

环保绝缘气体设备研发与应用进展

靳梦磊¹, 夏亚龙², 肖 淞¹, 李 祎¹, 唐 炬¹, 张晓星³

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430068; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心 (湖北工业大学), 湖北 武汉 400068)

摘要: SF₆ 在中、高压气体绝缘输配电设备中被广泛使用。然而, SF₆ 作为一种强温室气体, 其全球变暖潜能值高达 CO₂ 的 23 500 倍且大气寿命长, 由于 SF₆ 气体作为绝缘气体在电气设备中的大量使用, 致使其在大气中的浓度持续增加。为践行“2030 年碳达峰, 2060 年碳中和”的减排目标, 推动电网设备选型向绿色环保领域迈进, 环保型气体绝缘介质及设备研发成为热点。近年来, 全氟化酮、全氟化腈及其混合气体凭借优良的绝缘及环保性能被广泛关注, 被认为是极具潜力的 SF₆ 替代气体。文中阐述了常见环保型气体绝缘介质的基础特性, 分析了其应用于气体绝缘输配电设备的可行性, 并介绍了近年来国内外环保绝缘气体设备的研发与应用进展; 最后, 展望了环保绝缘气体应用面临的问题及未来的发展趋势。

关键词: 环保绝缘气体; 设备研发; C₄F₇N 混合气体; C₅F₁₀O 混合气体

中图分类号: TM 835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0012-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230403

Research and Application Progress of Environmentally Friendly Insulating Gases

JIN Menglei¹, XIA Yalong², XIAO Song¹, LI Yi¹, TANG Ju¹, ZHANG Xiaoxing³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430068, Hubei, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 400068, Hubei, China)

Abstract: SF₆ is widely used in medium and high voltage gas insulating transmission and distribution equipment. However, as a strong greenhouse gas, SF₆ has a global warming potential as high as 23,500 times that of CO₂ and a long atmospheric life, and its concentration in atmosphere continues to increase due to its extensive use in electrical equipment as an insulating gas. In order to implement the emission reduction goal of "carbon peak in 2030, carbon neutral in 2060" as well as promote the selection of power grid equipment to move towards the green and environmental protection field, developing eco-friendly gas insulating medium and equipment has become a hot topic. In recent years, perfluorone, perfluoronitrile and their gas mixture have attracted wide attention due to their excellent insulation and eco-friendly properties, which are regarded as SF₆ alternative gases with extremely potential. The basic characteristics of common eco-friendly gas insulating medium are described. Then the feasibility of application in gas insulating transmission and distribution equipment is analyzed, and the development and application progress of environmentally friendly insulating gas equipment at home and abroad in recent years are introduced. Finally, some problems and future development trends of environmentally friendly insulating gas are prospected.

Key words: environmentally friendly insulating gases; equipment development; C₄F₇N gas mixture; C₅F₁₀O gas mixture

0 引言

采用 SF₆ 气体作为绝缘介质的输配电设备,由于可靠性高、运行维护周期长、占地面积小等优点,在各电压等级的电力系统中应用极其广泛,特别是在 110 kV 及以上电压等级的气体绝缘输配电设备中具有统治地位^[1-2]。然而, SF₆ 作为一种全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)达到 CO₂ 的 23 500 倍的温室气体,造成了不容忽视的环境问题。事实上,它是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)认定的迄今为止最强劲的温室气体。由于 SF₆ 气体作为绝缘气体在电气设备中的大量使用,致使其在大气中的浓度持续增加。为助力解决温室气体排放所导致的愈发严峻的环境问题,以及落实中国“2030 年碳达峰,2060 年碳中和”的目标要求,环境友好型气体及设备研发刻不容缓^[3-5]。

下面综述了常见环保绝缘气体的基础特性并介绍了近些年国内外环保绝缘气体设备的研发与应用进展,最后展望了环保型气体绝缘介质应用可能面临的问题与发展前景,并提供了相关建议。

