

不同材质电缆支架对电缆运行适用性研究

黄涛¹, 文珊², 王庭华¹, 范逸斐¹, 王颖¹, 万鹭¹

(1. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008;

2. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:在大电流作用下, 电缆支架的导磁性会改变电缆周围的磁场分布, 进而影响电缆本体运行, 导致其温升变化, 以往电力规程规范对于电缆支架的选材并未给出明确说明。文中以江苏省电力公司镇江市南徐 220 kV 变电站电缆为例, 采用二维电磁场-流体场-温度场多物理场耦合有限元计算方法, 研究不同载流量、不同电缆材质支架对电缆运行温升的影响。结果表明不同材质电缆支架因涡流引起的电缆支架温升不会危及人身及设备安全, 是否选用非磁性材质支架应综合考虑涡流引起的损耗及经济性。文中考虑了电缆支架的影响, 给出了支架选择时的理论与工程应用依据, 对提高电缆建设经济性和运行可靠性有重要意义。

关键词: 电缆支架; 多物理场耦合; 不同材质; 涡流; 温度

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)02-0104-06

0 引言

交流电缆在运行时, 其交变电场会产生交变磁场, 交变磁场作用在金属质电缆支架上感应出涡流。在大电流作用下, 支架的导磁性会对电缆周围的磁场产生不可忽视的影响, 进而对电缆本体的运行产生影响, 导致电缆本体温度升高^[1]。长期电缆运行经验表明, 普通钢支架涡流损耗不能忽略, 且钢制支架长期发热对电缆外护套的寿命也有一定的影响^[2,3]。由于电阻率的存在, 金属支架上产生的涡流会产生损耗, 该损耗以热量的形式散发出去。支架上热量难以散发, 这使金属支架的温度较高^[4]。目前电缆支架材料主要分为导磁材质(钢制)与不导磁材质(复合材料与不锈钢等), 根据国标规定, 电缆支架除支持作电流大于 1500 A 的交流系统单芯电缆外, 宜选用钢制^[5]。技术经济综合较优时, 可选用铝合金制电缆桥架。根据国家电网的指导意义, 电缆支架材料以普通钢材为主; 分相布置的单芯电缆, 电缆支架应采用非铁磁性材料^[6]。根据电力行业标准《城市电力电缆线路设计技术》规定: 单芯电缆用的夹具, 不得形成磁闭合回路, 与电缆接触面应无毛刺, 即使用非磁性铝合金夹具隔断磁环路, 减少因单芯电缆而引起的涡流和磁滞损耗而导致电缆局部发热^[7]。

不锈钢材料价格高, 工程投资大。一组不锈钢支架价格超过普通钢支架 5000 元左右, 全部使用不锈钢支架的电缆线路造价往往达到普通钢支架电缆线路的 4 倍。目前发展策划部门要求降低工程造

价, 但支架是否采用非铁磁性材料, 各方仍存在异议。按规程要求: 电缆支架支持工作电流小于 1500 A 的交流系统单芯电缆(大截面电缆)宜采用钢制。这与运行检修部门提出的“分相布置的单芯电缆, 电缆支架应采用非铁磁性材料”明显矛盾。因此, 在电缆设计时, 存在规程依据不明确、标准要求相对粗放的实际情况。据此, 江苏省电力设计院提出设计考虑的电缆工作电流是正常时的负荷电流, 不要考虑最大电流($N-1$ 情况)。其次工作电流大于 1000 A 时采用非铁磁性材料; 工作电流小于 1000 A 时采用绝缘材料将电缆抱箍与支架隔离, 但该解决方法仍然缺乏可靠的理论与计算依据。关于支架材质选择时的具体标准与现有规程的理论支撑, 目前仍很缺乏。

针对该问题, 本文主要研究电缆支架处 110 kV 及以上电缆运行的电磁场、流体场与温度场分布情况, 重点研究不同材质电缆支架对不同排列方式电缆的耦合场的影响程度。采用二维电磁场-流体场-温度场多物理场耦合有限元计算方法, 建立含支架电缆电磁场、流体场、温度场耦合仿真计算模型, 计算不同电缆支架材质、载流量、排列方式下电缆及支架的温度, 并进行实验验证。结论中, 基于现有电力电缆上规程标准, 根据所建立模型给出电缆支架材质选择的标准与依据。

