

# 新型高频电磁加热热水器的研究与设计

王峰, 陈辉明, 王英, 潘如峰

(浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

**摘要:**本文介绍了一种利用半桥谐振电路实现的新型电磁热水器的设计原理和方法。试验结果表明基于感应加热原理的电磁热水器可稳定工作在 1.5KW, 30KHz 的范围, 并使输入谐波降到最低, 负载侧功率因素达 96%以上, 效率达 92%。

**关键词:**感应加热, 热水器, 半桥电路, 谐振

## The research and design of high-frequency induction water-heater

WANG Feng, CHEN Hui-ming, WANG Ying

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:**This paper presents an analysis of a new induction water-heater, using half-bridge parallel resonant inverter. This inverter can work stably in condition of 1.5KW, 30KHz. Power factor of this inverter is over 99, and efficiency is 92%.

**Keywords:**induction heating, water-heater, half-bridge circuit, resonant

### 一、引言

目前, 在家庭浴用设施方面尤受人们欢迎的是淋浴热水器。为满足人们的需要, 各厂家相继研制出燃气、电加热、太阳能热水器等。然而在使用中这些热水器都有各自的缺点, 燃气和电热水器的安全性较低, 太阳能热水器的效率不高这都造成了它们使用的局限性。采用感应加热原理设计的高频电磁加热热水器和以上几种相比有着突出的优点, 它是利用电磁感应产生的交变磁场在圆柱状的发热体的表面形成涡流达到直接加热的目的, 效率比贮水式热水器要高百分之二十, 加热时间比相同功率的电热水器要快的多, 更值得指出的是它是通过感应线圈使发热体产生涡流达到加热的目的, 从而实现了发热体和主电路之间电气上的隔离, 避免了电热水器那样因绝缘的损坏而产生的漏电现象, 在安全性上有了大大的提高。这次, 我们设计出了 1.5KW, 30KHz 的电磁热水器, 试验表明完全符合要求。

### 二、电路拓扑及设计过程

电磁热水器电路的系统框图如图 1 所示, 市电交流 220V 经过滤波整流后变为大约 310V 直流, 通过半桥谐振逆变电路的振荡在线圈绕组中产生交变的磁场, 在发热体中产生涡流以达到加热的目的。

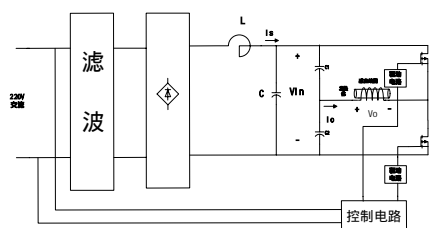


图 1、电路系统框图

#### 2.1、主电路过程分析

主电路的工作过程如图 2, 通过开关管 S1, S2 的开通和关断, 感应线圈电感和半桥电路的两个电容在各自的回路形成谐振。在稳态工作下根据开关管, 负载, 电容上电压电流的波形, 电路一个运行周期有四个阶段:

阶段一: 如图 2(a) 开关管 S1、S2 都关闭, 电流经 C1, L, R, D1 形成回路, 此时 S1 上的电压为零, 流过 S2 的电流为零。

阶段二: 如图 2(b) 开关管 S1 开通, 负载中电压方向不变, 电流反向经 S1, L, R, C2 形成回路, S1 开通时电压为零, 减小了开关损耗, 实现了零电压开通。

阶段三: 如图 2(c) 开关管 S1 关断, 负载电压反向, 电流通过 D2 续流, 此时 S2 上的电压为零, 流过 S1 的电流为零。

阶段四: 如图 2(d) 开关管 S2 开通, 线圈中电流反向, S1 在电压为零时开通, 电流流经 S1, L, R, C2。

$$V_L + V_R + V_C = V_{TH} \quad (1)$$

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L + \frac{1}{C} \int i_L dt = \pm V_{in} \quad (2)$$

$$i_L = e^{-\alpha t} \left[ I_1 \cos \beta t_1 + \left( \pm \frac{V_{in}}{2\beta L} - \frac{V_1}{\beta L} - \frac{\alpha}{\beta} I_1 \right) \sin \beta t_1 \right] \quad (3)$$

$$V_R = R * e^{-\alpha t} \left[ I_1 \cos \beta t_1 + \left( \pm \frac{V_{in}}{2\beta L} - \frac{V_1}{\beta L} - \frac{\alpha}{\beta} I_1 \right) \sin \beta t_1 \right] \quad (4)$$

$$V_L = L * e^{-\alpha t} \left[ \left( \pm \frac{V_{in}}{2\beta L} - \frac{V_1}{\beta L} - \frac{\alpha}{\beta} I_1 \right) * (\beta \cos \beta t_1 - \alpha \sin \beta t_1) - I_1 (\beta \sin \beta t_1 + \alpha \cos \beta t_1) \right] \quad (5)$$

$$V_{RL} = V_R - V_L \quad (6)$$

其中:

$$\alpha = R/2L, \beta = \sqrt{(R/4L)^2 - (1/LC)}, R = R_{eq} + R_{on}$$

$V_1, I_1$ : RLC 谐振回路中电容上的起始电压和电感上的起始电流;

