

高压真空绝缘组合电器载流量的分析

王 宁¹, 关永刚¹, 钱家骊¹, Xavier Godechot²

(1. 清华大学电机工程及应用电子技术系, 北京 100084;

2. AREVA T&D, 1340 rue de Pinville, 34965 Montpellier Cedex 2, France)

Analysis of Current Carrying Capacity on Vacuum Insulated Switchgear

WANG Ning¹, GUAN Yong-gang¹, QIAN Jia-li¹, Xavier Godechot²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. AREVA T&D, 1340 rue de Pinville, 34965 Montpellier Cedex 2, France)

摘要: 真空绝缘组合电器(VIS)是应用真空代替 SF₆ 作为绝缘介质的一种新型电器设备。从技术上论证其可行性需要考虑绝缘、真空系统维持和载流量 3 方面的内容。为了分析其载流量,建立了 VIS 的简化热模型。该模型综合考虑了热辐射、热传导和材料物理性能随温度变化的特点,并利用有限元软件 ANSYS 对简化热模型进行了长期发热计算。根据计算结果对影响载流量的各种因素进行了分析,并对 40.5 kV VIS 提出了载流量可用范围和设计建议。

关键词: 载流量; 有限元; 长期发热

中图分类号: TM595/TM501+.4 文献标识码: A

Abstract: Vacuum insulated switchgear (VIS) is a new kind of power equipment which uses vacuum as insulated medium instead of SF₆. The insulation performance, the maintainability of vacuum system and current carrying capacity are needed to technically investigate. To analyze the current carrying capacity of VIS, a thermal model has been built based on considering characteristics-thermal radiation and temperature-dependent properties of material-of vacuum insulation. The long-term heat calculation of the thermal model has been done by using finite element analysis software-ANSYS. The analysis concerning several factors' effect on current carrying capacity is given. Moreover, the feasible range of current carrying capacity and some design advices of 40.5 VIS are also given.

Key words: current carrying capacity; finite element; long-term heat

0 引言

SF₆ 是一种绝缘性能、灭弧性能和对流热性能都很好的人造气体,目前广泛应用在高压电气设

备领域,例如作为 GIS 中的绝缘和灭弧介质。但是 SF₆ 是一种温室气体,对环境有较大的影响。1997 年制定的京都议定书中将 SF₆ 气体列为全球管制的六种指名气体之一。因此,如果能够找到 SF₆ 合适的替代物,将可以大大减少 SF₆ 的排放量,从而达到保护环境的目的。真空绝缘组合电器(VIS)就是应用真空代替 SF₆ 作为绝缘介质的一种新型电器设备。

由于 VIS 的绝缘介质是真空,电器内部不存在对流散热。与 GIS 等其它组合电器相比,VIS 内部的径向传热大大减少,热量不易散出。因此能否应用真空作为组合电器的绝缘介质除了要考虑真空的绝缘和灭弧特性外,其是否有足够的载流能力也是必须考虑的问题。

为了分析 VIS 是否能具有足够的载流量,建立了简化热模型,应用有限元分析软件 ANSYS 对简化热模型进行了计算。并根据长期发热计算结果对影响 VIS 载流量的各种因素进行了分析,对 40.5 kV VIS 提出了可用范围和设计建议。

1 最高允许温度的设定

为了从载流量方面验证 VIS 的可行性,需要设定设备各部位在长期运行下的最高允许温度。VIS 作为一个全新概念的产品,其各部件的最高允许温度的设定需要参考现行国际、国内相似产品的标准。但是在现行的 IEC 60694:1996 标准中对处于真空环境下的部件的最高允许温度由于种种原因没有明确规定。因此笔者参考现行标准,以最高温度不损害周围绝缘材料和不影响设备正常运行有限,提出设计用真空环境内最高允许温度的建议。

各等级绝缘材料及与其接触的金属零件的最高

收稿日期: 2006-08-25

作者简介: 王 宁(1982-),女,北京市人,硕士研究生,研究方向为高压电气设备。

允许温度参考现行的 IEC 60694: 1996 标准, 建议设定为 90 (Y), 105 (A), 120 (E), 130 (B), 155 (F) 和 180 (H)。而不与绝缘材料(油除外)接触的金属零件的最高允许温度在 IEC 60694: 1996 标准中并未有所规定, 参考国家标准 GB 763: 在考虑发热对机械强度影响时的最高允许温度为 110, 在不需考虑发热对机械强度影响时的最高允许温度为 145。在 VIS 中的绝缘材料采用足够高耐热等级的绝缘材料的条件下, 最高允许温度的设定参考不与绝缘材料(油除外)接触的金属零件的最高允许温度。

