

基于数字信号处理器与复杂可编程逻辑器件的 三相电流源型超导储能不间断电源及其控制策略

王付胜¹, 刘小宁², 王磊²

(1. 合肥工业大学电气工程学院, 安徽省 合肥市 230009; 2. 中科院等离子体所, 安徽省 合肥市 230031)

3-Phase Current-source SMES-UPS and Its Control Strategies Based on DSP and CPLD

WANG Fu-sheng¹, LIU Xiao-ning², WANG Lei²

(1. Department of Electrical Engineering Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China;
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Three-Phase Current-Source SMES-UPS is introduced, which can serve for the exciting power supply of toroidal field superconducting coils (TFSC) when the power system is normal, as well as for uninterrupted power supply (UPS) of the cryogenic and vacuum system once the deep voltage sag or other grid faults are detected. In the case of former, by controlling the active and reactive current of the AC side of converter, not only the DC current in TFSC can slope up to a steady value according to the referenced rate, but also the AC side of the converter can achieve unit power factor and low harmonic distortion; in the case of latter, by the quantitative analysis between the voltage and current of protected loads, a real-time control strategy for AC current with the feedback of voltage is presented, which not only ensures the amplitude and frequency of voltage of protected loads steady, but also its phase can be invariable. In addition, a simple and high programmable control system of SMES-UPS based on DSP and CPLD is described. Finally, to prove the validity of control strategies and system, a 1.0 kVA prototype has been established and the experiment when it serves for exciting power supply for TFSC, as well as UPS for protected loads are carried out, the results show that the proposed control strategies and system can fulfill the goals of SMES-UPS whether it works in the former case or the latter case.

KEY WORDS: superconducting magnetic energy storage system-uninterruptible power supply; toroidal field superconduction coils; exciting power supply; uninterruptible power supply; control strategies; digital signal processor; complex programmable logic device

摘要: 该文介绍了一种基于 DSP 与 CPLD 的三相电流源型

SMES-UPS 装置, 该装置在电网正常时可以作为超导纵场线圈(TFSC)的励磁电源, 而在电网故障时又可以用作低温和真空系统的 UPS 电源。在电网正常时, 通过对变流器交流侧有功、无功电流的控制不但可以保证超导线圈上电流按照设定速度上升到稳态值, 而且可以保证变流器网侧的单位功率因数运行和低谐波污染; 在电网故障时, 通过分析负载电压和电流之间的定量关系, 提出了基于负载电压反馈的交流侧电流实时控制策略, 不但可以保证负载电压的幅值和频率稳定, 还可以电压相位不随负载性质的变化而变化。文中还介绍了基于 DSP 与 CPLD 的 SMES-UPS 控制系统, 该控制系统结构简单、可编程程度高。1 kVA 的 SMES-UPS 样机实验结果表明文中所述的控制算法及其控制系统能够很好地实现 SMES-UPS 兼作 EAST 纵场励磁电源和低温、真空系统 UPS 电源的双重功能。

关键词: 超导储能不间断电源; 纵场超导线圈; 励磁电源; 不间断电源; 控制策略; 数字信号处理器; 复杂可编程逻辑器件

0 引言

国家九·五大科学工程超导托卡马克聚变实验装置(EAST)计划 2006 年底投入运行, 这将是世界上第一个投入运行的全超导托卡马克实验装置。在 EAST 装置长达 2 个月的运行期间一旦电网出现嬗变或者秒级跳闸, 低温和真空系统短时掉电使超导态所需的真空和低温条件不能保持, 造成超导磁体失超; 而为使超导磁体重新进入超导态可能长达数天的时间, 由此造成经济上的损失是巨大的^[1-3]。为了避免这种情况, 在文献[1]中提出一种基于 EAST 超导纵场线圈的电流源型 SMES-UPS 系

统(图 1)，并对工作原理、变流器设计、控制策略和仿真结果进行了详细的叙述。本文在原仿真的基础上进一步介绍了基于 DSP 和 CPLD 的 SMES-UPS 控制系统的实现，并设计一套 1kVA 的样机进行实验室仿真，以验证 SMES-UPS 装置及其控制系统的可行性和可靠性。

