

大容量发电机断路器研究进展及展望

杨飞¹, 孙晋茹¹, 刁兆炜¹, 吴益飞¹, 孙昊¹, 吴翊¹, 张晋波^{1,2}, 李刚^{1,2}, 程立³, 荣命哲¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 710077, 西安; 3. 西安西电开关电气有限公司, 710077, 西安)

摘要: 发电机断路器(GCB)作为百万 kW 级发电机组的关键保护设备,对于保障电力系统安全具有重要意义,但其开断技术仍面临短路电流巨大、直流分量衰减缓慢的严峻挑战。针对大容量 GCB,系统地综述了其研究进展。首先,梳理了 GCB 的技术演进路径。压缩空气式 GCB 能够依赖强力气吹,但存在系统庞大、开断速度受限的缺点;气压及自能式结构的 SF₆ 式 GCB 凭借优异灭弧性能成为主流,但面临温室气体环保替代压力;真空式 GCB 具有环保、快速介质恢复和长寿命优势,成为目前重要的发展方向。其次,针对关键技术研究现状,梳理了 SF₆ 断路器中电弧特性仿真、介质恢复提升及气流场优化的相关研究;聚焦于大电流燃弧特性、电弧与电极相互作用及多断口均流机制;系统归纳了通过磁场调控与多断口并联技术攻克大电流开断的真空断路器前沿技术进展。最后,总结指出了大容量 GCB 研发领域中提升单断口开断极限、优化多断口协同控制并发展智能运维技术的未来发展方向,为形成全系列绿色产品、支撑新型电力系统建设提供理论参考与工程指导。

关键词: 发电机断路器;开断技术;电弧特性;介质恢复

中图分类号: TM561 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604002 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0015-14

Research Progress and Prospects of High-Capacity Generator Circuit Breakers

YANG Fei¹, SUN Jinru¹, DIAO Zhaowei¹, WU Yifei¹, SUN Hao¹, WU Yi¹,
ZHANG Jinbo^{1,2}, LI Gang^{1,2}, CHENG Li³, RONG Mingzhe¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Generator circuit breakers (GCB), serving as critical protection equipment for million-kilowatt generating units, are of significant importance for ensuring the safety of power systems. However, their interruption technology still faces severe challenges, including extremely high short-circuit currents and slowly decaying DC components. This paper systematically reviews the research progress of high-capacity GCB. Firstly, the technological evolution path of GCB is outlined. Compressed-air GCB rely on strong gas blast but suffer from disadvantages such as large system size and limited breaking speed. SF₆ GCB with puffer or self-blast designs have become mainstream due to their excellent arc-extinguishing performance, yet they are under pressure for environmentally friendly alternatives because of greenhouse gas concerns. Vacuum

GCB, with advantages such as environmental friendliness, fast dielectric recovery, and long service life, have emerged as a major development direction. Secondly, regarding the current status of key technologies, relevant research on SF₆ circuit breakers—including arc characteristic simulation, dielectric recovery enhancement, and gas flow field optimization—is reviewed. Focus is placed on the arc characteristics under high currents, the interaction between arcs and electrodes, and the current-sharing mechanism in multi-break configurations. Furthermore, the cutting-edge technological advancements in vacuum circuit breakers for overcoming high-current interruption challenges, primarily through magnetic field control and multi-break parallel techniques, are systematically summarized. Finally, future development directions in the field of high-capacity GCB are pointed out, which include enhancing the interruption limit of single breaks, optimizing the coordinated control of multi-break systems, and developing intelligent operation and maintenance technologies. This work aims to provide theoretical reference and engineering guidance for developing a full series of green products and supporting the construction of new power systems.

Keywords: generator circuit breaker; interruption technology; arc characteristics; dielectric recovery

随着我国经济的快速发展,电力需求的持续增长,电力能源结构向高效化、大型化方向演进。2024 年我国总用电量已达 9.8 万亿 kW·h,到 2035 年预计总用电量将达到 13 万亿 kW·h^[1]。然而,2035 年人均用电量仅能达到约 9 100 kW·h,仍只相当于美国 2024 年水平的 70%,这表明我国发电装机容量仍有巨大的提升空间。在此背景下,百万 kW 级大型发电机组凭借其优越的经济性和高效性,已成为新增核电、火电及水电项目的主力机型。这一发展趋势与中国特高压输电网络的快速建设相辅相成,后者为大型能源基地的电力外送提供了关键通道^[2]。白鹤滩水电站的世界首批百万 kW 级水轮发电机组,单机容量达 120 万 kW 的华龙一号三代核电技术,单机容量达 150~160 万 kW 的国家重大科技专项成果,国和一号,均标志着我国电力装备制造水平进入了全新的发展阶段。

发电机断路器(GCB)作为连接发电机与升压变压器的核心保护设备(如图 1 所示),承担着切除母线故障、保护关键电气设备的重要使命^[3]。加装

GCB 可显著提升系统可靠性,既能增强发电机和变压器的保护水平,又能简化厂用电系统结构,同时大幅缩短故障处理时间。因此,该技术已在全球大型电厂中获得广泛应用,也是我国核电机组及大容量火电、水电项目的标准配置。

然而,与常规断路器相比,大容量 GCB 的研发面临以下严峻的技术挑战。①百万 kW 级发电机出口短路电流幅值巨大,可靠开断对灭弧室电弧控制及介质恢复能力要求极高;②发电机出口短路电流含有较高直流分量且衰减缓慢,故障电流存在显著延迟过零现象,难以实现快速切除,且 GCB 开断故障电流过程中,短时间内燃弧能量会累积至 MJ 级,极大增加了开断难度;③封闭腔体内大额定通流及短路电流条件下,断路器的电磁-热-力多物理场耦合复杂,电接触系统性能协同提升困难;④在“双碳”目标背景下,构建以新能源为主体的新型电力系统已成为国家能源发展的核心战略,这对系统中所有关键设备,尤其是承担着核心保护职责的发电机断路器,提出了更高的可靠性、快速性和环保性要求^[4]。然而,现有技术难以同时满足开断容量、速度和环保性的需求,必须通过原理创新和技术突破,才能实现百万 kW 级环保型大容量发电机断路器的自主研制,这已成为开关电器领域的前沿课题。

随着发电机组单机容量的不断提升,发电机断路器的技术演进始终围绕着可靠开断巨大故障电流这一核心使命。从发展历程来看,发电机断路器所

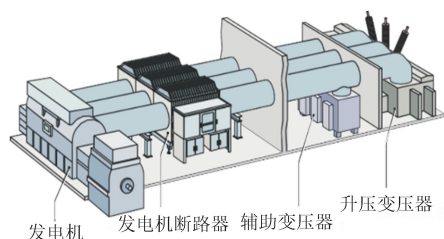


图 1 GCB 在电力系统中的位置

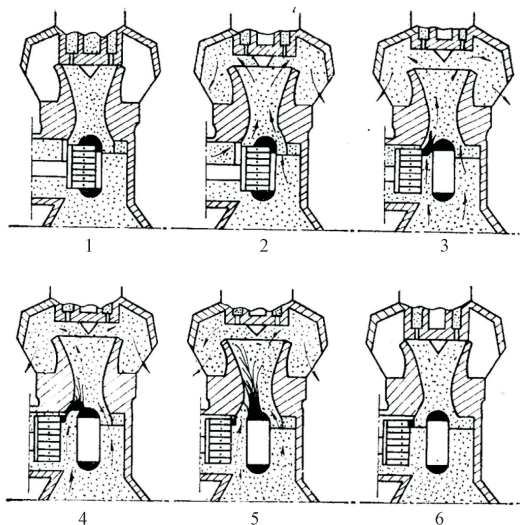
Fig. 1 Position of GCB in the power system

采用的灭弧介质主要包括空气、SF₆和真空等类型,由此也构成了 GCB 的 3 大主要技术路线。这些不同类型的 GCB 在开断原理、结构设计和适用场景上均存在差异。本文针对不同类型发电机断路器,从原理结构、研究工作、产品及应用角度进行综述,最后对大容量发电机开断技术的未来发展提出展望。

