

Study of Resonant Reset Technology for Single-Ended Forward Converter

YU Yan-jun, YANG Shi-yan, HAN Ji-ye

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper studies a resonant magnetic reset circuit of single-ended forward DC/DC converter. The circuit is reset by the resonance of parasitic capacitances of switching devices and transformer magnetizing inductance without additional circuit. The six different switching modes of the circuit in one switching period are analyzed. The calculating formulas of parameters design are derived. The simulation analysis and examination study have been carried through. The circuit has been applied in the study of car-carried charging unit of lithium-ion power battery.

Key words: charging unit; single-ended forward converter; transformer; resonant magnetic reset
EEACC: 2140

单端正激变换器谐振磁复位技术的研究

于艳君, 杨世彦, 韩基业

(哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对单端正激式 DC/DC 变换器的磁复位问题, 本文对无需外加辅助电路, 仅通过开关器件寄生电容与变压器励磁电感实现的谐振式磁复位电路进行了研究。文中详细分析了电路在一个开关周期内的 6 种不同开关模式, 给出了参数设计的计算公式, 进行了仿真分析和实验研究, 并应用于车载式锂离子动力电池充电单元的研制。

关键词: 充电单元; 单端正激变换器; 变压器; 谐振磁复位

中图分类号: TN710

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2004)04-0661-04

在开关电源变换电路中, 单端正激变换器由于具有电路结构简单、工作可靠性高等优点而广泛应用于中小功率变换场合。在单端正激变换器中, 由于变压器的铁芯是单方向磁化的, 为了防止铁芯磁饱和而导致的开关器件损坏, 必须采取相应的措施, 使变压器的铁芯磁复位^[1]。常见的磁复位方法有复位绕组复位、谐振复位、RCD 复位、LCD 复位以及有源箝位复位等^[2]。它们各有优缺点, 其中谐振磁复位所需的器件少, 磁能循环利用、效率高, 适合于高频变换器。针对车载锂离子动力电池充电单元对重量、体积、效率等方面的特殊要求, 本文对单端正激变换器谐振磁复位技术

进行了研究。

1 电路的拓扑结构和工作原理

1.1 电路的拓扑结构

谐振磁复位电路是利用电路中开关器件寄生电容与变压器励磁电感的自激振荡来实现磁复位。其主电路的拓扑结构如图 1, 图中: C_S 是开关管的结电容, L_m 是变压器的励磁电感。图 2 是电路主要参数波形图。

在分析之前, 先定义如下符号:

L_{l1} —— 变压器原边的漏电感;

L_{l2} —— 变压器副边漏电感的归算值;

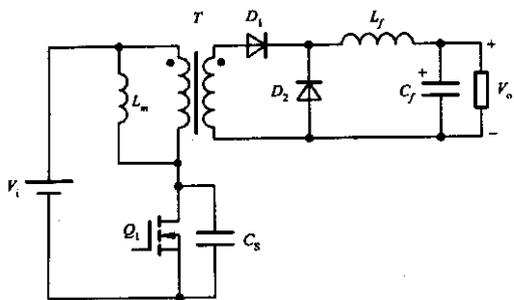


图 1 电路原理图

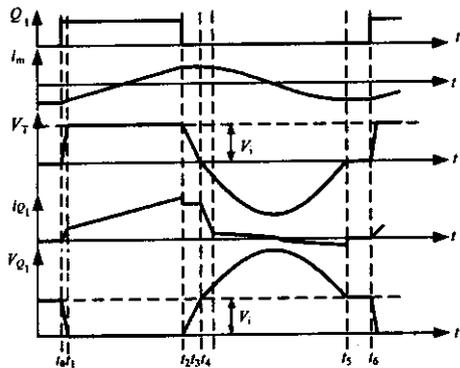


图 2 变换器的主要波形

- C_{D1} ——整流二极管结电容的归算值；
- C_{D2} ——续流二极管结电容的归算值；
- I_o ——负载电流的归算值；
- i_m ——变压器的励磁电流；
- i_2 ——变压器副边电流的归算值；
- v_{Q1} ——主开关管两端的电压；
- v_{D1} ——整流二极管电压的归算值；
- v_{D2} ——续流二极管电压的归算值；
- T_s ——开关管 Q_1 的开关周期；
- D ——开关管 Q_1 的导通占空比。

1.2 电路的工作原理

为了分析的方便,做出如下假设:

