

一种新型电子变压器的研制

王 晗, 闫彩艳, 游龙翔

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 根据常用电子变压器的电磁兼容性和安全方面的新要求, 对其基本线路进行改进设计和分析. 在输入端加入了滤波网络和输入保护电路, 并加入了实用的输出保护电路, 既实现了 220 V 输入、12 V/60 W 输出的功能, 又大大提高了电子变压器的性能, 达到了 IEC 制定的技术标准. 通过理论和实验分析, 证明了该设计的优点, 给出了元件参考参数. 本电路设计具有实用性, 适用于工业化生产.

关键词: 电子变压器; 推挽; 保护电路

中图分类号: TN 712

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2005) Sup 0302-05

过去在照明领域中, 使用的配套电源往往是传统的铁芯变压器. 传统的变压器具有制作工艺简单、可靠性高等优点, 但是它的缺点也十分明显, 例如体积、重量、空载损耗大; 过载时导致输出电压下降、产生谐波; 带非线性负载时, 畸变电流通过变压器耦合进入电网, 造成对电网的污染; 电源侧电压受到干扰时, 又会传递到负载侧, 导致对敏感负荷的影响^[1], 而且在安装和维修时, 也十分不方便.

因此, 从 90 年代初开始, 国内外竞相开发电子变压器来取代老式铁芯变压器. 但在实际使用中, 一些电子变压器的性能常常达不到老式铁芯变压器的性能标准, 并且可靠性不高, 从而制约了它的使用和推广. 本文在认真分析和反复实验的基础上, 对老式电子变压器的结构进行优化改进, 得到的一种新型电子变压器, 其继承了常用电子变压器设计思想, 克服了常用电子变压器存在的一些缺点, 从而提高了安全性和可靠性.

1 原理分析

在低压大电流应用场合下, 推挽电路是一种优选方案^[2]. 传统的电子变压器就是利用这一技术思想进行设计. 图 1 为典型的电子变压器线路图.

如图所示, 其工作原理与开关电源相似, 二极管 VD1~VD4 构成整流桥把交流电变成脉动直流电, 由振荡变压器 T1, 三极管 VT1、VT2 组成的高频振荡电路, 将脉动直流变成高频电流, 然后由输出变压器 T2 对高频高压脉冲降压, 获得所需的输出电压和功率.

其典型参数如下: R_1 (1 Ω /1 W) 为过流保护电阻.

电阻 R_2 (330 k Ω /0.25 W)、电容 C_1 和双向触发二极管 VD5 构成启动触发电路. 三极管 VT1、VT2 选用 13005, 其 β 值为 15~20 倍. 也可用 3093 等大功率三极管. 触发二极管 VD5 选用 32 V 左右的 DB3. 振荡变压器可自制^[3]. 变压器 T1 的三边中, T1a、T1b 绕 5 匝, T1c 绕 1 匝. 输出变压器 T2 也可自制, 磁芯选用边长 27 mm、宽 20 mm、厚 10 mm 的 EI 型铁氧体. T2a 用直径为 0.45 mm 高强度漆包线绕 100 匝, T2b 用直径为 1.25 mm 高强度漆包线绕 10 匝. 整流桥所用二极管 VD1~VD4 可选用 IN4007 型, 电容 C_1 (0.01 μ F)、 C_2 (0.1 μ F)、 C_3 (0.1 μ F) 选用聚丙烯酯涤纶电容, 耐压 250 V. 电路工作时, 1~5 点间工作电压约为 12 V, 波形占空比 Q 约为 0.6, 最大输出功率在 50 W 左右. 改变 T2 原、副边线圈的匝数, 则可改变输出的高频电压. 整个电路应置于屏蔽性和散热性均较好环境中, 还必须注意电路与外壳的绝缘.

在传统的设计中, 主要存在两点不足. 首先是电路中保护电路的设计存在缺陷, 可靠性不高, 主要表现在负载功率超过额定点时, 保护电路不能及时启动工作, 有时在没有达到额定点时却提前启动工作. 其次, 由于

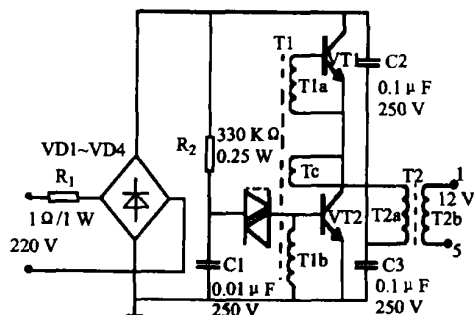


图 1 传统的电子变压器线路

Fig. 1 The old electronic transformer's circuit

收稿日期: 2005-04-17

作者简介: 王晗(1980-), 男, 硕士研究生.

