

MOSFET 寄生参数对 LLC 谐振变换器性能影响研究*

沈 华,甄昊涵,童 涛,沈培刚,陈海敏,陈圣泽

(国网上海市电力公司电力科学研究院,上海 200090)

摘要:针对 MOSFET 寄生参数对 LLC 谐振电路性能的影响,首先对 MOSFET 的寄生电容进行等效分析,基于该等效模型,分析在 LLC 谐振变换电路中,寄生参数的存在对电路各个阶段过程的影响;接着对由于寄生参数引起的非线性特征,基于 Angelov 模型进行建模,并对该模型在直流电路中的影响进行分析。最后在 MATLAB 下建立了 LLC 谐振电路模型,在仿真模型中考虑了寄生参数的影响。仿真结果表明,建立的等效模型可以较好地反映 MOSFET 器件的工作特点;同时,由于寄生参数的存在,LLC 谐振电路的输出增益和谐振频率都会受到影响,其中尤其对谐振频率的影响较大。

关键词:寄生参数;LLC 谐振电路;Angelov 模型;输出增益;谐振频率

中图分类号:TN386

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200552

中文引用格式:沈华,甄昊涵,童涛,等. MOSFET 寄生参数对 LLC 谐振变换器性能影响研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(1): 41-45.

英文引用格式: Shen Hua, Zhen Haohan, Tong Tao, et al. Influence of MOSFET parasitic parameters on LLC resonant converter performance[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(1): 41-45.

Influence of MOSFET parasitic parameters on LLC resonant converter performance

Shen Hua, Zhen Haohan, Tong Tao, Shen Peigang, Chen Haimin, Chen Shengze

(Institute of Electric Power Science, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200090, China)

Abstract: For the influence of the parasitic parameters of MOSFET on the performance of LLC resonant circuit, the equivalent analysis of the parasitic capacitance of MOSFET is first carried out. Based on this equivalent model, in the LLC resonant conversion circuit, due to the existence of parasitic parameters, the impact of each stage of the circuit is analyzed. Then, the nonlinear characteristics caused by parasitic parameters are modeled based on the Angelov model, and the impact of the model on the DC circuit is analyzed. Finally, the LLC resonant circuit model is established under MATLAB, and the influence of parasitic parameters is considered in the simulation model. The simulation results show that the equivalent model established in this article can better reflect the operating characteristics of the MOSFET device; at the same time, due to the presence of parasitic parameters, the output gain and resonance frequency of the LLC resonant circuit will be affected, especially the resonance frequency Greater impact.

Key words: parasitic parameters; LLC resonant circuit; Angelov model; output gain; resonant frequency

0 引言

随着电力电子技术的发展,对电子元器件自身造成的损耗要求越来越严格,人们期望通过技术的改变,大幅降低开关器件的功耗,达到节约能源,提升控制精度的目的。近年来,开关电源作为电力电子的一个重要应用方向,其频率日益高频化。然而,开关速度的提高,使某些在低频下能够忽略的寄生参数,如印制电路板的布线、器件封装形式导致的寄生电感以及开关器件的寄生电容,它们在高频的工作环境下,容易形成振荡^[1],给应用电路带来过高的电压和电流,增加了器件损坏的风险^[2-3]。

为此,许多学者对于开关器件的寄生参数问题开展了大量研究工作。如文献[4-5]针对 MOSFET 开关器件的 Miller 电容的非线性问题进行了研究,得出了影响 Miller 电容非线性特性的一些因素和数学模型;文献[6]研究了 MOSFET 寄生参数(电感、电容、电阻)对 MOSFET 开关器件开关性能的影响,对理论分析和实验结果进行了对比分析;文献[7]分别研究了栅极、漏源级回路中的寄生电感对开关器件的影响以及开关损耗的分析。

