

电压型高温超导储能系统变流器设计与试验

诸嘉慧¹, 程 强^{1,2}, 杨 斌^{1,2}

(1. 中国电力科学研究院 电工研究所, 北京 100192;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 为提高电力系统动态稳定性, 实现高温超导储能系统对电网电压跌落的有效补偿, 采用三单相 H 桥型拓扑结构, 搭建了一个电压型高温超导储能系统功率变换器。对控制系统、信号调理系统、功率和驱动保护电路进行了设计; 基于 SPWM 脉冲触发方式, 应用 TMS320F2812 型 DSP 实现了动态电压瞬时跌落补偿的全数字闭环控制, 给出了相关的软件程序设计方法。补偿电压实验波形表明该变流器具备应用高温超导储能系统进行动态电压跌落补偿的性能要求。

关键词: 高温超导储能系统; 电压跌落; 电压型变流器; TMS320F2812 型 DSP; 设计与试验

中图分类号: TM 761; TM 917

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)02-0119-05

0 引言

电力系统电压受到干扰造成负荷侧电压短时跌落(几个周期至几十个周期)是造成敏感负荷和设备故障的主要原因^[1-2]。高温超导储能系统(SMES)^[3-5]可以在毫秒内产生补偿电压, 抵消系统电压所受干扰, 维持负荷侧电压不变, 很好地实现了对电网电压瞬时跌落的补偿, 具有能量转换效率高、响应速度快的特点。

SMES 变流器按拓扑结构主要分为两大类: 电流型换流器^[6-7]和电压型换流器^[8], 从目前应用来看, 由于电压型换流器的控制技术比电流型成熟, 便于超导单元与电网隔离运行, 因此应用更加广泛。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, 工作性能不太理想。

考虑到三单相 H 桥型结构具有直流电压利用率高、三相电压独立灵活控制的优点^[9], 本文应用该拓扑结构设计了一台高温 SMES 电压型换流器以实现电力系统电压跌落的补偿。根据主电路结构进行了主要功率元器件参数设计。以 TMS320F2812 型 DSP 作为核心处理器进行控制系统的软、硬件设计, 详细阐述了控制系统的结构和各功能模块的设计原理。从控制系统的需求出发, 提出了系统软件程序的设计方法, 针对 DSP 的初始化、中断、AD 采样及 SPWM 生成的程序实现, 给出了主要软件设计流程。最后对电压型变流器软、硬件系统进行了试验研究。

1 SMES 系统结构及工作原理

在大功率电压补偿场合, 使用较广泛的是带串联变压器的拓扑结构。SMES 变流系统和电网之间通

过串联变压器相连, 如图 1 所示。整个补偿系统主要包括电压型换流器、直流侧储能单元(包括斩波器和超导线圈)、低通滤波器三大部分, 通过隔离变压器串入电网。正常状态时超导线圈储存的能量可以用于短时间电网侧动态电压跌落补偿。

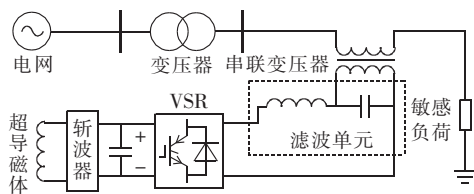


图 1 基于 SMES 的 DVR 拓扑结构

Fig.1 Topology of DVR based on SMES

2 SMES 变流器系统设计

2.1 SMES 变流器拓扑结构设计

考虑到高温 SMES 自身的特点, 基于瞬时电压跌落补偿的变流装置在主电路结构、参数设计、补偿原理和控制方法上均不同于传统的动态电压恢复器(DVR)。由于三相电网系统负载在多数情况下是不对称的, 同时为了提高三相四线制电源的可靠性, 当某一相出现故障, 另外两相还可以继续供电, 因此本文应用三单相 H 桥型结构设计了电压型 SMES 变流器, 利用该变流器可以独立进行三相电压凹陷补偿。