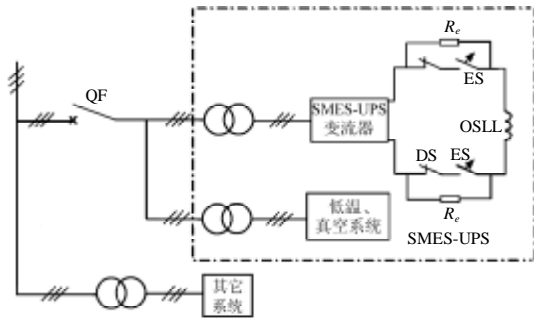


图 1 SMES-UPS 系统结构图
Fig.1 Diagram of SMES-UPS

1 SMES-UPS 主回路及其控制策略

1.1 SMES-UPS 用作 EAST 纵场励磁电源的控制策略

为了简化系统结构，SMES-UPS 变流器采用电流源型拓扑结构^[4-5]与被保护的低温、真空系统负载并联运行，主回路原理如图 2 所示。

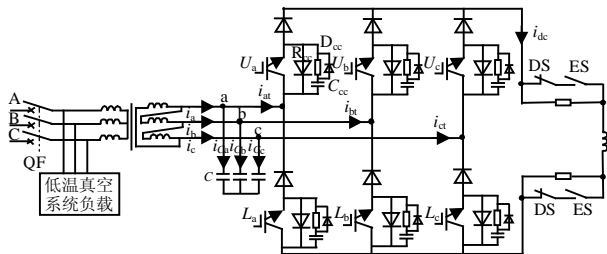


图 2 SMES-UPS 主回路原理图
Fig.2 Main circuit of SMES-UPS

当 SMES-UPS 用作 EAST 纵场励磁电源时，控制目标是使超导线圈的电流按照设定速度上升到某一稳态值，并保证网侧单位功率因数运行。三相电流源型变流器(3-Phase CSC)采用三值 PWM 控制时，其交流侧可以看作是一个对称的三相受控电流源，等效电路如图 3 所示。图中 L 、 R 为折算到变压器副边的每相漏阻抗。由文献[6-7]知道变流器交流侧电流 i_{jt} (j 为 a,b,c) 可以分解为 2 部分：一个是超前(或落后)电网电压 90° 的无功分量 i_{jtd} ；另一个是与电网电压同相位的有功分量 i_{jq} ，它们的有效值为

$$\begin{cases} I_{jtd} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} i_{dc} M \sin j \\ I_{jq} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} i_{dc} M \cos j \end{cases} \quad (1)$$

式中 j 为调制波即变流器交流侧电流与电网电动势的相位差。

显然，要保证变流器网侧单位功率因数运行，需满足条件 $I_{jtd} = -I_{jc} \approx -wCE$ 。而 I_{jq} 的大小则取决于变流器需从电网吸收的有功功率，由直流侧电流闭环控制环节给定。

SMES-UPS 用作 EAST 纵场励磁电源时的控制策略如图 4 所示。图中 j_j (j 为 a,b,c) 为三相电网电动势的初始相位角。

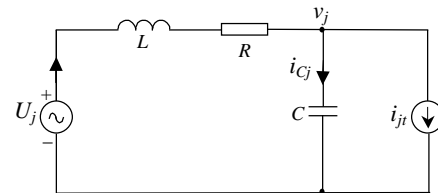


图 3 三相 CSC 等效电路图
Fig.3 Equivalent Circuit of 3-Phase CSC

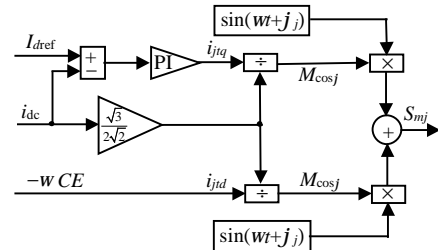


图 4 SMES-UPS 用作纵场励磁电源时的控制策略
Fig.4 Control strategy when SMES-UPS serves for TFPS

1.2 SMES-UPS 用作低温和真空系统 UPS 电源的控制策略

当控制系统检测到电网发生故障^[8-10]并分断 SMES-UPS 与主电网之间的三相断路器 QF 后，控制目标是为被保护的低温和真空系统负载提供幅值和频率都不变的三相对称电压，这通过控制向交流侧负载注入的三相电流大小来实现，因而需要找到负载电压和电流之间的定量关系。

