基于补偿法的超导单元交流损耗测量系统设计*

陈盼盼[1†],诸嘉慧[1],张宏杰[1],丘　明[1],杨文将[2],陈晓宇[3]

1.中国电力科学研究院有限公司储能与电工新技术研究所,北京 100192;

2.北京航空航天大学宇航学院,北京 100044;

3.北京交通大学电气工程学院,北京 100044

收稿日期:2018-10-10;接收日期:2019-01-20

【摘要】 交流损耗是影响超导电力装置运行稳定性和成本的关键因素之一.本文提出了一种基于电压补偿法的大载流超导单元交流损耗测量方法,通过串联在回路中的大电流补偿线圈,抵消超导单元的感性电压来实现.在系统设计上,通过数据采集卡和运动控制器,获取超导单元、补偿线圈的电压信号,同时控制步进电机拖动补偿线圈.通过相位的对比计算,实现精确定位补偿,从而测量超导单元的交流损耗.最后,在不同频率下,测量了 0.2 m 长、110 kV/1.5 kA 的高温超导电缆样缆的交流损耗,得出的交流损耗曲线与计算结果基本吻合.实验结果表明,采用补偿线圈的交流损耗测量系统具有自动检测、定位和测量功能,可以实现具有大电流容量超导单元交流损耗的准确测量.

关键词: 超导单元,交流损耗,补偿线圈,步进电机

PACS: 4.25.-q, 74.25.N-

DOI: 10.13380/j.ltpl.02019.01.008

引用方式: 陈盼盼,诸嘉慧,张宏杰,丘明,杨文将,陈晓宇, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0049 (2019)

AC Loss Measurement System Design for High Temperature Superconducting Unit Using Compensation Method

CHEN Panpan[1], ZHU Jiahui[1], ZHANG Hongjie[1],
QIU Ming[1], YANG Wenjiang[2], CHEN Xiaoyu[3]

1. *Energy Storage and Electrotechnics Department, China Electric Power Research Institute, Beijing* 100192;

2. *College o f A stronautics, Beihang University, Beijing* 100044;

2. *School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044

Received date: 2018-10-10; accepted date: 2019-01-20

【Abstract】 AC loss is one of the key factors that affects the operation stability and cost of superconducting power plant. A method of AC loss measurement for large current carrying superconducting unit based on voltage compensation method is proposed in this paper. It is realized by compensating the inductive voltage of superconducting units by large current compensation coil in series. In the system design, through the data acquisition card and motion control card, the voltage signal of superconducting unit and compensation coil is obtained, and stepping motor is controlled to drive the secondary coil. By phase contrast calculation, the compensation coil achieves precise position, so as to realize the measurement of AC losses of superconducting unit. Finally, AC losses

* 中国电科院自筹项目(载流涂层超导体的电磁模型及其动态稳定特性研究 DG83-18-006)资助的课题.

† chenpanpan1@epri.sgcc.com.cn

of a 0.2 m, 110 kV/1.5 kA prototype high temperature superconducting (HTS) cable are measured at different frequency. The AC loss measurement curve of the cable is basically consistent with the calculation results. The AC loss measurement system with compensation coil can automatically detect, locate and compensate, and realize the effective measurement of high temperature superconducting samples with large current capacity.

Keywords: superconducting unit; AC loss; compensation coil; stepping motor

PACS: 4.25.-q, 74.25.N-

DOI: 10.13380/j.ltpl.02019.01.008

Reference method: CHEN Panpan, ZHU Jiahui, ZHANG Hongjie, QIU Ming, YANG Wenjiang, CHEN Xiaoyu, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0049 (2019)

1 引　　言

超导电力技术是利用超导体的无阻高密度载流能力和超导态—正常态相变本征属性发展起来的先进电力技术,在实现电力装置的轻量化、小型化、低能耗和提高输电技术的容量、降低损耗及改善电力质量等方面有着广阔的应用前景[1-2].

交流损耗是影响超导电力装置运行稳定性和成本的关键因素之一[3-4].传统的交流损耗电测法是基于锁相放大器测量超导样品阻性电压分量来实现的[5-6],它与参考电流处于同一相位信号.由于锁相放大器存在测量范围小,测量速度慢,易受外部干扰等问题,锁相放大器的方法难以在短时间内快速测量流过大容量电流的大型超导电力装备;在以往的研究中,认为补偿线圈可以消除带材、扁平线圈或电缆[7-9]的感性电压成分,但往往采用手动调整补偿线圈来测量超导样品的交流损耗,这种方法可能会因为手动调整的不统一等原因,难以准确定位补偿线圈的位置,进而导致测量结果的不准确.

