

超导储能系统的研究现状及应用前景

郭文勇, 张京业, 张志丰, 邱清泉, 张国民, 林良真, 肖立业

中国科学院电工研究所, 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190

摘要 超导磁储能系统将电磁能存储在超导储能线圈中, 具有反应速度快、转换效率高、快速进行功率补偿等优点, 在提高电能品质、改善供电可靠性及提高大电网的动态稳定性方面具有重要价值。概述了超导储能系统的工作原理、研究现状及优缺点, 并展望了其未来应用可能性及发展方向。

关键词 超导磁储能系统; 功率补偿; 大电网

由于发电资源和负荷资源地理分布不匹配、资源互补和综合高效利用的要求等原因, 现代电网逐渐形成了跨区互联大电网。在这个大电网中, 除了配置少量抽水储能外, 几乎没有其他储能系统, 特别是高功率、快速响应的灵活储能系统。这一方面导致电网峰谷调节困难、使电网的灵活性受到限制, 另一方面引起电网的安全可靠性问题: 当电网出现瞬态功率不平衡时, 必须由电网自身的惯性和控制系统来实现平衡, 一旦出现大的瞬态扰动, 将导致电网稳定性事故的发生; 瞬态扰动还会导致电压和频率的波动, 从而引起电能质量问题。在电网中配置具有不同功率特性和响应特性的储能系统是解决上述问题的根本出路, 特别是在可再生能源大量接入的情况下更是如此^[1-2]。目前, 用于电网的储能方式主要有 6 种: 抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能、超导磁储能 (superconducting magnetic energy storage system, SMES)、超级电容器储能和电池储能。相比于其他储能方式, SMES 具有响应速度快、储能效率高及有功和无功率输出可灵活控制等优点^[3-4], 有望在未来电网建设中发挥作用。

本文介绍 SMES 的基本原理、结构和研发现状, 探讨 SMES 的 2 个基本核心部件——超导储能线圈和功率调节系统, 分析基于 SMES 的混合储能系统。

1 SMES 基本原理

SMES 是利用超导线圈将电磁能直接储存起来, 需要时再将电磁能回馈电网或其他负载, 并对电网的电压凹陷、谐波等进行灵活治理, 或提供瞬态大功率有功支撑的一种电力设施。其工作原理是: 正常运行时, 电网电流通过整流向超导电感充电, 然后保持恒流运行 (由于采用超导线圈储能, 所储存的能量几乎可以无损耗地永久储存下去, 直到需要释放时为止)。当电网发生瞬态电压跌落或骤升、瞬态有功不平

衡时, 可从超导电感提取能量, 经逆变器转换为交流, 并向电网输出可灵活调节的有功或无功, 从而保障电网的瞬态电压稳定和有功平衡。

SMES 主要包括 4 部分^[5], 即超导储能线圈、功率变换系统、低温制冷系统和快速测量控制系统。其中超导储能线圈和功率变换系统为 SMES 的核心关键部件。超导储能线圈需要在低温杜瓦中维持低温状态是 SMES 的能量存储单元, 由于在恒定温度下运行, 其寿命可达 30 年以上; 功率变换系统是电网与 SMES 进行能量交换的装置, 它主要将电网的能量缓存到超导储能线圈中, 并在需要时加以释放, 同时还可发出电网所需的无功功率, 实现与电网的四象限功率交换, 进而达到提高电网的稳定性或改善电能质量的作用; 低温制冷系统包括制冷机及相关配套设施, 为 SMES 的正常运行提供所需冷量, 可以实现“零挥发模式”运行; 快速测量控制系统主要用来检测电网的主要运行参数, 对电网当前的电能质量进行分析, 进而对 SMES 提出运行控制目标, 同时还具有自检和保护功能, 保障 SMES 的安全运行 (图 1)。

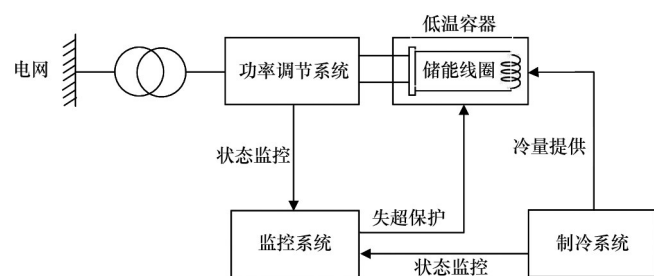


图 1 SMES 的基本结构

Fig. 1 Major configuration of the SMES

收稿日期: 2016-08-08; 修回日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50907070, 51361135705); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA0850803)

作者简介: 郭文勇, 副研究员, 研究方向为电力储能、风力发电、故障限流器, 电子信箱: wyguo@mail.iee.ac.cn

引用格式: 郭文勇, 张京业, 张志丰, 等. 超导储能系统的研究现状及应用前景[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 68-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.23.007

2 SMES 储能系统研发现状

自从超导材料实用化以来,世界各国政府高度重视超导电力应用研究;SMES作为超导电力应用研究的重要内容,也受到了广泛的关注。随着技术的发展,SMES已不仅仅是个储能装置,而且可以主动对电力系统的功率进行四象限的补

偿和调节,从而提高电力系统的稳定性和功率传输能力,改善电能质量,因而也可视为电网中的能量管理系统。表1以美国、法国、日本、韩国和中国为代表,总结了国际上主要SMES项目的进展。

表1 国际代表性SMES项目

Table 1 Representative SMES projects at home and abroad

国家	研究开发单位	主要 SMES 研发装置	研究状况
美国	威斯康辛大学(20世纪70年代初)	超导电感线圈和三相AC/DC格里茨桥路组成SMES	试验完成
	洛斯阿拉莫斯国家实验室和邦纳维尔电力局(20世纪70年代中期)	30 MJ/10 MW 的 SMES	试验运行
	R.Bechtel 团队(1993)	1 MW·h/500 MW 的 SMES	示范样机
	超导公司和 IGC 公司(2001)	1~5 MJ 微型和小型 SMES	市场销售
	国家基础设施部和以色列电子公司(2002—2004)	8台3 MJ/8 MV·A 的 SMES	并网运行
法国	佛罗里达大学先进电力系统中心(CAPS)(2003)	100 MJ SMES 演示系统	试验完成
	CNRS-CRTBT-LEG	800 kJ 的 SMES	试验完成
	九州大学(1985)	100 kJ 的 SMES	试验阶段
日本	九州电力公司(1991)	30 kJ 的 SMES 并联到 60 kW 的水力发电机	并网运行
	东京电力公司与日立公司(1992)	1 MJ/275 kV 的 SMES	试验完成
	中部电力公司与东芝公司(2005)	5 MV·A 的 SMES	试验完成
	中部电力公司与三菱电机等(2009)	10 MV·A/20 MJ 的 SMES	试验完成
韩国	首尔国际大学(1985)	20 MJ 小容量 SMES	试验阶段
	韩国檀国大学	0.5 MJ 的 SMES	试验阶段
	韩国电工研究所(KERI)	0.7 MJ 的 SMES	试验阶段
	KERI(2006)	3 MJ/750 kV·A 的 SMES 系统	试验完成
中国	KERI(2008)	600 kJ HTS-SMES	完成试验组装
	中国科学院电工研究所(1999)	25 kJ(300 A/220 V)微型 SMES	完成样机
	中国科学院电工研究所(2004)	100 kJ/25 kW 的 SMES	试验完成
	清华大学(2004)	0.3 MJ/150 kV·A 可控超导储能快速 UPS	完成试验
	中国科学院电工研究所(2006)	超导限流-储能系统样机	完成样机
	中国电工研究所(2011)	1 MJ/0.5 MV·A(1.5 kA/10.5 kV) 的 SMES	并网运行
	清华大学与英国巴斯大学(2013)	60 kJ SMES-BESS 混合系统	完成设计
华中科技大学与中国科学院等离子研究所等(2015)	600 V/150 kJ/100 kW 的 SMES	试验完成	

2.1 国际 SMES 研究现状

美国是最早研究 SMES 的国家之一,目前小型 SMES 已达到商业化水平。20 世纪 70 年代初,威斯康辛(Wisconsin)大学应用超导中心利用 1 个由超导电感线圈和三相 AC/DC 格里茨(Graetz)桥路组成的电能存储系统,对格里茨桥在能量存储单元与电力系统相互影响中的作用进行了详细的分析和研究,开创了超导储能在电力系统应用的先河^[6]。

