

恒定导通时间电容电流控制 Buck 变换器研究

张 希 沙 金 徐杨军 许建平 陈 兴

(磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室 西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

摘要 由于输出电容电压相位滞后电感电流相位,当输出电容等效串联电阻(ESR)较小时,恒定导通时间 V^2 (V^2 -COT)控制 Buck 变换器将工作在不稳定状态。针对该问题,提出开关变换器的恒定导通时间电容电流(CC-COT)控制技术,并阐述了其工作原理。通过基于描述函数法建立的小信号模型和 Routh-Hurwitz 判据,研究 CC-COT 控制 Buck 变换器的稳定性。研究结果表明,CC-COT 控制技术具有快速瞬态响应速度,且不存在因输出电容 ESR 较小而引起的不稳定现象。

关键词: 电容电流 恒定导通时间 V^2 控制 等效串联电阻 稳定性 瞬态响应

中图分类号: TM315

Research on the Constant On-time Capacitor Current Control of Buck Converters

Zhang Xi Sha Jin Xu Yangjun Xu Jianping Chen Xing

(Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Meglev Ministry of Education
School of Electrical Engineering Southwest Jiaotong University Chengdu 610031 China)

Abstract For the constant on-time V^2 (V^2 -COT) controlled buck converter, when the output capacitor with small equivalent series resistance (ESR) is used, it will operate in the unstable state because the output voltage phase lags behind the inductor current phase. To solve the problem, a constant on-time capacitor current (CC-COT) control technique for switching converter is proposed and its operational principle is elaborated. Based on the small signal model established by describing function method, the stability of CC-COT controlled buck converter is studied by using the Routh-Hurwitz criterion. The study results show that the CC-COT control technique has fast transient response characteristic and can eliminate the instability caused by the small ESR of the output capacitor.

Keywords: Capacitor current, constant on-time V^2 (V^2 -COT) control, equivalent series resistance (ESR), stability, transient response

0 引言

随着电子信息技术的快速发展,各种便携式电子设备已在人们的生活中得到了广泛使用。为了保证这些电子设备高效、可靠的工作,需要其供电电源具有高轻载效率和快速负载瞬态响应速度^[1],传统脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)开关变换器控制技术(如电压型控制^[2]和电流型控制^[3])常无法满足该要求。

恒定导通时间(Constant On-Time, COT)控制技术是一种脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation, PFM)控制技术^[4],它使开关变换器的开关管在每个开关周期内导通固定的时间,通过控制关断时间实现对输出电压的调节。与传统 PWM 控制技术相比,COT 控制具有轻载效率高以及瞬态响应速度快等优点,在工业界和学术界得到了广泛关注和研究^[5-13]。然而,传统 COT 控制开关变换器存在输出电压稳态偏差,因此无法满足需要高输出电压精度的应用场合^[5]。为了解决输出电压调节精度的问题, V^2 控制思想^[1]被引入到传统 COT 控制技术中,形成 V^2 -COT 控制^[5,11-13],其

国家自然科学基金(51177140、61371033)资助项目。
收稿日期 2015-01-05 改稿日期 2015-10-10

保持了传统 COT 控制快速瞬态响应速度和高轻载效率等优点,有效消除了传统 COT 控制开关变换器输出电压存在的稳态偏差,提高了其调节精度。

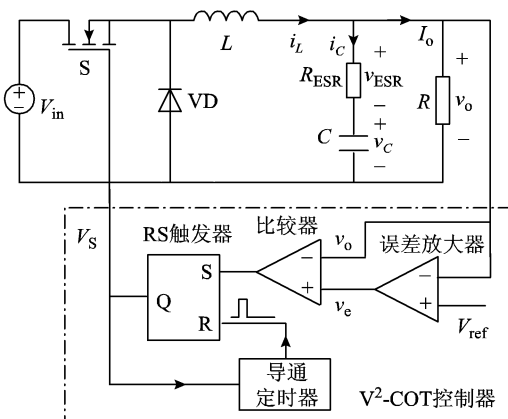
相对于传统 COT 控制, V^2 -COT 控制开关变换器虽然提高了输出电压的调节精度,但由于输出电容电压与电感电流之间存在相位差,当输出电容等效串联电阻(Equivalent Series Resistance, ESR)较小时,变换器将工作在不稳定状态,并伴随脉冲簇发现象^[6,7],输出电压及电感电流工作在低频振荡状态。增大输出电容 ESR 虽然可满足 V^2 -COT 控制开关变换器稳定工作的要求^[5,12],但增大了输出电压纹波。

