

一种新型 Buck 单周控制变换器

许振伟

(浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310035)

摘要: 基于单周控制器控制的 Buck 变换器具有很强的抗输入电压干扰能力, 但抑制负载扰动能力较差、输出有稳态误差。根据单周控制 Buck 变换器存在的主要问题, 通过将单周控制器和一种类似滞环控制的非线性控制器组合起来形成一种新型误差自适应单周控制器。该控制器根据输出误差的不同为单周控制器选择不同的参考信号, 从而提高了变换器的动态响应性能, 比传统的单周控制器具有更好的动态性能以及指令跟踪能力。仿真结果证明了这种控制方法的有效性。

关键词: Buck 变换器; 单周控制; 非线性控制器; 误差自适应

A novel Buck converter based on one-cycle control

XU Zhen-wei

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China)

Abstract: The Buck converter based on one-cycle control has excellent line ripple cancellation capability. However, its transient response is not satisfactory and in steady state it has output offset error. In this paper, a novel one-cycle controller is presented to improve the one-cycle control feature for Buck converters. The controller combines the one-cycle controller with a hysteretic-like non-linear controller. The role of the non-linear controller is to select the reference value for the one-cycle controller, due to the output error value, in order to make the response follow the reference faster. By this way, the combined controller has better dynamics than that of traditional one-cycle controller. The results of the method have been approved by simulations.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Zhejiang Province(No.Y106669).

Key words: Buck converter; one-cycle controller; non-linear controller; error self-adaptive

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0098-05

0 引言

单周控制技术是一种新颖的脉冲状的非线性控制技术, 这种技术利用了开关变换器的脉冲特性和非线性特性, 实现斩波电压或电流平均值的即时控制, 具有响应速度快, 鲁棒性好, 电源抗干扰抑制能力强以及具有输入波动抑制能力等特点, 但对负载扰动抑制能力比较差。目前, 在开关电源、功率因数校正、开关功率放大器、以及有源滤波等领域的应用比较广泛^[1-2]。

Buck 变换器是典型的开关电路, 具有强非线性特点, 采用单周控制器的 Buck 变换器应用比较广泛。针对单周控制技术的改进主要有三个方面: ①当因负载扰动, 变换器从 CCM 进入 DCM 时系统会不稳定, 需要将输入电压误差进行积分补偿, 但不能实现最优动态响应^[3]; ②针对变换器负载扰动

抑制能力差的问题, 需要将每个开关周期的电感电压平均值进行积分补偿, 但也不能实现最优动态响应^[4-5]; ③采用互补控制策略使电流波形对称, 从参考信号的角度消除电流直流分量。本文在 Buck 变换器中将单周控制器和一种类似滞环控制的非线性控制器结合起来提出一种新型误差自适应单周控制器, 这种新型控制器既具有单周控制对输入扰动抑制能力强的特点, 又具有一般非线性控制动态响应速度快, 抑制负载扰动能力强的特点, 它根据输出误差的不同为单周控制选择不同的参考信号, 从而提高变换器的动态响应速度^[6-8]。

1 单周期控制器

传统单周控制 Buck 变换器的结构如图 1 所示。开关 MOS 管 Q 以固定频率 f_s 开通和关断, 当 Q 导通时, 二极管 D 截止, D 上的电压 $U_D = U_s$, 当 Q 截止时, D 导通, 若系统工作在 CCM 状态时

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y106669)

$U_D = 0$ ，则 U_S 被斩波为开关变量 U_D ，经过 LC 低通滤波后在 C 两端得到直流电压 U_o ，由文献[2]可得 $U_o = V_{ref} / [1 + (L/R)s + LCs^2]$ ，即 Buck 电路的输出变成了参考电压的线性函数。但是由于滤波器和二极管存在不理想因素，传统单周控制器下，Buck 变换器输出有稳态误差^[9]。

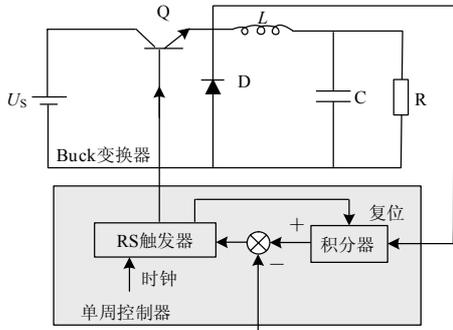


图 1 Buck 变换器单周控制电路图

Fig.1 Buck converter one-cycle control circuit

2 误差自适应单周期控制器

从结构上可以看出，传统单周控制器没有输出反馈，而引入输出反馈可以改善系统性能。在图 2 所示的误差自适应单周控制器中，在输出反馈通道采用一个类似滞环控制的非线性控制器。即该系统在结构上是个双环系统，内环是控制输入电压扰动的单周控制器；外环是提高动态响应性能的非线性控制器，该控制器的功能是根据输出电压误差的大小确定单周控制器的参考电压^[10]。

