

# 变压器脉冲功率调节系统的研究<sup>\*</sup>

刘烈峰 丰树平 韩文辉 王敏华 高顺受 丁伯南

(中物院流体物理研究所 成都 523 信箱 610003)

**摘要** 对一种变压器和电爆炸丝开关相结合的功率调节系统进行了研究。该系统能有效实现低阻抗的初级能源和高阻抗负载的匹配,为高阻抗负载提供高电压大功率的脉冲。给出了该系统在 5kJ 电容器能源组上的实验结果和数值模拟结果。在  $75\Omega$  电阻负载上得到了脉宽为 300ns、幅度大于 600kV 的高压脉冲。变压器耦合系数大于 0.8。

**关键词** 功率调节系统 脉冲变压器 电爆炸丝开关

中图法分类号 O441.3

## 1 引 言

脉冲功率调节系统的作用是对初级能源的输出进行脉冲压缩和整形,提高输出功率以满足负载的需要。一种较简单的方法是采用电爆炸丝开关,通过爆炸丝的瞬间断开,压缩初级输出脉冲,提高输出功率,从而满足负载的需要<sup>[1]</sup>。

采用直接的电感储能、电爆炸丝开关压缩脉冲的方法存在很大的局限性。许多负载对电流要求并不很高,要求一定的脉宽,因而好的选择是用适当大的储能电感。但是对爆磁发生器这类能源装置大电感储能不利于其工作。而且,在初级能源的电压不可能很高的情况下,为满足负载兆伏级的电压要求,丝需要很长,这在设计上显然也是不能考虑的。特别是对于高阻抗负载(大于  $100\Omega$ ),由于爆炸丝的峰值电阻有限,单纯通过爆炸丝的作用是很难实现和负载的阻抗匹配的。

采用带爆炸丝开关的变压器系统可以有效地解决上述问题。变压器首先作为一个储能器件,其初级的小电感有利于爆磁发生器的工作,次级的大电感又有利于满足负载的要求。通过变压器的升压作用,也降低了对初级能源的电压要求。而且,变压器功率调节系统的阻抗调节范围大,参数选择灵活性好,可以满足不同负载的需要。采用这种方法,美国人已在不同的负载上实现了 1~3MV 的输出,变压器耦合系数 0.7~0.85<sup>[2~3]</sup>。俄罗斯人也报道了在这方面的研究情况,高功率微波系统中采用变压器功率调节装置,实现了 300MW 的微波输出。该装置采用的变压器耦合系数为 0.81,电压输出能力 600kV。我们研制了一套变压器功率调节装置,包括耦合系数大于 0.8、电压幅度为 600kV 脉冲变压器的研制,改进了爆炸丝断路开关,使整个装置小型化。使用 5kJ 的电容器组能源进行了实验,在  $75\Omega$  负载上产生了幅度大于 600kV、脉宽 300ns 的高压脉冲。并对实验结果进行了数值模拟。

\* 刘烈峰:男,1966 年 11 月生,硕士,副研究员。

1998-06-10 收到原稿,1998-08-28 收到修改稿。

## 2 变压器功率调节系统分析和数值模拟

### 2.1 变压器功率调节系统

变压器功率调节系统是由脉冲变压器、爆炸丝断路开关和隔离间隙组成的高电压装置。变压器起阻抗和感抗匹配作用,其参数应根据初级能源的阻抗、负载阻抗和工作电压等设计。爆炸丝断路开关和隔离间隙起压缩脉宽和陡化前沿的作用。

设  $L_p$ 、 $L_s$ 、 $n$ 、 $k$  分别为变压器的初、次级电感、匝比和耦合系数,  $R_D$  为变压器次级回路等效阻抗,则初级能源的等效阻抗  $R_D' = R_D/n^2$ 。当变压器次级短路时变压器初级等效电感  $L_p' = L_p \cdot (1 - k^2)$ 。爆炸丝爆炸前,  $R_D \approx 0\Omega$ ,初级能源相当于对小电感  $L_p'$  放电。由于隔离间隙的作用,只有在爆炸丝爆炸后变压器次级大电感才开始对负载放电,大电感有利于增加脉宽。而且通过变压器的阻抗调节作用,大大地减小了初级能源的负载阻抗。因此,变压器功率调节系统既能满足初级能源对低阻抗和感抗要求,又能满足高阻抗负载对大电感储能的要求。

