

交流气体绝缘输电线路载流量计算方法综述

高海英¹, 黄琦¹, 朱玉玉¹, 曾文慧², 黄埔生³, 时浩添¹, 许文杰²

(1. 西南科技大学信息与工程学院, 四川省 绵阳市 621010;

2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川省 成都市 610095;

3. 中国人民解放军 32377 部队, 北京市 昌平区 100192)

A Review of Current-carrying Capacity Computation Methods for AC Gas-insulated Transmission Lines

GAO Haiying¹, HUANG Qi¹, ZHU Yuyu¹, ZENG Wenhui², HUANG Pusheng³, SHI Haotian¹, XU Wenjie²

(1. School of Information and Control Engineering, Southwest University of Science and Technology,

Mianyang 621010, Sichuan Province, China;

2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610095, Sichuan Province, China;

3. Chinese People's Liberation Army Unit 32377, Changping District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Gas-insulated transmission lines (GIL) have become a preferred solution for long-distance, high-capacity power transmission systems due to their advantages of high current capacity, low loss, high reliability, and environmental friendliness. The current-carrying capacity of GIL is a critical parameter for evaluating power transmission efficiency and ensuring system safety, with its accurate computation being fundamental for controlling cable temperature rise. This paper provides an overview of the basic GIL structure. It comprehensively summarizes the current research status at home and abroad on methods for computing the current-carrying capacity of AC GIL systems. Key factors affecting the current-carrying capacity of GIL are thoroughly investigated. The analytical method based on thermal circuit models, the thermal network method utilizing nodal analysis, and the finite element method relying on computational simulations are analyzed, along with discussions of their respective advantages and limitations. Then, potential enhancement strategies are proposed from perspectives of material-structure optimization and intelligent thermal management design. Finally, aligning with modern power system demands, the critical challenges faced by GIL technology and prospects for future research directions are outlined, including transient current-carrying capacity calculation methods, digital 3D modeling, and intelligent management technologies.

KEY WORDS: GIL; current-carrying capacity; analytic computation method; thermal network method; finite element method

摘要: 气体绝缘输电线路(gas insulated transmission lines, GIL)因其大电流、低损耗、高可靠性及环境友好性等特点,逐渐成为长距离、大容量输电系统的优选方案。GIL 载流量是判断电力传输效率、保障系统安全运行的关键参数,其准确计算是控制线缆温升的基本前提。该文针对交流 GIL 输电系统,详细综述了 GIL 基本结构并总结了国内外载流量计算方法研究现状,全面分析了影响 GIL 载流量的关键因素。重点介绍了基于热回路模型的解析算法、基于节点解析的热网络法和基于计算机模拟的有限元法,阐述了各自的优缺点,并从材料结构优化设计与智能化热管理策略开发的维度总结了提高载流量的潜在方案。最后结合现代电力系统需求,阐述了目前 GIL 输电技术面临的关键挑战,并对 GIL 暂态载流量计算方法、数字化三维建模及智能化管理技术做出展望。

关键词: GIL; 载流量; 解析算法; 热网络法; 有限元法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2093

0 引言

随着技术的进步和电力需求的持续增长,气体绝缘输电线路(gas insulated transmission lines, GIL)因其具有载流量高、环境适应性强、稳定可靠、低故障性、长寿命及节约线路走廊等特点成为现代电力系统的重要组成部分^[1]。当前城市化建设进程逐步加快,城市电网线路走廊拥挤, GIL 能有效利用有限的空间资源,成为代替传统电缆的重要手段^[2]。GIL 采用管道密封绝缘,对特殊的地理和天气环境适应性强,在山区、河流等特殊地理环境中,架空线路的架设十分困难且成本极高,并且容易遭受风、雪、冰雹等自然灾害,而 GIL 输电系统不受地

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A20651)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U23A20651).

形限制、安装灵活,且能在恶劣的天气环境下表现出极强的稳定性与供电可靠性,对架空线路的替代也势在必行^[3]。此外,现代电力需求的增加对电力系统的负荷能力提出了更高要求,在相同的物理尺寸下,GIL的载流量更高,更易满足大容量输电的需求^[4]。因此,GIL有望成为未来主流输电形式之一。

国外对GIL的研发从20世纪70年代开始,1972年世界上第一条交流GIL输电系统在美国新泽西州的Hudson电厂落成,该条输电线路电压等级为242kV,载流量1600A^[5]。20世纪80年代,美国在Waltz Mill建成了当时世界上唯一的1200kV特高压GIL试验线段,单相长度420m,额定电流5000A^[6]。日本、德国、法国等国家也在20世纪七八十年代开始了对GIL输电技术的研发与应用,但在特高压GIL输电方面应用相对较少。

相比之下,国内对GIL的研发与生产起步较晚,但发展迅速。目前GIL在发电端的应用已相对成熟,在大容量输电、工业用电、储能电站等领域还处于发展阶段^[7]。国内率先开展特高压GIL输电技术研究和样机试制,2019年9月26日,苏通GIL综合管廊工程建成投运,电压等级达到1000kV,载流量达到6300A,单相长度达5.8km,是目前全球电压等级最高、输电容量最大、技术含量最高的GIL交流输电工程,也是首次将特高压交流GIL技术应用于重要输电通道的工程^[8]。该项工程的成功建设与投运,标志着GIL输电在城市负荷中心大规模应用具有可行性,也为后续发展提供了技术参考。

为了确保电力系统的安全稳定运行,在投运前需对输电线路载流量进行准确计算,使得导体截面利用率最大化,并为设计环节提供反馈指导^[9]。载流量是衡量输电线路负载能力的重要指标,直接影响到线路的热稳定性、绝缘性能及设备使用寿命。相较于架空线路和电缆,GIL因其结构特殊性使得载流量计算面临着更多挑战^[10-12]。GIL的载流量不仅受导体截面、材料损耗和绝缘介质特性等因素的影响,还与散热条件、环境温度及导体布置方式密切相关,计算过程尤为复杂。因此,GIL载流量计算方法的深入研究,对于确保GIL截面利用率最大化、保障电力系统安全稳定运行、提高输电效率以及推动技术进步等方面具有重要意义。准确的载流量计算不仅可以优化GIL的设计,还可为后续运维提供可靠依据,从而更好地服务于现代电网的发展需求。

该文针对交流GIL输电线路,分析了GIL的结构及优势,梳理了GIL载流量的关键影响因素;阐

述了载流量的主流计算方法,并从设计与运行层面总结了提高载流量的方法;最后对GIL未来发展趋势做出展望,为GIL的后续发展提供参考。

1 GIL基本结构与载流量概述

1.1 GIL概述

随着电力市场的发展,GIL的应用场景逐渐趋于多场景化,尤其适用于土地资源紧张、环境要求高、输电容量大的场合。随着技术的进步和成本的降低,GIL的市场应用前景将更为广阔。

1.1.1 GIL结构分析

GIL是一种采用纯SF₆气体或特殊混合气体绝缘、外壳与导体同轴布置的高电压、大电流电力传输设备^[13],主要由铝合金外壳、铝合金中心导体、绝缘气体、绝缘子和双密封圈法兰构成,外壳是容纳绝缘气体的压力容器,中心导体用于承载工作电流,绝缘子可分为柱式绝缘子和盆式绝缘子,通常采用内部安装并在其附近装设微粒陷阱来捕捉金属微粒,提高GIL绝缘可靠性^[14]。GIL设备普遍采用标准单元设计,标准直线管道长度一般为7~18m,并在壳体两端焊接用于管道连接的法兰。GIL管道综合示意如附录中图A1所示^[15]。

图A1(a)为苏通1000kVGIL综合管廊隧道实景,图A1(b)为GIL三维模型,图A1(c)为GIL横截面示意图。图A1(c)中, D_{di} 为导体内半径, D_{do} 为导体外半径, D_{ki} 为壳体内半径, D_{ko} 为壳体外半径。GIL结构类似于SF₆气体绝缘金属封闭开关(gas insulated metal-enclosure switchgear, GIS)中同轴放置的管道母线,区别在于GIL是一种输电方式,而GIS主要用于电力系统的保护与控制,如断路器、隔离开关、母线连接等^[16]。

1.1.2 架空线、电缆和GIL对照分析

架空线、电缆和GIL是电力传输系统中最常见的3种方式,GIL的电气特性与架空线路相似,三者主要区别在于以下几点:

1) 应用场景。架空线路通过铁塔悬挂于空中,建设成本较低,常用于长距离输电;电缆多采用直埋敷设,适用于城市密集、便于施工的区域;而GIL通常安装于地面、地下直埋或隧道内,可减少地面使用限制和视觉污染,适用于高压架空线入地、环境恶劣、输电走廊拥挤的场景^[17]。

2) 载流量。架空线的载流量受导线类型、截面积、环境温度等影响,用四分裂导线的典型架空线额定载流量为3000A;电缆载流量主要受导体材料、型号、敷设方式和环境温度等影响,典型

2500mm² 截面积的铜芯电缆额定电流为 2000A^[18]；GIL 载流量主要受导体截面积和应用场景的影响，550kV 的 GIL 在隧道和直埋式布置方式下的额定电流是 3000~4000A，800kV GIL 的额定电流可达到 5000A，1200kV GIL 的电流可达到 6000A，而用于地面上布置时，电流可达到 8000A。

