

Development of Macroscopic and Microscopic Model of SF₆ Arc

Su Zhao¹, Juntao Jiao¹, Xiaoling Zhao¹, Dengming Xiao¹, J. D. Yan²

¹Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

²University of Liverpool, Liverpool, UK

Email: 735067831@qq.com

Received: Feb. 10th, 2016; accepted: Feb. 24th, 2016; published: Mar. 1st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

SF₆ circuit breaker is important breaking equipment in power system; the operation of the circuit breaker is related to the stability and reliability of the power system. SF₆ arc is a complex multi-field coupling process evolving electric field, magnetic field, temperature field and flow field. Although there are a lot of domestic and foreign researchers conducting studies of SF₆ arc, those previous studies are all based on the assumptions and under the conditions of the specific laboratory setting. Based on the research status of SF₆ arc, this paper introduces the development of macroscopic and microscopic models in SF₆ arc and discusses the future research directions and problems to be solved in SF₆ arc.

Keywords

SF₆, Arc, Macroscopic Model, Microscopic Model

SF₆电弧宏观微观模型研究进展

赵 谔¹, 焦俊韬¹, 赵小令¹, 肖登明¹, J. D. Yan²

¹上海交通大学电气工程系, 上海

²利物浦大学, 利物浦, 英国

Email: 735067831@qq.com

收稿日期: 2016年2月10日; 录用日期: 2016年2月24日; 发布日期: 2016年3月1日

摘要

SF_6 断路器是电力系统中的重要开断设备，断路器的稳定性与可靠性事关电力系统的安全运行。但是 SF_6 电弧是电场、磁场、温度场以及气流场等多场耦合互相影响不断变化的复杂过程，因此虽然国内外已有很多研究者对 SF_6 电弧进行了多方位的研究，但是已有的研究都是建立在假设和实验室设定的条件下的。本文基于国内外研究者对 SF_6 的研究现状以及方向进行了整理归纳，介绍了 SF_6 研究中宏观和微观模型，并对 SF_6 电弧的未来研究方向以及亟待解决的问题进行了探讨。

关键词

SF_6 ，电弧，宏观模型，微观模型

1. 引言

随着我国经济与工业的不断发展，电力工业在国民经济中所扮演的角色越来越重要，确保电力系统的安全稳定运行事关国计民生。为了满足我国持续增长的用电需求量，增大输电容量，提升电压等级，发展新型输变电装备以及特高压电网就变得尤为迫切。我国于上个世纪七十年代对超高压等级下的输电情况开始进行研究，并在西北地区建设了 750 kV 电压等级的输变电示范工程。根据我国在电力系统领域的布局，我国已经形成了“三纵三横”的特高压输电系统，横跨华北、华中以及华东地区。这些重大基础电力工程为解决我国用电发电不均做出了重要贡献，但是同时也对我国的电力系统的安全稳定运行提出了极大的考验。电力系统中大量使用的断路器，可以切断线路正常运行时的负荷电流，也可以在线路短路时自动切断故障短路电流。因此断路器对电力系统的安全运行起着尤为重要的作用，在发电厂、变电站以及输电电路上应用十分广泛。

断路器诞生于上个世纪五十年代，经过六十多年来的不断发展，断路器在电力系统中已经广泛应用，起着保护和控制的重要作用。由于断路器在电力系统中扮演者举足轻重的角色，因此对于断路器工作的可靠性和稳定性的要求越来越苛刻，而如今在我国大量使用的 SF_6 断路器也成为众多研究者的研究热门对象，其中 SF_6 断路器的电弧又是其中的研究热点。 SF_6 电弧事关 SF_6 断路器能否成功开断故障电流，是一个 SF_6 介质由绝缘状态变为导电状态再恢复绝缘的过程。进行 SF_6 电弧的研究，对于提高 SF_6 断路器的开关能力与开断稳定性进而对国家电力系统的安全稳定可靠运行都具有重要意义。

本文主要就国内外关于 SF_6 电弧的研究现状以及存在的问题进行了研究总结并对 SF_6 电弧研究以及 SF_6 断路器的未来发展研究方向提出了展望。

2. SF_6 电弧国内外研究现状

SF_6 断路器在开断过程中产生的电弧从微观角度出发，其是大粒子的电离和消电离过程。电弧燃烧时伴随着发光、发热等现象。从宏观角度出发，电弧是气体绝缘介质在高压下形成的导电通道，是会动态变化的热流。 SF_6 断路器中的电弧是物理化学现象兼有的复杂复合过程。这也使得国内外对电弧的研究仍局限在参数的求取与电弧能量的传递过程。

