

恒定导通时间控制 buck 变换器多开关周期振荡现象分析*

王金平 许建平[†] 徐杨军

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

(2010年6月10日收到; 2010年9月9日收到修改稿)

研究了恒定导通时间(constant on-time, COT)控制 buck 变换器的多开关周期振荡现象, 揭示了 buck 变换器输出电容等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)对 COT 控制 buck 变换器控制性能的影响. 研究表明, 输出电容等效串联电阻是 buck 变换器发生多开关周期振荡现象的关键因素, 并给出了 COT 控制 buck 变换器发生多开关周期振荡的临界 ESR 值. 当输出电容 ESR 值小于临界值时, 发生多开关周期振荡现象; 而当 ESR 大于临界值时, 多开关周期振荡现象消失. 最后, 仿真结果验证了理论分析的正确性.

关键词: 恒定导通时间控制, buck 变换器, 振荡, 等效串联电阻

PACS: 84.30.Jc, 05.45.-a

1. 引言

开关变换器是一类典型的强非线性时变动力学系统^[1,2], 存在丰富的非线性现象^[3-6]. 开关变换器的非线性现象严重影响了开关变换器的性能^[7]. 因此, 深入分析和研究开关变换器的非线性动力学行为, 对开关变换器的设计和工程应用具有重要的理论意义和实用价值.

脉宽调制(pulse width modulation, PWM)开关变换器在学术界和工业界有着广泛的研究和应用. 已有不少文献研究了 PWM 开关变换器的非线性现象^[8-16]. 开关变换器的恒定导通时间(COT)控制^[17-20]是一种特殊的脉频调制(pulse frequency modulation, PFM)控制技术, COT 控制开关变换器在每一个开关周期内具有恒定导通时间 T_{ON} , 通过控制开关管的导通时刻, 实现开关变换器输出电压的调整. COT 控制不需要 PI 调节器, 具有结构简单、动态响应速度快、轻载效率高等优点而在工程实际中得到广泛的重视和应用^[21,22]. 然而, 目前国内外还未见有关 COT 控制开关变换器非线性现象的研究

报道. 因此, 研究 COT 控制开关变换器的非线性动力学行为, 具有理论指导意义及工程应用价值.

本文以 COT 控制 buck 变换器为研究对象, 研究了 COT 控制 buck 变换器多开关周期振荡现象, 揭示了 buck 变换器输出电容等效串联电阻(ESR)对 COT 控制 buck 变换器控制性能的影响. 研究表明, 输出电容等效串联电阻是 buck 变换器发生多开关周期振荡现象的关键因素, 并给出了 COT 控制 buck 变换器发生多开关周期振荡的临界 ESR 值. 当输出电容 ESR 值小于临界值时, 发生多开关周期振荡现象; 而当 ESR 大于临界值时, 多开关周期振荡现象消失. 最后, 仿真结果验证了理论分析的正确性. 本文的研究结果对于合理设计 COT 控制 buck 变换器电路参数, 避免多开关周期振荡现象的发生, 具有指导意义和工程应用价值.

2. COT 控制 buck 变换器工作原理

图 1 所示为 COT 控制 buck 变换器电路及其主要工作波形, COT 控制器由比较器、导通定时器(ON TIMER)和 RS 触发器构成. 当 buck 变换器输出电压

* 国家自然科学基金(批准号:50677056), 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:SWJTU09ZT13)和西南交通大学工程实践项目(批准号:10-78)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jpxu-swjtu@163.com

瞬时值 v_o 低于参考电压 V_{ref} 时,比较器输出高电平,RS 触发器置位,开关管 S 导通,输出电压上升,导通定时器决定开关管的导通时间 T_{ON} . 开关管导通 T_{ON} 时间后,导通定时器输出一个窄脉冲,使 RS 触发器

复位,开关管关断,输出电压下降;当输出电压下降到参考电压时,开关管再次导通,进入下一个开关周期. 因此,COT 控制本质上是基于输出电压纹波谷值的控制技术.

