

# 高温超导磁储能用斩波器仿真及试验

杨 斌<sup>1,2</sup>, 诸嘉慧<sup>2</sup>, 郭云峥<sup>1,2</sup>, 方 进<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 中国电力科学研究院 电工所, 北京 100192)

**摘要:** 针对高温超导磁体充、放电对超导储能系统斩波单元稳定运行的要求, 对超导磁储能电压型功率调节系统进行了研究, 采用状态空间平均法建立斩波器充电及放电模式的数学模型, 分析斩波器充电、续流及放电的工作原理, 并设计斩波器的电流闭环反馈控制方法。基于第 2 代高温超导线圈, 考虑到线圈电感量及其限流保护, 应用 Matlab 软件进行了斩波器充电和放电工作模式仿真, 并且搭建了一个超导储能的斩波器试验系统, 应用 DSP2812 处理器实现对超导磁体充、放电控制。磁体电压、磁体电流及直流母线电流仿真与实验波形吻合较好, 所应用的斩波器数学模型及其控制方法能实现对超导磁体快速稳定地充、放电和续流。

**关键词:** 高温超导磁储能; 功率调节系统; 斩波器; 电流环控制; 仿真; 试验

**中图分类号:** TM 46

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2010)12-0051-04

随着现代电力电子技术及高温超导材料的快速发展, 高温超导磁储能 (HT-SMES) 装置逐渐应用于电力系统<sup>[1-2]</sup>。超导磁储能 (SMES) 功率调节系统 (PCS) 通过变压器与电网连接, 具有蓄能量大、转换效率高、响应迅速、对环境无污染、控制方便、使用灵活等优点<sup>[3]</sup>, 能提高电网的稳定性, 改善电网电能质量。

作为 SMES 装置中的关键部分, PCS 的拓扑结构有电流型<sup>[4-5]</sup>和电压型<sup>[6-7]</sup> 2 种形式。目前, 电压型 PCS 的控制技术更加成熟, 而且应用也较广泛。在电压型 PCS 中, 斩波器的设计尤为重要, 它实现超导磁体与电网隔离, 能够将超导磁体的大电流快速转换为电压型变流器 (VSC) 所能承受的电压<sup>[8]</sup>, 对超导磁体快速、稳定地充电和放电。

本文对 SMES 电压型 PCS 进行了研究, 分析斩波器充、放电工作原理, 运用状态空间平均法建立斩波器数学模型, 并设计电流闭环控制策略。基于第 2 代

YBCO 高温超导线圈, 考虑到线圈电感及其限流保护, 进行了斩波器充电、放电模式的仿真及试验, 而且磁体电压、磁体电流及直流母线电流波形一致, 斩波器能对超导磁体快速稳定地充、放电。

## 1 SMES 电压型 PCS

图 1 是 SMES 电压型 PCS 的原理图, 包括 1 个四象限三相半桥 VSC 和 1 个二象限斩波器, 两者间以直流电容相联。 $u_a, u_b, u_c$  为网侧相电压,  $V_{Ta}, V_{Tb}, V_{Tc}$  为 VSC 上桥臂开关管,  $V'_{Ta}, V'_{Tb}, V'_{Tc}$  为 VSC 下桥臂开关管, 且上、下桥臂开关互补导通。其中, VSC 通过 PWM 整流器控制, 发出电网所需的有功和无功功率; 而斩波器则通过调节超导磁体上的电压, 与电网交换所需的有功和无功功率。直流母线电容起到提供 VSC 和斩波器的稳定支撑电压的作用<sup>[9]</sup>, 并实现了超导磁体与电网的隔离, 有利于保护超导磁体不受电网的影响。将磁体与斩波器相结合构成稳压源, 再根据

