

双管正激理想模型的理论缺陷及实际工作过程分析
The defects in operation principle of dual switch forward converter based
on ideal model and the analysis of practical operation principle

adlsong

摘要: 本文阐述的双管正激拓扑结构基于理想模型的工作原理的缺陷, 分析了基于实际模型的磁通复位工作原理。还讨论了散热器寄生电容对磁通复位过程的影响。文中给出的实际双管正激电源的工作波形, 实验的结果证明了分析的正确。此外, 还讨论了磁通复位后开关管两端的电压大小与负载的变化关系, 也给出相应的实验波形。

Abstract: The principle of dual switch forward converter based on ideal model and its defects are presented in this paper. The practical operation principle based on real model is also discussed in detail. The effect on transformer reset caused by parasitic capacitance between power devices and the heat sink is also discussed. It proves to be correct by the waveforms of a practical dual switch forward converter. It is discussed how the voltage value between the power device after the transformer demagnetized completely varies with the output load. The waveforms are presented in the end.

关键词: 双管正激, 磁通复位, 寄生电容, 散热器

Key Words: Dual Switch Forward, Magnetic Reset, Parasitic Capacitor, Heat Sink

双管正激变换器拓扑结构由两个功率开关管和两个二极管构成, 当二个开关管 Q1 和 Q2 同时关断时, 磁通复位电路的二个二极管 D3 和 D4 同时导通, 输入的电流母线电压 V_{in} 反向加在变压器的初级的励磁电感上, 初级的励磁电感在 V_{in} 作用下励磁电流从最大值线性的减小到 0, 完成变压器磁通的复位, 并将储存在电感中的能量返回到输入端, 没有功率损耗, 从而提高电源的效率; 此外, 每个功率开关管理论的电压应力为直流母线电压, 这样就可以选取相对较低的额定电压的功率 MOSFET 管, 成本低, 而且额定功率较低的功率 MOSFET 的导通电阻小, 因此可以进一步的提高效率。所以双管正激变换器广泛的应用于台式计算机的主电源及大功率通信电源、变频器等三相电路的辅助电源中。本文将讨论在一些教材和资料中所阐述的这种拓扑结构基于理想模型的工作原理的缺陷, 并

分析其实际的工作原理，从而真正的理解这种电路结构的工作方式。

1 双管正激变换器的实际工作原理

双管正激变换器的拓朴结构如图 1 所示，其中 C_{in} 为输入直流滤波电解电容， $Q1$ 和 $Q2$ 为主功率开关管， $D1$ 、 $D2$ 和 $C1$ 、 $C2$ 分别为 $Q1$ 和 $Q2$ 的内部寄生的反并联二极管和电容， $D3$ 、 $C3$ 和 $D4$ 、 $C4$ 分别为变压器磁通复位二极管及其寄生的并联电容，不考虑 $Q2$ 的漏极与散热片间的寄生电容， T 为主变压器， DR 和 DF 为输出整流及续流二极管， L_f 和 C_o 输出滤波电感和电容。