1 常见环保绝缘气体

SF₆ 于 20 世纪 70 年代被成功制备并开始作为绝缘与灭弧介质在 GIS 等气体绝缘设备中应用^[6]。早期研究 SF₆ 替代气体主要为解决其液化温度较高的问题。1980 年,通用电气公司 J C Devins 等对 35 种潜在绝缘气体进行了性能测试,并通过饱和和蒸气压特性分析了应用可行性,指出:应用在 0.2 MPa 气压时存在性能优于 SF₆ 的气体,分别是 C₄F₇N、C₂F₅Cl、CF₃-C≡C-CF₃ 和 C₂F₅CN;其他气体只有设备在更高运行温度下才具备替代 SF₆ 的潜力;综合来看 SF₆ 仍是最为理想的气体绝缘介质^[7]。此后, SF₆ 在 1997 年签署的《京都议定书》中被列为六大温室气体目录,国内外学者开始从环保角度对绝缘气体展开研究。表 1 给出了目前常见的环保绝缘气体的基础特性参数^[8]。

根据研究对象可将环保绝缘气体分为传统类与混合类:传统类包括 N₂、CO₂ 和干燥空气;混合类包括 SF₆ 混合气体,如 SF₆/N₂、SF₆/CO₂、SF₆/CF₄ 等,以及氟碳类强电子亲和性气体,包括氢氟碳化物

表 1 SF₆ 及环保绝缘气体的基础特性参数

名称	GWP (100 a)	大气 寿命/a	液化 温度/°C	相对 SF ₆ 绝缘性能 (临界击 穿场强)	半数致 死浓度 (LC50)/%
SF ₆	23 500	3200	-64.0	1	—
CO ₂	1	—	-78.5	0.35	—
N ₂	—	—	-196.0	0.38	—
O ₂	—	—	-183.0	0.33	—
CF ₄	6630	50 000	-128.0	0.41	—
c-C ₄ F ₈	8700	3200	-6.0	1.27	—
CF ₃ I	0.4	0.005	-21.8	1.2	16
HFO-1234zeE	<1	0.045	-19.2	0.85	>20.7
C ₄ F ₇ N	2090	22	-4.7	2	1.25~1.5
C ₅ F ₁₀ O	<1	0.044	26.9	1.4	2
C ₆ F ₁₂ O	1	0.014	49.0	>2	>10

(hydrofluorocarbons, HFCs)、全氟化碳(perfluorinated compounds, PFCs)、CF₃I、全氟化腈(perfluoronitriles, PFNs)、全氟化酮(perfluorinated ketone, PFK)等^[9-10]。

其中传统气体在液化温度、环保特性、安全性方面表现优异,但其绝缘性能仅为 SF₆ 的 30%~38%,因此常作为缓冲气体与 SF₆ 或强电子亲和性气体进行混合使用;而全氟化碳和 CF₃I 则存在液化温度高、固体析出严重、环保性能不佳、安全性差等缺点,没有工程应用可行性^[8]。相比之下,全氟化酮、全氟化腈两类物质绝缘性能高于 SF₆ 且环保特性优异,虽然液化温度较高,但与 CO₂ 等常规气体混合使用可以满足设备最低运行温度的要求,具有在中、高压气体绝缘设备的应用潜力。

目前,诸多输配电设备生产厂家也推出了以全氟化酮、全氟化腈为绝缘介质的环保型设备,通过了型式试验并开展了示范运行及推广工作。下面主要针对国内外全氟化酮、全氟化腈环保绝缘气体的应用现状进行综述。

2 国外气体绝缘设备研发及应用

目前,国外对以环保绝缘气体为绝缘介质的多电压等级输配电设备研发都取得了一定进展。自 2015 年以来,通用电气公司与 ABB 公司基于 3M 公司的 Novec 绝缘气体,率先推出系列环保绝缘气体输配电设备,随后其他厂家也陆续开展应用。表 2 和图 1 为 3M 公司部分环保绝缘气体设备安装案例。