图1为变压器功率调节装置示意图。系统包括三部分,中间的储能脉冲变压器、两边的爆炸丝开关和带隔离间隙的负载接口。系统的公共接地端为装置外壳。整个装置长1.3m,最大直径为0.52m。

变压器采用复合铜箔带层绕结构。其骨架为和环氧树脂粘接度较好的玻璃布管。内外管间采用环氧树脂真空浇铸以固定线圈。这种结构的变压器耦合效率很高,而且由于次级高压输出端在中心,初、次级间电压较低,其间体绝缘问题相对容易解决。

爆炸丝断路开关起压缩脉宽、提高输出功率的作用。由于初始丝阵电阻很小,变压器次级回路有较大的电流。当丝阵进入汽化爆炸阶段、其电阻快速增加时,这一电流被快速切换到高阻抗的负载回路,从而在负载上形成高电压脉冲。因此,丝开关性能好坏的关键在爆炸时的丝电阻。实际中多采用几十根丝并联使用,以提高其断开性能<sup>[1]</sup>。但丝阵的长度决定了开关单元尺寸较长。我们对此进行了改进,采用折叠绕丝、凸形盘防爬电的方法,有效地减小了开关的长度。隔离间隙采用球形铜电极结构,其间充六氟化硫气体,通过气压的调节来调整间隙导通电压。隔离间隙的绝缘体采用凹形结构以增加爬电距离,减小了装置的尺寸。

### 2.2 数值模拟

实验的初级能源采用电容器能源组,如图2所示。考虑实际情况,在回路的初、次级还有回路电感  $L_{p1}$ 、 $L_{s1}$  和回路内阻  $R_1$ 。设变压器初、次级电感和互感系数为  $L_p$ 、 $L_s$  和  $k$ ,电路方程为

$$U + L_1 dI_1/dt + M dI_2/dt + I_1 R_1 = 0 \quad (1)$$

$$dU/dt = I_1/C \quad (2)$$

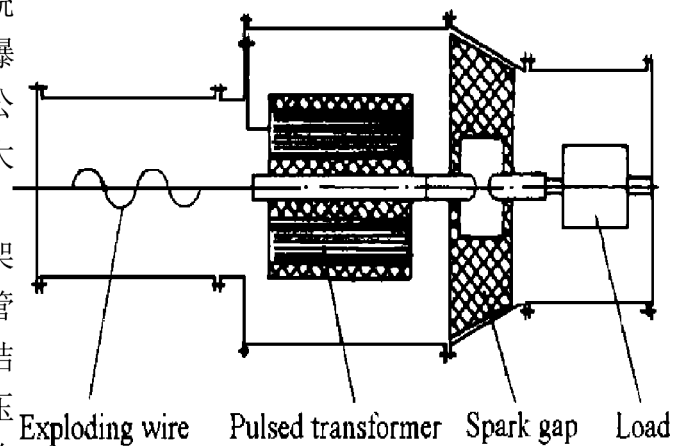


图1 变压器功率调节装置示意图

Fig.1 Pulsed power conditioning design with transformer

$$L_2 dI_2/dt + M dI_1/dt + (I_2 - I_3)R_e = 0 \tag{3}$$

$$L_d dI_3/dt + U_g + I_3 R_d = (I_2 - I_3)R_e \tag{4}$$

$$\begin{aligned} U_g &= M dI_1/dt & I_2 R_e &\leq U_{g0} \\ U_g &= U_{g0} e^{-t/\tau} & I_2 R_e &> U_{g0} \end{aligned} \tag{5}$$

