35 kJ高温超导磁储能 (SMES)的热输运实验研究

谢江波 王惠龄 吴 钢 赵 琰 李敬东 唐跃进

(华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

摘 要:研制了中国首台高温超导磁储能直接冷却系统,该系统不使用低温液体(液氦、液氮)。 在 10⁻³ Pa的真空度下,高温超导磁体线圈由 1台单级 GM 制冷机从室温 293 K冷却到 19 K, B2223 电流引线由另一台制冷机冷却到 77 K以下。整 係 统在通 140 A 直流电流的时候产生了 4 5 T的 磁场。系统连续运行 480 h(20 d),磁体和低温系统各参数动态特性良好。实验研究表明,控制系统 的漏热,优化磁体内部导冷结构,有效减少热传导部件的接触界面热阻是制冷机直接冷却高温超导磁 体的关键技术。

关键词:高温超导磁体 直接冷却 热分析 中图分类号: TB611 文献标识码: A 文章编号: 1000-6516(2006) 01-0031-04

Experimental investigation of heat transport for 35 kJ superconducting magnet energy storage system

X ie Jiangbo Wang Huiling WuGang Zhao Yan Li Jingdong Tang Yuejin (Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074, China)

Abstract The first conduction cooled superconducting magnets energy storage(HTS-SMES) magnet system was designed and built without cryogenic liquid (helium or nitrogen) in China The HTS-SMES superconducting coil has been cooled down from about 293 K to 19 K in vacuum of 10⁻³ Pa by a GM cryocooler The cylindrical Bi2223 oxide current leads were cooled down be bw 77 K by another cryocooler This system generates a magnetic field of 4 5 T at the operating current of 140 A. There was nothing wrong with the system which operated for about 480 hours continuously. Experimental research shows that the key technology of a conduction cooled magnet depends on controlling heat leak, reducing interfacial them al resistance and optimizing the conduction cooled structure of the magnet system.

Keywords high temperature superconducting magnet conduction-cooling thermodynamic analysis

1 引 言

超导磁储能是高温超导技术在电力系统应用中

的一个重要方面,超导技术的发展离不开低温技术的 支持,低温技术的发展直接关系到超导设备的运行效 率和安全可靠性。随着 GM 制冷机研究取得进展,高

收稿日期: 2005-12-19,修订日期: 2006-01-04 基金项目:国家 863高技术研究发展计划(2002AA 306331-4),教育部博士学科点专项科研基金项目(20040487039)资助。 作者简介:谢江波,男, 23岁,硕士研究生。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温超导材料的加工工艺不断改善, GM 制冷机直接冷 却高温超导磁体成为高温超导体在电力系统应用中 的一个重要发展方向。与传统的单一低温液体的冷 却模式相比,它是一种以导热为主的新的冷却模式, 有以下优点^[1]:低温系统结构简化,操作方便,长时 间运行不需要补液,经济性、安全性好,还可以根据电 力系统的需求,灵活的选择安装地点。

华中科技大学、西北有色金属研究院、浙江大学、 中国科学院等离子所等在国家 "863" 计划的支持下, 成功的研制了国内首台直接冷却 35 kJ高温超导磁 储能系统 (SMES)。该系统能高效储能,快速响应电 力系统功率变化,不但可以提高电力系统的稳定性, 还可以改善电力系统的供电品质,能作为不间断电 源。该项研究的成功,标志着中国在高温超导电力应 用技术上取得了新突破。

2 实验装置

高温超导磁储能 (SMES)低温系统主要由高温 超导磁体圈,电流引线,2台 GM 制冷机,真空系统和 低温杜瓦装置等组成。高温超导磁储能低温系统由 华中科技大学设计研发,杜瓦装置尺寸为 Φ800 mm ×1900 mm,由四川空分集团制造。直接冷却磁体导 致冷结构由华中科技大学设计,中国科学院等离子所 研制。SMES低温装置的结构示意图由图 1所示。



