

准各向同性高温超导体交流损耗的实验研究^{*}

李彦^{1,2} 王银顺^{1†} 刘明闯^{1,2} 陈浩¹ 侯言兵² 皮伟¹ 邓加军³

¹华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

²华北电力大学 高电压技术与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206;

³华北电力大学 数理学院, 北京 102206

收稿日期: 2017-09-14; 接收日期: 2017-10-17

【摘要】 高温超导体的交流损耗直接影响超导电力装置的运行成本和稳定性, 是判断超导电力设备设计是否合理的重要特性之一。在阐述准各向同性高温超导体结构特点的基础上, 首先对准各向同性高温超导股线的交流损耗和磁滞损耗进行仿真研究, 利用有限元软件 Comsol Multiphysics 分析了交流背景磁场下的损耗, 然后在对光纤布拉格光栅(optical fiber Bragg grating, 简称 FBG)波长与损耗关系标定的基础上, 使用光纤布拉格光栅测量交流背景磁场下的交流损耗。理论计算与实验结果相吻合, 表明在工频和液氮温度下股线的交流损耗以磁滞损耗为主。

关键词: 高温超导体, 交流损耗, 磁滞损耗, 光纤布拉格光栅

PACS: 74.25.-q, 74.25.N-

1 引言

超导体在直流传输情况下电阻为零, 没有损耗, 但处于交变电磁场中时, 由于磁通线运动受到磁通钉扎作用, 超导体将表现出一定的电磁能量损耗, 即交流损耗。对于单根超导细丝或块材, 交流损耗主要是磁滞损耗, 其机理是超导体在交变磁场作用下, 磁通线不断克服钉扎力进入或退出超导体所做的功^[1]。交流损耗是高温超导电缆、超导限流器、超导变压器、超导电机等超导电力应用装置的主要热负载, 因而交流损耗直接影响超导器件的运行成本和稳定性^[2]。交流损耗的大小也是判断超导电力设备设计是否合理的一个重要指标, 交流损耗较低的超导体在工程领域上有更为广阔的发展前景。

虽然以锁相放大器法和拾波线圈法为代表的电测法在测量超导材料交流损耗方面有着广泛的应用, 但是电测法容易受到电磁干扰的影响, 而且不适

用于交变磁场与传输交变电流存在相位差的场合, 因此很多研究人员开始研究交流损耗的热测法^[3]。Yagi M. 等人通过铂电阻温度计测量温差, 然后计算得到超导电缆的交流损耗^[4]; Magnusson N. 等人通过热电偶测量样品温度, 然后计算得到半径为 150 mm 超导线圈的交流损耗^[5]; Janu Z. 等人通过蒸发液氮的方法测量超导变压器的交流损耗^[6]。温度计测量的响应时间长, 测量系统复杂; 热电偶的测量精度低, 被测对象受局限; 液氮蒸发法存在耗时长、灵敏度低的缺点^[7]。FBG 克服了传统电测法和热测法的缺点, 具有体积小、抗电磁干扰、分辨率高、响应速度快的优点, 可以用于复杂电磁环境下交流损耗的测量^[3]。

本文主要研究一种具有准各向同性的高温超导体, 与高温超导带材相比, 高温超导体具有传输电流大、无尖端放电现象的优点, 可以应用于直流输电电缆、超导限流器以及大型磁体等领域。将涂层超导带材 REBCO 堆叠至其截面为正方形或近似正方

^{*} 国家自然科学基金资助项目(课题项目号 51477053)、新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)资助项目(课题项目号 KZ0002)资助的课题。

[†] yswang@ncepu.edu.cn

形,然后将四个这样的股线子模块按照一定的方向堆叠成中心对称形式的正方形.股线中的 REBCO 带材直接堆叠,可以提高其载流能力.外部采用金属包套工艺包覆制成高温超导线,可以增强超导股线的机械性能和电磁稳定性.本文基于 Maxwell 方程和高温超导体的 E-J 指数特性仿真分析了高温超导线在交流背景磁场下的交流损耗、磁滞损耗,通过 FBG 测量高温超导线在交流背景磁场下的交流损耗.通过理论计算和实验结果的比较,验证了实验和仿真模型的合理性.