1983 年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)和邦纳维尔电力局(Bonneville Power Administration, BPA)合作研制了 1 台 30 MJ/10 MW 的 SMES(图 2),并将其安装于华盛顿州塔科马变电站进行系统试验,成

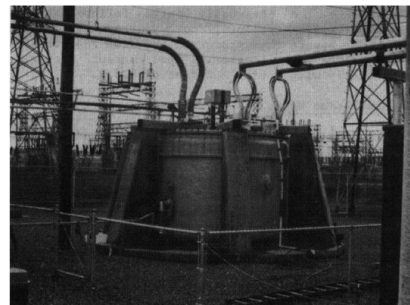


图2 美国 30 MJ SMES 线圈的真空容器和支撑骨架
Fig. 2 Vacuum vessel and support structure of American 30 MJ coil

功用于抑制美国西部1条500 kV交流输电线路上的0.35 Hz的低频功率振荡,有效地改善了电网的稳定性^[7]。其磁体设计参照核反应堆中采用的脉冲超导磁体技术。为了降低磁体损耗,绕制超导磁体的导线由两级子导线组成。超导磁体由20个双饼绕组组成单螺管结构。磁体绕组的尺寸为:内径2.73 m,外径3.38 m,高度1.21 m。磁体设计储能30 MJ,额定工作电流5 kA,中心最大磁场3.92 T,自感2.4 H。超导磁体在液氦中浸泡冷却,运行温度为4.5 K,为了降低常规不锈钢杜瓦上感应的涡流损耗,杜瓦采用绝缘材料制作。功率调节系统是由2个六脉冲变流器串联组成的12脉冲晶闸管变流器,作为超导磁体与交流系统连接的界面,控制有功功率在2个方向流动。为了抑制现有系统的功率振荡,变流器要在0.35 Hz的条件下处理10 MW的功率流动,因而,变流器的电流在4~4.8 kA间变动,变流器最大输出电压为±2.2 kV。1983年2月,30 MJ/10 MW SMES系统安装于塔科马电站,通过变压器与13.8 kV的BPA母线相连,进行抑制太平洋交流互联网低频振荡的实验,实验结果显示SMES系统的响应特性很好,抑制交流系统功率振荡时与系统进行功率交换达到±4 MW。该SMES系统的成功试验是超导技术在美国第一次大规模的电力应用试验。

2002—2004年,AMSC在田纳西州500 kV输电线路安装了8台3 MJ/8 MV·A的SMES进行输电试验,大幅度改善了电网电压的稳定性。其最大有功功率输出可以持续0.5 s,最大无功功率输出可以持续1 s。在SMES有力的有功和无功支持作用下,该输电网电压崩溃的问题得到有效解决。与此同时,佛罗里达大学完成了100 MJ SMES系统设计与样机组装测试^[8],图3为该系统的储能线圈图。

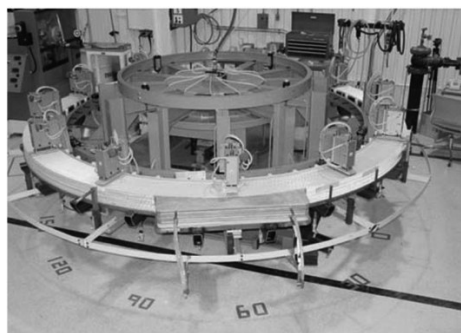


图3 美国100 MJ SMES线圈模块

Fig. 3 American 100 MJ SMES insulated coil module

日本和韩国在SMES研究方面也处于世界前列。早在1988年,日本就研制了一台5 MJ的SMES^[9]。为解决电网电压暂降的问题,日本对5 MV·A SMES进行了现场测试^[10],测试结果表明该SMES实现了对电网电压暂降的补偿,从而实现了关键负载的保护。图4为该系统的现场安装图。20世纪90年代,东京电力公司与日立公司合作,对275 kV系统进行了含1 MJ SMES的全面系统动模试验,达到了提高电网动态稳定性的效果^[11]。

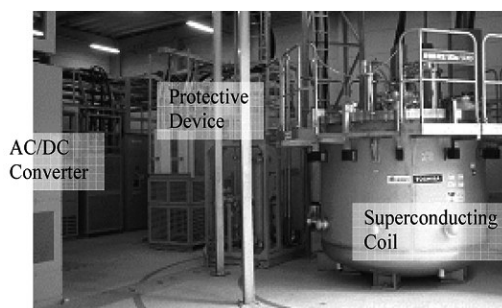


图4 日本5 MV·A SMES系统

Fig. 4 Scene of Japanese 5 MV·A SMES

2007年,日本研制成功10 MV·A/20 MJ SMES^[12](图5),并将该装置连接在一个水电站和轧钢厂之间,现场测试结果表明,该SMES有效地抑制了轧钢厂的功率波动,提高了电网的稳定性和电能质量。更高功率、更高性能SMES系统的研制,已被日本列为国家项目投入开展研究^[13]。



图5 日本10 MV·A/20 MJ SMES

Fig. 5 Japanese 10 MV·A/20 MJ SMES

韩国的SMES项目是1985年在首尔大学(Seoul National University, SNU)提出来的,出于学术目的规划开发20 kJ的SMES。近年来,韩国在SMES系统研究方面投入巨款,韩国电气研究院(Korea Electrotechnology Research Institute, KERI)在2006年研制并完成了3 MJ/750 kV·A SMES的实验测试^[14],并已在2008年成功设计组装测试了600 kJ高温超导SMES(图6)。韩国的终极目标是在未来5~10年内,实现MJ级高温超导SMES系统的商业化。

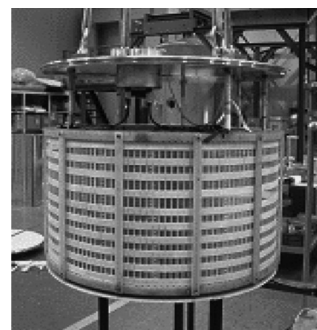


图6 韩国3 MJ/750 kV·A SMES储能线圈
Fig. 6 Korean assembled solenoid magnet for 3 MJ/750 kV·A SMES

俄罗斯、德国、法国、芬兰等国家也开展了 SMES 装置的设计与应用研究工作,其中法国 2008 年设计研制的 800 kJ 高温 SMES(HTS-SMES)较具代表性(图 7)^[15]。

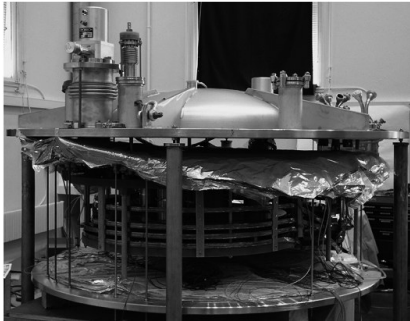


图 7 法国 600 kJ HTS-SMES
Fig. 7 600 kJ HTS-SMES of France

2.2 中国 SMES 研究现状

相比于其他国家,中国在 SMES 方面的研究虽然起步晚,但已经取得一些重要进展。1999 年中国科学院电工研究所成功研制出中国第一台 25 kJ 微型超导储能样机,在 2004 年又研制出了一台 100 kJ/25 kW 超导限流-储能装置(SFCL-MES)并进行了实验研究(图 8),图 8 中从左至右依次为储能线圈、电流调节器、整流器、逆变器^[16]。中国完全自主研制的世界上首座超导变电站 2011 年在甘肃省白银市建成^[17]。运行电压等级为 10.5 kV,变电站内集成了 1 MJ/0.5 MV·A 的高温超导磁储能系统^[18](图 9)。



图 8 中国科学院电工研究所研制的 SFCL-MES
Fig. 8 Scene of SFCL-MES of Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences



图 9 超导变电站中的 1 MJ/0.5 MV·A SMES
Fig. 9 1 MJ/0.5 MV·A SMES installed at the superconducting power substation

