

器件研究

无损耗单端正反激软开关DC/DC变换器

郭雁恩 王长河 聂荣琪

(电子工业部第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要 对单端正反激软开关变换器的拓扑进行了分析与设计。采用30W、100kHz的原型电路对理论预期和设计步骤进行了验证,并讨论了整个电路损耗的优化过程。

关键词 单端正反激变换器 反激 正激 自嵌位 变压器磁通平衡

A Single-Ended Fly-Forward Soft Switching DC/DC Converter With a Nondissipative Snubber

Guo Yanen, Wang Changhe, Nie Rongqi

(The 13th Institute, Ministry of EI, Shijiazhuang 050051)

Abstract The analysis and design of an improved single-ended fly-forward soft-switching DC/DC converter topology is presented in this paper. The theoretical predictions and design procedure are verified experimentally on a 30W, 100kHz prototype circuit. Furthermore, the optimisation procedure based on the overall losses in the work is discussed.

Keywords Single-ended fly-forward converter Flyback Forward Self-clamping Transformer flux balancing

1 引言

开关电源具有体积小、重量轻、损耗小、效率高等特点,在雷达、计算机、通信、电子仪器、家用电器中已得到广泛应用。随着大规模集成电路(LSI)的出现,特别是超大规模集成电路(VLSI)向超高速集成电路(VHSC)的发展,各种电子设备的体积显著减小,迫切需要为其提供能量的电源具有小体积(高功率密

度)、高可靠、高效率的特点,而且能够输出低电压大电流。显然,传统的线性电源系统无论从体积效率、性能以及可靠性等各方面已无法适应现代化的要求。目前,供电电源部分,正从集中式供电方式朝分布式供电方式发展。从图1这一典型的分布电源系统可见,DC/DC变换器正是这种供电方式中使用率最高、最频繁的部件,同时DC/DC电路性能的好坏直接影响整个系统的性能。

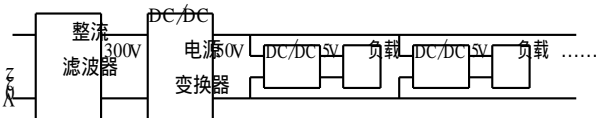


图 典型的分布式电源系统

电力开关变换器的出现 不仅使电源能够输出低电压大电流 而且使发展电力开关变换技术 进一步提高开关电源的功率密度成为可能。目前DC/DC 变换器的功率密度可达到 $6W/in^3$, 并正向 $60, 100 (W/in^3)$ 的方向发展。

国内外的动态表明DC/DC 变换器的发展始终朝着高效率与高功率密度的方向发展。其变换技术从以下三个方面加以论述

(1) DC/DC 变换器的组装方式。从采用THT (通孔插装技术 到采用MT (表面安装技术 发展到CM (多芯片组装 技术 功率密度已达到 $9W/cm^3$, 如hterpoint 的MK200 系列产品。

(2) 开关变换技术的发展体现着效率的提高。因为效率越高 意味着无功功耗越小 可靠性越高。从线性变换器PWM 开关变换器、谐振变换器到VM 软开关变换器 线性变换器的效率最低 尤其是输入电压较高时PWM 开关变换器使功率器件工作于开关状态 从而大大降低了变换器损耗 但是由于功率开关器件的导通和截止均需一定的时间 因而造成电压电流重叠 具有较高的开关损耗。谐振变换器利用谐振现象 使功率开关在零电压时导通 在零电流时关断 从而减小了开关损耗 使变换器在高频工作时的效率大大提高PWM 软开关为工作频率固定开关的前后沿实现了部分谐振的零电压或零电流开关。高效率有助于功率密度的提高 主要体现在散热器的尺寸可以减小。

(3) 决定开关电源体积大小的主要部分是电抗器、变压器等磁性元件和滤波电容。提高开关频率 减小电容器、电感、变压器的尺寸是实现电源小型化的最有效手段 而且还能抑制干扰 改善系统的动态性能。

