

研究报告

舰船电力系统用 1 MJ 高温超导储能磁体设计研究

戴陶珍, 范则阳, 李敬东, 唐跃进, 程时杰, 潘 垣
(华中科技大学电气与电子工程学院超导电力发展中心, 武汉 430074)

[摘要] 介绍了舰船电力系统用的 1MJ 螺管型高温超导储能磁体的设计优化步骤, 给出了用 Bi-2223 超导带进行 1 MJ 磁体线圈的设计和优化结果, 分析了高温超导体的各向异性对磁体临界电流的影响, 讨论了储能容量一定的多螺管磁体系统在漏磁、储能密度和所需超导线材方面的变化。

[关键词] 超导磁储能系统; 高温超导体; 磁体设计

[中图分类号] TM761; TM26⁺5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)01-0053-04

1 引言

近年来, 随着高温超导线材的开发成功, 高温超导体接近实用水平, 已设计制造了不同用途的高温超导磁体^[1~2]。由于高温超导线材在 20~30 K 范围内能承受更大的电流, 使高温超导磁体尺寸大大减小。采用直接冷却法可极大地降低制冷成本, 从而提高超导磁体的运行效率。这些优点使高温超导磁体更加吸引消费者。基于高温超导磁储能系统 (superconducting magnetic energy storage system, SMES) 在未来舰船电力系统中的潜在应用前景^[3], 进行了舰船电力系统应用 SMES 研究。通过对舰船电力系统的模拟分析发现, 容量为兆焦级的 SMES 适用于小型舰船电力系统。为此, 笔者进行了 1 MJ/250 kW 高温超导储能磁体的设计研究。

2 参数选择

作者设计所使用的高温超导线材选用美国 ASC 公司生产的高强度 Bi-2223 带材, 该带材的特性为: 银质外套结构; 截面尺寸 0.3 mm × 4.1 mm; 单根长度 100 m, 200 m, 300 m; 在温度为

77 K, 外加磁场为 0 T 时, 工程临界电流 $I_c = 115$ A; 工程临界电流密度 $J_c = 9.2$ kA/cm²。

高温超导体的一个显著特点是在外加磁场作用下具有极强的各向异性。图 1 分别给出了高温超导体温度为 20 K 时平行于高温超导带表面方向和垂直于高温超导带表面方向的磁场分量 B_p 和 B_v 与临界电流的关系曲线, 即 I_c-B 曲线。

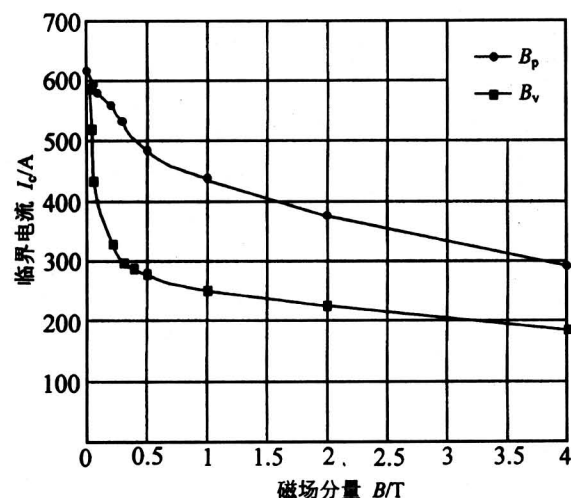


图 1 Bi-2223 带材的磁场分量与临界电流的关系
Fig.1 Magnetic component versus critical current for a Bi-2223 tape

用单根超导带组成的超导体绕制磁体时,线圈的匝数较多,磁体线圈的电感较大,限制了 SMES 磁体对外部的功率补偿做出快速响应;而用多根平行超导带组成的超导体来设计磁体,可以极大地降低储能磁体的电感,从而减小磁储能系统的时间常数,使超导磁储能系统能更好地适用于系统要求的快速响应功能。在磁体设计中,根据 SMES 功率确定 SMES 的工作电流为 1 300 A,每根超导线的电流选定为 130 A,超导磁体选用由 10 根带银质外套的 Bi-2223 平行超导带并联构成的超导体,其截面尺寸为 4.4 mm×5.4 mm。

3 高温超导体的 SMES 磁体设计

超导磁储能系统中的超导磁体主要有两种类型:螺旋管型(单螺管和组合螺管)和环型。由于螺管型储能磁体结构简单、材料利用率高和储能效率较高,在储能容量相对小时可优先选择,故选择了螺管型磁体的设计研究。