3) 输电损耗。架空线直接暴露在空气中，受环境条件影响最大，输电损耗最大；电缆内部使用的绝缘件数量较多，输电损耗通常高于 GIL，同等条件下，在 400kV 电压等级、1100MVA 功率等级输电系统中，交联聚乙烯电缆输电损耗约为 GIL 的 1.5 倍；相比之下，GIL 采用气体绝缘技术，介电损耗几乎可忽略不计，同时采用了大截面的导体，导体损耗远低于架空线和电缆^[19]。

4) 工程安全与环境影响。架空线路暴露在空气中，易受恶劣天气和自然灾害的影响，需定期检查与更换，且对周围环境有一定的电磁干扰；电缆埋设于地下，需要较大的地下空间，且电缆故障不易被发现，维护成本较高^[20]；而 GIL 是一种金属的刚性结构，采用管道密封绝缘，通常不受气候和特殊地形等环境因素的影响，且 GIL 年漏气率通常只有 0.1%，维护成本较低，还具有电磁辐射小、适合大容量、长距离输电等特点^[21]。

3 类输电方式对比总结如附录中表 A1 所示，结合上述内容可见，在各类型线路输送容量接近的情况下，GIL 在大容量、高安全性输电方面具有明显优势，综合性能最佳，适用于城市电网和复杂环境等高要求输电系统中。

1.2 GIL 载流量定义与研究现状

GIL 载流量定义为在特定条件下，GIL 能够安全、稳定传输的最大电流值，它是 GIL 设计和运行中的一个关键参数，直接关系到输电系统的安全稳定运行和经济效益^[22]。而在定义中并未明确对“特定条件”的界定，忽略了实际运行中的动态变化，且“安全、稳定”具有片面性，未体现全寿命周期内的动态安全裕度。载流量是 GIL 系统的核心运行参数，涉及到众多参数变化以及系统安全，需考虑动态运行条件与多维度安全标准，因此其计算的准确性尤为重要。

近年来，随着电力行业的发展和用电量的增加，直埋、沟道、隧道等多种敷设方式下的 GIL 回路数不断增加，导致线缆本体周围环境热源也随之增加，相互影响，使得 GIL 温度场复杂化，载流量的计算也更为困难^[23]。目前国内外学者们对载流量的主流研究方法包括实验测量法、解析计算法和数

值模拟法^[24-26]。其中，实验测量法通过搭建 GIL 输电模型，模拟 GIL 的实际运行测量得到其载流量，但该方法局限性较强，应用不广泛^[26]。数值模拟技术包含热网络模型(thermal network models, TNM)和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法^[27]。

解析算法主要基于 GIL 的热回路特性，构建等值热回路模型，通过计算导体及外壳的电阻、绝缘气体的热阻来估算载流量，但目前尚无 GIL 载流量解析计算的规程规范^[28]。文献[29]中给出了 GIL 载流量估算的基础公式，但没有进一步给出求解计算方法。文献[30]根据 GIL 的结构及热回路特点，对比 GIL 与电缆的热回路差异，提出了 GIL 载流量解析计算方法，对各部分电阻及热阻进行了详细分析。

热网络法以少量节点温升为求解对象建立热力学微分方程，将线缆及周围环境简化为一个电路网络模型，通过求解模型中的热平衡方程来确定 GIL 的载流量^[31]。文献[28]建立了一种考虑接触指和屏蔽结构的 TNM，将 GIL 气室轴向对称划分为两部分，根据传热机理建立模型。文献[32]提出了考虑 GIL 上下两部分之间不同换热过程的 TNM，推导了相应的热力学微分方程，结果表明该方法的计算时间比 CFD 模拟节省了 3 个数量级以上，且精度较高。

CFD 仿真采用有限元法、有限体积法或时域有限差分法求解电磁-流-热耦合偏微分方程，通过 ANSYS、COMSOL 等仿真软件建立 GIL 多场耦合模型，对 GIL 的热场及电场进行模拟计算，相比之下该方法计算量较大、耗时较长，且需要多学科知识储备^[33]。文献[34]开展了特高压 GIL 热平衡、伸缩节损耗和典型直线单元整体热场的仿真计算，搭建了特高压 GIL 温升测试平台，获得了特高压 GIL 的温度分布，从而得到最大允许电流。文献[35]采用有限元法模拟了含氟腈-CO₂ 混合气体 GIL 的温升行为与载流能力，研究结果表明混合气体填充下的 GIL 传热性能提高但载流能力有所下降，为大容量能量传输提供了解决方案。

1.3 GIL 多特性与载流量的关联分析

1.3.1 温升特性与载流量反馈机制

GIL 的载流能力与温升特性直接相关，载流能力的计算能够在给定导体最高允许温度下计算出最大允许负载电流；反之，给定电流负载下对导体温度进行计算与仿真，能够保证 GIL 在实际运行时的最高工作温度不超过绝缘材料长期承受温度的

上限,从而提高电力输送效率,并保障 GIL 使用寿命。

1) 载流量受温升特性的制约:若 GIL 中的热量无法及时散发, GIL 温度随之升高,影响绝缘件的使用寿命,甚至可能超过其允许的最高工作温度,导致 GIL 损坏或引发安全事故^[36]。因此,在设计 and 运行 GIL 时,必须充分考虑其温度分布,确保在规定的载流量下 GIL 能够稳定运行。

2) 温升特性影响载流量计算的参数表征:在计算 GIL 载流量时,需要充分考虑其温升效应带来的参数变化。例如,在计算 GIL 的温升时,需要考虑绝缘气体的热阻、外壳的热阻以及周围环境的散热条件等因素。这些因素都会影响 GIL 的散热效果,进而影响载流量。

1.3.2 电气特性、机械特性等与载流量的关联

GIL 具有大截面导体、低电容特性、气体绝缘等特点,这些特点使其电气特性优良,载流量高、输送容量大^[37]。GIL 导体的截面积非常大,通常是电缆和架空线数十甚至数百倍,大截面使得导体内部的电子移动阻碍更小,输电损耗很低,因此其载流能力远大于电缆或架空线。GIL 的同轴设计、金属封闭结构使得导体被绝缘气体包围,导体与壳体之间空气间隙很小,且壳体直接接地,有助于集中电场,减少电场的分布空间,因而降低线路电容,即使在长距离输电时也无需进行无功补偿,减少了能量损耗。此外, GIL 通常采用 SF₆ 等绝缘性能优于空气和固体绝缘材料的气体作为绝缘介质,灭弧能力优良,因此 GIL 能够承受高电压、大电流、长距离输电^[38]。

GIL 导体和壳体通常使用铝合金等材料,该类材料具有密度低、硬度高、延展性好等特点,使得 GIL 拥有良好的机械性能,这也是 GIL 能够在各种复杂环境下长期高电压、大电流运行的关键^[39]。GIL 具有高强度结构和强抗震特性,能够承受较大的内部压力和外部载荷,不易变形、损坏或断裂,在地震等极端条件下也能稳定运行,保证了高电流传输的安全性。GIL 拥有良好的弹性特性,可以减少因安装应力或运行中的热胀冷缩导致的永久形变。但 GIL 在长期运行过程中会产生热量,长时间的累积不可避免会产生热膨胀和收缩,从而影响其机械应力分布,进而影响载流量。因此,合理的热补偿设计可以减少热应力,保证 GIL 在不同温度下的稳定性。

此外,绝缘气体材料、气体压强、绝缘子形状设计都与载流量大小密不可分^[40]。在设计和运行

GIL 时,必须充分考虑各个特性对载流量的耦合作用,准确计算载流量大小,建立精确的仿真模型,使 GIL 能够在保证输电可靠性与安全性的同时将载流能力最大化,提高输电效率。

2 GIL 载流量关键影响因素

根据 GIL 的结构、材料特性以及安装环境可知,影响 GIL 载流量的因素主要有通风风速、外界温度、周围介质热阻、GIL 相间距、气体压强、导体及外壳电阻率等。根据 GB/T-11022^[41]的相关规定,从偏严角度出发,导体最高允许温度为 90℃,外壳长期运行最高允许温度为 40℃^[42]。通常情况下,敷设于地面的 GIL 载流量由导体的最高温度决定,直埋型 GIL 的载流量则由外壳允许的最高温度决定^[43]。因此,最大载流量的值即为线缆温升的影响结果,可直接对温升的影响因素进行分析^[44]。GIL 最高允许温度和最大载能力的关键影响因素及其相互作用如附录中图 A2 所示。

由图 A2 可见, GIL 载流量是多种因素耦合作用的结果,最终体现在 GIL 的最高允许温度上。为保证 GIL 的温度低于最高允许运行温度,现场一般采取的措施是减小 GIL 载流量,但会降低 GIL 的输电效率和利用率^[45]。为了确保输电系统的可靠运行和经济效益,研究 GIL 设计、制造及运维全过程中可优化条件对载流量的影响,并在投入运行前在不同条件下进行温升校核,是提高载流量和散热效率、实现大容量电力传输的重要手段。

2.1 设计制造环节对 GIL 载流量的影响

在设计阶段,材料的合理选择和结构的优化,可有效提高 GIL 的散热效率和载流量。导体的电导率、热导率、热膨胀系数和机械强度等都会对 GIL 的载流能力产生直接影响,电导率越高、横截面积越大,在相同条件下产生的热量便越少。热导率高的材料有助于提高散热效率,而热膨胀系数影响了极端温度下的尺寸稳定性,若系数过大,机械应力会随之增加,从而影响 GIL 的整体结构稳定性和寿命^[46]。此外, GIL 的壳体材料还需考虑耐腐蚀性,由于 GIL 安装环境通常较为复杂,壳体的耐腐蚀性对于长期运行下的高可靠与低维护性能非常重要^[47]。