基于上述问题,本文提出了一种基于电压补偿法的超导单元交流损耗测量方法,设计了一种高精度交流损耗自动测量系统.该测量系统通过改变补偿线圈中的初级和次级线圈的位置来改变补偿电压,采用数据采集卡和运动控制器,通过相位的对比计算,进行精确定位补偿,实现了交流损耗的闭环测量.该系统适用于超导线圈、超导电缆等超导单元交流损耗测量.最后在不同频率下,对一根 0.2 米, 110 kV / 1.5 kA 超导电缆样缆进行了交流损耗测量,验证了测量系统的有效性.

2 系统设计

2.1 测量原理

超导样品在交流电流下既有电感分量也有电阻分量,其电压超前电流一个角度 θ,由于其电阻较小,电感电压远远大于阻性电压,这使得二者之间的相角 θ 极其接近于 90°,给实验的精确测量带来了困难.基于补偿线圈法的交流损耗电测法是一种较为新颖的方法,通过电压补偿策略,在主回路中串联一个初级线圈,然后利用次级线圈(补偿线圈)的感应作用产生跟超导样品中感性电压幅值相等、相位相反的电压,这样即可抵消掉超导样品的感性电压,从而可以方便快捷的得到超导样品的阻性电压和交流损耗.

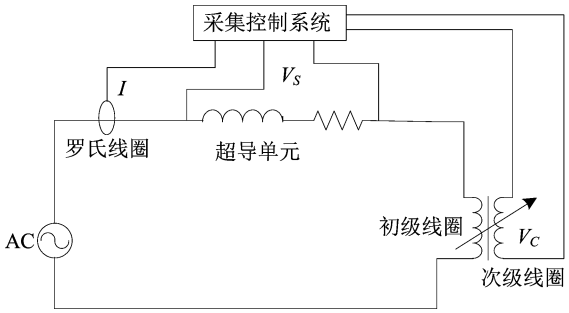

图 1　基于电压补偿法的交流损耗测量原理图

如图 1 所示,在超导样品主回路中串联一个初级线圈,然后利用数据采集控制系统分别采集得到超导电缆的电压 V_S,次级线圈的电压(补偿电压) V_C 以及整个回路的电流 I,并将采集到的数据在采集软件中进行相位匹配和数据处理,从而实现超导电缆交流损耗的准确测量.这种基于补偿法的超导交流损耗电测法精确度高,可控性好,无需采用锁相放大器的硬件电路,节约成本.

假设通过超导样品的电流为 I,则超导样品的电压表达式如下:

$$V_S = I(R_S + j\omega L_S) = IR_S + j\omega L_S I \quad (1)$$

补偿线圈感应电压电压表达式:

$$V_C = j\omega MI \quad (2)$$

其中 M 为初、次级线圈之间的互感,则:

$$V_S - V_C = j\omega I(L_S - M) + IR_S \quad (3)$$

由式(3)可见,当公式中 $L = M$,即补偿线圈的感应电压 V_C 等于超导电缆的感性电压分量 V_L 时,$V_S - V_C$ 的值即为超导样品的阻性电压.实际数据采集操作中,可以通过判断 $V_S - V_C$ 的相位与电流 I 的相位是否相等这一条件来决定补偿电压是否合适.若上述相等,则此时超导电缆的交流损耗可以通过下式得出:

$$Q_{\mathrm{Loss}} = I^2R = (V_S - V_C) \times I \quad (4)$$

2.2 测试系统硬件设计

超导交流损耗测试系统硬件主要包括补偿线圈装置、位置补偿电机、数据采集控制系统和交流电源,如图 2 所示.其中为了能够得到精确的补偿电压 V_C,通过控制电机来拖动安装在导轨上的次级线圈,改变初级线圈和次级线圈之间的位置关系来实现,进而改变补偿电压信号的大小.下面对测试系统的各个结构进行具体介绍.

