

超导储能系统用四模块组合变流器功率控制 设计和实验研究

史云鹏¹, 李君¹, 徐德鸿¹, 唐跃进², 程时杰², 王少荣²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 华中科技大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

The Design and Experiments of the Four-modular Converters Power Control for Superconducting Magnetic Energy Storage System

SHI Yun-peng¹, LI Jun¹, XU De-hong¹, TANG Yue-jin², CHENG Shi-jie², WANG Shao-rong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. College of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: An active power and reactive power control used in four-modular converter for superconducting magnetic energy storage system is presented. The converter consists of four modules. Each module is a current source converter. Phase-shifted SPWM technique is adopted to control a directly-paralleled multi modular current source converter for Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) to reach high power and low harmonics. A 23kVA prototype multi-modular converter which is based on 863-program has been developed. The research has shown that it can control active power and reactive power independently and rapidly.

KEY WORDS: superconducting magnetic energy storage; control; active power; reactive power; converter

摘要: 讨论了超导储能系统用四模块组合变流器的有功功率、无功功率四象限控制的设计问题。为了适应大功率变流器的需要主电路结构采用四模块电流型变流器直接并联, 在调试方式上采用载波相移 SPWM 控制, 在较低的开关频率实现大功率变流器 SPWM 技术, 以扩大容量和抑制网侧谐波; 在计算功率时采用的瞬时功率理论实时的计算出变流器的有功和无功功率进行闭环控制。同时结合了 863 项目研制了 23kVA 的变流器实验样机, 对超导储能系统用电流型变流器四象限功率控制方法进行了验证。实验结果表明超导储能系统用组合变流器能独立快速地控制有功功率和无功功率。

关键词: 超导储能; 控制; 有功功率; 无功功率; 变流器

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2002AA306331)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2002AA306331).

0 引言

超导储能系统具有高储能效率和快速响应, 可用于稳定系统电压和频率^[1-2], 提高电力品质^[3-8], 是柔性交流输电的一个理想元件^[9-13]。从拓扑上看, 功率调整系统有 2 种形式: 其一为四象限电压型变流器加一个二象限斩波器; 其二为一个四象限电流型变流器。超导线圈本质上为一个电流源, 采用电流型变流器作为超导储能系统的功率调整系统更方便, 超导储能系统需要大容量的变流器。多重化是提高容量的有效方法。在实验样机中采用了电流型变流器直接并联的结构, 其主电路拓扑如图 1。

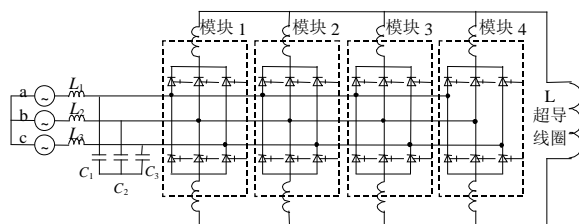


图 1 四模块组合变流器主电路

Fig. 1 Main circuit of the converter

同时为了能快速准确的放出或吸收功率, 采用基于瞬时无功功率理论的闭环功率控制方法。并进行了实验研究。

1 四模块组合变流器超导储能系统介绍

超导储能系统主要由监控屏, 变流器, 制冷系统和超导线圈组成, 结构框图如图 2。而变流器是其中连接超导线圈和电网的接口, 是关系到能否发

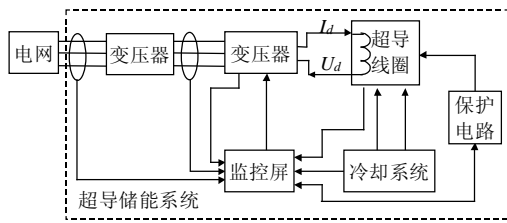


图 2 超导储能系统结构框图
Fig. 2 Diagram of SMES

超导储能系统作用的关键部分之一，受监控屏的控制实时补偿电网所需的有功和无功功率。

超导储能系统用四模块组合变流器工作于相移 SPWM 调制方式下，其实质上是多重化和 PWM 技术的有机结合。它可以在低开关频率下实现大功率 SPWM 技术，减小滤波器容量。