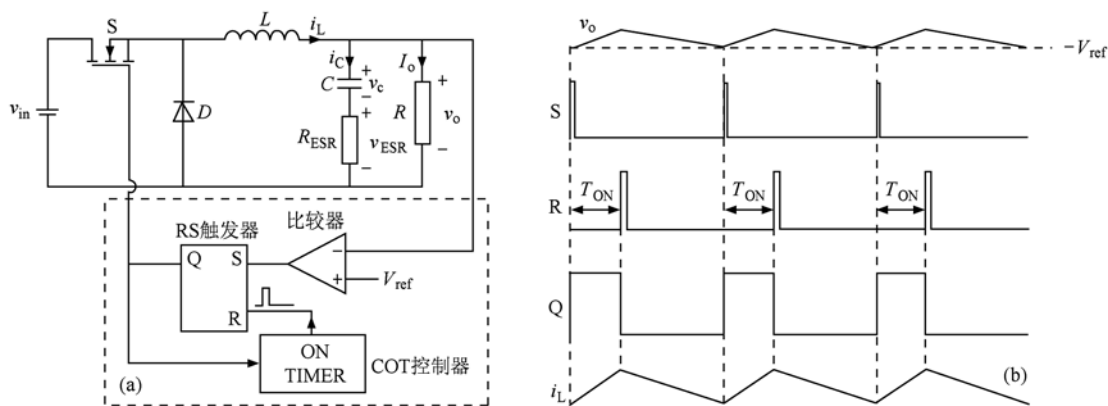


图 1 COT 控制 buck 变换器 (a) 电路图; (b) 工作波形

3. COT 控制 buck 变换器多开关周期振荡现象分析

3.1. 多开关周期振荡产生机理

由 COT 控制的工作原理可知,开关管在导通恒定时间 T_{ON} 后,开关管关断,输出电压下降;当输出电压下降到参考电压 V_{ref} 时,开关管再次导通,触发下一个开关周期. 因此,COT 控制开关变换器正常工作时,要求开关管关断时刻输出电压瞬时值 v_o 高于参考电压 V_{ref} .

如果在开关管关断瞬间,输出电压 v_o 低于参考电压 V_{ref} , 则开关管将在关断瞬间再次导通,进入下一个开关周期,在这种情形下,开关管连续导通若干个固定导通时间 T_{ON} , COT 控制 buck 变换器发生多开关周期振荡现象;直到开关管关断时刻输出电压高于参考电压,COT 控制恢复正常工作状态. 因此,开关管关断时刻输出电压高于参考电压成为 COT 控制正常工作的前提条件.

从图 1 可以看出,输出电压是输出滤波电容电压及其 ESR 电压的叠加. 对于 buck 变换器,由于开关频率远远大于变换器特征频率,电感电流纹波完全流入输出滤波电容. 在开关管导通期间,一方面,电感电流线性上升,ESR 两端电压上升,即 $v_{ESR}(nT + T_{ON}) > v_{ESR}(nT)$, 其中 $v_{ESR}(nT)$ 和 $v_{ESR}(nT + T_{ON})$ 分别是开关管开通时刻和关断时刻 ESR 两端

的电压,因此,输出滤波电容 ESR 电压有利于满足 COT 控制 buck 变换器正常工作的前提条件;另一方面,输出滤波电容电压波动滞后于电感电流的变化,输出滤波电容电压并不随电感电流的上升而上升. 因此,当输出滤波电容电压波动 v_{c_ripple} 幅度大于 ESR 电压波动幅度 $v_{ESR}(t)$ 时,滞后于电感电流纹波的输出滤波电容电压波动,将可能导致开关管关断时刻输出电压 v_o 低于参考电压 V_{ref} , 从而引发 COT 控制 buck 变换器的多开关周期振荡现象. 为了避免 COT 控制 buck 变换器的多开关周期振荡现象的发生,可以通过增大 ESR 值 R_{ESR} , 相应地增大 ESR 的电压波动幅度,以减小输出滤波电容电压波动 v_{c_ripple} 幅度对输出电压的影响. 但增加 R_{ESR} , 将影响开关变换器的稳态性能,导致较大的输出电压纹波,因此,合理选择 R_{ESR} 是十分重要的.