VIS 的主回路采用铜。图 1 显示了铜的机械强度与温度的关系^[1], 如图 1 所示, 当温度为 145 时, 铜的机械强度仅下降了 10%, 在设计中可以满足 VIS 在机械强度方面的要求, 因此文中设定的最高允许温度为 145。

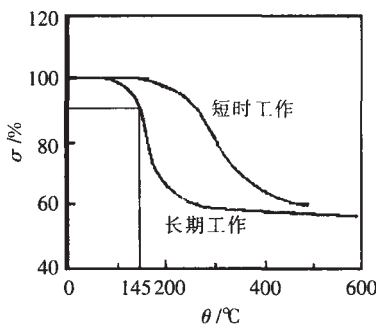


图 1 铜的机械强度与温度的关系

2 VIS 中的热源

由于 VIS 的外壳采用不锈钢等低磁导率的材料, 涡流造成的发热可忽略不计。因此, VIS 中的发热主要来源于载流导体的焦耳热。组合电器的回路电阻由以下两部分组成:

$$R = R_C + K_a R_b \quad (1)$$

其中: R_C 为导电回路中的总接触电阻; K_a 为交流附加损耗系数, 与集肤效应有关; R_b 为直流导体电阻, 可由式(2)得到:

$$R_b = \frac{l}{A} \rho \quad (2)$$

其中: l 为导体的长度; A 为导体的横截面积; ρ 为导体的电阻率。其中导体的电阻率与导体温度有关:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (3)$$

其中: ρ_0 为导体在 0 时的电阻率, α 为电阻温度系数, $1/K$ 。

如果 VIS 的主回路导体为实心圆导体, 导体交流附加损耗系数根据公式(4)^[1]得到:

$$K_a = \frac{A}{P} \sqrt{\frac{2f}{\rho}} \quad (4)$$

其中: A 是导体的横截面积; P 是导体横截面的周长。如果采用管状导体, 则 K_a 可以根据图 2^[2]得到。

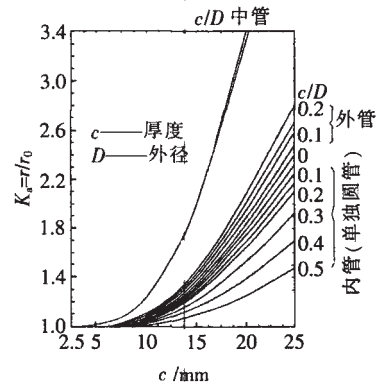


图 2 铜管的交流附加损耗系数

3 热模型的建立

VIS 的结构主要分为两大类: 一类是内部没有母线, 有两个出线端; 另一类是组合电器内部含有母线, 有一个出线端。图 3 是一种内部没有母线的 VIS (日立公司专利) 的结构图。从图 3 可以看出, VIS 的内部结构十分复杂, 但热模型可以根据 VIS 的特点进行简化。

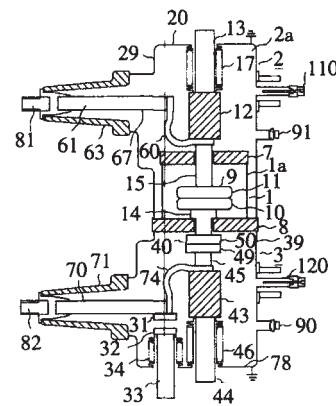


图 3 VIS 的结构(不含母线)

当真空度足够高时, 容器中的空气分子数量很少, 内部的对流散热忽略不计。由于两灰体封闭系统的辐射传热公式为^[3]:

$$\frac{Q}{A} = q = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

其中: ϵ_1 和 ϵ_2 仅与材料的表面特性有关。因此, VIS 可以简化成如图 4 的结构。

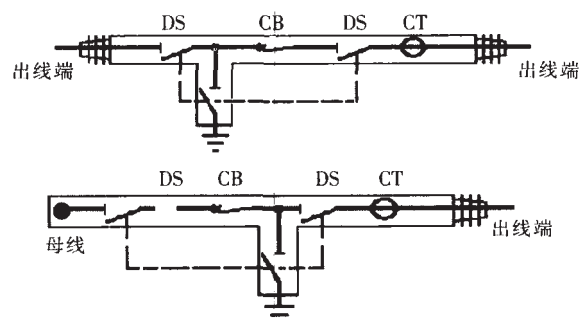


图 4 高压开关设备的两种典型结构

断路器处于合闸状态时,接地开关打开,因此可以忽略接地开关对散热的影响。为方便计算,在热模型计算中,直接设定外壳温度和端部导体温度作为边界条件。对于内部不含母线的 VIS,指定两端的出线端温度。对于含有母线的 VIS,指定一端的出线端温度的同时默认母线端绝热。