收稿日期: 2010-03-24; 修回日期: 2010-10-08

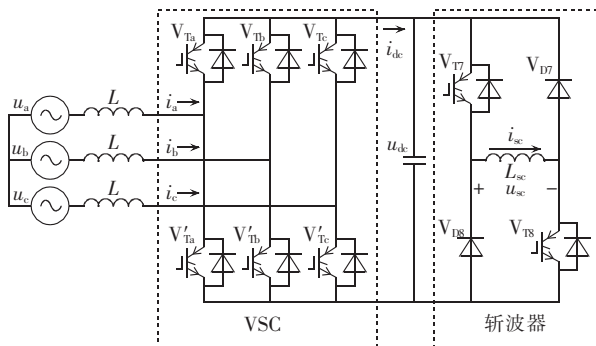


图 1 SMES 电压型 PCS 原理图

Fig.1 Voltage source PCS of SMES

实际的应用需要级联构成大容量 VSC,这将给大容量 SMES 在电网中的应用提供极大的方便。

## 2 电压型 PCS 斩波器设计

### 2.1 斩波器工作原理

图 2 是二象限斩波器的结构,由 2 个 IGBT 和 2 个快速功率二极管组成 H 桥型结构<sup>[10]</sup>。 $L_{sc}$  为超导磁体的电感; $i_{sc}$  为流过超导磁体的电流; $i_{dc}$  为 VSC 直流端输出电流; $u_{dc}$  为直流母线电容  $C$  的端电压。通过控制  $V_{T7}$ 、 $V_{T8}$  开通和关断实现 SMES 储能磁体充电、放电和续流工作状态<sup>[11]</sup>。斩波器中的  $V_{T7}$  及  $V_{T8}$  同时导通,磁体处于充电状态; $V_{T7}$  及  $V_{T8}$  同时关断,磁体处于放电状态; $V_{T7}$  开通、 $V_{T8}$  关断,或  $V_{T8}$  开通、 $V_{T7}$  关断,磁体续流。

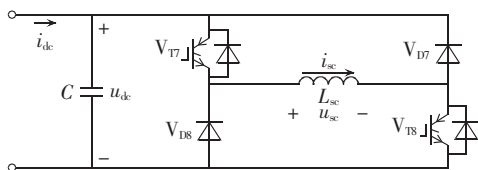


图 2 SMES 用斩波器拓扑结构

Fig.2 Topology of SMES chopper

该斩波器能在 2 个象限工作,不论变流器工作在整流还是逆变状态,都能确保电流在超导线圈中流动方向不变,并保证超导线圈有闭合的通路。根据电网的实际需要调节 2 个开关器件的导通和关断实现对超导线圈中的充、放电电流进行斩波控制。

### 2.2 斩波器数学模型<sup>[12]</sup>

当斩波器对磁体进行充、放电时,电容电压  $u_{dc}$  稳定,由 VSC 中的 PWM 整流器控制。线路中的引线电阻、开关损耗和磁体损耗可以用一个与超导磁体串联的等效电阻  $R_{sc}$  代替。

#### 2.2.1 充电模式数学模型

充电模式全阶段有充电和续流 2 种工作状态。此时,  $V_{T7}$  始终处于开通状态,  $V_{T8}$  交替开通和关断。

在充电状态下,电压型 PCS 工作在整流状态,维持  $u_{dc}$  电压稳定。在斩波器中,  $V_{T7}$  及  $V_{T8}$  同时开通,母线电容给线圈  $L_{sc}$  充电,磁体电流  $i_{sc}$  上升,  $L_{sc}$  中能量增加。其数学模型表示为

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = -R_{sc} i_{sc} + u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

在续流状态下,斩波器中的  $V_{T7}$  开通,  $V_{T8}$  关断,系统通过  $V_{T7}$ — $L_{sc}$ — $V_{D8}$  形成续流回路,当忽略开关损耗时,磁体电流  $i_{sc}$  不变,  $L_{sc}$  中能量不变。其数学模型表示为

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = -R_{sc} i_{sc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)(2)求和平均,并考虑到 IGBT 开关管导通占空比为  $D$  ( $0 < D < 1$ ),二极管导通占空比为  $1-D$ ,得到磁体充电的状态空间平均模型为

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = -R_{sc} i_{sc} + D u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - D i_{sc} \end{cases} \quad (3)$$

#### 2.2.2 放电模式数学模型

同理,放电模式全阶段也有放电和续流 2 种工作状态。此时,  $V_{T8}$  始终处于关断状态,  $V_{T7}$  交替开通和关断。

在放电状态下,斩波器中的  $V_{T7}$  及  $V_{T8}$  同时关断,  $V_{D7}$  及  $V_{D8}$  续流,线圈  $L_{sc}$  放电给母线电容。此时,电压型 PCS 工作在逆变状态,向电网回馈能量。磁体电流  $i_{sc}$  下降,  $L_{sc}$  中能量减少。其数学模型表示为