2.1. 微观参数研究

由于电弧的温度高，状态不稳定等因素限制，目前的研究水平以及研究设备还无法就实际电弧的各种参数进行有效测量，因此研究者主要是以理论计算和分析为主。又由于断路器的短路开断性能是一个

十分重要的参数,因此关于断路器电弧的研究中热力学平衡态、 SF_6 电弧及混合气体或介质形成电弧时的粒子组成、热力学属性、各种输运参数和介质强度以及辐射系数的分析计算也是研究者重点关注的领域。

Frost [1]等人将电弧弧柱看做是一个等离子体发生器,在他们的研究中,他们认为通道内的电弧的温度是不变的,能量沿着弧道传递并且不考虑能量沿着径向的消散过程,即将电弧简化为一维空间内的现象。Cowley [2]等人也将电弧简化为一维情况进行了分析研究,提出了边界层积分法计算电弧的输运参数。Chervy [3]等人在温度 300 K 至 30,000 K,气压从标准大气压至 10 个大气压力的范围内研究了 SF_6 和金属铜蒸汽混合气体的电弧情况。他们的研究发现混合气体中金属铜的含量对混合气体电弧的电导率有极大的影响,当 SF_6 和金属铜蒸汽电弧中金属铜的含量增大时,电弧的电导率也会随之增大。由于电力系统中的断路器中电极材料含有金属钨,因此钨对 SF_6 的影响也需要进行相应研究,Chervy [4]等人研究了 SF_6 气体中混入金属钨蒸汽后电弧的参数变化情况。他们的研究结果发现当 SF_6 气体中混入的金属钨蒸汽的含量在 10% 以内时,混合气体的电弧的各种物性中仅有电导率会发生改变,也就是说低含量的金属钨仅对电弧的电导率有影响,对其他参数的影响可以忽略不计。Paul [5]等人对 SF_6 和 PTFE 形成的电弧进行了研究,他们使用的是 SF_6 和烧蚀的 PTFE 蒸汽,研究中实验人员在 SF_6 和烧蚀 PTFE 蒸汽中添加了 Al_2O_3 和 BN,并求取了该种情况下的电弧特征参数,结果发现没有添加 Al_2O_3 的电弧的电导率小于添加了 Al_2O_3 的电弧的电导率,而电弧中是否含有 BN 对于电弧的电导率影响不大,都含有 BN 的电弧中不同含量的 BN 对电弧的电导率的影响也不大。上述研究者的研究都是仿真分析与理论计算,Hertz [6]等人与 Dayal 等人则对 SF_6 电弧的各种物性参数进行了实验测量研究。他们利用电弧电特性测量手段和光谱测量方法邱曲乐 SF_6 电弧的热导率和电导率。Hertz 等人的研究结果表明 SF_6 气体的强夕熄弧能力和 SF_6 气体在 11,000 K 温度以下的能量运输机理有关。Dayal 等人的实验则是测量了壁稳电弧,这也是第一次有研究者通过实验手段对电压与热导率的关系以及 SF_6 的辐射重吸收效应进行了研究。他们的研究表明, SF_6 之所以具有较高的能量耗散率和 SF_6 电弧的辐射运输机理以及湍流冷却作用有极大关系,二者共同作用才使得 SF_6 具有了较高的能量耗散率。

Lowke [7]等人对电弧的辐射现象进行了详细研究,他们主要研究了 SF_6 高温区域的净辐射,即等温球中辐射与吸收能量之间的差值,他们通过对净辐射的研究得到了一定点护半径下净辐射系数和温度的关系。该种研究方法的局限在于该定量关系只对电弧核心的高温区域有效,因为这种方法没有考虑在电弧边缘的能量重吸收现象。不过对于高温区域的研究,他们的定量关系确实能简便高效的计算出辐射量。Gleizes [8]等人对 SF_6 与金属铜蒸汽的混合气体中电弧的净辐射系数进行了计算,研究表明,由于在电弧和冷气体的交界层处能量会发生重吸收现象,因此混合气体中的电弧的净辐射系数会随着电弧半径的增大而减小。他们的研究还发现 SF_6 气体混入金属铜蒸汽后,在大电流阶段电弧的辐射会对温度产生较大影响,而在小电流阶段主要影响的是电弧的电导率。对于 SF_6 与 N_2 混合气体中的电弧净辐射系数 Gleizes 等人也进行了计算,计算结果显示共振线谱与连续谱在净辐射中有同样重要的分量,相比于氟谱线和硫谱线,氮谱线更容易被吸收。 SF_6 在低温时的辐射高于 N_2 ,但是当温度达到 12,000 K 后,由于发射率以及线谱的拓宽效应的作用,混合气体中电弧的净辐射会与 SF_6 和 N_2 气体的混合比例失去原有的一致性。

