

大截面电缆金具涡流损耗计算与分析

李娟,刘念,刘航宇,蒲丽娟
(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

摘要: 电缆的输送容量随着大截面电缆的广泛应用而越来越大。在大电流作用下,电缆金具涡流损耗不能忽略。分析电缆金具涡流原理,建立大截面电缆固定金具的三维涡流场数学模型,在考虑边界条件和初始条件下,利用有限元法,计算单根电缆的金具涡流损耗模型。计算结果得出金具涡流损耗,分析磁感应强度和涡流损耗分布,探讨了金具间隙大小和金具厚度对金具涡流损耗的影响,结合仿真实验和工程实际提出了最佳的金具间隙大小和金具厚度。

关键词: 大截面电缆; 电缆金具; 有限元法; 金具间隙

Abstract: With the wide application of large cross-section power cables in China, the transmission capacity of the cable is also growing. Under the high current, the eddy current losses of fixed cleat cannot be ignored. The principle of eddy current of fixed cleat for power cable is analyzed, and a 3D eddy current mathematical model of fixed cleat for large cross-section power cable is established. Under the consideration of boundary and initial conditions, the eddy current losses of fixed cleat for single cable are calculated with finite element method (FEM). The eddy current losses of fixed cleat are obtained after the calculation, and the distributions of magnetic induction intensity and eddy current losses are analyzed. And then the impacts of the clearance in cable fittings and their thickness on eddy current losses of fixed cleat are discussed. Finally, the best clearance in fittings and the best thickness are proposed combining with the simulation and the actual projects.

Key words: large cross-section power cable; cable fitting; finite element method (FEM); clearance of fittings

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0078-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.019

0 引言

电网的输送容量随着电网的快速发展越来越大,220 kV大截面电缆的应用也越来越广泛^[1]。在电缆运行过程中,大截面电缆的固定金具和支撑金具发挥很大作用,其将电缆重量和热机械力以及短路时的电动力分散到各个金具释放,使电缆免受机械损伤。长期的大电流作用使得金具损耗成为了电力电缆线路损耗中不可忽略的一部分,且金具长期发热对电缆外护套的寿命也有一定的影响^[2-3]。目前,国内损耗计算的文献,较多集中在电磁炉、变压器铁心等领域的电涡流发热课题的研究,但是对于高压电缆引起的涡流场导致电缆金具发热的问题关注较少^[4-6],国内对大截面电缆金具的研究没有跟上电网的发展。因此,对于大截面电力电缆金具损耗的研究,有助于电力电缆工程中对金具的选型、减少线路损耗、提高电力电缆运行稳定性及降低线路运行成本。

通过分析涡流原理,结合有限元方法,采用COMSOL软件对隧道敷设大截面(2 000 mm²)超高压单芯交联聚乙烯电力电缆及电缆金具进行建模,仿真计算在正常运行工况下所配套金具的损耗,分析仿真结果,并探讨金具间隙和金具厚度对金具损耗的影响。

1 涡流损耗产生的原理

电缆电流引起的金具涡流问题属于时变涡流场问题^[7]。电缆通过交变电流后,由于金具本身是采用铝合金等材料,在交变电流的作用下,金具周围会产生交变磁场,此磁场强度 B 的表达式为

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度; μ_0 为电导率; r 为距离无限长导线的距离; I 为电流。根据电磁感应定律,此交变磁场在金具内部也会产生感应电动势,感应电动势 e 为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

式中, Φ 为磁通。金具在感应电动势的作用下产生感应电流, 由于它是围绕金具中心呈涡状流动, 所以称为涡流。由于金具存在一定的电阻, 涡流会产生功率损耗, 即为涡流损耗。

由于金属护套本身存在环流与涡流, 必然会使电缆本体产生热量, 这些热量通过热传导的形式, 向与它接触的金具传递热, 且金具本身的涡流也会使金具产生大量的热量。当散热与生热两者平衡时, 电缆金具会保持为一个恒定值。如果这个温度长期地作用在电缆上, 会引起电缆表面绝缘的破坏, 加快电缆老化的速度, 减短电缆的寿命。因此研究隧道敷设大截面超高压单芯交联聚乙烯电缆和金具损耗具有重要的意义。