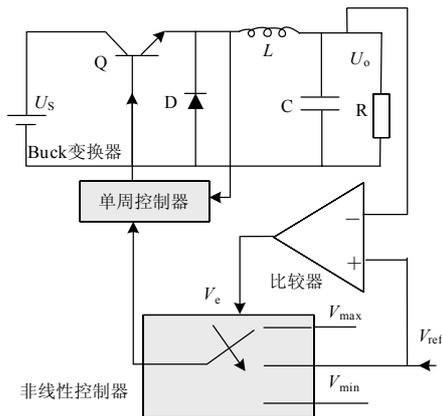


图 2 Buck 变换器误差自适应单周控制电路图

Fig.2 Buck converter error self-adaptive control circuit

当 $t = t_1$ 时，幅值为 V_A 的阶跃信号加入到变换器的输入端，此时输出电压误差 $V_e > e_{min}$ ，控制器

选择参考电压为 $V_{ref} = V_{max}$ ，系统的响应速度显然比参考电压为 V_A 时要快得多；当 $t = t_2$ 时，输出电压误差 $V_e = e_{min}$ ，控制器选择参考电压 $V_{ref} = V_A$ ；当 $t = t_3$ 时，输入阶跃信号为 $V_B < V_A$ ，此时输出电压误差 $V_e < -e_{min}$ ，控制器选择参考电压为 $V_{ref} = V_{min}$ ，然后输出电压迅速降低，直到 $t = t_4$ 时，输出电压误差 $V_e = e_{min}$ ，控制器选择参考电压 $V_{ref} = V_B$ ，系统逐渐进入到稳态。如图 3 所示。

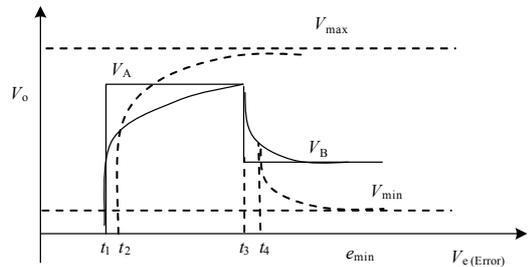


图 3 输入信号变化引起的输出变动

Fig.3 Output variations due to change of desired output

3 性能分析

Buck 变换器中低通滤波电路的时间常数远远大于开关频率，可以忽略开关频率的影响，将系统简化为连续动态模型。

假设输入信号为幅值是 A ，占空比是 D 的脉冲序列，由于开关频率很高，脉冲序列可以等效为一个幅值为 $A \times D$ 的阶跃信号。若满足 $V_{max} - V_{ref} = V_{ref} - V_{min}$ ，则非线性部分可以简化为一个带死区的滞环控制器，如图 4 所示。其中： $h = V_{max} - V_{ref}$ ，并且 $\delta = e_{min}$ 。

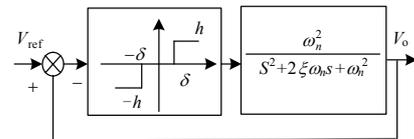


图 4 离散化对称控制器方框图

Fig.4 DF symmetric block diagram of the non-linear controller

其中非线性部分的特性为：

1) 当 $a > \delta$ 时

$$N(a) = \frac{2h}{\pi \delta} \sin(2 \cos^{-1} \frac{\delta}{a}) = \frac{4h \sqrt{a^2 - \delta^2}}{a^2 \pi}$$

2) $a < \delta$ $N(a) = 0$

其中： a 是振荡信号的幅值。

则系统特征方程为：

$$f(s, a) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2(1 + N(a)) = 0$$

令 $s = j\omega$ ，则实部和虚部分别为：

$$R(f(\omega, a)) = -\omega^2 + \omega_n^2(1 + N(a)) = 0$$

$$I(f(\omega, a)) = 2\xi\omega_n^2\omega = 0$$

从上式可见，虚部没有非 0 值，所以不会持续振荡。但是若考虑电感和电容的等效电阻，则滤波器的传输方程比上面的要复杂的多，一般采用 Nyquist 根轨迹图来分析，设电感电阻为 r_L ，电容的有效电阻为 r_c ，则传输方程为：

$$G(s) = \frac{R + Rr_c Cs}{L(R + r_c)Cs^2 + (RCr_c + r_L(R + r_c)C + L)s + R + r_L}$$