高频化是开关电源的主要发展方向。但是

提高开关频率 必须减小开关器件在开关过程中的功率损耗以及磁性元件的铁损和铜损 才能保证较高的效率 这样需要有相应的高速半导体器件和性能优良的高频电磁元件。

高频化的发展必然促使开关电源朝高效率 and 功率集成化方向发展 因为高频化有利于缩小电路和元件尺寸。缩小电路尺寸就可以减少寄生参数的影响 同时 高频化后将迫使人们寻找高效率的开关变换电路或新的开关变换技术 以降低开关损耗。

2 无损耗DC/DC 变换器的电路分析与设计

图 给出无损耗DC/DC 变换器电路图 其中C 子电路能提供变压器磁通的平衡 提高转换效率。这主要表现在减小开关损耗 将变压器漏感和电路的杂散电感的能量反馈回电源。

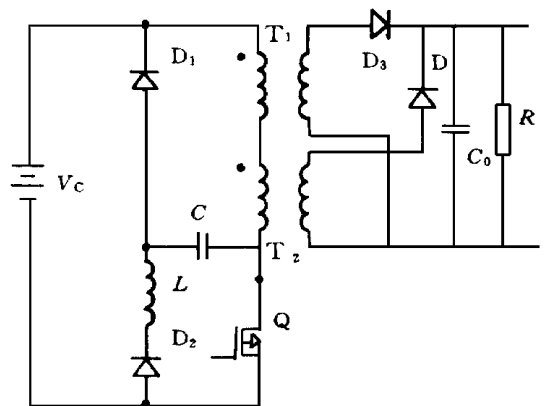


图 无损耗DC/DC 变换器电路图

图 给出无损耗单端正反激变换的等效电路 其工作原理简述如下。

假设电容 初始电压 v_c 。开关管闭合 表明能量正在供给负载和被贮存在变压器电感中。当开关 开始截止时 集电极电流开始下降 下降速率仅由晶体管的转换速度决定。然而 由于感抗的存在 外部电流不能立即变化 相反 流经电容 和二极管, 此时 电容的极性为正 且 v_s 。接下来 电容 电压开始缓慢变化直到改变极性 这样限制了集电极 发射极结电压的增长速率 以便使晶体管的

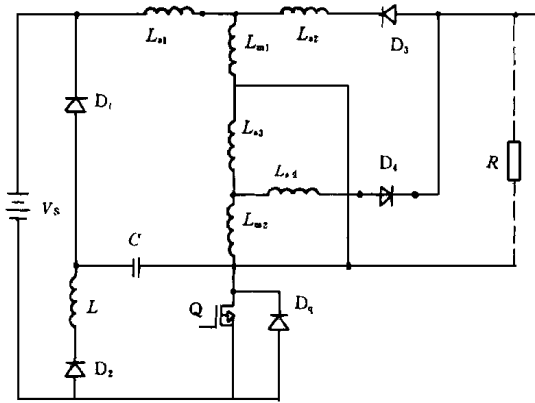


图3 无损耗单端正反激变换器等效电路

关断损耗大幅度减小,当电容电压变为负值时,开始由储存于 L_{m1} 和储存于 L_{m2} 剩余的能量供电,同时输送到电容 C ,电压 V_c 达到负的最大值,此时变压器磁通平衡条件得到满足。由于电容 C 的作用使关断时开关 Q 的电压由零开始缓慢上升。

V_c 的极性下个周期开始时翻转,这是由于 $L、C$ 通过 D_2 和 Q 进行谐振的结果。由于电感 L 的作用,使得电容 C 的电流从零开始缓慢上升,与开关主路的电流叠加,使得开关管 Q 的电流开始缓慢上升,这样限制了集电极-发射极结电流的增长速率,使晶体管的开通损耗大幅度减小。 V_c 的最终稳态电压总是 V_s ,这是由 D_1 和 D_q 的嵌位作用造成的。由于 LC 谐振的结果,使得开关管在零电流时导通,零电压时关断,从而大大降低了开关损耗。

2.1 电路分析

对一个开关周期10个状态的电流和电压进行分析,可得到其相应的等效电路图(见图4)。

导通过程(状态的方程解从略)

状态1: $0 < t < t_a$ 时,开关管由关断到闭合,此时 D_1 关闭, $D_2、D_3、D_4$ 处于开通状态,次级短路,将开关管看成一个线性减小电压源。