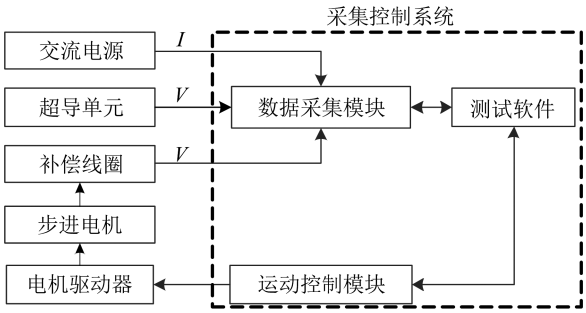

图 2　交流损耗测试系统结构示意图

2.2.1　补偿线圈装置

由于流经超导样品的电流在几百安培左右，与其串联的初级线圈也必须承载相同大小的电流.在本实验中，初级线圈做成一个圆形的铜环结构，为了使铜环中的电流尽可能分布均匀，接头采用上下端布置方案，这样这个铜环就可以看作是一个大的单匝线圈.为了保证良好的绝缘性，底座采用绝缘材料制成，并用一个圆形的绝缘固定板将初级线圈固定在底座上.在实验过程中需要选择合理匝数的次级线圈，并通过调节次级线圈位置，从而提供一个足够补偿超导样品感性电压的互感电压量程.

整个结构放在一个具有良好磁导率的双层屏蔽箱中，屏蔽箱可以使环境磁场能够在箱的内部闭合，从而避免进入箱体内.初级线圈的引线采用“8”字形绕线方式[10]，引出到屏蔽外部与外界形成电气回路.

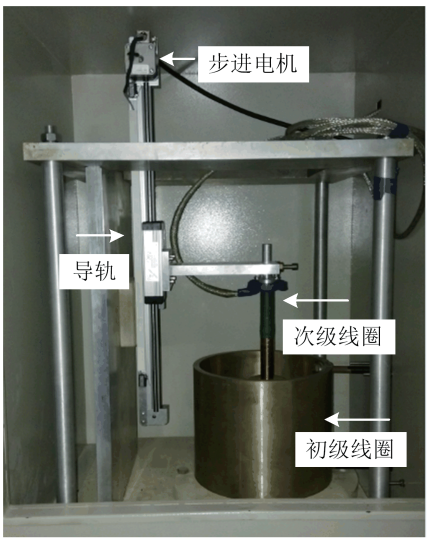

图 3　补偿线圈装置

2.2.2　位置补偿电机

试验中通过控制步进电机改变初、次级线圈之间的轴向位置来达到改变互感，从而达到调节感应电压的目的.

步进电机导轨的长度为 40 cm，每转进给量为 60 mm，配置了专门的驱动器.驱动器本身可以通过其自带的开关组合确定驱动电流以及细分精度的设定.由于实验装置中的电机导轨长度有限，为了防止电机在运行过程中超出行程造成实验装置损坏，在导轨两侧分别安装一个限位开关，当电机触碰到限位开关之后，自动返回运行.

2.2.3　数据采集控制系统

采集控制系统主要是由数据采集板卡和步进电机控制部分构成.结合软件环境，可以很好的实现超导样品上电压电流信号、补偿线圈电压信号的采集处理和电机的状态控制，实物图如图 4 所示.

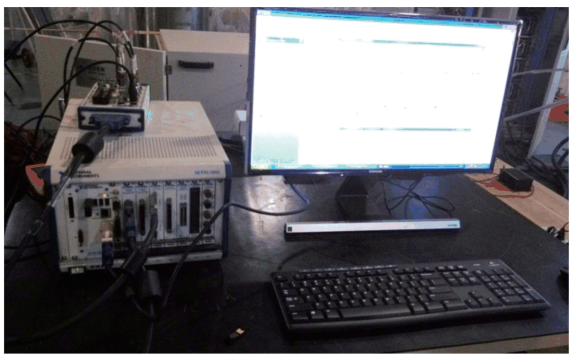

图 4　采集控制系统实物图

超导样品上的电压信号较小，为了提高测试精度，采用高精度 24 位的数据采集卡实现信号采集，可以实现 8 路同步采样模拟输入.电机控制系统则是由 NI 公司的步进/伺服运动控制器以及相应的接口来完成，整个控制系统可以实现对步进电机的转速与方向的控制、正向限位输入功能和反向限位输入功能.

2.3　交流损耗测试系统软件设计

2.3.1　设计流程

本系统在 LabVIEW 环境下，开发了一套交流损耗测试系统软件，结合 NI motion 和 NI-DAQ 模块，实现了自动检测、定位、电压补偿和损耗测试，设计流程如图 5 为所示.整个软件主要包括初始化设置、电机控制、数据采集、损耗计算和数据保存等功能.

