

超导磁储能系统在舰船电力系统中的应用前景及其关键课题

戴陶珍, 范则阳, 李敬东, 唐跃进, 程时杰

(华中科技大学超导电力科学技术研究中心, 武汉 430074)

[摘要] 现代舰船电力系统容量急剧增大, 全电力舰船的实现、敏感负荷和新概念武器的引入使舰船电力系统面临着一系列挑战。介绍了超导磁储能系统 (SMES) 作为一种新型储能设备的应用研究进展, 分析了 SMES 在舰船电力系统中的潜在应用, 最后提出了舰船电力系统中应用 SMES 的关键课题。

[关键词] 舰船电力系统; 超导磁储能系统 (SMES); 超导应用

[中图分类号] TM761; TM26⁺5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2002) 06-0016-04

1 引言

在现代舰船上, 随着大量高技术设备的应用, 对舰船电力系统乃至整个能源管理系统的要求越来越高。电力推进是舰船推进技术的发展方向, 大功率电动机的引入将对舰船电力系统在适合大负载变动方面提出新的要求。信息技术是舰船导航、武器的目标搜捕、瞄准、跟踪等指挥、控制系统的关键。计算机是信息技术的重要依托, 由于计算机以及电子设备对电源电压的变化较为敏感, 严重的电压波动将导致计算机系统的错误甚至故障。因此, 对未来舰船电力系统的可靠性、电压、频率的稳定性等技术要求必将大大提高。以激光、粒子束以及电磁炮为代表的新概念武器将成为舰船的重要打击力量, 这类新概念武器大多需要大功率脉冲电源, 这对舰船能源管理系统, 包括能量储存、大功率释放、能量高效高速控制的技术要求都是前所未有的。因此, 在未来的舰船电力系统中, 必须导入新的具有突破性的技术才能满足技术发展对舰船能源以及能源管理系统的要求。超导磁储能系统 (SMES: superconducting magnetic energy storage) 储能效率高、储能密度大、释放能量快速、易于控

制。在未来舰船上, SMES 具有广泛的应用空间。它能够向系统提供有功、无功功率来提高系统的稳定性, 改善供电品质。它可向舰船上的重要设备提供紧急备用电源, 也可为新概念武器提供脉冲电源。所以说, SMES 在舰船上有很大的潜在应用, 在未来的舰船上它将充当很重要的角色。

2 舰船电力系统面临的挑战

舰船电力系统是电源、配电网和本舰用电负载所组成的完整体系的总称。现代舰船的电气化程度越来越高, 用电负荷的增多使电力系统容量逐渐增大^[1], 随着电力系统发电容量的增大和全电力舰船的实现, 对电能管理的要求更加复杂。舰船电力系统将在以下几个方面面临新的挑战:

1) 频繁的大功率负荷变动和高质量电能需求的矛盾 全电力舰船 (AES) 是指对推进系统、电子设备、武器系统和日常供电采用一个综合的发电和配电系统, 是未来舰船发展的方向^[2]。这些大功率的推进电机在起动、制动瞬间对电网造成极大的冲击, 电压陡降, 会对舰船电力系统造成很大的干扰, 产生大的浪涌电压, 对电子设备造成损坏; 同时推进电机在运行时要求频繁调速, 需要电力系

统能够及时快速地满足它的功率变动需求, 这种大功率变动必然引起电网电压和频率的变化, 而电子设备如雷达、通信设备、声纳、光电传感器、电子侦察与预警、导航设备等对电源系统的要求非常高。如果供电电压过高, 会损坏设备中的敏感电子元件, 电压过低, 也会影响设备正常工作; 所以要想同时满足大功率变动和高质量的电能需求, 必须寻求新的解决方法。

2) 可靠的电能需求 用电负荷对供电系统最基本的要求是可靠性, 电子设备如果没有可靠的电能供给, 就会停止工作, 而不能发挥应有的作用; 同时, 作为自动化指挥系统的核心设备的计算机, 其性能直接关系到指挥、控制、通信与情报系统的性能和效率, 如果电能质量不可靠, 即使几毫秒的供电中断, 其后果也是不堪设想的, 轻则数据丢失、计算机出错, 重则使系统发生混乱, 将会造成指挥失控, 通信中断, 信息丢失, 严重影响战斗的胜利完成。因此, 对未来舰船电力系统的可靠性要求越来越高。