本文以 Buck 变换器为载体,针对 V^2 -COT 控制技术在输出电容 ESR 较小时存在脉冲簇发现象等不稳定问题,提出了恒定导通时间电容电流(Capacitor Current, CC)控制技术(CC-COT),并阐述了其工作原理;建立了其基于描述函数法的小信号模型,分析了 CC-COT 控制 Buck 变换器的稳定性。实验结果验证了该理论分析的正确性。

1 V^2 -COT 控制技术

1.1 工作原理

图 1 为 V^2 -COT 控制 Buck 变换器原理图及其稳态工作波形,其中 V_{in} 和 v_o 分别为 Buck 变换器的输入和输出电压, i_L 为电感电流, i_C 为电容电流, v_e 为误差信号, V_s 为驱动控制信号, S 为开关管, VD 为二极管, L 为电感, C 和 R_{ESR} 分别为输出电容及其等效串联电阻, R 为负载电阻。由图 1a 可看出, V^2 -COT 控制器由误差放大器、比较器、RS 触发器和导通定时器(ON TIMER)组成。输出电压 v_o 与基准电压 V_{ref} 做差后,经误差放大器产生误差信号 v_e ; 误差信号 v_e 与 v_o 经比较器进行比较产生驱动控制信号 V_s , 控制开关管的导通与关断。



(a) 原理图

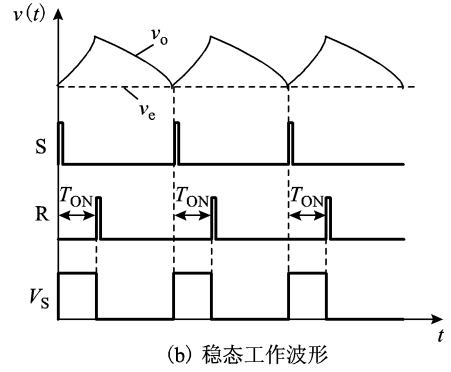


图 1 V^2 -COT 控制 Buck 变换器

Fig. 1 V^2 -COT controlled Buck converter

从图 1b 可看出,当输出电压 v_o 下降至误差信号 v_e 时,比较器输出高电平,置位 RS 触发器, Q 端输出高电平,驱动开关管 S 导通, v_o 开始上升,同时导通定时器开始定时;开关管导通固定时间 T_{ON} 后,导通定时器复位触发器, Q 端输出低电平,驱动开关管 S 关断, v_o 开始下降,当 v_o 下降至 v_e 时,开关管 S 再次导通,进入下一个开关周期。从稳态工作波形可见, V^2 -COT 控制 Buck 变换器正常工作时,固定导通时间结束时刻输出电压瞬时值 v_o 应高于误差信号 v_e 。

1.2 脉冲簇发现象

假设开关变换器的开关频率远大于系统特征频率, Buck 变换器的电感电流纹波完全流入输出电容,输出电容电流 i_C 与电感电流 i_L 完全同步。那么, ESR 两端电压 v_{ESR} 与 i_L 同相位,而输出电容电压 v_C 的相位滞后于 i_L 的相位。 V^2 -COT 控制的内环调制信号为输出电压,输出电压由输出电容电压及其 ESR 两端电压组成。