2 超导股线的损耗计算

2.1 超导股线的制作

本文采用苏州新材料研究所在美国 Superpower 公司生产的第二代高温超导带材 REBCO CC 的基础上加工后的超导带材制作超导线,加工后超导带材的结构如图 1 所示,带材参数见表 1.超导股线的超导芯由四个正方形区域构成,每个区域分别由 14 根宽度为 2.5 mm,厚度为 0.18 mm 的超导带材按照一定的方向堆叠而成,超导芯外包覆厚度为 0.1 mm 的不锈钢包套.在超导芯的中心需穿入一根直径为 0.1 mm 的电阻丝,为 FBG 波长与损耗关系的标定做准备,如图 2 所示.

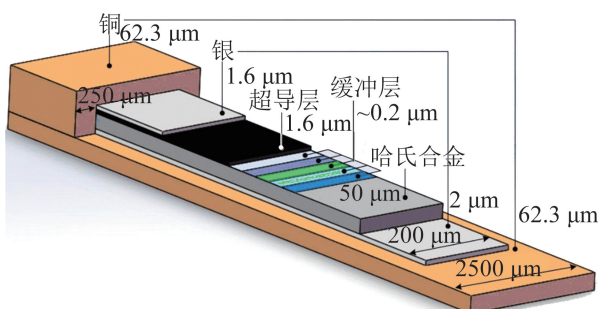


图 1 REBCO CC 结构示意图

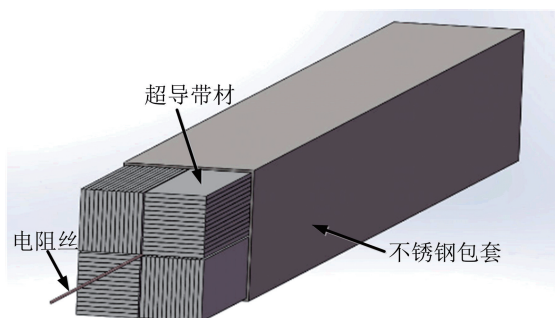
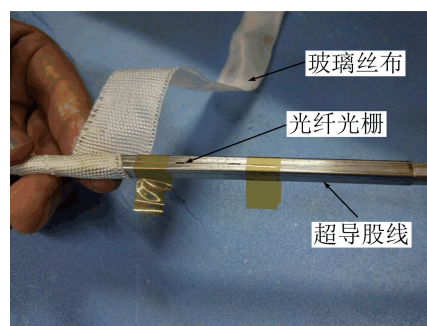


图 2 准各向同性高温超导线结构示意图

表 1 REBCO 导体主要参数

参数	值
带材宽度	2.5 mm
带材厚度	0.18 mm
临界电流	75 A
n 值	27

为了保证测量的准确性,需将 FBG 紧紧粘贴在超导线不锈钢包套表面,用玻璃丝布和 DW3 绝热胶对股线进行绝热处理,如图 3 所示.



(a) 缠绕玻璃丝布



(b) 涂绝热胶

图 3 超导股线的绝热处理

2.2 数值计算

关于超导体交流损耗的仿真研究,根据所选取的求解变量的不同,存在不同的计算求解方法,如 A-V formulation、T- Ω formulation 和 H formulation 等,本文采用 A-V formulation 方法,利用有限元软件 Comsol Multiphysics 进行建模求解.

A-V formulation 基于矢量磁势 A 和电场标量势 V ,矢量磁势 A 没有物理意义,仅作为一个辅助变量,其定义如下:

$$B = \nabla \times A \quad (1)$$

将矢量磁势 A 引入法拉第定律,则电场强度定义如下:

$$E = -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

其中 ∇V 为电压梯度, 所以求解的方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ J = \sigma E \\ B = \mu H \end{cases} \quad (3)$$

整理(3), 可以得到需要求解的一般方程为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \quad (4)$$

由苏州新材料研究所制作的高温超导带材有多层结构, 为了实现仿真的可行性, 需要对带材结构进行适当的简化, 如图 4 所示, REBCO 带材仿真模型参数见表 2.

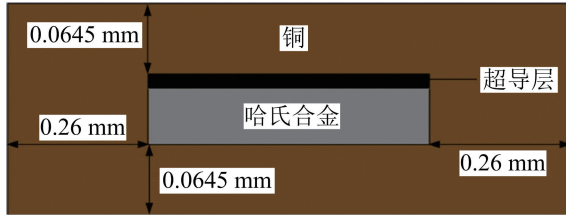


图 4 REBCO 带材仿真模型

表 2 REBCO 带材主要参数

参数	值
带材宽度	2.52 mm
带材厚度	0.18 mm
哈氏合金层厚度	0.05 mm
超导层厚度	0.001 mm

假设高温超导体在 z 方向为无限长, 计算时可以只取其 x - y 平面的截面. 在这种条件下, $\nabla V = 0^{[8]}$, 求解方程(4)简化为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

首先在 Comsol Multiphysics 软件中建立股线的二维平面图, 依次定义铜、哈氏合金、不锈钢和超导材料, 股线模型最外层是空气区域, 如图 5 所示.

