

超导电力磁储能系统研究进展(一)——超导储能装置

韩 翀, 李 艳, 余 江, 唐跃进, 程时杰, 潘 垣

(华中科技大学超导电力科学技术研究与发展中心, 武汉 430074)

摘要: 介绍了超导磁储能装置(SMES)的基本原理、系统组成和发展状况, 阐述了具有高效、快速响应、能与系统独立进行四象限交换有功和无功功率等特性的 SMES 在电力系统中应用的重要意义, 概述了 SMES 的应用前景和需要进一步解决的若干问题, 并针对我国 SMES 研究的现状提出了一些建设性意见。

关键词: 电力系统; 超导电性; 超导磁储能

中图分类号: TM 917; TM 26; O 511

0 引言

超导磁储能(superconducting magnetic energy storage, 缩写为 SMES)是超导应用研究的热点。超导磁储能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。本文介绍了 SMES 的发展历史, 对 SMES 的基本原理、应用领域及发展趋势进行了阐述。

1 SMES 的发生与发展

自 1911 年 Onnes 发现低温超导现象^[1]后, 人们首先认识到的是它作为储能装置的优点; 但由于在基本理论、材料和技术上的困难, 多年来未能付诸实用。SMES 在电力系统中的应用首先是作为一种平衡电力负荷的装置提出的^[2~4]。1969 年, Ferrier^[2]构想用一个很大的超导磁储能装置来平衡法国电力系统中的日负荷变化。当时, 预计核电将大量用于电力系统, 其特点是要求其功率输出在数月乃至数年内保持恒定。研究高效的储能装置以解决日电力需求变化所带来的困难已经成为人们关注的热点。在 SMES 装置中, 由于超导体电阻为零, 能量储存时的损耗极小, SMES 的效率可达 90% 以上, 比抽水储能、飞轮储能和蓄电池储能的效率高得多。

由于 SMES 与电网的功率交换非常迅速, 加上电力电子技术的发展, SMES 能同时与系统分别独立地进行四象限有功功率、无功功率的交换, 人们提出了将 SMES 用于抑制远距离交流输电系统上发

生的低频振荡现象。

近几年来, 人们又把注意力投向利用小型 SMES 提高电能质量的研究, 比如, 应付短时间的电压突降和突然停电。由于解决这样的问题需要功率巨大而不是储能巨大的储能系统, 因此实现起来较为容易。

由于 SMES 具有上述优越特性, 近 30 年来, 它一直是发达国家研究的热点, 美、日、俄、加、英、德、荷等国家均展开了广泛的研究。以下是部分发达国家关于 SMES 的研究状况。

1.1 美国 SMES 研究情况

1971 年, 在 Wisconsin 大学 Boom 和 Peterson 带领下, 发明了一个由超导电感线圈和三相 AC/DC 格里茨(Graetz)桥路组成的电能储存系统, 并对格里茨桥在能量储存单元与电力系统相互影响中的作用进行了详细分析和研究。他们发现装置的快速响应特性对于抑制电力系统振荡非常有效^[5]。

1972 年, 洛斯阿拉莫斯实验室(LASL)开始就 SMES 的经济可行性展开研究。结果显示, SMES 在经济性、有效性、可靠性、易建设性和环境保护上都是优越的^[6]。1974 年, 第 1 台并网运行的 SMES 在 LASL 进行了测试^[7]。关于 LASL 的研究成果可参见文献^[8]。

1976 年到 1982 年, LASL 和 BPA(Bonneville Power Administration)合作建成了 30 MJ/10 MW 的 SMES, 该系统成功地抑制了从太平洋西北地区到南加利福尼亚州 1 500 km 的双回交流 500 kV 输电线路的低频 0.35 Hz 自发功率振荡^[9]。

80 年代初, 5 GW · h^[10] 和 1 GW · h 的 SMES 也开始了可行性分析和设计^[11]。

80 年代后期, SDI(Strategic Defense Initiative)启动了 SMES-ETM(engineering test model)计划,

开展了方案论证、工程设计和器件的研制,目的是为储能调峰和战略备用电源开辟新路^[12]。

1.2 日本 SMES 研究情况

1986 年,日本成立了超导储能研究会,它的任务是实现超导储能的实际应用,为日本超导储能技术的独立发展做出贡献。该会现有成员单位 50 个,包括日本著名的大学、研究机构、公司和工厂。自 80 年代中期以来,进行了大量的分析、设计和试验研究工作^[13]。