当输出电容 ESR 较大时,输出电压纹波主要由输出电容 ESR 两端电压纹波决定,输出电压纹波与电感电流纹波相位一致, V^2 -COT 控制 Buck 变换器工作在稳定状态;当输出电容 ESR 较小时,输出电压纹波主要由输出电容电压纹波决定,输出电压纹波相位滞后电感电流,这将导致 V^2 -COT 控制 Buck 变换器工作在不稳定状态,并伴随脉冲簇发现象,造成电感电流和输出电压纹波过大,如图 2 所示。文献[6]的研究表明,当脉冲簇发现象出现时, V^2 -COT 控制 Buck 变换器处于混沌工作状态。因此,脉冲簇发现象的发生引起了系统失稳,从而严重影响了变换器的稳态性能。

V^2 -COT 控制 Buck 变换器稳定工作时输出电容 ESR 的临界值为^[6]

$$R_{ESR}^C = \frac{T_{ON}}{2C} \quad (1)$$

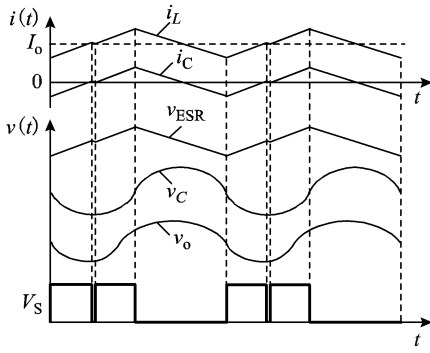


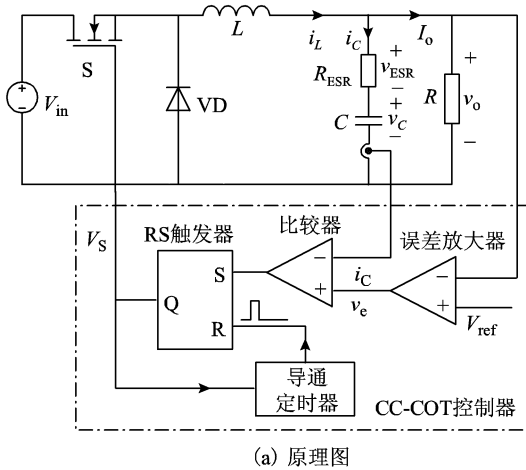
图2 波形示意图

Fig. 2 Time-domain waveforms diagram

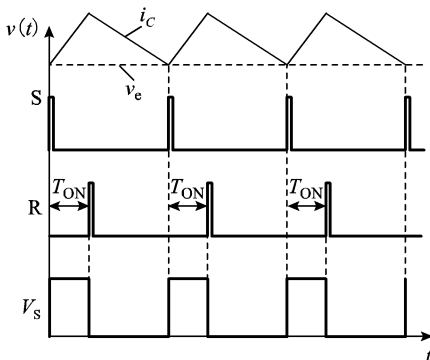
V²-COT 控制虽然消除了传统 COT 控制开关变换器的稳态偏差,但其稳定性依赖于输出电容 ESR 的取值。基于此,本文提出并研究了 CC-COT 控制技术。

2 CC-COT 控制技术

图3为CC-COT控制Buck变换器原理图及其稳态工作波形。对比图3a和图1a可看出,其控制电路组成基本一致,只是CC-COT控制将电容电流取代输出电压作为内环调制信号。从图3b可看出CC-COT控制Buck变换器的工作原理为:当电容电流*i_c*小于误差信号



(a) 原理图



(b) 稳态工作波形

图3 CC-COT 控制 Buck 变换器

Fig. 3 CC-COT controlled Buck converter

号 v_e 时,比较器输出高电平,置位 RS 触发器, Q 端输出高电平,驱动开关管 S 导通,电感电流和电容电流上升,同时导通定时器开始定时;开关管导通固定时间 T_{ON} 后,导通定时器复位触发器, Q 端输出低电平,驱动开关管 S 关断,电容电流 i_c 下降,当电容电流下降至误差信号 v_e 时,开关管 S 再次导通,进入下一个开关周期。

CC-COT 控制器的电压外环与 V²-COT 控制器的电压外环相同,均含有误差放大器及其补偿电路,可消除输出电压的稳态偏差;CC-COT 控制的内环采样电容电流作为调制信号,由于开关变换器的开关频率远大于系统特征频率,故电容电流与电感电流相位完全同步,从而消除了 V²-COT 控制 Buck 变换器中电容电压相位滞后电感电流相位对变换器稳定性的影响。

