

# 用于 SMES 的电压型换流器试验研究

黄晓华<sup>1,2</sup>, 李学斌<sup>1,2</sup>, 张志丰<sup>1</sup>, 赵彩宏<sup>1</sup>, 肖立业<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电工研究所应用超导实验室, 北京 100008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为实现超导储能装置 (SMES-Superconducting Magnetic Energy Storage) 与输电网之间的协调作用, 达到提高电网输送容量、暂态稳定性和电压稳定性, 提高配电网电能质量的目的。根据 SMES 的结构特点, 结合目前大功率电力电子器件以及电路拓扑的发展趋势, 设计了一台三单相 H 桥分立控制的电压型换流器 (VSI-Voltage source inverter) 及其控制系统平台。该电压型换流器采用三相器件独立运行结构, 控制系统采用数字信号处理器 (DSP-Digital Signal Processing) 设计, 在功能上实现了对串联于电力线路的注入电压幅值和相位的灵活控制, 最后给出了一台 20 kW 电压型换流器原理样机对母线电压补偿功能的试验结果, 试验结果表明, 该电压型换流器可以满足超导储能系统的需要。

**关键词:** SMES; 电压型换流器; 电压补偿; 双极性控制

## Experimental research of voltage source inverter for SMES

HUANG Xiao-hua<sup>1,2</sup>, LI Xue-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-feng<sup>1</sup>, ZHAO Cai-hong<sup>1</sup>, XIAO Li-ye<sup>1</sup>

(1. Applied Superconductivity Key Laboratory, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing 100080, China;

2. GSCAS, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A set of three of single-phase H-bridge separated controlled voltage source inverter and a flexible control system for the inverter are designed for the purpose of coordinating SMES with T&D power system in order to improve transmission capacity and transient and voltage stability, and to enhance the power quality in distribution network, which integrate the characteristics of superconducting magnet and developments of power electronics. This voltage source inverter adopted a structure with three phases working independently, while the control system was designed using digital signal processor (DSP). Such design implements the function of flexible change of amplitude and phase of injected voltage series to the network. Finally the voltage compensated experiment result of a 20kW prototype is given and the result is satisfactory.

This project is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 50225723).

**Key words:** SMES; voltage source inverter; voltage compensation; bipolar control

中图分类号: TM917; TM464 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0051-05

## 0 引言

超导储能 (SMES-Superconducting Magnetic Energy Storage) 充分利用了超导磁体的储能能力和电力电子装置的快速充放电特性, 将其应用于电力系统中, 具有快速调节潮流的峰谷特性, 提高输电线路的输送能力, 提高电力系统的暂态稳定性和电压稳定性, 抑制系统的次同步振荡和低功率振荡并提高配电系统电能质量的功能<sup>[1-7]</sup>。

40年来, 国内外多个科研机构已经在超导储能

(SMES) 系统的硬件构成及功能实现方面进行了大量的研究工作。在功率调节部分的拓扑结构方面主要分为电流型换流器<sup>[8, 9]</sup>和电压型换流器<sup>[10, 11]</sup>两大类, 从目前应用来看, 电压型换流器的发展比电流型成熟, 应用也较广泛<sup>[12, 13]</sup>, 但传统的电压型换流器一般采用结构较为简单的三相桥式换流电路<sup>[14, 15]</sup>, 工作性能不太理想。

三单相 H 桥结构的电压型换流器具有直流电压利用率高, 三相电压独立灵活控制的优点, 本文采用了一台 20 kW 三单相 H 桥结构的电压型换流器的主电路结构, 并经过连接变压器串联接入电力系统,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50225723)

运用电压补偿算法, 得出实验结果, 实验室物理模拟实验结果验证了该装置具有良好的响应速度和补偿效果, 具有能够快速调节电力系统电能质量的功能。

## 1 SMES-VSI 的工作原理

SMES 是由超导线圈, DC/DC 变换器, 电压型换流器, 滤波器和连接变压器等部分组成。能量以电磁形式存储在超导线圈内, 电磁能量在磁体内无

损耗存储。超导线圈内的能量可以通过可控电力电子变换器实现 SMES 与电网之间的交换, 从而实现和电力网络的协调作用。可控电力电子变换器分为 DC/DC 换流器和电压型换流器两个部分。

图 1 所示为电压源型电力电子变换器的功能原理图, 图中虚框内为电压型换流器的拓扑结构。电压型换流器的一侧与 DC/DC 变换器相连接, 然后连接到超导线圈, 另外一侧和电网相连接, 实现对输电网稳定性控制和配电网的电能质量调节。

