

超导储能功率脉冲电源中脉冲变压器的研制

陈天腾, 李海涛, 董亮, 王豫

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 利用脉冲变压器模式的超导储能功率脉冲电源能有效地提升输出电流, 针对这种模式, 笔者重点介绍了降压升流型脉冲变压器的一种设计方法。文中先建立了脉冲变压器的等效电路模型, 给出了脉冲变压器的技术要求和结构参数设计。通过理论分析和参数计算研制了一台脉冲变压器, 对研制好的脉冲变压器进行仿真和实验测试, 结果表明: 实验输出波形与仿真波形基本一致, 脉冲变压器的设计满足指标要求。

关键词: 电感储能; 功率脉冲电源; 放电; 脉冲变压器

中图分类号: TM417

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)02-0084-04

Development of the Pulsed Power Transformer Used in Superconducting Magnet Energy Storage Pulsed Power Supply

CHEN Tian-teng, LI Hai-tao, DONG Liang, WANG Yu

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Adopting pulse transformer model, the superconducting magnet energy storage pulse power supply could effectively improve the output current. This paper introduced the design method of risen current transformer. The equivalent circuit model of pulse transformer was established, and the technical requirement and configuration parameter were indicated. Through the theoretical analysis and the parameter calculation, the pulse transformer has been developed. The simulation and experiment with the transformer were carried on. The experiment results show that the output current waves are basically consistent to simulations. The pulsed power transformer satisfies the design requirements.

Key words: SMES; pulsed power supply; discharge; pulse transformer

0 引言

高功率脉冲技术作为高新、尖端技术日益受到重视, 特别是在新概念武器及未来高速运载工具方面, 具有极大的发展潜力。激光、粒子束以及飞机起飞电磁弹射系统^[1-3], 这类装置均需要大功率脉冲电源, 但脉冲功率技术指标主要取决于应用对象及应用场合, 不同的应用场合需要脉冲源提供不同的输出脉冲^[4]。在脉冲功率系统中, 电感储能的功率释放需要开断开关^[5], 与电容储能只需要闭合开关相比, 在大电流、大功率时技术难度较大^[6-9]。然而, 随着超导线材的发展, 电感储能越来越受到人们的重视。

超导电感储能具有储能密度高、损耗低、可长时间储存能量、无噪声、体积小等优点, 在长时间储存能量的脉冲功率系统中越来越显示出它独有的优势^[10]。超导电感储能脉冲功率系统中所需励磁电流很大, 往往不能直接获得, 通常需要经过脉冲变压器进行升流^[11-12]。经脉冲变压器可获得较大的脉冲电流输出, 可以减少磁体数量, 从而减小了整个装置的体积及减轻开断开关的负担^[13]。因此, 脉冲变压器在整个系统中占有很重要的地位, 尤其是脉冲变压器已成为输出脉冲成形和放大的元件, 对降低储能脉冲功率系统的规模 and 成本起到很重要的作用。笔者基于超导储能脉冲功率技术的应用, 研制一台脉冲变压器进行升流来实现大电流脉冲输出。

收稿日期: 2010-11-02; 修回日期: 2010-12-06

基金项目: 西南交通大学优秀博士学位论文培育基金。

Project Supported by Southwest Jiaotong University Excellence Doctoral Dissertation Cultivation Programme.

1 脉冲变压器等效模型的建立

单模块超导储能功率脉冲输出电路见图1,其工作原理是开关 S_1 闭合,电源对超导线圈 L_s 充电,充电到预设值,断开 S_1 的同时闭合 S_2 ,超导磁体经脉冲变压器对负载放电。电容 C 与电阻 R_1 串联作为吸收电路起到滤波和保护磁体端压的作用(电感电流的变化率较高将在超导磁体上产生瞬间高压)。

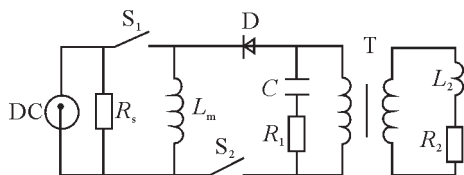


图1 单模块超导储能功率脉冲放电电路

Fig.1 Single module of superconducting magnet storage pulse power circuit

漏感和分布电容在脉冲变压器中起决定性作用。因此,考虑漏感和分布电容时的脉冲变压器是一个复杂的具有分布常数的系统。对脉冲变压器的分析主要有2种方法:一种是采用集中参数等效电路,另一种是采用分布参数等效电路。实际上如果利用分布参数来等效脉冲变压器的电路,会使分析的过程大为复杂,而且也不可能得到实际工程中有用的结果。笔者从应用出发,使用了集中参数等效电路的分析方法。其脉冲变压器的等效电路见图2^[14]。