图 1 SMES磁体直接冷却和传感器分布示意图 1. 二级 GM 制冷机; 2.铜引线; 3 HTS引线; 4.辐射屏; 5.低温杜瓦; 6.磁体和导冷结构; 7.温度传感器: 8.单级 GM 制冷机。

Fig 1 Sketch of experimental device and distribution of temperature sensors

磁体由国产高温超导线材 B 2223绕制而成,每

21 磁体

根线材在绕制之前都进行短样测试, 剔除不合格样 品。最终绕制成的磁体是双饼磁体, 由 32块饼串联 叠加而成, 每块磁饼的外径为 272 mm, 内径为 150 mm。磁体在用环氧树脂固化前在液氮中 77 K 的温 度环境下进行实验, 22 A 的电流达到了 0 68 T 的磁 场。

22 电流引线

低温装置的电流引线采用由铜引线和高温超导 电流引线组合而成二元电流引线结构,西北有色金属 院提供的高温超导电流引线由 B2223材料制成,该 材料具有临界电流密度高、热稳定性好,柔软等特性。 当高温超导电流引线工作在临界温度 *T*。以下时,与 常规的铜引线相比,可以消去焦耳热。B2223作为 陶瓷材料热导率很低,从而极大的减少从高温区向低 温区的热传导漏热。与传统的气冷电流引线相比,完 全靠沿引线长度方向的热传导来散热。

23 GM 制冷机

低温冷却系统有两台 GM 制冷机提供,一台二级的 GM 制冷机一级冷头温度为 77 K,冷却辐射屏和 铜电流引线,二级冷头温度为 20 K,冷却高温超导引线。另一台单级 GM 制冷机冷头温度为 20 K,用来 冷却高温超导磁体。

24 磁体导冷结构和柔性结构

在叠置的磁体线圈夹层及圆周方向设置有导冷 权和导冷杆,结构照片如图 2所示。

上下导冷板的外侧部分可沿孔位中心线拆卸,在 连接的界面上压入纯铟,以保证导冷板与导冷杆紧密 接触。导冷结构能够将制冷机冷头的冷量迅速地扩 散到磁体,均衡磁体温度,防止磁体因局部温度过高 而失超。GM 制冷机的冷头存在微弱的振动,微弱的 振动会导致冷量的间断传输,同时长时间的振动也会 对磁体造成伤害,大大降低磁体运行的稳定性。消除 这种振动比较好的方法是在冷头和磁体间采用柔性 连接。但柔性连接的采用不仅增加了低温系统的热 负荷,还增加了制冷机冷头和磁体的热阻,阻碍了冷 量的传输。最大限度的减少柔性连接的热负荷,优化 柔性连接与制冷机冷头和磁体间的接触界面热阻及 自身的体积热阻是直接冷却在超导应用中的关键。

25 测量仪表

采用华中科技大学自行研制的镍铬 – 铜铁低温 热电偶 (测量范围 4~ 273 K, 精度为 ±0.5K), 用英 国 1905A 数字电压表和美国 Keihley 2700 记录和进 行数据采集并送计算机分析处理。在磁体中设置了

33

多支低温铂电阻温度计,测量磁体中的温度分布。由 自行研制的智能型单点和多路低温数字温度表检测, 测量范围为 20~273 K,灵敏度为 0.1 K。完全满足 高温超导磁储能测量的低温范围和精度及动态过程 灵敏度的需要。



图 2 SMES磁体和导冷结构 Fig 2 SMES magnet and conduction-cooled structure

3 超导磁体直接冷却的热损耗分析

有效地阻止超导系统低温装置的漏热是设计低 温系统的关键。在设计低温系统的过程中,必须对系 统可能的漏热途经做出评估,从而针对具体的漏热采 取有效的绝热措施,最终达到降低系统热负荷的目 的。该超导系统的低温装置采用制冷机直接冷却,主 要的漏热途经有磁体的辐射漏热,残余气体的漏热, 和电流引线的传导漏热。