3) 脉冲负荷对电能管理系统的要求 舰船的武器系统包括常规的武器系统和高技术武器系统。随着作战环境的不断变化, 水面舰船武器的性能不断提高, 未来将引入激光武器、粒子束武器、微波武器、电磁炮等新概念武器。这些脉冲功率系统通过充电系统从电网吸收能量, 如中等能量激光器和高功率微波武器需要 100~500 kW 的充电功率, 并在毫秒数量级以极大功率释放脉冲电能^[2]。这对舰船能源管理系统, 包括能量储存、大功率释放、能量高效高速控制的技术提出了新的要求。

3 SMES 及其优越性

SMES 是利用由超导线制成的线圈, 将电网供电励磁所产生的磁场能量储存起来, 在需要时再将此储存能量送回电网或作他用。一般 SMES 的基本结构如图 1 所示。它主要由超导线圈、失超保护、冷却系统、变流器和控制器等组成。

SMES 系统预先在超导线圈内储存一定的能量(最大储存电能的 25%~75%), 再通过控制变流器的触发脉冲来实现 SMES 与系统的有功无功交换, 从而完成 SMES 的多种功能。

表 1 为几种主要储能方式的特征参数的比较。可以看出, 超导磁储能在储能密度、储能容量上均具有一定的优势。同时, SMES 能够稳定地输出—

定的功率。也就是说, SMES 的能量释放速度可以在较大时间范围内自由控制, 这为满足不同的用途提供了基本条件。

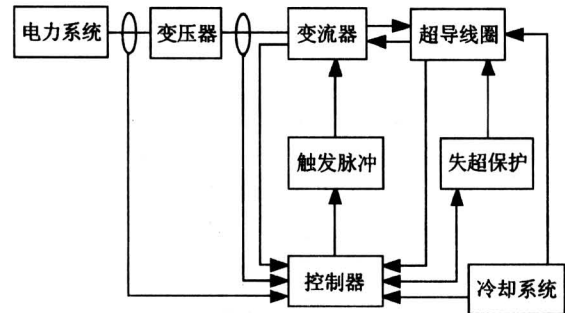


图 1 SMES 结构图

Fig.1 Components of a SMES

表 1 主要储能装置性能比较

Table 1 Comparison of performance on the main energy storage system

储能装置	储能密度 $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$	储能容量 MJ	释放时间
静电储能	$\approx 10^5$	≈ 60	0.1~10 μs
超导磁储能	$\approx 10^7$	$\approx 1\ 000$	1 ms 至数小时
超导磁悬浮	$\approx 10^7$	≈ 100	1 s 至数小时
单极发电机	$\approx 10^8$	≈ 100	1~100 ms
化学能	$\approx 10^{10}$	≈ 100	0.1 ms

具体地讲, SMES 具有以下优点: a. 它不经过其他形式的能量转换, 可以长期无损耗地储存能量, 其返回效率高达 95%; b. SMES 通过变流器连接电网, 因而响应速度快(几毫秒至几十毫秒); c. SMES 易于控制, 不仅能快速地与系统进行无功交换, 而且可快速地与系统进行有功交换, 更重要的是, 有功/无功的交换可四象限独立进行; d. 由于 SMES 能在短时间内输出大量功率, 特别适合于给脉冲负荷供电; e. SMES 除真空和制冷系统外没有转动部分, 故装置寿命长; f. SMES 的建造不受地点限制, 且维护简单、污染小。

4 国内外 SMES 研究的发展概况

美国 BPA (Bonneville Power Administration) 电力公司在 1983 年将储能 30 MJ、最大功率 10 MW 的 SMES 在 2 条并联的 500 kV 线路上试验, 累计时间达 1 200 h, 证明该装置对抑制输电线路低频振荡和无功功率补偿均有良好作用^[3]。1988