3.2. 临界 ESR 确定

图 2 所示为 R_{ESR} 较大和 R_{ESR} 较小时,COT 控制 buck 变换器电感电流 i_L 、输出滤波电容电压波动 v_{c_ripple} ($v_{c_ripple} = v_c - V_{ref}$), ESR 电压 $-v_{ESR}$ 以及驱动脉冲波形. 为了使 COT 控制 buck 变换器正常工作,需要满足 $v_c + v_{ESR} > V_{ref}$, 即 $v_{c_ripple} + v_{ESR} > 0$. 当增大 R_{ESR} , 使 $|v_{ESR}| > |v_{c_ripple}|$ 时,输出电压纹波主要由 ESR 电压 v_{ESR} 决定,可以忽略输出滤波电容电压波动, $v_{c_ripple} + v_{ESR} > 0$ 成立,此时输出电压纹波能够满足 COT 控制正常工作的条件,不存在多开关周期振荡现象;而随着 R_{ESR} 的减小,输

输出电压纹波主要由输出滤波电容电压波动 v_{c_ripple} 决定时, $v_{c_ripple} + v_{ESR} > 0$ 可能不成立, 如图 2(b) 所示, 输出电压纹波不能满足 COT 控制正常工作

的条件, 开关管在连续导通多个恒定导通时间后, 持续关断较长一段时间, 变换器出现多开关周期振荡现象.

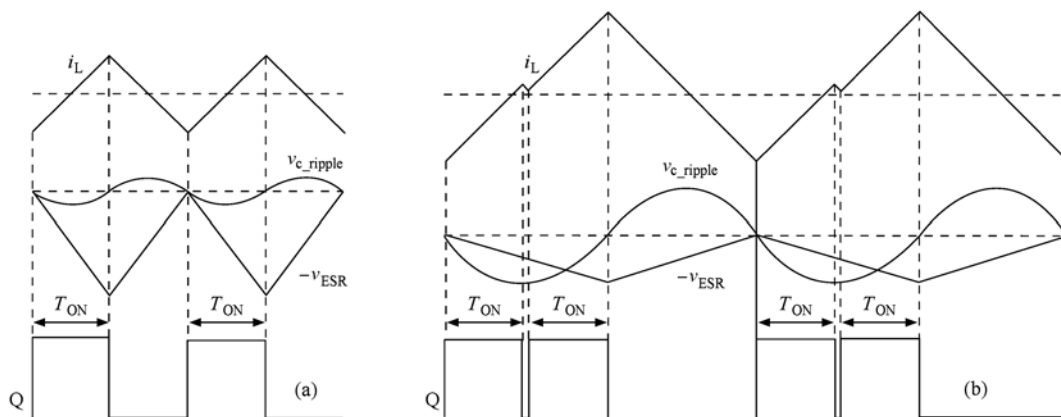


图 2 不同 ESR 时 COT 控制 buck 变换器工作波形 (a) ESR 值较大; (b) ESR 值较小

由以上分析可知, 增大 R_{ESR} 可以消除 COT 控制 buck 变换器的多开关周期振荡现象; 而减小 R_{ESR} 时, 将导致多开关周期振荡现象的发生. 因而存在一个临界值 R_{ESR}^C , 当 $R_{ESR} < R_{ESR}^C$ 时, COT 控制 buck 变换器发生多开关周期振荡现象; 而 $R_{ESR} > R_{ESR}^C$ 时, 多开关周期振荡现象消失.

COT 控制 buck 变换器正常工作时, 在开关管关断时刻有

$$v_{c_ripple} + v_{ESR} > 0, \quad (1)$$

即 $v_{c_ripple} > -v_{ESR}$ 成立.

因此, 当 ESR 电压波形 $-v_{ESR}$ 始终位于输出滤波电容电压波动 v_{c_ripple} 下方时, (1) 式总能满足. 观察图 2 可以发现, 为了使 $-v_{ESR}$ 波形始终位于 v_{c_ripple} 波形下方, 只需开关管导通时刻 $-v_{ESR}$ 波形的斜率 (负值) 小于 v_{c_ripple} 波形的斜率 (负值); $-v_{ESR}$ 和 v_{c_ripple} 的斜率相等时对应的 ESR 值即为发生多开关周期振荡现象的临界 ESR 值.

