

开关线性复合机理的柔性波形功率放大技术研究

刘晓东, 刘宿城, 姜克抗

(安徽工业大学电气信息学院 安徽 马鞍山 243002)

【摘要】研究了一种基于开关线性复合机理的柔性波形功率放大技术。该技术将开关功率放大技术与传统线性功率放大技术有机结合, 开关级功率输出包络只作为末级线性功率单元的供电电源以确保系统效率, 同时借助于线性功率单元的高阻抗输入、低阻抗输出特性以保证系统输出品质。与传统线性功率放大技术相比, 开关线性复合功率放大技术系统输出可兼顾高效率与优波输出的综合静态特性, 对电路的建模分析、参数设计和系统性能评估提供了理论依据, 理论分析与仿真结果为实验研究奠定了基础。

关键词 高效率; 功率放大; 电源纹波抑制比; 开关线性复合

中图分类号 TN710

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.012

A SLH Flexible Waveform Power Amplifier

LIU Xiao-dong, LIU Su-cheng, and JIANG Ke-kang

(Anhui University of Technology Ma'anshan Anhui 243002)

Abstract Conventional linear power amplifiers are characterized by their low efficiency due to relatively large voltage drop across the output power transistors. A flexible waveform power amplifier based on switch-linear hybrid (SLH) scheme is presented, which combines switching power amplifier with conventional linear power amplifier. The switching stage of the proposed SLH amplifier is used as the power supply for the final linear power unit to insure the system efficiency, and the high output quality is achieved by means of the remarkable feature of high input impedance and low output impedance of the linear power stage. Compared with conventional linear power amplifier, the SLH amplifier possesses the synthetic virtues of both high efficiency and excellent output quality. Modeling and analysis of SLH amplifier serve as theoretical basis for its parameters design and performance evaluation. Theoretical analysis and simulation results will support future experimental research.

Key words high efficiency; power amplifier; power supply ripple rejection ratio; switch-linear hybrid

功率放大器广泛应用于设备测试、军事电子对抗以及工业现场状况的电量与非电量模拟等领域中。开关模式D类功率放大器凭借其高效率的显著优点已有逐步取代传统线性功率放大器之势。然而由于D类功率放大器固有的非线性工作性质, 使得其输出波形质量较之线性功率放大器要差。线性功率放大器具有失真度低、动态响应特性快和频带宽的优点, 但严重的功耗问题成为其应用于高功率场合的技术瓶颈。本文提出一种基于开关线性复合机理(SLH)的柔性波形功率放大技术, 开关级功率输出只作为末级线性功率单元的动态跟踪供电电源, 因此在几乎不降低输出波形质量的同时保证了系统效率; 另外借助线性功率输出级的高输入阻抗、低输出阻抗特性, 使得放大器具有高效率与高质量波形兼顾, 输出具有良好的综合静态性能^[1-4]。为了叙述方便, 本文把基于开关线性复合机理的柔性波形

功率放大器简称为SLH-FPA(flexible power amplifier based on SLH scheme)。

1 SLH-FPA的电路拓扑与工作原理

SLH-FPA的电路拓扑源于并联型SLH功率变换器^[3-4], 并联型SLH拓扑的特点是将开关功率放大与线性功率放大各自的优点有机结合, 放大器末级线性功率单元推挽工作, 对LC滤波器参数的离散性有较大容限, 容易实现三相平衡, 为未来三相SLH-FPA的研制奠定良好的基础。

图1a为SLH-FPA的原理框图, 末级线性功率单元源于射(源)级跟随器结构; 电压增益单元完成对Buck变换器受控参考信号的高保真电压放大; 而电路拓扑上下对称的Buck变换器输出 u_{s+} 和 u_{s-} 只作为末级功率单元的动态跟踪供电电源, 而不是传统线性放大器的直流供电工作模式。图1b为SLH-FPA理

收稿日期: 2007-10-24; 修回日期: 2008-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(50407017, 50877001); 安徽省优秀青年科技基金(08040106809); 安徽省教育厅自然科学基金(KJ2008B102)