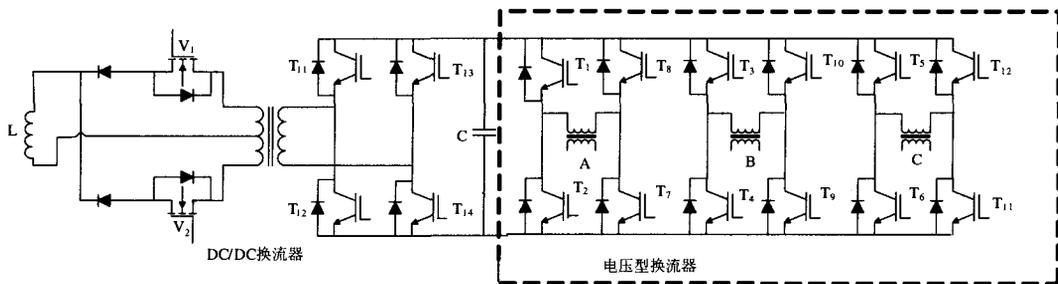


图 1 电压型换流器的原理图

Fig. 1 Principle of voltage-type PCS

该电路拓扑主要由电压型变换单元 ( $T_1$ — $T_{12}$ )、滤波单元和隔离变压器这三部分组成。通过旁路开关串联于电力网络中。电压型换流器的基本工作原理是: 直流侧并联一个单极性的支撑电容, 电容的容量足够大, 能在持续充/放电和器件换相过程中保持电压不发生很大的变化, 每个工作周期内的平均直流电流的方向决定了总体功率方向, 进而决定换流器是工作于整流还是逆变状态。当换流器作为功率因数为 1 的整流器运行时, 只有二极管工作, 而变换器作为功率因数为 1 的逆变器运行时, 只有可控器件 IGBT 起作用。通过控制输出信号的载波频率比和调制比, 进而控制换流器的输出交流电压的幅值和相位, 达到控制有功和无功功率的目的。

## 2 SMES-VSI 的硬件实现

电压型换流器硬件电路是由硬件功率单元和控制单元两部分组成, 硬件功率单元采用三菱公司的六单元智能功率模块 IPM100CLA120。这是一款先进的混合集成功率器件, 由高速、低耗的 IGBT 芯片和优化的门极驱动及保护电路构成, 具有过流保护、短路保护、过热和欠压锁定保护功能, 使系统的可靠性得到进一步提高。

控制单元部分的硬件结构平台如图 2 所示。

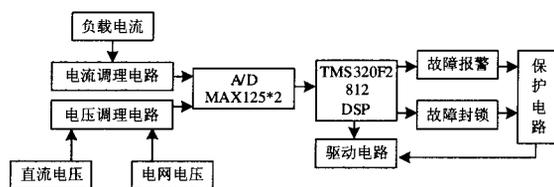


图 2 控制器的硬件结构平台

Fig. 2 Hardware structure of controller

控制单元是由信号调理电路、锁相电路、控制内核和隔离保护电路四个部分组成。

1) 信号调理电路。其作用是将线路的电压电流信号调节为满足 DSP 片内外设 AD 要求的 0~3 V 电压。输入输出电压的关系为:

$$U_{out} = \frac{1}{2}(U_{in} + 3.0) \quad (1)$$

参考电压基准采用 MAX6133AASA30, 输出 3.0 V 的基准电压。

2) 锁相电路。在周期性电参数中, 进行同步采样是准确测量实时信号的关键。信号预处理电路采用零相移低通滤波电路和 LM311 实现过零点判断, 生成与电网信号同相位的方波, 经锁相产生与电网同步的时钟触发信号。

3) 控制内核。控制器硬件内核采用 TI 公司生产的 32 位快速定点 DSP 芯片 TMS320F2812。这是目前控制领域最先进的处理器之一。其频率可高达 150 MHz, 大大提高了控制系统的控制精度和性能。

它是基于 C/C++ 高效 32 位 TMS320C28XDSP 内核, 并提供浮点数学库, 从而可以在定点 DSP 上方便地实现浮点运算。

4) 隔离保护电路。该电路是将故障和开/关控制信号从控制内核送入硬件功率单元的接口电路。隔离芯片采用高共模抑制比的高速光耦合器 HCPL4504, 保护芯片采用低速光耦 PC817。隔离保护电路实现了系统的模拟部分与数字部分分离, 从而大大提高了控制系统的电气稳定性及系统灵活性。