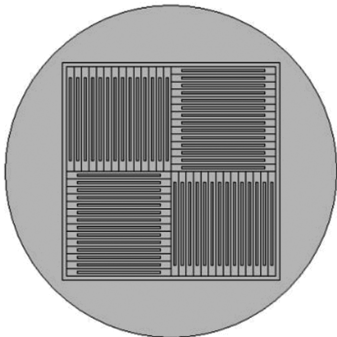


图 5 高温超导体仿真模型

超导体与空气域的边界是连续的:

$$n \times (H_1 - H_2) = 0 \quad (6)$$

股线中的铜、哈氏合金、不锈钢为常规导体, 在基本参数中可以直接设置其电导率. 由于超导材料特殊的电压、电流特性, 需要用 E-J 模型来描述超导体:

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (7)$$

其中 $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$, 表示超导体的临界判据, n 值反映超导体由超导态向正常态过渡的剧烈程度, J_c 为超导体的临界电流密度, 本文采用 Bean 临界态模型, 即假定超导体的临界电流密度 J_c 与磁感应强度 B 无关, 磁场强度为 0 的区域电流密度为 0, 磁场强度不为 0 的区域的电流密度与超导体的临界电流密度相等.

为了施加交流背景磁场, 边界条件设置为:

$$\begin{cases} B_x = B_m \sin(\omega t) \\ B_y = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, B_m 为所加交变磁场幅值. 根据设置的条件求解方程(5)便可得到高温超导体股线的电场、磁场、电流分布, 通过面积分可以得到不同区域的损耗值:

$$P = \int E \cdot J \quad (9)$$

对整个超导体区域积分, 得到超导体股线的交流损耗; 对所有 REBCO 带材的超导层积分, 得到超导体股线的磁滞损耗, 仿真结果如图 6 所示. 由图 6 可知, 磁滞损耗和交流损耗随着频率和交变磁场幅值的增大而增大, 磁滞损耗的数值非常接近于交流损耗, 可见在频率较低、交变磁场幅值较小的条件下, 磁滞损耗是交流损耗的主要组成部分.

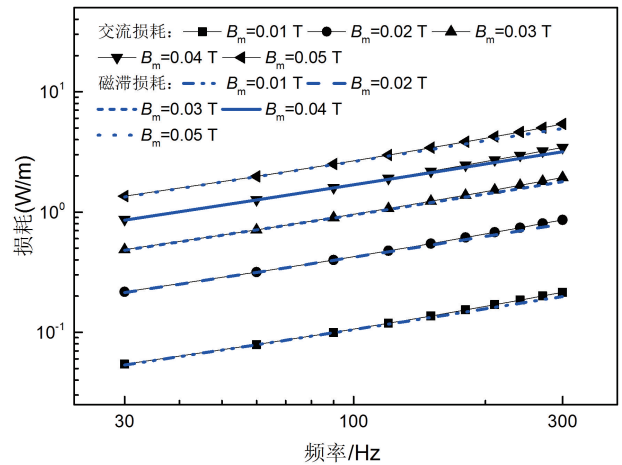


图 6 超导体交流损耗和磁滞损耗仿真结果

3 超导体线的交流损耗实验

3.1 FBG 温度传感特性

FBG 利用两束相干紫外光形成的空间干涉条纹照射光纤制作而成^[9].当一束宽谱光源入射到光纤光栅后,入射光在相应的波长上被反射回来,其余的光将透射,其中反射波长称为 FBG 的中心波长,FBG 的中心波长随环境温度的变化而变化,FBG 的中心波长数值可以由光纤光栅解调仪读取,光纤光栅解调仪由美国 MOI 公司生产,可以起到光源以及波长解调装置的作用^[10].解调仪可以通过网线与电脑相连,并通过仪器的配套软件 Enlight-x25 监测 FBG 的波长变化情况.

