

单相高温超导电缆屏蔽层电流仿真及实验研究

张会明¹, 丘明¹, 杜怡君¹, 徐维彬^{1,2}, 韩云武³, 邓祥力⁴

(1.中国电力科学研究院,北京 100192; 2.新疆大学,新疆 乌鲁木齐 830046;
3.上海电缆研究所有限公司,上海 200093; 4.上海电力大学,上海 200090)

摘要:高温超导电缆的屏蔽层在非对称故障情况下会在变电站间产生入地电流,影响系统的零序阻抗。采用数值模拟与实验相结合的方法,研究单相高温超导电缆的屏蔽层电流的影响因素。首先建立了超导电缆的电磁数值仿真模型,通过解析公式对模型进行验证,然后仿真计算不同屏蔽层等效电阻下,屏蔽层感应电流和感应电压大小。结果表明,感应电流和感应电压的主要影响因素是屏蔽层电阻的大小,且屏蔽层与导电层间的电磁关系可以采用变压器模型进行定性分析。同时,搭建了超导电缆屏蔽层电流的测试实验平台,初步验证了屏蔽层阻抗对屏蔽层电流的影响规律。

关键词:超导电缆;屏蔽层;感应电流;电阻;数值仿真

中图分类号:TM249.7

文献标识码:A

文章编号:1672-6901(2020)01-0014-05

Simulation and Experimental Study of Screening Current of Single Phase High Temperature Superconducting Cable

ZHANG Huiming¹, QIU Ming¹, DU Yijun¹, XU Weibin^{1,2}, HAN Yunwu³, DENG Xiangli⁴

(1.China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2.Xinjiang University, Urumuq 830046, China;
3.Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China;
4.Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Due to the existence of screening layer in HTS superconducting cable, fault current would be induced between power stations, thus the protection strategy would be changed, compared to normal cables. In this paper, we study the factors which influence the screening currents, using numerical modeling and experimental techniques. Firstly, we establish the FEM model of single phase superconducting cable, which is verified by the analytic method. Then, we simulate the screening current and induced voltage under different resistance. It is found that the resistance within the screen circuit is the major factor of screen current and induced voltage. This kind of relationship can be described by the transformer model. Meanwhile, the experimental platform of screening current measurement is built to verify the relation between the resistance and screening current.

Key words: high temperature superconducting cable; screening layer; current; resistance; numerical modeling

0 引言

与传统输电技术相比,超导输电技术具有大容量、低损耗、节省走廊、环境友好、优化电网结构等技术优势,自20世纪70年代开始,美国、苏联和日本等一些国家相继开展了超导电缆的研究工作^[1-2]。1986年陶瓷氧化物超导体的发现,使得超导电缆的运行温度可提至液氮温区,冷却和运行成本大幅度

降低。近二十年来良好性能的高温超导线材材技术逐步成熟,实现商品化,为高温超导电缆研发及其输电技术应用奠定了良好基础^[3-4]。目前,国内对超导电缆的研究已经进入示范运行阶段,研究的重点在配电网的工程验证与系统运行。上海市经济和信息化委员会与上海市科学技术委员会正在建设公里级长度、35 kV交流冷绝缘高温超导输电示范工程,预计2019年底投运^[5];中国南方电网公司正规划在深圳建设数百米长度冷绝缘高温超导配电线路^[6]。

图1是典型的冷绝缘超导电缆的结构示意图,包括内支撑、电缆导体、低温恒温器、电气绝缘层和电缆屏蔽层与外护套等部分^[7]。冷绝缘超导电缆与常规电缆最大的不同是其屏蔽层,一般采用与导体层相同的超导带材同轴绕制而成,运行时屏蔽层也处在低温环境中,称为超导屏蔽层。冷绝缘超导