### 3 控制原理及实现

#### 3.1 控制原理

在超导磁体对电网的充放电过程中, 电压型换流器采用双极性正弦脉宽 (SPWM) 控制。如图 3 所示。

以 A 相单元的  $T_1, T_2, T_7, T_8$  为例, 在正半周, 对于固定的三角载波, 增加参考正弦波的幅值将延长  $T_1, T_7$  的导通时间, 缩短  $T_2, T_8$  的导通时间, 在负半周正好相反。这说明交流输出电压的基波分量随着参考波与载波的调制比的增加而增加, 只要调制比小于 1, 就可以通过控制参考正弦波的幅值来调节交流输出电压的大小。D 反映了死区时间。

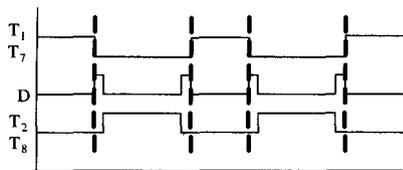


图 3 SPWM 的控制时序

Fig.3 Control mode of SPWM

#### 3.2 控制算法

本文实验采用的控制算法是电压补偿算法。电压型换流器控制算法结构如图 4 所示。算法及图中各变量的说明见下文。

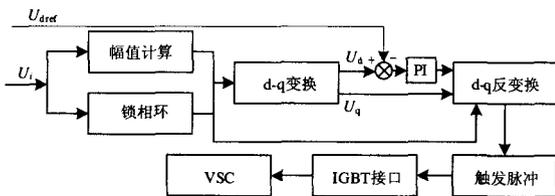


图 4 控制原理

Fig.4 Control principle diagram

系统电压值  $U_i$  经过 d-q 变换, 变换公式为

$$[u_d, u_q]^T = T_{abc/dq0} [U_1, 0, 0]^T \quad (2)$$

式中:

$$T_{abc/dq0} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$U_i$  为  $i$  相实际电压,  $u_d, u_q$  分别为变换后的 d 轴和 q 轴电压。

d 轴电压在无谐波情况下是频率为两倍系统电压的交流电压。当系统发生凹陷后, d 轴电压将下降, 下降电压为

$$\Delta U_d = U_{dref} - U_d \quad (3)$$

式中:  $U_{dref}$  为参考电压,  $\Delta H$  经 PI 控制器和 d-q 反变换后得到凹陷基波补偿电压  $U_{iout}$ 。

$$[U_{iout}, 0, 0]^T = T_{dq0/abc} [\Delta u_d, u_q] \quad (4)$$

其中:  $T_{abc/dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$

在实际应用中, 如果凹陷电压在标准电压的  $\pm 10\%$  内, 将不进行补偿。

#### 3.3 控制实现

系统软件设计是实现控制系统的关键部分, 主要完成同步信号的检测、算法编写和脉宽调制 (PWM) 输出等功能。其代码设计的结构和逻辑决定了整个控制系统的实时性和有效性。控制系统的软件实现流程如图 5 所示。

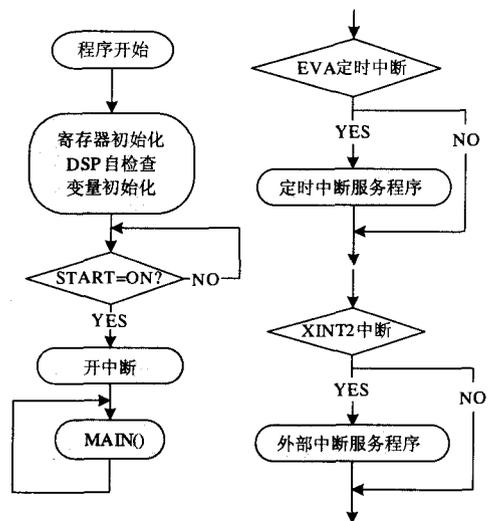


图 5 控制软件流程

Fig.5 Flow chart of control signal

1) 主程序。完成 TMS320F2812 系统寄存器初始化, 设置定时器控制寄存器 (GPTCON), 并进行

DSP自检查和变量初始化,使系统处于初始状态,等待中断响应信号,开中断进入主程序。

2)中断服务程序。AD中断服务程序,完成AD中断响应,保证定时器1下溢中断启动模数转换器(ADC)。XINT2外部中断服务程序,每个周期过零点的触发信号保证AD中断内计数器的清零,完成同步信号检测响应。