假设低温和真空系统为对称的三相负载，将变流器交流侧的静止三相坐标系(a, b, c)变换成两相同步旋转坐标系(d, q)，且令 d 轴初始相位与 a 轴重合，则电压(电流)矢量在两相旋转坐标系与三相静止坐标系的变换可以表示为

$$\begin{bmatrix} UI_q \\ UI_d \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} -\sin wt & -\sin(wt - 120^\circ) & -\sin(wt + 120^\circ) \\ \cos wt & \cos(wt - 120^\circ) & \cos(wt + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} UI_a & UI_b & UI_c \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} UI_a \\ UI_b \\ UI_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \omega t & \cos \omega t \\ -\sin(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t - 120^\circ) \\ -\sin(\omega t + 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} UI_q \\ UI_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

设逆变产生的负载电压为

$$U_j = U \sin(\omega t + j + j_j) \quad (4)$$

其中: $j = a, b, c$; $j_a = 0$, $j_b = -2\pi/3$, $j_c = 2\pi/3$ 。

将式(4)带入式(2)可得负载电压矢量在 q 、 d 轴的分量为

$$\begin{cases} U_q = -U \cos j \\ U_d = U \sin j \end{cases} \quad (5)$$

同理, 设负载电流峰值为 I 且相位落后电压 d , 则电流矢量在 q 、 d 轴的分量为

$$\begin{cases} I_q = -I \cos(j - d) \\ I_d = I \sin(j - d) \end{cases} \quad (6)$$

若三相对称负载的阻抗为 Z , 则有下式成立

$$U = IZ \quad (7)$$

将式(6)按照三角函数展开并考虑式(5)、(7)即可得到 (d, q) 坐标系中电压与电流的定量关系

$$\begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} \cos d & -\sin d \\ \sin d & \cos d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_q \\ U_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

显然, 上式中需要控制系统在线计算出负载功率因素角 d 。由三角函数关系可得

$$\begin{cases} \cos d = \cos(j - d - j) = \cos(j - d)\cos j + \sin(j - d)\sin j \\ \sin d = -\sin(j - d - j) = -\sin(j - d)\cos j + \cos(j - d)\sin j \end{cases} \quad (9)$$

将式(5)、(6)带入式(9)可得到功率因素角为

$$\begin{cases} \cos d = \frac{U_q I_q + U_d I_d}{\sqrt{(U_q^2 + U_d^2)(I_q^2 + I_d^2)}} \\ \sin d = \frac{U_q I_d - U_d I_q}{\sqrt{(U_q^2 + U_d^2)(I_q^2 + I_d^2)}} \end{cases} \quad (10)$$

在 SMES-UPS 用作 UPS 电源的第一个控制周期中, 可以令 $d = 0$ 。根据式(8)求出所需要的调制波电流矢量, 然后根据实测的负载电压矢量和式(10)计算出实际负荷的功率因素角 d ; 以后利用上个周期计算出来的功率因素角 d , 和本周期的实测负载电压, 根据式(8)即可计算出本周期所需要的调制波电流矢量。SMES-UPS 用作 UPS 电源时的控制策略如图 5 所示。当负载为纯阻性即 $d = 0$ 时, 图 5 中虚线框内部分可以忽略。显然, 该控制策略, 不但可以保证负载电压幅值和频率不变, 而且还可以实

时控制负载电压的相位, 当参考电压矢量初始相位角 j_0 与电网发生故障时刻电压矢量的相位角相同, 则可以保证故障前后负载电压相位不发生任何变换, 后面的实验结果也证明了这个结论。