作者简介: 刘晓东(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力电子技术、电力系统微机保护及微特电机的设计与驱动控制方面的研究。

想工作波形图。合理控制开关级输出动态跟踪供电电压与电压增益输出同步, 借助末级线性功率单元的良好跟随特性, 可使输出高效与优波兼顾、系统具有优良的综合静态性能。

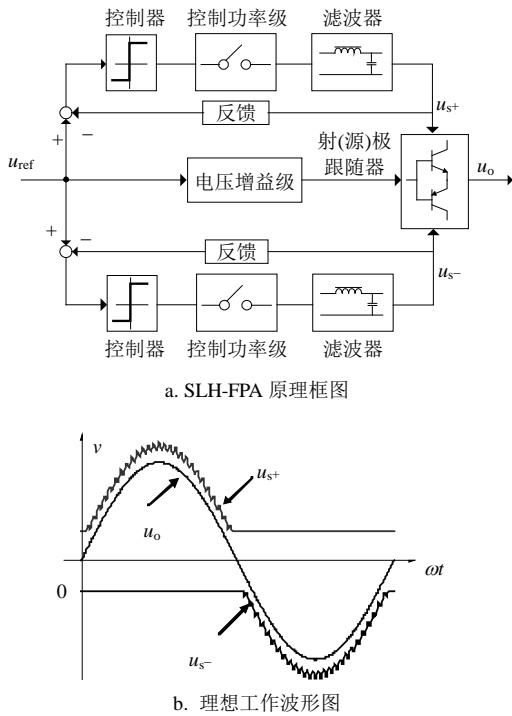


图1 基于开关线性复合机理的柔性功率放大器

2 SLH-FPA建模与分析

2.1 开关级Buck型变换器的小信号分析

SLH-FPA的开关功率级输出作为末级线性功率单元的动态跟踪供电电源, 由两个对称的PWM控制Buck型开关变换器组成^[4-5], 稳态情况下双Buck型供电电路为变占空比控制。根据三端口开关器件小信号建模理论^[6-7], 可将变换器中有源开关(场效应管)与无源开关(二极管)作为一个整体, 替换成等效线性受控源三端口网络, 再运用经典电路理论进行分析。图2为正半周开关级Buck变换器的小信号电路模型, 阴影部分即为功率开关管S₁和快恢复二极管D₁的等效受控源网络, 其中a为有源元件的端钮, c为无源元件端钮, p为有源与无源元件的公共端; D为稳态占空比, \hat{d} 为占空比扰动量, I_c 和 \hat{i}_c 分别为流出公共端的静态电流与扰动分量, U_i 和 \hat{u}_i 分别为静态输入电压与扰动量。则可从图2直接得到控制对输出传递函数为:

$$\frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{i}_i=0} = \frac{u_i R}{s^2 L_1 C_1 R + s L_1 + R} \quad (1)$$

以及开环输出阻抗:

$$Z_{os} \Big|_{\hat{i}_i=\hat{d}=0} = \frac{s L_1}{s^2 L_1 C_1 + s \frac{L_1}{R} + 1} \quad (2)$$

式中 L_1 和 C_1 分别为正半周开关级Buck变换器的滤波电感与电容。若 $L_1=300 \mu\text{H}$, $C_1=0.1 \mu\text{F}$, $R=30 \Omega$, $U_i=110\sqrt{2} \text{ V}$, 可得传递函数的Bode图, 如图3所示。图中, 相角裕度PM约为 9° , 增益裕度理想情况下为无穷大, 因此对于占空比的小信号交流扰动, 其开环系统是稳定的。