由电容电流与电感电流和负载电流间的关系(即 $i_c = i_L - I_o$)可知,电容电流作为内环调制信号包含了电感电流和输出电流信息,因此当输入或负载出现扰动,电容电流 i_c 均可立刻产生相应变化,作用于比较器,使开关管发生动作。由此可知,CC-COT 具有更好的瞬态响应能力。

3 小信号分析

本节基于描述函数法^[12],建立了 CC-COT 控制 Buck 变换器的小信号模型,并通过误差信号至电容电流的传递函数来分析变换器的控制稳定性。

在误差信号 v_e 上加入微小扰动

$$\Delta v = \hat{v} \sin(2\pi f_m t + \theta) \quad \hat{v} \ll v_e \quad (2)$$

得到加入微小扰动后的误差信号 \tilde{v}_e 为

$$\tilde{v}_e = v_e + \Delta v = v_e + \hat{v} \sin(2\pi f_m t + \theta) \quad (3)$$

式中 \hat{v} 、 f_m 和 θ 分别为扰动信号 Δv 的幅度(V)、频率(Hz)和相位(rad)。此时,关断时间由扰动后的误差信号 \tilde{v}_e 与电容电流调制。为了利用描述函数法^[12],需做如下假设:①在开关管 S 导通和关断时间内,电感电流 i_L ,即电容电流 i_c 的上升斜率和下降斜率均保持恒定;②开关频率 f_s 和扰动频率 f_m 的数量级相同,且存在正整数 M 、 N ,使得 $Mf_m = Nf_s$ 。图4为加入扰动后误差信号 \tilde{v}_e 与电容电流 i_c 调制关断时间的波形示意图。加入扰动信号后,占空比和电容电流可表示为

$$\begin{aligned} d(t) \Big|_{0 \leq t \leq t_M + T_{OFF(M)} + T_{ON}} \\ = \sum_{i=1}^M [u(t - t_i - T_{off(i)}) - u(t - t_i - T_{off(i)} - T_{on})] \end{aligned} \quad (4)$$

$$i_C \Big|_{0 \leq t \leq t_M + T_{\text{OFF}(M)} + T_{\text{ON}}} = i_L(t) \Big|_{0 \leq t \leq t_M + T_{\text{OFF}(M)} + T_{\text{ON}}} - I_o$$

$$= i_{L0} + \int_0^t \left[\frac{V_{\text{in}}}{L} d(t) \right] \Big|_{0 \leq t \leq t_M + T_{\text{OFF}(M)} + T_{\text{ON}}} - \frac{V_o}{L} dt - \frac{V_o}{R} \quad (5)$$

式中：当 $t > 0$ 时， $u(t) = 1$ ； i_{L0} 为电感电流在 $t_1 = 0$ 时的值。

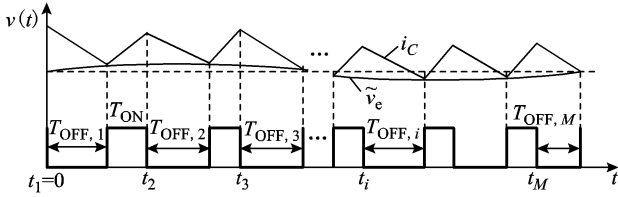


图4 加入扰动后的调制信号

Fig. 4 Perturbed modulation signal

在频率为 f_m 的扰动作用下，电容电流 i_C 和误差信号 \tilde{v}_e 的傅里叶系数分别为

$$c_m(i_C) = \frac{f_s}{m_2} \frac{(1 - e^{-j2\pi f_m T_{\text{ON}}})(1 - e^{-j2\pi f_m T_s}) \left(1 - \frac{e^{j\pi/2}}{2\pi f_m RC}\right)}{\left(1 + \frac{T_{\text{OFF}}}{2R_{\text{ESR}}C}\right) - \left(1 - \frac{2T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}}{2R_{\text{ESR}}C}\right) e^{-j2\pi f_m T_s}} \cdot \frac{V_{\text{in}} e^{-j\theta}}{Lj2\pi f_m} \quad (6)$$