图 5 是 $G(j\omega)$ 和 $-1/N(j\omega)$ 的根轨迹图。其中 $-1/N(j\omega)$ 在负实轴上从 $-\infty$ 开始向零点运动到最大值 $-\frac{\pi\delta}{2h}$ 后返回，再次到 $-\infty$ 。而 $G(j\omega)$ 则存在于实轴下方，在负实轴上与 $-\frac{1}{N(a)}$ 没有交点，所以系统一般是稳定的。

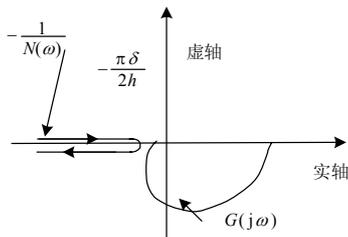


图 5 $G(j\omega)$ 和 $-1/N(a)$ 的根轨迹

Fig.5 Nyquist plot of $G(j\omega)$ and $-1/N(a)$

由图 5 可见，为了减少产生振荡的可能性，应当增加 δ/h 和 $e_{\min}/(V_{\max} - V_{\text{ref}})$ ，但是在系统设计中， V_{\max} 和 V_{ref} 一般不易改变，所以一般采取调整 e_{\min} 增加系统的稳定性。 e_{\min} 越大，系统越稳定，但是随着 e_{\min} 增大，系统动态响应将变差， $e_{\min} \rightarrow \infty$ 时，该非线性单周控制器的系统特性将接近单周控制器 [11-13]。

4 仿真和试验研究

系统仿真参数 $L = 1 \text{ mH}$, $C = 100 \text{ }\mu\text{F}$, $R = 0.5 \text{ }\Omega$ ，开关频率 $f = 20 \text{ kHz}$ 。

在变换器输入端加入分段常量阶跃信号，单周控制器和非线性单周控制器对输入阶跃信号的跟踪能力如图 6 所示。由图可见，在输入信号变化时，非线性单周控制器对输入信号的跟踪能力要比单周控制器要快得多。

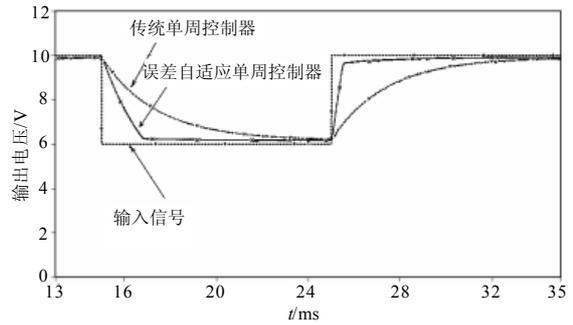


图 6 输入信号跟踪能力比较

Fig.6 Comparison of tracking ability

但是两种控制器的输出都有静态误差，这是二极管的导通电压不为 0，以及电感和电容的等效电阻不为 0 等不理想因素造成的。这是单周控制器的共性问题，这种误差可以通过调整积分器的时间常数来减小。

如前所述， e_{\min} 的大小对非线性单周控制器性能有着显著的影响。在图 7 中，调整 e_{\min} 的数值从 0.5 一直到 4，可以观察到 e_{\min} 对控制器性能的影响，当 e_{\min} 比较大时，非线性单周控制器与传统单周控制器的输出都有比较大的超调，动态响应性能差，非线性单周控制器的优点并没有得到体现。随着 e_{\min} 的减小，非线性单周控制器输出超调逐渐减小，系统特性也从欠阻尼逐渐进入到过阻尼状态 [14-15]。