3.1 高温超导体 SMES 磁体设计的基本准则

1) 在超导态运行时,导线内流过的电流与外加磁场有关。由于高温超导体具有各向异性,设计过程中要同时考虑平行于超导体表面的磁场分量和垂直于超导体表面的磁场分量与临界电流的关系。

2) 超导线圈的储能容量 ($LI^2/2$) 由线圈电感 L 和线圈运行电流 I 共同决定,而 L 和 I 有一定的约束关系,设计中要保证在储能一定的情况下超导磁体体积 V_S 最小,即储能密度 $LI^2/2V_S$ 达到最大,在设计中要考虑二者的协调。

3) 考虑到高温超导体的机械性能较差,若按常规螺旋管层绕式方法绕制,可能会使超导线芯折断引发性能退化,所以作者在磁体设计中选用盘式结构。每盘一对饼式与每盘单饼式相比,接头减少一半,可极大降低焦耳热,故设计中选用双饼结构。

4) 为了保证磁体安全可靠的运行,选择磁体的电流安全运行系数为 0.6~0.7。

3.2 设计思路

单螺管磁体线圈尺寸设计主要是指磁体内径、外径和长度的设计。由于磁体所采用的超导材料价格昂贵,所以在超导磁体的设计中,总是力求降低超导材料用量,以降低磁体成本。超导螺旋管线圈是超导储能应用中的一种重要的线圈形式,这种形状磁体的超导材料用量可以用螺旋管线圈的体积来

衡量,所以在对磁体进行优化设计时,可选择磁体线圈的体积作为目标函数。

设单螺管内半径为 R_i , 外半径为 R_o , 轴向全长为 $2b$, 电流密度为 J , 线圈体积为 V , 电感为 L , 总储能容量为 E , 匝数为 N , 线圈平均直径为 D , 则

$$\alpha = \frac{R_o}{R_i}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{b}{R_i}, \quad (2)$$

$$L = \frac{\mu_o}{4\pi} N^2 DT(\alpha, \beta), \quad (3)$$

$$B_\rho = \frac{\mu_o J}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{R_i}^{R_o} d\rho' \int_{z_1}^{z_2} \frac{-(z' - z)\rho' \cos\theta}{r^3} dz', \quad (4)$$

$$B_z = \frac{\mu_o J}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{R_i}^{R_o} d\rho' \int_{z_1}^{z_2} \frac{-\rho'(\rho' - \rho \cos\theta)}{r^3} dz', \quad (5)$$

$$B_\varphi = 0, \quad (6)$$

$$r = \sqrt{\rho'^2 + \rho^2 - 2\rho'\rho \cos\theta + z'^2}, \quad (7)$$

式 (1) 至式 (7) 中, α, β 为螺旋管线圈形状参数, $T(\alpha, \beta)$ 是螺旋管线圈形状参数的函数, μ_o 为真空磁导率, ρ 为磁场任意点 P 的径向坐标, z 为磁场任意点的轴向坐标, φ 为 P 点周向坐标, θ 为 P 点与磁体线圈内任意点的周向坐标之差, ρ' 为磁体线圈内任意点的径向坐标, z' 为磁体线圈内任意点的轴向坐标, z_1 为磁体线圈最下端的轴向坐标, z_2 为磁体线圈最上端的轴向坐标。

为了节约超导材料,约束条件为: a. 储存容量为 1 MJ; b. 超导磁体的工作点应在超导态的最大工作点以下。

目标函数为

$$V = 2\pi R_i^3 \beta (\alpha^2 - 1). \quad (8)$$

为了减小漏磁,进一步研究了轴线平行式多螺管磁体系统。这种磁体系统由偶数个线圈模块组成,线圈轴线平行,各线圈等间距分布在同一圆周上,相邻两个线圈的电流流向相反,见图 2。