3)子程序。设置事件管理器寄存器,设置死区控制器(DBTCON),保证同一桥臂上下二极管不能同时导通。设置产生占空比可调的PWM控制信号。

#### 4 试验

根据所提出的电路拓扑和控制原理,制造了一台20 kW电压型变流器样机并进行了试验。

原理样机的设计参数如表1所示。

表1 原理样机设计参数

Tab.1 Parameters of the principle SMES

容量	20 kW
直流电容	10 000 $\mu$ F
磁体电感	2 mH
滤波电感	1.3e-3H
滤波电容	30 $\mu$ F
变压器容量	7kW/台
变压器变比	1:1

##### 4.1 试验线路

实验室的SMES试验线路图如图6所示。试验中采用的IGBT的工作频率为1 200 Hz,双极性SPWM产生方式,直流侧电容电压为200 V,电网基波有效值为220 V,变压器变比为1:1,系统电抗 $X_S$ 为1.6  $\Omega$ ,短路电抗4.8  $\Omega$ ,负载电阻2 k $\Omega$ 。

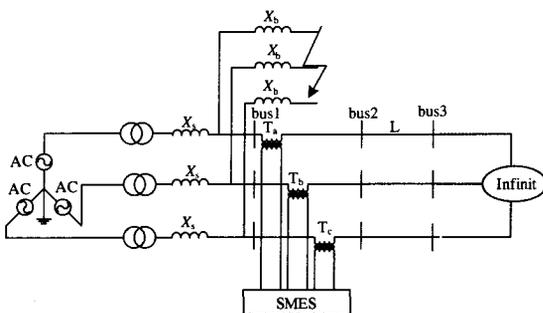


图6 实验室接线图

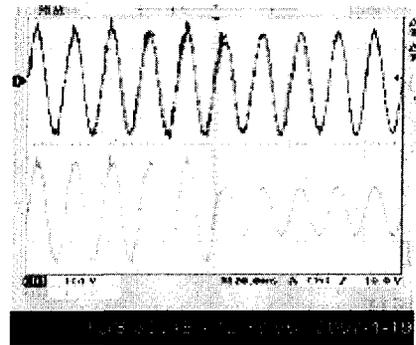
Fig.6 SMES connected to the network in laboratory

系统线路为系统电压通过变压器接模拟系统电抗,通过bus1有两条并联馈线,一条与SMES串联变压器相连,然后接负载。一条连接供短路实验用线路。由于系统中电压凹陷的类型以单相凹陷为常见故障,在稳态运行过程中,在短路线路的指定位

置发生单相接地短路,故障时间500 ms,同时进行了补偿试验。

#### 4.2 试验结果

单相接地短路实验结果如图7所示。



注:(上)含SMES电压结果,(下)不含SMES电压结果

图7 母线2电压波形

Fig.7 Bus 2 voltage

试验结果表明:在单相凹陷故障时,系统电压有效值从106 V下降为67 V,电压凹陷为63%,补偿后电压有效值为106 V,是正常值的100%。串联SMES,补偿了电压凹陷,未引发相位偏移问题。

#### 5 结语

本文提出了一种用于超导储能的电压型换流器的电路拓扑,详细分析了该电路拓扑结构的特点及工作原理,设计了基于TMS320F2812 DSP的数字控制系统来验证该电压型换流器的基本功能,开发了1台20 kW的电压型换流器样机并进行了试验研究。试验结果表明,该电压型换流器可以满足超导储能系统的需要。该电压型换流器不仅可以应用于超导储能系统,根据需要还可以进一步应用于超导限流-储能系统。

#### 参考文献

- [1] Ottonello L, et al. The Largest Italian SMES[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2006,16(2): 602-607.
- [2] Rogers J D, et al. 30-MJ Superconducting Magnetic Energy Storage System for Electric Utility Transmission Stabilization[J]. Proceedings of the IEEE,1983,71(9): 1099-1107.
- [3] Ali M H, Murata T, Tamura J. A Fuzzy Logic-Controlled Superconducting Magnetic Energy Storage for Transient Stability Augmentation[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2007,15(1): 144-150.
- [4] 周双喜,等. 超导储能装置用于改善暂态电压稳定性的研究[J]. 电网技术,2004(4): 1-5.