2.2. 宏观模型研究

电弧理论模型和计算流体理论使通过数值计算方法获得电弧的相关特性成为可能,电弧的实验测量也可以通过数值模拟仿真得以完善。就目前国内外电弧数值计算和数值仿真的研究成果来看,国内外学者基本都是将局域平衡态设为前提,并以磁流体动力学方法为基础对电弧进行数值计算仿真。

电弧宏观模型是将电弧等效成为一个阻值可变的电阻,用非线性微分方程对该“可变电阻”进行描述。国内外对于电弧宏观描述的数学模型主要有两类,一类是物理数学模型,另一类是黑盒模型。物理

数学模型是对电弧的各个物理参数进行数值计算。虽然通过数学推导可以得到待求解的参数值，但是计算量及推导过程十分复杂。黑盒模型顾名思义是把电弧当做一个“黑盒”对待，通过改变电弧的外部特性研究电弧内部参数的变化规律进而得到一般结论，这种模型计算量小，推导也不复杂，但是由其定义可知该模型下对电弧的研究需要大量实验数据的支持。

Fang [9]等人就 SF₆ 高压断路器的热开断能力进行了评估研究，他们以普朗特混合长度湍流模型为基础，就 SF₆ 电弧在喷口处电流过零前和过零后的动态特性进行了研究分析。理论计算和实测值都显示电流零区的喷口电弧呈现湍流状态。Zhang [10]等人对高压断路器中的气吹效应和烧蚀过压现象进行了研究，他们分析了断路器喷口处 PTFE 材料烧蚀变为蒸汽混入 SF₆ 气体电弧的过程，分析结果表明，断路器压力增强主要是由于 PTFE 材料烧蚀后产生的蒸汽会携带能量进入气体膨胀室内，研究人员在进行数值计算时使用 SF₆ 和 PTFE 混合气体的电弧参数得到的结果与实验测量得到的结果也基本相同，这也证明 PTFE 材料烧蚀后产生的蒸汽确实混入了 SF₆ 电弧中。MTC Fang [11]对重吸收过程提出使用一种半经验公式计算模型进行估计计算。该模型将电弧弧柱高温区域($T > 0.83 T_{max}$)认定为净辐射区辐射热再吸收区域的范围则为 $T < 0.83 T_{max}$ 到 $T = 4000 K$ 。这种模型认为辐射热再吸收区域将会吸收 80% 的辐射能量。与该模型类似的还有两类模型，即 P1 辐射模型和局部特征模型。P1 辐射模型中一般认为吸收系数是一个定值，可以理解为仅和电弧的组份和温度有关。局部特征模型中可以对频率直接进行积分运算，因为在该模型中输运方程的目前点和积分点是线性关系。

2.3. SF₆ 电弧国内研究进展

国内对电弧研究较多的有西安交通大学、沈阳工业大学以及上海交通大学等科研院所，最初对电弧的研究可以追溯至 20 世纪 80 年代。1996 年王其平等人在对 SF₆ 灭弧室的全面数值研究的基础上，建立了基于二维流体动力学的电弧喷口模型。2000 年，张俊民等人研究了灭弧室的喷口进行了研究，建立了喷口加热以及烧蚀的数学模型，该模型主要思想是根据导热微分方程提出的。2003 年刘晓明研究了气流场与 SF₆ 断路器开断电弧的关系，总结提出了电弧等效电阻网格法[12]。

3. SF₆ 电弧亟待解决问题及研究方向展望

3.1. SF₆ 电弧亟待解决问题

国内外研究者为了提高 SF₆ 断路器性能进行了全面系统长期的研究工作，从多方面入手，在理论推导，数值仿真、以及宏观、微观层面都对 SF₆ 电弧的发展机理与影响因素做了深入研究。这些研究成果也极大地推动了 SF₆ 断路器以及 SF₆ 电弧理论的发展与进步，不过，在电弧领域仍有些内容亟待国内外学者研究关注，这些方面主要为：

1) SF₆ 电弧的数学模型有待进一步改进。虽然现有的数学模型已从最初的一维模型逐渐演变为现在主流的二维电弧研究模型，但是在对电弧发生时的描述仍不全面。在对电弧轴向能量耗散、径向电弧高温区与冷流的研究仍限制在现有的模型基础上。不断改进 SF₆ 数学模型可以增加理论研究在 SF₆ 断路器生产中的实际应用价值，并且现有模型在非平衡态等状态下的对 SF₆ 的描述不够全面，都有各个方面的限制条件与应用环境，因此，关于 SF₆ 电弧的数学模型还需要更加全面。