1) 变压器的漏电感远远小于励磁电感, 变压器的线圈电阻、寄生电容可以忽略不计, 其等效电路如图 3。

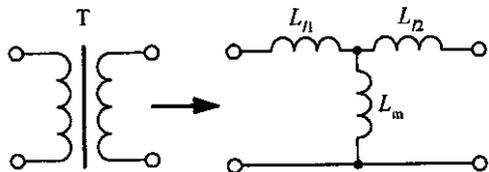
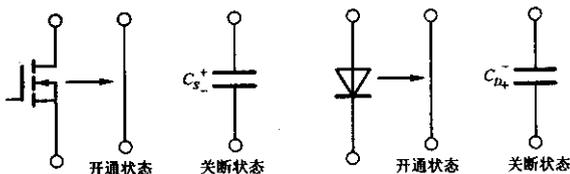


图 3 变压器的等效电路

2) 主开关管 Q_1 、整流二极管 D_1 、续流二极管 D_2 在导通期间相当于短路, 在关断期间相当于电容器(分别用 C_{D1} 、 C_{D2} 表示), 其等效电路如图 4 所示。



(a) 主开关管的等效电路 (b) 二极管的等效电路

图 4 功率开关器件的等效电路

3) L_f 足够大, 在一个开关周期内, 其电流基本保持不变, 这样 L_f 和 C_f 以及负载可以看成电光源。

在一个开关周期中, 该变换器有 6 种开关模式, 其等效电路如图 5 所示。

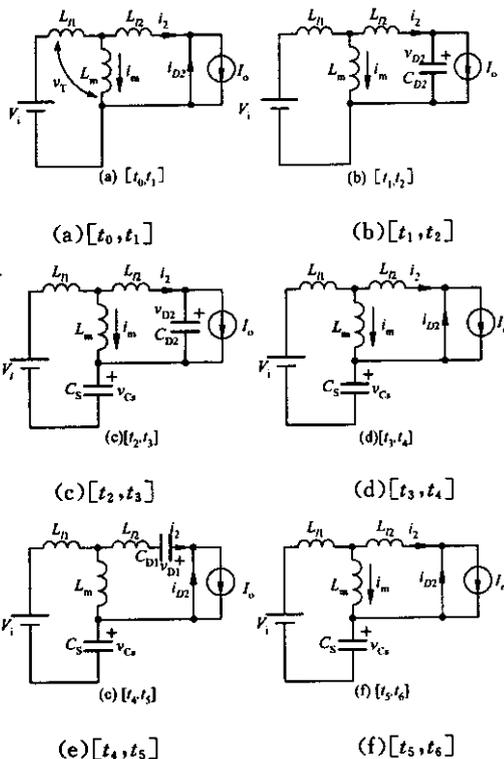


图 5 各开关模式的等效电路

① 开关模式 1 [t_0, t_1]

开关模式 1 为开关管 Q_1 开通阶段, 见图 5 (a)。

在 t_0 时刻, 开通开关管 Q_1 , 流过整流二极管 D_1 的电流增加, 续流二极管 D_2 的电流减小, 励磁电流 i_m 从 $I_{m(-)}$ 开始线性上升。

$$i_m(t) = V_i \cdot \frac{L_{l2}}{L_l L_m} \cdot t + I_{m(-)} \quad (1)$$

式中: $L_l = L_{l1} + L_{l2}$ ——变压器的漏感。

在 t_1 时刻, D_2 的电流减小到零, 由 D_1 代替 D_2 给负载供电, 开关模式 1 结束。

② 开关模式 2 [t_1, t_2]

开关模式 2 为功率输出阶段, 见图 5 (b)。

在此模式中, 能量通过变压器由输入电源传送给负载。励磁电流 i_m 继续上升。

$$i_m(t) = \frac{V_i}{L_m} \cdot (t - t_1) + i_m(t_1) \quad (2)$$

在 t_2 时刻, 关断 Q_1 , 开关模式 2 结束。

③ 开关模式 3 [t_2, t_3]