1985 年,九州(Kyushu)大学设计了一台 100 kJ 的 SMES,用于研究直流电网中 SMES 的应用和系统稳定。九州(Kyushu)电力公司于 1991 年将一台 30 kJ 的超导储能系统联接到一台 60 kW 的水力发电机上,进行了改善发电机稳定性的试验,并取得了较好的实验结果^[14];而且,九州电力公司与九州大学合作,开展了 36 MJ 的 SMES 试验,并正在设计建造一台 360 MJ/20 MW 的 SMES,并网后进行示范运行,然后将研制一台 1 260 MJ/500 MW 的多功能 SMES。九州电力公司最近在其所属的 Ariuragawa 水电站进行了超导储能用于系统稳定的一系列现场实验,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。

90 年代,神户制钢所、东芝公司、日立公司、富士电力公司、中部(Chubu)电力公司等也都进行了 SMES 的相关设计和试验^[15,16]。东京电力公司与日立公司进行合作,对 275 kV 系统进行了含 1 MJ 的 SMES 的全面系统动模实验,效果也非常令人满意。中部电力公司与电力研究发展中心合作,开展了含 1 MJ 的 SMES 系统的动模实验,内容包括调平尖峰负荷、平衡负荷波动、负荷频率控制、改善动态和暂态稳定性等,效果令人鼓舞。

1.3 俄罗斯 SMES 研究情况

1988 年建成的超导托卡马克 T-15 超导磁体,储能达 370 MJ~760 MJ。90 年代以来,俄罗斯国家实验室建成了 12 MJ 的 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。用于研究、储能达 900 MJ 的 SMES 也已建造完成^[17]。

2 SMES 的工作原理与系统组成

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。按功能模块划分,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。

以下分别简单介绍其工作原理。

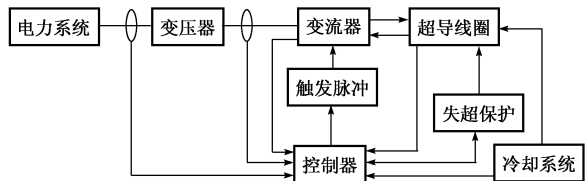


图 1 SMES 结构图

Fig. 1 Components of a SMES

2.1 超导线圈

超导线圈的形状通常是环形和螺管形。小型及数十 MW·h 的中型 SMES 比较适合采用漏磁场小的环形线圈。螺管形线圈漏磁场较大,但其结构简单,适用于大型 SMES 及需要现场绕制的 SMES。

目前,绕制超导磁体线圈的材料主要是 NbTi^[18]和金属化合物 Nb₃Sn。NbTi 的机械加工性能好,而 Nb₃Sn 的临界电流、临界磁场、临界温度都优于 NbTi,只是机械加工较难。这两种导体均为低温超导线材,需在液氮(4 K)温区工作。

虽然目前低温超导线材已基本达到了可以在小型 SMES 上使用的水平,但必须在液氮温区下才能维持超导状态。这使超导的经济优越性受到了限制。

在高温超导线材方面^[19],美国、日本等发达国家已制造出 50 m~1 km 的 Bi 系超导线材,并具有制造 $J_c > 20 \text{ kA/cm}^2$ 、交流损耗 $< 3 \text{ W/(kA} \cdot \text{m)}$ 、线长 $> 1 \text{ km}$ 的 Bi 系超导线材的能力。现在,高温超导线材虽已接近或达到可用于超导电力装置的水平,但与低温超导线材相比,仍有一段差距,尤其是在交流损耗上差距更大。为此,各国均在致力于开发交流高温超导线材,以期使高温超导线材达到实际应用水平^[20,21]。

2.2 失超保护

对于超导磁体,失超时可能出现以下 3 种情况:

- a. 过热(overheating, or meltdown);
- b. 高压放电(high-voltage arcing);
- c. 应力过载(overstressing)。