缺少合理的滤波网络, 电网中存在的高频脉冲可能会影响电子变压器的正常工作, 如果出现过压情况, 还有可能损坏电路中的电子器件, 而且大功率三极管开、关工作时产生的高频尖峰脉冲可能会污染电力网络. 这些缺点在实际使用中给用户带来许多不便.

2 改进设计

为了克服常用电子变压器的上述缺点, 在新的设计中, 进行了合理改进, 新型电子变压器的原理电路如图 2. 改进主要集中在前端滤波网络(1)和中间保护电路(2)这两部分, A、B、C、D 分别为电路测试点.

2.1 前端滤波网络设计

由于工作电网中存在大量高频杂波, 使用时会对后继电路的正常工作产生一定的影响, 导致电子变压器工作的稳定性和可靠性下降, 因而在输入前端, 设计增加了一个由电感 L_1 和电容 C_1 、 C_2 等元件组成的三阶全极点型巴特沃斯低通滤波器^[4], 如图 2 中(1)部分. 其可以对输入电压中的高频脉冲进行衰减. 假设滤波器后接负载电阻无限大, 用现代网络理论可以推导出滤波网络的传递函数表达式

$$T(S) = \frac{U_B(S)}{U_A(S)} = \frac{1}{C_1 C_2 L_1 S^3 + L_1 C_2 S^2 + (C_1 + C_2) S + 1}$$

令 $S = j$, 上式化为

$$T(j) = \frac{U_B(j)}{U_A(j)} = \frac{1}{C_1 C_2 L_1 (j)^3 + L_1 C_2 (j)^2 + (C_1 + C_2) j + 1}$$

由上可知, 当 C_1 、 C_2 、 L_1 的参数值确定时, $T(j)$

分母的多项式系数是可以确定的, 从而得到确定的频率特性函数 $T(j)$. 由此, 可以通过它的波特图分析滤波网络对各频段杂波的衰减程度, 证明其有效性. 在元件的选取上, 尽可能选用常规元件, 节约成本, 便于生产制造. 所以可以选用 $C_1 = C_2 = 0.022 \mu\text{F}$, 耐压 400 V 以上的薄膜电容; 电感可以在 1~22 mH 间的常规器件中选择, 在此选择 $L_1 = 20 \text{ mH}$ 的电感进行设计与测试. 此时可以得到频率特性函数

$$T(j) = 1 / [9.68 \times 10^{-18} (j)^3 + 4.4 \times 10^{-10} (j)^2 + 4.4 \times 10^{-8} j + 1]$$

由上式, 得到传递函数的波特图, 如图 3 所示. 当 $\omega = 1.26 \times 10^4 \text{ rad/s}$ 时, 转折点出现. 由于 $\omega = 2\pi f$, 经换算, 可知滤波器对于 $f > 5035 \text{ Hz}$ 以上的高频脉冲有明显的衰减作用, 从而可以对输入电压的高频分量起到过滤作用. 但是输入电压还有可能存在过压情况, 所以在滤波器后端, 还接入了一个浪涌吸收器 M1 和一个过流保护器 F1. M1 可以选取 MYN9 型, 在 250~500 V 过压情况下开始工作, 可吸收 9 kJ 浪涌能量. F1 在温度 $> 125^\circ\text{C}$ 时, 会自行断开, 也可以起到过压保护的作用. 此项设计理论上可以实现输入前端滤波与保护的作用.