1 电缆计算数学模型

1.1 二维涡流场的数学模型

考虑本文研究的是电缆不同载流量情况下电缆支架的温升分析, 并且电缆的磁场沿轴向分布基

本一致,可以近似采用二维等效代替三维。采用二维计算可节省计算时间及计算内存,提高计算效率。为此,计算模型为二维涡流场问题^[8,9]。计算区域 $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$, Ω_1 为涡流区,包含电缆支架; Ω_2 为含电流源的非涡流区,包含电缆本体、空气、土壤等; Γ 为 Ω 的边界; Γ_{12} 为涡流与非涡流区的交界面。二维有限元计算模型如图1所示。

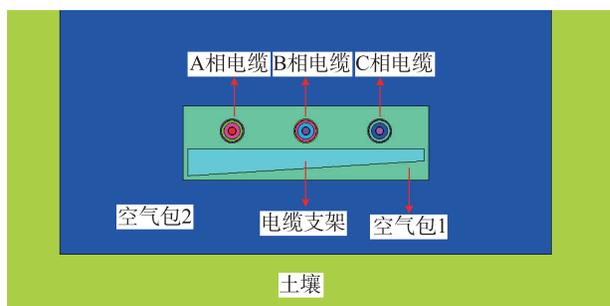


图1 二维有限元计算模型示意图

Fig.1 2D finite element calculation model

采用A, A- ϕ 法,在库伦(Coulumb)规范 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ 条件下,涡流场微分控制方程如下。

在 Ω_1 内:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) + j\omega \sigma \mathbf{A} + \sigma \nabla \varphi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma (-j\omega \mathbf{A} - \nabla \varphi) = 0 \quad (2)$$

在 Ω_2 内:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s \quad (3)$$

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率; \mathbf{J}_s 为绕组电流密度; ω 为磁场变化的角频率。

1.2 二维涡流场的数学模型

高压电缆稳态温度场计算可视作二维稳态导热问题。其中,有热源区域(如电缆导体和金属套)的温度控制方程为^[10-13]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v = 0 \quad (4)$$

无热源区域(如电缆其他层、土壤等)的温度控制方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

电缆中流体与固体之间的热量传递应满足稳态热传导方程和能量守恒方程^[14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q \quad (6)$$

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T + Q \quad (7)$$

式中: k_x, k_y, k_z 为电机内结构件各向异性的导热系数; Q 为结构件内部的热流密度; ρ 为空气密度; c 为比热容; u, v, w 分别为流体速度在 x, y, z 方向的分量; T 为温度; q_v 为单位长度电缆导体、金属屏蔽层或铠装层内的单位面积发热率。空气、电缆及护层、支架都按实际材料属性定义热导率、密度和比热容等参数。

2 计算数学模型

2.1 电缆仿真模型 220 kV 变电站电缆隧道介绍

本文计算模型采用江苏省电力公司南徐220 kV变电站电缆,该变电站位于镇江市市区,采用全户内设计,其电缆排列方式为水平排列,电缆隧道支架采用钢材料,电缆夹具为铝合金,图2为南徐220 kV变电站电缆隧道。

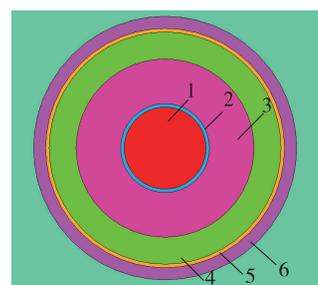


图2 南徐220 kV变电站电缆隧道

Fig.2 Nanxu 220 kV substation appearance

2.2 仿真模型

考虑到阻水带、阻水带、铝塑带、沥青等对磁场及温度场的影响不大,因此,为简化计算,可以不考虑,计算模型如图3所示。



1 为电缆芯; 2 为导体屏蔽; 3 为XLPE绝缘; 4 为绝缘屏蔽; 5 为皱纹铝护套; 6 为外护套

图3 电缆剖面示意图

Fig.3 Nanxu 220 kV substation cable tunnel

对于电缆模型的参数及材料属性分别如表1和表2所示。

表 1 电缆模型结构参数

Table 1 Structural parameters of cable model mm

结构参数	数值
导体外径	30.3
导体屏蔽外径	32.9
XLPE 绝缘外径	65.9
绝缘屏蔽外径	85.9
皱纹铝护套外径	88.5
外护套外径	97.5
电缆间间距	300
电缆与支架距离	22.7

表 2 电缆各部分材料属性

Table 2 Material properties of each part of cable

材料	电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	相对 磁导率	热导率/ [$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]
导体(铜)	1.75×10^{-8}	1	400
导体屏蔽	5.25×10^8	3	0.6
XLPE 绝缘	1×10^{15}	3	0.5
绝缘屏蔽	1×10^{14}	3	0.5
皱纹铝护套	2.83×10^{-8}	1	238
外护套	1×10^{15}	3	0.5
空气	—	3	0.023
土壤	80	1.8	—