状态2: 在 $t_a < t < t_b$,开关管 Q 开, $D_1、D_3$ 关, $D_2、D_4$ 开。

状态3: $t_b < t < t_c$ 时, Q 开, D_3 关, $D_1、D_2、D_4$ 开。 L 中的能量返回 V_s 。

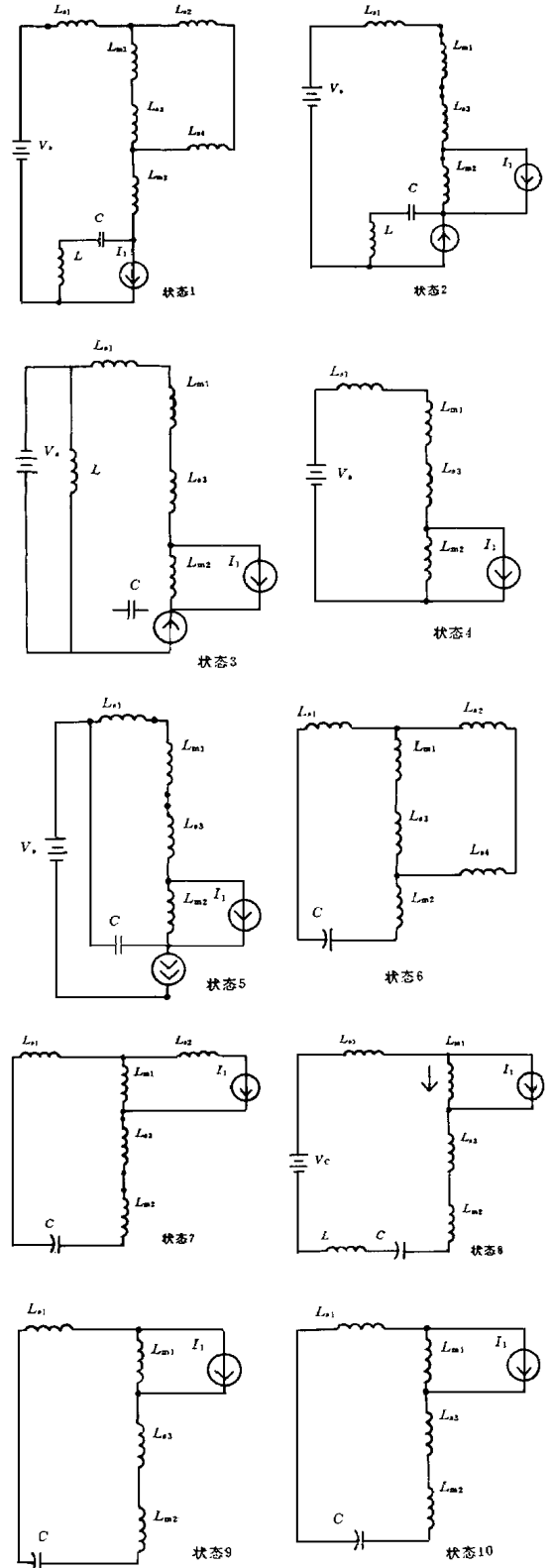


图4 10种状态下的等效电路

状态4: $t_c < t < t_{on}$ 时, Q 开, D_3 、 D_1 关, D_4 开, D_2 关。

关断状态 (状态方程解从略)

状态5: $t_{on} < t < t_1$, Q 开关, D_4 、 D_1 开, D_3 、 D_2 关。

开关管被看成是一个线性减小电流源, 此时储存在 C 中的大部分能量通过 D_1 流向负载, 电容 C 与变压器电感组成并联谐振电路。

状态6: $t_1 < t < t_2$, Q 关, D_1 、 D_3 、 D_4 开, D_2 关。电容吸收储存在变压器电感中的能量, V_c 逐渐为负值, C 与变压器电感组成并联谐振电路。

状态7: $t_2 < t < t_3$, Q、 D_3 、 D_4 关, D_1 、 D_2 开。储存在变压器电感中的能量同时向 C 与负载释放, 看成并联谐振, 在 $t = t_3$ 时, V_c 达到负的最大值。