1 压缩空气式发电机断路器

1.1 原理及结构

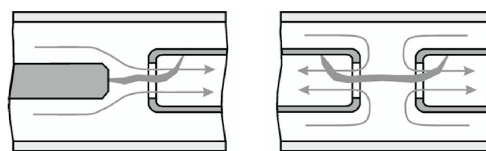
压缩空气式发电机断路器是早期为满足大容量发电机组保护需求而发展起来的重要电力装备。压缩空气断路器的主要原理是利用压缩空气产生高速气流,对电弧进行强烈气吹。该气吹能够有效降低弧柱温度、拉长电弧,从而建立足够的电弧电压,降低直流时间常数,以迫使电流尽快过 0^[5]。以 KW4 系列压缩空气断路器为例,其典型气吹灭弧过程如图 2 所示。根据吹弧方向的不同,压缩空气式断路器可分为横吹式与纵吹式两类。横吹灭弧室中,气流方向与电弧轴向垂直,能够将电弧强制拉长并通过绝缘隔板形成曲折路径,以增加弧长和冷却面积。纵吹灭弧室的气流方向与电弧轴线平行,可进一步细化并冷却电弧,其结构又可细分为单向纵吹和双向纵吹^[6]。这两种类型的导电喷嘴结构如图 3 所示。



1—合闸位置;2—排气阀打开形成稳定气流;3—触头分离产生电弧;4—电弧转移至喷嘴前腔;5—电弧进入喷嘴颈部受到强烈气吹;6—分闸位置。

图 2 KW4 型断路器气吹灭弧过程^[5]

Fig. 2 Arc-quenching process in KW4 puffer circuit breaker^[5]



(a)单向气流喷嘴 (b)双向气流喷嘴

图 3 气吹式断路器中两种类型的导电喷嘴^[6]

Fig. 3 Two types of conductive nozzles in puffer-type circuit breakers^[6]

1.2 研究工作

压缩式空气断路器的研发工作集中在上世纪 40 至 80 年代。相关研究不仅针对发电机断路器,还广泛涵盖了针对输电线路电压等级的高压开断领域。

早期的压缩空气式断路器主要源自欧洲企业的研究成果,研究人员通过改进吹弧装置,不断实现开断能力的提升。Brown Boveri 公司(BBC)和 AEG 公司率先开发了轴向吹弧型装置,并在 11 kV 与 66 kV 等级投入运行,该装置显著改善了开断过程的绝缘恢复速度和操作可靠性^[7]。美国研究者在吸收欧洲经验的基础上指出:原有的设计在大电流开断能力与经济性方面存在不足,无法满足北美电网中高短路容量、高恢复电压上升率的应用需求^[8]。针对此问题,研究者开展了系统性结构改进,提出了横向吹弧型和保压式断路器结构,以提高额定电流与电压等级的上限。Rankin 等^[9]提出在喷嘴下游设置一个带泄压阀的腔室结构,在维持触头间高绝缘强度的同时,确保了通过喷嘴的气流速度不受影响,使得电弧冷却效率提高,实现了更高额定电压(138 kV/1 500 MW)的开断。Bennett 等^[10]进一步在金属铠装开关设备中提出了中等容量的横吹式设计,该方案通过协调气流路径、操作机构与电阻参数,实现了气体用量的节约与紧凑化结构的兼容。进入 20 世纪 50 年代后,压缩空气断路器逐步发展为模块化高压设备。Shores 等^[11-12]报道了 115 kV 至 460 kV 等级的室外型系列产品,其模块化单元式结构显著简化了设备的维护要求,同时,通过独立储气罐布置,提高了灭弧效率与安全性。Cox 等^[13]提出了电阻切换技术,通过在主触头并联电阻,从而有效抑制操作过电压,并能够相对独立地控制断路器的开断容量和喷嘴的电气强度。

在机理研究方面,Jones 等^[14]研究了高电流电弧与气流场的耦合效应,揭示了电弧核心区与边界层压力分布的动态特性,为断路器喷嘴设计与气体

动力优化提供了实验依据。此外, Morita 等^[15]结合 Mayr 模型, 对电流过零点附近的动态电弧行为进行了理论分析, 建立了电弧时间常数与气流边界层参数的定量关系, 为同步空气吹弧型断路器的优化设计提供了理论支撑。

1.3 产品及应用

压缩空气式发电机断路器在历史上曾是发电机出口短路保护的主流方案之一。早在 20 世纪中期, BBC 公司即开发了 DR 型空气 GCB, 其最高额定电压为 36 kV, 最大额定电流为 12~48 kA。其中, 单断口断路器具有附加并联电阻的灭弧室, 能够开断 100~150 kA 的短路电流, 双灭弧室断路器可以开断 200~250 kA 的短路电流。

虽然压缩空气断路器具有开断能力大的优点, 然而, 其灭弧室的绝缘耐受能力相对较低, 开断时间受到触头分闸速度的限制。开断速度虽然能够通过多断口结构的应用得到有效提高, 但多断口串联系统在开断过程中必须确保每个灭弧室都工作在相同的空气动力学和电压条件下, 因此往往需要增加额外均压结构, 并在每个灭弧室中设计单独的吹气阀。此外, 为了保证灭弧效率, 需要配备大功率压缩机以实现足够的空气喷气压力(大于 2 MPa)。以上因素导致的体积庞大、维护复杂和运行成本较高的问题极大地制约了压缩空气式断路器的应用发展。因此, 当结构更简单、紧凑, 故障率更低且维护更方便的 SF₆ 发电机断路器面世后, 便迅速受到市场青睐, 逐步取代了压缩空气式断路器在大容量发电机组中的主流地位。如今, 压缩空气式断路器在大型发电机组中已很少使用, 主要作为技术发展历程中的重要阶段以及特殊工况下的备选方案被提及和研究。

2 SF₆ 式发电机断路器

强电负性 SF₆ 气体具有优异的绝缘性能和灭弧能力, 并且化学稳定性好、安全不易燃。采用 SF₆ 气体能够大幅提升弧后介质恢复强度, 因而, 在断路器中被广泛使用。SF₆ 型发电机断路器以 SF₆ 作为灭弧和绝缘介质, 通过断口喷嘴处的气吹作用熄灭电弧, 自 20 世纪 70 年代末 SF₆ 型发电机断路器问世后, 迅速取代了压缩空气技术, 成为大容量 GCB 的主流技术。

2.1 原理及结构

SF₆ 发电机断路器主要由灭弧室、操动机构和支撑套管等构成。灭弧室采用密封设计, 内部包含触头系统、压气机构和喷口。为满足快速灭弧的要

求, 该类型断路器多采用液压弹簧为操动机构提供分合闸动力。根据灭弧过程中高压气流产生方式的差异, SF₆ 断路器主要分为压气式和自能式。压气式依靠操动机构, 直接驱动压气缸内的活塞, 压缩 SF₆ 气体产生高压气流, 并经通道产生单向或双向气吹, 从而实现电弧的强制冷却和熄灭。压气式灭弧结构主要用于 100 kA 及以下的中等容量机组故障的开断, 其典型结构如图 4 所示^[16]。自能式灭弧结构主要面向 160 kA 及以上的大容量机组故障开断, 该结构是利用电弧自身能量加热灭弧室内的 SF₆ 气体, 使其压力升高并生成强烈的吹弧气流, 其典型结构如图 5 所示^[17]。自能式灭弧能够有效减小压气缸尺寸并降低操作能耗, 因而, 在发电机断路器产品中得到了广泛应用。