辐射漏热的计算公式如下:

$$Q_1 = A \,\sigma \, \mathcal{E} (T_2^4 - T_1^4) \tag{1}$$

式 (1)中 *A* 为储能磁体的表面积, m²; σ 为斯忒藩 – 玻耳茲曼常量, 5 67 × 10⁻⁸ W /(m² • K⁴); ε 为磁体 的发射率; *T*₁, *T*₂分别为磁体温度和辐射屏温度, K。

残余气体的漏热计算式如下:

$$Q_2 = \mathcal{M}_1 \Delta T \tag{2}$$

式 (2)中 A_1 为传热面积; λ 为气体导热系数; ΔT 取辐 射屏和磁体间的平均温差。

电流引线由高温超导电流引线 (HTSC)和铜引 线组成。高温超导电流引线的温度处在截流点温度 *T*_j和 GM 制冷机二级冷头温度 *T*_L之间,铜引线的温 度处在环境温度 *T*_L和截流点温度 *T*_j之间,高温超导 电流引线工作在临界温度以下,在通入电流的时候不 产生焦耳热,则从 HTSC 引线漏入到制冷机二级冷头的热量为:

$$Q_{2nd} = \frac{A_{\rm HTSC}}{L_{\rm HTSC}} \int_{T_{\rm L}}^{T_{\rm J}} k_{\rm HTSC} (T) \, \mathrm{d}T \tag{3}$$

式 (3) 中 A 为 HTSC 引线横截面积, L 为引线长度, k 为 HTSC 材料的热导率。

铜引线漏入到制冷机一级冷头的热量为:

$$Q_{1\text{st}} = \frac{A_{\text{Cu}}}{L_{\text{Cu}}} \int_{\mu_{j}}^{\pi} k_{\text{Cu}} (T) dT + i^{2} R \qquad (4)$$

式 (4) 中 *A* 为 Cu引线横截面积, *L* 为引线长度, *k* 为 Cu的热导率, *i* 为通过铜引线的电流, *R* 为铜引线的电阻。

4 实验结果

41 磁体的降温实验

首先用真空机械泵将系统内的压强降到 0.1 Pa, 启动 GM 制冷机后,随着磁体温度的下降,装置内的 气体进一步冷凝,系统的压强最终维持在 10⁻³ Pa, 整个磁体经过 24 h的冷却,磁体上的各点温度全部 稳定在 19 K 的范围内,磁体上下温差较小,不超过 1 K。磁体迅速而均匀的降温在于对磁体的导冷结构 进行优化,最大可能的增加磁体与制冷机冷头间的导 冷面积,缩短两者之间的冷量传输距离。

图 3是磁体的降温特性。T₄为磁体下部温度, T_5 为磁体上部温度, T_6 为磁体中部温度。当下部温 度为 110 K的时候,磁体进入到超导态。在开始冷却 阶段,轴向温差相差较大,上下两个温度测点最高温 差达到 28.4 K。随着时间的推移、磁体间的温度趋 向平衡,经过24h后,上下两个测点的温差不超过1 K.最终磁体下部的温度稳定在 19 K。产生这种现象 的原因是制冷机的冷头通过柔性结构和磁体下部相 连,制冷机刚开始运行时冷头与磁体下部的温差较 大,而且两者之间的导冷面积大,与超导磁体的内部 导热热阻相比,柔性结构与制冷机冷头之间的界面接 触热阻要小得多,这些因素都使得磁体的下部冷却较 快。当磁体的下部温度和制冷机的一级冷头温度比 较接近时,从制冷机过来的冷量很少一部分用来冷却 磁体的下部,而是通过磁体本身和导冷结构传给磁体 的上部,从而消除了磁体的轴向温差。单级 GM 制冷 机冷头最后稳定的温度是 17.6 K. 与磁体的下部温 度相差 1.4 K。如能减少磁体和下端导冷板,下端导 冷板和柔性结构,柔性结构和制冷机冷头的接触界面 热阻。两者的温差进一步缩小,磁体的温度进