2.2 过流保护电路设计

图 2 电路中, D 点输入 $f_0 = 100 \text{ Hz}$ 、 $U_0 = 218 \text{ V}$ 的直流脉动, 经由功率管 VT1、VT2 开关工作后, 在高频变压器 T2 的原边两端所产生脉冲电压 U_m 约 120 V, 频率 f_k 可达 20 kHz 左右. 高频变压器 T2 的效率为 0.95, 原、副边匝数比为 100:10, 输出电压 U_{out} 约 12 V. 设 I_K 为电路的总电流, 输出功率的计算式可近似为

$$P_{\text{out}} = 0.95 U_{\text{in}} I_K \quad (1)$$

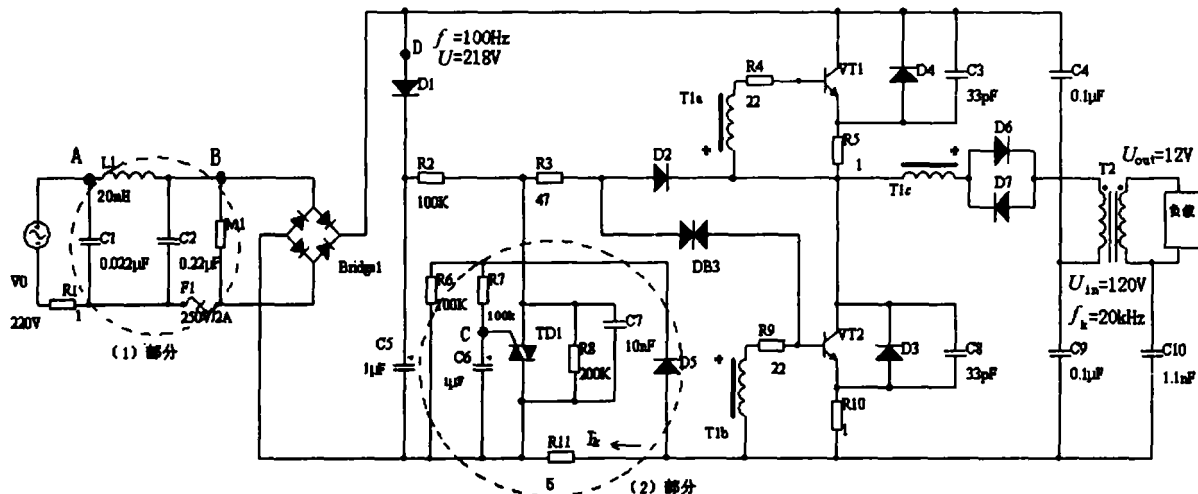


图 2 新型电子变压器的原理电路图

Fig. 2 The new electronic transformer's principle circuit

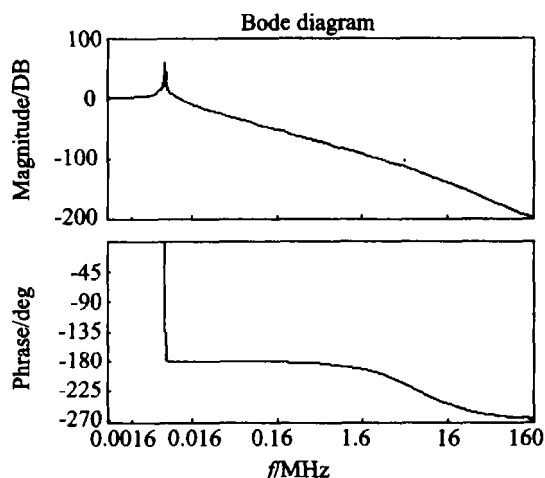


图3 波特图

Fig.3 Bode diagram

在有负载工作时,可能发生过载情况,需要有保护电路在过载时,进行制动保护.图2中(2)部分为过流保护电路.其由电阻 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_{11} ,电容 C_6 、 C_7 ,二极管 D_5 以及双向可控硅 DT_1 组成.设计思想如下:由于总电流 I_K 通过电阻 R_{11} 时会在其两端产生电压 U_K ,经过 D_5 、 R_7 、 C_6 回路将在 C 点产生电压 U_C ,取 $R_7 = 100 \text{ k}\Omega$ 作为分流电阻.

设可控硅控制极的导通触发电压为 V_C .当 $U_C > V_C$ 时,可控硅导通,直接降低 D 点的电位,使后继开关电路停止工作,达到对整个电路的过流保护作用.当输入电压恢复正常时,电路又恢复正常工作.

电路中,我们选择 MCR100-6 型双向可控硅,触发电压 V_C 为 $0.4 \sim 0.8 \text{ V}$,通常设计 R_8 、 C_7 与其并联,可取 $R_8 = 200 \text{ k}\Omega$, $C_7 = 10 \text{ nF}$.