表 2 3M 部分环保绝缘气体设备安装案例

序号	气体类别	设备类型	时间
1	C ₅ F ₁₀ O/Air	20 kV 环网柜	2015-11
2	C ₅ F ₁₀ O/Air	22 kV GIS	2015-05
3	C ₅ F ₁₀ O/Air	150 kV GIS	2015-05
4	C ₄ F ₇ N/CO ₂	110 kV GIS 和断路器	2017-10
5	C ₄ F ₇ N/CO ₂	245 kV CT	2017-04
6	C ₄ F ₇ N/CO ₂	420 kV GIL	2017-04



图 1 3M 部分环保绝缘气体设备安装案例地图

从应用 3M 环保绝缘气体的设备安装案例情况来看,自 2015 年起,国外包含多种类型、多种电压等级的环保绝缘气体输配电设备陆续被投运使用。部分典型案例如下:

2015 年,ABB 公司成功使用 AirPlus,即 C₅F₁₀O/Air 混合气体用于瑞士苏黎世的 EWZ 公司 170 kV GIS,该 GIS 是世界上第一个采用环保绝缘气体的气体绝缘开关设备。自 2015 年以来,EWZ 公司成功运行了第一批中、高压环保绝缘气体应用的试点装置^[11]。



图 2 ABB 公司的环保型 380 kV GIS 安装在德国 TransnetBW 公司的 Weier 变电站

2016 年,通用电气公司联合 3M 公司推出了世界首台采用 C₄F₇N/CO₂ 混合气体作为绝缘介质的气体绝缘输电管道,该 420 kV/63 kA GIL 的工作绝对气压为 1.06 MPa,运行温度为 -25~40 ℃^[12]。首台该型 GIL 安装于伦敦南部的 Sellindge 变电站,长度

约为 300 m 的两条回路投运至今未发现异常。

2018 年,ABB 公司赢得德国输电网运营商 TransnetBW 的约 4000 万美元订单,用于升级德国巴登符腾堡州 Obermoeweiler 的高压变电站。作为升级不可或缺的一部分,ABB 公司安装了世界首个环保型 380 kV GIS,该设备采用环保绝缘气体混合物,符合 SF₆ 行业标准^[13]。

日立能源(原 ABB 电网)于 2022 年 11 月宣布,将为欧洲领先的电网运营商 TenneT 在德国的埃尔茨豪森 220 MW 抽水蓄能电站提供世界首台环保型 420 kV GIS 和先进的预装式模块化并网解决方案,整个项目将于 2026 年竣工,该应用能够有效减少 SF₆ 近 2.3 t^[14]。此外,日立能源将于 2023 年中期为美国 Eversource 公司的 345 kV 变电站提供全球首台 420 kV 环保型罐式断路器,不仅能够实现远距离大容量输电,同时避免 SF₆ 气体的大量使用^[15]。



图 3 日立能源的世界首个环保型 420 kV 罐式断路器

2016 年,为开发环保型 170 kV GIS,韩国 LS 电气公司与通用电气公司签订技术合作,该 GIS 采用 C₄F₇N/CO₂/O₂ 混合气体作为绝缘介质,于 2020 年在国际认证测试所韩国电气研究院(KERI)完成了性能测试,并获得世界首个国际短路试验联盟(STL)对环保型 170 kV/50 kA GIS 的短路认证。2022 年,LS 电气获得韩国首个 170 kV 环保型 GIS 项目订单,将于 2023 年 11 月前完成 10 台该型环保 GIS 的供应,并将于 2024 年初正式投入运营^[16]。



图 4 韩国首个环保型 170 kV GIS

2021 年,S&C Electric Company 于美国芝加哥推出采用 C₄F₇N/CO₂ 气体的 38 kV 地下配电开关

柜。该开关柜与同公司使用 SF₆ 的 Vista 开关设备具有相同的性能、可靠性、额定值和占地面积,且在潜水式和中压开关柜中的总碳足迹最低^[17]。



图5 Vista 绿色地下配电开关柜

整体上,国外对于环保绝缘气体的研发起步较早,应用面已经涵盖低、中、高多种电压等级以及 GIS、GIL、CT 等多种类型气体绝缘设备。事实上,通用电气公司、日立能源对于旗下环保绝缘气体设备研发应用的路线图已制定至 2025 年,未来环保绝缘气体的应用势必会涵盖更多电压等级和种类,环保绝缘气体设备应用方兴未艾。