除上述壳导材料的影响外,绝缘子的选择和导体的连接方式对 GIL 载流量的影响同样重要。导体单元之间、导体与绝缘子之间的连接处会产生接触电阻,连接方式选择不当将会导致接触电阻过大,使得温度升高,并影响绝缘介质的性能。绝缘子的热稳定性决定了其在高温环境下是否能保持良好

的绝缘性能^[48]。如果绝缘子热稳定性不足，可能导致绝缘性能下降，甚至引发绝缘击穿，从而限制 GIL 的载流量。

2.2 运行环节对 GIL 载流量的影响

除了设计和制造过程中的固有特性对载流量的影响，载流量还取决于 GIL 的运行环境和执行条件，包括环境温度、气压、相间距以及系统的散热能力等^[49]。

环境温度是影响 GIL 载流量的重要因素之一。随着环境温度的升高，GIL 内部的绝缘气体和导体材料的电阻率可能会发生变化，进而影响载流量^[50]。一般来说，高温会增加导体的电阻和绝缘气体的热导率，导体和壳体产热量升高，导致 GIL 的载流量有所下降。

GIL 内部介质采用绝缘气体，其内部气压的稳定性对载流量也有显著影响。气压的变化会影响绝缘气体的密度和绝缘性能，进而影响 GIL 的电气性能。现有研究表明，GIL 通入电流后，热损耗导致导体及外壳温度升高，进而改变了其内部绝缘气体的温度分布^[51]。GIL 内气体沿导体表面向上流动，经导体顶部上升到外壳，沿外壳内表面下降到外壳底部，最后回流到导体底部。

GIL 在运行过程中会产生大量的热量，如果散热不良会导致导体温度升高、电阻增大、载流量下降甚至引发故障^[52]。如上所述，GIL 内部介质温度场分布不均匀，顶部温度较高，底部较低。因此，在设计、材料选择、热管理策略开发等过程实施中，需重点关注 GIL 顶端的散热。

3 GIL 载流量计算方法

3.1 解析算法

目前国内主要采用 IEC-60853 标准用于计算电缆的暂态载流量，IEC-60287^[53] 标准用来计算电缆的稳态载流量，而对于 GIL 载流量的计算尚无规范^[54]。因此，研究者们计算 GIL 载流量时多数参考 IEC-60287 标准，基于稳态温度场理论，结合 GIL 本身结构及应用场景，建立等值热回路模型进行分析计算^[55]。因此，该方法无法模拟短时过载或负荷波动的瞬时状态，仅适用于稳态电流计算。GIL 除了在两个单元结构的连接区域附近有局部温度升高外，沿轴向温度梯度一般很小，因此在直段单元内，轴向热传导可忽略不计^[56]。

由图 A1 所示的 GIL 结构可见，当内部导体中通过电流时，外壳中也会产生感应电流，因此二者都存在发热损耗，热量传递给导体与壳体之间的绝

缘气体，气体温度升高，存在热阻。为了方便理解，将热回路与电回路建立对偶关系，如附录中表 A2 所示。

使用等值热回路法分析 GIL 的温升时，假设载流导体均匀发热且向周围均匀传热，等效热阻可分为 3 个部分：绝缘气体的热阻、外壳防腐层的热阻和 GIL 周围介质热阻，构建等值热回路如附录中图 A3 所示^[57]。

图 A3(a)为 GIL 轴向截面，图 A3(b)为 GIL 等值热回路模型。图 A3(b)中， R_1 为绝缘气体等效热阻； R_2 为外壳热阻； R_3 为 GIL 周围介质热阻； Q_1 为导体发热源，箭头方向为热流传递方向； Q_2 为外壳发热源，导体和壳体的发热源相当于电回路中的电流源，为热回路提供稳定热源；A 点为导体最大允许温度 θ_c ；B 点为壳体最大允许温度 θ_s ；C 点为 GIL 外界温度 θ_0 ^[30]，各节点间的温差即为电回路中的电压差。导体、壳体最大工作温度和外界温度已知，载流量计算的核心就是计算热回路中各部分热阻^[58]。结合 GIL 的结构特征及国际标准 IEC 60287 中电缆载流量的计算方法，可得出 GIL 载流量计算公式如式(1)所示^[22]。

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_0}{R_c [R_1 + n(1 + \lambda_1) \cdot R_3]}} \quad (1)$$

式中： R_c 为导体在最高工作温度下单位长度的交流电阻； n 为每相导体根数； λ_1 为外壳环流损耗占导体损耗的比例，即损耗因数^[59]，计算方法可参照 IEC-60287 中电缆金属护套的损耗因数^[60]。

GIL 的传热形式可分为热传导、热对流和热辐射^[61]。其中，热传导包括了导体内部的热传导和壳体内部的热传导；热对流包括了绝缘气体域、外部空气域、导体对流换热边界以及壳体对流换热边界；热辐射包括了导体热辐射和壳体热辐射^[62]。当 GIL 处于热稳定的状态，仅需考虑热对流与热辐射。根据热传递模型结合 GIL 结构特点，即可计算两类传热形式传递的热量^[51]。计算出热流 Q 后，便可得出热阻值，绝缘气体的等效热阻 R_1 即为辐射热阻和对流热阻并联的结果。

正常运行时，GIL 导体和外壳电阻值需要同时考虑温度影响、集肤效应和邻近效应。导体在最高工作温度下单位长度的交流电阻 R_c 可按式(2)计算，外壳的交流电阻与之类似。

$$R_c = R_{0c} [1 + \alpha_c (\theta_c - 20)] \cdot (1 + \gamma_c) \quad (2)$$

式中： R_{0c} 为导体 20℃时的单位长度的直流电阻； α_c 为导体材料 20℃时的电阻率温度系数； γ_c 为导体的集肤效应和邻近效应系数。

由于 GIL 外部介质的传热特性与电缆外部介质的传热特性基本一致,因此,可以参照 IEC-60287 中的计算方法进行计算^[63]。根据 GIL 内部热传导公式导出允许电流,将导体和 GIL 表面之间的温度差与 GIL 的损耗联系起来。

在 GIL 载流量的计算中,解析算法虽具有高效、参数明确等优势,但其局限性也非常显著。解析算法将温度场假设为一维稳态分布,忽略三维热传导、气体湍流等复杂耦合效应,也未考虑材料物性参数的非线性特性,且对于动态负荷的瞬态响应不足,仅适用于稳态电流计算。该方法虽然计算简单,但仅适合用于 GIL 温度的大致估算。因此,解析算法还存在一定的改进空间,如将环境参数进行集成,结合实时监测数据,动态更新环境参数,提高稳态计算的准确性。还可引入混合解析-数值方法,采用有限元分析工具模拟绝缘气体对流换热,以数值仿真结果对解析计算的对流系数进行修正。

3.2 热网络法

热网络法把 GIL 细分为具有热量传递的单元节点,以少量节点温升为求解对象建立热力学微分方程,无论是热传导、热对流或是热辐射,节点之间均使用热阻与热容代替,通过对各节点建立热平衡方程进行求解,能够捕捉各个节点的瞬态温升^[64-66]。该方法允许快速参数化,使其在早期设计阶段进行灵敏度分析具有很强的竞争力,特别是在动态载流计算和参数扫描等情况下进行优化设计。相比于构建热回路的解析算法,热网络法更为详细和精确,能捕捉到系统关键部位温度分布,若构建节点足够,甚至能捕捉到系统的三维温度分布,但支路过多会导致计算过于复杂,且容易出现耦合错误。

以文献[32]中提出的改进热网络模型进行分析,该模型通过考虑分布的热对流阻力来捕获 GIL 上下空间的瞬态温差。在导体温升计算中,提出假设:1) 固体和气体材料的导热系数和热容在温升范围内保持不变;2) 由于 GIL 的安装多处于封闭环境,不存在风和太阳辐射的影响;3) 由于气体的透明度和低密度,忽略了气体的辐射传热;4) 由于 GIL 导体和壳体厚度都很小,忽略了导体和壳体的热传导^[67]。因此,在热网络法中热平衡包含两种不同类型:1) 导体的欧姆损耗 P_e 等于绝缘气体对流传热 Q_{cc} 和外壳内壁辐射传热 Q_{cr} 的综合效应;2) 导体欧姆损耗 P_e 与壳体欧姆损耗 P_e 总和等于壳体外表面与周围空气的对流传热 Q_{cc} 和辐射传热 Q_{cr} ^[68]。

文献[13]中表明,运行中导体的上下温度是相同的,不存在温差,因此,单元节点可建立在导体表面 A、绝缘气体顶部 B、壳体上表面 C、绝缘气体底部 D 和壳体下表面 E,并建立热网络模型如附录中图 A4 所示。

