

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.021

关于寄生参数对级联稳定性影响的研究

杜建华¹, 纪 婧², 王 均², 马 皓^{2*}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对分布式电源系统级联稳定性问题,对于带有寄生参数的典型拓扑(Buck 电路、Boost 电路和 Buck-Boost 电路)进行了小信号建模方面的归纳,对于寄生参数对单级系统的稳定性影响进行了研究,同时,基于 Middlebrook 稳定性判据,研究了寄生参数对输入阻抗和输出阻抗的影响,进而提出了寄生参数在级联系统中的作用和允许范围。研究表明,适当的寄生参数对改善单级系统的稳定性和改善级联系统的稳定性有积极作用,实际电路的特性由于这些寄生参数的影响会略好于理想情况。研究结果对于带有寄生参数的实际电路级联稳定性的设计有指导意义。

关键词:寄生参数;小信号模型;单级稳定性;级联稳定性

中图分类号:TM13

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)10-1371-05

Influence of parasitic parameters on stability of the cascade

DU Jian-hua¹, JI Jing², WANG Jun², MA Hao²

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing, 100190, China;

(2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to guarantee cascaded stability of distributed power supply system, the small signal model with parasitic parameters of Buck circuit, Boost circuit and Buck-Boost circuit were summarized. The influence of the parasitic parameters on the stability of the single system was analyzed. On the basis of Middlebrook stability criterion, the effects of parasitic parameters on the input impedance and output impedance were studied to proposed the effect of parasitic parameters in the cascade system. The results show that appropriate parasitic parameters have positive effect on the stability of the single stage system and the stability of the cascaded system. The characteristics of actual circuits are better than those of the ideal conditions. This research has some guidance for the design of the stability of the practical cascaded system.

Key words: parasitic parameter; small signal model; single stage stability; cascade stability

0 引 言

DC/DC 开关电源的建模是级联系统分析和设计的基础,对于级联系统的分析与设计具有重要意义。由于实际电路中存在寄生参数,使得理想模型和实际电路之间存在偏差,这些偏差会造成系统效率低或者系统不稳定的情况^[1-3]。针对级联稳定性和带寄生参数的典型拓扑的建模已有大量的文献进行了研究,但

都有一定的局限性。文献[4]只考虑了寄生参数对单级电路稳定性的影响。文献[5]主要讨论了输入阻抗和输出阻抗对级联稳定性的影响。文献[6]给出了寄生参数与级联稳定性定性的关系,并没有给出定量的关系。而对于电路的寄生参数对级联稳定性的定性研究少有涉及。但是只有明确的知道寄生参数对级联稳定性的影响,才能在实际电路设计时通过控制寄生参数在合适的范围内保证级联系统的稳定性。

收稿日期:2015-05-25

作者简介:杜建华(1979-),男,重庆人,高级工程师,主要从事开关电源变换器方面的研究. E-mail:woderful0579@126.com

通信联系人:马 皓,男,博士,教授,博士生导师. E-mail:mahao@zju.edu.cn

本研究首先建立了带有寄生参数的典型拓扑 (Buck 电路、Boost 电路和 Buck-Boost 电路) 的小信号模型,接着分析了电路的各个寄生参数对单级系统稳定性的影响;然后在 Middlebrook 稳定性判据的基础上^[7],分析了寄生参数对输入阻抗和输出阻抗的影响,从而确定了寄生参数对级联系统稳定性的影响。所以本研究对带有寄生参数的实际电路级联稳定性的设计有指导意义。

1 考虑寄生参数的典型拓扑的小信号模型

考虑寄生参数的 DC/DC 变换器在连续工作模式 (CCM) 下建模的关键就是将非理想开关等效为理想开关及其寄生参数的串联。本研究运用电路理论建立由受控源控制的平均模型,根据能量守恒原理推导寄生参数的等效平均值并折算到电感支路,可以得出带寄生参数的 Buck 电路、Boost 电路^[8] 和 Buck-Boost 电路的小信号模型如图 1~3 所示^[9]。