收稿日期:2019-06-18

基金项目:国家电网公司科技项目“国产公里级高温超导电缆系统关键技术及示范应用研究”(项目编号:DG71-18-026)资助

作者简介:张会明(1988-),男,博士,工程师。

作者地址:北京市海淀区清河小营东路15号[100192]。

电缆屏蔽层的作用是屏蔽超导电缆导体输电时产生的交变磁场,屏蔽交变磁场的目的一方面是防止在低温恒温器等金属导体中产生感应电流,避免涡流损耗,减少制冷功率,降低安全风险;另一方面也能减少相间的间隔距离,节约电缆敷设占用的管廊空间,提高空间的利用效率^[8]。



图 1 冷绝缘高温超导电缆结构示意图

在超导输电的工程实践中,三相分体超导电缆输电线路两端的三相屏蔽层分别短接,然后在变电站进行接地,如图 2 所示。因此屏蔽层与两端的变电站接地系统会构成回路,屏蔽层中的感应电流方向与超导导电层的电流方向相反,感应电流的大小能达到传输电流的 80%~90%^[9-10]。正常运行时三相完全对称,屏蔽层中的三相感应电流之和为零,因此屏蔽层回路中两端的人地电流为零。但是在线路内部和外部的非对称故障下,传输的三相电流之和不为零,因此屏蔽层入地电流不为零,这样会改变电网系统的零序电流,继电保护方案需要考虑超导屏蔽层对零序电流的影响。三相同轴超导电缆屏蔽层的影响与三相分体超导电缆的情况类似。

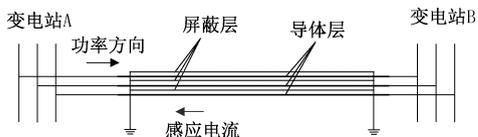


图 2 三相分体超导电缆本体和屏蔽层在系统中接线示意图

深入研究超导电缆屏蔽层回路电流产生的机理和影响规律是开展超导电缆示范工程的基础,其核心问题是分析超导电缆导体层和屏蔽层间的电磁耦合规律。其目的方面在于增加正常运行时屏蔽层感应电流,增强电磁屏蔽效果;另一方面在于降低故障下屏蔽层非对称电流对继电保护系统的影响,避免继保系统误动作。文献[11]利用解析公式分析了低温绝缘高温超导电缆屏蔽层电流对超导电缆导体和屏蔽电流分布的影响,为超导电缆的结构设计提供了依据。中国电科院在前期的工作中,研究了电缆超导屏蔽层连接电阻对屏蔽层感应电流大小的

影响^[12]。实验结果显示,在导体层电流相同的情况下,屏蔽层感应电流大小与屏蔽层连接电阻有关,定性分析表明连接电阻越小,感应电流越大。本文在前期研究的基础上,通过建立超导电缆的有限元模型,分析超导电缆导电层与超导屏蔽层间的电磁模型,仿真超导屏蔽层感应电场和感应电流的大小,研究屏蔽层电阻对感应电流的影响规律,并通过搭建超导电缆的工频通流实验平台,验证屏蔽层感应电流的影响规律。

1 单相超导电缆仿真模型

1.1 电缆几何模型

本文研究单相超导电缆屏蔽层的通流特性和影响规律,电缆本体各层选用材料和主要几何结构参数如表 1 所示,该电缆的额定通流 2 000 A,额定电压为 35 kV。仿真模型中选用液氮温度(77 K)下的材料参数。

表 1 超导电缆的材质和结构参数

序号	结构	外径/mm
1	铜衬芯	24.9
2	半导体纸带(二层)	25.4
3	超导带(第一层超导体层,18根)	26.2
4	聚酰亚胺带(一层)	26.5
5	超导带(第二层超导体层18根)	27.3
6	半导体纸带	28.3
7	PPLP 绝缘	55.3±1
8	半导体纸带	56.3
9	超导屏蔽(一层超导带,36根)	57.1
10	半导体纸带(二层)	57.6
11	铜带(一层)	58.4
12	保护纸带(二层)	59.0

1.2 数学方程

超导电缆屏蔽层电流的产生过程是典型的电磁感应现象,满足法拉第电磁感应定律和楞次定律,其控制方程为 Maxwell 方程组:

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$E = -j\omega A \quad (3)$$

$$J = \sigma E \quad (4)$$

式中: ∇ 为矢量微分算符; H 为磁场强度矢量(A/m); J 为电流密度矢量(A/m²); B 为感应强度矢量(T); A 为磁矢(V·s/m); E 为电场强度(V/m); j 为虚数符号; ω 为频率,本文取电网频率 50 Hz; σ 为电导率。

1.3 电磁仿真方法

本文通过电磁计算的有限元方法,对式(1)至式(4)在频域中进行耦合仿真,求解区间为超导电缆的二维横截面。首先对超导电缆的截面划分三角形单元网格,如图3所示;然后采用电磁计算的二阶矢量单元形成单元形状函数,并组装为系统刚度矩阵;最后设置求解系统的边界条件,本数值模型的边界条件为设定导体层传输电流。

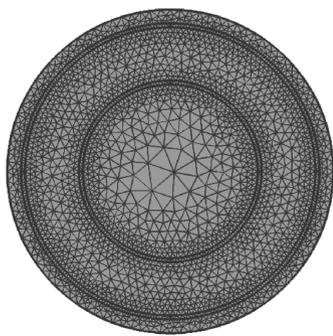


图3 超导电缆本体横截面网格结构

2 仿真结果分析

2.1 仿真模型验证

为了利用前面超导电缆模型研究屏蔽层电流的影响规律,首先要对数值模型进行验证。考虑到包含屏蔽层的超导电缆与同轴电缆的结构相似,本文采用同轴电缆的解析计算公式与数值模型进行对比,来验证超导电缆数值模型的有效性。

针对图4所示的同轴电缆,在柱坐标系下能够解析计算低频电场和磁场的分布,然后获得电缆的阻抗参数,其中单位长度的电感为^[13]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{b}{a} + \frac{\mu_0 \mu_r \delta}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (5)$$

式中: a 为内径; b 为外径; t 为屏蔽层厚度; σ 为电导率, ϵ_r 为相对电导率。

将表1所示的参数代入式(5)和电缆模型,在1 Hz至100 Hz的频率范围内的电感对比见图5。由

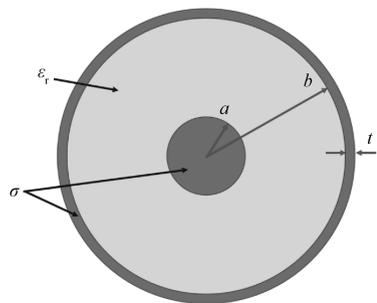


图4 典型同轴电缆的截面示意图

图5可以看出,电缆模型计算的电感与解析法的电感吻合较好,验证了电缆模型的正确性。

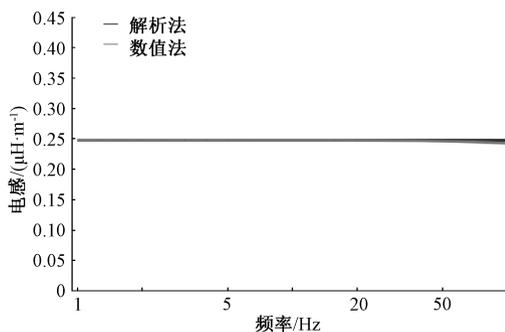


图5 低频下电缆数值模型与解析法的电感计算结果对比

2.2 屏蔽层电流的影响规律

图6是测试屏蔽层感应电流的典型回路,从中可以看出屏蔽层两端需要电缆进行连接,因此连接电缆和连接接头会在屏蔽层回路中引入电阻,在仿真模型中将该电阻等效为屏蔽层的电导率 σ 。