通过理论推导,对其它元件参数进行定量选择.已知 D_5 的管压降为 $V_{ON} = 0.7 \text{ V}$,为了便于计算分析,一般情况下, R_6 、 R_7 的阻抗以及 C_6 的容抗应远大于取样电阻 R_{11} 的阻抗,因此,可以近似认为

$$U_K = I_K \cdot R_{11} \quad (2)$$

根据电压计算公式知

$$U_C = \left| \frac{1/j \cdot C_6}{R_7 + (1/j \cdot C_6)} \right| (U_K - V_{ON}) = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (R_7 \cdot C_6)^2}} \right| (U_K - V_{ON}) \quad (3)$$

其中 ω : 总电流 I_K 的角频率.

$$= 2\pi f_K \quad (4)$$

其中 f_K : 总电流 I_K 的频率.

为提高可靠性,降低计算误差,可取 $V_C = 0.4 \text{ V}$.

若要求当

$$P_{out} \geq 70 \text{ W 时} \quad (5)$$

此刻

$$U_C \geq V_C \quad (6)$$

可控硅导通,过流保护电路启动,开关电路停止工作.

这里取常规元件

$$R_6 = 3.2 \text{ k}\Omega, \quad R_{11} = 2 \Omega \quad (7)$$

实际上 I_K 的组成分量的频率分布在 $0 \sim 40 \text{ kHz}$ 以上的频域内,所以从理论上计算 f_K 是十分困难的,计算值的可靠性也较低.在此,提出采样分析的方法,估计 C_6 的取值.

首先在 f_K 可能分布的频域内采样取值,如表 1.

表 1 采样频率值

Tab. 1 The sampling frequency value

采样点	1	2	3	4	5	6
f_K/Hz	10	50	200	1 k	15 k	80 k

将表 1 中 f_K 各值和式(1)~(8)联立计算,相应得到电容 C_6 相应取值范围的列表,如表 2.

表 2 C_6 相应取值范围表

Tab. 2 The confine of C_6 's value

采样点	1	2	3	4	5	6
$C_6 \leq (\mu\text{F})$	4.3	0.86	0.22	0.043	0.0029	0.00054

从表 1,2 可以看出,频率采样点取值的不同,直接影响着 C_6 的取值范围,而且差异较大.在此, C_6 参数的选取是保护电路正常工作的关键,必须慎重分析后,才能合理选择.

由于在通常使用中, I_K 中的直流成分和其它低频成分占 60% 以上,因而这一部分电流起到主导作用.所以可以选择 $C_6 = 1 \mu\text{F}$,按照上述理论推导,应该接近设计要求,但仍需实验检测.

2.3 其它改进

图 2 中增加的二极管 D_3 、 D_4 和电容 C_3 、 C_8 构成对称结构,可以对功率管 VT_1 、 VT_2 起到保护作用, C_{10} 可以对负载处产生的高频杂波起到一定的过滤作用.电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_9 、 R_{10} 等元件可以起到分压或限流的作用.其它新增元件对于提高电路工作的可靠性也有一定的作用.上述元件参数在图 2 中均已给出.

3 仿真分析

应用最新版 EDA 软件 Protel DXP 可以快速地对电路工作状态进行仿真分析^[5].

首先对前端滤波网络进行分析. 选取 A 、 B 两点的电压 U_A 、 U_B . U_A 为电网输入电压, 220 V/ A V, 含有一定的高频杂波分量. U_B 为经过滤波网络后得到的电压.

如果将 U_A 、 U_B 的波形加以比较分析, 就可以确定滤波网络的作用. 仿真结果如图 4 所示.

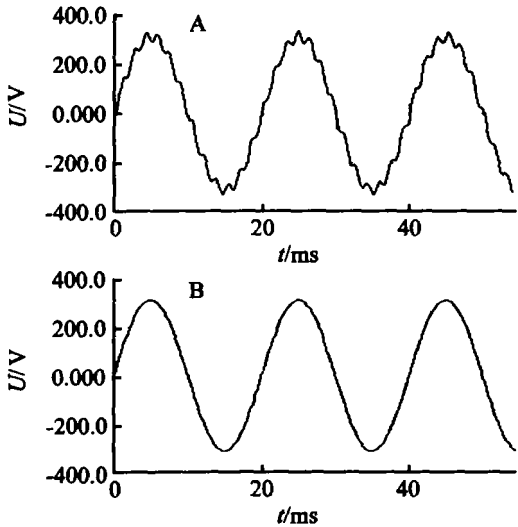


图 4 A 、 B 测试点电压波形图

Fig.4 The diagram of the voltage wave in the A , B test points

输入电压经过滤波网络后, 大部分高频杂波被过滤, 波形质量有明显的改善, 证明了设计增加的滤波网络的有效性.