$$c_m(\tilde{v}_e) = \hat{v} \frac{e^{-j\theta}}{2j} \quad (7)$$

式中 T_s 为稳态时的开关周期， μs 。

由此可得误差信号至电容电流的描述函数为

$$\frac{i_C(f_m)}{\tilde{v}_e(f_m)} = \frac{f_s}{m_2} \frac{(1 - e^{-j2\pi f_m T_{\text{ON}}})(1 - e^{-j2\pi f_m T_s}) \left(1 - \frac{e^{j\pi/2}}{2\pi f_m RC}\right)}{\left(1 + \frac{T_{\text{OFF}}}{2R_{\text{ESR}}C}\right) - \left(1 - \frac{2T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}}{2R_{\text{ESR}}C}\right) e^{-j2\pi f_m T_s}} \cdot \frac{V_{\text{in}}}{Lj2\pi f_m} \quad (8)$$

式中 $m_2 = \frac{V_o}{L}$ 。

在 s 域，误差信号至电容电流的传递函数为

$$\frac{i_C(s)}{\tilde{v}_e(s)} = \frac{f_s}{m_2} \frac{(1 - e^{-sT_{\text{ON}}})(1 - e^{-sT_s}) \left(1 + \frac{1}{sRC}\right)}{\left(1 + \frac{T_{\text{OFF}}}{2R_{\text{ESR}}C}\right) - \left(1 - \frac{2T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}}{2R_{\text{ESR}}C}\right) e^{-sT_s}} \cdot \frac{V_{\text{in}}}{sL} \quad (9)$$

由文献[12]，进一步化简有

$$\frac{i_C(s)}{\tilde{v}_e(s)} \approx \frac{1}{1 + \frac{s}{Q_1 \omega_1} + \frac{s^2}{\omega_1^2}} \quad (10)$$

式中： $Q_1 = \frac{2}{\pi}$ ； $\omega_1 = \frac{\pi}{T_{\text{ON}}}$ 。

从式(10)可看出，其所有极点均落在 s 平面的左平面。由 Routh-Hurwitz 判据可知，其稳定性不受输出电容参数，即电容值和 ESR 的影响，从根本上消除了输出电容电压相位滞后电感电流相位引起的不稳定现象。

4 实验验证

为了验证理论分析的正确性，本文设计了 CC-COT 控制 Buck 变换器实验电路，并与相同电路参数的 V^2 -COT 控制 Buck 变换器的实验结果进行对比分析。需要说明的是，本文借鉴文献[14]提出的电流采样方法实现对电容电流的采样。实验参数如表1所示。将表1有关参数带入式(1)，可计算出 V^2 -COT 控制 Buck 变换器的输出电容 ESR 临界值为 75 m Ω 。

表1 V^2 -COT/CC-COT 控制 Buck 变换器电路参数

Tab. 1 Circuit parameters of V^2 -COT/CC-COT

controlled buck converter	
参数名称	取值
输入电压 V_{in}/V	10
参考电压 V_{ref}/V	5
滤波电感 $L/\mu\text{H}$	100
输出电容 $C/\mu\text{F}$	100
负载电阻 R/Ω	5
固定导通时间/ μs	15

图5为输出电容 ESR 分别为 40 m Ω 和 200 m Ω 时， V^2 -COT 和 CC-COT 控制 Buck 变换器的实验波形，其中，图 5a1 和图 5b1 为 V^2 -COT 控制 Buck 变换器的波形；图 5a2 和图 5b2 为 CC-COT 控制 Buck 变换器的波形。图 5a 中， $R_{\text{ESR}} = 40 \text{ m}\Omega$ ， V^2 -COT 控制 Buck 变换器工作在不稳定状态，并出现脉冲簇发现象，输出电压及电感电流工作在低频振荡状态，如图 5a1 所示；而 CC-COT 控制 Buck 变换器工作在稳定状态，如图 5a2 所示。图 5b 中， $R_{\text{ESR}} = 200 \text{ m}\Omega$ ， V^2 -COT 和 CC-COT 控制 Buck 变换器均工作在稳定状态，分别如图 5b1 和图 5b2 所示。由此可见，实验结果验证了上文理论分析。