2 瞬时有功、无功功率的测量

将三相电压和电流的瞬时值 u_a, u_b, u_c 和 i_a, i_b, i_c 变换到 $a-b$ 两相正交的坐标系^[14-15]

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

三相电路瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a & u_b \\ u_b & -u_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)，得瞬时有功和无功功率

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_b - u_c) i_a + (u_c - u_a) i_b + (u_a - u_b) i_c]$$

当系统处于三相平衡时，根据瞬时无功功率理论，超导储能系统的有功功率和无功率化简如下

$$p = 2u_a i_a + 2u_b i_b + u_a i_b + u_b i_a \quad (4)$$

$$q = \sqrt{3} \cdot (u_b i_a - u_a i_b) \quad (5)$$

3 功率控制设计

由于超导储能系统可以起到稳定电网的作用。当电网负荷过高时，可能会出现电网电压的跌落或频率的畸变。而此时超导储能系统若能快速补偿电网的有功功率和无功功率，便可以防止电网不稳定现象的发生。为了能够快速准确的向电网放出或吸

收有功功率和无功功率。需要为超导储能系统设计良好的功率控制器。

由于电流型三相 SPWM 变流器对驱动信号的要求：任何时刻上桥臂和下桥臂都仅有一个开关管导通。而三逻辑 SPWM 的控制策略可以解决这个问题^[16]，其控制需要三逻辑的 PWM 信号 Y_a, Y_b, Y_c 的产生方式如下。 X_1, X_2, X_3 为两逻辑 SPWM 信号

$$\begin{bmatrix} Y_a(t) \\ Y_b(t) \\ Y_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \end{bmatrix}$$

变流器的直流侧电压为

$$u_{dc} = Y_a u_a + Y_b u_b + Y_c u_c \quad (6)$$

其中 u_a, u_b, u_c 为三相交流电压。假设三相交流电压平衡，载波频率为调制波频率的 $3k$ 倍 ($k \geq 1, k \in \mathbb{Z}$)，则 Y_a, Y_b, Y_c 为平衡^[17]。例如

$$Y_a = \sum_{n=2m+1}^{\infty} y_n \sin(n\omega t + q_n) \quad m \geq 0 \quad (7)$$

其中： $y_1 = \sqrt{3}/2x_1$ ； $\cos q_1 = \cos(q_x + 30^\circ)$ ； x_1 为 X_1 的基波幅度； q_x 为 X_1 的相位。将式(7)代入式(6)得

$$U_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{dc} d\omega t = \frac{3}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} U_{ph} \sin \omega t \cdot \sum_{n=2m+1}^{\infty} y_n \sin(n\omega t + q_n) d\omega t = \frac{3\sqrt{6} U_{ph} x_1 \cos(q_x + 30^\circ)}{4} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{ph} M \cos(q_x + 30^\circ)$$

又因为 $i_a(t) = Y_a I_{dc}$ ，则交流侧电流的基波分量有效值为

$$I_{ph} = \frac{y_1 I_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} M I_{dc}$$

根据功率平衡原理得

$$P = U_{dc} I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{ph} I_{dc} M \cos a \quad (8)$$

$$Q = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{ph} I_{dc} M \sin a \quad (9)$$

其中： M 为 SPWM 的幅度调制比； a 为交流侧电压和电流的相位角； U_{ph} 为交流侧相电压的有效值； I_{dc} 为系统直流侧电流。

由式(8)和式(9)可以看出，超导储能系统的有功功率和无功功率可以直接通过 SPWM 的幅度调制比 M 和相位角 a 表示，且

$$M = \frac{2\sqrt{2} \sqrt{P^2 + Q^2}}{3\sqrt{3} U_{ph} I_{dc}} \quad (10)$$

$$a = \arctan Q/P \quad (11)$$

这样结合瞬时无功功率理论求出的系统瞬时有功功率和无功功率，可以对系统进行闭环控制。在设计中，考虑在系统处于功率交换过程(即：放出或吸收有功功率和无功功率)中对其有功功率和无功功率进行闭环控制，这样可以在系统处于功率交换过程时，准确的放出或吸收电网所需要的有功功率和无功功率，起到稳定电网电压和频率的作用；