2.3 数值计算

在空气包 2 外边界设置第一类边界条件 $A_z = 0$, 即磁力线平行边界条件, 电缆电流为 2100 A, 环境温度选取 25 $^{\circ}C$ 。本文为简化计算, 采用时谐方法计算电缆的电磁场分布, 形成的方程组采用 ICCG (the incomplete cholesky conjugate gradient) 求解算法, 该算法不改变矩阵非零元素数量, 可减少对内存的需求, 适于求解大规模有限元计算问题, 需要的迭代次数少, 收敛较快^[15-18]。根据上述给定模型及求解方法, 计算得到的电缆磁通密度及损耗分布云图分别如图 4 和图 5 所示。

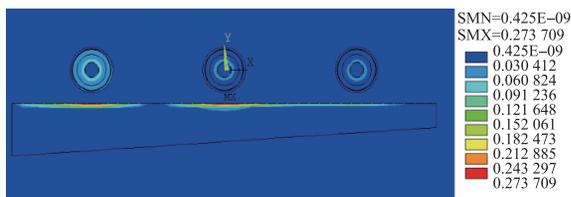


图 4 磁通密度分布云图

Fig.4 Cable cross-sectional schematic view

从图 4 中可以看出, 磁通密度较大的地方主要在电缆本体及支架附近, 最大值为 0.274 T。图 5 中, 损耗较大部位也是在本体及支架附近, 并且电缆本体损耗占了很大一部分, 支架也有一定的损耗, 且主要集中在靠近电缆的一侧。



图 5 损耗分布云图

Fig.5 The magnetic flux density contours

电缆的温度分布云图如图 6 所示, 最高温度在电缆缆芯处, 达到 90.534 $^{\circ}C$, 电缆支架温度为 42.1 $^{\circ}C$ 。根据 GB 50217—2007^[5], 电缆正常运行时温度不能超过 90 $^{\circ}C$, 因此该电缆的载流量不能超过 2250 A。

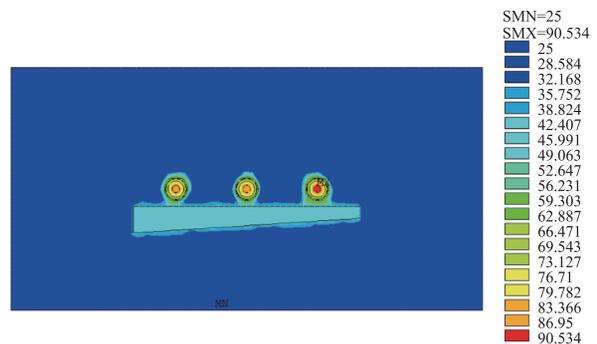


图 6 温度分布云图

Fig.6 Loss contours

2.4 不同载流量对电缆温度运行影响

电缆温度计算时, 温度变化主要由电流损耗转化的热能引起, 因此需要计及不同的载流量对电缆及其电缆支架的影响。因为电缆电流产生的磁场主要对导磁材料产生影响, 所以仿真时电缆支架材料取 40 号钢。图 7 为不同载流量时电缆及电缆支架温度场的模拟图。可以看到, 电缆温度大小与载流量的大小正相关。同时, 支架部分温度高于周围空气温度。

2.5 对电缆温度运行影响因素的综合性分析

电缆支架根据电压等级、应用场合以及建造预算, 会采用不同的材料, 其中主要包括: 钢材、不锈钢及复合材料等。随着支架材料的不同, 其对电缆温度的影响也不尽相同。因此, 在 2000 A 载流量的条件下, 通过有限元法分析不同电缆支架材料对电缆温度的影响。

图 8 为采用不同电缆支架材料时, 电缆及其周边温度场示意图。可以看到, 与不锈钢以及复合材料相比, 采用铁磁材料作为支架材料时, 电缆与电缆支架接近的地方存在温度积聚的情况, 最高可接近 70 $^{\circ}C$ 。由于铁磁材料支架存在较高的磁导率, 当电缆通电后, 交变电流产生的感应磁场导