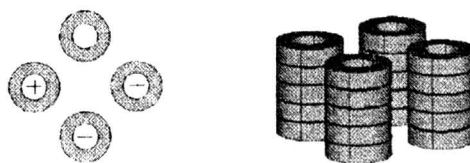


图 2 四螺管磁体结构

Fig.2 Four parallel solenoid configuration

根据设计目的，选用两种方案对多螺管磁体系统进行优化设计：第一种方案主要考虑提高系统的储能效率；第二种方案属于双目标优化，综合考虑储能效率与系统的漏磁场。

第一种方案以节约超导材料为目标，约束条件为：**a.** 储能为 1 MJ；**b.** 工作点应在超导态的最大工作点以下。

目标函数为

$$V = 2N\pi R_i^3 \beta (\alpha^2 - 1) = \min. \quad (9)$$

第二种方案以提高储能效率与减小漏磁场为目标，约束条件为：**a.** 储能为 1 MJ；**b.** 漏磁场最小；**c.** 工作点应在超导态的最大工作点以下。

目标函数 O_F 为

$$O_F = B_s^2 / B_n^2 + |E - E_r| / E_r = \min, \quad (10)$$

式中 E_r 为额定能量， E 为系统总能量， B_s 为平均漏磁的大小。假定以距离储能系统中心 2 m 为关心的范围，计算表明，在经过中心点的任一垂直平面内（如 $\varphi = 0$ 平面），边界线 1 ($z = 2, 0 < \rho < 2$) 和边界线 2 ($\rho = 2, 0 < z < 2$) 上的磁场平均值可以较好地反映漏磁场的特性，假定其大小为 B_s 。 B_n 为优化设计时需要达到的漏磁场水平。此处取值为地磁场大小的平均值 $5 \times 10^{-4} \text{ T}^{[4-7]}$ 。

3.3 设计结果与分析

图 3 给出了几种磁体磁场的衰减情况。从图 3 可以看到，单螺管漏磁大，磁场衰减缓慢，而多螺管都在一定程度上削弱了漏磁场，尤其是四螺管和六螺管极大地降低了漏磁场，在距离磁体中心 2.5 m 范围内，磁体磁场漏磁衰减到 $5 \times 10^{-4} \text{ T}$ 以下。由于用于舰船电力系统的超导储能磁体放置在舰船上，其漏磁场会导致控制系统和指挥系统发生故障，还可能与舰船上其他设备在电磁方面不兼容，

造成严重的电磁污染，因此，1 MJ 单螺管型超导磁体的漏磁场过大，若不采取有效的屏蔽措施，磁体的漏磁场将对舰船电器设备的正常工作及人员的健康造成极大的影响，因而不适合直接用于舰船上^[8]；而多螺管磁体系统极大地降低了漏磁，起到了很好的屏蔽作用，因此，可根据需要选用多螺管磁体系统。

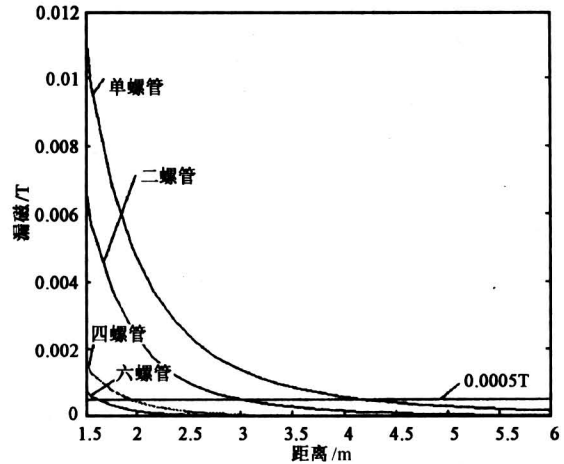


图 3 几种螺管漏磁场衰减图

Fig.3 Degradation of stray field in different solenoid magnet

表 1 给出了磁体线圈的设计值汇总，其中 I_c (径向)， I_c (轴向) 分别为径向最大磁场和轴向最大磁场决定的 Bi-2223 带材的临界电流，漏磁为距磁体中心 2 m 处的平均漏磁大小。从表 1 可以看出，由磁体径向磁场分量决定的 I_c 值，小于由磁体轴向磁场分量决定的 I_c 值，所以高温超导磁体的临界工作电流主要受垂直于超导带表面的磁场分量的限制，减小垂直于超导带表面的磁场分量可提高临界运行电流，从而增加磁体的储存容量。