基于前人所做工作,本文以 LLC 谐振变换器作为研究对象,研究 MOSFET 寄生参数对电路性能的影响。

常见 LLC 谐振变换器结构如图 1 所示,整个变换器由可控开关网络、谐振网络、变压器、整流网络以及低通

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61861007);国家电网公司科技项目(520940180019)

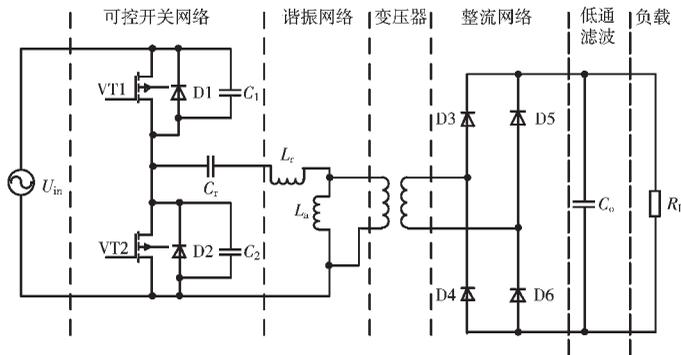


图1 LLC谐振变换器电路

滤波及负载构成;其中电路的谐振部分由谐振器件 L_r 、 C_r 以及变压器的等效漏感 L_m 共同构成,该电路由于存在两个参加谐振的电感元件而得名。

电路的谐振频率有两个:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r L_r}} \quad (1)$$

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r(L_r+L_m)}} \quad (2)$$

其中 f_s 为串联谐振频率, f_{min} 为最小谐振频率。这种变换电路利用谐振网络谐振时,电压或者电流自然过零点的特性,对开关进行导通或者关断,从而形成软开关^[8],达到减小开关损耗的目的。这种电路通常采用变频控制,通过对开关动作频率的改变,实现改变谐振网络中各部分阻抗上的分压,最终达到调节输出电压的目的;当外界功率需求较低时,LLC谐振变换器的工作频率较高,超出谐振点 f_s ,当功率需求较高时,控制回路降低开关频率。通常,LLC谐振变换器工作的理想的状态频率范围为:(1)高于 f_s 频率运行;(2)直接在 f_s 频率点运行;(3)介于 f_s 和 f_{min} 频率点间运行,在这三种频率范围内运行的LLC谐振变换器,其变压器的输入阻抗呈现感性特性,此时输入的电流相位滞后于输入电压,变换电路才能保证MOS管实现零电压开关的功能。

通常,LLC谐振电路在一个周期内有多种工作模式的交替变换,即:

$[t_0-t_1]$ 阶段:开通延迟阶段。此阶段主要特点是在MOSFET的栅极和漏极间加脉冲电压,栅极将会产生电流 I_{CS} ,该电流将向 C_{gl} 、 C_{gs} 充电。栅-源极间电压按式(3)所示的指数方式增长。

$$v_{gs}(t) = U_G(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

式中, U_G 为栅极电压; $\tau = (R_s + R_g)(C_{gs} + C_{gl})$ 为时间常数。在该阶段,由于MOSFET器件的工作状态没有改变,故此状态下的损耗为零。

$[t_1-t_2]$ 阶段:该阶段为电流上升阶段,由于寄生参数的存在,输出电压、电流都有一定变化,该阶段的漏极电流按式(4)规律变化,其中 K 为拟合系数, v_t 为阈值电压。

$$i_D = K(v_{gs} - v_t)^2 \quad (4)$$

$[t_2-t_3]$ 阶段:Miller平台形成。在该阶段,漏极电感 L_s 和电容 C_{gl} 形成了漏极至栅极间的反馈通路,导致漏极电流上升,栅极电压下降,形成Miller平台。当电感 L_D 与电阻 R_g 相比很小时,即 R_g 很大时,漏极电流在未达到最大值前,漏源极电压将会有很大的跌落过程,此时栅-漏极间电压数学关系式见式(5):

$$v_{ds}(t) = U_{dc} - \frac{dv}{dt}t = U_{dc} - \frac{U_G - v_t}{R_g C_{rss}}t \quad (5)$$