图 A4 中, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为导体、外壳顶部和外壳底部的欧姆损耗, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 分别为导体外表面、绝缘气体顶部、壳体上表面、绝缘气体底部和壳体下表面的节点温度值, T_6 、 T_7 为环境温度, R_{ci} 为热对流电阻、 R_{ri} 为热辐射电阻、 C_i 为各部件的热电容。利用基尔霍夫电流定律和节点电压法推导出热对流和热辐射的热力学方程,建立微分方程如式(3)所示^[32]。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= \frac{Q_1}{C_1} - \frac{T_1(R_{c1} + R_{c2})}{C_1 R_{c1} R_{c2}} + \frac{T_2}{C_1 R_{c1}} + \frac{T_4}{C_1 R_{c2}} + \\ &\quad \frac{T_1^4 - T_3^4}{C_1 R_{r1}} + \frac{T_1^4 - T_5^4}{C_1 R_{r2}} \\ \frac{dT_2}{dt} &= \frac{T_1}{C_2 R_{c1}} - \frac{T_2(R_{c1} + R_{c11})}{C_2 R_{c1} R_{c11}} + \frac{T_3}{C_2 R_{c11}} \\ \frac{dT_3}{dt} &= \frac{Q_2}{C_3} + \frac{T_2}{C_3 R_{c11}} - \frac{T_3(R_{c11} + R_{c12})}{C_3 R_{c11} R_{c12}} + \\ &\quad \frac{T_6}{C_3 R_{c12}} + \frac{T_1^4 - T_3^4}{C_3 R_{r1}} + \frac{T_3^4 - T_6^4}{C_3 R_{r12}} \\ \frac{dT_4}{dt} &= \frac{T_1}{C_4 R_{c2}} - \frac{T_4(R_{c2} + R_{c21})}{C_4 R_{c2} R_{c21}} + \frac{T_5}{C_4 R_{c21}} \\ \frac{dT_5}{dt} &= \frac{Q_3}{C_5} + \frac{T_4}{C_5 R_{c21}} - \frac{T_5(R_{c21} + R_{c22})}{C_5 R_{c21} R_{c22}} + \\ &\quad \frac{T_7}{C_5 R_{c22}} + \frac{T_1^4 - T_5^4}{C_5 R_{r2}} + \frac{T_5^4 - T_7^4}{C_5 R_{r22}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中:导体热源 Q_1 主要来自电流产生的欧姆损耗;壳体热源 Q_2 、 Q_3 来源于感应电流产生的焦耳热,皆可通过求解涡流场方程进行量化。

该方法用于瞬态分析,可使用数值方法来求解式(3)所示的偏微分方程,确定导体最大允许温度后,迭代计算中通过调整电流,使得导体和壳体温度不超过其最大允许温度,最终的迭代结果即为 GIL 最大载流量。

3.3 有限元法

有限元法主要利用计算机程序模拟物理过程,通常采用数值分析技术和离散化方法^[69]。相比于解析计算和热网络法,有限元法可精确地模拟 GIL 内部复杂的热力学过程,对于热传递等非线性问题的处理更加灵活,但也伴随着复杂度的提升^[70]。有限元法用于求解微分方程组问题时,须要引进一些特定条件,其中包括初始条件及边界条件^[71]。初始条

件是指微分方程里面包含的未知函数，在初始状态下所满足的条件；边界条件是指微分方程组的解在场域边界上所要满足的条件^[72]。

应用有限元法计算 GIL 载流量，关键在于温度场的模拟，需要根据 GIL 运行环境及排列方式确定温度场的导热微分方程^[73]。基于有限元法的 GIL 载流量求解一般步骤如下：首先创建 GIL 的三维几何模型，包括确定导体、壳体、绝缘气体以及周围介质的物理性质；然后设定运行边界条件，如 GIL 初始温度、最大允许温度、GIL 与外界的热交换条件等；随后便可通过微分方程与耦合关系模拟 GIL 的热传递过程，考虑 GIL 内部和外部的相互作用；最后，设定收敛准则进行迭代求解，计算 GIL 的温度分布，基于温度分布即可计算出导体的最大载流量^[74]。

当前有限元分析在 GIL 载流量计算中呈现多种技术分化，主要可分为 3 类，其精度与计算成本大不相同。纯热场分析的计算速度最快，其忽略电磁场与流体场，将壳导体发热功率作为稳定热源加入到热模型中，属于稳态计算。电磁-热耦合分析通过求解麦克斯韦方程获取壳导体的损耗分布，再将损耗作为热源加入到稳态温度场，属于稳态计算。相比之下，电磁-热-流固耦合仿真能实现多物理场耦合，考虑了时变电流下的电磁损耗，能够模拟绝缘气体与外部空气的湍流对流，计算精度最高，属于瞬态仿真，但计算资源消耗极大且高度依赖边界条件。无论在何种计算方式下，GIL 处于热平衡状态是有限元仿真的收敛条件，长期允许载流量也取决于稳态热平衡^[75]。GIL 导体内外表面间和壳体内表面间主要以热传导的方式进行温度传递，热传导方程如式(4)所示^[76]。

$$\rho_T C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \nabla^2 T + Q \quad (4)$$

式中： T 为绝对温度； ρ_T 为温度 T 时导体或壳体的材料密度； C_p 为绝缘气体的恒压热容； Q 为热损耗； λ_T 为温度 T 时的导热系数； t 为时间。由于 GIL 导体和壳体的厚度较小，某些研究者们选择忽略热传导现象，可根据需求进行选择^[77]。牛顿冷却公式^[78]是描述流体与固体之间热交换最常用的数学模型，其侧重于描述局部对流换热现象，并假设流体和固体表面之间的对流换热完全均匀，具有简单直观的优势，如式(5)所示。

$$Q_{dl} = \Delta t h A \quad (5)$$

式中： Q_{dl} 为对流传递热量； Δt 为存在热对流的壁面与流体之间的温度差； h 为对流换热系数； A 为换热面积。热对流可分为自然对流和强制对流，当

GIL 安装于无风室内时，内外气体都为自然对流^[79]。热辐射包括导体的热辐射和壳体的热辐射，导体热辐射可等效为两个同心圆柱间的热辐射密度计算，在封闭空间内依据 Stefan-Boltzmann 定律^[80]，其表达式如式(6)所示。

$$Q_{df} = \frac{\sigma(\theta_c^4 - \theta_e^4)}{1/\varepsilon_{do} + D_{do}(1 + \varepsilon_{ki})/(\varepsilon_{ki} \cdot D_{ki})} \quad (6)$$

式中： Q_{df} 为导体辐射热量； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数； ε_{do} 为导体外表面的表面发射率； ε_{ki} 为壳体内表面的表面发射率； D_{do} 为导体外径； D_{ki} 为壳体内径； θ_c 为导体温度； θ_e 为壳体温度。依据 Stefan-Boltzmann 定律，单位长度水平敷设的单相 GIL 外壳热辐射密度可以用式(7)来计算^[80]。

$$Q_{kf} = \sigma \varepsilon_{ko} (\theta_c^4 - \theta_o^4) \quad (7)$$

式中： ε_{ko} 为壳体外表面的表面发射率。具体计算过程可参考文献[81]。

在实际工程应用中，通常会根据项目需求、资源可靠性、精度要求和时间要求选取合适的方法。解析算法主要基于物理定律和数学模型进行求解，计算过程简单、快速，但计算结果精度较低^[82]。热网络法通过节点解析建立 GIL 热网络模型，深入考虑 GIL 内部热传递路径。相比于解析算法，热网络法估计结果精度更高，且计算复杂度和时间复杂度远小于 CFD 模拟。CFD 模拟能够考虑 GIL 的结构细节和运行条件，精确模拟其在复杂工况下的性能，但对跨学科跨领域综合知识要求较高，计算较为复杂。此外，实际应用时可能需要多种方法来获得最佳结果。

4 提高 GIL 载流量的方法

提高 GIL 载流量是满足电力传输需求、提高电网可靠性、优化电网结构、降低运行成本以及适应未来电网发展趋势的重要手段^[83]。突破载流量计算与温度控制技术壁垒，不断进行技术革新和应用开拓，可使 GIL 技术在电力行业中发挥更加重要的作用。

4.1 设计与制造过程优化

优化设计与制造工艺是提高 GIL 载流量的核心路径之一，可以围绕“降损耗”与“增散热”两大核心，从以下 3 个方面进行优化。

1) 导体设计与材料优化。在导体材料选择上，采用电阻率更低的导体材料，例如退火高纯度铝或铜合金(如铜-银复合导体)，可减少欧姆损耗。在 GIL 结构上，导体设计可考虑多分裂结构，通过增加导体的有效散热面积来增强散热效果，且合理的

导体截面形状能减少电阻和集肤效应,达到提升载流量的效果。在 GIL 导体和绝缘件的电联结上,采用滑动触头插接方式,允许一定的轴向伸缩和角度偏转,可有效补偿热胀冷缩、降低接触电阻对温升的影响^[84]。另外,在金属导体表面进行镀层(镀银或化学镀镍)处理,可显著降低 GIL 电联结结构的接触电阻并抑制氧化。

2) 绝缘系统升级。在绝缘气体选择方面,考虑环保的同时选用导热性能优良且电气绝缘性能强的气体或混合气体作为绝缘介质,在保证安全的前提下适当提高气体压力,有利于增强 GIL 的散热效果^[85]。在气体填充前,可采用分子筛吸附和低温冷凝技术去除绝缘气体中的水分和杂质,提高气体纯度,确保气体绝缘强度与导热性能。此外,要达到纯 SF₆ 气体的绝缘性能,混合气体需提高气体压强,对密封技术提出了更高要求,可应用激光焊接或电子束焊接工艺,确保导体连接点与外壳接缝的气密性,减少气体泄漏风险。