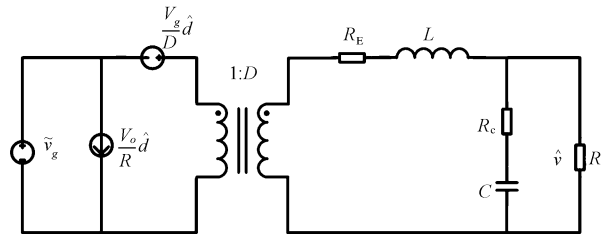


图 1 带寄生参数的 Buck 电路小信号模型

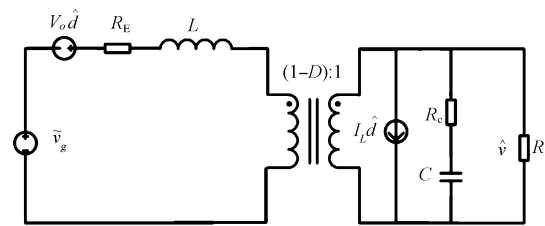


图 2 带寄生参数的 Boost 电路小信号模型

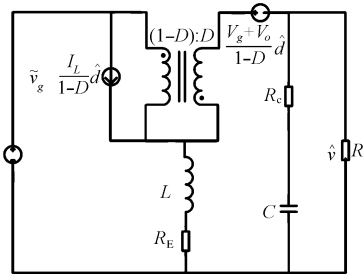


图 3 带寄生参数的 Buck-Boost 电路小信号模型

图中: R_E 为寄生参数等效平均电阻, $R_E = DR_{om} + (1 - D)R_F + R_L$,考虑的寄生参数有:功率 MOSFET 等效

为理想开关和导通电阻 R_{on} 的串联,二极管等效为理想开关、正向压降 V_F 和正向电阻 R_F 的串联, R_L 是滤波电感的等效串联电阻, R_c 是滤波电容的等效串联电阻 (ESR)。

2 寄生参数对单级稳定性的影响

以 Buck 电路为例,分析寄生参数对单级电路稳定性的影响,Buck 电路的相关参数如表 1、表 2 所示。

表 1 Buck 电路基本变量参数

参数	值
输入电压 V_g/V	5
输出电压 V_o/V	3.3
输出电流 I_o/A	3
滤波电感 $L/\mu H$	100
滤波电容 $C/\mu F$	250
开关频率 f_s/kHz	300

表 2 Buck 电路的寄生参数

寄生参数	值
功率 MOSFET 的导通电阻 $R_{on}/m\Omega$	4.5
二极管的正向压降 V_F/V	0.55
正向电阻 $R_F/m\Omega$	33
滤波电感的等效串联电阻 $R_L/m\Omega$	20
滤波电容的等效串联电阻 $R_c/m\Omega$	20

通过图 1 Buck 电路的小信号模型,可得系统控制到输出的传递函数为:

$$G_{vd} = \frac{V_{in}(R_c C \cdot s + 1)}{\left(1 + \frac{R_c}{R}\right)LC \cdot s^2 + \left(R_E C + R_c C + R_E R_c \frac{C}{R} + \frac{L}{R}\right)s + \frac{R_E}{R} + 1} = \frac{2.5 \times 10^{-5} s + 5}{2.5 \times 10^{-8} \times s^2 + 1.0 \times 10^{-4} s + 1.0} \quad (1)$$

设计补偿函数为^[10]:

$$G_c(s) = 10\,000 \frac{\left(1 + \frac{s}{1\,000\pi}\right)\left(1 + \frac{s}{1\,000\pi}\right)}{s\left(1 + \frac{s}{1\,200\,000\pi}\right)\left(1 + \frac{s}{1\,200\,000\pi}\right)} \quad (2)$$

2.1 等效平均串联电阻 R_E 对环路的影响

令电路的滤波电容的等效串联电阻 $R_c = 0 \Omega$,绘制电路的等效平均串联电阻 R_E 对环路相位裕度 (PM) 的影响和对环路穿越频率 (f_g) 的影响如图 4、图 5 所示。

通过传递函数可以看出等效平均串联电阻 R_E 主要影响传递函数的低频部分,并且随着 R_E 的增大传递函数的低频增益会下降。从图 4、图 5 中可以看出随着电路的等效平均串联电阻 R_E 的增大,环路的相位裕度线性上升,环路的穿越频率有所下降,但是 R_E

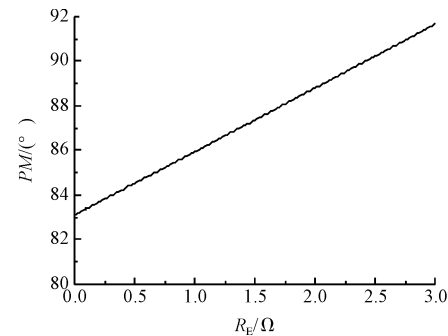


图 4 R_E 对环路相位裕度的影响

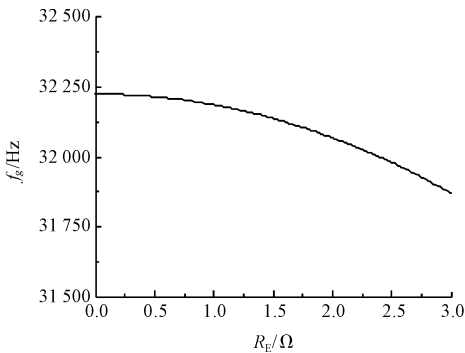


图 5 R_E 对环路穿越频率的影响

的影响较小,对系统的稳定性影响可以忽略。

2.2 滤波电容的 ESR 对环路的影响

令电路的等效串联电阻 $R_E = 0 \Omega$,绘制滤波电容的等效串联电阻(ESR) R_c 对环路相位裕度(PM)的影响和对环路穿越频率(f_g)的影响,如图 6、图 7 所示^[11]。