要使 FBG 温度传感技术可以应用于超导的研究中,需要掌握 FBG 在液氮温区附近的温度传感特性,因此需要对 FBG 进行标定.标定设备主要包括真空泵、制冷机、铜柱和套筒构成的密闭容器,低温

标定实验装置如图 7 所示.铜柱上端是真空泵和制冷机的接口,用于连接真空泵和制冷机.铜柱下端固定有一个可拆卸的铜片,铜片上固定有低温电阻温度传感器,低温电阻温度传感器与 LakeShore 331 温控仪相连,可以实时监测铜片的温度.实验前取下套筒,将 FBG 粘贴在铜片上,光纤从铜柱的上端引出密闭容器,出口处使用橡胶密封,然后将套筒套在铜柱上,从而形成密闭空间^[11].使用真空泵将标定装置抽成真空环境,然后使用制冷机对装置进行升降温,使用低温电阻温度传感器和 FBG 同时测量铜片的温度,根据与低温电阻温度传感器连接的 LakeShore 331 温控仪所获取的温度值作为温度基准对 FBG 的波长进行标定,实验重复进行四次,以 FBG 在 60 K 时的波长 1548.024 nm 为基准,得到如图 8 所示的波长偏移量随温度变化曲线.由曲线可知,FBG 对液氮温区附近的温度响应有着良好的重复性,适合进行低温下的温度测量.

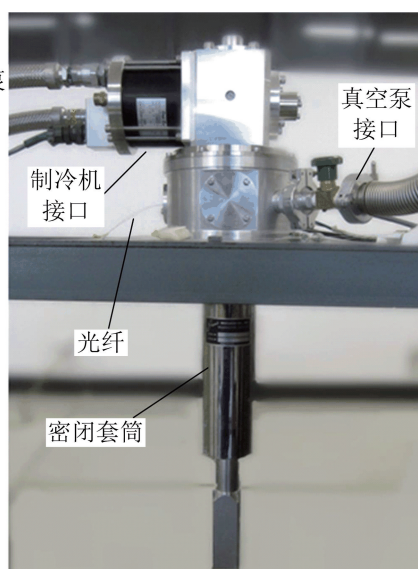
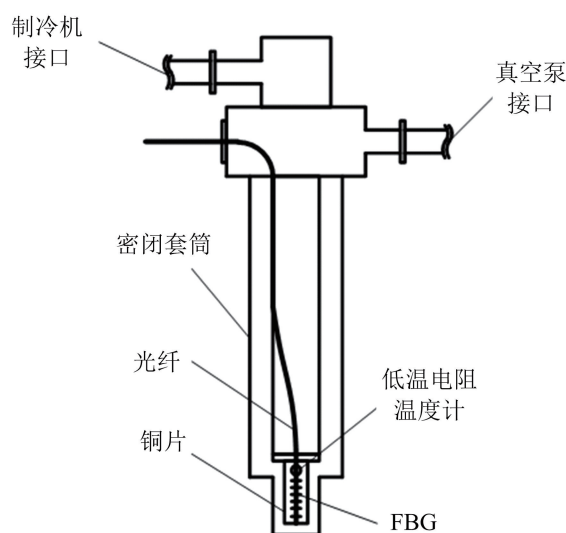


图 7 低温标定实验装置

3.2 磁场发生装置

磁场发生装置如图 9(a)所示,通电线圈可在所缠绕的铁芯中产生磁场,铁芯的缝隙为 10 mm.实验时将股线导体放置于缝隙处,可使其处于交流背景磁场的环境,而且磁场的均匀度良好.根据磁场发生装置的标定数据,给定通入磁体的交变电流值,即可得到磁体所产生交变磁场的幅值^[12].

3.3 交流损耗实验

超导体线中穿入的电阻丝采用的是漆包锰铜

线,直径为 0.1 mm,电阻为 57.95 Ω /m.通过 Agilent E3631A 仪表给电阻丝通入直流,仪表可以记录线路中的电流和电阻丝两端的电压,二者的乘积即为功率,如图 10(a)所示.通过光纤光栅解调仪可以采集不同功率条件下 FBG 的波长,得到 FBG 波长和损耗关系的标定曲线.