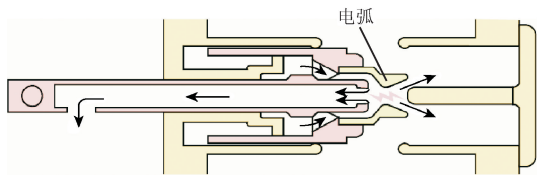
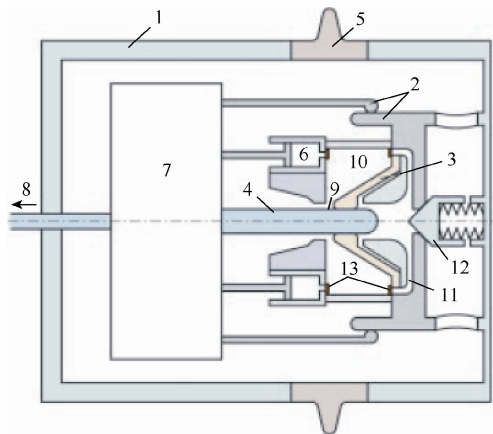


图 4 压气式灭弧结构^[16]

Fig. 4 Typical structure of puffer interrupter^[16]



1—外壳; 2—主触头系统; 3—弧触头系统(静侧); 4—弧触头系统(动侧); 5—绝缘子; 6—活塞; 7—齿轮传动装置; 8—主轴传动; 9—加热间隙; 10—加热室; 11—气体返回通道; 12—过压安全阀; 13—单向阀。

图 5 自压气式灭弧室典型结构^[17]

Fig. 5 Typical structure of self-pressuring interrupter^[17]

2.2 研究工作

针对 SF₆ 发电机断路器中超大电流电弧的研究, 公开发表的文献非常少。但已有的 SF₆ 电弧燃弧特性、开断过程介质恢复特性以及气体灭弧性能调控等方面的基础研究工作可为相关研究提供支撑。

2.2.1 SF₆ 电弧燃弧特性研究

开关设备开断产生的动态电弧过程是多场耦合的物理化学过程,涉及电磁场、温度场、辐射场、速度场和气流场等。国内外研究人员通常采用磁流体动力学(MHD)对电弧特性进行仿真计算及特性分析。Kollmann 等^[18]通过磁流体动力学方法研究空气电弧的衰减特性,但其中电弧的物性参数仅仅通过经验数值拟合得到。该研究通过对比温度衰减的实验结果发现,用该方法预测的温度衰减速率滞后于实验测试结果。Richley 等^[19]利用化学平衡假设对 SF₆ 弧柱区域的自由恢复特性进行了分析。宋宇等^[20]建立了 MHD 电弧数学模型,计算了 SF₆ 气体的电弧特性,对比了不同燃弧时间下断路器开断过程中气室压强、喷口气流速度和电弧温度的变化趋势,分析了 20 kA 短路电流开断过程中的气压特性、电弧电导等关键参量。

SF₆ 气体电弧与灭弧室内固体材料的相互作用对燃弧特性的影响机制也受到国内外学者的广泛关注。仲林林等^[21-22]考虑了 Cu、PTFE 材料的烧蚀效应,计算了 SF₆ 气体电弧等离子体的物性参数,揭示了不同含量的 Cu 或 PTFE 蒸气对 SF₆ 气体电弧的粒子组分,以及电弧热力学、输运、辐射系数的影响,为考虑固体部件烧蚀作用的电弧数值仿真提供了基础输入数据。Zhang 等^[23-24]、Wang 等^[25]的研究表明,铜电极蒸发产生的金属蒸气会显著降低电弧轴心温度(从 22 000 K 降至 16 000 K)并导致弧柱的扩张,这种冷却效应主要源于混合气体更高的净辐射系数与电导率。同时,其仿真结果表明:喷嘴烧蚀产生的 PTFE 蒸气会改变电弧的燃烧环境;在自能式断路器中,高温 PTFE 蒸气携带的能量成为压力上升的主要因素;其产生的压力波的传播与反射,会导致在第二个半波燃弧期间出现压力峰值。此外,他们采用 MHD 优化模型模拟 SF₆ 断路器多次开断产生的喷口累积烧蚀过程,分析了其对电弧温度、压力等动态分布特性和弧后热恢复能力的影响,为基于喷口优化设计的开断性能提升提供了理论参考。

2.2.2 开断过程介质恢复特性研究

SF₆ 断路器开断过程中的介质恢复特性,直接决定了其成功熄灭电弧的能力,是衡量其开断性能的核心指标。为深入探究这一复杂物理过程,研究者们发展了一系列多物理场耦合的数值模拟方法。

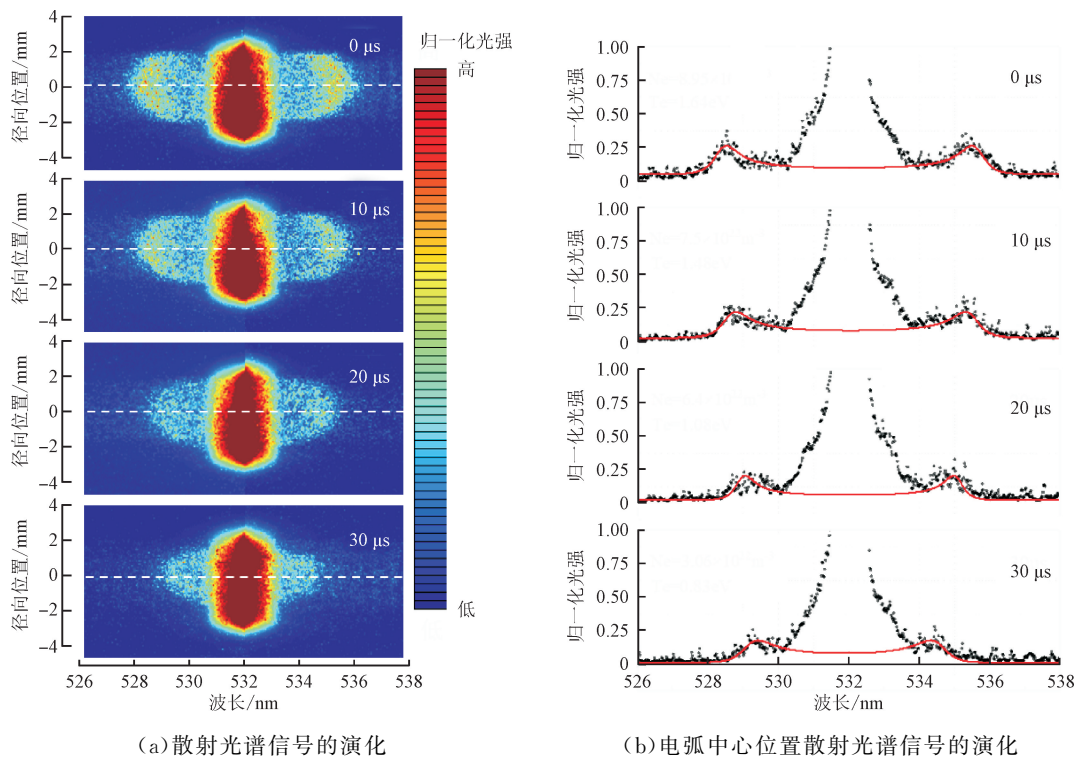
Schade 等^[26]研究了 SF₆ 喷口电弧电流零区的绝缘恢复特性,并通过实验对比,强调了湍流模型与

化学非平衡效应对结果的重要影响。在此基础上,Gonzalez 等^[27]进一步进行了 SF₆ 弧后化学非平衡模型的研究,结果表明:相对于局部热力学平衡假设,引入非平衡假设会降低电弧电流零区的恢复特性。在微观物理机制层面,Robin-Jouan 等^[28]提出了一种计算击穿特性的新方法,研究结果表明:对于 SF₆ 介质,在高于 2 000 K 的情况下,电子和离子的相互作用不可忽略。该结论完善了此前仅考虑电子与中性粒子相互作用的模型。为将宏观动力学与微观绝缘强度评估相结合,Song 等^[29]提出了将磁流体动力学模型与击穿特性 0 维模型相结合的计算方法,用以预测实际断路器中,电弧过零后的介质恢复过程,并发现考虑电流过零前阶段的影响能够更准确地预测结果。类似的,Yousfi 等^[30]与 Kim 等^[31]以实际高压断路器为模型,通过 MHD 模拟与高温击穿特性的结合,对恢复电压阶段的最概然击穿位置进行了预测。Wang 等^[32]则发展了双温流体动力学模型,从理论上揭示了电流零区附近存在的显著热非平衡效应,并指出电子与重粒子温度的差异会直接影响电弧冷却速率和零区电导特性。