在数据采集中，首先对 V_S 、V_C 、I 三路信号进行滤波，将滤波后的 V_C 和 V_S 进行相减处理，得到补偿后的电压信号 V_S-V_C ；然后和电流信号 I ，同时送入相位测量模块中，利用互相关[11-12]算法计算

出基频信号的相位差,判断出两者的相位差是否小于某一个设定值,并将相位判断的结果反馈给电机运动控制程序,使得电机及时停止;最后计算出超导样品的交流损耗,并进行数据保存.

电机控制由 NI motion 软件包中的相应模块来完成,主要包括电机参数设置、运行状态控制、限位检测等功能.在测量系统中能使电机停止的触发条件有两个,一是超导单元电压补偿成功;二是程序中设置的人为的强制停止按钮.当上述两种情况中的任意一项发生时,电机随即停止运动.

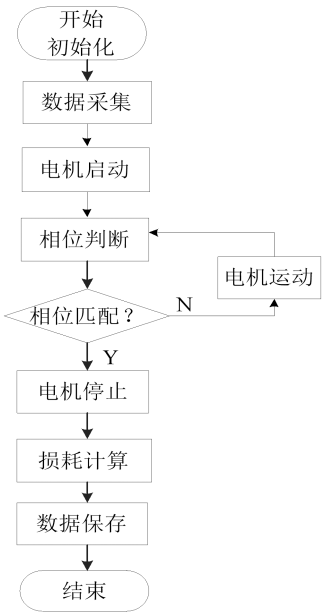

图 5　交流损耗测试系统软件流程图

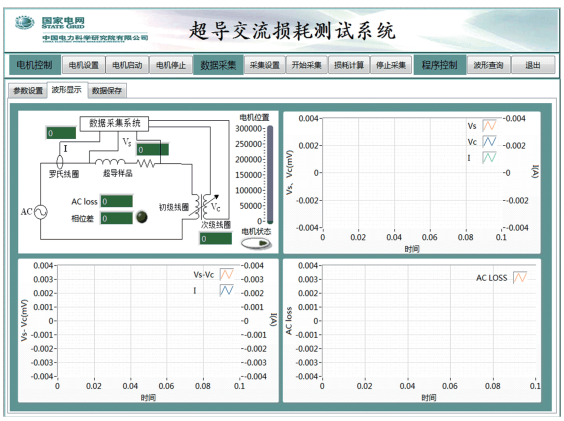

图 6　交流损耗测试系统的操作界面

图 6 是整个交流损耗测试系统的操作界面,用户可以通过对运行状态的控制,直观、方便和快捷的获取实验过程中一些重要参数的数值和波形.

3　测试系统集成与实验研究

根据上文中所述的测量方法,对超导单元交流损耗测量系统进行集成,对一根 0.2 m 超导电缆样缆,应用补偿线圈和步进电机,开展了不同频率下的交流损耗测量实验.

应用美国 AMSC 公司的 YBCO 高温超导带材,设计了具有 2 层导体层和 1 层屏蔽层结构的一根 0.2 m 长,110 kV/1.5 kA 的冷绝缘高温超导电缆,绕制好的超导电缆如图 7 所示,超导电缆的内、外导体层通过电流引线与外部电流源构成电流回路,屏蔽层直接通过电流引线短接.整个测量系统如图 8 所示.