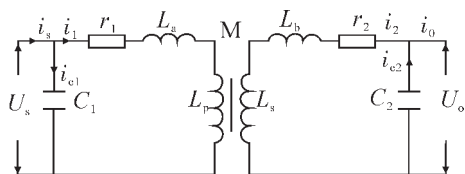


图2 脉冲变压器等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model of pulse transformer

图2中, C_1 、 r_1 、 L_a 、 L_p 分别是原边的等效分布电容、电阻、漏感、初级自感; C_2 、 r_2 、 L_b 、 L_s 分别是次边的等效分布电容、电阻、漏感、次级自感。

2 脉冲变压器设计

2.1 脉冲变压器铁心截面积的计算

在设计过程中对脉冲变压器的精确计算是比较困难的,笔者采用的方法是将输入脉冲做了近似处理。使用超导磁体储能,通过开关控制向负载放电,实现脉冲整形,保持脉冲电流有一定的峰值脉宽。正确选择铁心的材料、结构形式、退火工艺等,充分利用材料的磁性能,尽可能缩减脉冲变压器的体积和重量,可在一定程度上确保脉冲变压器的输出特性最佳。由于脉宽较宽,要求铁心材料的磁感

应增量越大越好^[15],能有效地减小脉冲变压器的铁心截面积和磁化绕组的匝数。笔者采用的超导磁体,在超导态(温度为77 K)的直流电阻为0.06 Ω ,通过低电压大电流直流电源缓慢充电至一定值,超导电感在稳定储能状态时的端压比较低。依据超导储能脉冲能量输出的功率大小,笔者设计的脉冲变压器的功率为500 W,输入脉冲幅值70 A,输出脉冲幅值450 A。对于波形要求不高的心式脉冲变压器,其铁心截面积可用下式^[16]表示

$$S = \frac{1}{10\Delta B} \sqrt{u_{\Delta} \cdot t_k \cdot P_2 \cdot \Delta \cdot K} \quad (1)$$

式(1)中: μ_{Δ} 为平均脉冲磁导率, $\mu_{\Delta} = \Delta B / \Delta H$; Δ 为平顶降落; t_k 为脉冲持续时间; P_2 为脉冲变压器的功率; K 为铁心实际截面积与铁心平均匝长的比值,即 $K = S_c / l$ 。

一般脉冲变压器的平顶降落 $\Delta \leq 5\%$,指标要求脉冲持续时间在4~6 ms,经计算得其铁心截面积为5.52 cm^2 ,结合实际应用场合,把铁心材料的带厚减薄一些,以降低涡流损耗、提高铁心有效磁导率。磁心材料选用取向硅钢薄带DG6,其表面涂有极薄的绝缘涂层,既防锈又使制成的铁心在每层钢带之间绝缘,厚度为0.05 mm。卷绕成CD型、铁心不切开,这样可提高铁心的叠加系数和磁导率。根据计算铁心截面积,可选用体积为 $a \times b \times h = 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$ 的铁心,其窗口宽度 $h_c = 60 \text{ mm}$ 。

实际铁心的截面积为

$$S_c = a \times b \times k_T = 5.94 \text{ cm}^2 \quad (2)$$

式(2)中, $k_T = 0.95$ 为叠加系数。

铁心的平均磁路长度 $l = 2(h + h_c) + a\pi$ 。计算得铁心平均磁路长度为39.05 cm。

2.2 初次级绕组匝数的计算

确定了铁心截面积之后,可按(3)式计算一次绕组匝数 N_1 的值

$$N_1 = \frac{U_{1k}}{S_c \Delta B} \quad (3)$$

经计算得初级绕组匝数 $N_1 = 26.5$ 匝,考虑到损耗等因素,在实际绕制过程中取 $N_1 = 27$ 匝。确定初级绕组匝数之后,根据设计要求算出变比 $n = 70:450 = 0.156$,再根据二次绕组匝数计算公式 $N_2 = nN_1 = 4.2$ 匝,实际绕制中取4匝。

2.3 绕组导线及绕线结构的选择

绕组导线的选择包括次级有效电流的计算、初级有效电流的计算^[17]和确定绕组导线。

次级有效电流 I_{2e} 为

$$I_{2e} = I_2 \sqrt{t_k F} \quad (4)$$

式(4)中, F 为重复频率。

初级有效电流 I_{1e} 为

$$I_{1e}=1.05nI_{2e} \quad (5)$$

由于电流较大, 初级采用双股扁铜线并绕, 次级用铜带线材来绕制。在干式脉冲变压器中, 铜带线材的电流密度大约为 $1\sim 3 \text{ A/mm}^2$ 。考虑到绕组层数不是单层, 这里电流密度取 $j=2.0 \text{ A/mm}^2$ 。为了减小漏感、比较充分地利用铁心的整个磁路长度, 绕组应当均匀地或对称地绕在 2 个铁心柱上。2 个铁心柱上固定 2 个相同的骨架, 其长为 96 mm , 绝缘厚度为 3.5 mm , 槽深 2 mm , 两端留 3 mm 的端空。