在实验研究方面,Liu 等^[33-34]通过激光汤姆逊散射技术对 SF₆ 及其混合气体的弧后过程进行了测量,揭示了 μs 量级内电子密度急剧下降及压力升高引发的电弧收缩等现象,该实验结果如图 6 所示。Zhu 等^[35]针对 500 kV SF₆ 自激振荡式金属回线换流断路器(MRTB),建立了耦合谐振电路方程的二维 MHD 电弧模型,并结合实验研究了直流 4 kA 开断下的电弧温度、压力及振荡特性。结果揭示了电弧的负阻特性与谐振回路相互作用对电流零点的形成及灭弧过程的关键作用,为电弧-电路耦合机理及参数优化提供了重要参考。Guo 等^[36]通过实验与二维 MHD 仿真相结合,系统比较了不同充气压力下 CO₂ 与 SF₆ 断路器的燃弧与灭弧特性,揭示了 CO₂ 在高压条件下的温度、压力及质量流动规律。结果表明:随着充气压力的提高,CO₂ 的灭弧性能逐步接近 SF₆,最高约可达其性能的 95%,该结果为 CO₂ 替代 SF₆ 提供了定量评估依据。

2.2.3 气体灭弧性能调控

提升 SF₆ 断路器开断能力的核心在于对电弧能量的精确控制与耗散,其性能在很大程度上取决于灭弧室内气流场与电场分布的协同优化。近年来,研究人员通过优化气体介质、关键部件结构及操动特性,在气体灭弧性能调控方面取得了显著进展。



(a) 散射光谱信号的演化

(b) 电弧中心位置散射光谱信号的演化

图 6 SF₆ 电弧汤姆逊散射的时空演化^[34]Fig. 6 Spatiotemporal evolution of Thomson scattering of SF₆ arc^[34]

在电场与部件结构优化方面,研究者通过先进算法实现了精准设计。Sedlacek 等^[37]通过优化断路器内部电场和气体密度分布,有效提升了短路及容性电流开断性能,并指出,喷嘴区域的气流状况是决定性的优化目标。在喷嘴结构与气流场优化方面,计算流体力学与智能算法的结合成为主流手段。Dhotre 等^[38]结合计算流体力学与多目标优化算法,以最大化冷态和热态下的最小气流密度为目标,实现了断路器喷嘴结构的优化设计。随着人工智能技术的发展,Zhong 等^[39]提出了基于图像识别与深度学习的方法,利用卷积递归神经网络预测了喷嘴运动参数与内部流场状态的关系,为喷嘴设计提供了新范式。

上述研究均侧重于静态或准静态优化,而对气流动态过程与灭弧机理的深入揭示,是实现精准调控的另一关键。宋宇等^[20]采用动网格技术,开发了能够模拟触头分闸全过程的自适应电弧模型,仿真揭示了喷嘴下游的激波结构是导致气流壅塞和能量耗散的关键因素,且激波强度与位置直接受活塞压气速度的调控。Zhang 等^[40]通过建立包含 5 种流场模型的对比分析框架,发现了瞬态喷嘴电弧的临界恢复电压上升率与滞止压力呈平方关系,该研究为灭弧室的压力设计提供了定量依据。

综上所述,通过电场与结构优化、智能流场设计

以及对动态过程机理的深入研究,气体灭弧性能的调控策略已从传统的经验设计,发展为多物理场、多目标协同的精准设计与优化,但面向发电机断路器的超大电流开断场景,相关研究工作还需要向更高电流等级的电弧特性,及高燃弧能量下的瞬态介质恢复强度提升方法等方面进一步展开。

2.3 产品及应用

自 20 世纪 70 年代末首台采用 SF₆ 灭弧介质和液压弹簧操作机构的发电机断路器问世以来,凭借其结构紧凑、故障率低和维护简便的优势,SF₆ 断路器迅速取代了压缩空气式断路器,成为市场主流。在随后的 50 余年发展中,ABB、西门子、三菱等跨国企业推动了技术的快速迭代,开断容量显著提高。其中,ABB 公司的 HEC 系列产品尤为典型。该系列是在 1994 年至 1998 年间开发出的产品,由于其额定短路开断能力可达到 160 kA 而成为市场主流,该产品的实物如图 7(a) 所示。进入 21 世纪后,ABB 进一步将短路开断能力提升至 210 kA 以上,以满足百万 kW 级发电机组的保护需求。其旗舰产品 HEC9-250 型发电机断路器,自然冷却额定电流高达 28.5 kA,短路开断能力达 250 kA,这使 ABB 在当前全球百万 kW 级大容量发电机断路器市场中处于主导地位。

我国在该领域的技术突破始于2013年,中国西电集团研发了160 kA发电机断路器成套装置,该装置融合了接地开关及隔离开关,并成功应用于向家坝水电站等重大工程,实现了300~800 MW发电机组的保护和控制。2023年,中国西电集团自主研发的ZHN10-27发电机断路器成套装置取得了重大进展,该装置采用单相封装和定向气流控制技术,短路开断能力达到190 kA,在强迫风冷条件下连续电流达40 kA,其实物如图7(b)所示。尽管如此,目前国内最大容量的GCB产品在开断容量上与国外产品相比,仍存在较大差距。同时,在全球“双碳”目标背景下, SF_6 作为强效温室气体,其温室效应潜能值高达 CO_2 的23 900多倍。同时,在开断过程中, SF_6 会分解产生有毒物质,对环境构成严重威胁。因此, SF_6 的使用受到严格限制,这也促使全球开关行业加速向环保型替代技术转型。



(a) ABB的210 kA产品 (b) 中国西电集团的190 kA产品

图7 SF_6 型发电机断路器典型产品

Fig. 7 Representative products of SF_6 generator circuit breaker

3 真空式发电机断路器

随着环保要求在全球电力装备领域的日益严格,真空型发电机断路器技术凭借其固有的环保属性、长寿命与低维护需求,在发电机保护这一关键领域获得了广泛关注与应用。与 SF_6 发电机断路器相比,真空型发电机断路器展现出多方面的显著优势:①该断路器采用真空灭弧,从根本上避免了 SF_6 气体的使用所带来的环保问题;②真空灭弧介质恢复快、机构操作功相对较低,可以实现更快的开断;③真空灭弧触头电磨损率低,电气寿命长。这些特性使得真空断路器不仅能满足新型电力系统对快速开断的苛刻需求,更在全生命周期的可靠性及经济性方面展现出强大的竞争力。然而,其开断容量的进一步提升仍面临挑战。如何突破大电流开断下的技术瓶颈,是真空型发电机断路器应用于更大容量发电机组的关键所在。

3.1 原理及结构

真空型发电机断路器的核心灭弧单元是真空灭弧室,其卓越的开断性能源于真空环境固有的高绝缘强度与真空电弧独特的等离子体特性。真空电弧开断过程如图8所示,其包括起弧、燃弧与弧后阶段。在起弧阶段,当触头分离瞬间,巨大的短路电流流经最后的接触点,该触点的接触电阻产生的焦耳热使触头表面金属材料瞬间熔化,形成液态金属桥。在燃弧阶段,随着触头开距的增大,液态金属桥被拉断并迅速蒸发,所产生的金属蒸气在电场作用下被电离,形成真空电弧。触头表面在电弧根部的高温作用下持续产生金属蒸气,以维持电弧的导通。当电流过零时,金属蒸气的产生停止。在弧后阶段,由于真空灭弧室极高的扩散条件,残余等离子体以极快速度向四周的真空区域扩散、冷却并复合为中性粒子,真空间隙的介质强度得以迅速恢复,从而有效抑制电弧重燃,完成电流开断。