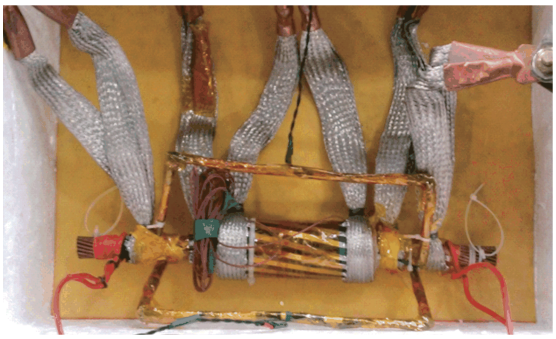

图 7　0.2 m 长,超导电缆

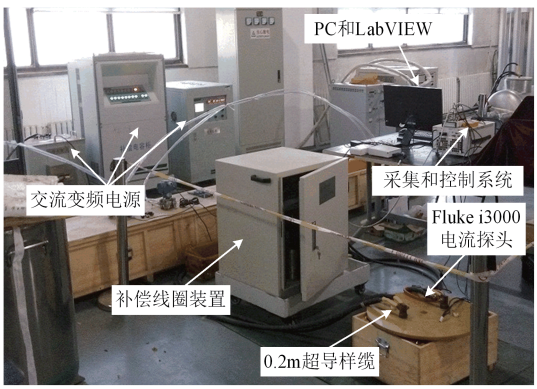

图 8　超导电缆交流损耗测量系统

为了减小电网中工频对于测量交流损耗结果的影响,实验分别测量了 49.9 Hz 和 60 Hz 下交流损耗的变化.将测得的交流损耗进行归一化处理后,不同频率下超导电缆随传输电流变化的交流损耗的测量值和理论计算值如图 9 所示,超导电缆的交流传输损耗随传输电流的增大而线性增大[13-15],与理论计算结果基本一致.实验结果验证了基于补偿法的超导交流损耗测试系统的有效性,为超导单元交流

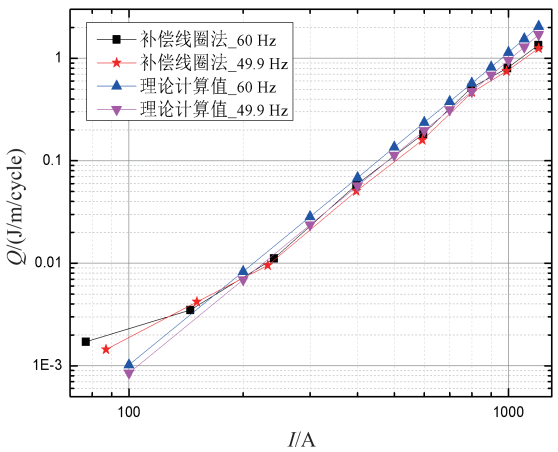

图 9　49.9 Hz 和 60 Hz 下超导电缆的交流损耗

损耗的测量提供了一种新方法.

4　结论

本文提出了一种基于电压补偿法的超导单元交流损耗测量方法,通过串联在回路中的补偿线圈抵消超导单元的感性电压来实现,并搭建了测量系统.该系统通过数据采集卡获取超导单元、补偿线圈的电压电流信号,利用互相关算法进行相位检测.同时采用运动控制器控制步进电机拖动次级线圈移动,通过相位的对比计算,最终实现精确定位补偿,从而实现测量超导单元交流损耗.

在此系统下,对一根 0.2 米, 110 kV / 1.5 kA 超导电缆进行了交流损耗测量,经分析得到不同频率下交流损耗随传输电流增大而线性增大,与理论结果吻合.该实验结果验证了测试系统的有效性,与传统交流损耗测量方法相比,该系统可以实现自动检测、定位、补偿和测量,为大载流超导单元的交流损耗提供了一种新方法.

参　考　文　献

[1] 肖立业,电网技术,**9**(2004),33.

[2] 丘明,电工电能新技术, **10**(2017),55.

[3] Chenghong Gu, Yan Zhang, Furong Li, Weijia Yuan, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, (2012),1

[4] Jiahui Zhu, Huifeng Li, Ming Qiu, Jin Fang, Xiaoyu Chen, Weijia Yuan, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **2**(2015), 607.

[5] Nguyen, D. N. , Kim, C. H. , Kim, J. H. , Pamidi, S. , & Ashworth, S. P., *Superconductor Science & Technology*, **9** (2013), 095001.

[6] 刘萌, 中国科学院研究生院, (2006),16

[7] J. H. KIM, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **3** (2011), 3269.

[8] Yuan, W. , Coombs, T. A. , Kim, J. H. , Han Kim, C. , Kvitkovic, J. , Pamidi, S., *Journal of Applied Physics*, **11** (2011), 113906.

[9] Zhu, J. , Zhang, Z. , Zhang, H. , Zhang, M. , Qiu, M. , & Yuan, W., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **3**(2014), 9500104.

[10] 张国民, 中国科学院研究生院, (2003),38.

[11] Chiu, C. C. , Yeh, S. J., *Computers in Biology and Medicine*, **6**(2001), 471.

[12] 陈晓宇, 诸嘉慧, 方进, 栗会峰, 丘明, 电工电能新技术, **7** (2014) , 6.

[13] Vellego, G. , Metra, P., *Superconductor Science and Technology*, **8**(1995), 476.

[14] Carr, W.J, *IEEE Transactions on Magnetics*, **1**(1979), 240.

[15] Demko, J. A. , Lue, J. W. , Gouge, M. J. , Stovall, J. P. , Butterworth, Z. , Sinha, U. , et al, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **1**(2001), 1789.