式中： $U$ 、 $C$  分别为电容器电压和电容量； $M = k_e \sqrt{L_1 L_2}$  为有效互感；有效互感系数  $k_e = k \sqrt{(L_p L_s)/(L_1 L_2)}$ ； $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  为初、次级电流和负载电流； $R_e$ 、 $R_d$  为爆炸丝和负载电阻； $L_d$  为负载回路电感； $U_g$ 、 $U_{g0}$  为隔离间隙电压和导通电压； $\tau$  为隔离间隙时延； $L_1 = L_{p1} + L_p$ 、 $L_2 = L_{s1} + L_s$  为回路等效的初、次级电感。爆炸丝电阻计算见文献[4]。

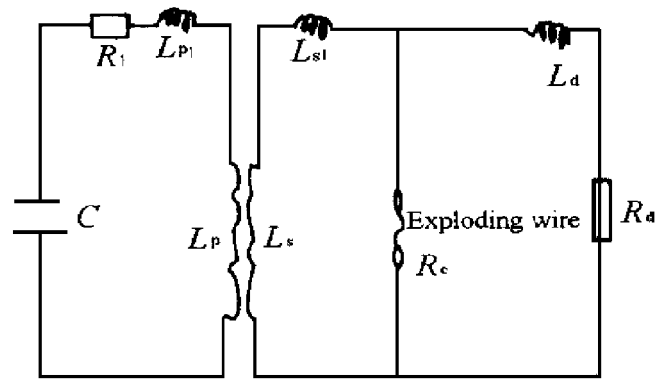


图 2 变压器功率调节系统性能实验的电路图

Fig.2 Experimental electric circuit

### 3 实验描述

用 HP4284A 精密 LRC 仪对变压器初、次级电感进行测量。互感采用串联法测量，即分别测量变压器初、次级电感  $L_p$ 、 $L_s$  和初、次级的串联电感  $L_{ps}$ 。变压器互感  $M$  满足

$$M = \frac{1}{2} (L_{ps} - L_p - L_s) \tag{6}$$

耦合系数为

$$K = M / \sqrt{L_p L_s} \tag{7}$$

变压器功率调节装置动态性能实验在一套 16μF 的电容器能源组上进行。用不带和带爆炸丝开关两种情况的实验检测了变压器的耦合系数和装置的电压输出性能。负载采用硫酸铜水电阻。图 2 为实验的等效电阻图。隔离间隙为导通状态。

实验测量了初级回路的电流、负载电流和电压。电流测量采用罗柯夫斯基线圈。电压测量采用硫酸铜水电阻分压器。记录示波器为 TDK744。

### 4 结果及讨论

变压器功率调节系统的性能主要取决于变压器的耦合效率和耐压。采用复合铜箔带层绕的结构可以有效地解决线绕脉冲变压器低耦合效率问题。箔带变压器初次级间的磁通损失主要由匝间绝缘层总厚度  $D$  和绕带平均半径  $r_p$  决定，耦合系数可近似由下式给出

$$k = 1 - D/r_p \tag{8}$$

绝缘层厚度取决于变压器的工作电压和材料绝缘强度。我们选用高绝缘强度的聚脂膜，其绝缘强度大于 50kV/mm。绕带初始半径为 100mm。变压器参数测量结果： $L_p = 2.0\mu\text{H}$ ， $L_s = 93.5\mu\text{H}$ ， $k = 0.82$ ， $n = 7.3$ 。

用不带爆炸丝开关的实验检测了变压器的耦合性能。图 3 为典型的实验电流波形和模拟波形，电容器充电电压 24kV，负载电阻 50Ω，回路电感  $L_{p1} = 0.20\mu\text{H}$ 。从模拟结果看，变压器耦合系数不小于 0.84。

图 4 为典型的带爆炸丝时实验和模拟电流电压波形, 电容器充电电压 27kV, 负载电阻 75Ω, 爆炸丝有效长度 480mm, 有效截面积 0.045mm<sup>2</sup>。隔离间隙为导通状态。负载电阻上输出电压峰值大于 600kV, 脉宽约 300ns, 较之电感储能功率调节系统输出脉冲, 脉宽有较大增加<sup>[1]</sup>。模拟结果和实验结果基本相符。