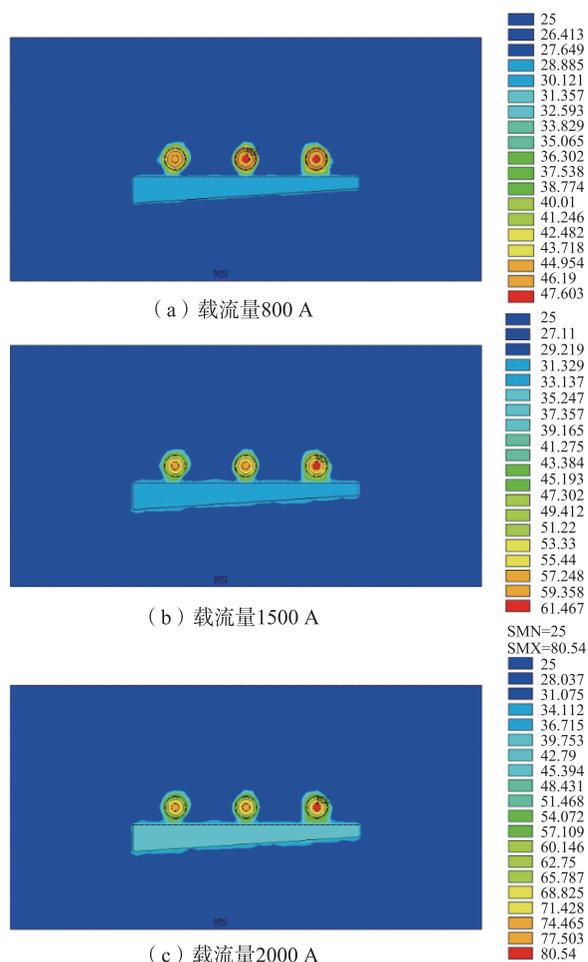


图7 不同载流量情况下电缆及电缆支架温度场云图

Fig.7 Cables and cable support temperature field cloud on different flow conditions

致支架中涡流的产生。同时,支架磁场反作用于电缆磁场,使电缆与支架靠近处的磁通密度增大。两者同时作用,使得该处温度高于远离支架处的温度。

电缆芯温度对应不同材料与载流量如表3所示。电缆支架温度对应不同材料与载流量如表4所示。

表3 电缆芯温度对应不同材料与载流量

Table 3 Cable core temperature corresponding to different materials and carrying capacity °C

材料	电缆芯温度		
	800 A	1500 A	2000 A
钢材(40号)	47.603	63.6	80.5
复合材料	47.66	62.7	78.8
不锈钢(403)	47.48	62.223	78.08

表3中,当支架采用钢材、不锈钢、复合材料(环氧树脂)时,对支架本身的温度有一定的影响,并且随着载流量增加,影响逐渐增大,采用钢材支架时,支架部分存在较高的温升。

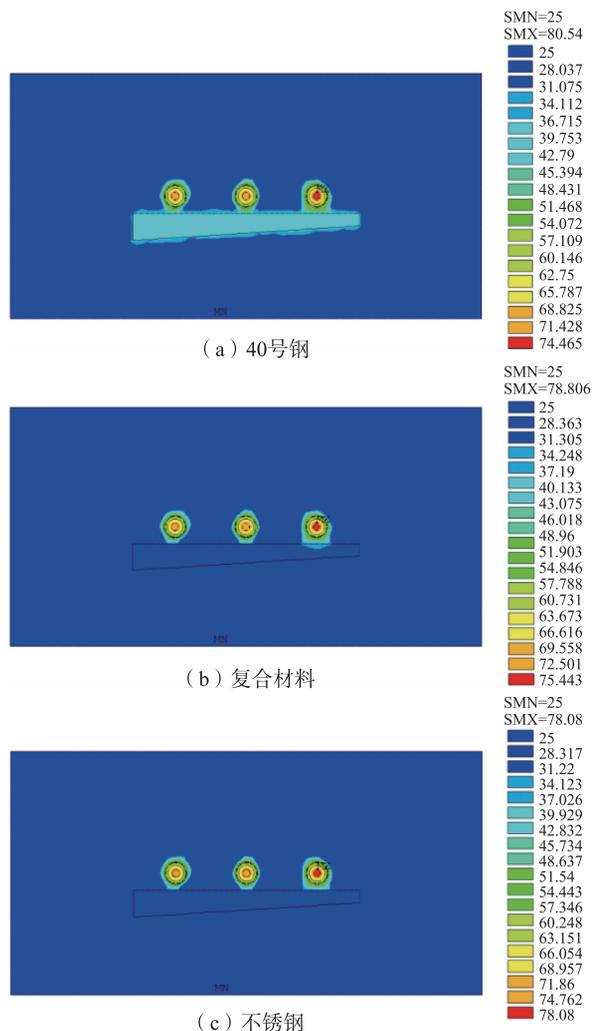


图8 2000 A时采用不同材料时电缆及电缆支架温度场云图

Fig.8 Cables and cable support temperature field cloud on different material with 2000 A