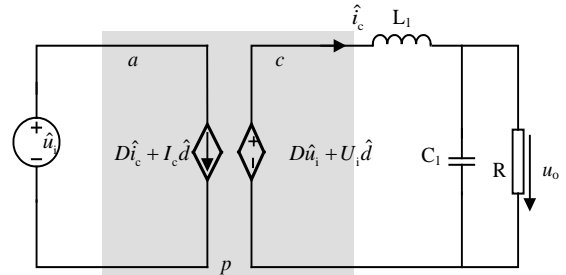


图2 开关级Buck变换器的小信号电路模型

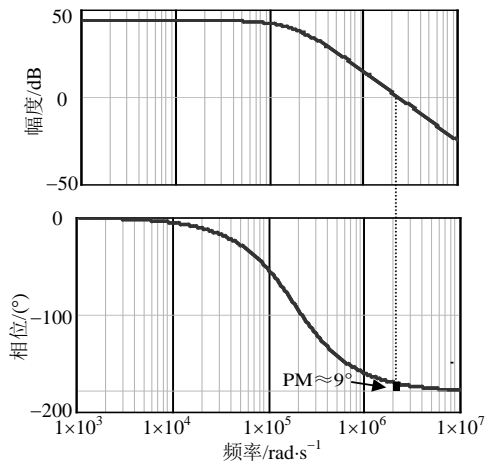


图3 Bode图

2.2 线性功率单元的电源纹波抑制比分析

对线性功率放大器而言, 供电电源纹波抑制比(PSRR)对放大器的输出起到举足轻重的作用, 尤其会影响输出波形的总谐波畸变率。通常在线性放大器中提高PSRR的主要途径是增加电源成本, 改善供电系统的动态性能。而在放大器电路设计方面, 则通过增设反馈控制环路、降低环境变化对电路参数影响的灵敏度来改善系统的PSRR^[8-11]。

本文通过建立SLH-FPA末级线性功率单元的等效电路模型来研究PSRR对功率放大输出质量的影响。图4为SLH-FPA末级线性功率单元的等效电路, u_s 为开关功率级输出动态跟踪电压, u_{VG} 与 R_V 的串联为电压增益级的输出等效网络。根据图4的电路模型, 按照KCL与KVL定律, 得到方程组:

$$\begin{cases} u_g(s) = \left[1 + \frac{1}{R_L(g_m + sC_{gs})} \right] u_o(s) \\ \left. \frac{u_g(s)}{u_s(s)} \right|_{u_{VG}=0} = \frac{sC_{gd}R_G}{sC_{gd}(R_G + Z_{os}) + 1} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $R_G = R_V + R_g$ 。由式(3)方程组整理可得SLH-FPA线性输出级的电源抑制比PSRR的传递函数为:

$$G_{PSRR}(s) = \left. \frac{u_o(s)}{u_s(s)} \right|_{u_{VG}=0} = \frac{sC_{gd}R_G}{sC_{gd}(R_G + Z_{os}) + 1} \times \left[\frac{R_L(g_m + sC_{gs})}{1 + R_L(g_m + sC_{gs})} \right] \quad (4)$$

一般情况下, $R_L(g_m + sC_{gs})$ 的值远大于1, 因此式(4)可最终简化为:

$$G_{PSRR}(s) = \frac{sC_{gd}R_G}{sC_{gd}(R_G + Z_{os}) + 1} \quad (5)$$

若SLH-FPA输出级线性功率单元的功率晶体管选用1MBH60-100, 则可从其数据表中得到以下参数: $g_m=30 \text{ S}$, $C_{gs}=3\ 000 \text{ pF}$, $C_{gd}=100 \text{ pF}$, 由此根据式(5)计算出不同的栅极外接串联电阻 R_G 时的电源抑制比PSRR曲线如图5所示。