当超导线圈处于充磁或放磁过程中对超导线圈中的电流进行闭环控制，使其电流在充磁和放磁过程中准确可控，便于稳定可靠的使用超导线圈，防止过流。同时为了保护超导线圈的安全，防止其运行时出现过流的故障，为直流侧的电流设计了限流环节。其控制的框图如图3。

当超导储能系统处于功率交换过程时(双掷开

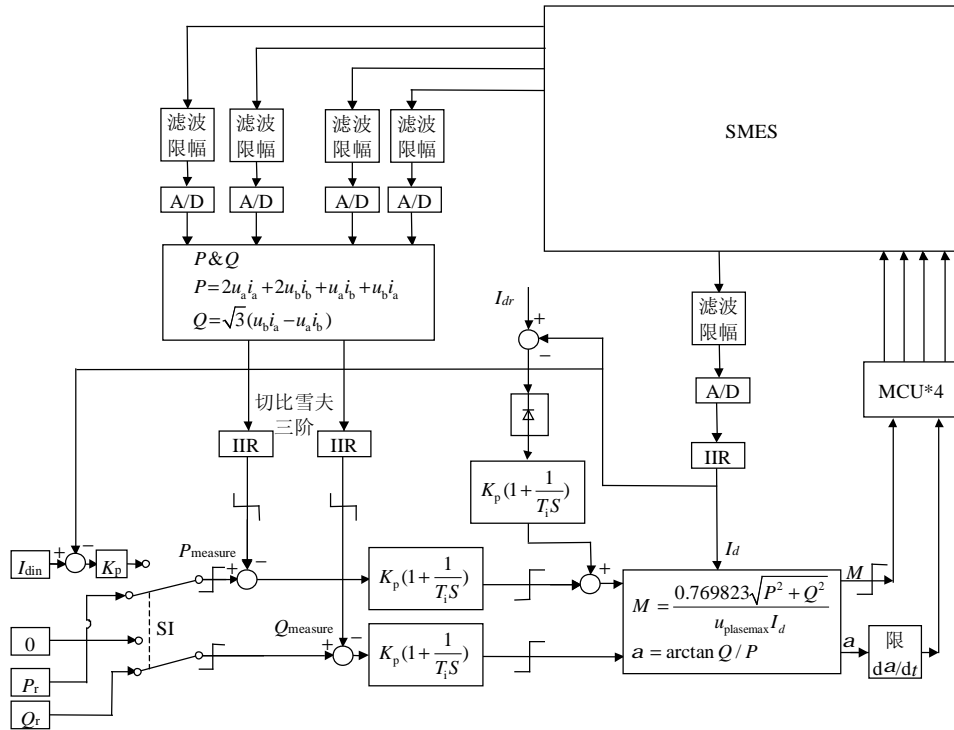


图3 SMES用四模块组合变流器功率闭环控制框图

Fig. 3 Control block diagram of the converter

关 S_1 置于下位置), 将系统的交流侧电压、电流信号经过采样后, 利用式(4)、(5)求出系统瞬时的有功功率和无功功率作为闭环控制的反馈量, 与设定的有功功率 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} 比较后, 分别通过 PI 调节器, 并对其输出结果进行限幅处理, 再通过式(10)、(11)的计算便可以得出 SPWM 控制需要的幅度调制比 M 和相位角 a , 再分别发送到控制四模块变流器的 MCU 中, 以此来控制 SMES 用四模块组合变流器的工作。

当超导储能系统处于充磁状态时(双掷开关 S_1 置于上位置), 为了能准确控制超导线圈中的充磁电流, 必须对超导线圈的电流做闭环控制。因为充磁时超导线圈电流增加, 超导线圈吸收纯有功功率(如下式)

$$P\Delta t = \frac{1}{2}L\Delta(I^2)$$

而此时超导线圈对无功功率并没有作用。所以可以

将充磁状态的无功功率设定值定为零; 而将超导线圈的电流作为反馈量与设定的充磁电流作比较后通过一个比例环节, 并对其输出结果进行限幅处理, 将其输出作为有功功率输入的设定值, 实现对超导储能系统用四模块组合变流器的工作进行控制。相对应放磁过程与充磁过程类似, 区别在于充磁过程中超导线圈的电流设定为一个特定的电流值; 而放磁过程中超导线圈的电流设定值为零, 即将超导线圈中的能量完全释放, 保护超导线圈。