后两种状况发生时,在一定范围内是可以自动修复的;而对于过热,其后果常常是致命性的(对磁体而言)。因此,更多的磁体保护是针对过热。防止过热,也就是要在失超时将超导磁体中的电流转移至外部消化,防止焦耳热释放在超导线上。根据不同的磁体结构,可有分段电阻保护、并联电阻保护、谐振电路保护和变压器保护等方法。各种方法有各自的优缺点。

实现超导线圈失超保护,必须要有高速、准确的失超检测器,同时还应具备除去交直流变换器等器

件上产生的电磁干扰的技术。

直流断路器的作用是当失超保护动作时把超导线圈和交直流变换器分开,将线圈电流转移到保护电阻上,同时防止保护电阻产生的电压加到变换器上去。由于通电电流很大,因此需考虑采用多触点形式,同时还必须在反向电流回路中叠加的高频电流中形成零点。

此外,和通常的暂态超导磁体不同,保护电阻不能总是并联在 SMES 系统中。因此,必须开发能保证保护电阻高速、准确地投入使用的开关。为防止投入时的过电压,应当尽量减少保护电阻的电感。

2.3 冷却系统^[22]

低温冷却装置由不锈钢制冷器、低温液体的分配系统、一对自动的氢液化器等 3 部分组成。

分配系统的主要组成是:制冷器顶部的电气连接;控制氢流的低温阀箱;制冷器之间、阀箱和液化器之间的低温管;真空装置;压力过高时的安全阀;备用氢罐和冷却箱(热交换器、Joule Thomson 阀和涡轮膨胀器)。这种装置通常每年只能使用 6 000 h。必须提高到每年使用 8 000 h,以满足电力运行的技术要求。

超导线圈的冷却方式有 2 种:一种是将线圈浸泡在液氮之中的浸泡冷却方式,另一种是在导体内部强制通过超临界氢流的强制冷却方式。浸泡冷却下超导稳定性好,但交流损耗大,而且耐压水平低;强制冷却的机械强度、耐压、交流损耗等方面都具有优点,但提高超导热稳定性则是其应解决的问题。

2.4 变流器

SMES 所用的 AC/DC 变流器应能独立控制 SMES 与电力系统的有功功率和无功功率交换,这就需要采用由电力电子器件组成的开关电路。从电路拓扑结构来看,常用的变流器有两种:电压型和电流型变流器。

电压型变流器电路的结构比电流型变流器复杂,线圈的充放电需考虑电压型 AC/DC 变流和从支撑电容到超导电感线圈的斩波 2 个部分协同控制。从目前变流器应用来看,电压型比电流型更为成熟,大容量的 SMES 大多采用电压型变流器与电网相连^[23]。多年来的研究表明,电流型 SMES 结构简单,控制策略设计也易于实现。对于中小型 SMES 而言,这种结构更为合理^[24,25]。

由于基本的 6 脉冲电流型或电压型变流器会产生谐波($6K \pm 1$ 次, K 为整数),因此需要在 SMES 交流侧滤波。目前,谐波抑制的方法主要有脉宽调制(PWM)技术和多重化技术^[26,27]。

2.5 控制系统

SMES 系统最大的优越性在于其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。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 装置能最大地改善电力系统的性能。可见,控制器和控制策略的好坏是 SMES 系统性能好坏的关键。

根据控制器设计过程对系统信息提取和综合过程的不同,SMES 的控制策略可分为以下 2 类:

a. 基于系统内部和外部特征的控制方式^[28~31],例如经典 PID、变参数 PID、局部线性化、反馈线性化、变结构控制和自适应非线性控制;

b. 综合控制方式^[32,33],包括模糊控制、人工神经网络控制、遗传算法和专家控制系统。

3 SMES 的应用与展望^[34,35]

SMES 由于具有快速响应特性,因而不仅能用于调节峰值,而且可以储存应急的备用电力,提高容许输电容量(例如,对于我国资源分布很不均衡的情况,用 SMES 系统可更好地实施西电东送),提高系统的稳定性,改善供电质量。从这个意义上讲,SMES 可以看成是一种能与电网交换有功功率的灵活交流输电系统(FACTS)装置,因而功能更加强大,可以实现电力系统由被动致稳转变为主动致稳。