状态8: $t_3 < t < t_4$, Q 关, D_3 开, D_1 关, D_4 关, D_2 开。假若 $t = t_3$ 时, V_c 达到最大值 $I_{Ls3}(t_3) = I_{Lm2}(t_3) = 0$, 若 $|V_c| > V_s$ 储存在 C 中的能量反馈回 V_s 则电路模型为状态8, 看成串联谐振。

状态9: $t_4 < t < t_5$, Q 关, D_3 、 D_1 开, D_4 、 D_2 关。若此时, $-V_c \ll V_s$, 则电路状态如状态9所示, 稳态后由于变压器不再给 C 充电, D_1 便断开, V_c 嵌位 V_s , 此时仍看成串联谐振, 仅 $I_{Ls1}(t)$, $V_c(t)$ 有些变化。

由状态5~9可以看出, 在开关管关断时, 由 C 与 L 或 C 与变压器电感组成的谐振电路, 使得开关管在零电压时关断, 关断损耗大大减小。

状态10: $t_5 < t < t_6$, Q 关, D_3 开, D_1 、 D_4 、 D_2 关。属于正常截止状态, 变压器次级回路供给负载电流, $I_{Lm1}(t)$ 逐渐减小, 若在 $t = t_6$ 时, $I_{Lm1}(t) = 0$, 在 $t_5 < t < t_6$ 期间, 变压器为不连续工作状态, V_c 最终嵌位在 $-V_c - V_s$ 。