表4 电缆支架温度对应不同材料与载流量

Table 4 Cable bracket temperature corresponding to different materials and carrying capacity °C

材料	支架温度		
	800 A	1500 A	2000 A
钢材(40号)	30.1	35.2	39.7
复合材料	28.8	31.4	34.2
不锈钢(403)	25	25	25

表4中,采用复合材料和不锈钢时,电缆支架温度与空气温度相同。对于支架的温度,采用钢材时最高,而采用复合材料及不锈钢的温度相对较低一些,并且采用不锈钢的支架温度低于复合材料,这是由于不锈钢的导热系数大于复合材料的导热系数,因而,温度能较快地降低到周围的环境温度。

对表3及表4进行综合分析,可以得出:

(1) 当支架采用钢材、不锈钢、复合材料时,不同支架材料对电缆本体温升的影响较小,仅仅相差1~2°C,几乎可以忽略;与国家电网指导意见[6]中

的“电缆支架材料以普通钢材为主”相吻合。

(2) 电缆运行时,其载流量直接影响电缆周围磁场分布,进而导致电缆及支架的温度的变化。一般来说,温度变化与电流大小成正相关,对于本文中分析的 220 kV 电缆,当电流为 2250 A 时,电缆温度接近国标设计规范[5]所允许最高的 90 ℃。

(3) 当支架采用钢材、不锈钢、复合材料时,对支架本身的温度有一定的影响,并且随着载流量增加,影响逐渐增大,采用钢材支架时,支架部分存在较高的温升。

3 结语

本文从电缆支架材料选择的角度对电缆运行进行研究,采用电磁-流体-温度间接耦合法建立含支架电缆仿真计算模型,计算不同电缆支架材质、载流量下电缆及支架的温度,得出不同材质的电缆支架因涡流导致引起的电缆支架温升不会危及人及设备的安全,是否选用非磁性材质支架应从涡流引起的损耗与经济入手,综合考虑。

参考文献:

- [1] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社, 2003:149-154.
MA Guodong. Wire and cable ampacity[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003:149-154.
- [2] 王雨阳,王永强,王浩,等. 一起 110 kV 电缆终端特殊部位发热的分析处理[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 9-10.
WANG Yuyang, WANG Yongqiang, WANG Hao, et al. Analysis and treatment of a special 110 kV cable terminal[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1): 9-10.
- [3] 牛海清,王晓兵,蚊泽沛,等. 110 kV 单芯电缆金属护套环流计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 15-17.
NIU Haiqing, WANG Xiaobing, YI Zepei, et al. Study on circulating current of 110 kV single-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 15-17.
- [4] 叶冠豪,郭湘奇,王一磊,等. XLPE 电缆交叉互联系统接地直流电流在线监测[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3): 39-45.
YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, et al. On line monitoring of ground direct current in XLPE cable cross connect system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 35(3): 39-45.
- [5] GB 50217—2007 不规则排列电缆温度场及载流量计算[S]. 2007.
GB 50217—2007 Calculation of temperature field and Ampacity of irregular cables[S]. 2007.
- [6] 国家电网. 国家电网公司关于印发电力电缆通道选型与建设指导意见的通知[Z]. 国家电网运检[2014] 35 号.
SG. Notice of the guiding opinions on the selection and construction of power cable channels [Z]. SG Inspection [2014] 35.
- [7] DL/T 5221—2005 城市电力电缆线路设计技术规定[S]. 2005.
DL/T 5221—2005 Technical specification for design of urban power cable lines[S]. 2005.
- [8] 王世山,刘泽远,杜亚平,等. 双向间接耦合有限元法预估电力电缆载流量[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 133-139.
WANG Shishan, LIU Zeyuan, DU Yaping, et al. Bidirectional indirect coupled finite element method for estimating ampacity of power cable[J]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(2): 133-139.
- [9] 梁永春,柴进爱,李彦明,等. 有限元法计算交联电缆涡流损耗[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 196-199.
LIANG Yongchun, CHAI Jinai, LI Yanming, et al. The finite element method to calculate eddy current loss crosslinked cable[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(9): 196-199.
- [10] 梁永春,王忠杰,刘建业,等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 763-768.
LIANG Yongchun, WANG Zhongjie, LIU Jianye, et al. Numerical calculation of temperature field and ampacity of cables in ducts[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(3): 763-768.
- [11] 郑雁翎,仪涛,张冠军,等. 分散式排管敷设电缆群温度场的流固耦合计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1566-1571.
ZHENG Yanling, YI Tao, ZHANG Guanjun, et al. Fluid-solid coupling computation on temperature field of decentralized pipe cable system[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(6): 1566-1571.
- [12] VAUCHERET P, HARTLEIN R A, BLACK W Z B. Ampacity derating factors for cables buried in short segments of conduit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 560-565.
- [13] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等. 有限元法计算地下电缆稳态温度场及其影响因素[J]. 高电压技术, 2009, 34(12): 3086-3092.
WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of static temperature field of buried cable based on FEM and analysis of influential factors[J]. High Voltage Technology, 2009, 34(12): 3086-3092.
- [14] GAGGIDO C, OTERO A F, CIDRAS J. Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 667-677.
- [15] 梁永春,李延沐,李彦明,等. 利用模拟热荷法计算地下电缆稳态温度场[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 129-134.
LIANG Yongchun, LI Yanmu, LI Yanming, et al. Calculation of the static temperature field of underground cables using heat charge simulation Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 129-134.
- [16] 刘毅刚,罗俊华. 电缆导体温度实时计算的数学方法[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 52-54.
LIU Yigang, Luo Junhua. Mathematical method of temperature