2 建立模型与仿真分析

2.1 建立金具涡流场数学模型

由于金具的物理和几何参数在沿电缆电流方向均发生变化, 因此金具涡流场问题是一个三维涡流场求解问题。大截面电力电缆在工频条件下稳定运行, 作似稳电磁场, 可忽略其位移电流与传导电流。图1所示为电缆缆芯导体与电缆金具简化模型正视图, 其中 V_1 为含电力电缆的非涡流区; V_2 为电缆金具, 即涡流区; S_{12} 为 V_1 和 V_2 的内部分界面; V_2 的外边界分别为 S_B 和 S_H [8-9]。

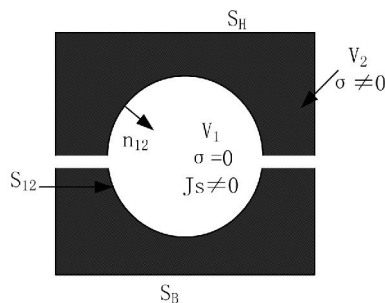


图1 电缆金具与缆芯简化模型正视图

在 V_1 和 V_2 内, 根据麦克斯韦方程组, 用场矢量 B 、 E 、 H 表示的涡流场控制方程与边界条件如式(3)至式(7)。

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_s \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \nabla \times H = \sigma E \\ \nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} B_1 \times n_{12} = B_2 \times n_{12} \\ H_1 \times n_{12} = H_2 \times n_{12} \end{cases} \quad (5)$$

$$B \times n = 0 \quad (6)$$

$$H \times n = 0 \quad (7)$$

式(3)、式(4)分别属于区域 V_1 、 V_2 , 式(5)~式(7)分别属于边界 S_{12} 、 S_B 、 S_H 。式中 J_s 为电力电缆电流密度; n 为 S 的单位法矢量; n_{12} 为 S_{12} 的单位法矢量, 方向从 V_2 指向 V_1 。

三维开域涡流场一般采用 A 、 Φ - A 法, 在非涡流区采用矢量磁位 A 作为未知函数, 在涡流区采用 A 和标量 Φ 电位作为未知函数, 引入式(8)和式(9)得

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (9)$$

将式(8)和式(9)带入式(3)~式(7)所得控制方程和边界条件并不能保证矢量磁位 A 的唯一性, 这里引入库仑规范, 并规定 $\nabla \times A = 0$

考虑电流连续性方程式, 式(3)和式(4)分别改写为

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) = J_s \quad (10)$$

$$\begin{cases} \nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi = 0 \\ \nabla \times (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

对式(10)和式(11)的第一个方程取散度, 并考虑源电流密度的散度为零, 可得出在整个区域 V 内标量函数 $v \nabla \times A$ 满足拉普拉斯方程结论, 即

$$\nabla^2 (v \nabla \times A) = 0 \quad (12)$$

式中 $v \nabla \times A$ 是整个区域 V 内的调和函数, 在边界 S 上给定第一类边界或齐次混合边界都可以保证矢量磁位 A 满足库仑规范。

综上所述, 引入矢量磁位 A 、标量电位 Φ 在给定初始条件和边界条件下, 涡流场完整数学模型如下, 式(13)、式(14)分别属于区域 V_1 、 V_2 , 式(15)~式(17)分别属于边界 S_B 、 S_H 、 S_{12} 。

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) = J_s \quad (13)$$

$$\begin{cases} \nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi = 0 \\ \nabla \times (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} n \times A = 0 \\ v \nabla \times A = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} n \times A = 0 \\ (v \nabla \times A) \times n = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ v_1 \nabla \times A_1 = v_2 \nabla \times A_2 \\ v_1 \nabla \times A_1 \times n_{12} = v_1 \nabla \times A_1 \times n_{12} \\ n \times (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