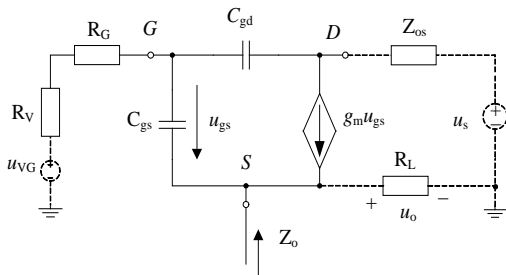


图4 SLH-FPA线性功率单元的等效电路

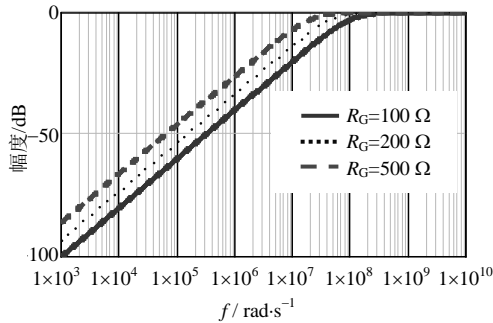


图5 SLH-FPA的PSRR曲线

表1 PSRR在不同情况下的纹波衰减值

	200 kHz $f_s/3$	67 kHz $f_s/5$	40 kHz $f_s/5$
$R_G=100 \Omega$	-34 dB	-48 dB	-52 dB
$R_G=200 \Omega$	-32 dB	-42 dB	-46 dB
$R_G=500 \Omega$	-24 dB	-34 dB	-38 dB

图5表明: (1) PSRR在低频段的变化斜率为 -20 dB/dec , 在转折频率 $1/(2\pi C_{gd}R_G)$ 以上, SLH-FPA线性输出级对开关级输出电压谐波将无衰减作用;

(2) 随着 R_G 的增大, SLH-FPA输出级对供电电源的谐波抑制能力降低, 表1列出了PSRR在 R_G 分别为 100Ω 、 200Ω 和 500Ω 时对于开关频率及其边带谐波成分的衰减值, 其中 f_s 代表开关频率。由表可知, 应在满足开关功率级输出滤波器设计要求的条件下尽可能减小 R_G 的值。

3 仿真与结果分析

基于以上的理论计算与分析, 为了验证SLH-FPA应用于柔性波形功率放大的可行性, 本文借助Orcad/PSPICE平台进行了仿真验证。仿真主要参数为: 直流母线电压 $E=110\sqrt{2} \text{ V}$, 开关频率 $f_s=200 \text{ kHz}$, 负载电阻 $R_L=20 \Omega$, 开关级输出直流偏置 $V_D=40 \text{ V}$ 。仿真中设定了3种典型参考信号, 即正弦波、三角波和方波进行实验验证, 仿真波形如图6所示。其中图6a、图6c和图6e为高频段柔性功率放大输出波形, 而图6b、图6d和图6f为超低频柔性功率放大输出波形。可以看出, 对于3种不同的参考信号, PWM开关级输出的正负半周动态跟踪电源 u_{s^+} 和 u_{s^-} 对输出电压 u_o 有良好的包络, 由于末级线性功率单元的PSRR对电源纹波的抑制作用, 负载输出电压几乎不受开关级输出供电电压高频纹波的影响, 保证了SLH-FPA输出电压波形的质量。