现在,SMES 已不仅用于平衡负荷,不同容量的 SMES 具有多种实际应用。电力系统中 SMES 规模与主要用途之间的关系如表 1 所示^[36]。对于中小型 SMES,特别是微型 SMES,则可利用其高速调节有功、无功特性来改善功率因数,稳定电网频率,控制电压的瞬时波动,保证重要用户不间断供电等多种功能,从而大大改善供电质量,满足军事、工业、民用电力的需要。

高温超导材料的出现和可用于工频交流的低温超导线材的开发成功,给超导应用带来了契机。在美、日、法、德、英等发达国家,出现了新一轮的超导应用研究高潮。80 年代以来,由 Wisconsin 大学提供的 1 MJ 量级的成套 SMES 已经商品化,可供区域负载用于稳压稳频。1988 年初,在美国建立的开发超导储能商业应用的超导电公司(ASC),已研制成功了用来对超导储能进行经济评估的系统(SSD),并推向了市场。近 10 年来,超导科学与材料技术的进步,使超导技术的应用、尤其是在电力方面的应用具有了更高的可行性^[37]。据美、日等国的调

表 1 不同规模 SMES 的应用情况
Table 1 Application of different SMES on size

项目	规模	安装地点	应用目的和作用
小型	0.1 MW·h 等级	负载端 长距离输电线	改善稳定性 小波动负载调平
		电源端 小容量电厂 光伏发电 风力发电系统	电压波动调节 校正功率因数 间断性电源调平输出
中型	10 MW·h 等级	配电站 中型发电厂	大波动负载调平 电压波动调节 减少无功调节和频率调节 及瞬时备用功率装置 改善电源可靠性
		大型发电厂及 适于 SMES 的一切其他 地点	负载调平后减少峰值功率 电源装置 减少传输容量和电站建设 减少传输损失 改善发电设备的热效率 减少无功调节和频率调节 及瞬时备用功率装置 改善电源可靠性
大型	1 GW·h 等级		

查研究机构预测,到 2010 年,新兴的超导产业市场将超过 250 亿美元,其中在电力系统中为 75 亿美元,占 30%;到 2020 年将达到 700 亿美元;在 2015 年左右,几乎各种超导电力产品都可达到商业化水平。在超导的电力应用中,SMES 技术相对简单,又具有诱人的应用前景^[23],是超导电力应用的主选课题之一^{—[38]}。

当然,目前 SMES 的实用技术上仍有一定的困难。为加速 SMES 的实用化进程,今后的研究方向主要是:

a. 降低成本。目前 SMES、特别是小型 SMES 的成本比其他相应技术要高,开发低成本的 SMES 已是必然需要。

b. 开发高温超导线材(HTS),提高线材的临界电流密度。

c. 研究变流器。电流均分化的并联技术、减少高次谐波以降低变流器损耗和安全性问题都需要进一步研究。

d. 研究控制策略。根据系统容量、SMES 参数、控制目的等多项指标,特别是从电力系统的角度,选择和设计出优良的控制策略,是一个重要课题。

e. 降低损耗和提高稳定性。提高 SMES 储能效率就要减少交流损失;为了减少交流损耗就要增加冷冻机的功率。同时,为了提高超导线圈的稳定性,也需要降低交流损耗。

f. 研究失超保护技术。开发出可靠、灵活的直流断路器和永久电流开关,以提高 SMES 的安全性。

4 结语

SMES 装置以其高效性、快速响应特性和能与系统独立进行四象限交换有功、无功的能力突破了传统电力系统的限制,适应电网不断提高的要求。它将和其他电力装置一起,成为电力系统的重要组成部分,使系统的容量、质量、稳定性和经济性进一步提高。

我国 60 年代起就开始低温超导研究工作。到 80 年代中期,在高能加速器、超导磁流体推进、磁流体发电、磁分离、核聚变、磁共振成像、磁悬浮列车和超导强磁场等方面开展了大量的工作,并在超导材料、超导磁体和低温技术等方面奠定了一定的基础,也培养了一支超导科研队伍。相信在各方面的共同努力下,我国 SMES 在电力系统应用方面的研究一定会取得丰硕的成果。

参考文献

1 Onnes H K. Report on the Researches Made in the Leiden Cryogenic Laboratory Between the Third International Congress of Refrigeration. Commus Phys Lab, Univ Leiden, 1911: 1226

2 Ferrier M. Stockage d'energie dans un Enroulement Supraconducteur. In: Low Temperature and Electric Power. Elmsford (N Y) Pergamon Press, 1970: 425~432

