有开断技术的前提下,需要开辟新的开断技术原理,而且对核心部件材料的研究也将成为核心难点。在直流开关装备方面,随着直流配用电系统推广,对直流断路器的成本控制提出了更高要求。未来亟需突破现有的电流转移技术瓶颈,显著降低断路器的成本与体积,为实现大规模应用提供关键的装备支撑。在电力开关装备数字化设计方面,随着人工智能技术的发展,未来亟需突破数据和机理双驱动的电力开关装备数字孪生技术,显著降低设计周期、提高设计精度。

参考文献:

- [1] NAKANO Y, TANAKA Y, ISHIJIMA T. Experimental and numerical study on polymer ablated arc characteristics with one side flow outlet model [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2024, 44(2): 739-754.
- [2] ZHOU Yunhong, CHEN Zenan, HUANG Yinfang, et al. Modeling and analysis of breaking arc for AC air circuit breakers in high-altitude environment [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(8): 3257-3269.
- [3] ZOU Huancheng, LIN Xin, ZHONG Jianying, et al. Research on the airflow field and interruption performance of 550 kV fast circuit breaker [J]. Physica Scripta, 2024, 99(10): 105603.
- [4] GUO Ze, HAN Weimeng, GUO Zixu, et al. Simulation of auto-expansion high voltage SF₆ circuit breaker breaking process considering valve motion [J]. AIP Advances, 2024, 14(9): 095017.
- [5] TUMA D T. A comparison of the behavior of SF₆ and N₂ blast arcs around current zero [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(6): 2129-2137.

- [6] SCHADE E, RAGALLER K. Dielectric recovery of an axially blown SF_6 -arc after current zero: part I experimental investigations [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1982, 10(3): 141-153.
- [7] UHRLANDT D. Diagnostics of metal inert gas and metal active gas welding processes [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(31): 313001.
- [8] ZHANG Kaiyuan, YAO Sili, WU Yi, et al. A method for analysing and characterizing the arc cooling effect of different gases in strong axial flow with SF_6 and air as examples [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(2): 740-750.
- [9] SATO M, YOKOMIZU Y, HORINOUCI K, et al. Calculation method of gas-pressure rising process in puffer chamber of high-voltage SF_6 circuit-breaker [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2021, 214(2): e23291.
- [10] FU Yuwei, WANG Xiaohua, WANG Xinxin, et al. The decomposition pathways of SF_6 in the presence of organic insulator vapors [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2020, 40(2): 449-467.
- [11] 傅中, 陈维江, 李志兵, 等. 大容量电容器组用断路器弧触头侵蚀状态的评价方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(20): 5668-5677.
FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Assessment method of arcing contacts erosion condition of circuit breakers used for large capacity capacitor banks [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(20): 5668-5677.
- [12] 贺小瑞, 韩金儒, 刘伟, 等. 高压断路器用 CuW 触头材料研究进展 [J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 63-76.
HE Xiaorui, HAN Jinru, LIU Wei, et al. Research progress on CuW contact materials for high voltage circuit breakers [J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(8): 63-76.
- [13] 吴细秀, 狄美华, 李震彪, 等. 电触头侵蚀研究概述 [J]. *低压电器*, 2003(5): 6-11.
WU Xixiu, DI Meihua, LI Zhenbiao, et al. A review on the development of electrode erosion [J]. *Low Voltage Apparatus*, 2003(5): 6-11.
- [14] 王珩, 李素华, 刘立强, 等. CuW 电触头材料研究综述 [J]. *电工材料*, 2014(5): 11-17.
WANG Hang, LI Suhua, LIU Liqiang, et al. Research review on CuW electrical contact materials [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2014(5): 11-17.
- [15] 吴佳玮, 韩若愚, 丁卫东, 等. 长寿命铜钨合金气体开关电极的烧蚀形貌 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(8): 2465-2479.
WU Jiawei, HAN Ruoyu, DING Weidong, et al. Surface morphology of Cu-W alloy electrodes in a long lifetime gas spark switch [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(8): 2465-2479.
- [16] MOROZOV S V, NOVOSELOV K S, KATSNELSON M I, et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 016602.
- [17] YANG Fei, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Numerical analysis of the influence of splitter-plate erosion on an air arc in the quenching chamber of a low-voltage circuit breaker [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2010, 43(43): 434011.
- [18] YANG Fei, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Simulation of arc splitting process considering splitter-plate erosion [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(11): 2862-2863.
- [19] YANG Fei, WU Yi, RONG Mingzhe, et al. Low-voltage circuit breaker arcs—simulation and measurements [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2013, 46(27): 273001.
- [20] WU Yi, RONG Mingzhe, YANG Fei, et al. Numerical modeling of arc root transfer during contact opening in a low-voltage air circuit breaker [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1074-1075.
- [21] RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi, et al. Simulation of arc characteristics in miniature circuit breaker [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(9): 2306-2311.
- [22] WU Yi, RONG Mingzhe, LI Xingwen, et al. Numerical analysis of the effect of the chamber width and outlet area on the motion of an air arc plasma [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2831-2837.
- [23] RONG Mingzhe, MA Qiang, WU Yi, et al. The influence of electrode erosion on the air arc in a low-voltage circuit breaker [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(2): 023308.
- [24] SHUKLA A, DEMETRIADES G D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 627-641.
- [25] WU Yi, HU Yang, WU Yifei, et al. Investigation of an active current injection DC circuit breaker based on a magnetic induction current commutation module [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(4): 1809-1817.