除中国科学院电工研究所外,清华大学、华中科技大学等也在开展超导装置的研究。2003 年 9 月,清华大学与保定天威集团公司合作研制完成 0.3 MJ 超导储能线圈。以此为基础,2004 年 5 月完成 0.3 MJ/150 kV·A 可控超导储能电压暂降补偿系统^[19],图 10 为该系统储能线圈和变流器柜现场图。最近,清华大学与英国巴斯大学合作,研制了 60 kJ 超导-蓄电池混合储能系统。

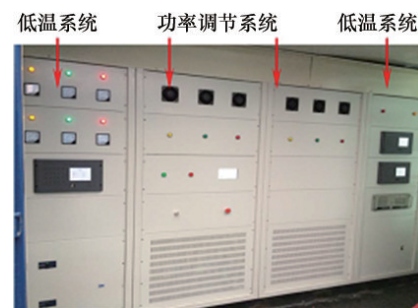


图 10 清华大学 0.3 MJ/150 KV·A SMES
Fig. 10 0.3 MJ/150 kV·A SMES by Tsinghua University

2015 年,华中科技大学联合中国科学院等离子研究所、国家电网湖北电力公司研制了一台 600 V/150 kJ/100 kW 的可移动 HTS SMES 系统^[20](图 11),并将其安装在一个小水电站进行测试,测试结果表明该 SMES 有效地阻尼了水力发电机的功率振荡,并稳定了负载电压。



(a) 储能线圈单元



(b) 控制单元

图 11 华中科技大学 600 V/150 kJ/100 kW 可移动 HTS SMES 子系统
Fig. 11 Subsystem of the 600 V/150 kJ/100 kW movable HTS SMES

3 超导储能线圈研发现状

超导储能线圈是 SMES 设备的核心部件,是由在一定条件下具有超导特性的导体绕制而成,可以在一定条件下无阻、无损地承载稳态直流大电流,是系统中的电磁能量存储单元。SMES 就是基于超导体的无阻高密度载流特性,利用超导电感存储能量,在响应时间以及瞬间大功率释放等方面具有优势。

3.1 低温超导储能线圈

20 世纪 60 年代,随着 NbTi 线的问世和大规模产业化, Girard B 等提出了超导储能概念,采用不同超导材料、不同构型、容量和用途的超导储能线圈相继问世^[21];最初是采用 NbTi、Nb₃Sn 等低温超导材料研制小型单螺管结构的超导线圈,结构简单、储能密度高、相同储能超导导体用量最少(美国第一套在电网中应用的储能系统 30 MJ/10 MW 采用的单螺管 NbTi 线圈,在 1983 年初次完成励磁),但由于漏磁场高、金属低温容器内感应出涡流损耗增加制冷负荷等原因未能大规模发展。为降低漏磁场及其影响,多螺管组合储能线圈系统被研发出来,它的储能密度比单螺管降低,且漏磁场并没有很好解决。随着储能线圈储能量的不断增加,螺绕环构型的储能线圈有了大规模的发展。1985 年开始,美国和日本分别进行 5000 MW·h/1000 MW 的储能系统的设计,随后日本进行了 20 MW·h/400 MW 模型样机的研制。该种构型的储能线圈虽然储能密度和导体利用率都比单螺管储能线圈低很多,但可以很好地解决漏磁场及其引发的涡流损耗问题。

3.2 高温超导储能线圈

随着高温超导体的发现及实用化高温超导带材的发展,1996 年美国超导公司研发出世界第一台高温超导储能线圈,储能 5 kJ,工作温度提高到 25 K^[22],从此揭开了高温超导储能线圈研发的序幕。由于受高温超导材料的价格、性能的影响,高温超导储能线圈技术的发展缓慢,直到 2004 年才出现 MJ 量级储能线圈样机^[23],但只见到日本研发团队研制过程的报道,未见后续进展情况的报道;2008 年,中国科学院电工研究所研制成功的 1 MJ/0.5 MW 高温超导储能线圈,是目前储能能量最大的高温超导储能线圈^[24]。

3.3 超导储能线圈的失超保护

超导储能线圈因为瞬间过流、热扰动等引发失超,伴随瞬间电阻增大、过热、瞬间高压等状况,因此超导储能线圈需要失超保护系统来确保超导储能线圈的安全。通常用监测超导储能线圈的电阻、电压等电器参数来监测超导储能线圈的失超信号,但由于超导储能线圈的电感较大,储能线圈的工作电流处于波动状态,这给失超信号的检测带来较大困难;也有的利用监测制冷剂的挥发量或储能线圈最容易失超部位的温度变化来监测超导储能线圈的失超信号,但由于热反应有较长时间的滞后,所以工程上同时采用这 2 种方法^[21]。

4 SMES 功率调节系统研发现状

从拓扑结构上看,用于 SMES 的功率调节系统(power conditioning system, PCS)可以分为电压型和电流型。两种拓扑都可以满足对变流器的要求。

4.1 电压型储能 PCS

电压型 PCS 包括 1 个四象限电压型变流器(voltage source converter, VSC)和 1 个二象限斩波器,两者间以直流电容联系,典型电路如图 12 所示。

当斩波器开关器件的导通占空比大于 50% 时,直流电容对超导线圈充电,当开关器件导通占空比小于 50% 时,超导线圈对直流电容充电,通过调节开关器件的占空比,就可以对超导磁体进行可控充放电。在 VSC 部分,通过调节电容电压和交流电压相角,可以实现 PCS 与交流电网间的有功和无功流动^[25-26]。

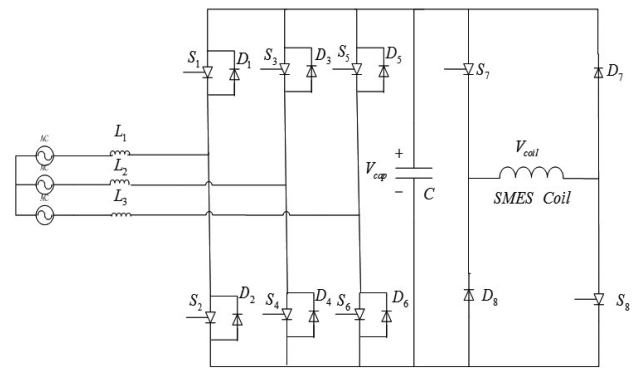


图 12 电压型 SMES PCS

Fig. 12 Voltage source SMES PCS

SMES 变流器采用电压型拓扑结构时,面对大功率、大容量及低谐波的要求时,一个有效的途径就是多重化^[27]。Guo 等^[28]进一步提出了模块化电压型超导储能系统的拓扑结构,由多个逆变和斩波模块构成,通过载波移相的方式,提高了等效开关频率,降低了输出谐波,其模块化的拓扑结构也有利于生产和维护。二极管箝位多电平超导储能 PCS 的一个主要问题是直流母线的均压问题。为了解决这个问题,郭文勇等^[29]提出了一种多电平电流调节器的拓扑结构,将其应用于二极管箝位多电平超导储能 PCS 时,一方面实现了斩波器的功能,另一方面有效地实现了直流母线电压的自动平衡。级联型超导储能系统实现的主要难题是解决逆变器单元电压的相互隔离,为了实现这一目标,必须采用含电压隔离功能的斩波器,李顺等^[30]提出了一种电流调节器拓扑结构,同时实现了斩波器和电压隔离的功能,郭文勇等^[31]进一步对该拓扑结构进行了数学建模和控制系统设计。电压型超导储能 PCS 控制的主要难点是逆变器和斩波器的协调控制问题,为了解决这个问题,分别提出了两电平电压型超导储能 PCS 的逆变器和斩波器的统一非线性控制策略和统一直接功率控

制策略^[32-33],有效地解决了两者之间协调控制问题。而利用级联型超导储能PCS的协调控制和能量优化控制的方法,改善了其控制性能^[34-35]。

4.2 电流型储能PCS

超导线圈实质上是一个电流源。一个基本的全控电流型PCS(图13),它将VSC型PCS的两极电路变为一极,直接将网侧交流电流整流对超导线圈进行充电,或是直接将超导线圈中的直流电流逆变注入交流电网,工作于四象限,采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制以降低谐波及实现功率控制。交流侧的滤波电路是电路正常工作必需的,应合理设计以降低网侧谐波并避免谐振。