3 国内气体绝缘设备研发及应用

国内对于环保绝缘气体设备的研发及应用现处于起步阶段。2016 年以来,电网公司联合诸多科研院所、研究机构和设备生产厂家开展了一系列环保绝缘气体应用可行性研究及设备研发。表 3 为近年来国内部分环保绝缘气体设备的研发及应用情况^[18]。

其中,南方电网云南曲靖麒麟供电局于 2021 年 4 月 29 日在麒麟区 10 kV 幸福小区线投运的环保型气体绝缘环网柜,系国内首台采用环保气体作为“开断介质+绝缘介质”的 12 kV 环网柜在电网示范运行。该开关设备创新性采用 C₄F₇N 混合环保气体作为开断和绝缘介质的“微负压+零表压”产品路线,特别适用于高海拔、低温的区域,实现了环保气体在低充气压力下开断和绝缘技术的重大突破,有效解决了气体绝缘开关设备在微负压下的开断和绝缘问题,以及气体绝缘开关设备运行于高海拔地区的充气隔室漏气和鼓包问题,为低碳环保、坚强配电网提供安全可靠的有力支持^[19]。

上海 110 kV 宁国变电站于 2022 年 12 月 5 日顺利投运国内首台(套) 110 kV C₄F₇N 环保气体 GIS。在 GIS 设备全寿命周期内,采用的 C₄F₇N 环保气体在相同压力下绝缘性能约为 SF₆ 气体的两倍,且能够减少近 100% 的碳排放,满足电网设备安全

运行要求。该设备投运是落实“双碳”行动的又一次成功实践,标志着电力系统设备选型向环境友好类型又迈进一步,对环保组合电器设备在电力系统进一步推广应用具有重要意义^[20]。

表 3 国内环保绝缘气体设备研发及应用情况

序号	气体类别	设备类型	应用情况	时间
1	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 环网柜	广州	2021-09
2	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 开关柜	浙江	2021-06
3	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 柱上负荷开关、断路器和 12 kV 环网柜	云南	2019-12
4	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 环网柜	安徽	2021-05
5	C ₄ F ₇ N/CO ₂	10 kV 气体绝缘变压器	陕西	2021-05
6	C ₆ F ₁₂ O/CO ₂	12 kV 环网柜	通过型式试验	2018-08
7	C ₄ F ₇ N/CO ₂	126 kV GIS 用母线、隔离开关和接地开关	通过型式试验	2019-11
8	C ₄ F ₇ N/CO ₂	126 kV GIS 用母线、隔离开关、接地开关、PT 和 CT	通过型式试验	2021-01
9	C ₄ F ₇ N/CO ₂	1000 kV GIL	通过型式试验	2020-07
10	C ₄ F ₇ N 混合气体	12 kV 环网柜	云南	2021-04
11	C ₄ F ₇ N 混合气体	110 kV GIS	上海	2022-12
12	C ₅ F ₁₀ O 混合气体	35 kV CT	四川	2022-11



图6 云南 12 kV 环保型气体绝缘环网柜



图7 安装完成的 110 kV C₄F₇N 环保气体 GIS 完整间隔

总体来看,现今国内中、低电压等级下环保绝缘气体输配电设备的研发应用颇有进展,但高电压等级下的应用多处于型式试验阶段,示范应用较少。环保绝缘气体设备的投运需要进一步积累实际应用数据与相关运维经验验证其应用可靠性,设备运行产生的有害气体处理与检测、气体与设备内部材料的相容性等可能面临的技术问题仍需进一步研究解决。