开关模式 3 为开关管 Q_1 关断阶段, 见图 5(c)。

在此模式中, 开关管的结电容 C_S 被充电, 续流二极管的结电容 C_{D2} 放电。

$$i_m(t) = X_1 \sin[\omega_1(t - t_2)] - I_o \quad (3)$$

$$v_{D2}(t) = Z_1 X_1 \cos[\omega_1(t - t_2)] \quad (4)$$

$$X_1 = \sqrt{(V_i/Z_1)^2 + [I_o + i_m(t_2)]^2} \quad (5)$$

式中: $\omega_1 = 1/\sqrt{L_m(C_S + C_{D2})}$ 为励磁电感与结电容 C_S, C_{D2} 的谐振角频率; $Z_1 = \sqrt{L_m(C_S + C_{D2})}$ 为励磁电感与结电容 C_S, C_{D2} 的特征阻抗。

在 t_3 时刻, v_{D2} 减小到零, C_{D2} 放电结束, 续流二极管 D_2 自然导通, 开关模式 3 结束。

④ 开关模式 4 [t_3, t_4]

见图 5(d)。在此模式中, 变压器漏电感上存储的能量继续给 C_S 充电。

$$i_2(t) = [i_2(t_3) + i_m(t_3)] \cdot \cos[\omega_2(t - t_3)] - i_m(t_3) \quad (6)$$

式中: $\omega_2 = 1/\sqrt{L_l C_S}$ 为变压器漏感与结电容 C_S 的谐振角频率。

在 t_4 时刻, i_2 下降到零, 变压器漏感上的能量全部传递到 C_S 上, 开关模式 4 结束。由于开关模式 4 的时间很短, 可以认为励磁电流基本不变, 即:

$$I_m(t_4) = I_m(t_3) \quad (7)$$

⑤ 开关模式 5 [t_4, t_5]

开关模式 5 为磁复位阶段, 见图 5(e)。

在此模式中, 励磁电感 L_m 与结电容 C_S, C_{D1} 谐振工作。结电容上储存的能量回馈给电源和变压器电感, 完成磁复位。

$$i_m(t) = X_3 \cos[\omega_3(t - t_4)] \quad (8)$$

$$v_{Q1}(t) = V_i + X_3 Z_3 \sin[\omega_3(t - t_4)] \quad (9)$$

$$v_{D1}(t) = v_{Q1}(t) - V_i \quad (10)$$

$$X_3 = \sqrt{I_m^2(t_4) + [V_{Q1}(t_4) - V_i]^2 / Z_3^2} \quad (11)$$

式中: $\omega_3 = 1/\sqrt{L_m(C_S + C_{D1})}$ 为励磁电感与结电容 C_S, C_{D1} 的谐振角频率; $Z_3 = \sqrt{L_m(C_S + C_{D1})}$ 为励磁

电感与结电容 C_S, C_{D1} 的特征阻抗。

在 t_5 时刻, v_{D1} 下降到零, 变压器完成磁复位, 开关模式 5 结束。

$$t_{45} = \pi/\omega_3 \quad (12)$$

⑥ 开关模式 6 [t_5, t_6]

开关模式 6 为死区阶段, 见图 5(f)。

在此模式中, D_1 和 D_2 同时导通, 副边绕组被箝位在零位, 因此原边绕组电压也为零, 变压器的励磁电流保持不变。

在 t_6 时刻, 开通开关管 Q_1 , 开始下一个开关周期。

2 参数设计

为了实现谐振磁复位, 必须对系统的参数必须进行合理的设计和優化^[3,4]。

从前面的分析可知, 为了保证变压器能够磁复位, 必须满足:

$$t_{05} < T_s \quad (13)$$

由于开关模式 3、4 的时间相对于开关模式 5 来说很短, 为了简化分析, 这里将其忽略, 那么有:

$$t_{05} \approx t_{02} + t_{45} = DT_s + \pi/\omega_3 < T_s \quad (14)$$

由此可推出谐振磁复位电路的最大工作频率应满足:

$$f_{\max} = (1 - D) / \left(\pi \sqrt{L_m(C_S + C_{D1})} \right) \quad (15)$$

而且, 由式(9), 主变压器上的电压最大值 (V_{TM}) 和主开关管的最大电压 (V_{Q1M}) 应满足:

$$V_{TM} = X_3 Z_3 < V_{Q1M} - V_i \quad (16)$$

由式(1)、(2)、(3)、(5)、(7)、(8)以及式(11)可推导出:

$$\sqrt{\frac{\omega_3^2}{4} \left(A - \frac{B}{C_S \omega_3^2 A} \right)^2 + \frac{B}{C_S}} < V_{Q1M} - V_i \quad (17)$$