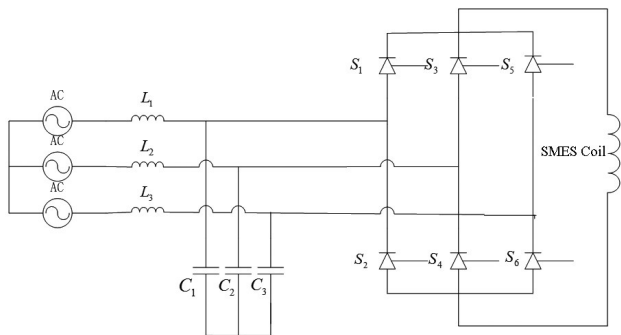


图13 电流型SMES PCS

Fig. 13 Current source SMES PCS

早期的电流型GTO(gate turn off thyristor)变流器工作在6脉方波方式,每个工频周期6个开关各导通 120° ,相邻导通的开关重叠 60° ^[36]。交流侧线路电感和变压器漏抗储存的能量在GTO关断时将产生极强的过电压,早期使用一种无损吸收电路的拓扑结构来改善上述缺点^[37]。PWM技术的引入,使上述电流型变流器得以简化和实用化。交流侧数值较小的滤波电容即可吸收过电压,保证安全换流。

在面对大容量、大功率储能等要求下,电流型变流器在交流侧不需要相移时可以直接并联,无需变压器即可实现多重化,这是其中一个显著特征。电流型变流器已经应用在SMES中,有了一些技术积累,其中Sakai等^[38]提出来GTO联接拓扑实现无损缓冲,利用空间矢量调制的方法来降低网侧谐波及直流侧纹波。Zhang等^[39]提出了一种相移正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)控制48个模块化电流型PCS的方法,可以得到优良的交流侧电流波形和纹波极低的直流侧电压,并在较低开关频率下实现大功率变换且抑制交流侧电流谐波的特性。对于未来,电流型变流器矩阵不失为一种实现大容量低谐波超导储能变流器的新途径^[40]。

4.3 SMES功率调节系统性能

40多年来,世界多个科研机构在超导储能系统的硬件构成及功能实现方面进行了大量研究工作。SMES变流器的2大主要拓扑结构——电流型变流器和电压型变流器——在结构和功能方面都有各自的特点和不足。表2对2种拓扑结构在SMES中的应用特点进行了总结^[41-42]。

表2 SMES系统中电流型PCS与电压型PCS性能比较
Table 2 Performance comparison of current based PCS and voltage based PCS in SMES system

分类	SMES拓扑	
	电压型PCS	电流型PCS
有功和无功功率控制能力 ^[43]	在超导线圈和功率系统之间能够实现有功和无功功率的单独控制,另外,即使在很低甚至没有线圈电流情况下,也能够提供连续的额定无功功率	在超导线圈和功率系统之间能够实现有功和无功功率的单独控制。其无功控制能力受超导电流制约,在电流小的时候无法提供额定的无功功率
控制结构 ^[44]	不仅包括整流结构还包括一个DC-DC斩波电路结构,使控制变得相对复杂	只有一个AC-DC整流模块,控制相对容易
谐波畸变率	较低	较低
多重化	交流侧可直接串联,无需变压器	交流侧直接并联,无需变压器
开关器件耐压与过流问题	直流侧经过电容与斩波器联接,不易产生高电压,开关耐压要求较低,存在开关器件过流问题	直接控制强换流,易产生高电压,开关耐压的要求高 ^[45] ,存在开关器件过流问题

5 基于SMES的混合储能系统

现有的储能介质主要分为能量型和功率型2类^[46]:能量型储能介质主要是以锂电池、钠硫电池、液流电池和铅酸电池等蓄电池为代表,具有能量密度较大、功率密度较小的特点,但充放电次数及放电深度受使用寿命限制;功率储能介质主要是以超级电容、SMES和飞轮储能等为代表,具有能量密度较小、功率密度较大、高倍率充放电不会损害其性能的特点。2类储能技术各有优劣,混合储能装置是将2类储能装置组合使用,取长补短^[47-50]。

目前研究较多的SMES混合储能主要是超导-蓄电池混合储能。超导-蓄电池混合储能是将SMES与电池储能系统(battery energy storage system, BESS)相结合的一种混合储能装置。它采用共直流母线的结构,风机通过变流器和变压器连接到电网,SMES和BESS通过各自的DC/DC斩波器连接到直流母线上^[51-52](图14)。

SMES-BESS具有超导储能响应快、效率高(可达95%)、无噪声污染、可靠性高的特点,同时又具有蓄电池储能抑制电压闪变、价格便宜、可靠性好、技术非常成熟、大容量容易实现等优点,可以稳定电网频率,控制电网电压的瞬时波动,提高供电质量,同时能够减少电池充放电次数和放电深度,延长电池的使用寿命。

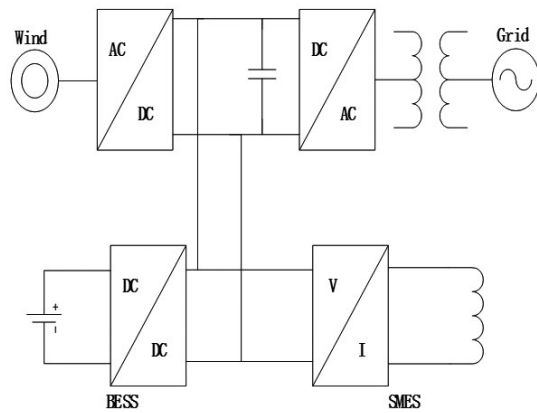


图 14 超导-蓄电池混合储能系统结构
Fig. 14 Superconducting-battery hybrid energy storage system structure

SMES-BESS 同时具有 SMES 与 BESS 的优点,相比于单一的储能的方式,在应用方面更具优势。张晓红等^[53]列出了 SMES-BESS 在微电网储能中应用的优势。快速响应和大容量储能的特点非常适合于微电网孤岛和并网的运行状态,可以稳定微电网频率,控制微电网电压瞬时波动,保证给用户不间断供电等功能,进而提高供电质量。

风力发电存在不连续、不稳定的特点,直接并网会造成电压闪变、功率频率波动等不良影响。同时,风电场必须具备低电压穿越 (low voltage ride through, LVRT) 能力,以消除潜在的安全隐患。研究表明,SMES-BESS 在稳定电压波动^[54]、平抑风电功率波动及提高低电压穿越能力方面具有重要作用。图 15 为 SMES-BESS 变流器的拓扑结构^[55-56]。

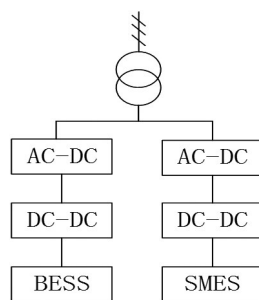


图 15 SMES-BESS 变流器拓扑结构
Fig. 15 Topology of converter for SMES-BESS

Li 等^[57]提出了 SMES-BESS 用于电动公共汽车储能的可能性,并提出一种新的控制算法。通过仿真分析,得出 SMES-BESS 混合储能系统具有更高的使用效率。SMES 作为能量缓冲区,能够减少电池的充放电频率,限制电池的峰值电流,从而延长电池的使用寿命。

6 超导储能系统应用实例

以本课题组研制的 $0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}/1 \text{ MJ}$ 的 SMES 为例,介绍 SMES 在电网的应用方法。 $0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}/1 \text{ MJ}$ SMES 安装在甘肃省白银市高新技术开发区内的超导变电站内,变电站的下游为 3 家高新技术企业。这 3 家企业拥有大量的非线性用电设备,这些设备会产生谐波和闪变,影响电网的电能质量。为了提高对 3 家企业的供电质量,该 SMES 采用与电网并联连接的方式,对下游负载的谐波、无功和功率波动进行补偿,同时实现了有源滤波、无功补偿和有功平滑的功能。

为了提高 SMES 有源滤波的效果,需要提高系统的开关频率,而过高的开关频率会导致变流器过热和不稳定的问题。为了解决该问题,SMES 功率调节系统采用模块化的设计方案,共由 12 个逆变器模块 (inverter module) 和 1 个斩波器模块构成,其拓扑结构及与电网的连接方式如图 16 所示^[28],功率模块的实物如图 17 所示。逆变器模块载波频率 5 kHz ,通过载波移相和单极性调制方式,其等效开关频率进一步达到 40 kHz ;采样率也为 40 kHz 。高等效开关频率和采样率有