4 实验

实验样机采用四模块组合变流器^[18-20], 使用 IGBT IRG4PC50F 串联一个 DESI60-06A 二极管做开关, 单模块开关频率 1050Hz。超导线圈用常导电感替代, 电感量为 100mH。交流侧线电压为 110V, 交流侧滤波电感用变压器漏感替代, 滤波电容为 200μF。直流侧总电流可到 200A, 总功率容量

可达 23kV·A。

1 台 PC 机作为上位机通过 RS-485 将设定的有功功率 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} 发送给 DSP, DSP 作系统的闭环运算, 并将计算出的 SPWM 所需的幅度调制比 M 和相位角 α , 通过 CAN 总线发送给 4 个 MCU, 以便生成 SPWM 波形控制超导储能系统, 其实验的电路框图如图 4。

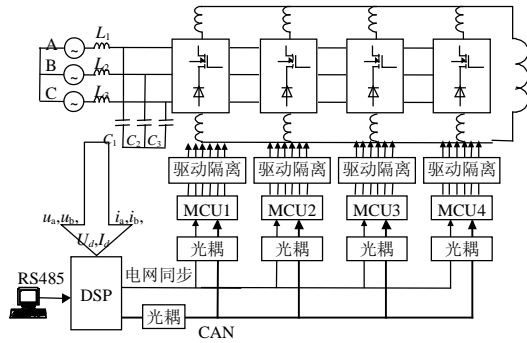
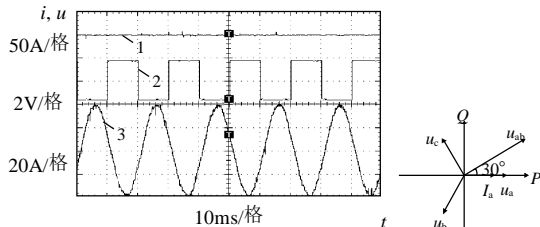


图 4 实验的电路框图

Fig. 4 Diagram of the experimental circuit

图 5 左图是系统在设定 $P_{ref}=4500W$, $Q_{ref}=0var$ 下, 超导储能系统稳态下的波形。交流侧电流滞后交流侧线电压 U_{ab} 为 30° , 即交流侧电流与交流侧相电压同相, 相位关系见图 5 右图。此时变流器的无功功率为零, 有功功率为正, 变流器吸收来自电网的纯有功功率, 变流器工作在 PQ 坐标轴的 X 正半轴。



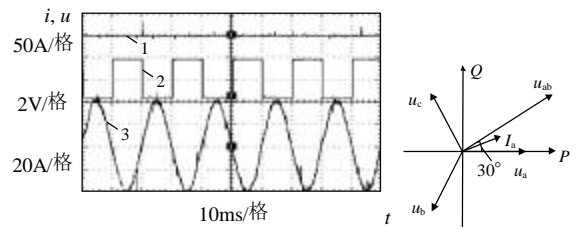
1—为直流侧电流波形, 此时 $I_{dc}=100A$;
2—为同步信号; 3—为交流侧电流波形

图 5 SMES 系统闭环 $P_{ref}=4500W$, $Q_{ref}=0var$ 时波形和相位关系

Fig. 5 The waveform of $P_{ref}=4500W$, $Q_{ref}=0var$ and phasor diagram of the AC current and line-to-line voltage

图 6 左图是系统在设定 $P_{ref}=4714W$, $Q_{ref}=2000var$ 下, 超导储能系统稳态下的波形。交流侧电流超前交流侧相电压一个锐角, 相位关系见图 6 右图。此时变流器的无功功率为正数, 有功功率为正数, 变流器工作在 PQ 坐标轴的第一象限。

