

Discussion on the Influencing Factors of the Temperature Rise of the Contact of High Voltage Switchgear

Wenwen Zhou¹, Weidong Xu¹, Jinhe Zeng², Qingxian Diao², Jiefeng Long²

¹School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

²Guangdong Ziguang Electric Co., Ltd., Dongguan Guangdong

Email: 1424706641@qq.com

Received: Nov. 17th, 2016; accepted: Dec. 12th, 2016; published: Dec. 15th, 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

High voltage switchgear is an important equipment for stable operation of electric power system. Reliable operation of equipment becomes the main task of power equipment operation and maintenance department. For a long time, heat failure has been a prominent problem in the operation and management of power equipment. Based on the understanding of the requirements of temperature rise of high voltage switchgear and the analysis of the influence factors of temperature rise, the influence of contact resistance, current-carrying capacity and contact pressure on the temperature rise and safe operation of the equipment is analyzed in this paper. And providing the relevant calculation methods and solutions. The relationship between the arc current and other influencing factors and the temperature rise is also discussed.

Keywords

High Voltage Switchgear, Contact Temperature Rise, Contact Resistance, Current Carrying Capacity, Contact Pressure

浅谈高压开关设备触头温升影响因素

周文文¹, 徐卫东¹, 曾锦河², 刁庆宪², 龙捷峰²

¹广东工业大学自动化学院, 广东 广州

²广东紫光电气有限公司, 广东 东莞

Email: 1424706641@qq.com

收稿日期: 2016年11月17日; 录用日期: 2016年12月12日; 发布日期: 2016年12月15日

摘要

高压开关柜作为电力系统稳定运行的重要设备, 设备的可靠运行成为电力设备运维部门的主要任务, 长期以来, 发热故障一直是电力设备运行管理过程中的突出问题。对高压开关设备触头温升的检测也是待解决的问题。基于对高压开关设备温升标准要求的理解和对温升影响因素的分析, 本文分析了触头部位接触电阻、载流量、接触压力对设备温升和安全运行的影响。并提供了相关的计算方法和解决途径。也对文献中较少阐述的电弧电流和其他影响因素与温升的关系进行了探讨。

关键词

高压开关设备, 触头温升, 接触电阻, 载流量, 接触压力

1. 引言

高压开关设备使用寿命长、封闭严实、结构紧凑, 随着对设备容量和电压等级的要求越来越高, 设备的生热密度也越来越高。高压开关设备的热问题已受到国内外研究专家的广泛重视, 面对高额定电流等级的高电压开关柜的需要, 通过对开关柜内触头的温升进行定量的计算分析, 对影响开关柜温升的各种因素进行研究在开关柜的结构设计中非常必要。在此背景下, 以高压开关触头作为研究对象, 对影响设备温升的3种因素进行研究, 并对影响程度进行评估。

2. 接触电阻对高压开关设备触头的影响

2.1. 电接触理论

电接触理论的奠基人 Holm 很早就阐述了接触电阻的产生原理, 并提出了电接触斑点模型, 给出了接触电阻的数学表示式, 明确了接触电阻为收缩电阻和膜电阻之和。文献[1] [2]研究了固定接触面接触电阻的特性, 并对 Holm 提出的电接触 a 斑点进行了研究, 讨论了电接触面多斑点的形状和尺寸对接触电阻的影响。文献[3] [4] [5]对收缩电阻和膜电阻电导问题作了探讨, 通过计算机用边界元法对收缩电阻进行了计算。近些年来, 通过对触点建立不同的分析模型使电接触理论不断完善, 文献[6] [7]实现了测量仪器对接触电阻的测量, 目前对接触电阻的计算越来越趋近于实际应用, 工程上常用宏观的经验公式来表达接触电阻

$$R = \frac{K}{(0.102F)^m}$$

该式与接触面接触状况, 接触点个数, 触头材料性质, 接触压力范围等因素有关的指数函数, 其中 R 将收缩电阻和膜电阻一起考虑, 表示接触电阻值, F 是触点接触压力, K 是与触点表面接触状况、触头材料有关的系数, m 是与接触点个数, 触头接触压力有关的指数。