2.2 建立有限元模型

根据实际隧道敷设电力电缆固定金具的实体模型建立相应的金具三维模型,金具为常用的电工铝合金材料3003,它的电导率为40% IACS。金具结构参数如表1所示。为了简化电缆模型,将电缆缆芯假设为一根加载源电流的通电导线;忽略谐波的影响;不考虑空间电荷和位移电流的影响;认为媒质的磁导率都是线性的^[10-12]。由于涡流场是开域场,在无限大的区域内进行计算是不实际的,因此取电缆长度500 mm进行计算,忽略其他位置电缆所产生的磁场对金具的影响。采用的电缆型号为YJLW02-Z型,电压等级为220 kV,电缆缆芯施加电流载荷额定有效值为2 000 A。电缆结构参数如表2所示。最终建立的电力电缆和电缆金具三维模型如图2所示。采用四面体单元对电缆模型和金具模型各个部件进行自适应的网格划分,共226 071个单元。

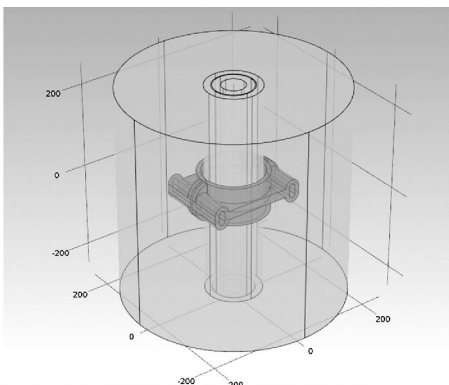


图2 电缆和金具的计算模型

2.3 仿真结果分析

根据仿真实验结果,得出电缆金具磁感应强度图如图3,金具涡流损耗分布图如图4。

表1 金具结构参数

参数	长度 /mm	厚度 /mm	内径 /mm	纵向宽 /mm	中间间隙 /mm
数值	54	18.5	2.3	7	127

表2 电缆结构参数

参数	导体直径 /mm	绝缘层厚 /mm	金属护套 /mm	外护层厚 /mm	电缆直径 /mm
数值	54	18.5	2.3	7	127

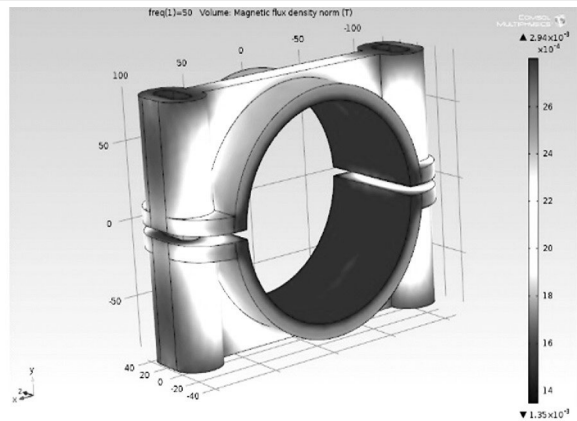


图3 磁感应强度图

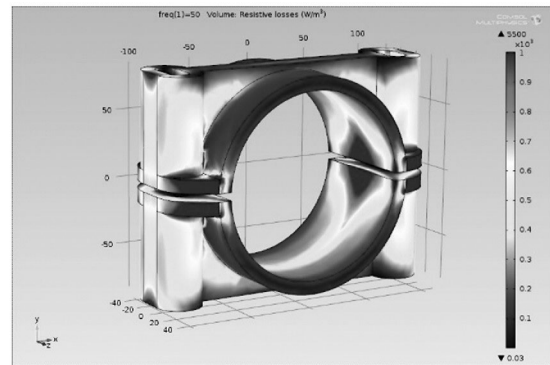


图4 涡流损耗分布图

从图3可以看出,电缆金具的磁感应强度主要集中在金具与电缆的接触面上,平均磁感应强度达到了 $3 \times 10^{-3} T$,而金具离电缆较远端磁感应强度略低于近端,平均磁感应强度为 $2 \times 10^{-3} T$ 。由理想公式 $B = \mu I / 2\pi r$ 可以看出,磁通量密度与离电缆距离 r 呈反比关系,离电缆越近磁通量密度越大。图4为涡流损耗分布图,仿真计算得出电缆金具的涡流损耗为0.213 5 W。可以看出两片金具对接处的涡流损耗远远大于金具其他地方。这是因为该部分不仅有涡流损耗,还有漏磁产生的附加损耗。