根据上述分析所得的电压电流波形如图5所示。

用 PSpice 软件对上述工作状态进行了模拟, 与分析结果一致。

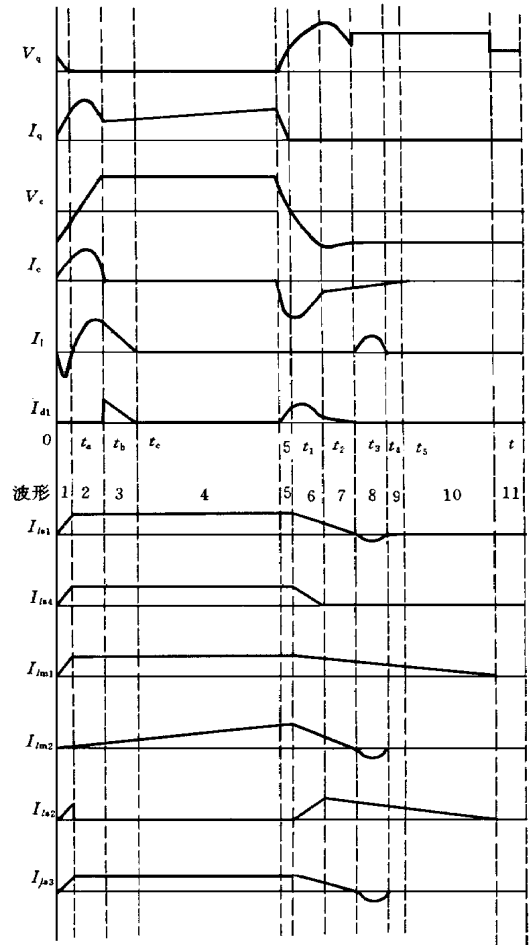


图5 各种状态下的电压、电流波形

2.2 电路设计指标

输入电压 V_i : 48V; 输出电压 V_o : 12V; 输出电流 I_o : 2.5A; 输出功率: 30W; 开关频率: 100kHz。

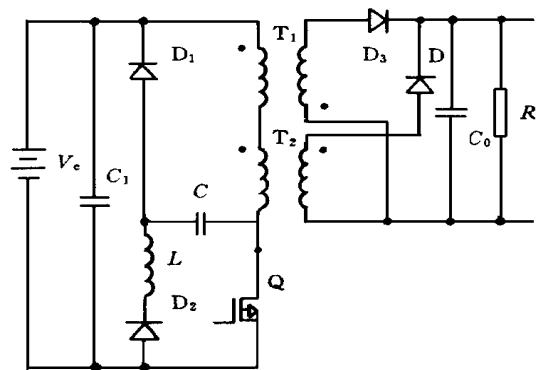


图6 软开关电路主回路实验电路图

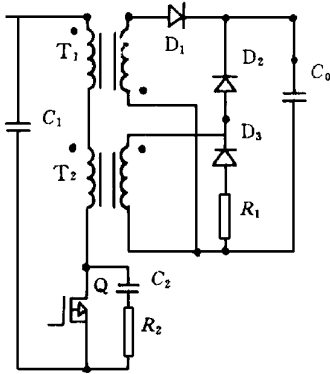


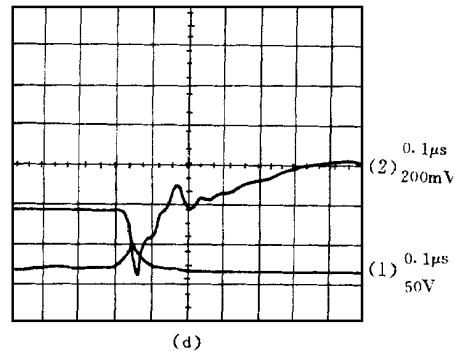
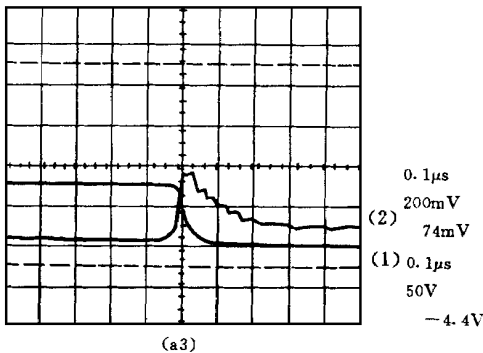
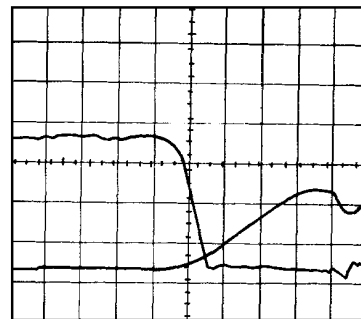
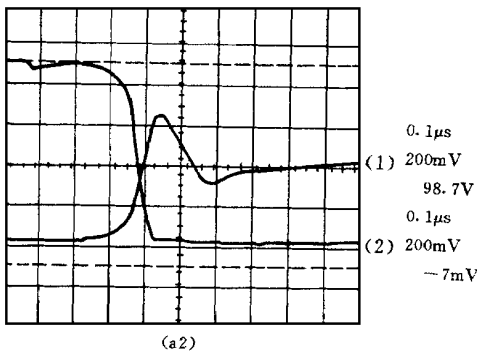
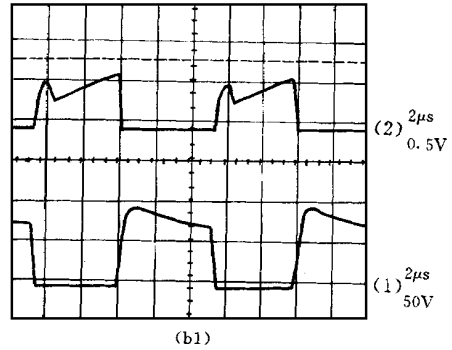
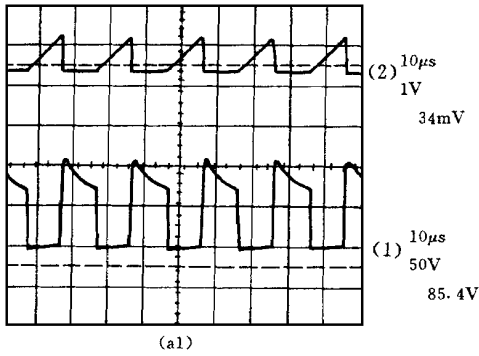
图7 硬开关电路实验电路图