式(1)中  $V_{TH}$  在阶段一、三为 0, 阶段二为

$$-\frac{V_{in}}{2}, \text{ 阶段四为 } +\frac{V_{in}}{2};$$

$V_{in} = V_{AC} \sin \omega t$ ,  $\omega$  为工频下的角频率, 在一个周期内近似认为不变;

该电路的输出功率为:

$$P_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} V_{s2} \sin(n\omega t) \right] \left[ \sum_{n=1}^{\infty} I_L \sin(n\omega t + \theta) \right] * \cos \theta_n \quad (7)$$

$v_{s2}, i_L$ : 开关管电压和负载电流

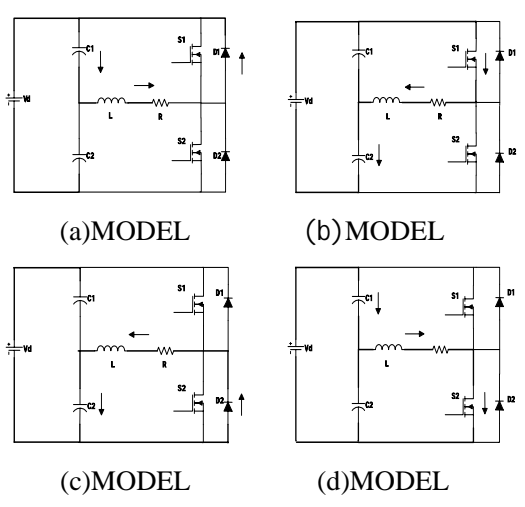


图 2、主电路工作过程

## 2.2 控制方法及实现

该控制电路的框图如图 3 所示

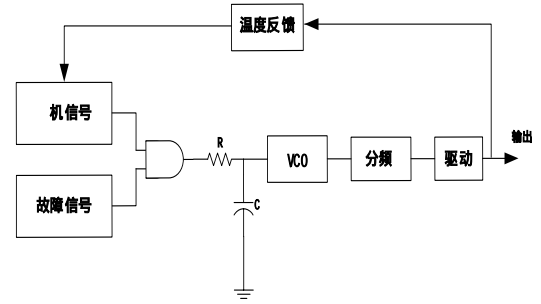
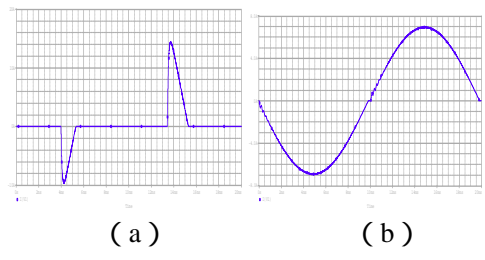


图 3、电路控制框图

开机信号经过 RC 缓冲后输入到压控振荡器 VCO 的输入端, 输出信号经分频后经过驱动电路实现对 MOSFET 的控制, 为降低成本, 该电路采用单一频率、电压电流开环控制, 而通过加热水温度的反馈控制起停。为了减少开机时对 MOSFET 的冲击, 采用了 RC 缓冲软启动电路, 以扫频的方式实现开机时功率的逐步增加。

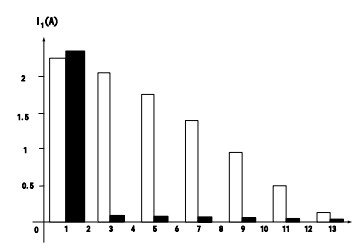
## 2.3 输入滤波器的设计

通常输入滤波器采用大电容或大电感使逆变器的输入电压或电流变成直流, 但这种设计也带来了许多的问题, 例如逆变器输入功率因素很差, 同时逆变器电路的谐波对电网的干扰也成为不可忽略的因素。为了减小电路对电网的谐波污染, 改善逆变器的功率因素, 该电路采用了 LC 滤波的方式, 使电路产生的谐波降到最低, 同时使输入电压和电流的包络线同相, 从而使负载侧功率因素接近为 1。



(a)

(b)



(c)

图 4、输入电流及谐波分析

图 4 (a) 是采用大电容滤波时输入电流的波形。由图可见，只有当整流后的电压大于电容上的电压是，电网才会向逆变器输入功率。图 4 (b) 采用的是 LC 滤波，输入电流近似于正弦波，高次谐波明显减少。(c) 是两种情况下输入电流谐波的比较，白色是采用电容滤波，黑色是 LC 滤波。由图可见，采用 LC 滤波的效果明显好于单一电容滤波。

在滤波电感的设计中，由公式(8)可知，

$$AP = \left( \frac{LI^2 * 10^4}{B_w K_0 K_j} \right)^{\frac{1}{1+X}} \quad (8)$$