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = -R_{sc} i_{sc} - u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} + i_{sc} \end{cases} \quad (4)$$

在续流状态下,斩波器中的  $V_{T7}$  开通,  $V_{T8}$  关断,与充电模式中的续流模型式(2)相同。

同理,由式(2)(4)求和平均,得到磁体放电的状态空间平均模型为

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = -R_{sc} i_{sc} - (1-D) u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} + (1-D) i_{sc} \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 斩波器控制

通过控制超导磁体电流来调节超导磁体充、放电的状态<sup>[13-14]</sup>,当磁体电流  $i_{sc}$  大于某一设定值时,斩波器控制超导磁体向电容放电;当磁体电流  $i_{sc}$  小于另一设定值时,通过斩波器给超导磁体充电。为保证电容电压  $u_{dc}$  稳定,由 VSC 中的 PWM 整流器来控制。

在磁体充、放电过程中,采用电流闭环控制<sup>[15]</sup>。将采样电流  $i_{sc}$  与指令电流  $i_{sc}^*$  比较,误差送入 PI 调节器计算斩波器的占空比,再结合移相技术产生相应的驱动信号 PWM<sub>7</sub> 和 PWM<sub>8</sub> 来控制  $V_{T7}$  和  $V_{T8}$  2 个开关管的动作,控制线圈电流的变化速率,实现对超导磁体充、放电速度的控制。斩波器电流闭环控制框图见图 3。

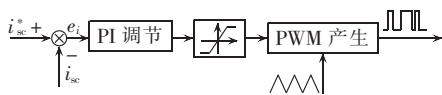


图 3 斩波器控制框图

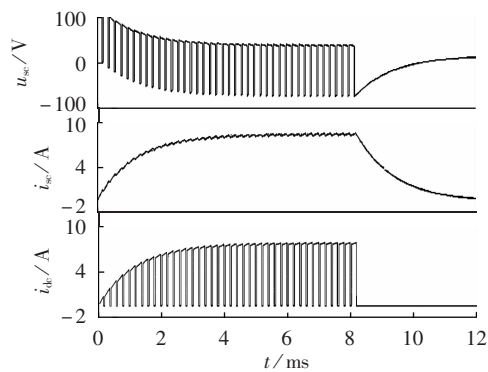
Fig.3 Block diagram of chopper control

### 3 仿真及试验结果

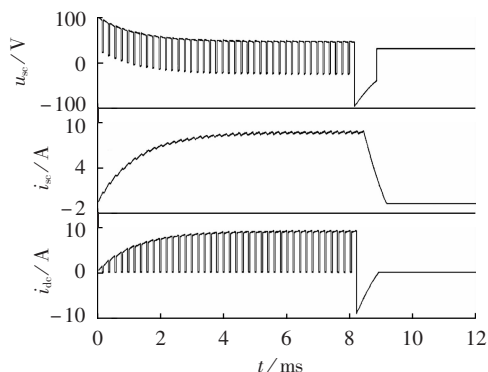
#### 3.1 斩波器仿真

用 Matlab/Simulink 软件进行仿真。由于母线侧电容电压稳定,用直流源  $U_{dc}$  提供,考虑到实际单线圈磁体电感及其限流保护,负载采用线圈与限流电阻串联结构。限流电阻可以相当于斩波器充、放电模型中的损耗等效电阻  $R_{sc}$ 。SMES 斩波器电路仿真参数如下:超导线圈电感  $L_{sc} = 12 \text{ mH}$ ,直流侧电压  $U_{dc} = 100 \text{ V}$ ,限流电阻  $R_{sc} = 10 \Omega$ ,PWM 开关频率  $5 \text{ kHz}$ 。

图 4(a)(b)分别为斩波器充电和放电模式下磁体电压  $u_{sc}$ 、电流  $i_{sc}$  和直流母线电流  $i_{dc}$  的仿真波形。充电模式下,在  $0 \sim 12 \text{ ms}$  内,  $V_{T7}$  始终开通;在  $0 \sim 8 \text{ ms}$ ,  $V_{T8}$  的驱动信号提供  $80\%$  占空比的脉冲给  $V_{T8}$ ,在  $8 \sim 12 \text{ ms}$ ,  $V_{T8}$  关断,磁体线圈电流续流。放电模式下,在  $0 \sim 8 \text{ ms}$ ,  $V_{T7}$  开通,  $V_{T8}$  驱动信号发出  $80\%$  占空比的脉冲给  $V_{T8}$ ;在  $8 \sim 12 \text{ ms}$ ,  $V_{T7}$  和  $V_{T8}$  同时关断,磁体线圈向直流侧放电。