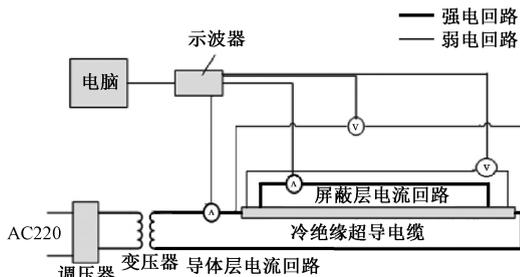


图6 测试屏蔽层感应电流的典型回路

图7是在不同导电层传输电流情况下,屏蔽层感应电流与单位长度屏蔽层等效电阻的关系曲线。当传输电流为1000 A,且屏蔽层等效电阻为0.047 mΩ/m时,感应电流为960 A,基本接近导电层电流;当屏蔽层等效电阻为0.37 mΩ/m时,感应电流降为传输电流的约1/3,即325 A。图7说明,增加屏蔽层电阻会减小屏蔽层电流,也就是降低了屏蔽层的电磁屏蔽效果。改变绝缘层的介电常数和导电层的等效电阻率后,屏蔽层感应电流的变化规律不变,说明绝缘层介电常数和导电层电阻不影响屏蔽层感应电流的大小。

为了进一步分析屏蔽层与导电层的关系,我们仿真计算在不同屏蔽层等效电阻的情况下,屏蔽层感应电压的大小,如图8所示。从图8可以看出,随着屏蔽层电阻的增加,屏蔽层感应电压逐渐增加;当电阻增加到0.5 mΩ/m后,感应电压进入稳定状态。如果将导体层和屏蔽层等效为变压器模型,那么导体层相当于变压器一次侧,屏蔽层相当于变压器二

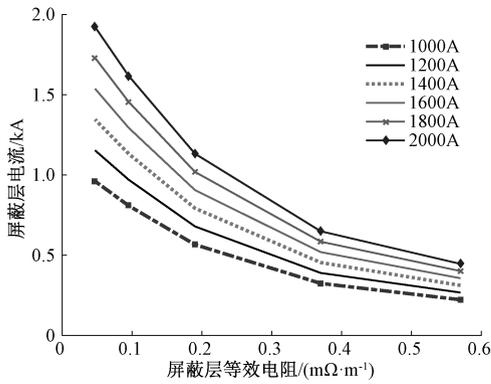


图7 屏蔽层感应电流与屏蔽层等效电阻的关系

次侧(负载)。因此,增加屏蔽层电阻相当于增加负载,负载电压增加,符合变压器的规律。

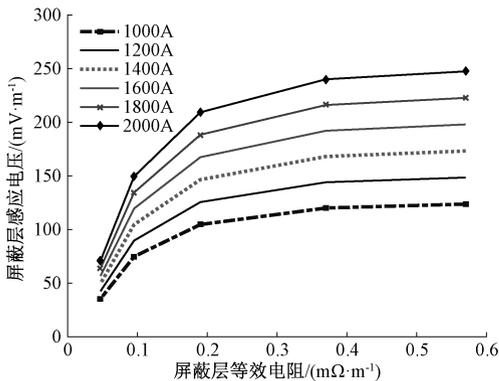


图8 屏蔽层感应电压与屏蔽层等效电阻的关系

通过上面对屏蔽层电流和电场的分析,可知影响屏蔽层电流最主要的因素是屏蔽层回路的电阻,屏蔽层电流随着电阻的增加而降低,而屏蔽层电压随着电阻的增加而增加。屏蔽层与导体层之间的相互作用关系可以用变压器模型来进行等价分析,即导体层的交变电流在空间中产生交变磁场,该交变磁场会在屏蔽层中产生感应电流;同时屏蔽层感应电流也会在导体层中产生交变磁场,最终达到平衡。在实际工程中,增强屏蔽效果的主要手段是降低屏蔽层回路的电阻,包括变电站接地电阻、接头接触电阻和连接导线的电阻等。