2.2. 接触电阻增大的原因及对触头温升的影响分析

要保证触头联接部位有一定的接触面积是有难度的, 如果接触面积不够, 会导致导电端面缩小, 如图 1 所示, 电流线在接触点附近急剧收缩, 收缩电阻增大, 接触损耗 $Q = I^2 R t$ 增大, 触头温升升高, 这

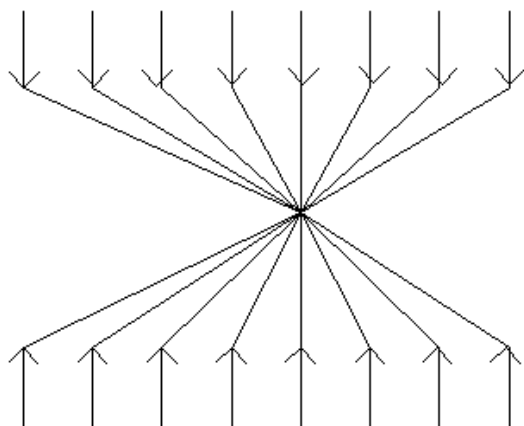


Figure 1. Diagram of the current carrying capacity through the contact points
图 1. 电流线流经接触点示意图

类热故障问题经常发生在隔离开关、断路器动静触头连接处，以及母线连接接头位置。隔离开关、断路器触头是可分合接触，会因为关合次数和使用年限而导致触头压接部位产生松动，接触电阻会因触头接触状态的不同而改变，母线触头属固定电接触接触，其接触状态一般不会改变。电流流过电接触位置，由于接触电阻的存在使触头温度升高，触头温升过高会加快触头接触面损坏程度，导致接触电阻进一步增加，触头长期的温升过高最终会降低绝缘层的绝缘水平，缩短开关设备寿命，严重的会因为电压击穿引发开关设备的故障，引发大范围的停电事故。

文献[8]通过设定不同的接触电阻，分别研究了隔离开关、断路器、母线接头的最高温升与开关柜最高温度的关系，实验表明当接触电阻达到一定范围时，开关触头最高温升与接触电阻的曲线关系和开关柜内最高温度与接触电阻曲线关系重合，说明此时触头温度就是柜内最高温度，通过检测柜内温度就可以近似获知触头温度。文献[9]探讨了低压配电柜温升与接触电阻的关系，此种方法也可以在高压开关柜温升影响分析中应用，通过实验获取接触电阻与触点温升的对应关系，进而可以通过接触电阻判断温升的范围，为开关柜生产厂家提供一定的设计指导。文献[10] [11]用有限元模拟的接触电阻来等效实际的接触电阻，该研究为接触电阻的计算和接触温升的仿真提供了一种新方法。接触电阻对触头温升有重要影响，对同一类型的高压开关柜，由试验可取得大量接触电阻与温升的对应关系值，通过曲线拟合找出温升与接触电阻之间的表达式。

2.3. 小结

对于固定连接的电接触通过提高接触面压接质量，严格检查触头间超行程、终压力等参数，保证各参数符合要求。以此控制接触电阻范围，确保温升不超过允许值。

对于可分合的开关触头通过测量仪器监测触头部位的接触电阻，建立接触电阻与温升的对应关系，以便对触头状态及时作出改善。

3. 载流量对高压开关设备触头的影响

3.1. 载流量对触头温升的理论分析

高压开关设备开关触头接触性能优良，处在额定工作电流状态下时，触头的稳定温升一般能够符合标准要求的范围内。实际上，高压开关设备往往在工作电流下运行，当触头加载工作电流时，电流流过触头导体回路，由于接触电阻的存在会产生焦耳热，产生的热量一部分使触头自身温度升高，另一部分