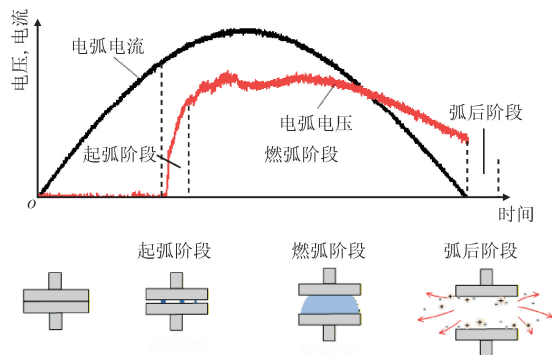


图8 真空电弧开断过程中的起弧、燃弧与弧后阶段

Fig. 8 Arc initiation, arc burning, and post-arc stages during vacuum arc interruption

3.2 研究工作

在真空电弧特性及开断技术方面,针对各类交直流断路器已有大量文献报道。同时,近年来随着真空型发电机断路器的发展,大电流真空电弧的相关研究也逐渐增多。

3.2.1 真空电弧燃弧特性研究

真空电弧的燃烧模式与伏安特性是决定其最终开断性能的物理基础。为系统揭示其内在规律,研究涵盖了从理论模型、实验观测到数值模拟的多个层面。Miller^[41]总结了真空电弧中可能出现的7种阳极放电模式,构建了从低电流扩散态到高电流集聚态(阳极斑点)的理论框架,为理解不同电流等级下的电弧行为提供了关键判据。Shi等^[42]通过高速摄影将真空电弧演变系统划分为4个阶段,明确了电流、机构速度等参数对电弧形态的宏观影响规律。

在真空电弧等离子体量化诊断与机理揭示方面, Yang 等^[43]建立了考虑电极运动的瞬态 MHD 模型, 揭示了电极分离导致的电弧在初始阶段高度收缩并产生极高能量通量的物理机理。为获取等离子体内部参数, Liu 等^[44]基于连续光谱辐射理论, 结合双色测温法, 实现了电子温度与密度的二维分布观测, 研究结果表明: 其电子密度呈径向中心高、边缘低的衰减分布, 而电子温度分布趋势则与之相反, 且电流的增大导致了电子密度峰值与分布范围的显著增加。

针对大电流真空燃弧条件, Chen 等^[45]观察了 100 kA 峰值条件下的真空电弧形态, 并总结了电弧等离子体喷射、电弧拉长与弧压升高、弧柱收缩及触头烧蚀熔融等燃弧作用阶段, 其燃弧过程如图 9 所示。韩翔宇等^[46]对大直径触头下峰值 100 kA 真空电弧演化模式及伏安特性展开了研究。结果表明: 大电流真空电弧伏安特性呈现独特的“7”字型曲线(如图 10 所示), 燃弧过程可据此划分为瞬态起弧、非稳定燃弧和稳定燃弧 3 个阶段。此外, 针对超大容量开断需求, Han 等^[47-48]进一步开展了多断口并联开断中的真空燃弧特性研究, 揭示了真空电弧弧压的混沌性与迟滞性等特征(如图 11 所示), 并阐明了电流等级、换流深度等因素对这 2 个特征的影响规律, 为多断口并联结构的电流均流调控奠定了理论基础。

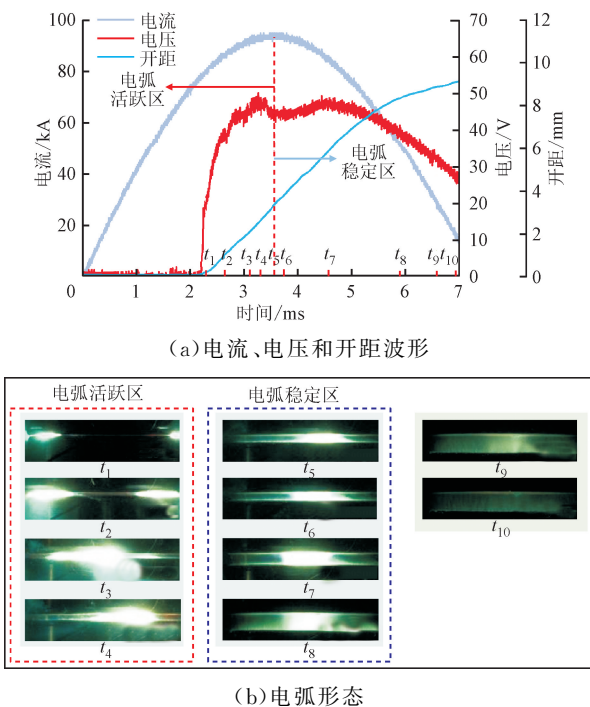


图 9 大电流真空电弧燃弧过程^[45]

Fig. 9 High-current vacuum arc evolution process^[45]

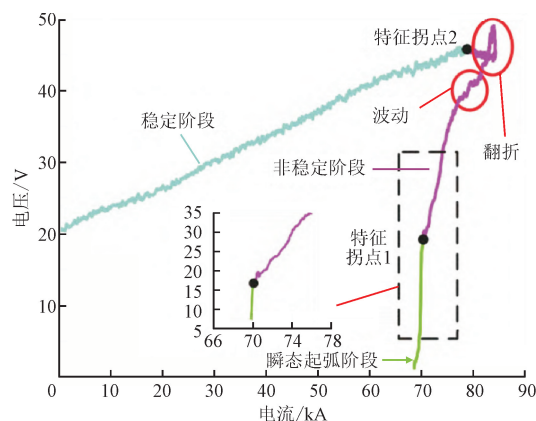
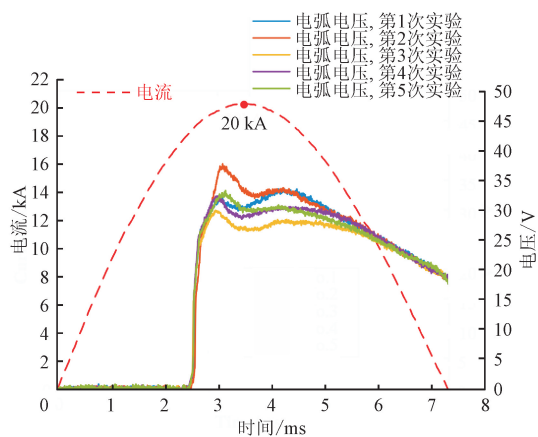
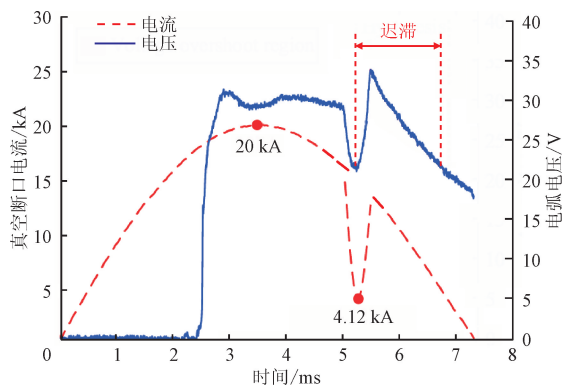


图 10 不同燃弧阶段下真空电弧的伏安特性曲线^[46]

Fig. 10 Voltage-current characteristic curves of vacuum arc during different arcing phases^[46]



(a) 混沌性



(b) 迟滞性

图 11 真空电弧的燃弧特征^[47-48]

Fig. 11 Arcing characteristics of vacuum arc^[47-48]