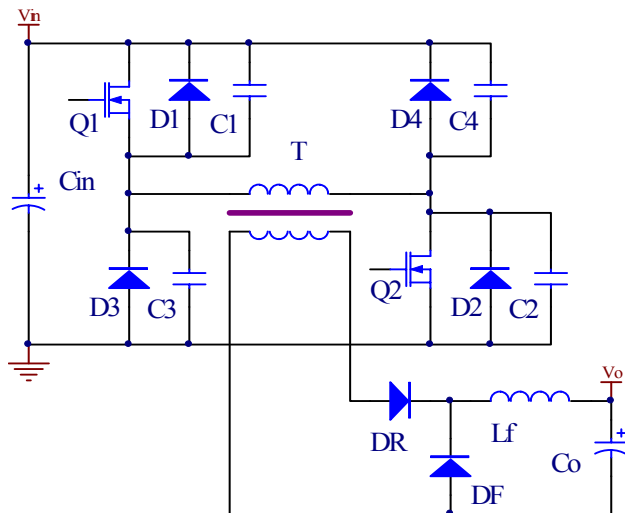


Figure 1: The structure of dual switch forward converter

图 1: 双管正激变换器的拓朴结构

下面分几个工作模式来讨论其磁通复位的工作过程：

(1) 模式 1: $t_0 \sim t_1$

在 t_0 时刻 $Q1$ 和 $Q2$ 关断，此时 $D3$ 也是关断的。初级的励磁电感电流和漏感的电流不能突变，必须维持原方向流动，因此 $C1$ 、 C_h 和 $C2$ 充电充电，其电压从 0 逐渐上升， $C3$ 和 $C4$ 放电，其电压由 V_{in} 逐渐下降。

$$i_{C1} - i_{C3} = i_{L_p} = i_{C2} - i_{C4}$$

$$u_{C1} + u_{C3} = V_{in}$$

$$u_{C2} + u_{C4} = V_{in}$$

$$L_p \frac{di_{L_p}}{dt} = u_{C3} - u_{C2}$$

$$C_3 \frac{du_{C3}}{dt} = i_{C3}$$

$$C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = i_{C1}$$

$$C_2 \frac{du_{C2}}{dt} = i_{C2}$$

$$C_4 \frac{du_{C4}}{dt} = i_{C4}$$

初始值： $u_{C1}(0) = 0$, $u_{C2}(0) = 0$, $u_{C3}(0) = V_{in}$, $u_{C4}(0) = V_{in}$,
 $u_{C2}(0) = 0$, $i_{Lp}(0) = I_{M0}$

由上面公式可得:

$$\left| \frac{\Delta u_{C2}}{\Delta u_{C3}} \right| = \frac{C_1 + C_3}{C_2 + C_4} \quad (1)$$

在理想的模型下, $C_1 = C_2$, $C_3 = C_4$, $C_1 + C_3 = C_2 + C_4$ 所以在 $t1$ 时刻 $C3$ 和 $C4$ 的电压下降到 0, 同时 $C1$ 和 $C1$ 的电压上升到 V_{in} , $D3$ 和 $D4$ 将导通, 系统进入下一个过程。

在实际的工作中, 事实上散热器的寄生电容不能忽略, 这个电容将参与变压器磁通复位的过程。Q1 和 Q2 漏极与散热片间的寄生电容的大小与漏极的面积及漏极与散热片的距离相关。

注意电容的公式:

$$C \frac{du_C}{dt} = i_C$$

Q1 的漏极接 V_{in} , 散热器接地, 因此此寄生电容接在直流母线电压端, 其两端没有电压变化: $du_C = dV_{in} = 0$, 也就没有电流从此电容流过: $i_C = 0$ 。实际上, 对于交流信号模型来说, 此寄生电容相当于短路, 因此在交流等效电路中可以不必考虑。

Q2 的漏极电位在开关的过程中处于变化的状态, 因此在开关的过程中, Q2 漏极与散热片间的寄生电容将有电流通过。此寄生电容为 Ch , 其大小将影响到功率管的开关损耗。电容值越大, 功率管漏源极电压随时间的变化率 $\frac{du_{ds}}{dt}$ 越小, 从而减小了功率管的开关应力, 并降低了功率管关断的功耗, 并且低的 $\frac{du_{ds}}{dt}$ 对 EMI 也有改善;

但是在功率管开通时, 电容上储存的能量将通过功率管放电, 产生开通损耗, 形成开通的电流尖峰和噪声。

注意到散热器的寄生电容 Ch 和 $C2$ 及 $C4$ 的总和大于 $C1$ 和 $C3$ 的和: $C_1 + C_3 < C_2 + C_4 + Ch$

$$\left| \frac{\Delta u_{C2}}{\Delta u_{C3}} \right| = \frac{C_1 + C_3}{C_2 + C_4 + Ch} < 1$$

所以此模式结束时，C3 的电压由 V_{in} 下降到 0 时，C2 的电压并不到 V_{in} ，此时由于 C3 的电压为 0，D3 将正向偏置导通，将 C3 的电压箝位于 0。