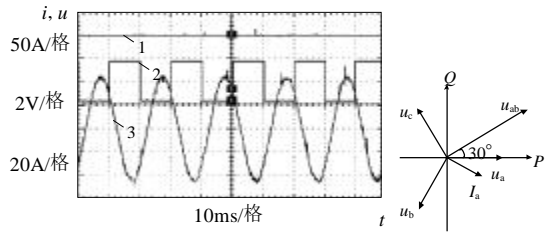
图 7 左图是系统在设定 $P_{ref}=4414W$, $Q_{ref}=-2000var$ 下, 超导储能系统稳态下的波形。交流侧电流滞后交流侧相电压一个锐角, 相位关系见图 7 右图。此时变流器的无功功率为负数, 有功功率为正数, 变流器工作在 PQ 坐标轴的第四象限。



1—为直流侧电流波形, 此时 $I_{dc}=100A$;
2—为同步信号; 3—为交流侧电流波形

图 6 SMES 系统闭环 $P_{ref}=4714W$, $Q_{ref}=2000var$ 时波形和相位关系

Fig. 6 The waveform of $P_{ref}=4714W$, $Q_{ref}=2000var$ and Phasor diagram of the AC current and line-to-line voltage



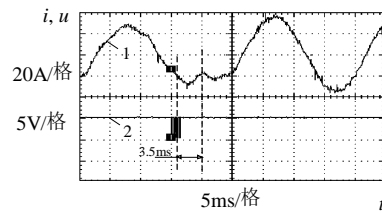
1—为直流侧电流波形, 此时 $I_{dc}=100A$;
2—为同步信号; 3—为交流侧电流波形

图 7 SMES 系统闭环 $P_{ref}=4414W$, $Q_{ref}=-2000var$ 时波形和相位关系

Fig. 7 The waveform of $P_{ref}=4414W$, $Q_{ref}=-2000var$ and Phasor diagram of the AC current and line-to-line voltage

图 8 是系统在 $P_{ref}=3000W$, Q_{ref} 由 $+2000var \sim -2000var$ 突变时, 超导储能系统动态的波形。从图 8 得出当上位机 PC 向超导储能系统发送 Q_{ref} 突变的命令后, 系统经过 3.5ms 交流侧电流的相位发生了突变。变流器通过功率闭环控制有较好的动态响应速度。

图 9、10 显示超导储能系统运行在功率闭环的



1—为交流侧电流变化的波形; 2—为系统 RS485 发送 Q_{ref} 突变时的数据波形

图 8 SMES 系统在 $P_{ref}=3000W$, Q_{ref} 由 $+2000var \sim -2000var$ 突变时的动态波形
Fig. 8 Transient response of SMES

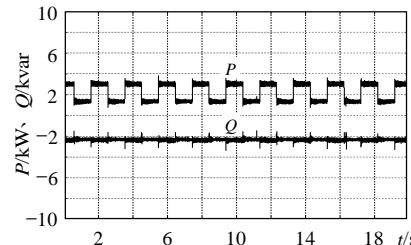


图 9 设定 P_{ref} 由 $3000 \sim 1500W$, $Q_{ref}=-2000var$ 时变流器功率的波形

Fig. 9 Waveform of the converter active power changed from $3000 \sim 1500W$ and reactive power is $-2000var$

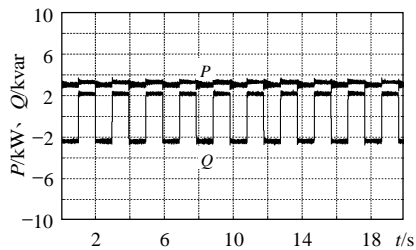


图10 设定 $P_{\text{ref}}=3000\text{W}$, Q_{ref} 由+2000var~-2000var时变流器功率的波形

Fig. 10 Waveform of the converter reactive power changed from 2000~ -2000var and active power is 3000W

控制下,可以及时快速的放出或吸收设定的有功功率和无功功率。

5 结论

为适应超导储能系统的快速的响应速度要求,本文讨论了四模块组合变流器有功功率和无功功率的控制系统设计,包括控制充磁、放磁和独立快速的有功功率和无功功率四象限控制,并通过实验研究了所设计控制方法的有效性。四模块组合变流器能够较好的适应超导储能系统应用的要求,具有响应速度快,直流侧电流脉动小的特点。