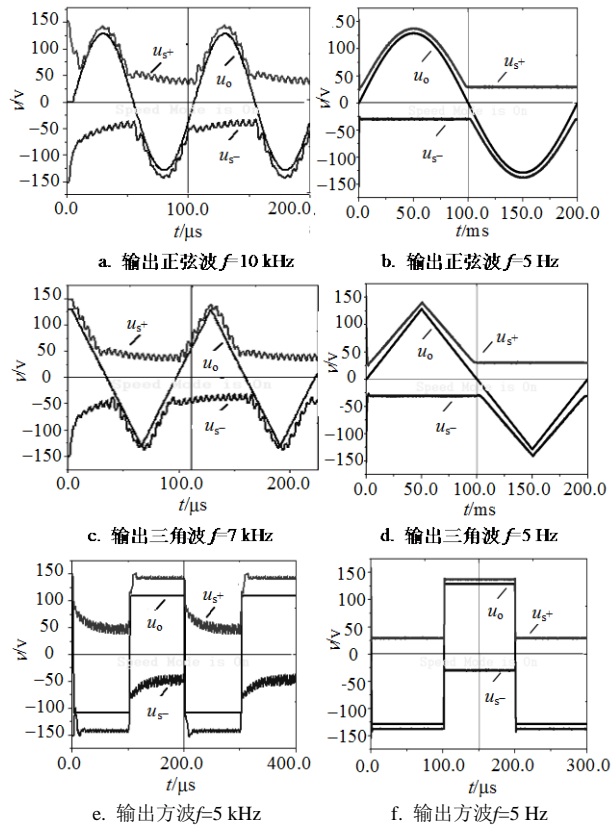


图6 仿真波形

因此SLH-FPA可以在不影响输出波形质量的情况下降低开关功率级滤波器的参数或是降低开关频率, 在提高系统动态性能和电路参数设计的离散性有较大的容限。在优化输出波形质量的同时, 降低了末级线性功率输出级的功率损耗, 系统高效率的指标得以保证。图7为输出正弦波频率为2 kHz时B类功率放大器与SLH-FPA的效率比较曲线, 可以看出SLH-FPA相对于传统线性B类功率放大器在提高系统效率方面有更大的上升空间。

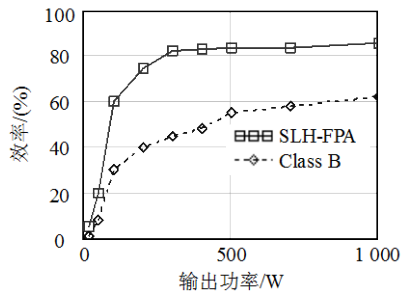


图7 效率曲线

4 结 论

本文探讨了一种基于开关线性复合机理的高效率线性功率放大技术, 其核心思想是采用PWM开关滤波电路作为末级线性功率单元的动态跟踪电源, 控制线性功率放大单元工作于低压差线性区, 提高了系统整体效率, 使整体系统近似等效为一个比例功率放大器。

前期的研究成果已验证了SLH变换器在超低频交流传动领域所体现出的优良综合性能, SLH-FPA将发展更宽频段的高效率柔性波形功率放大, 尤其是对波形质量要求严格的高功率场合。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Qian-zhi, GE Lu-seng. Switch-linear hybrid power conversion (SLH) with low output resistance[C]//Proc IEEE IPEMC 2004. Shanghai: [s. n.], 2004: 96-98.
- [2] ZHOU Qian-zhi, HU Wen-hua, WU Bin, et al. Switch-linear power conversion (I)—The topology based on source follower[C]//Proc IEEE ICIEA 2006. Singapore: [s. n.], 2006: 1118-1124.
- [3] 周谦之. 开关线性复合功率变换技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 28-33.
ZHOU Qian-zhi. Switch-linearity hybrid power conversion and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 28-33.
- [4] 周谦之, 李 定, 张捍东. 开关-线性复合功率技术机理和实效分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 73-79.
ZHOU Qian-zhi, LI Ding, ZHANG Han-dong. The analysis on SLH power conversion scheme and its validity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 73-79.
- [5] GONG G h, ERTL H, KOLAR J W. High-frequency isolated DC/DC converter for input voltage conditioning of a linear power amplifier[C]//Proc IEEE PESC 2003. Acapulco: [s. n.], 2003: 1929-1934.
- [6] KASHIWAGI S. A high efficiency audio power amplifier using a self-oscillating switching regulator[J]. IEEE Trans Industry Applications, 1985, 21: 906-911.
- [7] VORPÉRIAN V. Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch, Part I: Continuous conduction mode[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronics Systems, 1990, 26(3): 490-496.
- [8] DOUGLAS S. Audio power amplifier design handbook[M]. Oxford: Newnes, 2002.
- [9] 马 皓, 韩思亮. 新型功率放大器时变滑模控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 55-59.
MA Hao, HAN Si-liang. Time-dependent sliding surface for novel AC power amplifier[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(11): 55-59.
- [10] LAI T, SMEDLEY K M. A new extension of one-cycle control and its application to switching power amplifiers[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1996, 11(1): 99-105.
- [11] LAI J S, PENG Fang-zheng. Multilevel converters—a new breed of power converters[J]. IEEE Trans Industry Applications, 1996, 32(3): 509-517.

编 辑 漆 蓉