表 1 多螺管磁体线圈设计值汇总

Table 1 Specifications of the multiple solenoid magnet

参数	单元内半径 /mm	单元外半径 /mm	单元盘数 /盘	导体的 I_c (径向) /A	导体的 I_c (轴向) /A	储能密度 $J \cdot m^{-3}$	漏磁 $/10^{-4} T$	所需超导体 /m	
单螺管	224	422.4	16	1 890	2 300	1.22e7	198	3 000	
二螺管	方案 1	206	360	1 950	2 450	9.0e6	74	3 800	
	方案 2	200	314.4	23	1 960	2 510	8.56e6	65	4 000
四螺管	方案 1	167	317	14	2 000	2 700	6.87e6	18	5 000
	方案 2	170	276	19	2 020	2 780	6.52e6	15	5 200
六螺管	方案 1	162	281	13	2 040	2 840	5.86e6	9.4	5 900
	方案 2	150	242.2	20	2 050	2 920	5.34e6	7.4	6 200

从表1中还可以看出,对单元螺管数相同的多螺管磁体系统,第二种方案由于考虑了漏磁场的影响,超导磁体的体积相对增大,储能密度减小,需要的超导材料增多,但漏磁场较小,与周围环境更加和谐。对单元螺管数不同的多螺管磁体系统,随着多螺管单元数目的增加,所需的超导线增多,储能密度变小,漏磁减小;四螺管和六螺管的储能密度虽有所降低,但两种磁体结构在很大程度上减小了漏磁,可根据需要选择四螺管或六螺管结构。

4 结语

对1 MJ 高温超导体的 SMES 磁体单螺管结构和多螺管磁体结构分别进行了设计和优化,并给出了储能密度、漏磁和所需超导线随着螺管单元数目的增加引起的变化,得出了如下结论:

1) 高温超导磁体的临界工作电流主要受垂直于超导带表面的磁场分量的限制,减小垂直于超导带表面的磁场分量可提高临界运行电流,从而增加磁体的储存容量。

2) 对1 MJ 单螺管型高温超导磁体进行了优化设计,指出了1 MJ 单螺管磁体在其周围很大空间范围内存在漏磁场,在没有采取屏蔽措施的情况下,不适合用于舰船电力系统。

3) 对于单元螺管数不同但储能相同的多螺管磁体系统,随着多螺管单元数目的增加,所需的超导线增多,储能密度变小,漏磁减小,故四螺管和六螺管很好地减小了漏磁,可以优先选用。

参考文献

- [1] Funaki K, Lwakuma M, Kajikawa K. et al. Development of a 500 kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature [J]. *Cryogenics*, 1998, 38(2): 211~220
- [2] Snitchler G, Kalsi S S, Manlief M, et al. High-field warm-bore HTS conduction cooled magnet [J]. *IEEE Trans on Appl SC*, 1999, 9(2): 553~558
- [3] 戴陶珍, 范则阳, 李敬东, 等. SMES在舰船电力系统中的应用前景及其关键课题[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(6):16~19
- [4] Formisano A, Martone R, Villone F. Optimization of the magnetostatic field in SMES devices [J]. *IEEE Trans on Mag*, 1997, 33(2): 1832~1835
- [5] Alotto P, Kuntsevitch A V, Magele Ch. Multiobjective optimization in magnetostatics: a proposal for benchmark problems [J]. *IEEE Trans on Mag*, 1996, 32(3): 1238~1241
- [6] Korpela A, Lehtonen J, Mikkonen R, et al. Optimization of SMES magnet volume with electromagnetic and mechanical constraints [J]. *IEEE Trans on Appl SC*, 2000, 10(1): 780~783
- [7] 黄水龙, 邵可然, 陈德智. 微型超导磁体的场型分布及其结构优化[J]. *华中科技大学学报*, 2001, 29(10): 44~46
- [8] Hamajima T, Shimada M, Hanai S, et al. SMES coil configurations with reduced stray field [J]. *IEEE Trans on Appl SC*, 1999, 9(2): 346~349

Design Study of 1 MJ High Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage System Applied Into Electric Power System in Ships

Dai Taozhen, Fan Zeyang, Li Jingdong, Tang Yuejin, Cheng Shijie, Pan Yuan

(College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

[Abstract] This paper outlines a systematic procedure for the design of a solenoidal coil and presents the optimum design of 1 MJ HTS magnet which is designed with Bi-2223 tape. At last the authors analyse the main magnetic component which influences the maximum critical current and discuss energy density, stray field and superconductors needed in multiple solenoid magnet with different elements.

[Key words] superconducting magnetic energy storage system (SMES); high temperature superconductor (HTS); design of magnet