次级导线的截面积: $S_2=1.03 I_{2e}/j$ 。

初级导线的截面积: $S_1=1.03 I_{1e}/j$ 。

经计算求得次级导线的截面积为 64.6 mm^2 、初级导线的截面积为 10.4 mm^2 。最终确定脉冲变压器的初级线圈用宽为 3.5 mm 、厚为 1.81 mm 的扁铜漆包线 (绝缘层用玻璃纤维包裹) 双股并绕 3 层, 共 27 匝 (每层 9 匝); 次级线圈用宽为 90 mm 、厚为 0.8 mm 的铜带绕 4 匝 (每层 1 匝), 层间用宽为 96 mm 、厚为 0.15 mm 的绝缘纸 DMD 隔离。制作的脉冲变压器实物图见图 3。



图 3 研制的脉冲变压器实物图

Fig.3 The manufacture of pulse transformer

3 仿真与实验研究

用 Pspice 对图 1 所示的单模块超导储能功率脉冲放电电路进行仿真, 其回路参数如下: 超导磁体采用 Bi 2223/Ag 超导线材绕制, 在液氮下测得电感为 47.18 mH (临界电流为 80 A), 电容 C 为 100 uF , 负载电阻 $R_2=1 \text{ } \Omega$, 电感 $L_2=0.5 \text{ } \mu\text{H}$; 研制好的脉冲变压器用高精度 LCR 数字电桥测得一次绕组自感 $L_p=766.3 \text{ } \mu\text{H}$, 二次绕组自感 $L_s=8.2 \text{ } \mu\text{H}$, 用 MS-601 F 型互感测试仪测得脉冲变压器互感 $M=75.7 \text{ } \mu\text{H}$, 根据公式

$$K=\frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (6)$$

经式(6)计算出耦合系数为 0.93 。其仿真结果见图 4。

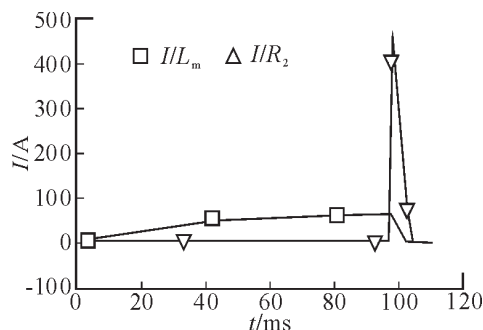


图 4 仿真输入输出脉冲波形

Fig.4 The pulse wave of pulse transformer in simulation

实验按图 1 电路连接, 由于受超导磁体临界电流所限, 实验将超导磁体充电预置为 70 A 。通过电流传感器检测的信号, 经信号调理电路对信号进行处理, 输入到数据采集卡, 采用 LabVIEW 软件设计数据采集程序, 实现数据的连续采集, 脉冲变压器的输入和输出结果见图 5、6。

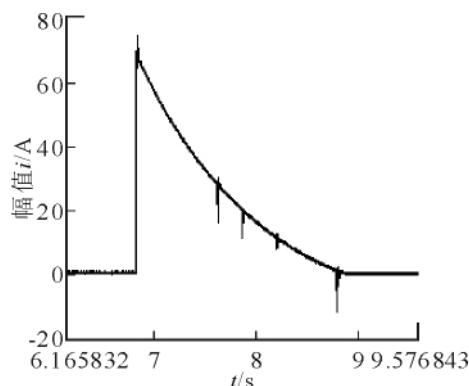


图 5 实验中脉冲变压器原边输入脉冲波形

Fig.5 The input pulse wave of primary winding in experiment

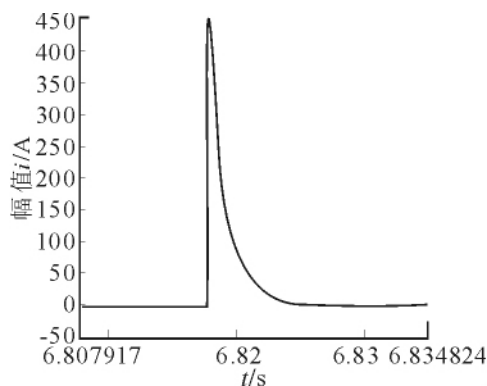


图 6 实验中脉冲变压器副边输出脉冲波形

Fig.6 The output pulse wave of secondary winding in experiment

从仿真和实验结果可看出: 实际输入的电流脉冲幅值为 69.4 A , 仿真输出的电流脉冲幅值约为 456 A , 实验输出结果约为 448 A , 脉冲电流幅值放大 6.5 倍左右, 脉冲持续时间在 4.6 ms 左右; 对比实验输入输出波形可以看出输出放电脉冲宽度减小,