通过热传导、热对流、热辐射等方式散失到周围介质中。当触头温升超过标准规定的限定范围时，会对触头材料机械性能和接触状态造成一定影响，还会使触头外裹绝缘层材料绝缘强度降低。长期在此状态下运行设备及电网系统造成严重的安全隐患。研究触头温升与载流量的关系对保障设备的使用寿命，电网的安全运行有重要意义，同时也为高压开关设备使用容量提供一定的理论依据。

在接触电阻为 $20 \mu\Omega$ ，接触电流分别为 40 kA、60 kA、80 kA、100 kA 试验条件下，温度传感器测得的触头温升变化如图 2 所示，4 种情况下的温度由室温增加至稳定温升的过程呈对数函数分布，进行函数拟合，可得 4 种情况下的温升分别为 45°C 、 55°C 、 78°C 、 85°C ，由此可判定触头稳态接触温升与接触电流呈正相关关系。

3.2. 载流量与触头温升的关系

文献[12]研究了断路器整体温升与工作电流的关系，通过设计温升实验，加载 70%~100% 额定电流，得到不同工作电流下的温升数据，对试验结果进行曲线拟合，并用算例验证了曲线的拟合优度。文献[13][14]以传统的电缆线载流量计算公式为出发点，推导出了导体温升与载流量的一系列关系式，阐述了推导公式的应用方法，在通过模拟试验或者已知运行数据的情况下，通过监测载流量、环境温度等相关因素来计算导体的温升。

3.3. 小结

已有学者进行了导体温升与载流量的相关研究，但是对于触头部位的温升与载流量关系的研究还比较缺乏，以上文献推导出导体温升与载流量的关系，并没有研究导体连接接头处的温升情况。因此，由导体温升得到触头温升与载流量的关系情况还有待进一步研究。