为了进一步分析导体层电流与屏蔽层电流间的关系,建立如图9所示的电磁模型。从图9可以看出,导体层与屏蔽层间为电磁感应作用,导体层的电阻和电感分别为 R_1 和 X_1 ,屏蔽层的等效电阻和电感分别为 R_2 和 X_2 ,导体层与屏蔽层的互感为 X_M 。假设导体层电流为 I_1 ,屏蔽层电流为 I_2 ,则导体层回路和屏蔽层回路的电路方程为:

$$R_1 I_1 + jX_1 I_1 + jX_M I_2 = E \quad (6)$$

$$R_2 I_2 + jX_M I_1 + jX_2 I_2 = 0 \quad (7)$$

表1所示结构超导电缆的电抗参数为 $X_1 = 0.048 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $X_M = 0.176 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $X_2 = 0.176 \text{ m}\Omega/\text{m}$ 。通过式(6)和式(7)即可获得图7和图8所示的电流和感应电压关系。

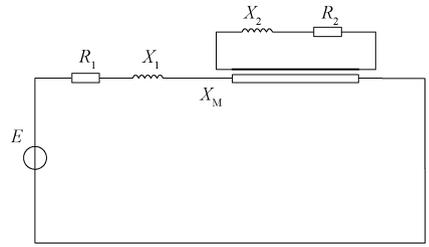


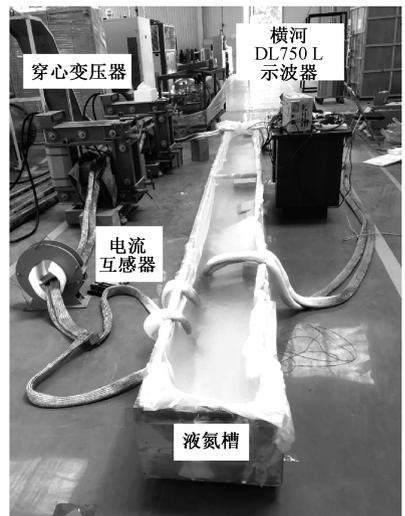
图9 导体层与屏蔽层间的电磁等效关系

3 实验数据与分析

为了从实验的角度对仿真模型进行进一步的验证,设计了图10所示的超导电缆工频通流实验平台,研究屏蔽层感应电流和电场与导体层电流之间的关系。我们用 1200 mm^2 的铜编织线将 5.4 m 单相 $35 \text{ kV}/2 \text{ kA}$ 的高温超导电缆屏蔽层两端端子短接,利用调压器对导体层加载电流,测量屏蔽层中的感应电流和感应电压,测量原理图见图6,实验接线见图10。



a) 5.4 m长超导电缆样缆



b) 实验平台工作图

图10 屏蔽层通流实验现场照片

实验过程中,将液氮导入液氮槽,待液氮完全浸没超导电缆后静置 3 h ,确保超导电缆完全冷却。然后对导体层分别通 300 A 、 500 A 、 980 A 、 1430 A 和 1980 A 电流,用示波器记录导体层和屏蔽层的电

流。屏蔽电流测试过程中,超导屏蔽层的长度为5 m。同时在屏蔽层回路中串入10 μH 的线圈,等效阻抗为3.6 $\text{m}\Omega$,两根铜编织并联的阻抗约为0.2 $\text{m}\Omega$,屏蔽层总阻抗转化为屏蔽层电导率为1.49 S/m ,仿真计算与实验的结果对比见图11,可知两者的趋势吻合较好。

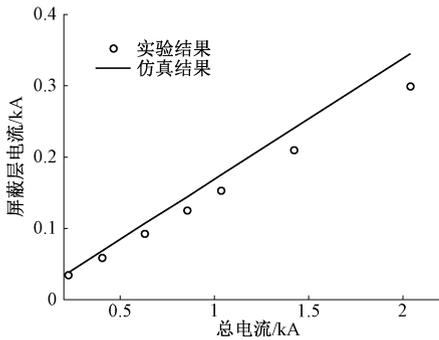


图11 屏蔽层感应电流与总电流的关系

4 结论

本文建立了超导电缆的电磁场仿真模型,通过解析模型对数值模型进行了验证,借助仿真模型分析了单相高温超导电缆屏蔽层和导电层之间的电磁作用关系,研究了屏蔽层回路电阻对屏蔽层感应电流和电场的影响规律,并实验验证了屏蔽层回路阻抗对感应电流的影响关系。研究表明屏蔽层感应电流和感应电压最主要的影响因素是屏蔽层回路的电阻。屏蔽层感应电流随着电阻的增加而降低,而屏蔽层感应电压随着电阻的增加而增加。当电阻增加到一定程度时,感应电流和感应电压进入稳定状态。通过对感应电压和感应电流的分析,屏蔽层与导电层之间的相互作用可以利用变压器模型来定性分析。