calculation of power cable conductor in real time[J]. High Voltage Technology, 2005,31(5):52-54.

[17] 刘畅. 电力电缆载流量与温度场计算软件设计[D]. 杭州:浙江大学, 2015.

LIU Chang. Calculation software design on ampacity and temperature field of power cables[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2015.

[18] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.

LUO Tao. The study on the temperature field and ampacity calculation of power cables [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

作者简介:



黄涛

黄涛(1986—),男,湖北崇阳人,博士,从事高电压绝缘技术、特高压工程建设管理方面工作;

文珊(1987—),女,江西萍乡人,工程师,主要从事变电经济性分析方面工作;

王庭华(1967—),男,江苏江都人,高级工程师,主要从事变电土建方面工作;

范逸斐(1989—),男,江苏无锡人,工程师,主要从事变电二次方面工作;

王颖(1991—),女,江苏泰州人,工程师,主要从事电网智能化规划方面工作;

万鹭(1992—),女,江西南昌人,助理工程师,主要从事主网规划方面工作。

Research on Applicability of Different Material Cable Brackets to Cable Operation

HUANG Tao¹, WEN Shan², WANG Tinghua¹, FAN Yifei¹, WANG Ying¹, WAN Lu¹,

(1. State Grid JiangSu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Under the effect of high current, the conductivity of the cable bracket will change the magnetic field distribution around the cable, affecting the operation and leading to changes in temperature. Conventional electricity standards and regulations has not given a clear explanation of the selection cable support. In this paper, we take NanXu 220 kV substation as an example, the effects of different current carrying capacity and cable materials on the temperature rise of cable are studied by using two-dimensional electromagnetic-fluid-temperature field coupling finite element analysis method. Analysis showed that the temperature rise of cable support due to eddy currents of different materials will not endanger the safety of human and equipment, whether uses a non-magnetic material depends on eddy currents and economy. This article breaks through the limitations of traditional cable temperature calculation, taking into account the impact of cable support, given the theory and practical application foundation when selecting the material, it has important significance in improving the construction's economy and the operational reliability.

Key words: cable support; multi-physics coupling field; different material; eddy currents; temperature

(编辑 刘晓燕)

(上接第 31 页)

The Frequency Emergency Control Characteristic Analysis for UHV AC/DC Large Receiving End Power Grid

LI Hucheng¹, YUAN Yubo¹, BIAN Zhengda², XU Wei¹, ZHOU Qi¹

(1. State GridJiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The large receiving end power grid with characteristics of UHV AC/DC mixed was prone to a cascading failure. In the event of HVDC pole blocking, frequency stability problem may occur. For multiple dc coordination control, pumped storage control, accurate load control and other frequency emergency control methods, this paper conducted frequency emergency control characteristic simulation based on the actual power grid model. The simulations verified the effectiveness of the existing frequency emergency control methods. And specific improvement measures were also put forward.

Key words: UHV AC/DC; HVDC pole blocking; large receiving end power grid; frequency emergency control; simulation analysis

(编辑 刘晓燕)