其次, 对新型电子变压器正常工作时的输出进行分析, 仿真如图 5.

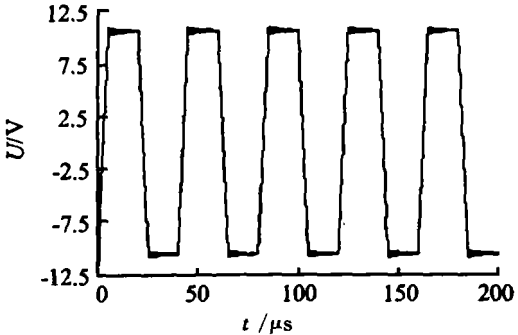


图 5 负载端输出电压波形

Fig.5 The diagram of the voltage wave in the load point

从图中看出, 在输入 220 V 电压时, 得到输出电压有效值约 12 V, 基本达到了设计要求. 从而证明了改进电路设计的有效性.

4 实验数据分析

实验主要针对保险 F1 和整体性能进行试验数据采集和分析. 当系统正常工作时, 突然加大输入电压 V_0 , 测试保险 F1 的状态, 得到表 3.

表 3 输入测试数据
Tab.3 Testing data of input

V_0 /V	255	260	261	262	263	264	265
F1 状态	正常	正常	正常	正常	正常	正常	断开

从表 3 中可以看出, F1 在 265 V 时断开, 起到一定的保险作用.

当输入 220 V 工作电压时, 通过增大输出负载, 测试输出电压的变化, 记录系统的状态, 进行分析, 得到表 4.

表 4 负载测试数据
Tab.4 Testing data of load

负载/W	0	50	60	65	70
输出电压	15.6	11.8	11.3	0	0
系统状态	正常	正常	正常	停止	停止

从表 4 中可以看出, 当负载达到 65 W 时, 保护电路开始工作, 使系统停止工作, 达到保护效果.

5 实验结果

实验中, 可以看出当输入电压大于 265 V 时, F1 迅速断开. 当输入电压 220 V, 正常工作时输出电压为 12 V 左右; 空载时, 输出电压为 15 V 左右. 当负载大于 65 W 时, 过流保护电路启动, 新型电子变压器停止输出.

仿真实验中, 可以看出新型电子变压器的前端滤波网络对 5 000 Hz 以上的高频杂波有明显的衰减作用. 实验数值和理论设计数值比较接近, 这证明了设计的可靠性.

6 结 论

相对于传统电子变压器, 新型电子变压器的工作状态稳定, 安全性能好, 可靠性高, 其组成元件在选用上述参数时, 各项工作指标均可达到设计要求, 其电磁兼容性能符合 IEC 标准. 由于全部使用常规元件, 其制造成本低廉, 适合于大规模工业生产, 值得推广.

但是, 在选择元件生产时, 元件参数的稳定性可能

对新型电子变压器的整体性能产生一定的影响, 这一问题值得再进行深入研究.

参考文献:

- [1] Ronan E R, Sudhoff S D, Glover S F, et al. Application of power electronic to the distribution transformer[A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. New Orleans (USA): 2000. 861– 867.
- [2] 张方华, 王慧贞, 严仰光. 正激推挽电路的 ZCS 方案[J]. 电力电子技术, 2003, 4(2): 60– 62.
- [3] 王瑞华, 王乔. 电子变压器及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 87– 97.
- [4] 威廉斯 阿瑟 B(美). 电子滤波器设计手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986. 1– 11.
- [5] 崔玮, 王金辉. Protel DXP 使用手册[M]. 北京: 希望电子出版社, 2003. 303– 344.

Research and Implement on the New Electronic Transformer

WANG Han, YAN Cai yan, YOU Long xiang

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: According to new requests of common electronic transformers' electromagnetic compatibility and security, its basic circuit was improved and analyzed. Puts a filtering net and a protective circuit of input was put in the front of the whole input net, and a new protective circuit of output was designed. This design realizes that 220 V input is transformed into 12 V/ 60 W output, and improves the performance of device to reach the criterion of IEC. The strongpoint of the new design was proved with analysis of theory and experimentation, and the tried parameters were provided. It is fit for producing because of its practicality.

Key words: electronic transformer; push pull; protective circuit