事实上在此过程中，当初级电压大于 0 即 $u_{C2} > u_{C3}$ 时，初级变压器电感仍处于正向励磁，电流增加，而且次级电感电流将反射到初级，参与电路的谐振。当其电压过 0 后，在很短的时间，次级整流和续流二极管换流使次级处于短路，次级电感电流将不能反射到初级，也就不参与电路的谐振。换流结束后，初级电压小于 0，只有初级励磁电感与电容谐振，本文不分析此具体细节过程。

(2) 模式 2: $t_1 \sim t_2$

在 t_1 时刻 D3 导通，Q1 和 Q2 仍然为关断，此时变压器在 C_h 和 C2 及 C4 的作用下去磁。变压器的励磁电流逐渐减小到 0，然后反向励磁，变压器的电流过 0 时 D3 自然关断，系统进入下一个过程。

$$i_{Lp} = i_{C2} + i_{Ch} - i_{C4} \quad (1)$$

$$(C_2 + C_h) \frac{du_{C2}}{dt} = i_{C2} + i_{Ch}$$

$$C_4 \frac{du_{C4}}{dt} = i_{C4}$$

$$u_{C2} + u_{C4} = V_{in} \quad (3)$$

$$Lp \frac{di_{Lp}}{dt} = -u_{C2}$$

初始值: $u_{C2}(0) = u_{C2}(t_2)$, $u_{C4}(0) = u_{C4}(t_2)$, $i_{Lp}(0) = I_{M1}$

在模式 2 过程中，变压器的电流过 0 前如果 C2 的电压上升到 V_{in} ，那么 D4 将导通，C2 的电压将被箝位于 V_{in} ，变压器的励磁电感在 V_{in} 作用下去磁，直到其电流过 0 后 D3 和 D4 自然关断，然后再进入模式 3。

(3) 模式 3: $t_2 \sim t_3$

在 t_3 时刻 D3 自然关断，Q1 和 Q2 仍然为关断，变压器在 C_h 和 C2 有 C4 的作用下反向励磁，相关的公式同于模式 1，仅仅是电容的电压和变压器励磁电流的初始值不同。