开关管导通时, 电感电流上升斜率为

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{in} - v_o}{L}, \quad (2)$$

由于电感电流纹波全部流入输出滤波电容, 所以开关管导通时刻 (假定 $t=0$) $-v_{ESR}$ 波形的斜率为

$$\begin{aligned} \left. \frac{d(-v_{ESR})}{dt} \right|_{t=0} &= \left. \frac{d[-(i_L - I_o)R_{ESR}]}{dt} \right|_{t=0} \\ &= -R_{ESR} \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} \\ &= -R_{ESR} \frac{v_{in} - v_o}{L}. \end{aligned} \quad (3)$$

对于 buck 变换器, 有

$$\begin{aligned} C \frac{dv_c}{dt} &= C \frac{d(v_{c_ripple} + V_{ref})}{dt} \\ &= C \frac{dv_{c_ripple}}{dt} = i_L - I_o. \end{aligned} \quad (4)$$

由 (4) 式可得开关管导通时刻 v_{c_ripple} 波形的斜率

$$\begin{aligned} \left. \frac{dv_{c_ripple}}{dt} \right|_{t=0} &= \left. \frac{i_L - I_o}{C} \right|_{t=0} \\ &= -\frac{\Delta I_L}{2C} \\ &= -\frac{v_{in} - v_o}{2LC} T_{ON}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 ΔI_L 为电感电流纹波峰峰值.

令 (3) 式等于 (5) 式, 可得临界 ESR 值 R_{ESR}^C 为

$$R_{ESR}^C = \frac{T_{ON}}{2C}. \quad (6)$$

从 (6) 式可以看出, 输出滤波电容值大小与临界 ESR 值 R_{ESR}^C 成反比, 输出滤波电容值越大, 临界 ESR 值越小, 反之, 临界 ESR 值越大. 输出滤波电容值仅影响临界 ESR 值的大小, 而不影响多开关周期振荡现象的存在与否, 因而本文将不考虑输出滤波电容大小对多开关周期振荡现象的影响.

因此, 要使 COT 控制 buck 变换器不发生多开关周期振荡现象, 输出滤波电容等效串联电阻值 R_{ESR} 必须满足

$$R_{ESR} > R_{ESR}^C. \quad (7)$$

换言之, 当输出滤波电容 C 及其 ESR 值 R_{ESR} 确定后, 为避免发生多开关周期振荡现象, 在设计恒定导通时间 T_{ON} 时, 需使之满足

$$T_{ON} < T_{ON}^c = 2\tau, \quad (8)$$

其中 T_{ON}^c 为临界固定导通时间, τ 为时间常数, $\tau = R_{ESR}C$. 否则, COT 控制 buck 变换器将出现多开关周期振荡现象.

4. 仿真实验

为了验证理论分析的正确性, 对表 1 所描述的 COT 控制 buck 变换器进行了计算机仿真研究.

在任意开关周期开始时刻采样 buck 变换器电感电流 $i_L(nT)$ 及输出滤波电容电压 $v_C(nT)$, 以 $i_L(nT), v_C(nT)$ 为初始条件, 利用 buck 变换器开关

管开通与关断时刻对应的电路状态方程, 求解下一个开关周期开始时刻的状态变量, 建立 buck 变换器的离散迭代映射模型, 通过数值仿真研究 COT 控制 buck 变换器的动力学行为.

表 1 COT 控制 buck 变换器电路参数

V_{in}/V	15
V_o/V	5
V_{ref}/V	5
$L/\mu H$	200
$C/\mu F$	100
R/Ω	5
$T_{ON}/\mu s$	2.5