3 Boom R W, Peterson H A. Superconductive Energy Storage for Power Systems. IEEE Trans on Mag, 1972, 8(3): 701~703

4 Hassenzahl W V. Will Superconducting Magnetic Energy Storage be Used on Electric Utility Systems? IEEE Trans on Mag, 1975, 11(1): 482~488

5 Boom R W. Wisconsin Superconductive Energy Storage Project. Univ of Wisconsin Publ, 1974~1981: 1~4

6 Hassenzahl W V, Rogers J D, McDonald T E. Magnetic Energy Storage and Its Application in Electric Power Systems. Technical Paper presented at IEEE Intercon, Mar, 1973

7 Buckles W E, Hassenzahl W V. Superconducting Magnetic Energy Storage. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 16~20

8 Progress Reports on the Los Alamos National Laboratory Superconducting Magnetic Energy Storage Program(1973~1981):

LA-5258-PR	LA-5415-PR	LA-5472-PR
LA-5588-PR	LA-5786-PR	LA-6004-PR
LA-6117-PR	LA-6225-PR	LA-6434-PR
LA-7132-PR	LA-7150-PR	LA-7294-PR
LA-7701-PR	LA-8777-PR	LA-9208-PR

9 Rogers J D, Boenig H J, Schermer R I, et al. Operation of the 30 MJ SMES System in the Bonneville Power Administration Electrical Grid. IEEE Trans on Mag,