4 热模型计算及载流量的分析

利用有限元软件 ANSYS 对简化热模型进行计算,其中所取的主要参数如下:导体材料为铜;外壳材料为不锈钢;导体的电阻率(ρ)为 $1.71e^{-8} \cdot m$;导体的热导率为 $390 W/(m \cdot K)$;导体外表面的辐射率为 0.18;外壳内表面的辐射率为 0.1;出线端温度为 $80^\circ C$;外壳温度为 $60^\circ C$;断路器处接触电阻为 $25 \mu\Omega$ 或 $12.5 \mu\Omega$ (处于导体正中);隔离开关处接触电阻为 $10 \mu\Omega$ 或 $5 \mu\Omega$ (处于导体中间 $\pm 0.5 m$ 处)。在改变外壳内半径、导体横截面积、导体长度、接触电阻值、回路电流等参数进行长期发热计算后得到结果如下:

(1) 导体的轴向温度分布图和热流图

图 5 是导体的轴向温度分布图。两条曲线分别代表 VIS 内部不含和含有母线的两种情况。从图 5 可以得出:不含母线时导体的最高温度位于主回路导体正中,即断路器断口处;含有母线时导体最高温度的位置靠近母线端,且含有母线时导体的最高温度高于不含母线时导体的最高温度。

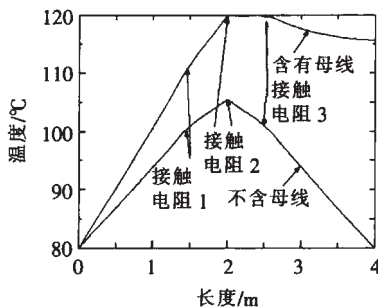


图 5 导体的轴向温度分布图

图 6 是导体热流图和导体径向热流云图。其中图 6(a) 是导体热流图。图中热流矢量几乎与导体平行,因此导体内的热量主要从轴向方向散出。图 6(b) 是导体径向热流云图,用来表示辐射散热,可以看出导体中间温度最高处的辐射热流最大。

(2) 导体最高温度与外壳内半径的关系

系统辐射率与外壳内半径有关,经计算,外壳内

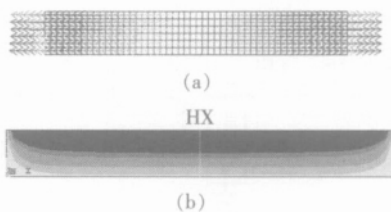


图 6 导体热流图和导体径向热流云图

半径略微影响导体最高温度,但幅度不大,可忽略不计。在后文的计算中为方便计算,外壳内半径统一采用 $0.3 m$ 。

(3) 不同载流量时最大导体可用长度

表 1 和表 2 是在不同载流量下最大主回路导体可用长度。其中最大主回路导体长度的含义是指在表 1 和表 2 中所示条件和载流量下,导体最高温度不高于最高允许温度 ($145^\circ C$) 时导体可以采用的最大长度。在综合参考 VIS 的设计要求和各厂商生产的 $40.5 kV$ 真空断路器的结构后,建议 $40.5 kV$ VIS 的主回路导体的长度不应少于 $3 m$ (参考 $40.5 kV$ 真空断路器、隔离开关和套管的长度)。表 1 和表 2 中的加括号数据是经计算后满足最高温度限制的可行设计方案。由表中可见,在一定条件下含有母线的 $40.5 kV$ VIS 载流量约可以达到 $2 000 A$; 而不含母线的 $40.5 kV$ VIS 的载流量约可以达到 $2 500 A$ 。

综合表 1 和表 2 中的数据,还可得到以下结论:

(1) 主回路导体横截面积越大, VIS 可用载流量越大。从表 1 和表 2 中可以看到, VIS 的主回路导体半径大于其它绝缘介质电器设备的导体半径。这是

表 1 不同许用载流量时最大导体可用长度(含母线)

长度/m	半径/m	接触电阻/ $\mu\Omega$	1 600 A	2 000 A	2 500 A
实心圆柱	0.06	25.0/10	2.8	2.0	<2.0
		25.0/5	(3.2)	2.2	<2.0
		12.5/10	(3.2)	2.2	<2.0
	0.07	12.5/5	(3.4)	2.4	<2.0
		25.0/10	(3.8)	2.6	<2.0
		25.0/5	(4.2)	2.8	2.0
空心圆柱	0.05/0.06	12.5/10	(4.2)	(3.0)	2.2
		12.5/5	(4.4)	(3.2)	2.4
		25.0/10	<2.0	<2.0	<2.0
	0.05/0.07	25.0/5	2.0	<2.0	<2.0
		12.5/10	2.2	<2.0	<2.0
		12.5/5	(3.8)	<2.0	<2.0

表 2 不同许用载流量时最大导体可用长度(不含母线)