图 2 为高温 SMES 变流器主电路拓扑图。该主电路采用 3 个单相逆变器组合控制的方式, 经过串联变压器接入电网和负载之间, 滤波器位于串联变压器和 Delta 逆变器之间。在直流母线电压电源和滤波电容之间设计了 R_1 和继电器开关 KM_1 组成的合闸软启动电路。 R_1 可防止直流电压电源对电解电容 C_1 充电产生过大冲击电流。延时开关 KM_1 由 DSP 的 I/O 口控制。超导磁体单元连接在“H 桥”型斩波电

单元、单稳态触发器及倍频单元组成,其系统组成框图如图 6 所示。

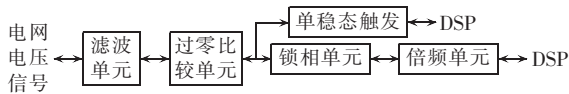
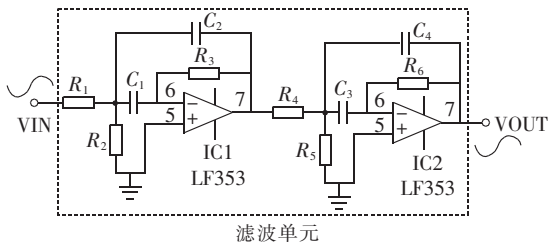


图 6 硬件锁相系统组成框图

Fig.6 Hardware phase locking system

在硬件锁相电路设计中,锁相电路各模块原理图如图 7 和图 8 所示。



滤波单元

图 7 滤波单元原理图

Fig.7 Schematic diagram of filter unit

图 7 中,滤波电路由集成运放 LF353、电阻 $R_1 \sim R_6$ 及电容 $C_1 \sim C_4$ 组成,可以将来自霍尔电压传感器检测到的电网电压信号 VIN 中的高频分量滤除,得到与电网电压成比例的同频同相的控制信号。过零比较电路由集成运放比较器 LM311 和电阻 R_{10} 、 R_{11} 、 R_{12} 构成,用于检测控制信号的过零点,其输出的方波信号 U_{comp} 作为锁相电路的参考基准输入图 8 中的 AIN。

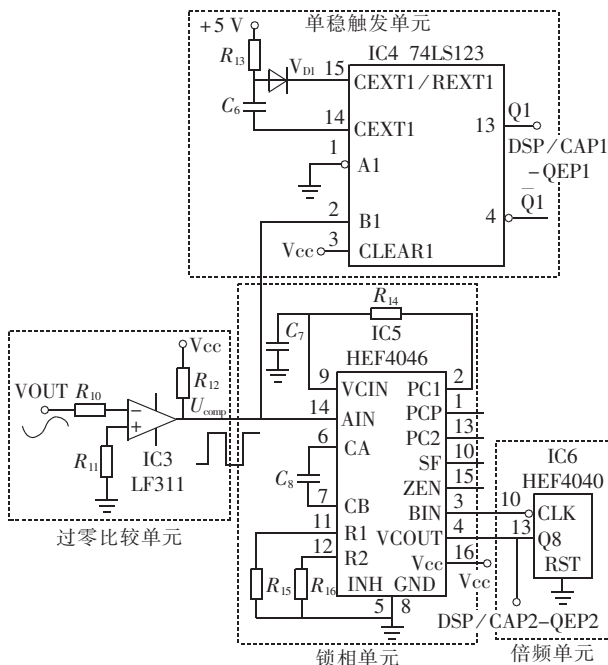


图 8 电压比较、锁相、倍频及单稳触发电路

Fig.8 Circuit of voltage-comparator, phase-locking, frequency-multiplication and mono-stable flip-flop unit

图 8 中,单稳态触发器 74LS123 检测过零比较电路的方波输出电压 U_{comp} 的上升沿,通过调节电阻 R_{13} 和电容 C_6 ,可以输出一个脉宽可调的低频方波信号;锁相电路采用单片集成的模数混合锁相环

HEF4046 构成,为了简化设计,采用其内部的异或门相位比较器 PD1 来完成相位-电压的转换。

倍频电路采用 12 位二进制串行计数器 HEF4040 以实现输入信号 CLK 的 $2^1 \sim 2^{12}$ 次倍频,在本设计方法中,为了提高锁相环的精度,节省 DSP 的计算时间,采用 2^8 次倍频模式。最后将单稳态触发器的输出信号以及倍频后的信号送至 TMS320 F2812 型 DSP 的捕获单元,在程序中通过计算输入脉冲的个数来计算各相角的位移,完成各相电压相角的检测和跟踪。