年初,在美国建立的开发超导储能商业应用的 SI (Superconductivity Inc.) 大量研制了更小的可移动的 SMES 系统 ($\approx 1 \text{ MW} / (1 \sim 10 \text{ MJ})$), 并在全球范围内实现商业化, 有报告显示在 1997 年已有 15 个 SI SMES 系统投入使用, 为供电质量敏感的工业生产基地提供了高质量的电能。由于军事上要求更大数目的这种小型 SMES 设备的应用, IGC (International General Company) 公司成为这种设备的第二个供货方^[4]。

1985 年, 日本九州大学设计了一台 100 kJ 的 SMES, 用于研究直流输电网中 SMES 的应用和系统稳定。日本九州电力公司于 1991 年将一台 30 kJ 的超导储能系统联接于一台 60 kW 的水力发电机上进行了改善发电机稳定性的现场实验, 表明单机系统可由其发电机容量 10% ~ 50% 的超导储能装置进行稳定控制^[5]。在此基础上, 1991 年开展了 36 MJ SMES 的试验。90 年代, 神户制钢所、东芝公司、日立公司、富士电力公司和中部电力公司等也都进行了 SMES 的相关设计和试验^[6~8]。东京电力公司对 275 kV 系统进行了含 1 MJ SMES 的全面系统动模实验, 效果也令人非常满意。中部电力公司开展了含 1 MJ SMES 的系统动态动模实验, 包括调平尖峰负荷、平衡负荷波动、负荷频率控制、改善动态和暂态特性等, 效果令人鼓舞。

90 年代以来, 俄罗斯 (前苏联) 建成了 12 MJ SMES, 并进行了储能 100 MJ / 电感 8 H / 电流 5 kA / 最强磁场 5.4 T 的 SMES 设计, 并正在研制建造 100 MJ 级 SMES^[9]。

德国已在 1997 年完成了一个容量为 4 MJ / 500 MW 的实验用脉冲功率电源的设计, 在其中成功地引入 SMES 作为储能单元。在 1999 年 9 月, 又研制了一个用作不间断电源的 2 MJ 的低温 SMES; 并正进一步研制 SMES 在高功率 UPS 方面的应用^[10,11]。

我国的 SMES 研究则刚刚起步, 华中科技大学、中国科学院电工研究所、清华大学等单位目前正在进行小型 SMES 的研究工作。

5 SMES 在舰船电力系统的应用前景

1) 提高舰船电力系统的动态特性 通过电力电子换流装置, SMES 可以高效地从系统中吸收并储存能量, 快速地向电力系统提供有功、无功功

率。因此, SMES 可以补偿发电和用电之间的功率不平衡程度, 调整发电机组向电网送出的功率以及负荷点从系统中吸收的功率, 从而提高系统的暂态稳定性; 也可快速地对负荷的变化作出响应, 减小负荷波动对系统的影响。这适应电力推进过程中要求的功率变化, 减小负荷快速波动或发电机出力变化对电网的冲击, 从而可以提高系统稳定性、抑制电压、频率波动, 改善供电品质, 保障舰船指挥、控制系统的电子设备所必需的高质量电能供应。

2) 重要设备的紧急备用电源 SMES 与变流器相结合, 可作为敏感负荷和智能装置的备用电源。当系统正常时, SMES 被旁路, 负荷由交流电网供电; 系统故障时, 中央控制单元马上发出控制信号, 切断交流电网供电, 同时启动 SMES 装置为负荷供电; 当交流电网恢复正常后, 又切回交流电网供电状态。SMES 装置能够避免由于供电中断造成的计算机数据丢失、计算出错等设备和人身的重大事故的发生, 它可以实现后备电源的微秒级的切换, 甚至可以做到无扰动切换。另外, 由于其内部电源转换装置的作用, 还可以避免由电网带来的各种电压波动和干扰, 保证优良的输出电源品质, 极大地提高计算机等负载的工作稳定性和可靠性。SMES 储能密度高, 储能线圈本身没有电阻, 基本上可以认为能维持永久电流, 从而可以高效能地储存电能, 作为重要设备的备用电源。

3) 新概念武器的脉冲电源 正在探索、研制之中的粒子束武器、自由电子激光武器、微波武器和电磁炮都是威力强大的武器。这些武器需要高功率脉冲电源。高功率脉冲电源的核心技术问题是研究高储能密度 (kJ/kg) 和高功率密度 (kW/kg) 的脉冲功率储能系统, 而且要求脉冲放电波形可控性好、内阻小以满足不同负载的需要, 同时要求脉冲重复性好, 系统构成简单, 因此提高储能密度、提高重复频率、使电源轻量化、小型化和实用化是其未来的发展方向。