$[t_3-t_4]$ 开通末期,此时Miller平台结束, v_{gs} 从 v_{gsP} 开始按指数的方式增长,在此阶段,由于寄生电容的非线性特性,该阶段电容值较大,导致开通延迟时间长。

$$v_{gs}(t) = v_{gsP} + (U_G - v_{gsP})(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6)$$

此时MOSFET器件已经完全开通,漏极电流的上升速度与寄生电感参数决定。

$[t_4-t_5]$ 关断延迟阶段。该阶段器件的栅极电压发生变化,此时, C_{gl} 、 C_{gs} 开始释放能量,栅-漏极间的电压以指数方式下降:

$$v_{gs}(t) = U_G e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

$[t_5-t_6]$ Miller平台。当 $v_{gs} = v_{gsP}$ 时, C_{rss} 开始将储存的能量进行释放,漏源间的电压按式(8)变化:

$$v_{ds}(t) = V_{DS} + \frac{v_{gsP}}{R_g C_{rss}}t \quad (8)$$

$[t_6-t_7]$ 电流下降阶段, v_{gs} 从 v_{gsP} 开始按指数的方式下降,该阶段Miller平台结束。

$$v_{gs}(t) = v_{gsP} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

$[t_7-t_8]$ 此阶段振荡关断,漏源极间的电压出现明显的阻尼振荡,漏极电流开始下降,此时电路可等效为二阶电路。

至此,整个电路完成一次完整的开通到关断的过程。从变化的过程可以看出,电路的状态变化以及输出与MOSFET器件的寄生参数(电容、电感)都有关联,这些参数在变换过程中,呈现出非线性特性。因此,在电路参数的设计中,寄生参数的影响因素将不能忽略,尤其是对电压输出要求严格的场合。

1 MOSFET寄生参数建模

在图2所示的等效模型中, C_{gl} 、 C_{gs} 以及 C_{ds} 分别表示MOSFET的栅极、漏极和源极之间的极间电容; L_D 和 L_s 分别为漏极和源极之间的寄生电感; R_g 为栅极寄生电阻。输入电容 C_{iss} 、输出电容 C_{oss} 和反馈电容 C_{rss} 之间的关系为:

$$\begin{cases} C_{iss} = C_{gs} + C_{gl} \\ C_{oss} = C_{ds} + C_{gl} \\ C_{rss} = C_{gl} \end{cases} \quad (10)$$

输入电容 C_{iss} 、输出电容 C_{oss} 和反馈电容 C_{rss} 成为MOSFET的Miller电容,可用 C 表示。根据半导体器件的特性,Miller电容与漏-源极间的电压成对数关系,可由

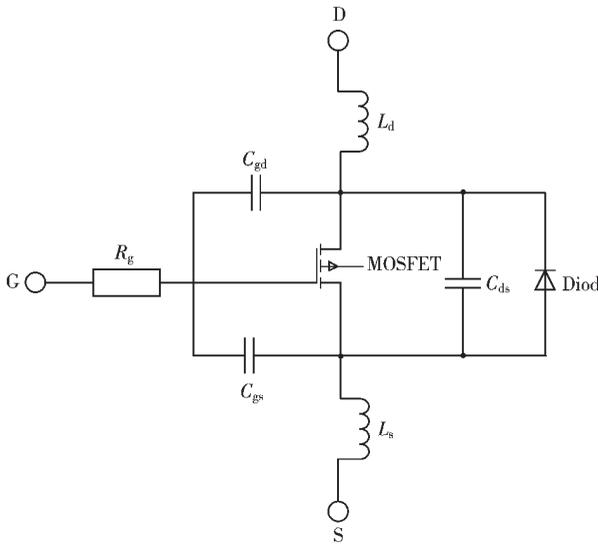


图2 MOSFET 等效模型

式(11)表示:

$$C = a \ln V_{DS} + b \quad (11)$$

其中 a 、 b 为 Miller 电容变化的对数拟合曲线系数; V_{DS} 为漏-源极电压。

对 MOSFET 的非线性物理建模可以从器件的基本原理出发,根据器件的具体结构,尺寸大小以及物理方程计算来预测器件的工作性能。但是对于射频 MOSFET 应用而言,物理基模型存在只限于计算 DC 方程(计算 S 参数和大信号性能时间过长,对软件的要求也非常高)的缺点。Angelov 模型是由 Angelov 等人提出的统一的 FET 模型,涵盖 MESFET、MOSFET、HEMT 器件。模型从数学角度出发,引入了多项式和双曲正切 tanh 函数,将器件的直流 DC I-V 和交流 ACC-V 工作特性使用拟合公式来表述^[9]。Angelov DC I-V 模型如式(12)~式(13)所示, I_{pk} 是跨导达到最大时的漏源极电流, V_{pk} 是跨导达到最大时的漏源极电压, α 是电压饱和因子。 $1 + \gamma V_{DS}$ 被用来表征 MOSFET 器件的沟道长度随 V_{DS} 调制变化的特性。

$$I_{ds} = I_{pk}(1 + \tanh(\varphi)) \tanh(\alpha V_{DS})(1 + \gamma V_{DS}) \quad (12)$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^n P_i (V_{GS} - V_{pk})^2 \quad (13)$$

在本文的仿真中,首先基于 Angelov 模型,仿真电路中的开关 MOSFET 器件,并将仿真结果与厂方提供的技术参数进行对比,用以确认 MOSFET 寄生参数模型的有效性。

2 电路输出特性

在实际的电路设计中,可以利用基波分量法,将副边的等效负载折算到变压器的主边,可以得到交流的等效负载为:

$$R_a = n^2 \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (14)$$

式中, $\frac{8}{\pi^2}$ 为正弦波流经电阻上产生的功率与方波产生

的功率的关系比, n 为主、副边匝数的比例。谐振网络的输出输入的复频域传递函数为:

$$H(s) = \frac{R_{ac} || sL_m}{\frac{1}{sC_r} + sL_r + R_{ac} || sL_m} \quad (15)$$

式中 S 表示为复频率,根据传递函数,系统对应的直流增益^[10]为:

$$M_{dc} = \frac{V_o}{V_{in}} = 2n |H(j\omega)| \quad (16)$$

定义归一化电压增益 $M(f)$ 为:

$$M(f) = 2n M_{dc} \quad (17)$$

则对于任意频率下的电压增益,可表示为:

$$M(f_n, K, Q) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{K} \left(1 - \frac{f_s^2}{f^2}\right) + j \left(\frac{f}{f_s} - 1\right) \frac{\pi}{8n^2} \frac{1}{2\pi f R_L C_s}}} \quad (18)$$

其中 f_s 为串联谐振频率, $f_n = f/f_s$ 为归一化频率, f 为开关频率, n 为变压器的变匝比。令 $Q = \frac{1}{R_{AC}} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$, 则系统的直流增益可以表示^[11]为:

$$G_{DC} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{K} - \frac{f_s^2}{Kf^2}\right) + \left(\frac{f}{f_s} - \frac{f_s}{f}\right)^2 Q^2}} \quad (19)$$

由上式可以看出,对直流增益有影响的因素有比例系数 K 、品质因素 Q 以及变压器的变匝比 n 。

3 模型仿真

为了研究寄生参数对电路输出特性的影响,本文首先将 LLC 电路中的开关器件建模为理想开关和考虑寄生参数的 MOSFET,开关器件的模型如图 3 所示。图 3 中,真实开关模型是考虑了寄生参数的 MOSFET 器件,理想开关器件是将开关器件建模为理想二极管、开关以及等效电容构成,这些参数在仿真过程中都保持恒定值,其余参数设定为 $C_r = 100$ nF; $L_r = 40$ μ H; $L_m = 170$ μ H; $R_g = 50$ Ω 。