3) 散热结构集成与制造。在 GIL 散热结构优化中,通过多层复合散热设计可显著提升其散热效率,进而提高载流量。在壳体表面可采用增材制造加工高密度散热翅片,并喷涂高辐射率涂层(如黑色阳极氧化铝,发射率 ≥ 0.9),可提高辐射散热效率。可对内部气体导流结构进行优化,增强绝缘气体的湍流换热,结合精密焊接工艺确保散热模块气密性。还可在导体与外壳间填充氮化铝陶瓷颗粒或嵌入微胶囊封装相变材料,通过降低热阻与吸收短时过载热量,降低系统整体温升。

4.2 智能化运维体系构建

1) 状态监测与预防性维护。对于绝缘气体状态监测,可部署气体纯度传感器与分解产物检测仪,实时监控气体绝缘性能,当绝缘气体纯度低于额定值或分解产物浓度超过阈值时,触发自动补气或净化程序,避免因气体劣化导致散热效率下降。对系统进行局部放电监测,使用红外热成像仪定期扫描导体接头,定位异常热点,或利用超声波局部放电检测仪识别绝缘缺陷,避免局部放电累积引发温升失控^[86]。此外,外壳的日常维护也是散热效率提升的重要环节,在 GIL 壳体暴露区域,可定期清洗外壳表面积尘,并喷涂防腐蚀涂层,恢复壳体的辐射散热效率。

2) 冷却系统优化。在冷却技术优化上,可在 GIL 系统中引入液体冷却技术,如使用冷却油对 GIL 导体进行冷却,以显著提高散热效率^[87]。在自动化控制层面,通过实施智能化热管理策略,集成

数据分析与决策支持,可以有效提高 GIL 的载流量和运行稳定性。为了实现 GIL 各部位温度实时监测,开发温度监测-数据管理-运维反馈的一体化热管理策略,利用传感器远程监测结果提供数据支撑,是实现 GIL 温度精准控制、载流量最大化提升的有效手段。由于热传导及自然对流的影响,GIL 通流元件上方的温升大于下方的温升,因此,应优先对通流元件上方温升进行监测^[87]。然后根据实时监测温度数据,自动调节 GIL 运行环境的通风系统与温控系统,如调整通风量、改变通风方向等,以维持 GIL 系统内部温度的稳定。

3) 智能运维系统升级。对于 GIL 系统运行层面,可建立 GIL 的数字孪生模型,输入实时运行数据(电流、温度、气体压力等),预测未来 6~24h 的负荷与温升趋势,并推荐最优载流量阈值,同时给出对应电流下最优散热方案。在 GIL 后期维护中,可利用人工智能算法分析红外热图与局部放电图谱,自动识别导体氧化、绝缘劣化等早期故障,并生成维护优先级列表^[88]。还可基于导体蠕变、绝缘老化等数据(如累计运行时间、过载次数),对在役 GIL 最小单元的剩余寿命进行评估,动态调整载流量上限以平衡安全性与利用率。

5 GIL 研究关键挑战和前景展望

5.1 主要挑战及潜在解决方案

GIL 作为一种新型输电技术,虽然在绝缘、散热、机械性能等方面具有明显优势,但仍面临着诸多难点及挑战。

1) GIL 在线监测技术的不足。在线监测装置能反映 GIL 设备的实时情况,降低人员巡检频率,实现系统的预测性维护。但目前的在线监测主要通过局部放电量、SF₆ 气体微水含量、现场分解物含量来判断运行情况,装置的抗干扰能力弱、运行稳定性差,且故障检测离散性大^[89]。其次,GIL 管廊中各个系统数据独立存在,无法做到统一综合管理,且对监测数据的利用和分析不够全面,缺乏数据联动与综合性评价指标。针对在线监测难题,可利用物联网技术,开发智能化综合在线监测系统,对 GIL 及其附属设施实行统一监控和管理。利用先进传感技术,实现设备状态高效监测,采用人工智能对采集数据进行处理,打破系统间信息孤岛,实现集成化系统智能监测,为预测性维护提供信息支撑。

2) GIL 绝缘气体可靠性不足。早期 GIL 中常用的 SF₆ 是一种强效温室气体,其温室效应是 CO₂

的 23500 倍, 鉴于环保的要求, SF_6 混合气体成为当前研究焦点。目前 SF_6/N_2 混合气体应用较为广泛, 但随之带来了许多新的挑战^[90]。 SF_6/N_2 混合气体的绝缘性能和灭弧性能有所下降, 若要达到纯 SF_6 的绝缘强度, 充气压强需达到 SF_6 的两倍, 无疑加大了工艺难度, 同时对气体防泄漏水平提出更高要求。此外, 代替气体的化学稳定性、环境友好性和生产成本等因素需要综合评估, 找到性能相当的代替气体是一个巨大挑战。

3) GIL 内部金属微粒捕捉困难。GIL 在制造安装或运行中, 不可避免地会产生自由金属微粒, 其在电场的作用下进行带电运动, 在气体中漂浮或附着在导体、壳体内壁以及绝缘子表面, 造成电场畸变, 引发间隙放电或绝缘件沿面网络, 造成 GIL 绝缘性能下降, 威胁系统安全^[91]。目前微粒抑制措施主要是限制微粒附着绝缘子, 同时提高系统绝缘强度。其中包含设置驱赶电极、外壳内表面覆黏性膜、微粒陷阱、电极或绝缘子表面敷电介质膜等, 微粒陷阱和表面覆膜是效果最显著、最常用的措施。

4) GIL 故障检测、识别与定位困难。GIL 故障检测、识别与定位面临的主要困难包括故障类型多样、特征提取困难、检测信号微弱、内部结构复杂、环境条件严苛和检测方法局限性等^[92]。GIL 由多层结构组成, 检测信号在传播中易被屏蔽、衰减或反射, 传统的方法难以检测故障类型, 且故障导致的物理化学现象复杂, 难以提取有用的故障信号, 使得故障定位十分困难。目前高灵敏度故障检测主要有红外成像、光纤传感和振动检测等方法, 在此基础上使用先进的信号处理技术, 可提高故障检测与定位的可靠性。

5) GIL 在超长深埋隧道等特殊环境中的适应性难题。目前我国 GIL 的应用案例不多, 主要在特殊地质或场景下做输电衔接。随着 GIL 的推广应用, 超长深埋隧道等特殊环境中的 GIL 输电不可避免^[93]。在各种极端环境下, GIL 的应用可能面临着散热问题、机械应力、绝缘性能、维护和检修、环境影响、经济成本和技术标准等多方面的适应性难题, 具体可能包括高地应力和地质问题、极限条件下的绝缘件寿命问题、施工技术难题、通风和能耗问题等, 解决极端环境下的适应性难题将加速 GIL 输电技术的广泛应用。

5.2 未来发展趋势展望

随着智能电网、特高压电网等新型电网技术的不断发展, 对 GIL 等输电设备的性能要求也越来越高^[94]。促进 GIL 载流量计算的技术革新是适应未来

电网发展趋势的重要举措之一, 有助于提升电网的整体性能和竞争力。对于未来 GIL 技术研发有以下不成熟建议:

1) 在线实时监测助力 GIL 暂态载流量计算。迄今为止, 对载流量的研究大部分集中在稳态条件下, 解析计算、热网络法和有限元法都只针对理想状态或某一固定条件下的载流量计算和分析, 对于变化工作条件下的动态载流量计算研究较少^[95]。而实际工作中 GIL 的内外部环境是时变的, 在线实时监测与计算更有利于及时对运行状态做出调整, 如 GIL 振动量在线监测、温度在线监测、多参量集成监测等, 并对监测量进行处理与分析得出实时载流量, 以使输电效率最大化。可见, 在线实时监测技术的发展将极大地促进 GIL 暂态载流量计算的准确性和实时性, 提高 GIL 的运行效率和安全性。

2) GIL 数字化设计与三维建模仿真。GIL 在投入生产前进行仿真设计是确保其可靠性和经济性的关键步骤, 而现有的工具和手段难以对复杂环境下 GIL 的运行进行全面仿真和模拟, GIL 的数字化设计与高保真三维建模仿真可成为未来发展方向^[96]。通过三维数字化设计, 可在设计阶段模拟设备安装, 进行碰撞检查和优化设计, 提高设计效率和准确性。开发智能化设计工具, 利用人工智能和机器学习技术, 自动优化设计方案, 减少试错成本。综上, 通过先进的设计工具、仿真技术、大数据管理和分析、标准化与规范化等手段, 可提高 GIL 设计、制造和运维的效率, 降低生产成本, 提高安全性, 推动 GIL 广泛应用。

3) GIL 输电系统智能化管理。集成先进的传感器和监测技术, 对 GIL 的运行状态进行实时监测和数据分析, 及时发现并处理潜在问题, 提高运维效率和可靠性^[97]。通过物联网和云计算技术, 实现 GIL 的远程控制和优化调度, 提高输电系统的灵活性和智能化水平。开发智能运维系统, 对 GIL 的运维过程进行自动化管理和优化, 降低运维成本和提高运维效率。最后, 开发 GIL 设计制造和运维全过程全周期一体化平台, 用运维数据优化设计与制造, 用设计过程指导制造与后期运维, 实现全过程的数据反馈与实时校正, 最大限度提升 GIL 整体寿命长度。