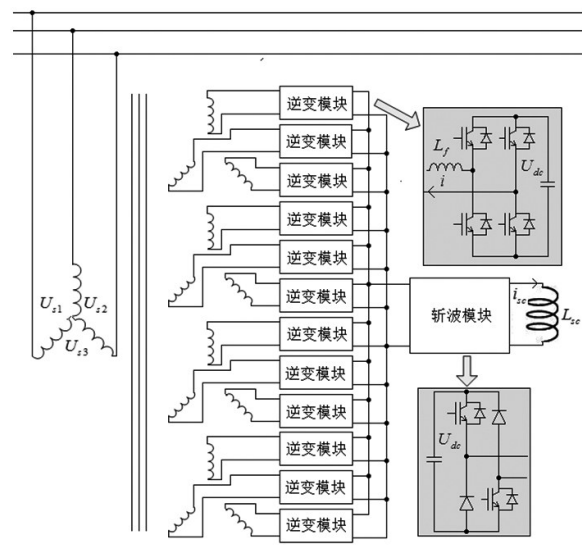


图 16 $0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}/1 \text{ MJ}$ SMES 拓扑结构
Fig. 16 System of electric buses on SMES-BESS

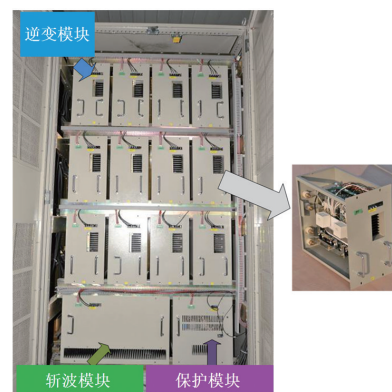


图 17 $0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}/1 \text{ MJ}$ SMES 功率模块
Fig. 17 Power module of the $0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}/1 \text{ MJ}$ SMES

效地提高了系统的控制带宽,从而保证了有源滤波效果。为了进一步提高有源滤波的效果,在控制上采用了比例积分和重复控制相结合的方式。

其储能线圈由44个铋系带材绕制的双饼线圈构成(图18)^[18]。储能线圈的中部采用双带双饼串联连接的方式。由于储能线圈端部垂直磁场较强,对临界电流的影响较大,因此在端部采用单带双饼与双带双饼并联连接的方式,保证了其端部临界电流与中部相匹配。

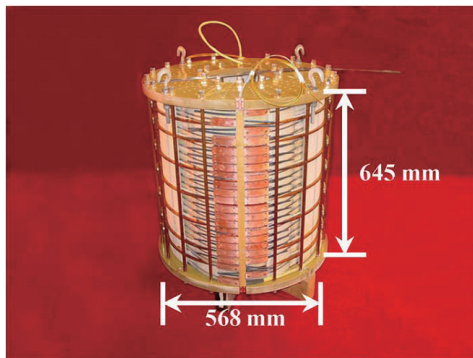


图18 0.5 MV·A/1 MJ SMES 储能线圈
Fig. 18 Superconducting coil of the 0.5 MV·A/1 MJ SMES

为了评估该SMES的性能,对其进行了实验和并网测试。图19是其有源滤波的实验波形,自上至下依次为电网电流、负载电流、直流母线电压和储能线圈电流。

从图19中可以看出,其负载电流存在严重的谐波畸变,经电能质量分析仪测试,其总谐波畸变率(total harmonics distortion, THD)达到92.2%,而经过SMES进行有源滤波处理后,其电网电流的THD降到4%,有源滤波的效果非常明显。

图20是有功平滑的实验结果。在实验过程中,非线性负载的功率由50 kW跳变到100 kW后跳变回50 kW。在负荷突增时,储能线圈的电流从300 A下降到260 A,从而为突增的负荷提供突变的有功功率;而在负荷突降时,储能线圈从电网吸收有功功率,储能线圈的电流逐渐增加到300 A。在负荷突增或者突降时,电网电流的幅值没有明显变化,这表明负荷突变对电网的冲击大大减轻,有效地实现了有功平滑的功能。

图21是并网运行的测试结果,蓝色和红色曲线分别为电网和负载的有功功率和无功功率,图21(a)、(b)分别为电网和负载的有功和无功功率。从图21可以看出,加入该SMES后,虽然负荷的有功功率存在剧烈波动,但是电网仅提供较为平滑的有功功率,有功平滑的效果明显。同时也可以看出,通过SMES的无功补偿,注入电网的无功功率基本为0,无功补偿的效果明显。

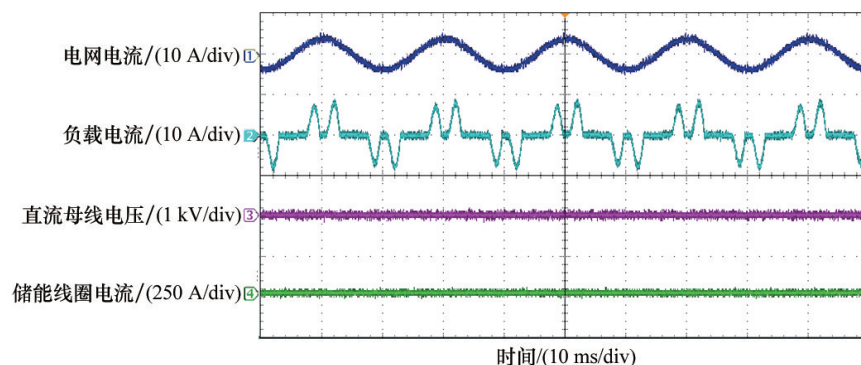


图19 有源滤波实验结果
Fig. 19 Harmonics compensation result

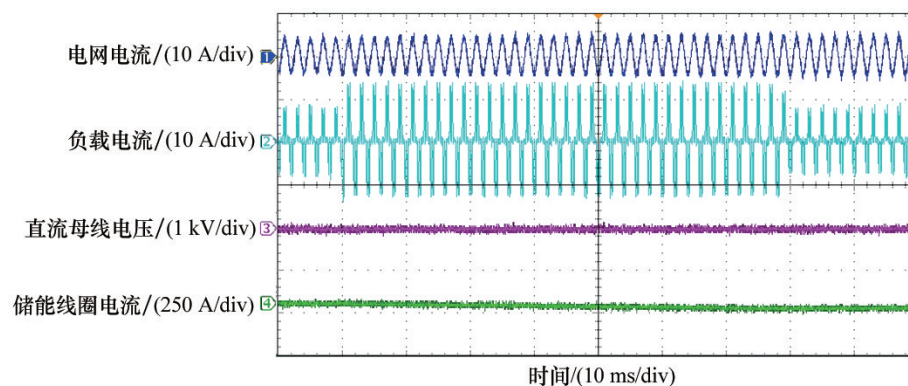


图20 有功平滑实验结果
Fig. 20 Active power fluctuation compensation result

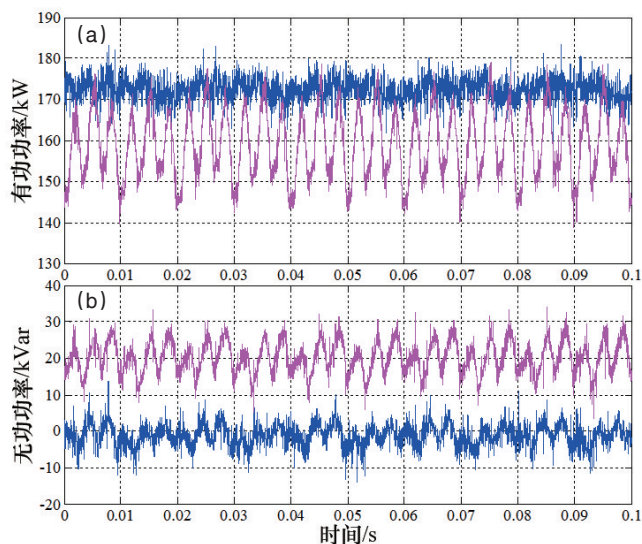


图 21 并网测试结果

Fig. 21 Field test results

7 SMES 应用前景和发展方向

7.1 SMES 在功率和能量系统中的应用前景

相比于其他储能方式, SMES 最大的优点就是响应速度快, 这使 SMES 在功率和能量系统中具有广泛的应用前景。

1) 能量存储。一个 SMES 单元最大能存储 5000 MW·h 能量, 存储效率可达 95%。对于能量的快速变化, SMES 的跟随速度达毫秒级别^[58-61]。对于电网系统的削峰填谷, SMES 是个理想的器件, 同时能减少设备的旋转备用需求 (spinning reverse requirements)。