(a) 充电模式



(b) 放电模式

图 4 磁体充、放电模式仿真波形

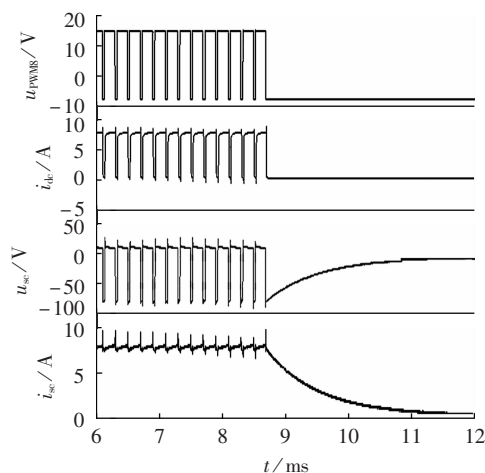
Fig.4 Simulative waveforms in charging and discharging mode

#### 3.2 斩波器试验结果

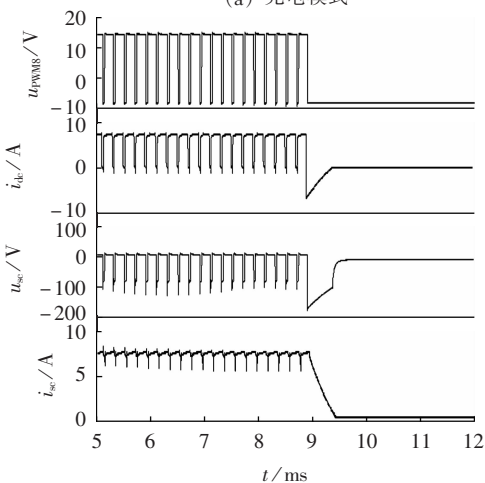
根据斩波器工作模式和控制策略,基于 YBCO

高温超导线圈,实际搭建了一个 SMES 系统的斩波器试验系统:直流侧电压  $U_{dc} = 100 \text{ V}$ ,额定电流  $I_{sc} = 8 \text{ A}$ ,开关频率  $5 \text{ kHz}$ ,YBCO 超导线圈电感  $L_{sc} = 12 \text{ mH}$ ,阻尼电阻  $R_{sc} = 10 \Omega$ 。控制算法用 DSP2812 控制器软件实现。

图 5(a)(b)分别为充电和放电模式下  $V_{T8}$  驱动信号  $u_{PWM8}$ 、直流母线电流  $i_{dc}$ 、磁体线圈电压  $u_{sc}$  及电流  $i_{sc}$  试验波形。可见,斩波器可对超导磁体快速稳定地充电,达到额定电流后磁体续流,由于续流回路内阻,磁体电流衰减为零。斩波器对超导磁体稳定充电,超过额定电流后直流侧电流流向母线电容,磁体向电容快速放电。试验结果与仿真中磁体电压、电流母线电流波形一致,表明该斩波器控制策略较好,且能够实现超导磁体快速、稳定充电和放电功能。



(a) 充电模式



(b) 放电模式

图 5 充、放电模式试验波形

Fig.5 Experimental waveforms in charging and discharging mode

### 4 结论

对 SMES 电压型 PCS 进行了研究,分析了斩波器充电、放电和续流工作原理,运用状态空间平均法建立了斩波器充电及放电模式的数学模型,并设计了电流闭环控制方法。

针对实际超导磁体线圈的电感以及线圈的限流保护,进行了斩波器的充电、放电模式的仿真及试验。结果表明该斩波器能实现对超导磁体快速稳定充、放电,满足超导储能系统应用的需要。