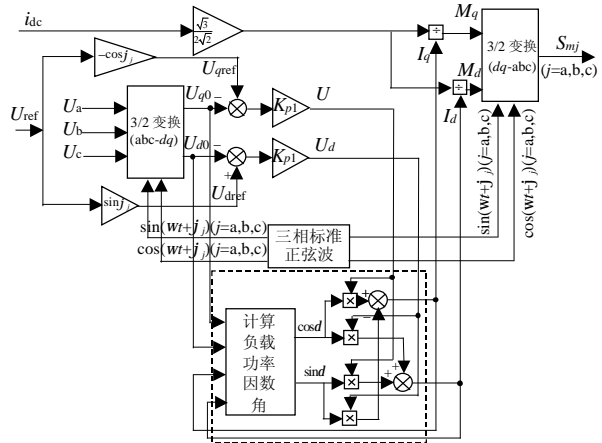


图 5 SMES-UPS 用作 USP 电源时的控制策略
Fig.5 Control strategy when SMES-UPS serves for UPS

2 SMES-UPS 控制系统介绍

SMES-UPS 控制系统需要完成的任务包括 3 部分: ①根据三相电网电压采样值判断电网是否发生故障; ②根据判断结果, 实时采样直流侧电流(电网正常, SMES-UPS 用作纵场励磁电源)。或者三相负载电压(电网故障, SMES-UPS 用作低温、真空系统 UPS 电源), 按照图 4 或 5 的控制策略, 在线计算出三相调制波 $S_{mj}(j$ 为 $a, b, c)$; ③把调制波和三角波比较所得的二值开关函数按照一定逻辑关系转换为功率器件所需要的触发信号。前 2 个任务需要经过 AD 采样、实时计算和 DA 转换 3 个阶段, 控制器运算量较大。某公司生产的 16 位定点 LF2407A DSP 是为专为基于控制的应用而设计的, 它将高性能的 DSP 内核和丰富的微控制器的外设集成于单片中, 因而能够快速而准确的完成上述 2 个任务^[11]; 最后一个任务由 3 个较复杂的逻辑运算部分组成^[12], 即二、三值逻辑转换、零区间判断和状态信号分配。某公司生产的 EPM7128SLC84 CPLD 是工业界速度最快的高集成度复杂可编程逻辑器件, 适合于组合、逻辑电路应用场合。它可以把芯片内部硬件连接关系的描述用软件编程的方式存放到 EPROM 中, 因此一个 CPLD 芯片即可完成 3 个逻辑运算部分的任务, 控制系统得以简化、故障率也随之降低。综上所述, SMES-UPS 的控制系统结构如图 6 所示。

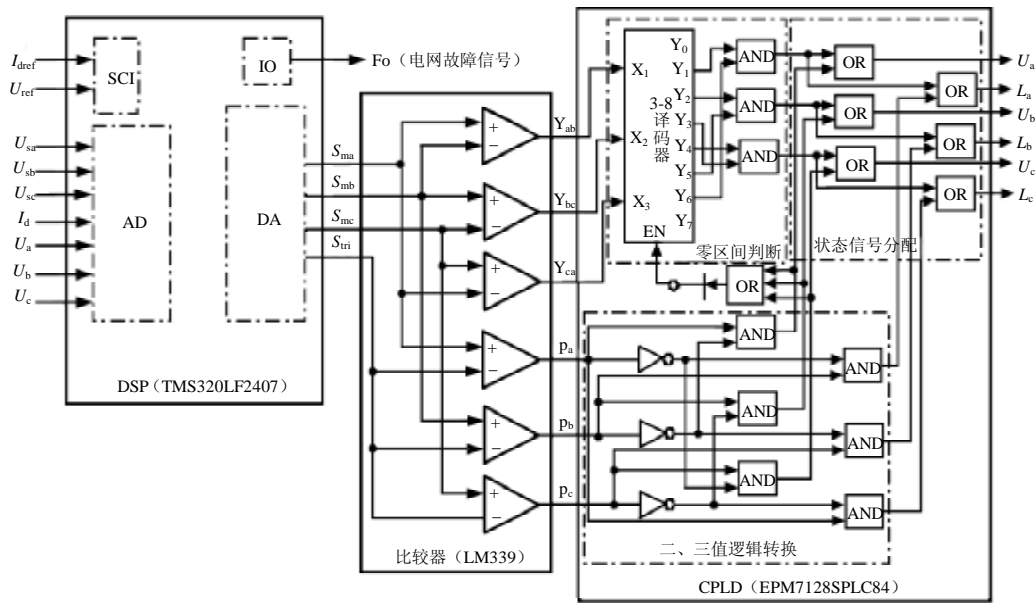


图 6 基于 DSP 与 CPLD 的 SMES-UPS 控制系统

Fig.6 Control system of SMES-UPS based on DSP and CPLD

3 SMES-UPS 样机实验结果及其分析

为了验证主回路、控制策略和控制系统的可行性、可靠性，本文作者设计了一个 1kVA 的实验样机^[13-15]，主回路参数如表 1 所示。实验结果由示波器 TDS3014 测量所得。