2) 稳定电压动态性能。线路严重过载或者动态无功补偿不足会造成电压失衡, 出现电压骤升或骤降。SMES 通过提供瞬时有功和无功功率补偿, 稳定电压的动态性能^[62-64]。

3) 稳定风力发电机。现代风力发电系统主要面临 2 个主要问题: 风力发电的输出功率受风速影响较大, 输出功率随机波动; 电网电压跌落时, 若单纯切断风力发电设备, 会给电网稳定性带来严重影响^[65]。基于具有自换相能力逆变器的 SMES 单元能够对有功和无功功率进行实时控制。因此, SMES 对于稳定风力发电系统具有重要作用^[65-67]。

4) 次同步谐振阻尼。发电机传输线路上一般有高阶串联补偿装置, 提供功率补偿, 调节功率因数。高阶串联补偿装置将会引发次同步谐振现象, 对发电机产生严重损害。SMES 作为有源器件, 能够缓解次同步谐振的影响, 允许更高阶串联补偿装置的安装^[68-69]。

5) 联络线功率控制。电网输出功率与实际消耗功率之间的匹配控制十分重要。一般情况下, 电网输出功率等于用电设备的消耗功率。而当发电机输送功率时, 控制区域与执行区域的不统一造成系统负载发生变化, 实际输送功率与设定功率产生误差, 影响发电机工作效率。SMES 可以通过适当控制算法, 注入功率补偿来消除误差, 保证发电机的工作

效率和功率相匹配^[70]。

6) 黑启动能力。SMES 单元能为发电单元提供启动功率, 不需要从电网吸收能量。当电网发生故障时, SMES 的黑启动能力能维持发电机继续工作, 能够有效保护电网^[71]。

7) 多功能超导储能装置。将超导储能与统一电能质量控制器相结合, 可形成具有储能功能的动态电压恢复器^[72]、统一电能质量控制器^[73], 与故障限流器相结合, 形成超导限流-储能系统^[6]。应用于单台分机的超导限流-储能系统拓扑结构, 可同时提高单台风力发电机的低电压穿越能力和功率输出稳定性^[74]; 对超导限流-储能系统在风电场中的应用进行了初步的仿真分析^[75], 进一步提出应用于风电场的超导限流-储能系统拓扑结构^[76], 实现对风电场的保护, 并开展相关样机的研制^[77]。

7.2 SMES 磁体研究的新方向

储能磁体的结构主要有单螺管、组合螺管、环形螺管 3 种。以往单螺管磁体的设计, 大多使用矩形截面的磁体, 其结构简单, 但超导带材的利用率相对较低。研究者分析如何改变磁体的结构, 一种思路是采用阶梯形截面磁体^[78-79]。相比于矩形截面磁体, 阶梯形截面磁体在优化设计方面比较复杂, 但是采用阶梯型磁体结构可以减小垂直于带材磁场的作用, 从而提高磁体的临界电流, 最终提高其储能量和稳定裕度。阶梯形截面储能磁体的结构可分为内阶梯截面磁体和外阶梯截面磁体。由于在不同温区磁场对氧化钇钡铜 (YBCO) 超导带材临界电流的影响规律有所不同, Sun 等^[79]通过研究发现: 在 20 K 温区, 采用内阶梯截面结构更省带材, 在 77 K 温区, 采用外阶梯截面结构更省带材。

另外, 对于需要频繁充放电的超导储能磁体或者低频交流磁体, 由于磁体自身交流损耗且在低温容器及金属部件上产生的涡流损耗较大, 运行于过冷液氮温区, 相对于在液氢和液氦温区而言具有较低的制冷成本和较高的运行经济性, 只是超导材料的用量相对较大。在过冷液氮温区, 超导磁体的中心场强可达 2 T 左右。

储能磁体在工作时, 磁体外部的磁场呈轴对称状分布在空气中, 漏磁较大, 成为变电站内电磁污染的主要来源之一。储能磁体的强磁场不仅对周围其他电气设备产生影响, 而且对人体存在潜在危害。采用磁屏蔽或电磁屏蔽的方法抑制磁体漏磁虽然可以将空间磁污染抑制到可接受的水平, 但是各种屏蔽方法均会导致磁体运行损耗的增加, 并引起电感参数的变化。为了降低空心电抗器或储能线圈的空间漏磁, 通常采用 2 种方式: 一种是采用多螺管平行排列^[80], 一种是采用多螺管或线饼环形排列^[81]。国际对多个螺管和双饼串联连接方式超导储能磁体展开了大量研究工作。日本九州电力公司完成了 1 GJ 环形结构高温超导储能磁体的概念设计, 韩国、印度分别对 2.5 MJ、4.5 MJ 环形结构高温超导储能磁体进行了概念设计^[82-83], 在中国华中科技大学也开始进行 10 MJ 储能磁体的概念设计^[84]。在高压、大电流应用场合, 采

用上述结构面临诸多线圈间的均压均流问题。

7.3 SMES面临的挑战和发展方向

虽然SMES在提高电力系统稳定性和改善供电质量方面具有明显优势,但是受限于其身高昂的费用,SMES还未能大规模进入市场,技术的可行性和经济价值将是SMES未来发展面临的重大挑战。

今后SMES的研究重点将集中在如何降低成本、优化高温超导线材的工艺和性能、开拓新的变流器技术和控制策略、降低超导储能线圈交流存耗和提高储能线圈稳定性、加强失超保护等几方面。高温超导材料的不断发展,极大推动了SMES的发展,许多国家采用高温超导材料进行SMES系统的研究实验,包括日本和韩国,得出结论:高温超导材料会极大降低SMES的成本,并提高性能。可以预见,高温超导材料的不断发展成熟,将会降低整个SMES系统的价格,极大地简化冷却手段和运行条件,提高其性能和寿命。SMES技术将加速发展,并可望成为主要电力基础应用装备之一。

8 结论

经过几十年的发展,SMES在技术研究和应用方面都取得大量成果。相比于其他储能方式,SMES的性能更加优越,应用前景更加广泛。在未来几十年、甚至更长的时间内,SMES将会是一个持续的研究热点。随着超导技术的进步,SMES的发展已进入一个新阶段,推动着电力系统的发展与革新。

参考文献(References)