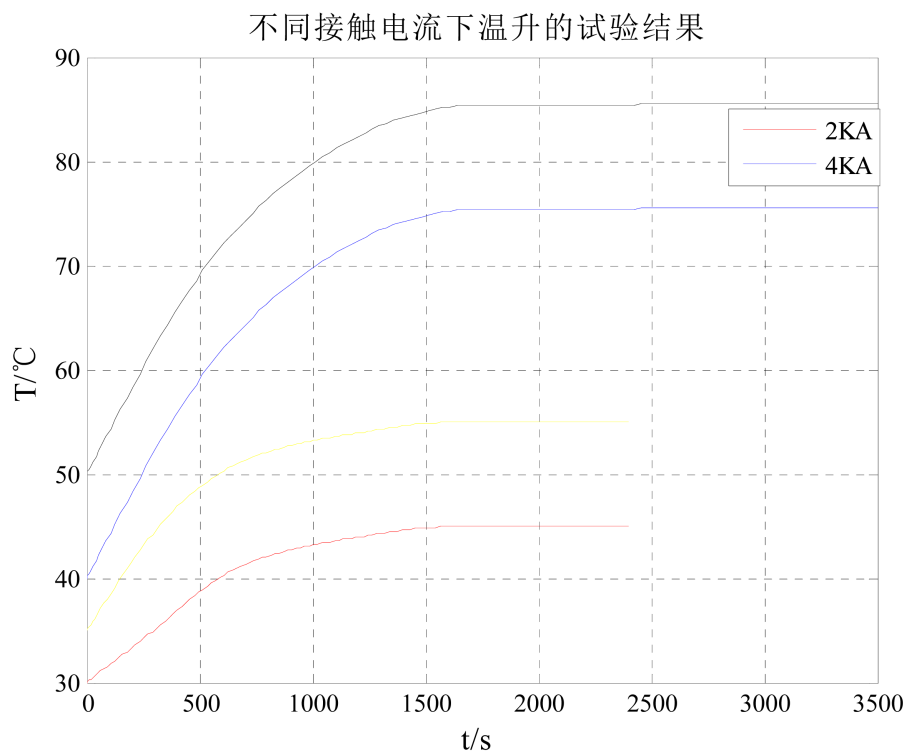


Figure 2. Test results of temperature rise under different contact current

图 2. 不同接触电流下温升的试验结果

4. 触头压接力度对高压开关设备触头温升的影响

4.1. 接触压力

触头的接触压力，对开关的通断电流能力有重要的影响，虽然没有严格的标准对此值进行限定，但接触压力不允许过高或过低，尤其是过低的接触压力会使触头接触电阻显著增大，这种情况会导致触头严重发热，还可能因短路电流的冲击作用而损坏触头。如果接触点温度升高，接触电阻会随之增加，进而使温升不断升高，这种状态互相影响，长期运行可能导致触头材料软化甚至融化。由于存在接触压力，这种软化和融化的结果，将可能与关合开关过程所发生的情况一样的造成触点熔焊。轻者，可能延迟故障开断时间，严重的使触头在发生故障时无法开断。因此，设计中特别重视这一状态，触头接触压力的设计，就是以这一状态为主要依据并辅之以热稳定性验算来进行的。图 3 是开关柜内部某一动静触头接触位置的示意图。

对该触头做实验，当动静触头接触不牢时，进线端、静触头、动触头、出线端各处温升超过允许值 $10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，跟换触头后，在动静触头接触牢固正常状况下，触头平均各点温升降低 40°C 左右，见表 1。

4.2. 触头压力与高压开关设备触头温升的关系

文献[15]介绍了一种高压开关触头接触压力测量仪，该仪器对于高压隔离开关，无论在产品出厂时、产品投运前或在定期维修时，对触头进行接触压力的检测，文献[16]设计、制作了交流接触器触头接触压力传感器，搭建了交流接触器触头接触压力动态测试系统，实现了触头接触压力的动态测试。文献[17]根据前人对接触压力与温升关系的研究成果上，以接触电压降与温度之间的关系理论和集中电阻理论为基础，重新推导了接触压力与触头温升的计算公式

$$P = \frac{I^2 \rho^2 \theta_0 \pi \sigma}{16 A \theta_0^2} \times \left[\arccos \left(\frac{\theta_0}{\theta_m} \right)^2 \right]^2$$

其中， P 为接触压力， I 是流过触头电流， A 为洛伦兹常数(取为 2.45×10^{-8})， σ 触头材料的流动极限， θ_0 触头本体的温度， θ_m 接触点的温度， ρ 触头材料在 θ_0 时的电阻率。

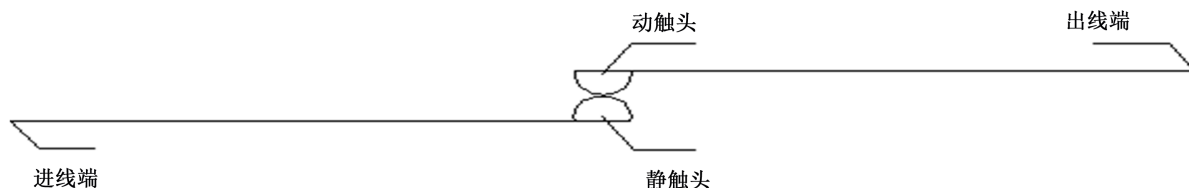


Figure 3. Diagram of the contact position of static and dynamic contact of the switch cabinet

图 3. 开关柜动静触头接触位置的示意图

Table 1. Temperature rise data before and after replacing the contact

表 1. 触头更换前后温升数据

比较部位	更换前温升($^{\circ}\text{C}$)	更换后温升($^{\circ}\text{C}$)
进线端	72	48
静触头	110	65
动触头	127	72
出线端	51	36

4.3. 小结

触头接触压力与温升的关系可由上式来表示,通过测量设备对触头压力的实时监测,由上述关系式可得到对应的温升值,以便及时对触头的运行状态做出调整。触头之间接触要求紧密联接,接触压力正常,若有松动,则易造成触点接触电阻增大,触头温升显著升高。试验表明触点压力正常情况下,平均各点温升降低四十多度。因此,为了使电器温升符合标准要求,触头联接部位不得有空隙、接触不牢现象,要保证接触压力等参数符合要求。