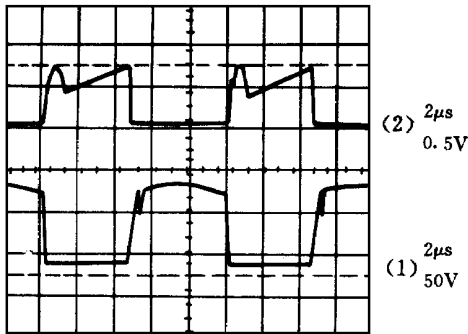
3 无损耗单端正反激DC/DC 变换器电路性能测试数据及结果分析

3.1 测试数据

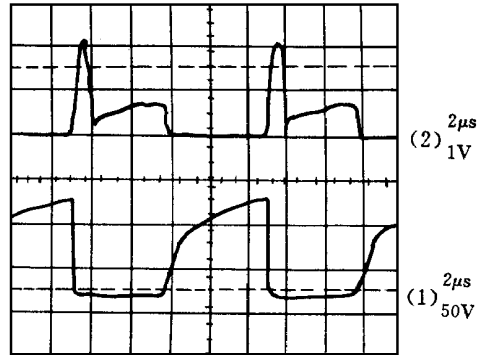
在硬开关DC/DC 变换器电路中, R_1 与 D_3 组成的子电路的功率损耗较大, 为了与软开关技术进行比较, 在软开关电路中, 仍保留 R_1 与 D_3 子电路, 但此时子电路的功耗较小。测试数据列于表 1。(略)

图 6 给出软开关主回路的实验电路图。图 7 给出硬开关电路的实验电路图。

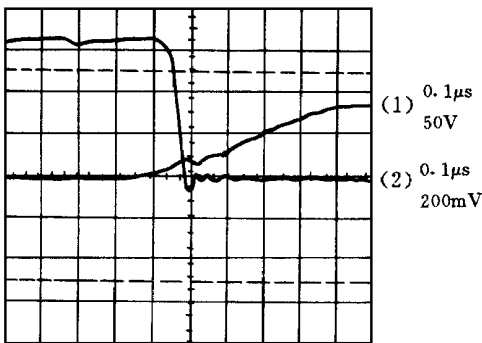




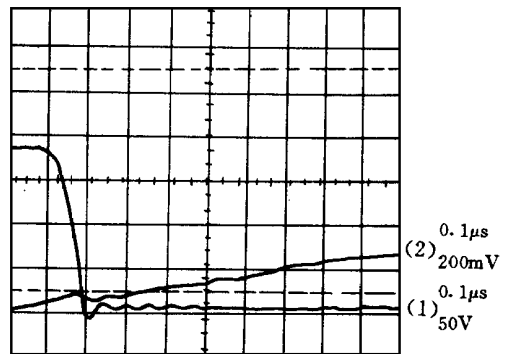
(c1)



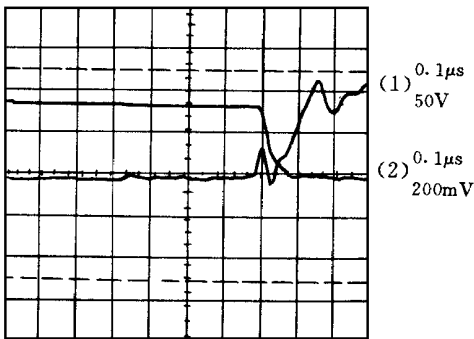
(d1)



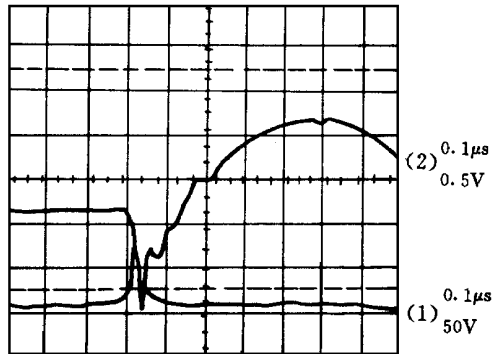
(c2)



(d2)



(c3)



(d3)

(a) 硬开关正反激变换器 $f = 50\text{kHz}$

(a₁) 开关管电压与电流波形;

(a₂) 开关管关断过程;

(a₃) 开关管开通过程

(b) 谐振电容 $C = 5.6\text{nF}$

(b₁) 开关管电压与电流波形;

(b₂) 开关管关断过程;

(b₃) 开关管开通过程

(c) 谐振电容 $C = 15\text{nF}$

(c₁) 开关管电压与电流波形;

(c₂) 开关管关断过程;

(c₃) 开关管开通过程

(d) 谐振电容 $C = 30\text{nF}$

(d₁) 开关管电压与电流波形;

(d₂) 开关管关断过程;