本文的研究为超导电缆屏蔽层在非对称故障下的线路特性分析打下了基础,后续研究将针对三相

超导电缆的并网过程进行分析,最终目的是获得超导电缆的正序、负序和零序线路参数。

参考文献:

- [1] 严陆光,肖立业,林良真,等. 大力发展高电压、长距离、大容量高温超导输电的建议[J]. 电工电能新技术,2012,31(1): 1-7.
- [2] 肖立业,林良真. 超导输电技术发展现状与趋势[J]. 电工技术学报,2015,30(7):1-9.
- [3] Masuda T, Yumura H, Watanabe M, et al. Fabrication and installation results for alban HTS cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2007,17(2):1648-1651.
- [4] Masuda T, Yumura H, Watanabe M, et al. Recent progress of HTS cable project [J]. Physica C, 2008, 468 (15-20): 2014-2017.
- [5] 郑莹莹. 中国首条公里级高温超导电缆示范工程启动大会在沪举行 [EB/OL]. [2019-08-27]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588129/c10623345/content.html>.
- [6] 丘明. 超导输电技术在电网中的应用[J]. 电工电能新技术, 2017(10):55-62.
- [7] 夏占军,郭立杰,诸嘉慧. 110 kV 冷绝缘高温超导电缆本体绝缘设计[J]. 低温与超导,2011,39(12):1-4.
- [8] 信赢,任安林,洪辉,等. 超导电缆[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [9] Masuda T, Yumura H, Ohya M, et al. Test results of a 30 m HTS cable for yokohama project[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2011,21(3):1030-1033.
- [10] Masuda T, Morimura T, Nakano T, et al. Safety and reliability of 66 kV class HTS cable systems in short-circuit current accidents-experimental results on 40-m cable system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2017,27(4):1-4.
- [11] 应启良. 低温绝缘(CD)高温超导电缆屏蔽层电流对超导电缆导体和屏蔽电流分布的影响[J]. 电线电缆,2009(2):7-15.
- [12] 陈志福,李振明,诸嘉慧,等. 10 kV/1.5kA 冷绝缘高温超导电缆实验[J]. 低温物理学报,2013(2):128-132.
- [13] David M. Pozar, Microwave Engineering [M]. Wiley Education Press,2011.
- [14] 林良真. 超导电性及其应用[M]. 北京:北京工业大学出版社,2001.

(上接第13页)

- [5] 郭思敏,龚巍,徐剑峰,等. 辐照对用于核电站三元乙丙橡胶性能老化的影响[J]. 金属热处理,2015,40(增刊):353-356.
- [6] GONG Y, HU S M, YANG X L, et al. Comparative study on degradation of ethylene-propylene rubber cables from gamma and irradiation [J]. Polymer Testing,2017(60):102-109.
- [7] 吕生华,梁国正. 耐辐射高分子材料的研究和应用进展[J]. 工程塑料应用,2002,30(1):52-54.
- [8] 徐剑峰,龚巍,鲍一晨. 核级电缆用聚合物材料在 γ 射线辐照下的指数老化模型[J]. 机械工程材料,2019,43(3):55-59.
- [9] 吕洪久. 耐辐射高分子材料的研究动向[J]. 化工新型材料,1985(6):42-46.
- [10] IEEE. IEEE standard for qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations: IEEE Std 383™—2003[S].
- [11] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第11部分:通用试验方法 厚度和外形尺寸测量 机械性能试验: GB/T 2951.11—2008 [S].北京:中国标准出版社,2009.