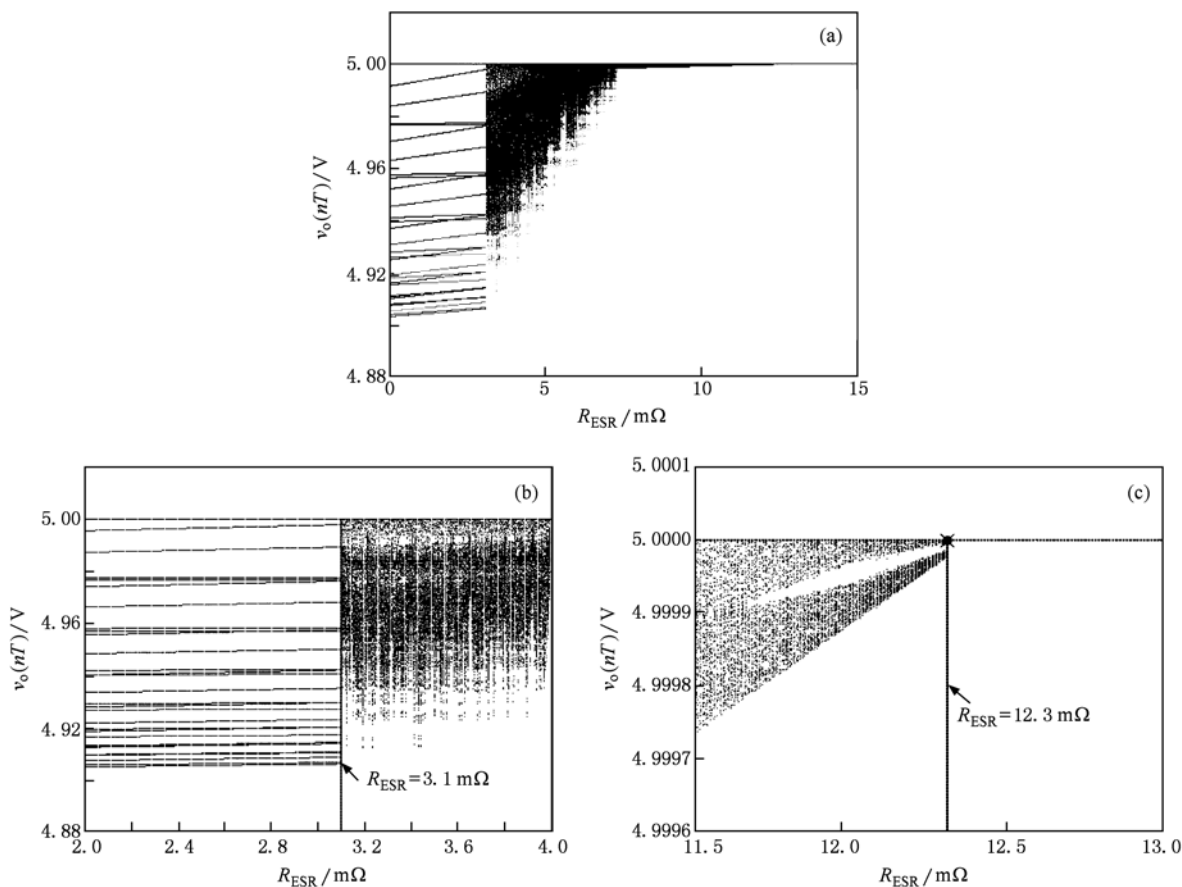


图 3 COT 控制 buck 变换器稳态开关周期开始时刻输出电压 $v_o(nT)$ 与 R_{ESR} 的关系 (a) $R_{ESR} \in (0, 15 \text{ m}\Omega)$; (b) $R_{ESR} \in (2 \text{ m}\Omega, 4 \text{ m}\Omega)$; (c) $R_{ESR} \in (11.5 \text{ m}\Omega, 13 \text{ m}\Omega)$

基于 COT 控制 buck 变换器的离散映射迭代模型, 图 3 给出了 COT 控制 buck 变换器稳态工作时开关周期开始时刻的输出电压 $v_o(nT)$ 与输出滤波电容 ESR 值 R_{ESR} 之间的关系图, 其中图 3(b) 和图 3(c) 分别为 $R_{ESR} \in (2 \text{ m}\Omega, 4 \text{ m}\Omega)$ 和 $R_{ESR} \in (11.5 \text{ m}\Omega, 13 \text{ m}\Omega)$ 时图 3(a) 的放大图. 从图 3(a) 可以看出, 当 R_{ESR} 小于 $3.1 \text{ m}\Omega$ 时, 稳态工作时开关周期开

始时刻的输出电压存在多种可能值, 输出电压波动幅值较大; 随着 R_{ESR} 的增加, 稳态工作时开关周期开始时刻的输出电压的取值增加, COT 控制 buck 变换器处于混沌工作状态, 输出电压波动幅值逐渐减小; 从图 3(c) 可以看出, 当 R_{ESR} 大于 $12.3 \text{ m}\Omega$ 时, 稳态工作时开关周期开始时刻的输出电压取值唯一 (恒为 5 V), 变换器稳定工作. 图 3 所示结果验证了

当 R_{ESR} 减小时, COT 控制 buck 变换器将出现多开关周期振荡现象, 而随着 R_{ESR} 增大, 多开关周期振荡现象消失、变换器工作稳定的分析结果. 此外, 从图 3 (c) 还可以看出, $R_{ESR} = 12.3 \text{ m}\Omega$ 是开关周期开始时刻稳态输出电压取值唯一和存在多种取值的分界点, 即 $R_{ESR} = 12.3 \text{ m}\Omega$ 为 COT 控制 buck 变换器发生多开关周期振荡现象的临界 ESR 值. 另外, 根据表 1 所示电路参数, 由 (6) 式可得临界 ESR 值 $R_{ESR}^C = 12.5 \text{ m}\Omega$, 与利用离散迭代映射模型得到的 $12.3 \text{ m}\Omega$ 非常相近, 由此验证理论分析的正确性.