SMES 的发展提供了解决上述难题的现实可能性。首先, SMES 储能密度大; 其次超导电阻为零, 可大大降低输入级的输入功率, 功率密度大; 更重要的是, SMES 容易控制, 可对脉冲放电波形进行控制; 最后, 由于超导线材的通电流密度远大于铜等常导体, 利用超导线材制成的储能装置的体积和重量将远小于常规的储能装置, 从而可以实现电源的轻量化和小型化。

6 舰船用 SMES 的关键课题

1) 舰船用 SMES 的实现 SMES 在舰船电力系统中可用于提高供电品质, 作为紧急备用电源和充当脉冲电源的储能设备。这三种用途对 SMES 的技术要求各不相同。为提高电力系统稳定性, 改善电力品质的 SMES 需要能快速吸收和向系统提供有功/无功功率, 其响应时间需要达到毫秒级。为提供紧急备用电源的 SMES, 需要具有足够的储能容量, 能长时间地提供充分的电力, 对响应时间没有严格的要求。用于脉冲功率电源的 SMES 则重点在于具有大功率释放能量的能力, 响应时间应小于毫秒级。

舰船装置对体积、重量的要求较高, 所以, 针对不同用途设计不同特性的 SMES 装备舰船是不经济的。为此我们提出设计一台 SMES, 在舰船上实现一机三职: 提高舰船电力系统稳定性, 保障紧急备用电源和提供脉冲电源, 必将取得巨大的技术经济效益。如果 SMES 可以实现一机三职, 就可以大大地节约舰船上有限的空间, 也减轻了重量, 这对提高舰船的机动性是大有好处的。今后研究将从分析针对不同用途的 SMES 的特性入手, 在充分考虑舰船电力系统和能源管理系统的技术基础上, 对 SMES 进行综合设计, 奠定实现一机三职 SMES 的理论基础和技术基础, 为在舰船上实际应用作出贡献。

2) SMES 的控制 SMES 系统最大的优越性在于其能快速地与系统独立进行有功/无功交换。为了实现一机三职, 要求 SMES 能对不同的供电需求及时作出反应; 因此, 在控制器设计和控制策略的选择过程中, 最关键的是 SMES 系统的控制策略是否能使 SMES 装置与电网良好地匹配, 并根据不同的控制目标使 SMES 装置能最大地改善舰船电力系统的性能。

3) SMES 的保护 SMES 只能运行在临界温度以下、所承受的磁场和所通过的电流均不得大于其临界值, 否则就会失去超导电性——即发生失超。失超后将在常态电阻上产生大量的热量而造成 SMES 装置的损坏。因此, 必须采取有效的保护措施来避免 SMES 装置的损坏。

将 SMES 投入舰船电力系统的实际运行, 还要依赖其他相关技术的发展。它包括超导线材技术, 低温技术, 电力电子等^[12]。

7 结语

SMES 是当今高新技术的前沿, 是当前超导应用研究的热点。SMES 利用超导磁体的低损耗和快速响应来储存能量的能力, 通过现代电力电子型变流器与电力系统接口, 组成既能储存电能(整流方式)又能释放电能(逆变方式)的快速响应器件, 从而达到大容量储存电能、改善供电质量、提高系统容量和稳定性等诸多目的。在舰船电力系统中, 利用超导技术制成的超导储能装置可以提高系统运行的稳定性, 改善电能质量, 有着广阔的应用前景。相信随着超导技术的发展, 有关 SMES 的各项技术难题都会迎刃而解, 其经济成本也会大大降低, 为 SMES 在舰船电力系统中的实际应用提供条件。