3.2.2 真空电弧与电极材料的相互作用

触头材料是决定真空灭弧室电寿命和开断稳定性的核心。在电极电弧侵蚀特性方面, Wu 等^[49]揭示了阳极斑点在真空电弧阴极溅射侵蚀中的影响机

制,通过光学诊断方法验证了阳极斑点释放的高能蒸发原子流会导致阴极局部熔化,并产生持续金属熔滴。Jiang 等^[50]聚焦于真空电弧中的微颗粒动态特性及电极侵蚀行为,发现微颗粒主要来源于熔融金属桥断裂、阳极熔融物流出和阴极溅射,其研究的阴极微粒生成及运动轨迹如图 12 所示。该研究发现:触头铬含量对微颗粒产生具有显著影响,低电流时,高铬含量可抑制微颗粒的产生;较高电流时,CuCr30 表现最佳。此外,磁场作用也显著影响侵蚀特性,Ma 等^[51]研究了轴向磁场作用下,收缩型真空电弧中吹弧效应引发的阳极熔层重分布现象,揭示了电极侵蚀过程中的热机械耦合效应。为了进一步提升材料性能,近年来研究者通过在 CuCr 合金中引入第 3 相元素进行优化,有效改善了触头的开断性能与抗熔焊能力^[52]。

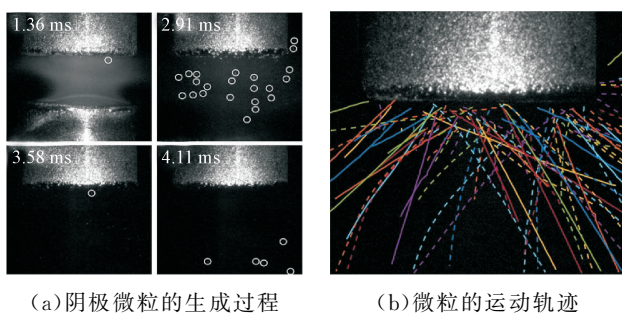


图 12 阴极微粒生成及喷射微粒运动轨迹^[50]

Fig. 12 Generation of cathode microparticles and trajectories of splashed particles^[50]

3.2.3 介质恢复特性研究

真空断路器的开断能力最终取决于电流过零后的介质恢复速度。这一复杂过程涉及多种物理机制的相互作用,研究者们从不同时间尺度和影响因素展开了系统研究。

弧后初期残余粒子动态与衰减规律是介质恢复研究的首要环节。Wu 等^[53]研究了 20~60 kA 直流燃弧条件下,真空断口介质恢复特性的主要影响因素。Xiao 等^[54]进一步量化了燃弧条件对介质恢复的影响规律,研究发现,在 10~20 kA 的电流范围内,介质恢复时间随燃弧时间的增加而延长。然而,当电流升至 30 kA 时,灭弧室在燃弧时间为 1 000 μ s 时表现出最高的介质恢复强度,揭示了燃弧强度与介质恢复之间的非线性关系,研究结果如图 13 所示。

通过磁场调控实现对介质恢复的优化是提升开断能力的关键技术路径。Wang 等^[55]通过三维瞬态磁流体动力学模型,揭示了强制过零过程中电弧等

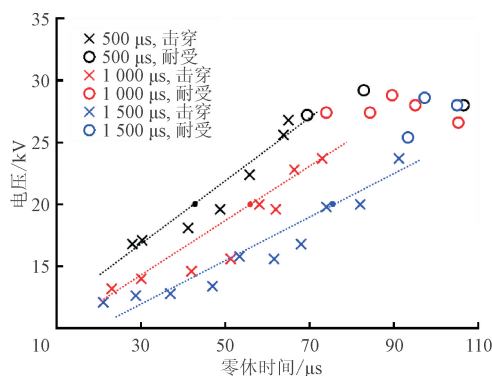


图 13 燃弧时间对弧后介质恢复特性的影响^[54]

Fig. 13 Influence of arcing time on post-arc dielectric recovery characteristics^[54]

离子体特性变化滞后于电流的物理现象,发现涡流导致的磁场滞后虽能使等离子体分布均匀,却不利于其扩散,而触头开槽设计可有效抑制此负面效应。Wang 等^[56]采用平面激光诱导荧光技术,实现了对电弧熄灭后铜原子二维分布的直接观测,发现轴向磁场会使铜原子在阳极附近滞留,而横向磁场则能促进其快速消散。

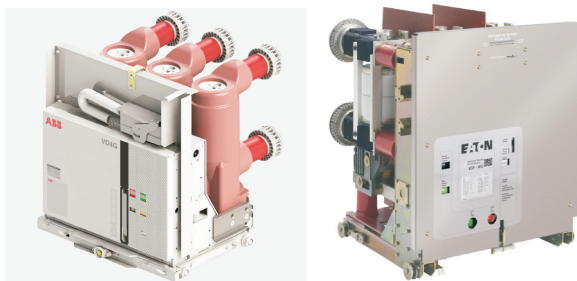
针对多断口并联型发电机断路器的开断工况,Han 等^[57]研究了峰值 100 kA 的电弧弧后 1 μ s 内的介质恢复特性,揭示了电流等级、燃弧能量和电流上升率对瞬态介质恢复的耦合作用规律。研究表明,真空电弧的弧压主动调节效应和燃弧记忆效应是影响瞬态介质恢复分散性的主要因素。

3.3 产品及应用

在真空型发电机断路器领域,国内外知名企业已推出系列产品,其实物如图 14 所示。德国西门子公司自 20 世纪 90 年代起,致力于环保型真空发电机断路器的研发,其 HB3 型产品代表了当前国际真空型发电机断路器的最高水平,其参数可达到额定电压 24 kV、额定电流 15 kA、开断电流 110 kA。同时,该断路器的短路开断次数高达 30。伊顿电气公司的 VCP-WG 型真空发电机断路器则面向中小型发电站,其额定电压为 15 kV,额定电流为 7 kA,开断电流为 75 kA。该产品能够在高失步电压及高非对称短路电流情况下,可靠开断,机械寿命可达万次以上。此外,ABB 公司推出的 VD4G 系列产品,其额定电压为 15 kV,短路开断能力为 63 kA,能够承受 130% 的直流分量,可有效应对延迟过零电流并耐受严峻的瞬态恢复电压条件。

国内制造企业在该领域也取得了显著进展。平高集团、北开电气、锦州华光、长城开关厂等单位均

成功开发了环境友好的真空型发电机断路器。其中,北开电气研制的 ZN105 型产品的额定电压达到 15 kV,开断电流达到 80 kA;山东泰开集团开发的 VTK-15(F)型真空发电机断路器,额定电压为 15 kV,开断电流为 63 kA。这些产品标志着我国在真空发电机断路器领域已具备相当的研发与制造能力。



(a) ABB 的 VD4G 产品 (b) 伊顿的 VCP-WG 产品

图 14 国外公司推出的真空型 GCB 产品

Fig. 14 Vacuum GCB products launched by overseas companies

随着发电机容量的不断提升,面对高达数百 kA 的短路开断需求,传统 SF₆ 开断方案故障切除时间长,电弧能量高达数 MJ,开断能力持续提升极其困难。真空开断技术受限于单断口真空灭弧室的开断物理极限,也难以满足要求。西安交通大学^[45-48,58]提出了电弧能量主动控制与真空多断口并联相结合的开断原理与拓扑结构。对于额定电流级别的常规电流,通过主回路断口直接开断;对于超大短路电流,通过电流转移技术,使开断时间大幅缩短,灭弧室燃弧能量从 MJ 级降至 kJ 级,实现了开断电寿命的大幅提升,这 2 种控制方式的对比如图 15 所示。针对真空多断口并联均流与开断,研究揭示了多断口系统中静态均流与动态均流耦合的开断机制。研究发现:支路杂散阻抗差异以及机构动作分散性对多断口并联结构的静态、动态均流具有重要影响。该研究还提出了磁场、杂散参数、快速操动相结合的调控策略,实现了静态及动态均流系数的显著提升。操作机构对动态均流的影响规律如图 16 所示。