在进行标定之后,对电阻丝停止通电,将交流变频电源、磁体和分流器连成回路,交流变频电源由显示器、变压器、调压器构成,用来提供不同幅值、不同

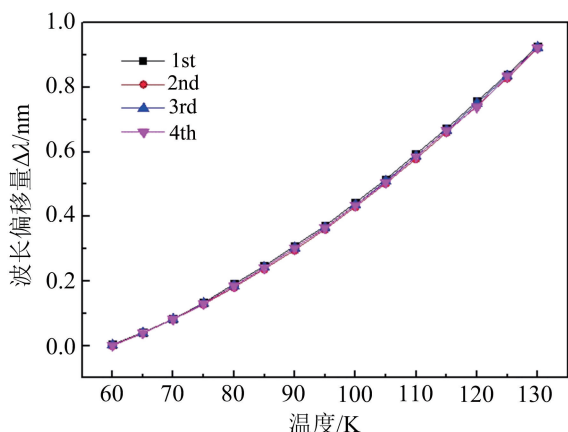
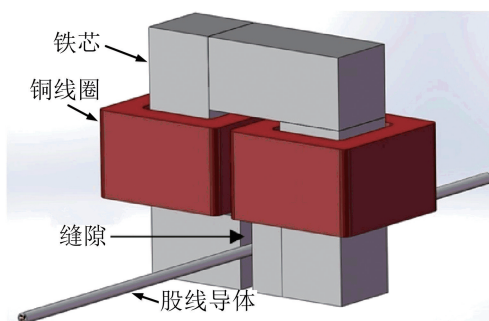
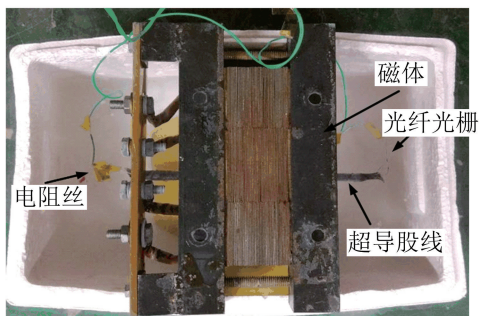


图 8 FBG 波长-温度曲线



(a) 示意图



(b) 实物图

图 9 实验布置图

频率的交变电流,频率值可以从电源的显示器读取,交变电流的有效值由连在分流器两端的 KEITHLEY 2000 表来监测,如图 10(b)所示. KEITHLEY 2000 表显示的是分流器两端交流电压的有效值,除以分流器恒定的电阻值,得到线路中交变电流的有效值,通过磁体标定数据即可得到缝隙处交变磁场的幅值.磁体位于盛有液氮的泡沫箱内,超导股线处于液氮环境中,当 FBG 的波长值稳定在 1548.192 nm 左右时,超导股线充分冷却,开始给磁体通电,进行实验.由于超导股线在施加交流背景磁场后需要短暂的时间达到热平衡,所以波长值需要

选择达到稳定以后的数据作为实验结果.



(a) 光纤光栅传感解调仪测试系统



(b) 实验样品、磁体和低温装置

图 10 实验现场

为了使实验结果更为准确,FBG 波长和损耗关系的标定实验重复三次,以 1548.192 nm 为基准,计算不同功率下 FBG 波长偏移量,得到的标定曲线如图 11 所示.在对磁体通电后,光纤光栅解调仪可以测得不同交变磁场幅值、不同频率条件下 FBG 的波长值,根据图 11 的标定曲线,可以得出不同交变磁场幅值、不同频率条件下超导股线的交流损耗值,实验结果与计算结果对比情况如图 12 所示.

4 结 论

由图 12 可知,在交变磁场幅值和频率较低的情况下,超导股线的交流损耗随交变磁场幅值以及频率的增大而增大.通过图 12 仿真与实验数据的比较,可知仿真与实现结果较为接近,误差在正常的范围内,从而验证了仿真模型和基于 FBG 热测法的正确性.由图 6 可知,在交变磁场幅值和频率较低的情况下,磁滞损耗是交流损耗的主要组成部分,交流损耗中的涡流损耗和耦合损耗可忽略不计.