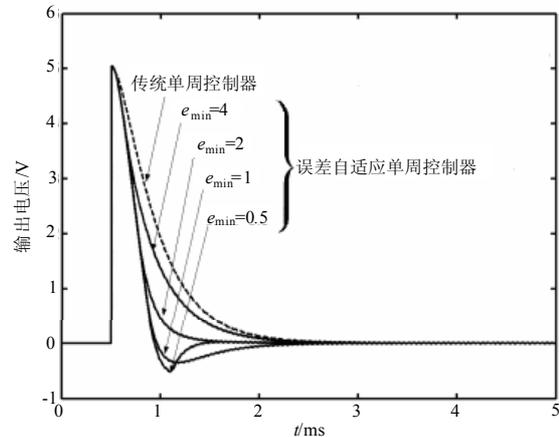


图 7 e_{\min} 对控制器性能的影响

Fig.7 Effect of e_{\min} on the response of the controller

传统单周控制器对负载扰动的抑制能力较弱，而非线性单周控制器对负载扰动的抑制能力有显著提高。在图 8 中， $L = 1 \text{ mH}$, $C = 100 \text{ }\mu\text{F}$ ，负载电阻从 $R = 0.5 \text{ }\Omega$ 减小到 $R = 0.4 \text{ }\Omega$ 。从图中可见单周控制器输出受到扰动后有明显的滞后上升的过程，而非线性单周控制器输出扰动之后很快就上升到正常

输出，抑制负载扰动的能力得到显著提高。

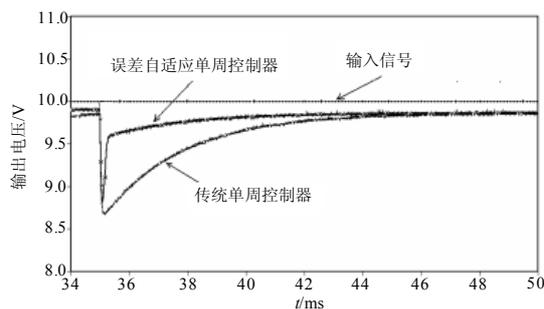


图 8 抑制负载扰动能力比较

Fig.8 Comparison of rejection of load changes

在该控制器中，由于输入信号的变化或者由于负载的变化，滞环非线性控制器将产生一个与误差对应的参考信号，作为单周控制器的输入信号，加快系统的动态响应速度，图 9 是系统中产生的参考信号。

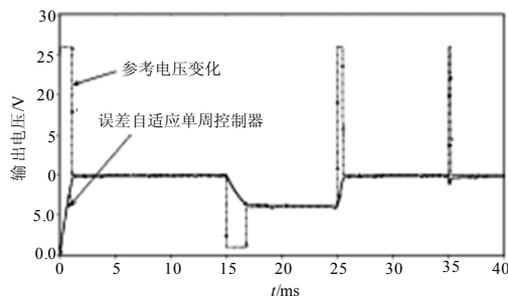
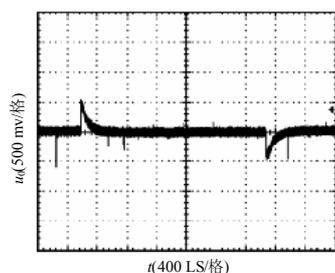
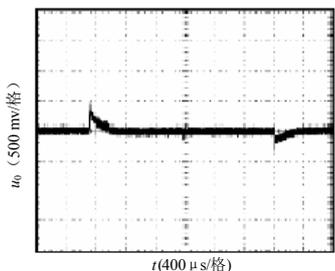


图 9 输入控制信号产生机理比较

Fig.9 Comparison of refer input signal



(a) 传统单周控制输出电压波形



(b) 误差自适应单周控制输出电压波形

图 10 试验波形

Fig.10 Experimental waveforms

试验参数与前述一致，图 10 是负载发生跳变时输出电压波形对比。可以看出，误差自适应单周控制器控制时有更小的输出电压跌落和超调，恢复时间也很短，说明变换器具有更好的动态负载性能，试验结果很好地验证了理论分析的正确性。

5 结论

本文提出的非线性单周控制器本质是一种组合控制器，内环是控制输入电压扰动的单周控制器，外环的辅助控制器是提高动态响应性能的非线性控制器。相比于普通单周控制器，该控制器最大的优点就是快速的跟踪能力和良好的负载扰动抑制能力。该控制器的核心思想就是通过一个滞环非线性控制器将一个自适应参考信号输入到 Buck 变换器中，这个参考信号是在实际参考信号的基础上形成的，从而加快系统的响应速度。另外，在该控制器中有三个参数与控制器的性能相关，如同传统 PID 控制一样，增加了系统设计的自由度。自适应参考信号的幅值与输出误差相关，同时，改进了传统单周控制器中滤波器和负载的动态性能与控制无关的缺点。该控制器特别适合于滤波器和负载有阻尼性能的系统。