6 结论

GIL 以其高载流量和低维护成本的特性, 在电力传输行业中占据了一席之地, 尤其在需要高电压、大容量传输的场景中, GIL 的优势更加明显,

为智慧电力系统的开发和扩展提供了有力的支持。对于 GIL 载流量计算,解析计算方法和热网络法具有计算速度快、结果可预测性强的优点,而数值仿真方法则能提供更为详细和真实的运行环境模拟,多种方法的结合将有助于提高 GIL 载流量计算的效率和准确性。目前 GIL 载流量的计算多采用数值仿真方法,该方法计算结果精度高但计算过程复杂且耗时长。随着大数据和人工智能的发展,未来可能会涌现出更多便捷且准确的载流量计算方法。为了促进 GIL 技术的广泛应用和标准化发展,未来可能会出台更多关于 GIL 载流量计算方法的标准和规范,明确 GIL 载流量计算的具体步骤、参数取值范围以及计算方法等,为相关从业人员提供统一的技术指导和参考依据。此外,随着计算机与人工智能技术的发展,GIL 制造技术与运维平台的智能化发展将成为不可阻挡的趋势,电力系统的数字化转型将成为未来的主要发展方向。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 李鹏,颜湘莲,王浩,等.特高压交流 GIL 输电技术研究及应用[J].电网技术,2017,41(10):3161-3167.
LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167(in Chinese).
- [2] 彭宗仁,张鹏飞,刘鹏,等.苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘关键技术[J].高电压技术,2023,49(10):4046-4057.
PENG Zongren, ZHANG Pengfei, LIU Peng, et al. Key insulation technology of UHV GIL in Sutong utility tunnel project[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4046-4057(in Chinese).
- [3] BENATO R, DI MARIO C, KOCH H. High-capability applications of long gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 619-626.
- [4] 肖登明,阎究敦.气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J].高电压技术,2017,43(3):699-707.
XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line(GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707(in Chinese).
- [5] 梁芳蔚,张长虹,吕金壮,等.直流气体绝缘输电线路关键问题及装备研发现状综述[J].高压电器,2023,59(9):1-11.
LIANG Fangwei, ZHANG Changhong, LYU Jinzhuang, et al. Review of key problems and development status of DC gas insulated transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 1-11(in Chinese).
- [6] 喻新强,肖明清,袁骏,等.苏通 GIL 综合管廊长江隧道工程设计[J].电力勘测设计,2020(7):1-7.
YU Xinqiang, XIAO Mingqing, YUAN Jun, et al. Design of Sutong GIL utility tunnel across Yangtze River[J]. Electric Power Survey & Design, 2020(7): 1-7(in Chinese).
- [7] CHENG Jianwei, ZHU Sijia, JIN Shoufeng, et al. Analysis on electric field distortion of three-phase tri-post insulator in 220kv compact gil with metal defects[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Richland, WA, USA: IEEE, 2019: 251-254.
- [8] 刘泽洪,王承玉,路书军,等.苏通综合管廊工程特高压 GIL 关键技术要求[J].电网技术,2020,44(6):2377-2385.
LIU Zehong, WANG Chengyu, LU Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in Sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385(in Chinese).
- [9] 吴春芳,陈云,黄韬,等.电力电缆状态感知与检测技术研究综述[J].高压电器,2024,60(10):86-103.
WU Chunfang, CHEN Yun, HUANG Tao, et al. Overview of condition sensing and detection technology for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 86-103(in Chinese).
- [10] GONG Ao, WU Zehua, JIN Shoufeng, et al. Transient overvoltage simulation analysis of 1100kV long distance GIL[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Richland, WA, USA: IEEE, 2019: 596-599.
- [11] 刘卓锟,李健栋,张国华,等.国内外直流输电系统可靠性综合评价及提升建议[J].电网技术,2025,49(1):316-322.
LIU Zhuokun, LI Jiandong, ZHANG Guohua, et al. Comprehensive evaluation and improvement suggestion for the reliability of HVDC system domestic and foreign[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 316-322(in Chinese).
- [12] 周扬,王主丁,张漫,等.适应分布式资源渗透率提高的配电网网元规划方法[J].电网技术,2025,49(1):306-315.
ZHOU Yang, WANG Zhuding, ZHANG Man, et al. A grid cell based distribution network planning method adapting to the increasing permeability of distributed resources[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 306-315(in Chinese).
- [13] MINAGUCHI D, GINNO M, ITAKA K, et al. Heat Transfer Characteristics of Gas-Insulated Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(1): 1-9.
- [14] 乔宇娇.基于热特性的混合气体绝缘输电线路的状态感知与故障定位[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [15] 袁迎.特高压气体绝缘输电设备研究[J].电力设备管理,2024(16):298-300.
YUAN Ying. Research on UHV gas insulated transmission equipment[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(16): 298-300(in Chinese).
- [16] 孙国霞.基于电接触理论的 GIS 母线接头过热性故障的研究[D].武汉:武汉大学,2013.
- [17] SEDAGHAT A, LU Haowei, BOKHARI A, et al. Enhanced thermal model of power cables installed in ducts for ampacity calculations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2404-2411.
- [18] OČLOŇ P, RERAK M, RAO R V, et al. Multiobjective optimization of underground power cable systems[J]. Energy, 2021, 215: 119089.
- [19] CHEN Geng, TU Youping, WANG Cong, et al. Environment-friendly insulating gases for HVDC gas-insulated transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(3): 510-529.
- [20] 梁宇涛,林舜江,冯祥勇,等.海上风电场交流集电和多端柔直流输电并网系统多目标优化规划[J].电网技术,2024,48(6):2404-2415.
LIANG Yutao, LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, et al. Multi-objective optimal planning for AC electrical collector and VSC-MTDC transmission grid-connected system of offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2404-2415(in Chinese).
- [21] 蔡希鹏,邹常跃,彭发喜,等.超大规模海上风电海陆一体直流输电技术探讨[J].电网技术,2024,48(7):2895-2901.
CAI Xipeng, ZOU Changyue, PENG Faxi, et al. Discussion on HVDC transmission technology for super-large scale offshore wind power under offshore-onshore integration[J]. Power System

- Technology, 2024, 48(7): 2895-2901(in Chinese).
- [22] 邓阳. 基于电磁-热耦合的电缆计算模型的金属护套损耗对载流量的影响[J]. 电力设备管理, 2024(15): 201-203.
DENG Yang. Effect of metal sheath loss on current carrying capacity based on electromagnetic-thermal coupling cable calculation model[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(15): 201-203(in Chinese).
- [23] 乔宇娇, 唐泽华, 高鹏, 等. 不同环境因素下 GIL 温度场分布特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 136-143, 150.
QIAO Yujiao, TANG Zehua, GAO Peng, et al. Distribution characteristics of GIL temperature field under different environmental factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 136-143, 150(in Chinese).
- [24] 赵莹莹, 纪航, 王逊峰, 等. 电力电缆载流量计算方法综述[J]. 电力与能源, 2022, 43(4): 299-303, 331.
ZHAO Yingying, JI Hang, WANG Xunfeng, et al. Review of calculation methods for power cable current carrying capacity[J]. Power & Energy, 2022, 43(4): 299-303, 331(in Chinese).
- [25] XIE Maojie, LIU Wenbo, MA Guoqin, et al. Ampacity analysis of power cables based on polypropylene insulation[C]// Proceedings of 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Hangzhou: IEEE, 2023: 3906-3911.
- [26] 朱长东, 嵇洪港, 智李, 等. 电力电缆温升特性研究及载流量计算[J]. 电力与能源, 2024, 45(2): 197-202.
ZHU Changdong, ZHUO Honggang, ZHI Li, et al. Temperature rise characteristics of power cable and its current carrying capacity calculation[J]. Power & Energy, 2024, 45(2): 197-202(in Chinese).
- [27] LEBBIHIAT N, ATIA A, ARICI M, et al. Thermal performance analysis of helical ground-air heat exchanger under hot climate: in situ measurement and numerical simulation[J]. Energy, 2022, 254: 124429.
- [28] CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, ZHANG Jinxian, et al. Temperature rise prediction of gas-insulated transmission lines based on thermal network model considering contact fingers[C]//Proceedings of 2022 IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Denver, CO, USA: IEEE, 2022: 1-2.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路: GB/T 22383—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [30] 岳浩, 李健, 罗楚军, 等. 隧道中 GIL 载流量解析计算方法研究[J]. 电力勘测设计, 2023(6): 16-22.
YUE Hao, LI Jian, LUO Chujun, et al. Research on analytical calculation method of GIL ampacity in tunnel[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(6): 16-22(in Chinese).
- [31] NOWAK R, DUC J, SAMUL B, et al. A Thermal Network Approach for a Quick and Accurate Study of Multiple Connected Switchgears[J]. Heat Transfer Engineering, 2022, 43(3-5): 183-197.
- [32] CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, XIE Kejia, et al. A novel method for fast computation of the temperature rise and optimal design of GIL based on thermal network model[J]. Energy, 2024, 289: 130034.
- [33] NIU Haiqing, CHEN Zeming, ZHANG Huang, et al. Multi-physical coupling field study of 500 kV GIL: simulation, characteristics, and analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8: 131439-131448.
- [34] 费焱. 特高压 GIL 温升特性与超声波故障定位技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- [35] CHEN Geng, TU Youping, WANG Cong, et al. Analysis on temperature distribution and current-carrying capacity of gil filled with fluoronitriles-CO₂ gas mixture[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2018, 13(6): 2402-2411.
- [36] WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Thermal problems in gas-insulated transmission lines solved by the finite-element method[C]// Proceedings of 2012 6th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications. Dalian: IEEE, 2012: 1-3.
- [37] SIMA Wenxia, CHEN Xiaoxiao, SUN Potao, et al. Environmentally friendly super-insulating material with three-dimensional nanoporous structure: a promising candidate for future gas insulated transmission lines and carbon sequestration[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147673.
- [38] XING Yunqi, WANG Zhiwen, LIU Lin, et al. Defects and failure types of solid insulation in gas-insulated switchgear: in situ study and case analysis[J]. High Voltage, 2022, 7(1): 158-164.
- [39] WANG Zhen, GAO Jianmin, WANG Rongxi, et al. Failure mode and effects analysis using Dempster-Shafer theory and TOPSIS method: application to the gas insulated metal enclosed transmission line (GIL)[J]. Applied Soft Computing, 2018, 70: 633-647.
- [40] 陈庚. 直流 C3F7CN/CO₂ 气体绝缘输气管道绝缘子表面电荷积聚特性及机理[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- [41] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [42] ZHU Sijia, LIU Peng, GONG Ao, et al. Optimization of electric field distribution for tri-phase tri-post insulator in 220kV GIL[C]// Proceedings of 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Richland, WA, USA: IEEE, 2019: 259-262.
- [43] SHU Yinbiao, CHEN Weijiang. Research and application of UHV power transmission in China[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 1-13.
- [44] 张延伟. 不同敷设方式下 XLPE 电力电缆温度场与载流量仿真研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2023.
- [45] 黄莉, 梁云, 黄辉, 等. 基于代理模型的电力电缆温度场快速计算方法及其应用[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 178-187.
HUANG Li, LIANG Yun, HUANG Hui, et al. Surrogate model-based fast calculation of power cable temperature field: method and application[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 178-187(in Chinese).
- [46] ZHAO Lihua, WANG Zelong, ZHU Haiyi, et al. Study on temperature rise characteristics of GIS disconnector under different operating conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3601-3610.
- [47] 孙龙勇, 姚灿江, 刘英英, 等. 新型 515 kV 直流 SF₆ 气体绝缘穿墙套管研发设计[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 28-34.
SUN Longyong, YAO Canjiang, LIU Yingying, et al. Development and design of new 515 kV DC SF₆ gas insulated wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 28-34(in Chinese).
- [48] HABIBURRAHMAN A, ARYA L D. Comparison of transmission losses and voltage regulation of overhead and gas insulated transmission line[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering (ICADEE). Coimbatore, India: IEEE, 2020: 1-3.
- [49] 张家鑫. 考虑接地电流的高压海底电缆载流量的研究与计算[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [50] 陈新岗, 宋欣, 马志鹏, 等. 基于电磁-热耦合的 XLPE 电缆缺陷暂态温度分布研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 122-129.
CHEN Xingang, SONG Xin, MA Zhipeng, et al. Study on transient temperature distribution of defects in XLPE cables based on electromagnetic-thermal coupling[J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 122-129(in Chinese).
- [51] 杨龙, 吕毅, 袁飞晨, 等. 基于有限元法的 GIL 温升仿真与试验[J]. 机电工程技术, 2023, 52(9): 206-210.
YANG Long, LÜ Yi, YUAN Feichen, et al. Simulation and experiment of temperature rise based on finite element method[J].

- Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(9): 206-210(in Chinese).
- [52] 孙国霞, 关向雨, 金向朝, 等. 基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3445-3451.
- SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, JIN Xiangchao, et al. Temperature rise calculation and overheating fault analysis of gas insulated switchgear bus connector based on coupled field theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451(in Chinese).
- [53] International Electrotechnical Commission. Electric cables-calculation of the current rating - part 2-3: thermal resistance-cables installed in ventilated tunnels: IEC 60287-2-3: 2017[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [54] BENATO R, DUGHIERO F. Solution of coupled electromagnetic and thermal problems in gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1741-1744.
- [55] HELLESO S M, EBERG E. Simplified model for heat transport for cables in pipes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3813-3822.
- [56] LI Botong, GU Tianfeng, LI Bin, et al. Study on the gas-insulated line equivalent model and simplified model[J]. Energies, 2017, 10(7): 901.
- [57] 靳一林, 宋旭东, 张晓平, 等. 基于有限元法的气体绝缘输电线路热路模型分析[J]. 河北电力技术, 2016, 35(6): 16-18, 59.
- JIN Yilin, SONG Xudong, ZHANG Xiaoping, et al. Thermal circuit model analysis of gas-insulated transmission line based on finite element method[J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(6): 16-18, 59(in Chinese).
- [58] 石大城. 基于电磁场热场耦合的隧道敷设电缆载流量计算及布置优化研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [59] 李巍巍, 侯振奇, 吴科, 等. 隧道电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(5): 55-59.
- LI Weiwei, HOU Zhenqi, WU Ke, et al. Ampacity calculation for cable in cable tunnel and its influencing factors[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(5): 55-59(in Chinese).
- [60] SUN Qiuqin, LIN Ziqi, WANG Feng, et al. Thermal network modeling of tunnel cable considering circumferential heat transfer and tunnel curvature[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 107190.
- [61] WANG Wei, BAI Xueting, SI Wenrong, et al. Review of calculation methods of power cables temperature based on thermal circuit model [C]//Proceedings of 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing: IEEE, 2024: 1711-1714.
- [62] 徐亮, 龙艳, 张高爽, 等. 节点解析法研究特高压廊管气体绝缘输电线路的热特性[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(5): 125-132.
- XU Liang, LONG Yan, ZHANG Gaoshuang, et al. Thermal characteristics study of EHV gas insulated transmission lines in pipe gallery using node analysis method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(5): 125-132(in Chinese).
- [63] WANG Wei, CHENG Yinzhang, MENG Xiaokai, et al. Review of researches on power cables ampacity calculation[C]//Proceedings of 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing: IEEE, 2024: 1764-1768.
- [64] STOSUR M, SZEWCZYK M, SOWA K, et al. Thermal behaviour analyses of gas-insulated switchgear compartment using thermal network method[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2833-2841.
- [65] QIAO Yujiao, LIANG Rui, GAO Peng, et al. Heat transfer analysis of different conditions for SF₆/N₂ gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 831-840.
- [66] BOGLIETTI A, CARPANETO E, COSSALE M, et al. Stator-Winding Thermal Models for Short-Time Thermal Transients: Definition and Validation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2713-2721.
- [67] CHEN Xiao, WANG Jiabin, GRIFFO A, et al. Thermal modeling of hollow conductors for direct cooling of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 895-905.
- [68] OTAKI D, NONAKA H, YAMADA N. Thermal design optimization of electronic circuit board layout with transient heating chips by using Bayesian optimization and thermal network model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 184: 122263.
- [69] MARTINHO L B, SILVA V C, L FILHO P M, et al. 3-D Finite-Element Analysis of Conductive Coupling Problems in Transmission Line Rights of Way[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 7024004.
- [70] 刘晓妍. 基于有限元法的电力电缆载流量计算[D]. 济南: 山东科技大学, 2018.
- [71] 牛海清, 郑文坚, 雷超平, 等. 基于有限元和粒子群算法的电缆周围土壤热特性参数估算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1557-1563.
- NIU Haiqing, ZHENG Wenjian, LEI Chaoping, et al. Estimation method for thermal parameters of soil around the cable based on finite element and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1557-1563(in Chinese).
- [72] HAO Songhua, YANG Jun. Dependent competing failure modeling for the gil subject to partial discharge and air leakage with random degradation initiation time[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2019, 68(3): 1070-1079.
- [73] MIYAZAKI A, TAKINAMI N, KOBAYASHI S, et al. Line constant measurements and loading current test in long-distance 275 kV GIL[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 165-170.
- [74] LI Xiaolong, WAN Mingde, ZHANG Guangkuo, et al. Surface charge characteristics of DC-GIL insulator under multiphysics fields: 3-D modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1608-1616.
- [75] CALLENDER G, ELLIS D, GODDARD K F, et al. Low computational cost model for convective heat transfer from submarine cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 760-768.
- [76] 郭一帆, 徐志钮, 李先锋, 等. 252 kV GIS 隔离开关温度场仿真及触头温度的预测方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 162-171.
- GUO Yifan, XU Zhiniu, LI Xianfeng, et al. Research on temperature field simulation and contact temperature prediction method of 252 kV GIS disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 162-171(in Chinese).
- [77] CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, XIE Kejia, et al. A novel multi-slice electromagnetic field-circuit coupling method for transient computation of long-distance gas-insulated transmission lines[J]. High Voltage, 2024, 9(4): 826-838.
- [78] 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(in Chinese).
- [79] WANG Bo, JIA Xiaoyu, YANG Jian, et al. Numerical study on temperature rise and structure optimization for a three-phase gas insulated switchgear busbar chamber[J]. Energy, 2022, 254: 124463.