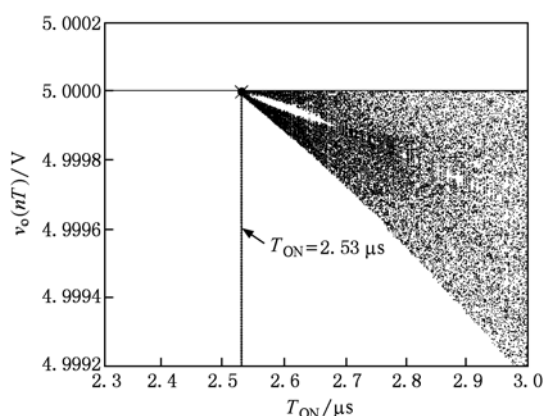


图 4 COT 控制 buck 变换器稳态开关周期开始时刻输出电压 $v_o(nT)$ 与 T_{ON} 的关系

图 4 为采用表 1 所示电路参数, 输出滤波电容 ESR 值为 $R_{ESR} = 12.5 \text{ m}\Omega$ 时, COT 控制 buck 变换器稳态工作时开关周期开始时刻输出电压 $v_o(nT)$ 与

固定导通时间 T_{ON} 之间的关系图. 从图中可以看出, 当 T_{ON} 小于 $2.53 \mu\text{s}$ 时, 稳态工作时开关周期开始时刻的输出电压取值唯一 (恒为 5 V), 而随着 T_{ON} 值的增加, 稳态工作时开关周期开始时刻的输出电压取值变得混乱, 出现多开关周期振荡现象. 根据采用的电路参数, 由 (8) 式可得临界固定导通时间 $T_{ON}^C = 2.5 \mu\text{s}$, 与图 4 中的 $2.53 \mu\text{s}$ 非常接近, 从而验证理论分析的正确性. 因此, 在设计 COT 控制 buck 变换器时, 一旦输出滤波电容及其 ESR 值确定后, 固定导通时间的取值就必须小于临界固定导通时间以避免多开关周期振荡现象的产生.

图 5 为采用表 1 电路参数、当 $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$ 和 $R_{ESR} = 20 \text{ m}\Omega$ 时, COT 控制 buck 变换器的 PSPICE 时域仿真波形. 从图 5 (a) 可以看出, 当 $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$ 时, 开关管连续导通多个固定导通时间, 然后持续关断一段时间, 输出电压纹波发生多开关周期振荡现象, 输出电压振荡, 电压波动幅度大; 而从图 5 (b) 可以看出, 当 $R_{ESR} = 20 \text{ m}\Omega$ 时, $-v_{ESR}$ 始终位于 v_{c_ripple} 下方, 满足 COT 控制正常工作的前提条件, 变换器工作稳定, 输出电压纹波小, 抑制了多开关周期振荡现象. COT 控制 buck 变换器的 PSPICE 时域仿真结果验证了理论分析的正确性.

图 6 所示为 $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$ 和 $R_{ESR} = 20 \text{ m}\Omega$ 时, COT 控制 buck 变换器输出电压与电感电流的相图. 当 $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$ 时, COT 控制 buck 变换器发生多开关周期振荡现象, 输出电压振荡, 变换器工作于混