参考文献

- [1] WANG Yong, SHEN Song-hua. Research on One-cycle Control for Switching Converters[A]. in: WCICA' 2004[C]. 2004. 74-77.
- [2] Alejo D, Maussion P, Faucherl J. Multiple Model Control of a Buck DC/DC Converter[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 63: 249-260.
- [3] Ruzbehani M, Zhou L, Wang M. A New Approach in Combining One-cycle Controller and PID Controller[A]. in: Proc of 2004 IEEE International Symposium Industrial Electronics[C]. Ajaccio(France): 2004.1173-1177.
- [4] Lin W M, Huang S P, Zhang G S, et al. A New Open Loop Control Strategy for a DC-DC Switching Converter with Fast Load Transient Response[J]. The Proc of CSEE, 2001, 21: 77-81.
- [5] Smedley K M, Cuk S. One-cycle Control of Switching Converters[J]. IEEE, 1995: 625-633.
- [6] 周维维, 龚伟, 等. 一种改进的单周控制的开关功率放大器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 108-112.
- ZHOU Luo-wei, GONG Wei, et al. An Improved Switching Power Amplifier with One Cycle Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 108-112.
- [7] 许峰, 徐殿国, 等. 具有最优动态响应的 PWM 型 DC/DC 变换器非线性控制新策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 136-142.

XU Feng, XU Dian-guo, et al. A Novel Nonlinear Control Method for PWM DC-DC Converter with Optimizing Transient Response[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 136-142.

[8] 费万民, 吕征宇. 基于互补策略的新型单周控制有源滤波器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 53-56, 66.

FEI Wan-min, Lü Zheng-yu. A Novel One-cycle Control Active Power Filter Based on Complementary Control Strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 53-56, 66.

[9] Larcon E A, Villar G, Vidal E, et al. General Purpose One-cycle Controller for Switching Power Converters. A High-speed Current-mode CMOS VLSI Implementation[J]. IEEE, 2001: 290-293.

[10] LAI Zhe-ren, Smedley K M. A New Extension of One-cycle Control and Its Application to Switching Power Amplifiers[J]. IEEE, 1996: 99-105.

[11] LAI Zhe-ren, Smedley K M, MA Yun-hong. Time Quantity One-cycle Control for Power Factor Correctors[J]. IEEE, 1996: 821-827.

[12] Mark Semith K, LAI Zheren, Smedley K M. A New

PWM Controller with One-cycle Response[J]. IEEE, 1999: 142-150.

[13] HU Zong-bo, ZHANG Bo, DENG Wei-hua. Feasibility Study Cycle Control for PWM Switched Converters[A]. in: IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference[C]. Aachen(Germany): 2004. 3359-3365.

[14] JIN Tao-tao, Smedley Keyue. A New Control Approach for Unity Power Factor Multilevel Rectifiers[A]. in: 19th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Anaheim(USA): 2004. 1475-1480.

[15] MA Dong-sheng, KI Wing-hong, Tsui Chiyong. An Integrated One-cycle Control Buck Converter with Adaptive Output and Dual Loops for Output Error Correction[J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2004, 39(1): 140-149.

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2009-03-22

作者简介:

许振伟(1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其应用技术。E-mail: xuzhenwei88@126.com

(上接第 97 页 continued from page 97)

case 2:

```

    m_fValSetRX2 = m_fValProRange *
m_fValRX2 / 100;
    break;
default:
    break;
}

```

UpdateData(false);

1.2.5 重置功能

为了进行多次不同模式的计算转换, 本工具设置了重置功能, 以设置相关参数的初始值, 由 **button** 重置按钮完成。重置后的对话框效果如图 2 所示。



图 2 重置后的界面

Fig.2 Reseted tool's interface

2 结论

通过应用 VS2005 软件开发平台, 本文设计的基于 SEL-221F 距离保护定值参数核算工具, 能根据使用者输入参数的逻辑顺序, 自动感知需要计算的输电线路参数, 有效地提高了现场保护调试人员的计算转换效率、准确率和精确度; 同时, 本工具可以满足其它人员对输电线路一、二次参数核算、保护范围确定等的不同需要, 达到了预期的目的。

参考文献

[1] 齐舒创作室. Visual C++ 6.0 用户界面制作技术与应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992.

[2] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

收稿日期: 2009-03-06; 修回日期: 2009-03-26

作者简介:

杨永前(1967-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事继电保护设计应用、VC++开发应用、Interbus 现场总线应用。E-mail: snyue@163.com