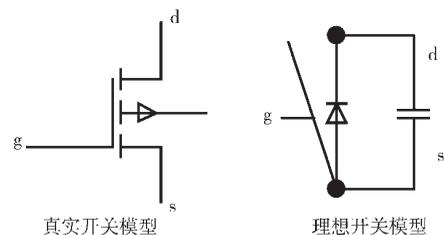


图3 理想开关 VS 真实开关

为了验证 MOSFET 器件模型的正确性,利用第 1 节的寄生参数建模知识,将寄生参数的变化考虑进模型的搭建中,并以 MOSFET 元件厂家提供的出厂数据作为对比基准,不断修正拟合参数,最终得到图 4、图 5 所示的器件输出特性曲线,其中,图 4 表示了器件的输出特性,图 5 表示器件的转移特性。

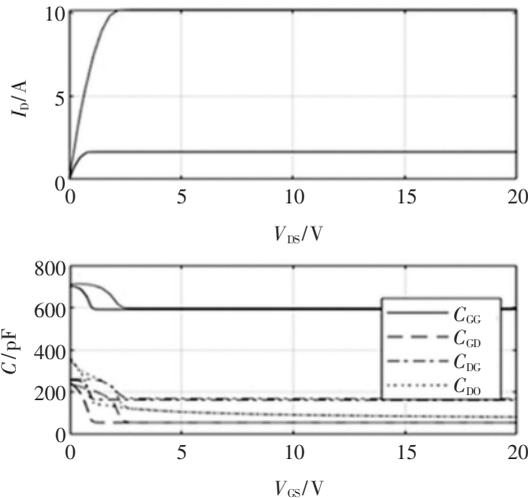


图4 MOSFET 输出特性

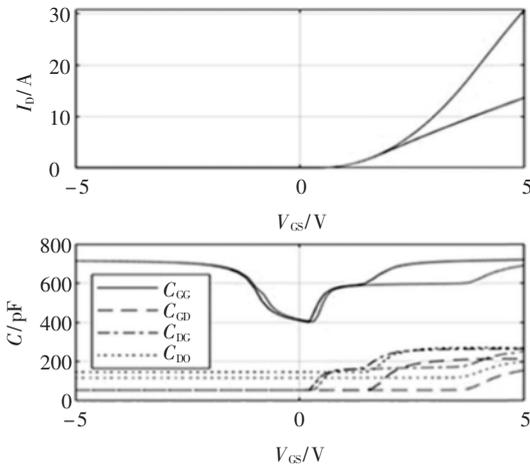


图5 MOSFET 转移特性

图4是根据等效模型进行仿真得到的输出特性曲线,从图4可以看出,随着漏-源极间电压 V_{DS} 的增加,寄生容量值减小。从图4还可以看出,输出特性分为截

止、饱和与非饱和3个区域。当处于饱和区时,是漏极电流 I_D 不随漏源电压 V_{DS} 的增加而增加,基本保持不变。

图5反映了漏极电流 I_D 和栅源间电压 V_{GS} 的关系,称为MOSFET的转移特性。由图可知, I_D 较大时, I_D 与 V_{GS} 的关系近似线性,曲线的斜率为跨导 G_m ,此阶段,寄生电容随着 V_{GS} 的增大而增大,但两者关系呈现出非线性特性,这与前面分析一致。

根据图1所示的LLC谐振电路,在MATLAB环境下搭建仿真模型如图6所示,图6中的上臂与下臂分别对应上开关MOSFET管和下开关MOSFET管,在仿真时,分别仿真开关特性为理想特性与实际特性时系统的输出,通过对输出的分析,比较寄生参数对电路的影响。仿真电路采用反馈控制机制,通过反馈,使系统的输出能够尽快达到输出的期望。