3 影响因素分析

3.1 金具间隙对损耗的影响

部分磁通通过金具和空气间隙而闭合,这部分磁通称为漏磁,漏磁也能使电缆金具产生涡流。气隙磁导的变化会引起气隙磁场变化,而这个气隙磁场的变化会产生附加损耗,两片金具对接处不仅有涡流损耗,还存在因漏磁而产生的附加损耗^[13]。考虑中间间隙大小对涡流损耗的影响,以图2的有限元模型为例,仅改变电缆金具模型中金具间隙的大小,不改变电缆模型和金具模型中的其他结构参数,其他条件都不变。中间间隙从0 mm变化至8 mm。金具涡流损耗随中间间隙大小变化的情况如图5所示。从图5可以看出,中间间隙为0 mm时,涡流损耗最大,为0.215 71 W,随着中间间隙增大,金具涡流损耗逐渐减小。因为随着气隙增大,夹具上下部分之间空气磁阻增大,使得产生涡流损耗减小。

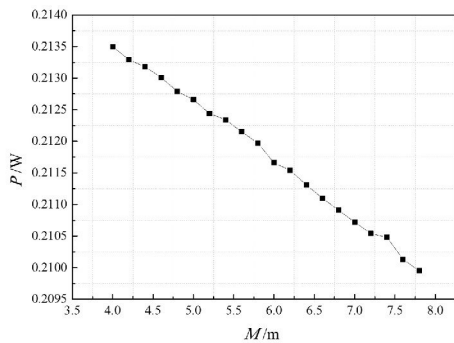


图5 金具涡流损耗随中间间隙大小变化图

3.2 金具厚度对损耗的影响

金具厚度一方面决定着其强度,另一方面对涡流损耗有影响。以图2的有限元模型为例,改变电缆金具模型中金具厚度,不改变电缆模型和金具模

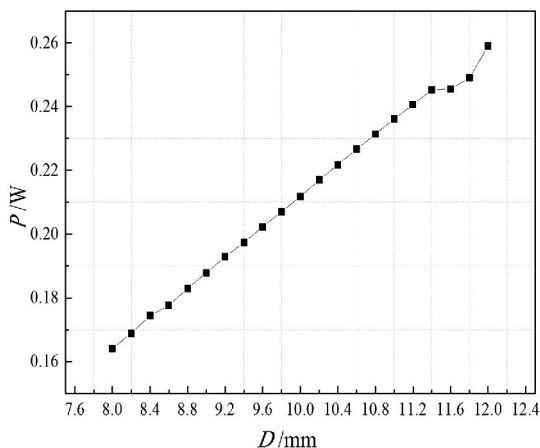


图6 金具涡流损耗随厚度变化图

型中的其他结构参数,其他条件都不变。金具厚度 D 从8 mm变化至12 mm。图6为金具涡流损耗随金具厚度的变化情况。可以看出金具涡流损耗与金具厚度近似呈线性关系,由截距法可以推知当金具厚度增加1 mm时,涡流损耗将近似增加0.024 W。

4 结论

根据对大截面电力电缆金具三维涡流场的分析,分析涡流损耗产生的原理,基于有限元基本原理,运用COMSOL软件建立大截面电力电缆固定金具三维涡流损耗的计算模型,仿真计算磁感应强度及其分布,金具涡流损耗及其分布,分析金具间隙大小和金具厚度对涡流损耗的影响,得出以下结论:

1) 电缆金具的磁感应强度主要集中在金具与电缆的接触面,涡流损耗在两片夹具对接处远远大于金具其他地方。

2) 求得单个金具的涡流损耗一般在0.22 W左右。虽然该金具涡流损耗较小,但长期发热会引起电缆本体局部过高的温升,加上现在电力电缆多采用隧道敷设,隧道内温度高,特别是夏季,电缆局部温度过高导致电缆绝缘老化。在实际工程中电力电缆隧道一般为多回路敷设且线路较长,隧道内金具数量很多。虽然单个金具涡流损耗较小,但是计及金具数量和大截面电缆运行时间由此而产生的涡流损耗是不可忽略的。