仿真结果与实验结果基本一致,输出脉冲达到指标要求。

4 结语

脉冲变压器的设计方法很多,在实际工程中,要针对具体的技术要求,对脉冲变压器的各种参数进行优化,以选择最合适设计方案。笔者根据实际应用场合,在理论分析和仿真的基础上研制了一台降压升流型脉冲变压器,应用于超导储能功率脉冲电源装置中,有效地提高了输出电流脉冲幅值,很大程度上减少了储能磁体的数量,缩减了整个装置的体积和重量,输出脉冲波形达到设计指标的要求。

参考文献:

- [1] RAHN H W.The all-electric ship-an answer to future challenges[J]. Naval Forces, 1999, 20(2):38-49.
- [2] MCNAB I R.Pulsed power for electric guns[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 33(1):453-459.
- [3] AKIYAMA H, SAKUGAWA T, NAMIHIRA T, et al. Industrial applications of pulsed power technology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5):1051-1064.
- [4] ABDELSALAM M K, EYSSA Y M.Pulsed magnetic energy storage for space applications[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1987, 23(2):533-536.
- [5] 李漫华,邵可然.电感储能型高功率脉冲电源断路开关的最新发展[J]. 电机电器技术, 2000(6):24-28.
LI Man-hua, SHAO Ke-ran.Recent development of opening switch used in pulsed power technology with inductive energy storage [J]. Electric Machine and Electric Apparatus Technology, 2000(6):24-28.
- [6] 周羽生,郭芳,戴陶珍,等.超导电感储能高功率脉冲技术及其仿真研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2):85-88.
ZHOU Yu-sheng, GUO Fang, DAI Tao-zhen, et al. Pulse power technology based on superconducting magnet energy storage system and its simulation research[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2):85-88.
- [7] WECK W, EHRHART P, MULLER A, et al. Demonstration of a superconducting inductive pulsed power supply at simulated load conditions [J]. IEEE Transactions on magnetics, 1999, 35(1):383-387.
- [8] MESYATS G A, RUKIN S N, LYUBUTIN S K, et al. Semiconductor opening switch research at IEP [C]//Tenth IEEE International Pulsed Power Conference, USA:IEEE, 1995:298-305.
- [9] CAO C H, LIU W, LEE Y Q, et al. Nanosecond inductive energy storage pulsed power system using YBCO superconductor opening switches[J]. Photonics Technology Letters, 1993, 5 (1):109-111.
- [10] 周羽生.高温超导脉冲功率应用电磁特性的基础研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
ZHOU Yu-sheng.Basal research on electromagnetic characteristics of high-temperature superconductor applied in pulsed power[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [11] 宋萌,周羽生,唐跃进,等.电磁发超导空心脉冲变压器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12):72-76.
SONG Meng, ZHOU Yu-sheng, TANG Yue-jin, et al. HTS air-core pulse transformer for electromagnetic launch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (12):72-76.
- [12] 宋萌,周羽生,唐跃进,等.高温超导空心脉冲变压器的可行性研究[J]. 低温物理学报, 2007, 29(2):153-157.
SONG Meng, ZHOU Yu-sheng, TANG Yue-jin, et al. The feasibility research of the HTS air-core pulse transformer [J]. Chinese Journal of Low Temperture Physics, 2007, 29 (2): 153-157.
- [13] WECK W, EHRHART P, MULLER A, et al. Superconducting inductive pulsed power supply for electromagnetic launchers: design aspects and experimental investigation of laboratory set-up[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1):524-527.
- [14] 宋晓兵,梅建伟.非晶合金脉冲变压器的研制[J]. 变压器, 2010, 47(2):12-15.
SONG Xiao-bing, MEI Jian-wei.Development of pulse transformer with amorphous core[J]. Transformer, 2010, 47 (2):12-15.
- [15] 管金云.变压器铁心最佳截面计算[J]. 变压器, 2001, 38 (7):18-22.
GUAN Jin-yun.Calculation for optimum core cross section of transformer[J]. Transformer, 2001, 38(7):18-22.
- [16] 王瑞华.脉冲变压器设计[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [17] 郑新,李文辉,潘厚忠,等.雷达发射机技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.

陈天腾(1980—),男,硕士研究生,主要研究方向为脉冲功率与脉冲变压器的设计。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!