4 结 论

上面对常见环保绝缘气体的基本特性参数进行了比较,分析了其应用于气体绝缘输配电设备的可行性;介绍了目前国内外对于环保绝缘气体的示范应用情况。目前环保绝缘气体的主要应用集中在全氟化酮、全氟化腈上,尤其是 $C_3F_{10}O$ 、 C_4F_7N 混合气体。国外已经推出多种类型、多种电压等级的环保绝缘气体输配电设备并实现示范运行,国内相关应用多集中于低、中电压等级设备,高电压等级设备应用处于起步阶段。

尽管近些年对于环保型气体绝缘介质的研究取得了一些突破,但仍存在设备运行产生的有害气体处理与检测、灭弧场景需要考虑的断路器结构调整等技术问题需要解决,仍需进一步积累设备研发、实际应用与运维策略的总结,逐步排查并解决各类理论和技术问题。环保绝缘气体的应用发展需要电气、物理、化学等多学科领域的交叉融合,需要进一步联合设备制造企业、电网公司、科研院所等开展合作研发,逐步探索并实现环保绝缘气体的进一步推广应用,助力减少气体绝缘输配电设备对使用 SF_6 的依赖,最终促进电力工业“2030 年碳排放达峰,2060 年碳中和”减排目标的实现。

参考文献

- [1] 唐炬, 杨东, 曾福平, 等. 基于分解组分分析的 SF_6 设备绝缘故障诊断方法与技术的研究现状[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 41-54.
- [2] FU Yuwei, YANG Aijun, WANG Xiaohua, et al. Theoretical study of the neutral decomposition of SF_6 in the presence of H_2O and O_2 in discharges in power equipment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(38): 385203.
- [3] FANG Xuekun, HU Xia, GREET Janssens-Maenhout, et al. Sulfur hexafluoride (SF_6) emission estimates for China: an inventory for 1990-2010 and a projection to 2020[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(8): 3848-3855.
- [4] RABIE M, FRANCK C M. Assessment of eco-friendly gases for electrical insulation to replace the most potent industrial greenhouse gas SF_6 [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(2): 369-380.
- [5] ZHANG Boya, XIONG Jiayu, CHEN Li, et al. Fundamental physicochemical properties of SF_6 -alternative gases: a review of recent progress[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(17): 173001.
- [6] COOPER F S. Gas dielectric media: US2221671A[P/OL]. 1940-11-12 [2022-12-10]. <https://patents.google.com/patent/US2221671>.
- [7] DEVINS J C. Replacement gases for SF_6 [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1980, 15(2): 81-86.
- [8] 李伟, 张晓星, 傅明利, 等. 环保绝缘气体 C_4F_7N 研究及应用进展 I: 绝缘及电、热分解特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3535-3552.
- [9] 张晓星, 田双双, 肖淞, 等. SF_6 替代气体研究现状综述[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 2883-2893.
- [10] BRAND K P. Dielectric strength, boiling point and toxicity of gases-different aspects of the same basic molecular properties[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, EI-17(5): 451-456.
- [11] Hitachi Energy. World's first gas-insulated switchgear installation with eco-efficient gas mixture [EB/OL]. [2022-12-10]. <https://www.hitachienergy.com/about-us/case-studies/reference-ewz-oerlikon-substation-switzerland>.
- [12] KIEFFIL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF_6 in electrical grids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(2): 32-39.
- [13] ABB. ABB wins \$ 40 million order for eco-efficient substation in Germany [EB/OL]. (2018-11-5) [2022-12-10]. <https://new.abb.com/news/detail/9877/abb-wins-40-million-order-for-eco-efficient-substation-in-germany>.
- [14] Hitachi Energy. Hitachi Energy to provide world's first SF_6 -free 420 kV gas-insulated switchgear technology at TenneT's grid connection in Germany [EB/OL]. (2022-11-9) [2022-12-10]. <https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/11/hitachi-energy-to-provide-world-s-first-sf6-free-420-kv-gas-insulated-switchgear-technology-at-tennet-s-grid-connection-in-germany>.