电感磁芯体积的大小与通过电感电流成正比。为了减小滤波电感的体积，我们采用了无气隙环形磁芯的饱和电感，当主回路电流超过一定值时，电感磁芯饱和，电路中只剩下电容滤波。饱和电感电感值与电流的关系由下式给出：

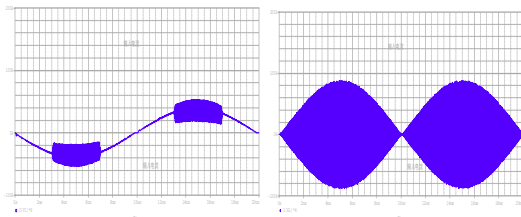
$$L = NS \frac{dB}{dI} \quad (9)$$

$$B = f(H) \quad (10)$$

$$HI = NI \quad (11)$$

$$L = \frac{N^2 S}{l} f' \left( \frac{NI}{l} \right) \quad (12)$$

仿真和试验结果表明，采用饱和电感后输入电流的谐波有所增加，但整流二极管和开关管上的电流和电压值没有太大的变化，电感的体积减小了很多，仿真结果如图 5 所示。



(a)输入电流 (b)负载电流

图 5、采用饱和电感后的波形

滤波器参数经计算，电感 L 取 300~400u，电容 C 取 5u 滤波效果最好。由滤波器传递函数

$$G(s) = \frac{1}{S^2 LC + 1} \quad (13)$$

得出的伯德图如图 6 所示。由图可见，

电路在工作频率 30K 的谐波被完全的滤掉。

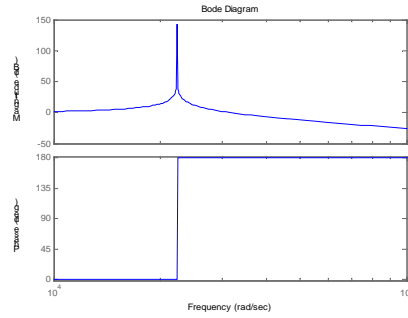
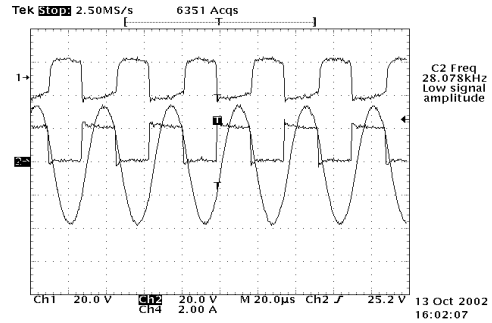


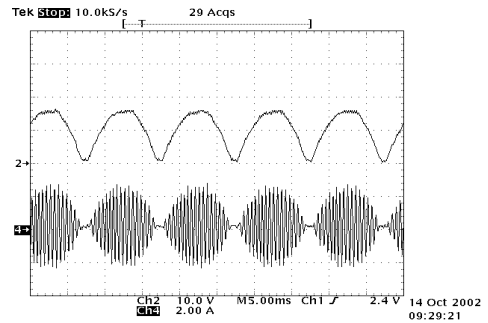
图 6、滤波器函数的 Bode 图

### 三、试验结果及波形

根据以上思路，我们设计了一台功率 1.5KW，工作频率 30KHz 的样机，图 7 是试验结果的波形，试验结果验证了以上推导的特性。



(a)



(b)

图 7、试验结果

图 7 (a) 中，1 是管子的驱动波形，2 是管子两端的电压，4 是电感上的电流。(b)中，2 是输入滤波器后的电压，4 是电感上电流的波形。由图 7 (b) 可以看出输入电压和电感电流的包络线同相位，负载侧功率因素接近为 1。

### 四、结论

由于采用了半桥式谐振电路和 LC 输入滤波器的设计，在器件的选择、电源效率、

对电网的谐波干扰等方面比同类的单管电路提高很多。但在减小开关的导通损耗，防止电路的直通方面尚需进一步改进。

#### 参考文献:

- [1] Eduard M.et al. Power Factor Enhancement of Induction Machines by Means of Solid-State Excitation[J]IEEE.Trans.on power elec.1989(4) 409~418
- [2]林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002.
- [3]张占松、蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.

#### 作者简介:

王峰(1979 - ):男, 硕士, 浙江大学电气工程学院电力电子及电力传动专业, 主要从事感应加热电源方面的研究。

陈辉明(1964 - ):男, 副教授, 浙江大学电力电子国家工程研究中心, 主要从事感应加热电源及电力电子器件的研究。

王英(1977 - ):男, 博士, 浙江大学电气工程学院电力电子及电力传动专业, 主要从事感应加热电源方面的研究。

潘如峰(1974 - ):男, 硕士, 浙江大学电气工程学院电力电子及电力传动专业, 主要从事感应加热电源方面的研究。

#### 通讯地址:

浙江大学玉泉校区电气工程学院 1339 信箱

邮 编: 310027

联系电话: 13958167593

email: wangfeng@zju.edu.cn