式(17)中 $A = V_i t_{02} - L_l I_o$

$$B = [C_S / (C_S + C_{D2})]^2 L_l I_o^2$$

在谐振磁复位电路中, 为了完成磁复位, 必须满足式(15)和式(17)。

3 电路的仿真与实验

应用谐振磁复位技术, 设计了 42 V/500 W 的锂离子动力电池充电单元电路, 利用 PSPICE 软件对主电路作了仿真分析, 并进行了实验研究。

仿真和实验所用的主要数据为:

输入直流电压: $V_i = 310$ VDC;

输出直流电压: $V_o = 42.0$ VDC;

Q_1 : 2SK1539;

$D_1 \sim D_2$: FMG36;

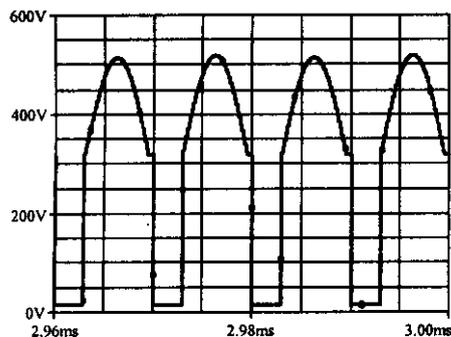
变压器原副边匝比: $K=2$;

输入滤波电感: $L_i=1.7 \text{ mH}$;

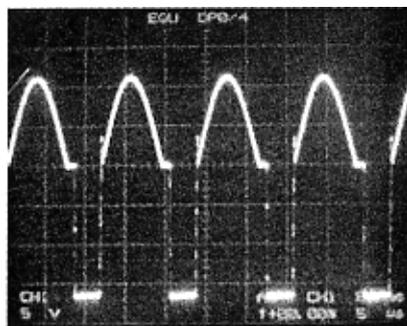
输出滤波电感: $C_f=1\ 880 \mu\text{F}$;

开关频率: $f_s=100 \text{ kHz}$ 。

仿真和实验结果如图 6、图 7 所示。

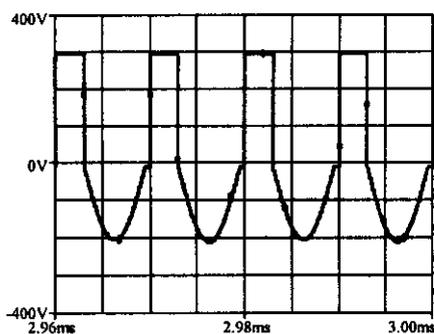


(a) 仿真波形

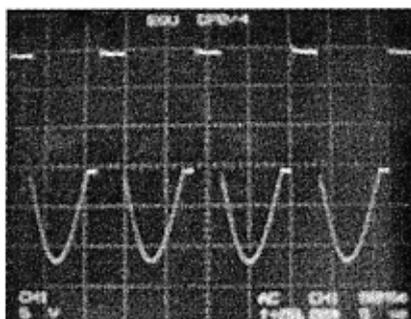


(b) 实验波形

图 6 主开关管 V_{Q1} 的仿真和实验波形(时间标尺: $5 \mu\text{s}/\text{div}$; 电压标尺: $100 \text{ V}/\text{div}$)



(a) 仿真波形



(b) 实验波形

图 7 变压器原边电压 V_T 的仿真和实验波形(实验波形的时间标尺: $5 \mu\text{s}/\text{div}$; 电压标尺: $100 \text{ V}/\text{div}$)

从图 6、图 7 可以看出, 仿真和实验波形基本吻合, 电路利用本身的寄生参数可以实现变压器的磁复位。

4 实际应用与结论

谐振磁复位电路利用开关器件寄生电容与变压器励磁电感的自激振荡实现了磁复位, 无需外加辅助电路, 所需的器件少, 磁能循环利用、效率高。应用谐振磁复位技术研制的锂离子动力电池充电单元已经投入使用, 满足了充电系统对电源稳定性、比功率等方面的严格要求。

参考文献:

- [1] 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, 2002.
- [2] 朱新宇, 沈颂华. 正激功率变换器复位电路分析[J]. 电工技术杂志, 2000, (9): 26-28.
- [3] Spiazzi G. A high-quality rectifier based on the forward topology with secondary-side resonant reset [C]. In: Power Electronics Specialists Conference, 2000, (2): 781-786.
- [4] Xi Y, Jain P K. Analysis of the Self-reset power transformer in a zero-voltage-switching forward converter topology [C]. In: Telecommunications Energy Conference, 2002, 156-163.