- [5] Ngamroo I, et al. Enhancement of Load Frequency Stabilization Effect of Superconducting Magnetic Energy Storage by Static Synchronous Series Compensator Based on Hinfinitiy Control[J]. Energy Conversion and Management.
- [6] Banerjee S, Chatterjee J K, Tripathy S C. Application of Magnetic Energy Storage Unit as Load-frequency Stabilizer[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1990, 5(1): 46-51.
- [7] Nagaya S, et al. Field Test Results of the 5 MVA SMES System for Bridging Instantaneous Voltage Dips[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 632-635.
- [8] Iglesias I J, Acero J, Bautista A. Comparative Study and Simulaion of Optimal Converter Topologies for SMES Systems[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 1995, 5(2): 254-257.
- [9] 蒋晓华, 等. 20kJ / 15kW 可控超导储能实验装置[J]. 电力系统自动化, 2004, (4): 88-91.
- [10] Hassan I D, Bucci R M, Swe K T. 400 MW SMES Power Conditioning System Development and Simulation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1993, 8(3): 237-249.
- [11] Jiang Y, et al. Control Scheme Studies of Voltage Source Type Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Under Asymmetrical Voltage[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 750-753.
- [12] Chen L, et al. Detailed Modeling of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 699-710.
- [13] Steurer M, et al. Interaction Between a Superconducting Coil and the Power Electronics Interface on a 100 MJ SMES System[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 1806-1809.
- [14] 赵彩宏, 等. 基于电压补偿原理的超导储能—限流集成系统[J]. 电力系统自动化, 2006, (2): 68-71, 108.
- [15] 赵彩宏, 等. 具有故障限流功能的串联型超导储能系统[J]. 电力系统自动化, 2006, (4): 54-58.

收稿日期: 2007-06-22; 修回日期: 2007-07-24

作者简介:

黄晓华(1980-), 女, 博士研究生, 研究方向为超导储能在电力系统中的应用; E-mail: hxx80@mail.iese.ac.cn

李学斌(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率电力设备的运行与控制;

张志丰(1967-), 男, 博士, 主要从事超导限流技术的研究。

(上接第 44 页 continued from page 44)

HU Jian-jun, TANG Chang-jie, LI Chuan, et al. An Efficient Multi-layer Clustering Algorithm based on Nearest Neighbors First[J]. Journal of Sichuan university, 2004, (11): 93-99.

- [3] 王鑫, 王洪国, 张建喜, 等. 基于数据分区的最近邻优先聚类算法[J]. 计算机科学, 2005, 32: 188-190.

WANG Xin, WANG Hong-guo, ZHANG Jian-xi, et al. A Data-partitioning-based Nearest-Neighbors-First Clustering Algorithm[J]. Computer Science, 2005: 32, 188-190.

- [4] 苏琳, 康积涛. 地理信息系统在配电网规划与设计中的应用[J]. 华东电力, 2006(1): 64-66.

SU Lin, KANG Ji-tao. Application of Geographical Information System to Planning and Design of Distribution Network[J]. East China Electric Power, 2006, (1), 64-66.

- [5] Guha S, Rastogi R, Shim K. CUR; An Efficient Clustering Algorithm for Large Databases. In: Proc. of the ACM SIGMOD Int'l. Conf on Management Ant of Data[C]. Seattle: ACM Press, 1998. 73-84.

- [6] 张立庆, 刘耀新, 杜林. 2000 年河南电网图册[Z]. 河

南省电力公司, 2001. 37-69.

ZHANG Li-qing, LIU Yao-xin, DU lin. The Atlas of Henan power grid in 2000[Z]. Electric Power of Henan, 2001. 37-69.

- [7] ZHOU Shui-geng, et al. A Fast Density-based Clustering Algorithm[D]. Shanghai: Fudan University, 1999.

- [8] 陈昊, 吴杰, 高山. 模糊聚类分析在分区负荷预测中的应用[J]. 电力需求侧管理, 2006, (5): 12-15.

CHEN Hao, WU Jie, GAO Shan. Application of Fuzzy Clustering in Subarea Load Forecasting[J]. Application of Fuzzy Clustering in Subarea Load Forecasting[J]. Power DSM, 2006, (5): 12-15.

收稿日期: 2007-06-24; 修回日期: 2007-08-02

作者简介:

李双伟(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统信息整合及数据平台; E-mail: lswzju@gmail.com

范斗(1968-), 男, 主任工程师, 主要从事电力系统自动化的工作;

王康元(1973-), 男, 讲师, 主要从事电力系统信息整合方面的教学与研究工作。