当 C2 和 C3 电压谐振到相等时，C2 和 C3 的电压将维持不变，直到 Q1 和 Q2 导通、系统进入下一个过程。

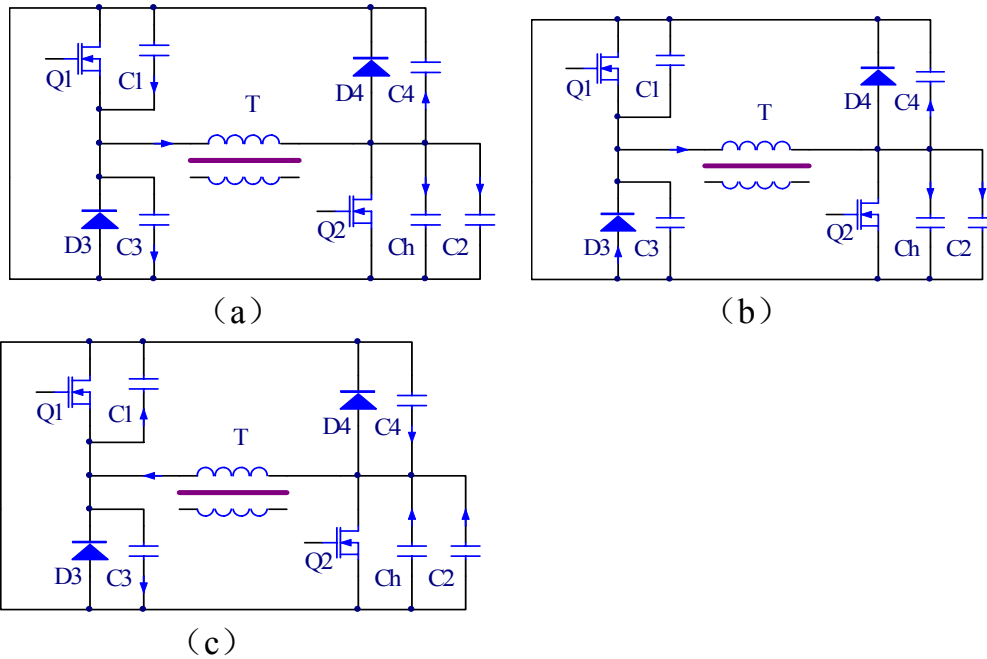
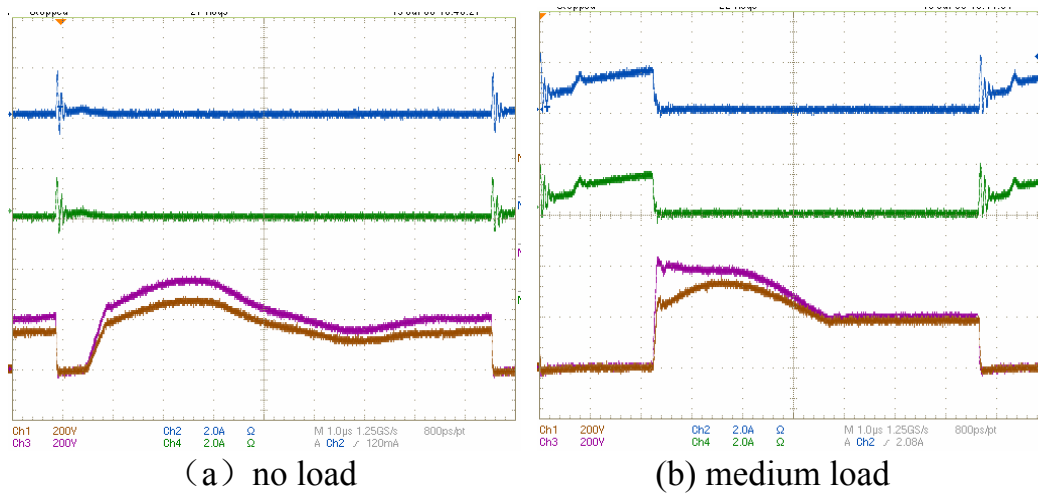
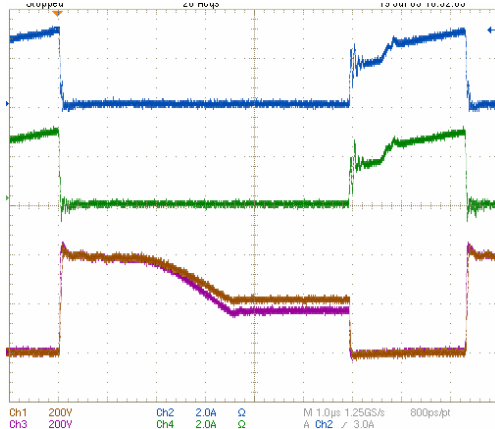


Figure 2: The operation modes during demagnetizing
图 2: 磁通复位过程工作模式

3 工作波形及讨论

一个双管正激电源系统在空载、中等负载和满载时的工作波形如下图所示 3 所示。功率 MOSFET 为 STP15NK50，初级电感量为 5mH，前级有 PFC，输入电压为 400V。图中，蓝色为下管的电流波形，棕色为下管的漏源极 DS 的电压波形，绿色为上管的电流波形，红色为上管的漏源极 DS 的电压波形。





(c) full load

Figure 3: The operation waveforms

图 3: 工作波形

从图 3 (a) 波形可以看出，空载时，由于没有负载的反射电流，在模式 1 中漏感的能量不足以在如此短的时间内抽光 C1 和 C3 的能量，上管的漏源极电压（红色）和下管的漏源极电压（棕色）都没有上升到母线电压，这表明 D3 和 D4 的电压都没有达到 0V，所以 D3 和 D4 都没有导通，系统仍停留在模式 1 中并且系统在模式 1 中完成磁能复位，然后进入模式 3 反向励磁。模式 3 结束时，C2 和 C3 的电压 160V，小于 $V_{in}/2$ 。