表 1 实验样机主回路参数

Tab.1 Main circuit parameters of experimental prototype

参数名称	参数值
电网相电压有效值/V	220
滤波电容 C/ μ F	193/phase
开关断器件	IGBT/50A, 600V
开关频率/kHz	5
储能线圈 $L_d/H, R_d/\Omega, I_d/A$	0.1, 0.6, 20
变流器直流侧最大平均电压/V	50
变压器参数	
容量/kVA	1
漏阻抗/%	4.7
绕组和变比/V/v	Y- Δ 11, 380/47

SMES-UPS 用作 EAST 纵场励磁电源的实验结果如图 7 所示。

图 7 (a)、(b)是终值电流设为 15A、电流上升速度分别为 15A/s 和 30A/s 时，储能线圈充电过程的实验结果。从图中可以看出储能线圈上电流在 2 种

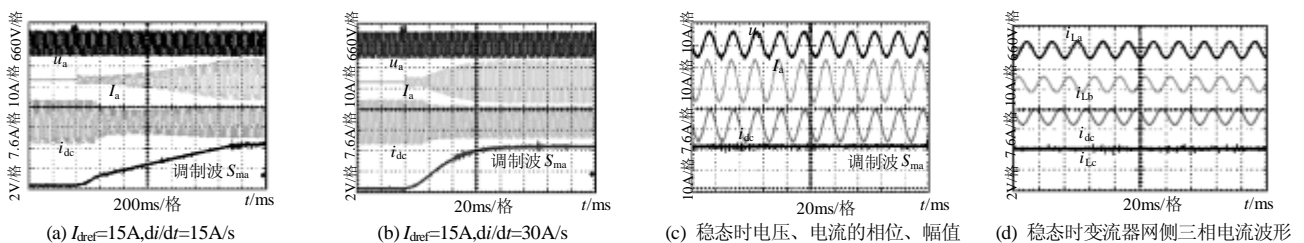
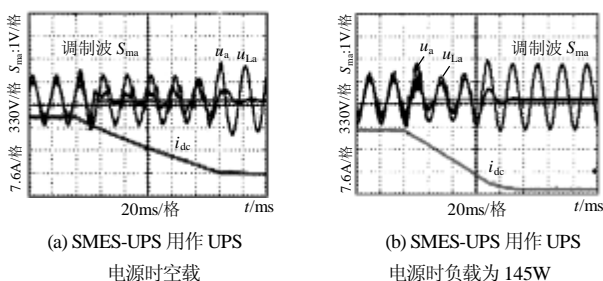


图 7 SMES-UPS 用作纵场励磁电源的实验结果

Fig.7 Experimental results when SMES-UPS serves for TFPS

情况下都能够很好地按照给定速度上升到稳态值。从图 7 (c)可看出系统稳定时，变流器 A 相线电流超前电网相电压 1.59ms(即 28.6°)，故相电流和相电压基本同步，即变流器网侧实现了单位功率因素运行。从图 7 (d)可以看出变流器网侧线电流是三相很对称的标准正弦波，谐波含量很低。

SMES-UPS 用作 UPS 电源的实验结果如图 8 所示。图中 i_{dc} 为储能线圈上电流波形， S_{ma} 为 A 相调制波， u_a 和 u_{La} 通道分别为电网 A 相电压和负载 A 相电压。图 8(a)为 SMES-UPS 空载时的实验结果，图 8(b)是阻值为 1k 的三相对称电阻负载(额定功率为 145W)时的实验结果。从图 8 可以看出：当电网发生故障，控制器发出分断断路器的指令后，经过约一个周期的过渡时间断路器完全分开，SMES-UPS 系统脱离主电网；负载电压经过很短的过渡时间恢复到电网发生故障前的状态，幅值和相位几乎没有发生变化。这说明 SMES-UPS 变流器能够在电网发生故障时，将线圈中储存的能量正常释放给被保护的关键负载以维持其正常运行，实现了 UPS 电源的目的。