参考文献

- [1] 李立春, 马维新, 郑丽. 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.
Li Lichun, Ma Weixin, Zheng Li. Superconducting Magnetic energy storage system for enhancing transient stability[J]. J Tsinghua Univ(Sci&Tech), 2001, 41(3): 73-76(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [3] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.
Chen Xingying, Liu Mengjue, Shan Yuanda. Application of superconducting magnetic energy storage system in wind power system of network-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66(in Chinese).
- [4] 杨勇. 超导技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 48-50.
Yang Yong. Developing of the superconducting technology and its applications in the power system[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 48-50(in Chinese).
- [5] 方进, 翁佩德, 陈灼民, 等. 运行温度对 NbTi 管内电缆导体顺态稳定性影响实验研究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 113-118.
Fang Jin, Weng Peide, Chen Zhuomin, et al. Experiment research and analysis of the influence of operating temperature on NbTi CICCC transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 113-118(in Chinese).
- [6] 肖立业. 超导电力技术德现状和发展趋势[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 33-37.
Xiao Liye. Present station and development trend of superconducting power technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 33-37(in Chinese).
- [7] 杨军, 张哲, 尹相根, 等. 高温超导电缆在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 63-68.
Yang Jun, Zhang Zhe, Yin Xianggen, et al. Application of high temperature superconducting cable in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 63-68(in Chinese).
- [8] 张勇刚, 张哲, 尹相根, 等. 高温超导电缆监测与保护系统管理软件开发[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 7-10, 19.
Zhang Yonggang, Zhang Zhe, Yin Xianggen, et al. Development of management software for high temperature superconducting cable's monitoring and protection system[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 7-10, 19(in Chinese).
- [9] Hsu C S, Lee W J. Superconducting magnetic energy storage for power system applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(5): 990-996.
- [10] Karasik V, Dixon K, Weber C, et al. SMES for power utility applications: a review of technical and cost considerations[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 541-546.
- [11] 潘垣, 程时杰, 唐跃进, 等. 超导电力磁储能系统研究进展(一)——超导储能装置[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 63-68.
Pan Yuan, Cheng Shijie, Tang Yuejin. Application development of SMES in electric power system part one-general review[J]. 2001, 25(12): 63-68(in Chinese).
- [12] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-4.
Ye Lin, Lin Liangzhen. Superconducting fault current limiter applications in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-4(in Chinese).
- [13] Bellis R H, Iwasa Y. Quench propagation in high T_c superconductor [J]. Cryogenics, 1994, 34: 129-144.
- [14] 熊宇, 胡长生. 一类新型三相直接式电流型多电平逆变器拓扑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 163-167.
Xiong Yu, Hu Changsheng. Research on a new three-phase direct type multilevel current source inverter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 163-167(in Chinese).
- [15] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits[C]. International conference on Power Electronics, Tokyo, 1983: 1375-1386.
- [16] Wang X, Ooi B T. Unity PF current-source rectifier based on dynamic trilogic PWM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 288-294.
- [17] 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): 124-129.

- Xu Dehong, Eisuke Masada. GTO PWM current converter array for superconducting magnetic energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 124-129(in Chinese).
- [18] Zhang Z C, Ooi B T. Multi-modular current-source SPWM converters for a superconducting magnetic energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 250 -256.
- [19] 李君, 徐德鸿, 郑家伟, 等. 超导储能系统用多模块电流型变流器载波轮换均流方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 106-111.
Li Jun, Xu Dehong, Zheng Jiawei, et al. Carrier-swapping method to equalize current in a multi-modular current source converter for SMES[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 106-111(in Chinese).
- [20] Tsukamoto O, Nagai Y, Imaie K. Direct connected multiple current-source converters for SMES system[J]. Inst. Elect. Eng. Jpn. D, 1998:

992-999.

收稿日期: 2006-09-08。

作者简介:

史云鹏(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超导储能系统变流器, mentnem@263.net;

李君(1972—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超导储能系统变流器;

徐德鸿(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超导储能系统, 谐波抑制与电力品质, 高频半导体功率变换技术, 先进控制在电力电子中应用。

(责任编辑 云爱霞)