5. 结束语

(1) 触头接触电阻的增大影响触头局部温度升高,当温度超过极限值时会对电器元件性能造成一定影响,降低开关设备使用寿命。因此,有必要通过减小接触电阻使开关设备温升符合允许的标准要求,改善触头材料质量,增加材料硬度,增大接触面积、接触压力,定期维护触头保持一定的清洁度,这些措施都对接触电阻的减少有促进作用。

(2) 本文主要阐述分析了接触电阻、载流量、接触压力对触头温升的影响,实际上,影响触头温升的因素远不止这3种,例如开关柜运行环境的空气温度,海拔高度,电弧电流,散热表面的对流换热系数、动静触头接触点半径、接触点位置以及导电杆的半径都对触头温升有影响。通过对这些因素的综合分析来研究触头的温升更具实际意义。

(3) 由于导致开关柜过热故障的原因较复杂,且一旦温升过高将引起严重后果,因此,考虑各种温升影响因素在内的温升在线监测系统,实时监测开关柜动静触头、母排处的温升也刻不容缓。

基金项目

感谢东莞市科技局产学研合作项目专项资金资助(2015509132215)。

参考文献 (References)

- [1] Timsit, S. (1998) Electrical Contact Resistance: Properties of Stationary Interfaces. *Proceedings of the Forty-Fourth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, IEEE, 1-19.
- [2] Malucci, R.D. (1990) Multispot Model of Contacts Based on Surface Features. *Electrical Contacts, 1990. Proceedings of the Thirty-Sixth IEEE Holm Conference on... and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts*. IEEE, 625-634.
- [3] Greenwood, J.A. (1966) Constriction Resistance and the Real Area of Contact. *British Journal of Applied Physics*, **17**, 1621. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/17/12/310>
- [4] Nakamura, M. and Minowa, I. (1989) Film Resistance and Constriction Effect of Current in a Contact Interface. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, **12**, 109-113. <https://doi.org/10.1109/33.19023>
- [5] Nakamura, M. (1993) Constriction Resistance of Conducting Spots by the Boundary Element Method. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, **16**, 339-343. <https://doi.org/10.1109/33.232062>
- [6] 刘帼中, 李文华, 蒋栋. 电器触点接触电阻测量装置的研究[J]. 电测与仪表, 2001, 38(2): 15-16.
- [7] 任万滨, 武剑, 陈宇, 等. 电触点材料接触电阻高精度测量技术[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 31-36.
- [8] 王秉政, 江健武, 赵灵, 等. 高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 42-48.
- [9] 黄艳, 马利军. 低压配电柜温升与接点接触电阻的关系[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 1997, 15(1): 24-27.
- [10] Park, S.W. and Cho, H. (2014) A Practical Study on Electrical Contact Resistance and Temperature Rise at the Connections of the Copper Busbars in Switchgears. *2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, IEEE, 1-7.
- [11] Wang, S.J., Hu, F., Su, B.N., et al. (2012) Method for Calculation of Contact Resistance and Finite Element Simulation of Contact Temperature Rise Based on Rough Surface Contact Model. *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*, IET, 317-321.

- [12] 陈建兵. 万能式断路器温升与工作电流的关系研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(11): 75-78.
- [13] 范玉军. 一种电缆载流量及温度参数的换算方法[J]. 电线电缆, 2014 (2): 4-5.
- [14] 邱海锋, 韩荣杰, 汤宵, 等. 配网开关柜桩头温度与载流量关联算法研究[J]. 科技创新与应用, 2016(3): 48-48.
- [15] 沈聿修. 高压开关触头接触压力的测量[J]. 高压电器, 1996, 32(3): 53-55.
- [16] 李俊峰, 郑新芳, 苏秀苹, 等. 应用 PVDF 压电薄膜进行触头接触压力动态测试研究[J]. 河北工业大学学报, 2014(4): 7-10.
- [17] 王白眉. 论触头接触压力与温升关系的计算公式[J]. 高压电器, 1982(4): 46-49.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aepe@hanspub.org