- [1] 陈新耀. 电力系统储能问题初步探讨[J]. 电池工业, 2003, 8(4): 161-162.
Chen Xinyao. Discussion on battery used for energy storage system[J]. Battery Industry, 2003, 8(4): 161-162.
- [2] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(4): 1-8.
Cheng Shijie, Wen Jingyu, Sun Haishun. Energy storage technology and its application to modern power system[J]. Electrical Applications, 2005, 24(4): 1-8.
- [3] 郑丽, 马维新, 李立春. 超导储能装置提高电力系统暂态稳定性的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(3): 73-76.
Zheng Li, Ma Weixin, Li Lichun. Superconducting magnetic energy storage system for enhancing transient stability[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology Edition, 2001, 41(3): 73-76.
- [4] 石晶, 唐跃进, 戴陶珍, 等. 电力安全与超导磁储能系统[J]. 低温物理学报, 2005, 27(S1): 1051-1057.
Shi Jing, Tang Yuejin, Dai Taozhen, et al. The safety of the power system and superconducting magnetic energy storage[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2005, 27(S1): 1051-1057.
- [5] Buckles W, Hassenzahl W V. Superconducting magnetic energy storage[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 16-20.
- [6] Boom R W, Peterson H A. Superconductive energy storage for power systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1972, 8(3): 701-703.
- [7] Boenig H J, Hauer J F. Commissioning tests of the bonneville power administration 30 MJ superconducting magnetic energy storage unit[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(2): 302-312.
- [8] Luongo C A, Baldwin T, Ribeiro P, et al. A 100 MJ SMES demonstration at FSU-CAPS[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 1800-1805.
- [9] Ishigaki Y, Shirahama H, Kuroda K. Power control experiments using a 5 MJ superconducting magnetic energy storage system[C]//19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Kyoto, Japan: IEEE, 1988: 301-306.
- [10] Nagaya S, Hirano N, Moriguchi H, et al. Field test results of the 5 MVA SMES system for bridging instantaneous voltage dips[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 632-635.
- [11] Honma H, Fujibayashi K, Asano K, et al. Development of a 1 MJ SMES with quench enthalpy protection[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(3): 442-447.
- [12] Katagiri T, Nakabayashi H, Nijo Y, et al. Field test result of 10 MVA/20 MJ SMES for load fluctuation compensation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 1993-1998.
- [13] Kozak J, Majka M, Kozak S, et al. Performance of SMES system with HTS magnet[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1348-1351.
- [14] Kim H J, Seong K C, Cho J W, et al. 3 MJ/750 kVA SMES system for improving power quality[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 574-577.
- [15] Tixador P, Bellin B, Deleglise M, et al. Design and first tests of a 800 kJ HTS SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1967-1972.
- [16] Zhao C, Wang Z, Zhang D, et al. Development and test of a superconducting fault current limiter-magnetic energy storage (SFCL-MES) system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2014-2017.
- [17] Xiao Liye, Dai Shaotao, Lin Liangzhen, et al. Development of the world's first HTS power substation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5000104-5000104.
- [18] Dai Shaotao, Xiao Liye, Wang Zikai, et al. Development and demonstration of a 1 MJ High-Tc SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5700304-5700304.
- [19] Jiang X, Zhu X, Cheng Z, et al. A 150 kVA/0.3 MJ SMES voltage sag compensation system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1903-1906.
- [20] Ren L, Xu Y, Zuo W, et al. Development of a Movable HTS SMES System[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4): 1-9.
- [21] Seeber B. Handbook of applied superconductivity[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [22] Kalsi S S, Aized D, Connor B, et al. HTS SMES magnet design and test results[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997(7): 971-976.
- [23] Nagaya S, Hirano N, Shikimachi K, et al. Development of MJ-Class HTS SMES for bridging instantaneous voltage dips[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 770-773.
- [24] Xiao Liye, Wang Zikai, Dai Shaotao, et al. Fabrication and tests of a 1 MJ HTS magnet for SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 770-773.
- [25] Wang J, Skiles J, Kustom R, et al. Studies of power conditioning circuits for superconductive magnetic energy store[C]//19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Kyoto, Japan: IEEE,

- 1988: 307-312.
- [26] Dong H. A power conditioning system for superconductive magnetic energy storage based on multi-level voltage source converter[D]. Virginia: College of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [27] Hassan I D, Bucci R M, Swe K T. 400 MW SMES power conditioning system development and simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 237-249.
- [28] Guo Wenyong, Xiao Liye, Dai Shaotao, et al. Control and test of a 0.5 MVA/1 MJ SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5700804.
- [29] 郭文勇, 赵彩宏, 张志丰, 等. 用于超导储能系统的多电平电流调节器[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 66-67.
Guo Wenyong, Zhao Caihong, Zhang Zhifeng, et al. A Multilevel Current regulator for superconducting magnetic energy storage system [J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(18): 66-67.
- [30] 李顺, 赵彩宏, 肖立业. 用于超导储能系统的电流调节器试验研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 25(16): 76-78.
Li Shun, Zhao Caihong, Xiao Liye. Experimental research of current regulator for superconducting magnetic energy storage[J]. Automation of Electric Power System, 2005, 26(16): 76-78, 96.
- [31] 郭文勇, 赵彩宏, 肖立业, 等. 超导储能用电流调节器充放电数学模型及其控制系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 117-122.
Guo Wenyong, Zhao Caihong, Xiao Liye, et al. Charging and discharging math model and control system of current regulator for superconducting magnetic energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 117-122.
- [32] 郭文勇, 赵彩宏, 张志丰, 等. 电压型超导储能系统统一非线性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 54-58.
Guo Wenyong, Zhao Caihong, Zhang Zhifeng, et al. A unified nonlinear control strategy for the voltage type superconducting magnetic energy storage system[J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(19): 54-58.
- [33] 郭文勇, 赵彩宏, 张志丰, 等. 电压型超导储能系统统一直接功率控制[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 58-63.
Guo Wenyong, Zhao Caihong, Zhang Zhifeng, et al. A unified direct power control method for voltage type superconducting magnetic energy storage system[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 58-63.
- [34] 郭文勇, 赵彩宏, 张志丰, 等. 级联型超导储能系统整体协调控制方法[J]. 电网技术, 2007, 31(16): 55-59.
Guo Wenyong, Zhao Caihong, Zhang Zhifeng, et al. A system control strategy for cascaded superconducting energy storage system[J]. Power System Technology, 2007, 31(16): 55-59.
- [35] 郭文勇, 张志丰, 肖立业, 等. 基于共直流电压母线级联型超导储能系统的动态电压恢复器最小能量控制[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 69-74.
Guo Wenyong, Zhang Zhifeng, Xiao Liye, et al. Minimum energy control for dynamic voltage restorer based on common DC voltage link cascaded superconducting magnetic energy storage system[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 69-74.
- [36] Kustom L, Skiles J, Wang J, et al. Digital control of power conditioning converters for superconductive magnetic energy storage[C]// IEEE International Conference on Systems Engineering. Fairborn, Ohio, USA: IEEE, 1989: 293-296.
- [37] Ise T, Skiles J J, Kustom R L, et al. Circuit configuration of the GTO converter for superconducting magnetic energy storage[C]//19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Kyoto, Japan: IEEE, 1988: 108-115.
- [38] Sakai T, Kawaguchi A, Yonemoto T, et al. SMES system with snubber loss free type current source converter[C]//23rd International conference on Industrial Electronics. Guimarães, Portugal: IEEE, 1997: 443-446.
- [39] Zhang Z, Ooi B T. Multi-modular current-source SPWM converters for superconducting magnetic energy storage system[C]//23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Toledo, Spain: IEEE, 1992: 561-568.
- [40] 徐德鸿, 正田英介. 超导储能装置用GTO PWM电流型变流器模块方阵[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 124-130.
Xu Dehong, Masada Erikosuke. GTO PWM Current Converter Array for Superconducting Magnetic Energy Storage[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 1998, 18(2): 124-130.
- [41] Ali M H, Wu B, Dougal R A. An overview of SMES applications in power and energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 38-47.
- [42] Iglesias I J, Bautista A, Visiers M. Experimental and simulated results of a SMES fed by a current source inverter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 861-864.
- [43] Han B M, Karady G G. A new power-conditioning system for superconducting magnetic energy storage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 214-220.
- [44] Lasseter R H, Jalali S G. Dynamic response of power conditioning systems for superconductive magnetic energy storage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(3): 388-393.
- [45] Haberberger M, Fuchs F W. Novel protection strategy for current interruptions in IGBT current source inverters[C]//35th Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 558-564.
- [46] 施啸寒, 王少荣. 蓄电池-超导磁体储能系统平抑间歇性电源出力波动的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 53-58.
Shi Xiaohan, Wang Shaorong. Power output fluctuation suppression by hybrid energy storage system for intermittent source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 53-58.
- [47] 唐西胜, 武鑫, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(2): 178-183.
Tang Xisheng, Wu Xin, Qi Zhiping. Study on stand-alone PV system with battery/ultracapacitor hybrid energy storage[J]. Journal of Solar Energy, 2007, 28(2): 178-183.
- [48] Akiyama K, Nozaki Y, Kudo M, et al. Ni-MH batteries and EDLCs hybrid stand-alone photovoltaic power system for digital access equipment[C]//22nd Telecommunications Energy Conference. Dresden, Germany: IEEE 2000: 387-393.
- [49] Nozaki Y, Akiyama K, Kawaguchi H, et al. Evaluation of an EDLC-battery hybrid stand-alone photovoltaic power system[C]//Photovoltaic Specialists Conference. Anchorage, Alaska: IEEE, 2000: 1634-1637.
- [50] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
Zhang Guojun, Tang Xisheng, Qi Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid [J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(12): 85-89.
- [51] Wei Li, Joos G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm[C]//Power Electronics Specialists Conference. Jeju, Korea: IEEE, 2007: 1280-1285.
- [52] Nojima I, Takano I, Sawada Y. Transient performance of a new-type hybrid electric power distributed system with fuel cell and SMES[C]//