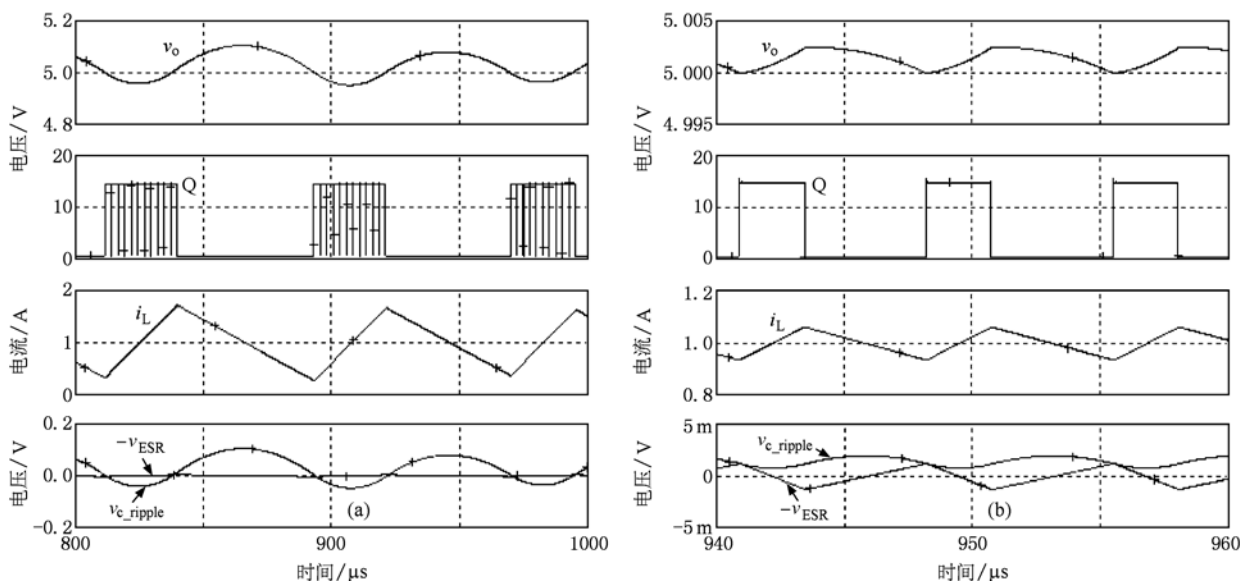


图 5 COT 控制 buck 变换器时域仿真波形 (a) $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$; (b) $R_{ESR} = 20 \text{ m}\Omega$

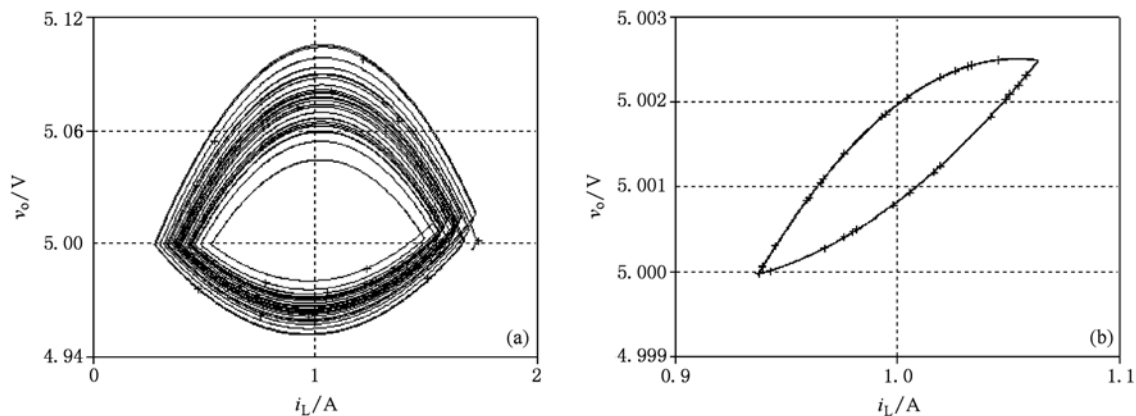


图6 COT控制 buck 变换器相图 (a) $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$; (b) $R_{ESR} = 20 \text{ m}\Omega$

沌状态;而当 $R_{ESR} = 20 \text{ m}\Omega$ 时,不存在多开关周期振荡现象,变换器工作稳定,从而验证了理论分析的正确性。

5. 结 论

本文揭示了 COT 控制 buck 变换器中存在的多开关周期振荡现象,并对其产生机理进行了研究。

研究表明,存在一个临界 ESR,当输出滤波电容 ESR 小于临界 ESR 时,多开关周期振荡现象产生,而输出滤波电容 ESR 大于临界 ESR 时,多开关周期振荡现象消失。根据多开关周期振荡现象产生机理,本文给出了临界 ESR 值与固定导通时间及输出滤波电容值之间的定量关系,并进行了仿真验证。本文能够用于指导 COT 控制 buck 变换器的电路参数设计,具有理论指导意义及工程价值。

[1] Xu F, Xu D G, Liu Y X 2003 *Proceeding of the CSEE* **23** 133 (in Chinese) [许峰、徐殿国、柳玉秀 2003 中国电机工程学报 **23** 133]