2.5 接口电路与辅助电源

功率驱动电路采用智能功率驱动模块,其内部集成了 6 个 IGBT 功率器件及短路和驱动电压欠压保护电路。DSP 控制芯片输出的 6 路 PWM 信号分别接到功率模块的 6 个 IGBT 开关器件的控制端,驱动三相逆变桥桥臂的开关动作。在 PWM 数字信号和功率驱动模块之间接有光电隔离电路,防止强电对弱电的电压/电流冲击,以免损毁 DSP 芯片。模块内部含有 6 个接口电路,4 个独立的电源,其中 DC/DC 电源模块原理设计框图如图 9 所示。输入为 +15 V 的直流电源,通过变压器输出隔离的 4 路 +15 V 电源,给光耦供电;输入侧高速信号光耦 HCPL4504 可将输入信号进行隔离放大;在电路出现故障时,模块发送的 FO 故障信号通过低速光耦 NEC PS2501 送给 DSP,关断触发脉冲。

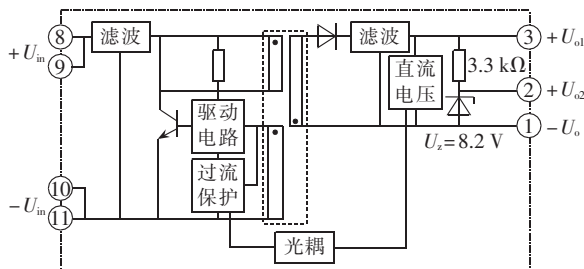


图 9 辅助电源原理图

Fig.9 Schematic diagram of auxiliary power supply

3 基于 DSP 的控制系统程序设计

3.1 DSP 控制程序设计

高温 SMES 变流器的核心控制单元采用 TMS 320F2812 型 DSP^[14],本文基于超导储能的瞬时电压跌落补偿控制算法^[15-16],应用 CCS2000 实验平台进行编程。所设计的主程序由初始化程序、主程序、外部中断保护程序、定时器下溢中断程序、AD 中断子程序等组成。程序流程图如图 10 所示。3 个中断程序的优先级设定外部中断保护程序为最高,定时器下溢中断程序为最低。主要的控制算法是在 AD 中断程序中完成的。

3.2 中断程序

a. AD 中断: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)。

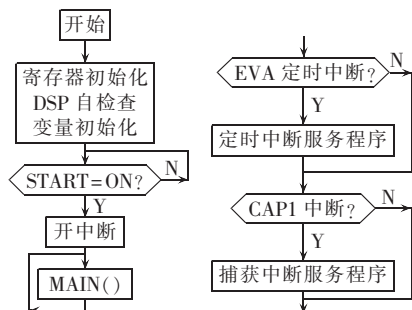


图 10 DSP 控制主程序流程图

Fig.10 Flowchart of DSP control program

b. CAP1 捕获中断:使能 CAP1 捕获中断服务程序,每个周期过零点的触发信号保证 AD 中断内计数器的清零,完成同步信号相位检测响应。

c. 外部中断保护程序:主要完成主电路过电流、过电压,IPM 电路发生短路、驱动电源欠电压时的故障响应,其保护程序由 DSP 芯片的功率驱动保护中断输入引脚 PDPINTA、PDPINTB 及 IPM 的故障发生信号 FO 触发。在发生上述故障时,DSP 启动保护中断程序,封锁 PWM 脉冲输出,使得控制装置停机。

3.3 PWM 子程序

通过对 TMS320F2812 型 DSP 芯片内的事件管理器 EVA 模块内的通用定时器 Timer1 和 Timer2, EVB 模块内的通用定时器 Timer3 和 Timer4,以及比较单元 COMP1~COMP6 的设置,产生三单相 H 桥型高温 SMES 变流器所需要的 SPWM 脉冲频率和死区时间。