2) SF₆ 电弧和湍流的关系的研究仍然较少。断路器灭弧室中存在湍流现象，湍流可以增强电弧的能量输运能力，并且可以增强断路器的电弧开断性能。但是在湍流存在的条件下对电弧的能量和激波的相互关系以及是否互有影响的系统研究仍较少。并且现有研究结果都显示 SF₆ 电弧中的湍流和激波对电弧有极强的控制。因此对电弧中湍流现象的研究对进一步提高断路器等电力设备的性能具有重要意义。

3) 电弧与固体材料的相互作用影响以及机理尚未研究清楚，关于喷口材料、触头金属材料高温下产

生的金属蒸汽对电弧的各项性能参数的影响还不够全面，对于金属蒸汽对电弧的产生和灭弧过程的影响现在也仍处于初级研究阶段。

3.2. SF₆ 电弧研究方向展望

基于 SF₆ 电弧国内外已有研究及我国电力设备行业对 SF₆ 断路器灭弧室工作状态的情况反馈，下列领域具有极大的理论研究与实验分析价值：

- 1) 新的电弧非平衡态的研究模型中可以考虑非平衡态下电子扩散与零区各时变特性的关系；
- 2) 电弧电流零区动态特性与固体材料和电弧的相互反应的关系；
- 3) 在不同气压、温度下断路器电弧的电弧温度、电子数密度与喷口形状、材料的关系。

4. 结论

SF₆ 断路器是电力系统中极为重要的开断设备，本文主要介绍了国内外关于 SF₆ 电弧的研究现状，分析了 SF₆ 电弧的宏微观模型的发展过程以及研究成果，简述了宏微观研究中研究者对 SF₆ 电弧的研究方法与分析手段，并基于现有的研究成果以及存在问题给出了 SF₆ 电弧领域的未来研究方向。

参考文献 (References)

- [1] Frost, L.S. and Liebermann, R.W. (1971) Composition and Transport Properties of SF₆ and Their Use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model. *Proceedings of the IEEE*, **59**, 474-485. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1971.8206>
- [2] Cowley, M.D. (1974) Integral Method of Arc Analysis. *Journal of Applied Physics*, **7**, 2218-2222.
- [3] Chervy, B., Gleizes, A. and Razafinimanana, M. (1994) Thermodynamic Properties and Transport Coefficients in SF₆-Cu Mixtures at Temperatures of 300 - 30000 K and Pressures of 0.1 - 1 Mpa. *Journal of Physics D-Applied Physics*, **27**, 1193-1206. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/27/6/017>
- [4] Chervy, B. (1996) The Influence of the Presence of Tungsten of SF₆ Arc Plasmas. *Journal of Physics D-Applied Physics*, **29**, 2156-2161. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/29/8/014>
- [5] Paul, K.C., Sakuta, T. and Takashima, T. (1997) Transport and Thermodynamic Properties of SF₆ Gas Contaminated by PTFE Reinforced with Al₂O₃ and BN Particles. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **25**, 786-798. <http://dx.doi.org/10.1109/27.640704>
- [6] Hertz, W., Motschma, H. and Wittel, H. (1971) Investigations of Properties of SF₆ as an Arc Quenching Medium. *Proceedings of the IEEE*, **59**, 485-491. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1971.8207>
- [7] Lowke, J.J., Morrow, R. and Haidar, J. (1997) A Simplified Unified Theory of Arcs and Their Electrodes. *Journal of Physics D-Applied Physics*, **30**, 2033-2042. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/30/14/011>
- [8] Gleizes, A., Rahmani, B., Gonzalez, J.J. and Liani, B. (1993) Calculation of Net Emission Coefficient of Thermal Plasmas in Mixtures of Gas with Metallic Vapor. *Journal of Physics D-Applied Physics*, **26**, 1921-1927. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/26/11/013>
- [9] Fang, M.T.C., Zhuang, Q. and Guo, X.J. (1994) Current Zero Behavior of an SF₆ Gas Blast Arc. Part II: Turbulent Flow. *Journal of Physics D-Applied Physics*, **27**, 74-83. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/27/1/011>
- [10] Zhang, J.L., Yan, J.D., Murphy, A.B., Hall, W. and Fang, M. (2002) Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **30**, 706-719. <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2002.1024273>
- [11] Zhang, J.F., Fang, M.T.C. and Newland, D.B. (1987) Theoretical Investigation of a 2 kA Arc in a Supersonic Nozzle. *Journal of Physics D-Applied Physics*, **20**, 368-379. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/20/3/020>
- [12] 王立森. SF₆ 电弧输运特性对灭弧室内电场的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.