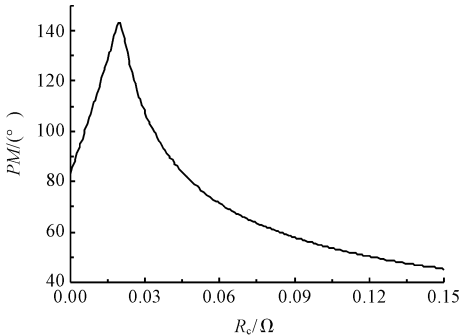


图 6 R_c 对环路相位裕度的影响

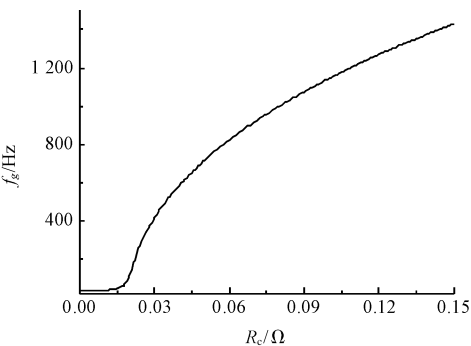


图 7 R_c 对环路穿越频率的影响

从传递函数 G_{vd} 中可以看出,滤波电容的等效串联电阻(ESR)在高频部分引入了一个高频的零点 $1/R_c C$,这个高频零点改善了电压环的相位裕度。从图 6 和图 7 曲线中可以看出, $R_c < 20 \text{ m}\Omega$ 时,随着 R_c 的增大,环路的相位裕度有一个较大的上升,环路的穿越频率有所上升,这对系统的稳定性有积极的影响的;当 $R_c < 20 \text{ m}\Omega$ 时,随着 R_c 的增大,环路的穿越频率急剧增大,使得环路的相位裕度下降,不利于系统的稳定性。所以在 $R_c < 20 \text{ m}\Omega$ 的范围内,滤波电容的等效串联电阻(ESR)的增大是对系统的稳定性有益的。

3 寄生参数对级联稳定性的影响

基于 Middlebrook 提出的稳定性判据,电路在全频段范围内,源变换器的子系统的输出阻抗均小于负载系统的输入阻抗,就可以使得级联系统稳定。电路的寄生参数会对系统的输入阻抗和输出阻抗的产生影响,进而影响系统的级联稳定性。

本研究以前级双管正激电路后级 Buck 电路为例,分析寄生参数对级联稳定性的影响。双管正激电路参数如表 3 所示。

Buck 电路参数如表 1 所示。

表 3 双管正激电路的基本变量参数

参数	值
输入电压 V_g/V	85
输出电压 V_o/V	5
变压器变比 1: n	7: 1
滤波电感 $L/\mu\text{H}$	100
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	250
开关频率 f_s/kHz	200

3.1 寄生参数对输入阻抗的影响

由图 1 Buck 电路小信号模型可知,Buck 电路的输入阻抗为:

$$Z_{in} = \frac{R \left(\frac{1}{C_s} + R_c \right)}{R + \left(\frac{1}{C_s} + R_c \right)} + L_s + R_E \quad (3)$$

令电路的等效串联电阻 $R_E = 0 \Omega$,根据式(3)可以画出滤波电容的等效串联电阻(ESR) R_c 对输入阻抗最小值的影响,电容 ESR 对输入阻抗的影响如图 8 所示。

从图 8 中可以看出随着 R_c 的增大,输入阻抗在变大,并且 $R_c < 3 \Omega$ 的范围内, R_c 对输入阻抗的影响较为明显。滤波电容的等效串联电阻(ESR) R_c 对输入阻抗的下跌有很好的抑制作用,更加有利于级联的稳定性。

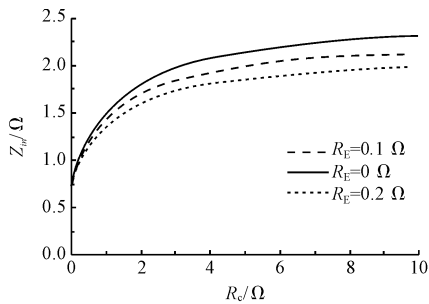
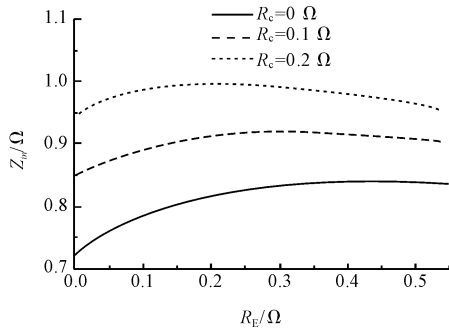