(a) SMES-UPS 用作 UPS 电源时空载

(b) SMES-UPS 用作 UPS 电源时负载为 145W

图 8 SMES-UPS 用作 UPS 电源时的实验结果

Fig.8 Experimental results when SMES-UPS serves for UPS

4 结论

本文介绍了一种基于 DSP 与 CPLD 的三相电流源型 SMES-UPS 装置, 该装置在电网正常时可以用作超导纵场线圈的励磁电源, 而在电网故障时又可以用作低温和真空系统的 UPS 电源, 为关键负载提供稳定的三相对称正弦电压。按照文中所述的控制策略, 在电网正常时, 不但可以保证超导线圈上电流按照设定速度上升到稳态值, 而且可以保证变流器网侧的单位功率因数运行和低谐波污染; 在电网故障时, 不但可以保证负载电压幅值、频率稳定, 而且还可以保证关键负载性质发生变换时, 电压相位保持不变。文中还介绍了基于 DSP 与 CPLD 的 SMES-UPS 控制系统, 该控制系统结构简单、可编程程度高, 1KVA 的 SMES-UPS 样机实验结果表明该控制系统能够很好的完成 SMES-UPS 兼作 EAST 纵场励磁电源和低温、真空系统 UPS 电源的双重功能。

参考文献

- [1] 王付胜, 刘小宁. 基于托卡马克超导纵场线圈的 SMES-UPS 变流器设计及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 172-176.
Wang Fusheng, Liu Xiaoning. Design and control strategies for SMES-UPS based on TF superconducting coils of tokamak [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 172-176(in Chinese).
- [2] 王付胜, 刘小宁. 基于 EAST 超导纵场线圈的 SMES-UPS 变流器及其控制策略的研究[D]. 北京: 中科院等离子体物理研究所, 2005.
Wang Fusheng, Liu Xiaoning. Research of SMES-UPS converter and its control strategies based on TFSC of EAST[D]. Beijing: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005(in Chinese).
- [3] 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): 48-60.
Yang Yong. Developing of the superconduction technology and its applications in the power system[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 48-60(in Chinese).
- [4] 熊宇, 胡长生, 程丹江, 等. 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, Cheng Danjiang, et al. 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).

- [5] 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, Cheng K W E, et al. Carrier-swapping method to equalize current in a multimodular current source converter for SMES[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 106-111(in Chinese).
- [6] Xiao Wang, Boon-Teck Ooi. Unity PF current-source rectifier based on dynamic trilogic PWM, IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 288-294.
- [7] 王付胜, 刘小宁, 潘胜明. 基于 DSP 与 CPLD 的三相电流源型变流器[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(4): 26-29.
Wang Fusheng, Liu Xiaoning, Pan Shengming. 3-phase current-source rectifier based on DSP and CPLD[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24(4): 26-29(in Chinese).
- [8] 刘逊, 朱晓光, 储旭, 等. 基于超导储能的瞬时电压跌落补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 28(3): 40-45.
Liu Xun, Zhu Xiaoguang, Chu Xu, et al. Voltage sag compensation by SMES[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 28(3): 40-45(in Chinese).
- [9] 侯勇, 蒋晓华, 姜建国. 基于超导储能的并联处理不间断供电系统及其控制策略的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 1-6.
Hou Yong, Jiang Xiaohua, Jiang Jianguo. Superconduction magnetic energy storage based parallel processing uninterruptible power system and its control strategy[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 1-6(in Chinese).
- [10] Salbert H, Krischel D, Schillo M, et al. 2 MJ SMES for uninterruptible power supply[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2000, 10(1): 777-779.
- [11] Xiao Wang, Boon-Teck Ooi. Real-Time multi-DSP control of three-phase current-source unity power factor PWM rectifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 295-300.
- [12] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [13] 王毅, 李和明, 石新春, 等. 多电平 PWM 逆变电路谐波分析与输出滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 78-82.
Wang Yi, Li Heming, Shi Xinchun, et al. Harmonic analysis and output filter design for multilevel PWM Inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 78-82(in Chinese).
- [14] 徐德鸿, 马皓. 超导储能系统交流侧滤波器设计的几何方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 48-52.
Xu Dehong, Ma Hao. Geometric approach to designing of filter for SMES[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 48-52(in Chinese).
- [15] 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).

收稿日期: 2006-02-12。

作者简介:

王付胜(1976—), 男, 安徽池州人, 博士, 研究课题为 SMES-UPS 电源系统的研究与设计, 研究方向为大功率变流技术及其应用, wfs@ipp.ac.cn;

刘小宁(1963—), 男, 安徽合肥人, 博士生导师, 现为中科院等离子体物理研究所研究员, 目前从事 EAST 纵场电源、NBI 电源和强磁场电源的研究和设计工作, 研究领域为大功率变流技术和超导电工。

(编辑 王彦骏)