[2] Zhang B 2006 *Transactions of China Electrotechnical Society* **21** 24 (in Chinese) [张波 2006 电工技术学报 **21** 24]

[3] Zhou Y F, Chen J N, Tse C K, Ke D M, Shi L X, Sun W F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3676 (in Chinese) [周宇飞、陈军宁、谢智刚、柯导明、时龙兴、孙伟锋 2004 物理学报 **53** 3676]

[4] Zhang B 2005 *Transactions of China Electrotechnical Society* **20** 1 (in Chinese) [张波 2005 电工技术学报 **20** 1]

[5] Liu J, Wang Y B 2004 *Proceeding of the CSEE* **24** 174 (in Chinese) [刘健、王媛彬 2004 中国电机工程学报 **24** 174]

[6] Zhang X T, Ma X K, Zhang H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6174 (in Chinese) [张笑天、马西奎、张浩 2008 物理学报 **57** 6174]

[7] Wang F Q, Zhang H, Ma X K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2842 (in Chinese) [王发强、张浩、马西奎 2008 物理学报 **57** 2842]

[8] Zhao Y B, Luo X S, Fang J Q, Wang B H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5022 (in Chinese) [赵益波、罗晓曙、方锦清、汪秉宏 2005 物理学报 **54** 5022]

[9] Zhao Y B, Zhang D Y, Zhang C J 2007 *Chin. Phys.* **16** 933

[10] Deane J H B, Hamill D C 1990 *IEEE Trans. on Power Electronics* **5** 260

[11] Zhang B, Qi Q 2002 *Proceeding of the CSEE* **22** 18 (in Chinese) [张波、齐群 2002 中国电机工程学报 **22** 18]

[12] Wang X M, Zhang B, Qiu D Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2728 (in Chinese) [王学梅、张波、丘东元 2008 物理学报 **57** 2728]

[13] Bao B C, Xu J P, Liu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2949 (in Chinese) [包伯成、许建平、刘中 2009 物理学报 **58** 2949]

[14] Bao B C, Zhou G H, Xu J P, Liu Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3769 (in Chinese) [包伯成、周国华、许建平、刘中 2010 物理学报 **59** 3769]

[15] Bao B C, Liu Z, Xu J P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4742

[16] Zhuo G H, Xu J P, Bao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2272 (in Chinese) [周国华、许建平、包伯成 2010 物理学报 **59** 2272]

[17] Xu X R, Wu X B, Yan X L 2008 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems* Seattle, USA, May 18—21, 2008, p2206

[18] Sahu B, Rincon-Mora G A 2007 *IEEE Trans. on Circuits and Syst.* **1** 54 312

[19] Yeh C A, Lai Y S 2009 *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems* Taipei, November 2—5, 2009, p848

[20] Na K, Dong S H, Jian L, Lee F C 2008 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems* Seattle, USA, May 18—21, 2008, p3270

[21] Xu X R, Wu X B 2008 *IEEE Power Electronics Specialists Conference* Rhodes, Greece, June 15–19, 2008, p4192

[22] Xu X R, Wu X B, Zhao M L, Yan X L 2009 *Journal of Semiconductors* **30** 1

Analysis of multi-switching period oscillation phenomenon in constant on-time controlled buck converter*

Wang Jin-Ping Xu Jian-Ping[†] Xu Yang-Jun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 10 June 2010; revised manuscript received 9 September 2010)

Abstract

In this paper, multi-switching period oscillation phenomenon in constant on-time (COT) controlled buck converter is studied, and the effect of output capacitor equivalent series resistance (ESR) on the control performance of COT controlled buck converter is revealed. The study results indicate that ESR is the critical factor causing multi-switching period oscillation phenomenon in the COT controlled buck converter, and critical value of ESR is obtained. When the value of ESR is less than the critical value, the multi-switching period oscillation phenomenon occurs, and it disappears when the value of ESR is higher than the critical value. Finally, the theoretical results are verified by simulation.

Keywords: constant on-time control, buck converter, oscillation, equivalent series resistance

PACS: 84.30.Jc, 05.45.-a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50677056), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. SWJTU09ZT13), and the Engineering Practice of Southwest Jiaotong University (Grant No. 10-78).

[†] Corresponding author. E-mail: jpxu-swjtu@163.com