Fig. 3 Temperature profiles of magnets

图 4是电流引线的降温特性。T₈ 是高温超导电 流引线的温度, T₁₀是铜引线的温度。铜电流引线一 端与二级 GM 制冷机的一级冷头相连, 一端与室温环 境相连。两者间巨大的温差使得环境的热量不可避 免的沿铜引线导入到低温系统中。当二级制冷机一 级冷头带走的热量和外界环境漏入的热量达到动态 平衡时,铜引线的温度最终稳定在 159 K,此时外界 环境沿铜引线进入低温装置系统的漏热量约为 14 W。高温超导电流引线安装在二级 GM 制冷机的一级 冷头和二级冷头之间, Bi2223材料制成的高温超导引 线导电性优良,热导率低,能够有效的阻止外界环境沿 铜引线导入的热量继续沿高温超导电流引线向磁体系 统蔓延。同时高温超导电流引线的温度维持在 54 K 左右,在通入电流动态运行时,高温超导电流引线处于 超导态,几乎没有焦耳热,高温超导电流引线成功解决 了电流引线的漏热问题。实验的过程中,铜电流引线 出口端的温度维持在露点温度以上,成功避免了使用 传统气冷电流引线在铜引线的出口端出现的结霜甚 至结冰现象。使用高温超导二元电流引线,引线的漏 热可以做到比气冷引线低得多的水平。



4.2 磁体的动态特性实验

在磁体和电流引线的动态特性实验中,加载的直 流电流从 0A开始,在 15m in内逐渐增加到 140A, 140 A的时候产生了 4.5T的磁场。磁体和高温超导 电流引线的温度随电流的加载变化不大,磁体温度的 浮动上下不超过 1 K. 高温超导电流引线的温度变化 在 2 K 以内。主要原因是磁体超导性能良好,在超导 的状况下几乎没有电阻,产生微量焦耳热很快被制冷 机带走,不足以对磁体的温度产生大的波动。铜引线 在电流加载的情况下温度变化明显,在加载电流 15 min的时间内温度上升了约 50 K。铜引线的残余电 阻在强电运行的情况下产生了巨大的焦耳热,由于高 温超导电流引线的低热导率,热量只有微小的部分导 入到磁体。大量的焦耳热逐渐被二级制冷机的一级 冷头带走。在高温超导磁储能系统中使用二元电流 引线结构能够很好的降低系统的漏热,减轻系统的热 负荷,保障磁体的动态运行。

5 结 论

(1)磁体经过制冷机 24 h的冷却,磁体温度由室 温 293 K 降到 19 K。

(2)中国首台直接冷却高温超导磁储能系统 (SMES)连续运行 480 h(20 d),磁体和低温系统各参 数动态特性良好,没有出现局部失超现象。

(3)磁体与导冷结构之间的接触界面热阻,导冷 结构与冷头之间的接触界面热阻是影响磁体冷却速 率的主要因素。从微结构低温工程学的角度研究如 何减少接触界面热阻是制冷机直接冷却高温超导磁 体的关键技术所在。

参考文献

- 王惠龄, 饶荣水, 李敬东, 等. 超导电力低温技术展望. 电力系统自动化, 2001 (10): 65~68
- 2 Kumakura H, Ohara T, Kitaguchi H, et al Conduction-cooled Bi₂S₅Ca₂Cu₃Ox (Bi-2223) magnet for magnetic separation Phycisa C, 2001 350(1/2): 76~82
- 4 Onishi A, Li R, A sami H, et al Development of a 1. 5W-class 4K G ifford-M M alon cryocooler Cryogenic Engineering 1996 31(4): 162~ 167
- 5 宋乃浩,林良真,张 亮,等.制冷机直接冷却的超导磁体系统.低 温工程, 1999 (4): 296~ 301

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net