(d₃) 开关管开通过程

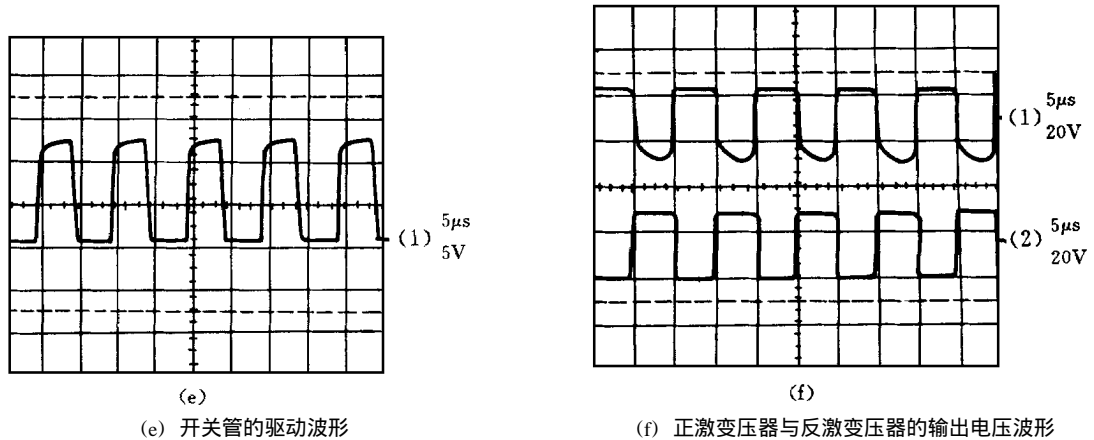


图8 输出功率为30W的单端正反激变换器电压电流波形

3.2 实验结果分析

图8给出电路主要节点的波形。

从波形图可以看出,虽然硬开关电路增加了RC减振器,电压尖峰仍然非常高,换成LC谐振电路,使得开关管电压箝位非常好,波形非常理想。

从波形图可以看出,采用软开关技术使得开关管的功耗大大减小,在频率提高1倍时仍能提高效率10%,证明这种软开关技术在实验上与理论分析完全吻合。

从变压器次级输出的两路电压波形可以看出,能量传输在开关期间的两个状态同时进行,波形十分对称,与理论设计要求一致。

从不同谐振电容 C 对应的开关状态波形图可以看出,随着 C 值增大,关断损耗减小,但开通损耗增大,谐振电容 C 取值在15nF时,总功耗最小,效率最高。 C 值太小或太大将降低整个电路的效率。

4 结论

本文给出了无损耗LC单端正反激软开关变换器的理论分析与设计,电路拓扑的主要特点是:电路简单,体积较小,元件数目较少。

由于采用了LC缓冲电路,储存在变压器漏感与杂散电感的能量返回电源或负载中。实

现了零电压关断和零电流导通,使开关管的开通损耗与关断损耗大大减小。开关管的总功耗显著减小,效率提高,使得电源的工作频率可以达到100kHz或更高。采用单端正反激变换器,使得开关管电压的耐压能力得以改善,能量传输也颇具特色。无耗缓冲电路消除了电压尖峰。正反激开关电路采用和正激电路相同的主电感元件,但在制作工艺上稍微复杂一些。

最后,采用30W,100kHz的实验电路对理论分析进行了验证,并得到一致的结论。

郭雁恩 女,1990年毕业于吉林大学电子科学系。工作单位:电子部第十三研究所,硕士学位。主要从事半导体材料及器件、开关电源DC/DC变换器等方面的研究工作。已发表论文6篇。

王长河 男,1958年毕业于北京大学物理系半导体专业。电子部第十三研究所副总工程师、研究员。1987年应聘国防科工委专家组专家,1994年任电子部可靠性专家组副组长。四十年来一直从事Ge, Si, GaAs半导体器件及集成电路研究,取得四十多项科研成果,获国家级、部级科技进步奖十多项。培养硕士研究生23名,已发表论著160多篇。

聂荣琪 男,1968年毕业于北京工业学院。电子部第十三研究所教授级高工。多年来从事功率半导体器件、通信和电力电子器件的研究工作。在功率电子学和开关电源的研究中以及在通信卫星电源和系列化通信电源的开发中,多次获国防科工委和部、省科技进步奖。