3) 改变金具间隙大小对金具涡流损耗的影响较大,随着中间间隙增大,金具损耗逐渐减小,但中间间隙过大时,固定金具不能支撑电缆重量,机械力电动力得不到释放,得出金具间隙大小的最好选在5~6 mm之间。

4) 改变厚度对金具涡流损耗的影响较大,金具损耗随厚度近似呈线性变化。金具厚度增大,金具涡流损耗随之增加;但是金具厚度太薄,无法满足暂态电流下电动力对金具机械强度的要求,综合实验结果和工程实际,金具厚度为10 mm较合适。

参考文献

[1] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
 [2] H. J Li, K. C Tan, Qi Su. Assessment of Underground Cable Ratings Based on Distributed Temperature Sensing

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1763 - 1769.

[3] S. Liu, J. K. Peng. An Improved Optimal Design Scheme for High Voltage Cable Accessories [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1): 5 - 11.

[4] 聂永峰, 王建辉, 孟毓. 输电电缆支架涡流损耗的计算与分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 142 - 145.

[5] 徐莎, 金先龙, 庞峰, 等. 大电流母线桥三维涡流场的有限元分析 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12): 2097 - 2100.

[6] 陈平, 薛毓强, 郭建钊, 等. 大电流母排三维涡流场 - 温度场耦合分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 68 - 71.

[7] 颜威利, 杨庆新, 汪友华. 电气工程电磁场数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[8] 刘志珍, 朱常青, 励庆浮. 计算导体涡流分布的 FEM - IEM 混合数学模型 [J]. 电工技术学报, 2001, 16(6):

46 - 49.

[9] 王泽中, 王炳阁, 卢斌先, 等. 三维开域涡流场 A - V 位有限元与边界耦合分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 1 - 4.

[10] D Labridis, P Dokopoulos. Finite Element Computation of Eddy Current Losses in Nonlinear Ferromagnetic Sheaths of Three - phase Power Cables [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(4): 1407 - 1415.

[11] 谢德鑫, 白保东, 等. 三维涡流场的有限元分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[12] Pyungwoo Jang, Bonghan Lee. Effects of Insulator Resistivity on Eddy Current Loss of Compressed Powder Cores Studied by FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2781 - 2783.

[13] 李晓松, 陈乔夫, 胡贵. 超导变压器绕组环流损耗 [J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 1 - 4.

(收稿日期: 2015 - 05 - 13)



(上接第 23 页)

5 结 论

通过对凤凰片区现状短路电流水平分析, 得出 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流已接近额定遮断电流, 制约电网运行方式安排, 影响系统安全稳定运行。根据电网规划, 凤凰片区各项电网工程对 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流均有一定的贡献, 短路电流超标严重影响凤凰片区安全稳定运行。针对凤凰片区短路电流水平超标问题, 结合该地区网架结构特点, 提出了 3 种抑制短路电流的措施, 3 种措施均能降低 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流水平。但随着各项电网项目的相继投运, 仅靠单一的措施无法满足电网发展需要, 需要多种措施并举才能降低 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流, 保证电网安全稳定运行, 同时在后续电网规划中应重点关注凤凰片区短路电流问题, 合理规划、合理分配 750 kV 凤凰变电站接带电源容量, 形成 750/220 kV 分片区运行。

参考文献

[1] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨 [J]. 华东电力, 2006, 34(7): 55

- 59.

[2] 国网新疆电力公司. 新疆电网 2015 年度运行方式 [R]. 2015.

[3] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141 - 151.

[4] 江道灼, 敖志香, 卢旭日, 等. 短路限流技术的研究与发展 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 8 - 19.

[5] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42 - 45.

[6] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 92 - 96.

[7] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500kV 电网短路电流运行方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 104 - 107.

[8] 叶幼君, 鲍爱霞, 程云志. 浙江 500kV 电网短路电流的控制 [J]. 华东电力, 2006, 34(3): 11 - 15.

作者简介:

张增强 (1982), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与分析;

吕盼 (1984), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与分析;

周专 (1987), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制。

(收稿日期: 2015 - 05 - 11)