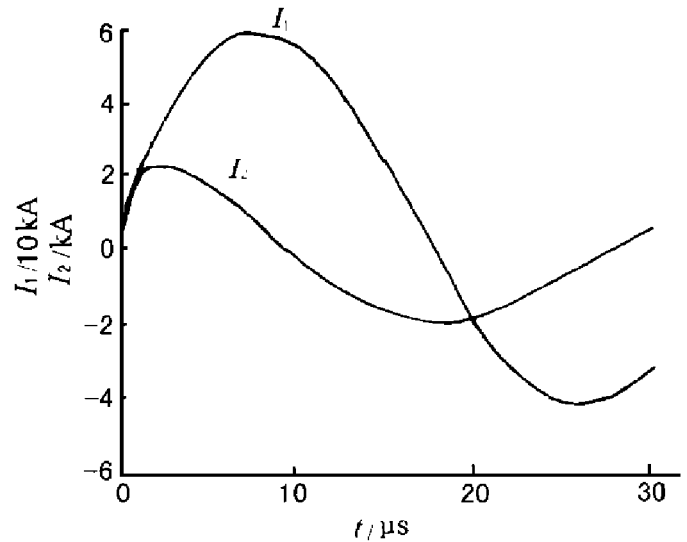
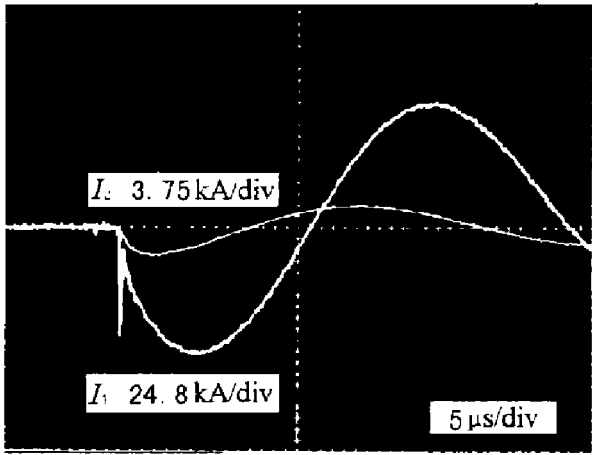


图 3 不带爆炸丝时典型的初级电流  $I_1$  和次级电流  $I_2$

Fig.3 Typical current in the primary coil and the second coil without exploding wire

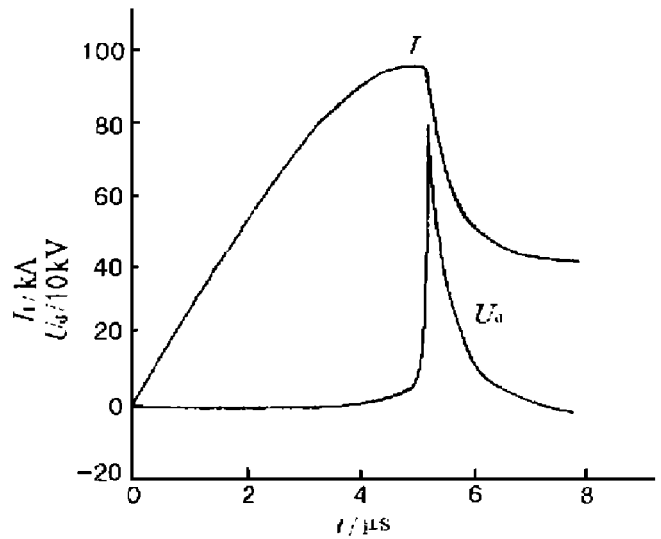
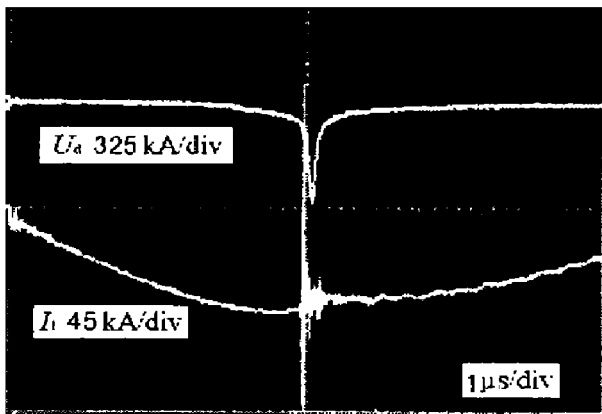