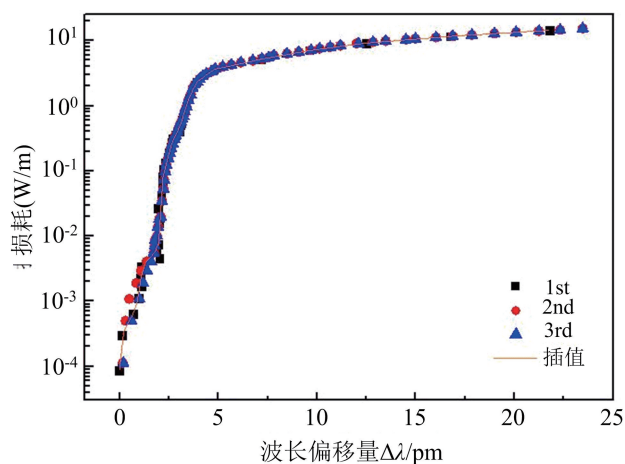


图 11 超导股线损耗与 FBG 波长关系曲线

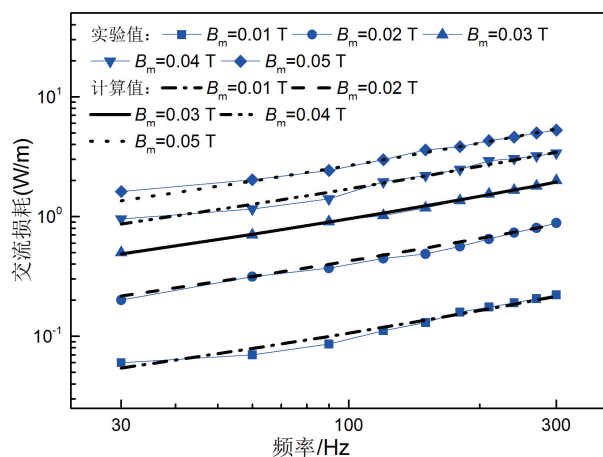


图 12 超导股线交流损耗随频率变化曲线

参 考 文 献

- [1] 王银顺, 超导电力技术基础(科学出版社, 北京, 2011), 124.
- [2] Hong Z. Campbell A. M. Coombs T. A., *Supercond. Sci. and Tech.*, **19**(2006), 1246.
- [3] Wang Y. S. Zhou W. W. Dai J. S., *Sci. China Tech. Sci.*, **58** (2015), 545.
- [4] Yagi M. Tanaka S. Mukoyama S. Mimura M. Kimura H. Torii S. Akita S. Kikuchi A., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **13** (2003), 1902.
- [5] Magnusson N. Hornfeldt S., *Rev. of Sci. Instrum.*, **69** (1998), 3320.
- [6] Janu Z. Wild J. Repa P. Jelinek Z. Zizek F. Peksa L. Soukup F. Tichy R., *Cryogenics*, **46**(2006), 759.
- [7] 金翀, 李振明, 丘明, 低温工程, **6**(2010), 19.
- [8] Vinot E. Meunier G. Tixador P., *IEEE Trans. on Magn.*, **36** (2000), 1226.
- [9] 孙丽, 光纤光栅传感应用问题解析(科学出版社, 北京, 2011), 5.
- [10] 邓凡平, 邵进益, 黄国君, 徐国兴, 王厚生, 王秋良, 光电子·激光, **18**(2007), 404.
- [11] Dai J. S. Wang Y. S. Zhao W. J. Xia L. M. Sun D., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **24**(2014), 9002104.
- [12] Li T. T. Wang Y. S. Shi C. J. Li J. W. Chen G. X. Zhang H. X., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **26**(2016), 4804005.

Experimental Research on AC Loss of Quasi-isotropic HTS Strand

LI Yan^{1,2} WANG Yinshun¹ LIU Mingchuang^{1,2} CHEN Hao¹
HOU Yanbing² Pi Wei¹ DENG Jiajun³

¹ State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² Key Laboratory of HV and EMC Beijing, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

³ Mathematical and Physical Science, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Received date: 2017-09-14; accepted date: 2017-10-17

【Abstract】 AC loss of high temperature superconductor (HTS) has a direct impact on the operation cost and stability of superconducting power devices, and is thus one of important characteristics which identifies whether the design of superconducting power devices is reasonable. Based on presenting geometric structure of quasi-isotropic HTS strand, the paper focuses on simulating AC loss and hysteresis loss of quasi-isotropic HTS strand, the loss in AC magnetic field is calculated by Comsol Multiphysics finite element software. Calibration of the relationship between optical fiber Bragg grating (FBG) wavelength and loss provides the foundation for the subsequent measurement of AC loss in AC magnetic field. The measurement results are in agreement with calculated ones, which shows that the hysteresis loss dominates the AC loss at power frequency and liquid nitrogen(LN₂) temperature.

Keywords: HTS strand, AC loss, hysteresis loss, optical fiber Bragg grating (FBG)

PACS: 74.25.-q, 74.25.N-