长度/m	半径/m	接触电阻/ $\mu\Omega$	1 600 A	2 000 A	2 500 A
实心圆柱	0.06	25.0/10	(4.8)	(3.6)	2.6
		25.0/5	(5.0)	(3.6)	2.8
		12.5/10	(5.2)	(4.0)	(3.0)
	0.07	12.5/5	(5.2)	(4.0)	(3.2)
		25.0/10	(6.0)	(4.4)	(3.4)
		25.0/5	(6.2)	(4.6)	(3.4)
空心圆柱	0.05/0.06	12.5/10	(6.4)	(5.0)	(3.8)
		12.5/5	(6.6)	(5.0)	(3.8)
		25.0/10	(3.4)	2.2	<2.0
	0.05/0.07	25.0/5	(4.0)	2.4	<2.0
		12.5/10	(4.8)	2.8	2.0
		12.5/5	(6.2)	(3.4)	2.2

因为真空不存在对流传热,使得 VIS 中的径向传热与其它绝缘介质电气设备相比大大减少,为了加强轴向传热需要增加主回路导体的横截面积。因此建议设计人员在设计真空绝缘组合电器时适当增加主回路导体半径并尽可能采用实心导体以帮助从轴向散出 VIS 中的热量。

(2) 主回路导体长度越小,许用载流量越大。应在满足设计要求的情况下尽可能减小主回路导体的长度,这样一方面有利于散热,另一方面也有利于减小 VIS 的体积。

(3) 接触电阻越小,许用载流量越大。应尽量选用接触电阻小的断路器和隔离开关。因为接触电阻是电气设备的主要热源,例如在断路器接触电阻为 12.5μ 、隔离开关接触电阻是 5μ 、主导体半径为 0.06 m 、长度为 3 m 的 VIS 中,接触电阻的发热量占总发热量的 67.4% 。另一方面接触电阻多处于 VIS 的内部,其发出的热量不易散出。目前在市场上已出现回路电阻为 $7 \pm 2 \mu$ 的 40.5 kV 真空断路器,因此 VIS 的载流量仍有上升的空间。

(4) 由于高于 40.5 kV 电压等级的 VIS 绝缘距

离的增加,因此在相同条件下的可用载流量要小于 40.5 kV 的可用载流量。

5 结论

(1) 确定了 VIS 最高允许温度,建立了简化的热学模型,并应用有限元软件 ANSYS 进行了长期发热计算。

(2) 根据长期发热计算结果,对各种影响 VIS 载流量的因素进行了分析,并提出了对 VIS 的设计建议。

(3) 经过计算得到了 40.5 kV VIS 的可用载流量范围:在一定条件下,含有母线的 40.5 kV VIS 载流量约可以达到 2000 A ;不含母线的 40.5 kV VIS 载流量约可以达到 2500 A 。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计[M]. 北京:电力工业出版社,1984.
- [3] John H Lienhard. A Heat Transfer Textbook. Third Edition [M]. New Jersey: Printice-hall, Englewood Cliffs, 2002.

(上接第 87 页)

它 3 种缺陷的识别率皆高于以统计算子为特征量输入的认识率。结果表明,两种识别方法都是有效的。

5 结论

(1) 提出逐段搜索法确定 XLPE 电缆局部放电信号的无标度区,为灰度图像的分维数计算提供可靠的依据。识别的结果表明无标度区的确定是有效的。

(2) 通过计算灰度图像正、负半波的盒维数和信息维数,并将其作为 BP 神经网络的输入,得到了较好的识别效果。

(3) 通过与以三维谱图正、负半波统计算子为特征量的 BP 神经网络模式识别率相比较,证明了两种识别方法的有效性。

参考文献:

- [1] 刘云鹏,律方成,李成榕. 局部放电灰度图像数学形态谱的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 179-183.
- [2] 张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版社,1995.

- [3] Sati sh L, Zaengl W S. Can Fractal Features be Used for Recognizing 3-D Partial Discharge Patterns [J]. IEEE trans on Dielectrics and Elect. Insulation, 1995, 2(3): 352-359.
- [4] 高凯,谈克雄,李福祺,等. 基于散点集分形特征的局部放电模式识别研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 22-26.
- [5] 杨孝华. 基于人工神经网络的 XLPE 电力电缆局部放电模式识别的研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [6] 孙佳峰,仲海,张军. 电力电缆击穿机理及常见故障原因[J]. 农村电气化, 2000(8): 31.
- [7] 李剑. 局部放电灰度图象识别特征提取与分形压缩方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2001.
- [8] Krivda A, Gulski E, Sati sh L. The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 889-892.
- [9] 李剑,孙才新. 局部放电灰度图象分维数研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 123-127.
- [10] 巫兆聪. 分形分析中的无标度区确定问题 [J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 240-244.
- [11] 费斌,蒋庄德,王海容. 基于遗传算法求解分形无标度区的方法[J]. 西安交通大学学报, 1998, 7(32): 72-75.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!