图 4 带爆炸丝时典型的初级电流  $I_1$  和负载电压  $U_a$

Fig.4 Typical current in the primary coil and the load voltage with exploding wire

理想情况下, 变压器的耐压  $U$  取决于绝缘层厚度  $d_w$  和绝缘薄膜的绝缘强度  $w$

$$U = Md_w w \tag{9}$$

式中:  $M$  为变压器次级层数。但实际上沿边击穿减小了变压器的耐压。实验结果表明, 根据 (9) 式计算出的变压器最高输出电压与实验结果有一定的偏差, 这一偏差随变压器设计最高输出电压的增加而加大。这主要是因铜带边缘区电场畸变和铜带边缘毛刺等造成了击穿, 因此有效地解决沿边击穿问题是提高变压器电压输出能力的关键之一。

从图 4 实验结果可以看出, 主流的 1/4 周期约为 4.8μs, 因此, 初级能源的等效负载电感约为 0.58μH。可见由于变压器的电感调节作用, 大大减小了初级能源的负载电感, 有利于满足

爆炸磁压缩发生器这类能源装置对负载电感的要求。对主电流波形的分析表明, 变压器也大大减小了初级能源的等效负载电阻, 当系统带  $75\Omega$  的电阻负载时, 初级能源的等效负载电阻小于  $2\Omega$ 。

## 5 结 论

(1) 通过变压器和电爆炸丝相结合的技术途径, 在  $75\Omega$  负载上产生  $600\text{kV}$ 、脉宽  $300\text{ns}$  的高压脉冲。变压器耦合系数达到  $0.84$ 。

(2) 采用复合铜箔带层绕的结构, 解决了高电压输出能力的空心变压器研制中存在的低耦合效率问题。

(3) 由于直接对负载放电的为变压器次级大电感, 采用变压器和电爆炸丝相结合的功率调节系统可以有效地增加输出脉冲宽度, 有利于满足负载的需要。

(4) 由于变压器的阻抗调节作用, 相对于初级能源而言, 其负载电感和电阻较小, 可以满足爆磁发生器等能源系统的要求。

参加实验工作的还有张南川、李争等, 在此向他们表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 高顺受, 杨礼兵, 陈英石, 等. 电感储能脉冲功率调节系统的研究. 爆炸与冲击, 1997, 17(1): 50 ~ 56
- 2 Blaher R J, Reinovsky R E. Inductive Store/Transformer Driven Diode System. In: Proceedings of the 4th IEEE Pulse Power Conference. Albuquerque, New Mexico: [s. n.], 1983. 126 ~ 128
- 3 Fowler C M, Caird R S, et al. Pulse Transformer Operation in Megagauss Fields. Megagauss Physics and Technology, 1979. 275 ~ 285
- 4 刘烈峰. 含变压器的功率调节系统分析. 爆轰波与冲击波, 1998, (2): 37 ~ 40

## STUDIES OF PULSED POWER CONDITIONING SYSTEM WITH TRANSFORMER

Liu Liefeng, Feng Shuping, Han Wenhui, Wang Minghua,  
Gao Shunshou, Ding Bonan

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, 610003*)

**ABSTRACT** The pulsed power conditioning system with transformer is studied. It contains a pulse transformer with a coupling efficiency of about  $0.8$ , a fuse opening switch and a separating spark gap. Test results of the system are presented. When a  $5\text{kJ}$  source is used to charge the system, the pulse, the peak voltage is  $600\text{kV}$  and duration is  $300\text{ns}$ , is obtained on a  $75\Omega$  resistance load. The numerical simulation results are presented.

**KEY WORDS** pulsed power conditioning, pulse transformer, exploding wire