参考文献

- [1] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [2] 董新洲,王珺,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.
- [3] 王珺,董新洲,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的实现与试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 172-178.
- [4] 张慧芬,桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 65-71.
- [5] 李帆,李阳林,张宇,等. 架空输电线路涉鸟故障分析与防范[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 92-99.
- [6] 蒋文超. 中性点接地方式在电力系统中的作用及意义[J]. 中国科技博览, 2010, 12(30): 387-388.
- [7] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [8] 郭丽伟,薛永端,徐丙垠,等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [9] 张利,杨秀媛,王丽婕,等. 中性点不接地系统单相接地故障定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4069-4076.
- [10] 余斌,尹项根,朱维钧,等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 72-79.
- [11] 蔡德福,施通勤,周鲲鹏,等. 鄂西电网受灾原因及抗灾能力提升措施[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 96-103.
- [12] 阎博,张昊,郭子明,等. 基于多源数据融合的电网故障综合分析 with 智能告警技术研究与应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 39-46.
- [13] 贾鹏飞. 基于 Matlab 仿真的谐振接地系统单相接地故障分析[J]. 现代电子技术, 2012(23): 200-202.
- [14] 董晓刚,邵玉槐,郑宇明,等. 消弧线圈接地系统单相故障选线的研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 22(2): 75-77.
- [15] 张新一. 电力系统间歇性接地故障识别方法的探究[J]. 山东商业职业技术学院学报, 2018, 91(2): 99-102.
- [16] 李辉,唐轶,孙常青. 谐振接地系统单相接地故障仿真分析[J]. 工矿自动化, 2012(1): 51-55.
- [17] 陈景龙,王聪. 小电流接地系统单相接地故障分析[J]. 山东电力技术, 2017, 34(7): 32-36.
- [18] 林林,金震. 配电网单相接地故障定位研究[J]. 中国科技信息, 2012, 20(23): 98-99.
- [19] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- [20] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
- 作者简介:**
 卫佳奇(1992),女,工程师,研究方向为电力系统继电保护;
 袁明哲(1985),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用;
 陈翔(1991),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及电力设备运行维护;
 令狐静波(1993),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及二次系统运行状态评估;
 曹柯(1985),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护;
 许立志(1981),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护。
 (收稿日期:2022-08-12)
- (上接第 16 页)
- [15] Hitachi Energy. Hitachi Energy collaborates with Eversource to install the first Econiq™ 420-kilovolt circuit-breaker in the US[EB/OL].(2022-8-31)[2022-12-10].<https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/08/hitachi-energy-collaborates-with-eversource-to-install-the-first-econiq-420-kilovolt-circuit-breaker-in-the-us>.
- [16] Korea Electric Newspaper. LS Electric won Korea's first 170 kV eco-friendly gas insulated switchgear business[EB/OL].(2022-10-18)[2022-12-10].<https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=309969>.
- [17] S&C Electric Company. S&C Electric Company Introduces New Sustainable Switchgear Design[EB/OL].(2021-06-14)[2022-12-10].<https://www.sandc.com/en/news/sc-news/sc-electric-company-introduces-new-sustainable-switchgear-design>.
- [18] 肖淞,石生尧,林婧桐,等.“碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF₆ 控制策略分析[J/OL].中国电机工程学报:1-23[2022-12-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.0835.002.html>.
- [19] 厦门华电开关有限公司.厦门华电 Airing 环保型负荷开关方案助力云南曲靖电网打造“绿色电网”[EB/OL].(2021-11-16)[2022-12-10].<https://www.huadianswg.com.cn/news/766.html>.
- [20] 中国电力网.国内首台(套)110千伏 C4 环保气体 GIS 设备在上海投运[EB/OL].(2022-12-07)[2022-12-10].<http://www.chinapower.com.cn/dww/sbdt/20221207/178540.html>.
- 作者简介:**
 靳梦磊(2000),男,硕士研究生,研究方向为环保绝缘气体。
 (收稿日期:2022-12-30)