## 参考文献:

- [1] OTTONELLO L, CANEPA G, ALBERTELLI P, et al. The largest Italian SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 602-607.
- [2] 周双喜, 吴畏, 吴俊玲, 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, 28(4): 1-5.  
ZHOU Shuangxi, WU Wei, WU Junling, et al. Application of superconducting magnetic energy storage to improve transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 1-5.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Hui, LIU Ping, DAI De, et al. DSP controlled chopper in power conditioning system for superconducting magnetic energy storage[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Beijing, China: [s.n.], 2000: 1395-1399.
- [5] 彭晓涛, 程时杰, 王少荣, 等. 一种新型的电流源型变流器 PWM 控制策略及其在超导磁储能装置中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 60-66.  
PENG Xiaotao, CHENG Shijie, WANG Shaorong, et al. A novel PWM control for current source converter and its application in a superconducting magnetic energy storage unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 60-66.
- [6] YU Jiang, DUAN Xianzhong, TANG Yuejin, et al. Control scheme studies of voltage source type superconducting magnetic energy storage under asymmetrical voltage[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 750-753.
- [7] 王少荣, 彭晓涛, 唐跃进, 等. 电力系统稳定控制用高温超导磁储能装置及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 44-50.  
WANG Shaorong, PENG Xiaotao, TANG Yuejin, et al. Apparatus and experiment of high temperature superconducting magnetic energy storage used for power system stability enhancement[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 44-50.
- [8] 单德鹏, 白焯, 王秋良. 超导储能系统用斩波器的原理及设计[J]. 低温物理学报, 2007, 29(1): 34-37.  
SHAN Depeng, BAI Ye, WANG Qiulaing. Principle and design of a chopper applied in SMES[J]. Chinese Journal of Lower Temperature Physics, 2007, 29(1): 34-37.
- [9] ZHU Guiping, WANG Zanzi, JIANG Xiaohua. Design and research on a multi-functional combined device incorporating a SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2018-2021.
- [10] PADIMITI D S, CHOWDHURY B H. Superconducting Magnetic Energy Storage system (SMES) for improved dynamic system performance[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: [s.n.], 2007: 1-6.
- [11] 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, 29(16): 76-78, 92.  
LI Shun, ZHAO Caihong, XIAO Liye. Experimental research of current regulator for superconducting magnetic energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 76-78, 92.
- [12] 唐跃进, 石晶, 任丽. 超导磁储能系统 (SMES) 及其在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 86-88.
- [13] 郭文勇, 赵彩宏, 肖立业. 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. 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.
- [14] 陈明, 汪光森, 刘德红, 等. 多重化双向 DC-DC 变换器复合校正双闭环控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 83-88.  
CHEN Ming, WANG Guangsen, LIU Dehong, et al. Dual close-loop control strategy for multi-channel interleaving bidirectional DC-DC power converter based on compound regulation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 83-88.
- [15] 王守仁, 金新民. 应用于超导储能的双向 DC/DC 变换器的设计[J]. 现代电力, 2006, 23(1): 49-51.  
WANG Shouren, JIN Xinmin. Design for the bidirectional DC/DC converter for the application of superconducting magnetic energy storage[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(1): 49-51.

(编辑: 李育燕)

## 作者简介:

杨斌(1984-), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、超导电力技术(E-mail: 08121975@bjtu.edu.cn);

诸嘉慧(1977-), 女, 江苏无锡人, 工程师, 博士, 研究方向为电磁场的数值计算、超导电力技术;

郭云峥(1986-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、超导电力技术;

方进(1963-), 男, 安徽六安人, 副教授, 博士后, 研究方向为超导材料及超导电力技术。

## Simulation and experiment of HT-SMES chopper

YANG Bin<sup>1,2</sup>, ZHU Jiahui<sup>2</sup>, GUO Yunzheng<sup>1,2</sup>, FANG Jin<sup>1</sup>

(1. School of Electric Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The charge and discharge of superconducting magnets request the chopper unit of HT-SMES (High Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage) system to operate stably, for which its voltage source power conditioning system is researched. The state-space averaging method is used to establish the mathematical model of chopper for studying its working principle in charging and discharging mode and its current-loop feedback control is designed. With the consideration of its actual inductance and current-limiting protection of second-generation HTSM coil, the charging and discharging mode of chopper is simulated with Matlab software. A test system of SMES chopper is built, which applies DSP2812 to control the charge and discharge of superconducting magnets. The experimental and simulative waveforms of magnet current and DC bus current inosculate well, which indicates the validity of the proposed mathematical model of chopper and its control method.

**Key words:** HT-SMES; power conditioning system; chopper; current loop control; simulation; experiment