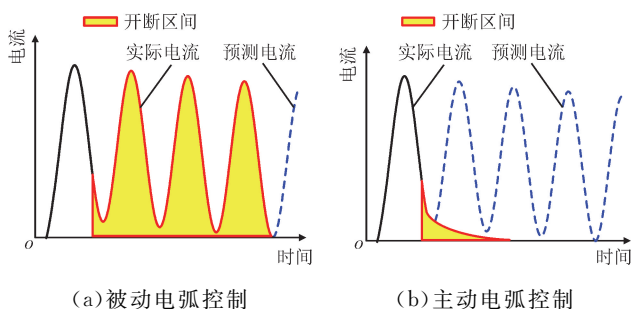


图 15 电弧控制方式对比

Fig. 15 Comparison of arc control methods

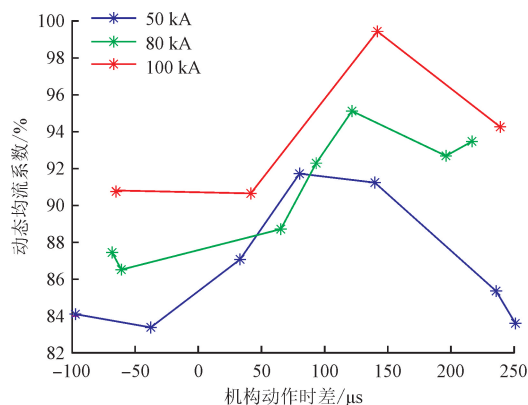


图 16 操作机构对动态均流的影响规律^[47]

Fig. 16 Influence of operating mechanism characteristics on dynamic current-sharing^[47]

基于相关研究,西安交通大学与中国西电集团联合攻关研制的 ZHN-31.5 环保型发电机快速断路器,以其额定电压 31.5 kV,额定电流 40 kA,额定短路开断电流 210 kA 的关键参数全面超越传统产品水平,并将开断时间缩短至 40 ms 以内。产品实物如图 17 所示。该产品解决了大型核电、水电主力机组发电机断路器的卡脖子问题,标志着我国在大容量真空开断技术领域取得的重大进展,为未来更高幅值短路电流的开断需求提供了新的技术路径。

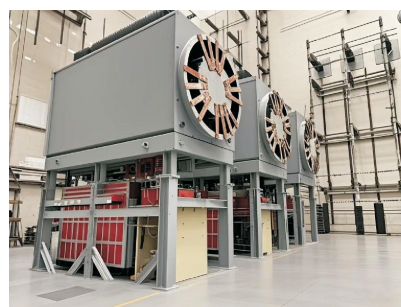


图 17 ZHN-31.5 环保型发电机快速断路器

Fig. 17 ZHN-31.5 environment-friendly fast circuit breaker

4 结论及展望

在“双碳”目标与新型电力系统建设背景下,大容量发电机断路器正面临开断容量、开断速度与环保性能的协同提升挑战。本文系统梳理了压缩空气式、SF₆ 型及真空型发电机断路器的技术发展脉络。其中,真空灭弧技术凭借其环境友好、开断速度快、寿命长等优势,已成为替代 SF₆ 断路器的重要发展方向,并通过多断口并联与电弧主动控制等方法,在

提升开断容量方面展现出巨大潜力。为进一步突破技术瓶颈,推动发电机断路器适应未来的发展需求,以下方向值得重点关注。

(1)突破开断容量瓶颈,构建多层次技术体系。深入开展超大电流真空电弧燃弧特性与介质恢复机理等基础研究,揭示超大电流开断的物理本质;研制新型磁控触头系统,通过创新磁场构型实现对电弧形态的精确调控与大电流的快速开断;同步推进关键材料创新与灭弧室结构优化;提升发电机断路器在极端工况下的热稳定性和机械可靠性。实现单断口开断电流达到100~125 kA的水平,推动多断口并联技术实现250 kA及更高水平的开断能力。

(2)推进真空型发电机断路器全系列化,构建绿色产业链。针对抽水蓄能电站的频繁操作、核电水电的大容量开断等特定应用场景,加速开发从中小容量到特大容量的全系列真空发电机断路器产品,推进真空断路器对SF₆设备的替代。实现发电机保护装备的全面环保化,构建自主可控的绿色环保产业链。

(3)深度融合智能技术,提升运维智能化水平。将传感技术、大数据分析 with 人工智能深度融合,构建发电机断路器的智能监测与诊断系统。发展数字孪生技术,推动设备的全生命周期管理,全面提升发电机断路器运行的可靠性与智能化水平。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告-2024 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
- [2] LI Peng, SHU Yinbiao, GU Chen, et al. Development and prospect of UHV transmission technology [J]. Renewable Energy System and Equipment, 2025, 1(1): 8-19.
- [3] FENG Xiaosong, TAN Liming, WANG Yikai, et al. Improved generator circuit breaker failure protection method combined with voltage quantities [J]. Energy Reports, 2022, 8(S5): 419-427.
- [4] WANG Qinghua, HUANG Yujing, ZHU Yankai, et al. Development direction, technical issues, and key construction tasks for new power system [J]. Renewable Energy System and Equipment, 2025, 1(1): 1-7.
- [5] 朱家果, 李朝阳. 高压断路器 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [6] 米尔萨德·卡普塔诺维克. 高压断路器: 理论、设计与试验方法 [M]. 王建华, 闫静, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [7] BLANDFORD A R. Air-blast circuit-breakers [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers: Part II Power Engineering, 1943, 90(18): 411-423.
- [8] PRINCE D C, HENLEY J A, RANKIN W K. The cross-air-blast circuit breaker [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1940, 59(9): 510-517.
- [9] RANKIN W R, BENNETT R M. A conserved-pressure air-blast circuit breaker for high-voltage service [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1941, 60(5): 193-197.
- [10] BENNETT R M, WYMAN B W. Medium-capacity air-blast circuit breakers for metal-clad switchgear [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1941, 60(6): 383-388.
- [11] SHORES R B, BEATTY J W, SEELEY H T, et al. A line of 115 kV through 460 kV air-blast circuit breakers [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers: Part III Power Apparatus and Systems, 1959, 78(3): 673-685.
- [12] SHORES R B, BEATTY J W. A new 138 kV 10,000-MVA air-blast circuit breaker [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers: Part III Power Apparatus and Systems, 1957, 76(3): 178-187.
- [13] COX H E, WILCOX T W. The influence of resistance switching on the design of high-voltage air-blast circuit-breakers [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers: Part II Power Engineering, 1944, 91(24): 483-495.
- [14] JONES G R, LIDGATE D, EDELS H. Interaction between a high-current arc and the air flow in an air-blast circuit breaker [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1975, 122(12): 1443-1451.
- [15] MORITA T, IWASHITA M, NITTA Y. A theoretical analysis of dynamic arcs and test results of model synchronous air blast circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97(3): 940-949.
- [16] 徐齐巍. 大容量 SF₆ 发电机断路器关键技术的探讨 [J]. 智能电网, 2015, 3(3): 201-207.
- [17] XU Qiwei. Discussion on the key technologies of large capacity SF₆ generator circuit breaker [J]. Smart Grid, 2015, 3(3): 201-207.
- [18] ZEHNDER L, KIEFER J, BRAUN D, et al. Generator circuit-breaker system for short-circuit currents up to 200 kA [J]. ABB Review, 2002(3): 35-42.
- [19] KOLLMANN W, SOMMER H, STOJANOFF C G.