- Industrial Electronics Society, Denver, Colorado, USA: IEEE, 2001: 1303-1308.
- [53] 张晓红, 马列, 李美林. 新型混合储能技术在微电网中的应用研究[J]. 通信电源技术, 2015, 32(6): 14-15.
Zhang Xiaohong, Ma Lie, Li Meilin. Research on the application of new hybrid energy storage technology in micro grid[J]. Telecom Power Technologies, 2015, 32(6): 14-15.
- [54] 杨芳华, 刘娇, 陈浩, 等. 超导-蓄电池混合储能装置接于配电网对电压稳定性的影响[J]. 电力学报, 2014(3): 211-214.
Yang Fanghua, Liu Jiao, Chen Hao, et al. Influence of superconducting magnetic-battery energy storage hybrid energy storage connected to distribution on voltage stability[J]. Electric Power Journal, 2014(3): 211-214.
- [55] 邓江娟, 张铁山, 周小光, 等. 超导储能蓄电池混合储能在风力发电中的应用[J]. 电源学报, 2013(1): 25-29.
Deng Huijuan, Zhang Tieshang, Zhou Xiaoguang, et al. Application of hybrid energy storage system with superconducting magnetic energy storage battery in wind power generation[J]. Journal of Power, 2013 (1): 25-29.
- [56] 杨堤, 程浩忠, 马紫峰, 等. 基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 1-10.
Yang Di, Cheng Haozhong, Ma Zifeng, et al. Analysis and prospect of LVRT improvement based on energy storage technology for wind turbine generator system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015(12): 1-10.
- [57] Li J, Zhang M, Yang Q, et al. SMES/battery hybrid energy storage system for electric buses[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [58] Suzuki S, Baba J, Shutoh K, et al. Effective application of superconducting magnetic energy storage(SMES) to load leveling for high speed transportation system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(628): 713-716.
- [59] Ngamroo I, Taeratanachai C, Dechanupaprittha S, et al. Enhancement of load frequency stabilization effect of superconducting magnetic energy storage by static synchronous series compensator based on H ∞ control[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1302-1312.
- [60] Torre W V, Eckroad S. Improving power delivery through the application of superconducting magnetic energy storage(SMES)[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, Ohio USA: IEEE, 2001: 81-87.
- [61] Buckles W E, Daugherty M A, Weber B R, et al. The SSD: A commercial application of magnetic energy storage[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1993, 3(1): 328-331.
- [62] Hsu C S, Lee W J. Superconducting magnetic energy storage for power systems application[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 1993, 29(5): 990-996.
- [63] Yunus A M S, Abu-Siada A, Masoum M A S. Application of SMES unit to improve the high-voltage-ride-through capability of DFIG-grid connected during voltage swell[C]//Innovative Smart Grid Technologies Asia. Kollam, Kerala, India: IEEE, 2011: 1-6.
- [64] Reza A P M, Ali M H, Abbas S. Voltage stabilization of VSI SMES capacitors and voltage sag compensation by SMES using novel switching strategies[J]. Energy, 2010, 35(8): 3131-3142.
- [65] 郭文勇, 肖立业, 戴少涛. 集成SMES和CS-SGSC的双馈型风力发电系统[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 101-107.
Guo Wenyong, Xiao Liye, Dai Shaotao. Doubly Fed Induction Generation system incorporated with SMES and CS-SGSC[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(14): 101-107.
- [66] Sheikh M R I, Mondol N, Eva F. Stabilization of wind generator by PWM-VSC controlled SMES[C]//International Conference on Developments in Renewable Energy Technology. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2012: 1-5.
- [67] 柳伟, 顾伟, 孙蓉, 等. DFIG-SMES互补系统一次调频控制[J]. 电工技术学报, 2012(9): 108-116.
Liu Wei, Gu Wei, Sun Rong, et al. Primary frequency control of doubly fed induction generator-superconducting magnetic energy storage complementary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012(9): 108-116.
- [68] Wasynczuk O. Damping subsynchronous resonance using energy storage[J]. IEEE Power Engineering Review, 1982, PAS-101(4): 905-914.
- [69] Wu Chijui, Lu Chunfeng. Damping torsional oscillations by a superconducting magnetic energy storage unit[J]. Electric Machines and Power Systems, 1994, 22(1): 1-15.
- [70] Torre W V, Eckroad S. Improving power delivery through the application of superconducting magnetic energy storage (SMES)[C]//2001 Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, Ohio USA: IEEE, 2001: 81-87.
- [71] Baumann P D. Energy conservation and environmental benefits that may be realized from superconducting magnetic energy storage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7(2): 253-259.
- [72] Guo Wenyong, Xiao Liye, Dai Shaotao, et al. Control strategy of a 0.5 MVA/1 MJ SMES based dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1329-1333.
- [73] Guo Wenyong, Xiao Liye, Dai Shaotao. Control and design of a current source UPQC with fault current limiting ability[J]. IET Power Electronics, 2013, 6(2): 297-308.
- [74] Guo Wenyong, Xiao Liye, Dai Shaotao. Enhancing low-voltage ride-through capability and smoothing output power of DFIG with a superconducting fault-current limiter-magnetic energy storage system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 277-295.
- [75] 郭文勇, 戴少涛, 王海风, 等. 向风电场的超导限流-储能系统[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 37-45.
Guo Wenyong, Dai Shaotao, Wang Haifeng, et al. A superconducting fault current limiter-magnetic energy storage system for wind farm[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(14): 37-45.
- [76] 郭文勇. 超导限流-储能系统风电场应用分析[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 176-182.
Guo Wenyong. Application analysis of a superconducting fault current limiter-magnetic energy storage system for the wind farm[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 176-182.
- [77] Guo Wenyong, Zhang Jingye, Song Naihao, et al. Overview and development progress of a 1 MVA/1 MJ superconducting fault current limiter-magnetic energy storage system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 5200905.
- [78] Noguchi S, Yamashita H, Ishiyama A. An optimization method for design of SMES coils using YBCO tape[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 13(2): 1856-1859.
- [79] Sun Q, Zhang Z F, Lin L Z, et al. Design method of SMES magnet considering inhomogeneous superconducting properties of YBCO tapes [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1-5.
- [80] Moghadasi A H, Heydari H, Farhadi M. Pareto optimality for the design of SMES solenoid coils verified by magnetic field analysis[J].

- IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(1): 13–20.
- [81] Hayashi H, Tsutsumi K, Funaki F, et al. Design study of 1 GJ class HTS-SMES(1): Conceptual design of a magnet system[J]. Physica C, 2001, 357–360: 1327–1331.
- [82] Choi J H, Cheon H G, Choi J W, et al. A study on basic insulation characteristics of 2.5 MJ class conduction-cooled HTS SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1344–1347.
- [83] Bhunia U, Akhter J, Nandi C, et al. Design of a 4.5 MJ/1 MW sectored toroidal superconducting energy storage magnet[J]. Cryogenic, 2014, 63: 186–198.
- [84] Dai T Z, Tang Y J, Shi J, et al. Design of a 10 MJ superconducting magnetic energy storage magnet[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1356–1359.

Current research status and application prospect of SMES

GUO Wenyong, ZHANG Jingye, ZHANG Zhifeng, QIU Qingquan, ZHANG Guomin, LIN Liangzhen, XIAO Liye

Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract SMES stores the magnetic energy in the superconducting coil. It has the advantages of fast response, high conversion efficiency, fast power compensation, etc. Therefore, SMES is an ideal device for improving the quality and reliability of the electrical system. This paper presents an overview of the SMES technology, including its working principle, current research status, major advantages and disadvantages. The potential application prospects of SMES are also presented.

Keywords superconducting magnetic energy storage system; power compensation; power grid

(编辑 王志敏)