图 8 电容 ESR 对输入阻抗的影响

令电路的滤波电容的等效串联电阻(ESR) $R_c = 0 \Omega$, 根据式(3)画出电路的等效平均串联电阻 R_E 对输入阻抗最小值的影响如图 9 所示。

图 9 等效串联电阻 R_E 对输入阻抗的影响

随着电路的等效平均串联电阻 R_E 的增大输入阻抗在变大, 并且 $R_c < 0.3 \Omega$ 的范围内, R_c 对输入阻抗的影响较为明显。等效平均串联电阻 R_E 对输入阻抗的下跌有很好的抑制作用, 更加有利于级联的稳定性。

3.2 寄生参数对输出阻抗的影响

由双管正激电路小信号模型可知, 双管正激电路的输出阻抗为:

$$Z_{out} = \frac{(Ls + R_E) \left(\frac{1}{Cs} + R_c \right)}{(Ls + R_E) + \left(\frac{1}{Cs} + R_c \right)} \quad (4)$$

令电路的等效串联电阻 $R_E = 0 \Omega$, 可以得出滤波电容的等效串联电阻(ESR) R_c 对输出阻抗的影响如图 10 所示。

从式(4)中可以看出 R_c 在高频部分引入了零点 $1/R_c C$, 一般在穿越频率点以上。这个高频零点会使得在高频部分的输出阻抗增大, 并且 R_c 越大, 输出阻抗增大越多; 从图 10 中可以看出当滤波电容的等效串联电阻(ESR) $R_c < 0.1 \Omega$, 时随着 R_c 的增大, 输出阻抗

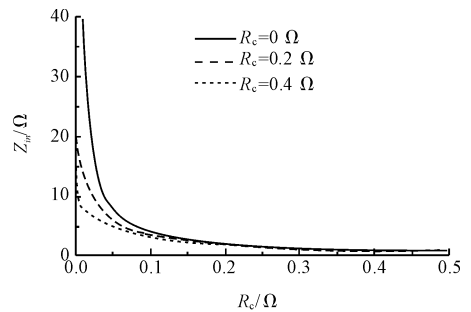
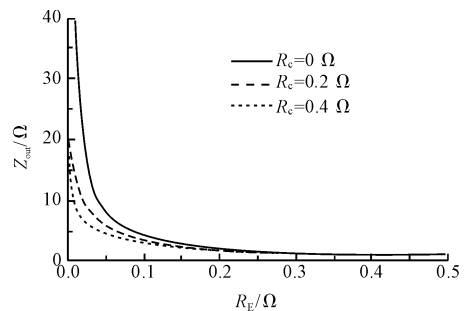


图 10 电容 ESR 对输出阻抗的影响

急剧下降, 所以 R_c 有利于级联的稳定性。

令电路的电容的等效串联电阻(ESR) $R_c = 0 \Omega$, 可得电路的等效平均串联电阻 R_E 对输出阻抗的影响如图 11 所示。

图 11 等效串联电阻 R_E 对输出阻抗的影响

从式(4)中可以看出等效平均串联电阻 R_E 给输出阻抗引入了一个低频的零点 R_E/L , 会使得输出阻抗的低频幅值在该零点前有所上升。从图 11 中可以看出, 当滤波电容的等效串联电阻(ESR) $R_c < 0.1 \Omega$, 时随着 R_E 的增大, 输出阻抗急剧下降, 所以 R_E 有利于级联的稳定性。

4 结束语

本研究建立了带有寄生参数的典型拓扑的小信号模型, 在此基础上分析了寄生参数对单级系统稳定性的影响, 又分析了寄生参数对电路输入阻抗和输出阻抗的影响, 进而得出了寄生参数对级联稳定性的影响。 R_E 包括电感的电阻、开关器件的导通电阻等, 其主要作用是对环路增益, 等效二阶滤波环节的谐振点起衰减作用; 对于输入阻抗的影响不大; 对于输出阻抗主要使其增加了一个低频的零点, 增加了其低频处的幅值。 R_c 是电容的等效串联电阻, 其主要作用是环路增益中

(下转第 1384 页)

本文引用格式:

杜建华, 纪婧, 王均, 等. 关于寄生参数对级联稳定性影响的研究[J]. 机电工程, 2015, 32(10): 1371-1374, 1384.

DU Jian-hua, JI Jing, WANG Jun, et al. Influence of parasitic parameters on stability of the cascade[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(10): 1371-1374, 1384.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>