图 3 (b) 从波形可以知道，中等负载时，当开关管关断后，由于有有负载的反射电流，在模式 1 中反射电流和漏感的能量在如此短的时间内足以抽光 C1 和 C3 的能量，上管的漏源极电压迅速（红色）上升到母线电压，即 C3 的电压迅速下降到 0，D3 导通，而此时下管的漏源极电压（棕色）即 C2 电压则小于母线电压。此后，C2 与初级电感谐振对其复位，由波形可见：电容 C3 的电压谐振上升。当变压器电感的电流谐振为 0 时，储存在变压器电感中的所有的能量转移到电容 C2。电容 C2 的电压达到最大值；此后电容 C2 的电压谐振下降，注意到 C1 电压谐振下降即 C3 的电压谐振上升，当电容 C2 和 C3 的电压相等时，谐振过程停止电容 C2 和 C3 维持电压不变。模式 3 结束时，C2 和 C3 的电压 200V，等于 $V_{in}/2$ 。

图 3 (c) 从波形可以看出，全负载时，当开关管关断后，在模式 1 中足够大的负载的反射电流和和漏感的能量在如此短的时间内足以抽光 C1 和 C3 的能量，上管的漏源极电压迅速（红色）上升到母线电压，即 C3 的电压迅速下降到 0，D3 导通，而此时下管的漏源极电压（棕色）即 C2 电压则小于母线电压。此后，C2 与初级电感谐振对其复位，由于漏感的能量的足够大，电容 C3 的电压也很快谐振上升到 V_{in} 并箝位于此值，此时 D4 导通，D3 和 D4 都导通，变压器

的励磁电感在 V_{in} 的作用下去磁，电流不断下降，能量全部返回到输入的滤波电解电容中，变压器的励磁电感电流下降为 0 时，D3 和 D4 都自然关断，系统进入模式 3。模式 3 结束时，C2 和 C3 的电压 220V，大于 $V_{in}/2$ 。

模式 3 的谐振完全结束后，在不同的负载条件下，电容 C2 和 C3 的稳定电压随输出负载的变化而变化，因不是通常人们所认为的恒定等于 $V_{in}/2$ 。不同的负载条件下，负载反射电流和漏感的电流影响的变压器的去磁模式，从而也影响到此电压值的大小。

从波形可以看出，

图 4 所示为功率 MOSFET 管漏源极电压变化的斜率，非常的明显，下管（棕色）波形电压变化的斜率 $\frac{du_{ds}}{dt}$ 小于上管（红色），这表明下管总的漏源极的寄生电容大于上管。

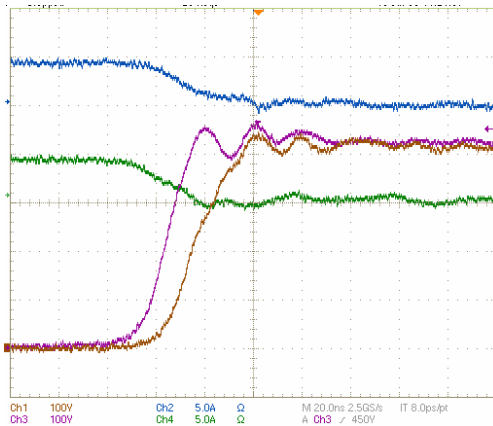


Figure 4: The voltage variation of MOSFET

图 4: MOSFET 管漏源极电压变化的斜率

4 结论

- ①双管正激电源的磁通复位的方式随着负载的变化进入不同的工作模式。
- ②变压器励磁电感去磁后将进入反向磁化，反向磁化结束后两管的所承受的电压值并不相同。空载时，上管的电压大于 $V_{in}/2$ ，下管的电压小于 $V_{in}/2$ 。中间某一个负载时，上管和下管的电压等于 $V_{in}/2$ ；全空载时，上管的电压小于 $V_{in}/2$ ，下管的电压在于 $V_{in}/2$ 。
- ③上管与散热器的寄生电容不影响复位工作，下管与散热器的寄生电容参与谐振复位的工作过程。