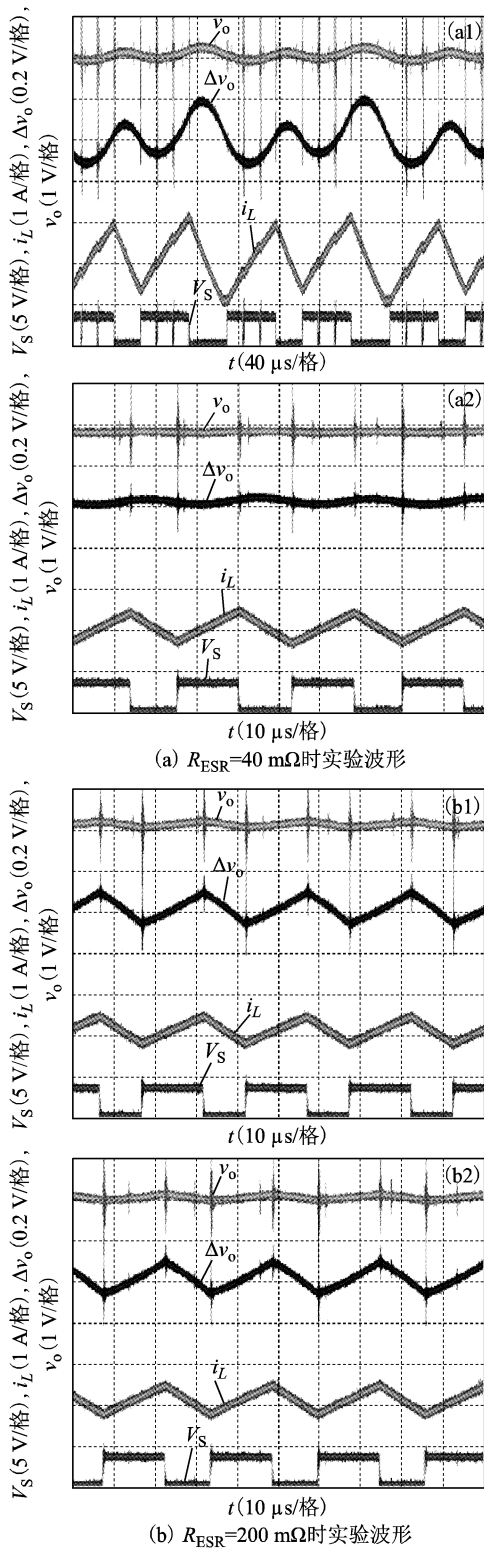


图5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

进一步,为了验证CC-COT控制Buck变换器具有快速的负载动态响应速度,图6给出了输出电容ESR为 $40\text{ m}\Omega$ 时负载电流 I_o 跳变的实验波形。图6a为负载电流从 1 A 跳变到 1.5 A 时的实验波形;图6b为负

载电流从 1.5 A 跳变到 1 A 时的实验波形。从图6可看出,当负载电流跳变后,CC-COT控制Buck变换器可在 $1\sim 2$ 个开关周期进入到新的稳态。由此可看出,CC-COT控制具有快速的负载动态响应速度。因此,实验结果很好的验证了理论分析的正确性。