- Numerical simulation of a decaying air plasma column [J]. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 1977, 2(1): 17-38.
- [19] RICHLEY E, TUMA D T. Free recovery of the gas-blast arc column [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1980, 8(4): 405-410.
- [20] 宋宇, 林莘, 周涛, 等. 550 kV 快速断路器气流场仿真与开断性能 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2432-2441.
- SONG Yu, LIN Shen, ZHOU Tao, et al. Simulation of airflow field and breaking capacity of 550 kV fast circuit breaker [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2432-2441.
- [21] 仲林林, 王小华, 荣命哲. 高压开关 SF₆-Cu 电弧净辐射系数计算 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(23): 5600-5606.
- ZHONG Linlin, WANG Xiaohua, RONG Mingzhe. Calculation of net emission coefficients of SF₆-Cu arc in high-voltage circuit breakers [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(23): 5600-5606.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Jinling, YAN Jiudun, MURPHY A B, et al. Computational investigation of arc behavior in an auto-expansion circuit breaker contaminated by ablated nozzle vapor [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(2): 706-719.
- [24] ZHANG Jinling, YAN Jiudun, FANG M T C. Electrode evaporation and its effects on thermal arc behavior [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(3): 1352-1361.
- [25] WANG W Z, ZHAO X M, YAN J D. Modelling of nozzle ablation in gas-blast circuit breakers considering its accumulative effect due to geometric variation [C]//International Conference on Gas Discharges and Their Applications. [S.l.: s.n.], 2018.
- [26] SCHADE E, RAGALLER K. Dielectric recovery of an axially blown SF₆-arc after current zero: part I experimental investigations [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1982, 10(3): 141-153.
- [27] GONZALEZ J J, GIRARD R, GLEIZES A. Decay and post-arc phases of a SF₆ arc plasma: a thermal and chemical non-equilibrium model [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2000, 33(21): 2759-2768.
- [28] ROBIN-JOUAN P, YOUSFI M. New breakdown electric field calculation for SF₆ high voltage circuit breaker applications [J]. *Plasma Science and Technology*, 2007, 9(6): 690-694.
- [29] SONG K D, LEE B Y, PARK K Y, et al. Analysis of dielectric recovery for SF₆ gas-blast arc [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(11R): 6541-6549.
- [30] YOUSFI M, ROBIN-JOUAN P, KANZARI Z. Breakdown electric field calculations of hot SF₆ for high voltage circuit breaker applications [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, 12(6): 1192-1200.
- [31] KIM H K, CHONG J K, SONG K D. Analysis of dielectric breakdown of hot SF₆ gas in a gas circuit breaker [J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2010, 5(2): 264-269.
- [32] WANG Weizong, YAN J D, RONG Mingzhe, et al. Theoretical investigation of the decay of an SF₆ gas-blast arc using a two-temperature hydrodynamic model [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2013, 46(6): 065203.
- [33] LIU Tianxiao, SUN Hao, ZHANG Yushi, et al. Post-arc electron density measurement in SF₆ and SF₆/CO₂ mixture arcs using Thomson scattering [J]. *Spectrochimica Acta: Part B Atomic Spectroscopy*, 2025, 229: 107196.
- [34] LIU Tianxiao, SUN Hao, ZHANG Yushi, et al. Comparative study of the decay process of LIP and gas arc in SF₆/N₂ gas mixture by Thomson scattering [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2024, 57(24): 245204.
- [35] ZHU Kai, LI Xingwen, JIA Shenli, et al. Study of the switching arc characteristics of a 500 kV HVDC self-excited oscillatory metallic return transfer breaker [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(1): 128-134.
- [36] GUO Ze, LIU Shungui, PU Yunjie, et al. Study of the arc interruption performance of CO₂ gas in high-voltage circuit breaker [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(5): 2742-2751.
- [37] SEDLACEK J, VOSTRACKY Z, KNOBLOCH H, et al. Optimization of high-voltage self-blast interrupters by gas flow and electric field computations [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(4): 1228-1235.
- [38] DHOTRE M T, YE Xiangyang, LINARES F, et al. Multiobjective optimization and CFD simulation for a high-voltage circuit breaker [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(4): 2105-2112.

- [39] ZHONG Jianying, WANG Zhijun, ZHANG Bo, et al. Research on parameters optimization of high voltage circuit breaker nozzle based on image recognition and deep learning [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 16(4): 496-504.
- [40] ZHANG Q, LIU J, YAN J D, et al. The modelling of an SF₆ arc in a supersonic nozzle: II current zero behaviour of the nozzle arc [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2016, 49(33): 335501.
- [41] MILLER H C. Anode modes in vacuum arcs: update [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2366-2374.
- [42] SHI Zongqian, LV Xinkun, GUO Jing, et al. Experimental investigation on the evolution of vacuum arc in the quench protection switch based on forced current zero [J]. Physics of Plasmas, 2022, 29(9): 093504.
- [43] YANG Ze, WANG Lijun, ZHANG Zhefeng, et al. Numerical investigation on transient arc characteristics and anode surface temperature considering the electrode movement [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2022, 55(41): 415201.
- [44] LIU Shan, YUAN Zhao, LIU Liming, et al. Experimental study on dynamic characteristics of charged particles in vacuum arc [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(2): 025402.
- [45] CHEN Hongbin, LI Gang, SUN Jinru, et al. Research on the shape evolution and voltage characteristics of high current vacuum arcs [C]//2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-4.
- [46] 韩翔宇, 杨飞, 陈洪斌, 等. 基于真空电弧伏安特性的大电流真空多断口并联动态均流特性 [J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1922-1933.
- HAN Xiangyu, YANG Fei, CHEN Hongbin, et al. Dynamic current-sharing characteristics of large-current vacuum multi-breakers based on vacuum arc voltage-ampere characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1922-1933.
- [47] HAN Xiangyu, YANG Fei, CHEN Hongbin, et al. Dynamic current-sharing of parallel vacuum multi-breakers in large-capacity generator circuit breakers [J]. Vacuum, 2025, 237: 114130.
- [48] HAN Xiangyu, YANG Fei, CHEN Hongbin, et al. Experimental investigation on the hysteresis characteristic of vacuum arc voltage during the current commutation [J]. Vacuum, 2025, 238: 114211.
- [49] WU Yi, ZHANG Yushi, JIANG Fengfeng, et al. Study on the influence mechanism of anode spots on cathode splashing erosion in vacuum arcs [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2025, 58(20): 205205.
- [50] JIANG Fengfeng, WU Yi, WU Yifei, et al. Experimental investigation on the erosion behavior in high-current vacuum arcs and resulting microparticles dynamics [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2021, 54(39): 395201.
- [51] MA Hui, TIAN Yunbo, GENG Yingsan, et al. Anode erosion pattern caused by blowing effect in constricted vacuum arcs subjected to axial magnetic field [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(8): 2329-2334.
- [52] ZHAO Zhilei, XIAO Zhu, LI Zhou, et al. Microstructure and properties of a Cu—Ni—Si—Co—Cr alloy with high strength and high conductivity [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 759: 396-403.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] WANG Lijun, ZHANG Zhefeng, CHEN Jieli, et al. 3D transient MHD simulation of DC breaking vacuum arc based on artificial current zero [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 132(6): 063301.
- [56] WANG Zhenxing, LIU Jiankun, LI Yuecheng, et al. Two-dimensional observation of copper atoms after forced extinction of vacuum arcs by laser-induced fluorescence [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(8): 2777-2789.
- [57] HAN Xiangyu, YANG Fei, CHEN Yili, et al. Post-arc transient dielectric recovery characteristics of vacuum interrupter in the large-capacity generator circuit breaker [J/OL]. High Voltage. (2026-02-11) [2026-02-14]. <https://doi.org/10.1049/hve2.70153>.
- [58] HAN Xiangyu, YANG Fei, CHEN Hongbin, et al. Parallel current-sharing characteristics of vacuum multi-breakers for large-capacity generator circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 1162-1173.

(编辑 刘懿莹)

团队介绍:

电力开断技术及装备研究团队长期专注于新能源电网接入装备、电力设备的智能运维与数字孪生等关键技术研究。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 8 人,团队负责人荣命哲是国家杰出青年科学基金获得者。团队代表性成果包括:成功研制世界上中压直流领域开断容量最高的空气式直流断路器,突破我国大型舰船综合电力系统发展瓶颈;实现城市轨道交通直流断路器国产化,打破国外垄断;开发 10 kV 直流断路器,并率先在国网江苏直流配电示范工程中批量应用。在智能设计与数字孪生方向,建立等离子体基础数据库,被 COMSOL、ANSYS 等国际仿真软件推荐使用,使我国成为全球拥有该数据库的 4 个国家之一;开发电力设备智能计算软件,在多家国内外知名企业实现商用。团队获国家技术发明二等奖 1 项、国家科技进步二等奖 3 项、省部级一等奖 4 项,授权发明专利 70 余项,发表 SCI 论文 290 余篇。研究成果为我国新型电力系统建设与电力装备自主创新作出了突出贡献。



团队负责人:荣命哲教授



团队合影