- 1985, 21(2): 752~755
- 10 Loyd R J, Schoenung S M, Nakamura T, et al. Design Advances in Superconducting Magnetic Energy Storage for Electric Utility Load Leveling. IEEE Trans on Mag, 1987, 23(2): 323~1330
- 11 Rogers J D, Hassenzahl W V, Schermer R I, Eds. 1 GW · h Diurnal Load-leveling Superconducting Magnetic Energy Storage System Reference Design. Los Alamos Nat Lab Rep, LA 7885 MS, 1980, I~VIII
- 12 Loyd R J, Walsh T E, Kimmy E R. Key Design Selections for the 20.4 MW · h SMES/ETM. IEEE Trans on Mag, 1991, 27(2): 1712~1715
- 13 余运佳(Yu Yunjia). 超导储能电力应用的新进展(New Progress of SMES for Electric Utility Use). 低温与超导(Cryogenics and Superconductivity), 1995, 23(2): 34~38
- 14 Irie F, Takeo M, Sato S, et al. A Field Experiment on Power Line Stabilization by a SMES System. IEEE Trans on Mag, 1992, 28(1): 426~429
- 15 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. Electrical Engineering in Japan, 1995, 114-B(2): 135~144
- 16 Imayoshi T, et al. Development of a 1 kW · h-Class Module-Type SMES——Design Study. IEEE Trans on Appl SC, 1997, 7(2): 844
- 17 Akopyan D G, Batakov Y P, Dedjurin A M, et al. Conceptual Design of a 100 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage. IEEE Trans on Mag, 1992, 28(1): 398~401
- 18 Koizumi N, Okumo K, Takahashi Y, et al. Stabilized Operation of 30 kA NbTi Demo Poloidal Coil (DPC-U) with Uniform Current Distribution in Conductors. Adv Cryo Eng, 1994, 34(12): 1015~1019
- 19 Ries G. Magnet Technology and Conductor Design with High Temperature Superconductors. Adv Cryo Eng, 1993, 33(6): 609~614
- 20 Hassan I D, Bucci R M, Swe K T. 400 MW SMES Power Conditioning System Development and Simulation. IEEE Trans on Power Electronics, 1993, 8(3): 237~249
- 21 唐跃进, 李敬东, 叶妙元, 等(Tang Yuejin, Li Jingdong, Ye Miaoyuan, et al). 未来电力系统中的超导技术(Applied Superconducting Technique in the Future Electric Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(2): 70~75
- 22 Bautista A, Esteban P, Garcia-Tabares L, et al. Design, Manufacturing and Cold Test of a Superconducting Coil and Its Cryostat for SMES Application. IEEE Trans on Appl SC, 1997, 7(2): 853~856
- 23 周晓兰, 韩居华, 辛 玲(Zhou Xiaolan, Han Juhua, Xin Ling). 超导储能及其在电力系统中的应用研究综述(Electric Power Application and Study Overview of SMES). 电力情报(Information on Electric Power), 1999, 1: 1~3
- 24 陈利军, 马维新, 冯之鑫(Chen Lijun, Ma Weixin, Feng Zhixin). 超导储能装置改善电力系统动态性能的研究(Study of SMES to Improve Dynamics of Power System). 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University, Sci & Tech), 1999, 39(3): 14~18
- 25 Iglesias I J, Bautista A, Visiers M. Experimental and Simulated Results of a SMES Fed by a Current Source Inverter. IEEE Trans on Appl SC, 1997, 7(2): 861~864
- 26 Zhang Z C, Ooi B T. Multimodular Current-Source SPWM Converters Form a Superconducting Magnetic Energy Storage System. IEEE Trans on Power Electronics, 1993, 8(3): 250~256
- 27 Jiang Q, Conlon M E. The Power Regulation of a PWM Type Superconducting Magnetic Storage Unit. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(1): 168
- 28 Simo J B, Kamwa I. Exploratory Assessment of the Dynamic Behavior of Multimachine System Stabilized by a SMES Unit. IEEE Trans on PWRs, 1995, 10(3): 1566~1571
- 29 Tan Y L, Wang Y. Augmentation of Transient Stability Using a Superconducting Coil and Adaptive Nonlinear Control. IEEE Trans on PWRs, 1998, 13(2): 361~366
- 30 Ise T, Murakami Y, Tsuji K, et al. Simultaneous Active and Reactive Power Control of SMES Using GTO Converter. IEEE Trans on Power Delivery, 1986, PWRD-1(1): 143~150
- 31 Rabbani M G, Devotta J B X, Elangovan S. Application of Simultaneous Active and Reactive Power Modulation of SMES Unit Under Unequal α -Mode for Power System Stabilization. IEEE Trans on PWRs, 1999, 14(2): 547~552
- 32 Funabiki S, Fujii T. Fuzzy Control of SMES for Levelling load Power Fluctuation Based on Lukasiewicz Logic. IEE Proceedings-C, 1993, 140(2): 91~95
- 33 Rabbani M G, Devotta J B X, Elangovan S. Fuzzy Controlled SMES Unit for the Improvement of Synchronous Generator Damping. IPEC 1997: 178~183
- 34 Luongo C A. Superconducting Storage Systems: An Overview. IEEE Trans on Mag, 1996, 32(4): 2214~2222
- 35 Hassenzahl W V. Superconducting Magnetic Energy Storage. Proc of the IEEE, 1983, 71(9): 1089~1098
- 36 余运佳, 惠 东(Yu Yunjia, Hui Dong). 大中型超导储能装置的研制与应用(Research and Application of Large and Medium Sized Superconducting Energy Storage Equipment). 中国电力(Electric Power), 1997, 30(3): 57~59

- 37 傅其伦(Fu Qilun). 超导电力系统的可行性研究 (Feasibility Study of Superconducting Power Systems). 低温与超导 (Cryogenics and Superconducting), 1996, 24(1): 44
- 38 严陆光(Yan Luguang). 八十年代超导应用的进展(The Advances of Superconducting Application in the Eighties). 电工电能新技术(The New Technology in Electrical Engineering and Energy), 1992(3):1~10

韩 舫,男,硕士研究生,从事电力系统控制与仿真、超导磁储能装置设计与控制。

李 艳,女,博士研究生,从事超导磁储能装置仿真与实验。

余 江,女,博士研究生,从事超导电力系统动态特性分析研究。

APPLICATION DEVELOPMENT OF SMES IN ELECTRIC POWER SYSTEM

Part One General Review

Han Chong, Li Yan, Yu Jiang, Tang Yuejin, Cheng Shijie, Pan Yuan
(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The basic principle, main components and development of superconducting magnetic energy storage (SMES) are described. The significance of applying SMES to power system is explained, which are high efficiency, fast response and good capability of exchanging active and reactive power independently in four quadrants with AC power systems connected. After summarizing the status and issues of SMES at present, suggestions on the application of SMES to power system in china are made.

Keywords: power systems; superconductivity; superconducting magnetic energy storage (SMES)