4 系统调试实验

4.1 信号调理波形

在信号调理电路中,对电网三相电压进行采样,应用过零比较电路,在电压过零点输出相应的信号,采用单稳触发器对电压相位进行采样。

示波器观测到电网三相电压及周期脉冲实验波形如图 11 所示。图 11 中正弦波形是输入电网电压采样信号,峰峰值约 2 V,频率 50 Hz;输出脉冲信号是幅值约 5 V,与电网电压信号同频的周期脉冲,脉冲出现在正弦信号上升过零点的时刻。通过单稳态触发器,能够在过零比较电路输出方波的上升沿触发一个窄脉冲,该脉冲宽度可以通过调节外围的 RC 值来确定。此脉冲作为 DSP 捕获单元中断的使能输入,用于确定正弦电压信号的相角位置。

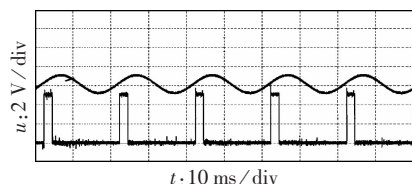


图 11 单稳态触发单元输出波形

Fig.11 Output waveform of mono-stable flip-flop unit

4.2 DSP 脉冲控制信号波形

采用 SPWM 脉宽调制,产生 PWM 脉冲驱动 SMES

变流器的功率管 IGBT。当电压没有发生跌落,不进行补偿的时候,PWM 输出占空比为 50% 的脉冲,其调制比不变,当采样到电压发生跌落,PWM 为调制比变化的脉冲信号,其变化率由参考电压和跌落电压决定。图 12 是在发生电压跌落变化过程中,DSP 控制电路发出的 A 相 V_{T1} (上图) 和 V_{T3} (下图) 2 路 PWM 脉冲,其开关频率为 6 kHz。

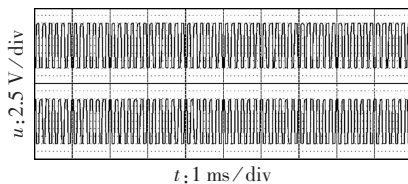


图 12 DSP 触发的 SPWM 脉冲波形

Fig.12 SPWM pulses triggered by DSP

4.3 功率电路输出波形

根据图 2 的实验系统,以不控整流模块为直流电容充电,来等效超导单元经斩波模块给直流电容充电,并模拟三相电网发生电压跌落故障,调试变流器功率输出。图 13 为电网发生三相电压跌落故障过程中,该功率电路产生的逆变电压实验波形。从中可见,当电网电压没有发生跌落时,三相补偿电压均为零,不进行补偿;当发生三相电压跌落时,功率电路输出三相逆变电压,对电压跌落进行补偿;跌落故障结束后,补偿电压恢复为零,不再进行补偿。根据实验波形,尽管产生的补偿电压有一定程度的暂态谐波,但可以看出,该变流器对电压跌落故障具有较好的响应速度和动态补偿效果。

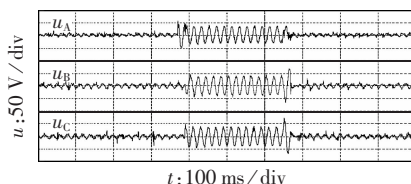


图 13 变流器输出补偿电压实验波形

Fig.13 Experimental waveforms of compensation voltage outputted from converter

5 结论

a. 为高温 SMES 变流器设计了一种三单相 H 桥型主电路拓扑结构,提出了各模块硬件电路及其元器件参数设计方法。

b. 以 TMS320F2812 型 DSP 作为核心处理器进行控制系统的软件设计,实现了三相补偿电压独立解耦控制策略。

c. 通过分析信号调理板、DSP 控制板及功率变换电路的逆变电压实验波形,结果证明该变流器可以在供电侧发生电压跌落瞬时迅速动作,具有较好的电压动态补偿效果。

参考文献:

[1] SOMPOB P,TOSHIFUMI I,SADATOSHI K. Voltage sag com-

- pensation with minimum energy injection by use of a micro-SMES[J]. Electrical Engineering in Japan (English Translation of Denki Gakkai Ronbunshi), 2002, 141(3): 70-80.
- [2] 余江, 曾建平. SMES 及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(3): 32-34.
- YU Jiang, ZENG Jianping. Relative problems of using SMES in electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(3): 32-34.
- [3] BUCKLES W. Superconducting magnetic energy storage[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 16-20.
- [4] 刘逊, 朱晓光, 褚旭, 等. 基于超导储能的瞬时电压跌落补偿[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 40-44.
- LIU Xun, ZHU Xiaoguang, CHU Xu, et al. Voltage sag compensation by SMES[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 40-44.
- [5] 郭风, 赵彩宏, 肖立业. 基于超导储能的动态电压补偿的研究[J]. 电气应用, 2005, 24(9): 84-87.
- GUO Feng, ZHAO Caihong, XIAO Liye. Research of DVR using superconducting magnetic energy storage[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(9): 84-87.
- [6] IGLESIAS I J, ACERO J, BAUTISTA A. Comparative study and simulation of optimal converter topologies for SMES systems[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 1995, 5(2): 254-257.
- [7] 蒋晓华, 褚旭, 吴学智, 等. 20 kJ/15 kW 可控超导储能实验装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 88-91.
- JIANG Xiaohua, CHU Xu, WU Xuezhong, et al. A 20 kJ / 15 kW SMES system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 88-91.
- [8] YU Jiang, DUAN Xianzhong, TANG Yuejin, 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.
- [9] 黄晓华, 李学斌, 张志丰, 等. 用于 SMES 的电压型换流器试验研究[J]. 继电器, 2008, 36(3): 51-55.
- HUANG Xiaohua, LI Xuebin, ZHANG Zhifeng, et al. Experimental research of voltage source inverter for SMES[J]. Relay, 2008, 36(3): 51-55.
- [10] 刘珺, 邵亮. 传统 LC 滤波器与新型阻尼滤波器的比较[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11): 49-51.
- LIU Jun, SHAO Liang. Comparison of LC filters and damping filters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 49-51.
- [11] JUERGIN K, STENKE. Use of an LC filter to achieve a motor-friendly performance of the voltage source inverter[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 13(4): 649-654.
- [12] 万心平, 张厥盛. 锁相环路原理与应用[M]. 修订本. 北京: 人民邮电出版社, 1984: 25-57.
- [13] KAURA V, BLASKO V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33(1): 582.
- [14] TI Incorporated. TMS320C28x 系列 DSP 的 CPU 与外设[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 16-70.
- [15] CHOI S S, LI B H, VILATHGAMUWA D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 51-57.
- [16] 李学斌, 赵彩宏, 肖立业. 超导储能用大功率换流器及其控制技术[J]. 电力电子技术, 2006, 10(5): 124-126.
- LI Xuebin, ZHAO Caihong, XIAO Liye. Topologies of high power converters and the control schemes of SMES system[J]. Power Electronics, 2006, 10(5): 124-126.

(编辑: 李 玲)

作者简介:

诸嘉慧(1977-), 女, 江苏无锡人, 工程师, 博士, 研究方向为超导电力技术、电磁场的数值计算、大型发电机的故障分析与保护、电力电子技术(E-mail: zhujiahui@epri.sgcc.com.cn);

程 强(1981-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与超导电力技术;

杨 斌(1984-), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 研究方向为超导电力技术和电力电子技术。

Design and experiment of voltage source converter for high temperature superconducting magnetic energy storage system

ZHU Jiahui¹, CHENG Qiang^{1,2}, YANG Bin^{1,2}

(1. Electrical Engineering Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electric Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To compensate the voltage drop and improve the dynamic stability of power supply, a voltage source converter with the topology of three single-phase H-type bridges is proposed for the high temperature superconducting magnetic energy storage system. Its control system, signal conditioning system, power conversion circuit and drive & protection circuit are designed. TMS320F2812 DSP is applied to implement the full-digital close-loop control for instantaneous voltage sag compensation based on SPWM and its relevant software program design is presented. The experimental results show the effectiveness of the designed converter in dynamic voltage sag compensation.

This work is supported by the Key Project of State Grid Corporation of China(dghz200810).

Key words: high temperature superconducting magnetic energy storage system; voltage sag; voltage source converter; TMS320F2812 DSP; design and experiment