参考文献

- [1] 孙诗南. 舰船电力系统的设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990
- [2] Rahn H W. The all-electric ship—An answer to future challenges [J]. Naval Forces, 1999, 20(2): 38~47 张志杰. 全电力舰船——未来挑战的答案[J]. 船电技术, 2000, (2): 50~58
- [3] Pogers J D, Boening H J, Hauer J F. Operation of the 30 MJ SMES system in the bonneville power administration electrical grid [J]. IEEE Trans on Mag, 1985, 21: 752~755
- [4] Parizh M, Kalafala A K, Wilcox R. Super-conducting magnetic energy storage for substation applications [J]. IEEE Trans on Appl SC, 1997, 7(2): 849~851
- [5] Irie F, Takeo M, FuKui F, et al. A field experiment on power line stabilization by a SMES system. IEEE Trans on Mag, 1992, 28(1): 426~429
- [6] Fujita H, Goto M, Kito Y. Improvement of dynamic stability in a multimachine power system via SMES with active power modulation controlled by frequency deviation [J]. Electrical Engineering in Japan, 1995, 114-B (2): 135~144
- [7] Fujita H, kurebayashi H, Konishi H, et al. Effective control method for stabilizing large power systems using power electronics devices [A]. CIGRE Symposium [C], Paris, 1996. 39~301
- [8] Imayoshi T, Kanetaka H, Hayashi H, et al. Development of a 1 KWh-class module-type SMES design study [J]. IEEE Trans on Appl SC, 1997, 7(2): 844~847

(cont. on p.28)

着广阔的应用前景。PCI总线使用了许多不同于传统总线的技术手段,在设计开发中需特别注意。

S5933提供了一种性能可靠、应用范围广泛、价格相对低廉的解决方案。笔者利用S5933开发出的高速打标机,PCI控制卡效率提高25%~30%,这项技术已在飞行打标机中应用。

参考文献

- [1] 曾凡太,李洪珍. PCI总线发展概况[J]. 计算机世界, 1996,(7):101
- [2] 曾凡太,陈美金. PCI总线产品的开发[J]. 计算机世界, 1996,(7):109
- [3] Shanley T, Anderson D. PCI system architecture[M]. San Francisco Mindshare, Inc., 1997
- [4] 李贵山,戚德虎. PCI局部总线开发者指南[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1997

Application of PCI Bus in the Numerical-Control-System

Zhang Guoshun, Zhang Jian, Zhang Taishi, Yan Kun, Huang Fuqing

(Laser Device Section, Institute of Precision Instrument, Tianjin University, Photoelectricity Information Technology & Science Education Department Key Laboratory, Tianjin 300072, China)

[Abstract] PCI bus has become the primary bus standard of PC. It is widely used in numerical-control-system, such as 3D laser formation, high speed laser marking, laser cut and so on. This article analyzes several technique problems and puts forward solving strategy. A graphic processing card for high speed laser marking machine has been designed, which can raise the efficiency by 25%~30%.

[Key words] PCI bus; linear burst transmission; reflected wave conversion; interference avoidance

※ ※ ※ ※ ※

(cont. from p. 19)

- [9] Andrianov V V, Batenin V M, Veselovsky A S, et al. Conceptual design of a 100 MJ superconducting magnetic energy storage [J]. IEEE Trans on Mag, 1991, 27 (2): 2329~2332
- [10] Weck W, Ehrhart P, Muller A, et al. Superconducting inductive pulsed power supply for electromagnetic launchers: Design aspects and experimental investigation of laboratory set-up [J]. IEEE Mag, 1997, 33(1): 524~527
- [11] Salbert H, Krischl D, Hohl A, et al. 2 MJ SMES for an uninterruptible power supply [J]. IEEE Trans on Appl SC, 2000, 10(1): 777~779
- [12] 唐跃进,李敬东,段献忠,等. 超导电力科学技术——发展中的新学科和新技术 [J]. 科技导报, 2000,(4): 27~30

Prospects and Key Points for Applying SMES to Electric Power System in Ships

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

(Superconducting Electrical Power Science and Technology R&D Center, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

[Abstract] This paper introduces a series of challenges which modern power system in ships are confronted with the realization of All Electrical Ship and the application of sensitive loads and new weapons. The author analyses the potential application in power system in ships based on the development of superconducting magnetic energy storage (SMES) as a new storage device and points out the key topics for application of SMES to electric power system in ships in the future.

[Key words] electric power system in ships; superconducting magnetic energy storage (SMES); superconducting application