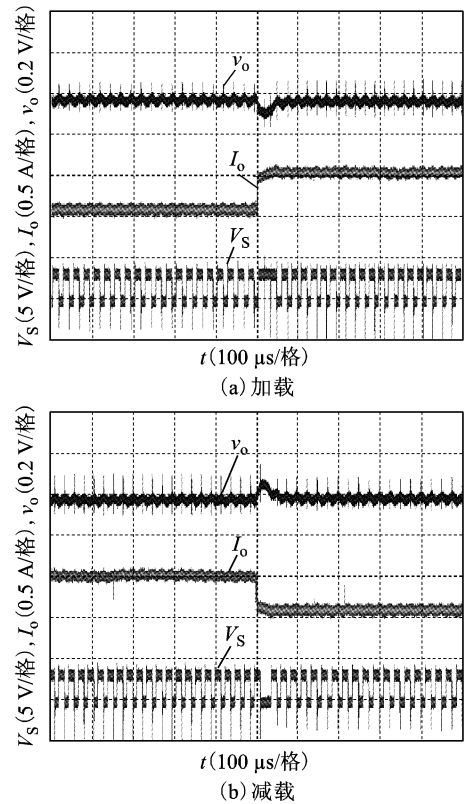


图6 负载跳变实验结果

Fig. 6 Experimental results of load step

5 结论

在分析输出电容ESR对 V^2 -COT控制Buck变换器影响的基础上,提出了开关变换器的CC-COT控制技术,该控制技术利用输出电容电流作为控制环路的内环调制信号,不仅具有快速的瞬态响应速度,而且有效消除了输出电容ESR对Buck变换器工作稳定性的影响。通过描述函数法,建立了CC-COT控制Buck变换器的小信号模型,分析了其控制环路的稳定性。研究表明,CC-COT控制Buck变换器的稳定性不受输出电容ESR取值的影响。实验结果有效验证了理论分析的正确性。

参考文献

- [1] Goder D. Switching regulator; U. S., 5770940[P]. 1998.
- [2] 王建华, 张方华, 龚春英, 等. 电压控制型Buck DC/DC变换器输出阻抗优化设计[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 18-23.

Wang Jianhua, Zhang Fanghua, Gong Chunying, et al.

- Study of output impedance optimization for voltage mode control Buck DC/DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 18-23.
- [3] 刘雁飞. 平均电流控制下的 DC/DC 变换器大小信号统一动态模型[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 84-91.
Liu Yanfei. A unified large signal and small signal model for DC/DC converters with average current control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 84-91.
- [4] 周国华, 许建平. 开关变换器调制与控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 815-831.
Zhou Guohua, Xu Jianping. A review of modulation and control techniques for switching converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 815-831.
- [5] Redl R, Sun J. Ripple-based control of switching regulators—an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2669-2679.
- [6] 王金平, 许建平, 徐杨军. 恒定导通时间控制 buck 变换器多开关周期振荡现象分析[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 777-783.
Wang Jinping, Xu Jianping, Xu Yangjun. Analysis of multi-switching period oscillation phenomenon in constant on-time controlled buck converter[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 777-783.
- [7] Wang J P, Xu J P, Bao B C. Pulse bursting phenomenon constant on-time controlled buck converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(12): 5406-5410.
- [8] 王金平, 许建平, 兰燕妮, 等. 基于输入电压前馈补偿的开关变换器恒定导通时间控制技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 18-22.
Wang Jinping, Xu Jianping, Lan Yanni, et al. Constant on-time control of switching DC-DC converters based on input voltage feed-forward compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 18-22.
- [9] Fang C C. Closed-form critical conditions of instabilities for constant on-time controlled buck converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2012, 59(12): 3090-3097.
- [10] Qian T, Wu W K, Zhu W D. Effect of combined output capacitors for stability of Buck converters with constant on-time control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5585-5592.
- [11] 沈霞, 王洪诚, 方玮. 基于恒定导通时间的 V^2 控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(527): 72-76.
Shen Xia, Wang Hongcheng, Fang Wei. Research of the V^2 control method based on constant on time[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2009, 46(527): 72-76.
- [12] Li J, Lee F C. Modeling of V^2 current-mode control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2010, 57(9): 2552-2563.
- [13] Yu Feng, Lee F C. Design oriented model for constant on-time V^2 control[C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, 2010: 3115-3122.
- [14] Cortés J, Šviković V, Alou P, et al. Accurate analysis of subharmonic oscillations of V^2 and V^2I_c controls applied to buck converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 1005-1018.

作者简介

张希男, 1985年生, 博士研究生, 研究方向为开关功率变换器控制技术及其动力学。(通信作者)

沙金女, 1987年生, 博士研究生, 研究方向为开关变换器拓扑及控制方法。