- [80] 张煌. 500kV GIL 多物理耦合场仿真及特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [81] 高鹏. 环保型 GIL 温度场分析及导体温度反演研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [82] DU Mengbo, CHENG Zixia, MA Yuelong, et al. Simulation study on temperature distribution and ampacity of HVDC submarine cable laid in cable trench[C]//Proceedings of 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Harbin: IEEE, 2024: 1975-1979.
- [83] 吕为鹏. GIL 输电技术在大连地区的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [84] WANG Jian, HU Qi, CHANG Yanan, et al. Metal particle contamination in gas-insulated switchgears/gas-insulated transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(5): 1011-1025.
- [85] TU Youping, CHEN Geng, WANG Cong, et al. Feasibility of C3F7CN/CO₂ gas mixtures in high-voltage DC GIL: a review on recent advances[J]. High Voltage, 2020, 5(4): 377-386.
- [86] 戴志辉, 石旭. 基于电压-电流采样轨迹的混合直流输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2179-2188.
- DAI Zhihui, SHI Xu. A pilot protection for hybrid hvdc transmission line based on voltage-current sampling trajectory[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2179-2188(in Chinese).
- [87] 徐大坤, 王浩, 姜洋彬, 等. GIL 管廊热环境及外逸气体浓度的分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4695-4704.
- XU Dakun, WANG Hao, JIANG Yangbin, et al. Analysis of the thermal environment and concentration of escaping gas in the GIL pipe gallery[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(12): 4695-4704(in Chinese).
- [88] 黄新波. 基于图像感知的输电线路智能巡检综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 1826-1841.
- HUANG Xinbo. Survey of intelligent inspection based on image perception[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1826-1841(in Chinese).
- [89] 刘闽, 李喆, 李曜丞, 等. 基于重参数化 YOLOv5 的输电线路缺陷边缘智能检测方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 1954-1966.
- LIU Min, LI Zhe, LI Yaocheng, et al. Transmission line defect edge intelligent inspection method based on re-parameterized YOLOv5[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1954-1966(in Chinese).
- [90] XIAO Song, SHI Shengyao, LI Yi, et al. Review of decomposition characteristics of eco-friendly gas insulating medium for high-voltage gas-insulated equipment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(37): 373002.
- [91] ZHUANG Weijian, LIANG Fangwei, LIANG Zuodong, et al. Efficiency analysis of particle trapping for ± 320 -kV GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3): 1541-1546.
- [92] 李利荣, 戴俊伟, 崔浩, 等. 基于交错部分卷积的高压输电线路检测方法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 5159-5168.
- LI Lirong, DAI Junwei, CUI Hao, et al. High-voltage transmission line detection method based on interleaved partial convolution[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5159-5168(in Chinese).
- [93] BENATO R, BRUNELLO P, FELLIN L. Thermal behavior of EHV gas-insulated lines in brenner pass pilot tunnel[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2717-2725.
- [94] 李利荣, 梅冰, 戴俊伟, 等. 基于多尺度轻量化卷积的高压输电线路巡检[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5269-5280.
- LI Lirong, MEI Bing, DAI Junwei, et al. High-voltage transmission line inspection based on multi-scale lightweight convolution[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5269-5280(in Chinese).
- [95] DOUKAS D I, PAPADOPOULOS T A, CHRYSOCHOS A I, et al. Multiphysics modeling for transient analysis of gas-insulated lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2786-2793.
- [96] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 1-10.
- JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48: 1-10(in Chinese).
- [97] 梁志峰, 礼晓飞, 郭琳润, 等. 德国电力系统转型对我国新能源发展运行的启示[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2884-2894.
- LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, GUO Linrun, et al. Enlightenment of Germany's power system transformation on the development and operation of renewable energy in China[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2884-2894(in Chinese).



高海英

在线出版日期: 2025-07-25。

收稿日期: 2024-11-27。

作者简介:

高海英(1999), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统广域测量与控制、隧道输电和新能源系统智慧储能等, E-mail: gaohaiying.swust@qq.com;

黄琦(1976), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 研究方向为电力系统广域测量与控制、大电网分析与控制、智慧能源信息支撑技术、大规模多可再生能源系统并网消纳和隧道输电等, E-mail: hwong@swust.edu.cn;

朱玉玉(1979), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子应用与电磁兼容、先进检测与控制技术研究等, E-mail: zhuyuyu@swust.edu.cn;

曾文慧(1975), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输变电工程防灾减灾的差异化设计和隧道输电等, E-mail: 200819735@qq.com;

黄埔生(1997), 男, 硕士, 研究方向为新能源技术研发与应用, E-mail: hpusheng1997@163.com;

时浩添(1992), 男, 博士, 特聘副教授, 研究方向为海上风电、隧道输电和智慧储能系统建模等, E-mail: shihaotian1994@qq.com;

许文杰(1995), 男, 博士, 研究方向为高海拔地区输变电工程建设技术, E-mail: 1624647208@qq.com。

(责任编辑 李健一)

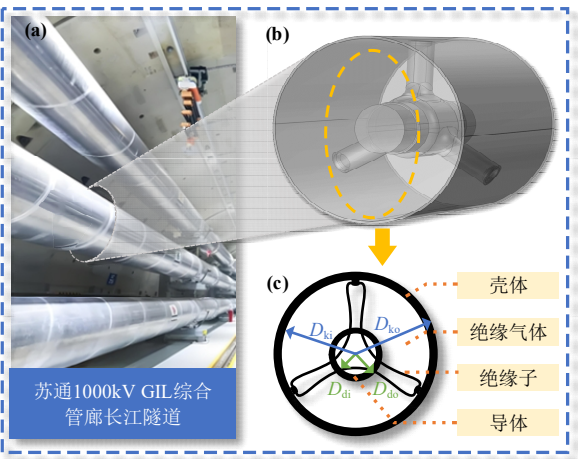


图 A1 GIL 管道综合示意图
Fig. A1 GIL Pipeline Comprehensive Schematic



图 A2 GIL 载流量关键影响因素
Fig. A2 Key factors of GIL current carrying capacity

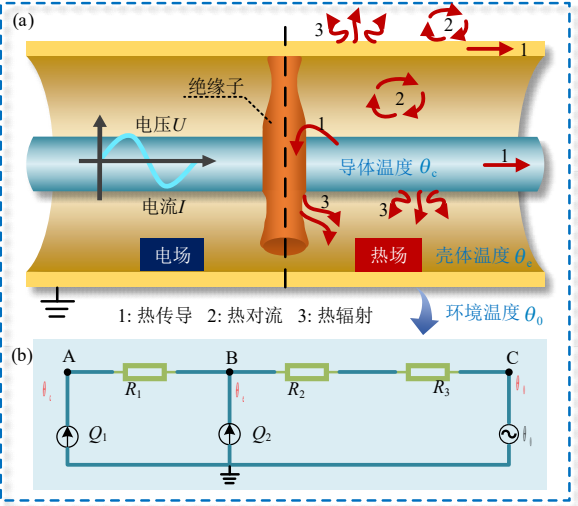


图 A3 GIL 等值热回路示意图
Fig. A3 GIL Equivalent Thermal Circuit Diagram

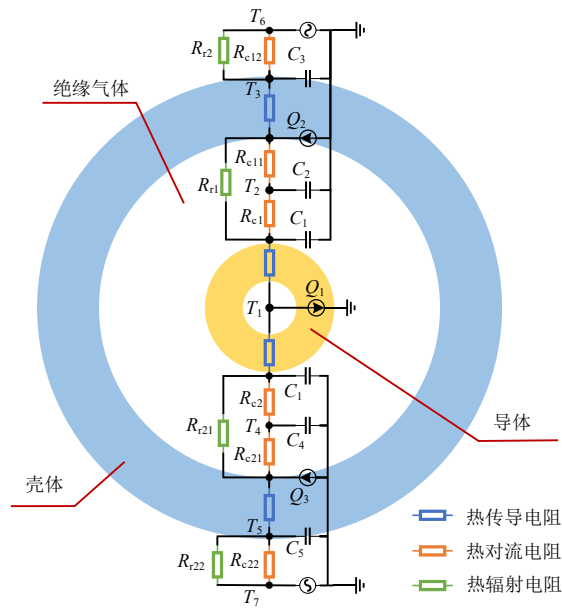


图 A4 GIL 热网络模型^[32]
Fig. A4 GIL Thermal Network Model^[32]

表 A1 架空线、电缆与 GIL 的对比

Table A1 Comparison of overhead lines, cables and GIL

对比项	GIL	电缆	架空线
输电损耗	介电损耗几乎可忽略不计，导体损耗与负荷电流的平方成正比，损耗远低于电缆和架空线	包括与负荷有关的损耗、介电损耗及与运行设备有关的损耗，损耗较小	包括导线电阻上产生的功率损耗和电抗损耗，受环境影响大，损耗最大
载流量	非常高，最高额定电流可达 8000A	采用 8 根 5×160mm 的铜排可以实现 8000A 的载流量，但实际工程应用达不到	四分裂导线的典型架空线的额定电流是 3000A，无绝对上限，但低于 GIL
电压等级	非常高，可达 1100kV 以上	通常较低，如 420kV	非常高，可达 1100kV 以上
运行温度	通常在 105-120℃	取决于电缆的耐热等级	受环境温度影响较大
电磁影响	电磁影响很小	存在一定电磁影响	电磁影响较大
敷设方式	直埋安装、隧道安装、地面安装	直埋安装、隧道安装	空中架设
故障率	故障率低，维护方便	故障率较低，维护相对方便	故障率高，维护较为复杂
环境适应性	不受恶劣气候和特殊地形影响	受环境影响较小，但需避免极端天气	受恶劣气候和特殊地形影响

表 A2 电/热回路对偶关系

Table A2 Dual relationship of electric/thermal circuit

电域	热域
电压 U	温度差 ΔT
电流 I	热流 Q
电阻 R	热阻 R_{th}
电容 C	热容 C_p/C_v
$U=IR$	$\Delta T=R_{th}Q$