- [26] WU Yifei, WU Yi, YANG Fei, et al. A novel current injection DC circuit breaker integrating current commutation and energy dissipation [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2861-2869.
- [27] YI Qiang, YANG Fei, ZHUANG Weibin, et al. Transient current balancing of parallel IGCTs in 10-kV/10-kA hybrid DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10055-10065.
- [28] XIAO Yu, WU Yifei, WU Yi, et al. High-capacity MVDC interruption based on IGCT current sharing integrated with freewheeling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10982-10991.
- [29] XIAO Yu, WU Yi, WU Yifei, et al. Study on the dielectric recovery strength of vacuum interrupter in MVDC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7158-7166.
- [30] WU Yifei, DONG Shaolun, XIAO Yu, et al. Research on dielectric recovery characteristic after large capacity DC interruption [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 3420-3423.
- [31] WU Yifei, XIAO Yu, WU Yi, et al. Hybrid MVDC circuit breaker based on enhanced arc voltage of vacuum interrupter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4776-4785.
- [32] ZHUANG Weibin, RONG Mingzhe, WU Yifei, et al. A novel DC circuit breaker with counter-current injection and IGCT combined [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3451-3461.
- [33] XIAO Yu, WU Yi, WU Yifei, et al. A passive oscillation DC breaking scheme based on enhanced vacuum interrupter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7344-7353.
- [34] CHOWDHURY S S. The composition of an argon plasma in Saha equilibrium [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1969, 9(1): 129-135.
- [35] ERIKSSON G, HACK K. ChemSage: a computer program for the calculation of complex chemical equilibria [J]. Metallurgical Transactions: B, 1990, 21(6): 1013-1023.
- [36] CHERVY B, GLEIZES A, RAZAFINIMANANA M. Thermodynamic properties and transport coefficients in SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300-30000 K and pressures of 0.1—1 MPa [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1994, 27(6): 1193-1206.
- [37] COUFAL O. Composition and thermodynamic properties of SF₆-C-(C₂F₄)_n-CaF₂-Cu-W reacting mixtures [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1998, 31(16): 2025-2039.
- [38] RONG Mingzhe, ZHONG Linlin, CRESSAULT Y, et al. Thermophysical properties of SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300 ~ 30 000 K and pressures of 0.01~1.0 MPa: part 1 Equilibrium compositions and thermodynamic properties considering condensed phases [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2014, 47(49): 495202.
- [39] YANG Aijun, LIU Yang, ZHONG Linlin, et al. Thermodynamic properties and transport coefficients of CO₂-Cu thermal plasmas [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(4): 1141-1160.
- [40] WANG Weizong, RONG Mingzhe, YAN J D, et al. Thermophysical properties of nitrogen plasmas under thermal equilibrium and non-equilibrium conditions [J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(11): 113502.
- [41] ZHONG Linlin, WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, et al. Calculation of combined diffusion coefficients in SF₆-Cu mixtures [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(10): 103506.
- [42] 杨飞, 荣命哲, 吴翊, 等. 考虑栅片烧蚀金属蒸气的栅片切割空气电弧仿真与实验研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(5): 055208.
- YANG Fei, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Numerical and experimental study of air arc splitting process considering splitter plate erosion [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 055208.
- [43] 吴翊, 荣命哲, 王小华, 等. 触头打开过程中低压空气电弧等离子体的动态分析 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 12-17.
- WU Yi, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Dynamic analysis of low-voltage air arc plasma during contact opening process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 12-17.
- [44] 纽春萍, 矫璐璐, 王小华, 等. 基于多场耦合的环保型GIS热特性分析 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3765-3772.
- NIU Chunping, JIAO Lulu, WANG Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on Multi-Field coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3765-3772.

- [45] RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, YANG Wu. Mechanical condition recognition of medium-voltage vacuum circuit breaker based on mechanism dynamic features simulation and ANN[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1904-1909.
- [46] 李东妍, 荣命哲, 王婷, 等. 超高压 GIS 剩余寿命评估方法综述 [J]. 高压电器, 2011, 47 (10): 87-92.
- LI Dongyan, RONG Mingzhe, WANG Ting, et al. Review of residual service life estimation methods on extra-high voltage GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 87-92.

(编辑 刘杨 陶晴)

团队介绍:

荣命哲, 入选国家级人才计划, 国家自然科学基金委创新群体带头人, 科技部“973”项目首席科学家, 国家重点研发计划项目负责人。研究成果获国家技术发明二等奖(2016年, 第一完成人), 国家科技进步二等奖 3 项(2023年, 第一完成人; 2008 和 2004 年, 第二完成人), 陕西省技术发明一等奖(2023 年, 第一完成人), 中国产学研合作创新成果奖一等奖(2022 年, 第一完成人), 教育部技术发明一等奖(2017 年, 第一完成人)和教育部自然科学一等奖(2012 年, 第一完成人)等。授权国家发明专利 70 余项, 发表科技论文 400 余篇(SCI 收录 290 余篇)。在本科教学、研究生创新能力与国际化培养方面作出了卓越的贡献, 教学成果获高等教育(本科)国家级教学成果二等奖(2022 年, 第一完成人)、中国学位与研究生教育学会研究生教育成果二等奖(2016 年, 第一完成人), 是西安交通大学研究生教育优秀导师团队负责人。



团队负责人: 荣命哲教授

整个团队现有教授 10 人、副教授 4 人、研究员 1 人、助理教授 3 人、工程师 2 人、科研辅助人员 3 人, 其中国家级人才获得者 8 人(含国外兼职教授 1 名)。团队获西安交通大学研究生教育优秀导师团队, 陕西省“三秦学者”创新团队和陕西省引智示范基地等荣誉称号, 多人在本专业国际机构任职。课题组面向国家重大需求开展科学研究, 主要从事新能源电网接入关键装备技术及应用、基于人工智能和大数据分析的电力装备智能运维、电力设备智能设计与数字孪生技术、等离子体生物电磁技术及应用、微能量收集与无线能量传输技术及应用。



团队合影