图7模拟了当MOSFET器件真实工作时,输出的变化曲线,从图7可以看出,整个电路在1.4ms时,输出才能够达到期望值,该数值比期望输出时间(1ms处)大约滞后0.4ms,滞后特性反映了MOSFET开关的延迟导通性,其工作过程对应于 $[t_0-t_1]$ 时间段的状态。同时,从

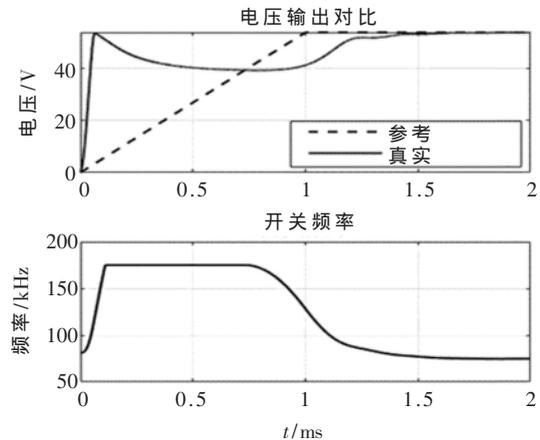


图7 电路输出曲线

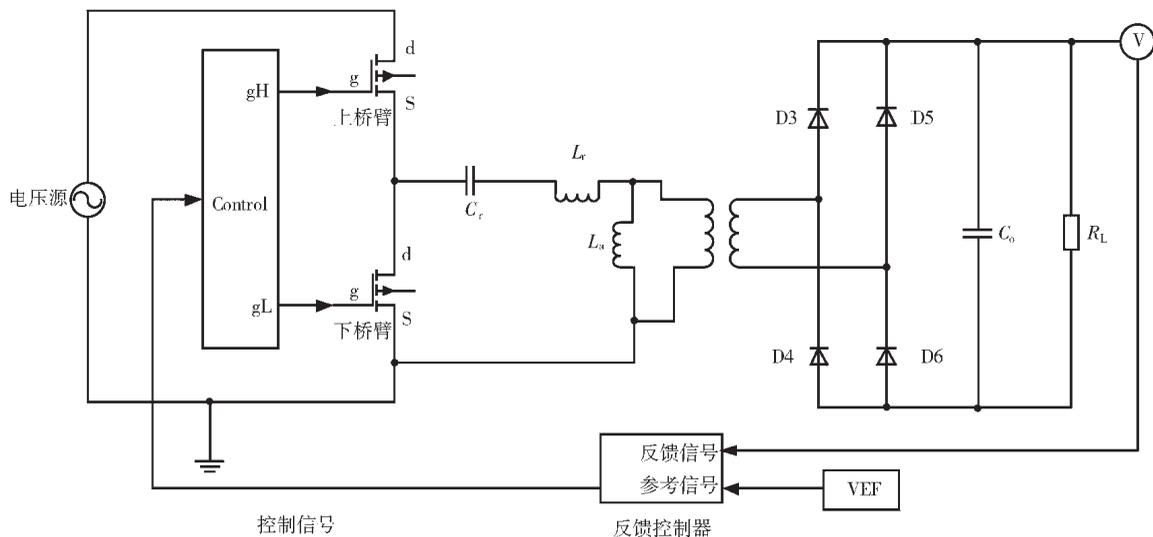


图6 仿真模型

图中可以看出,达到稳态输出时,开关的频率维持在 75 kHz 左右,即谐振频率,该频率与本电路设计的参数基本一致。

从图 8 中的曲线对比可以看出,由于寄生参数的影响,输出达到稳态的电压的时间较理想时间有一定的延迟,但延迟时间大约为千分之一毫秒,这一时间对于普通的开关电路,其延迟可以忽略;此外,在稳态时输出电压较理想输出电压有很小的下降,大约 2 V,当对电压精度要求较高时,需要在设计时考虑将该值。

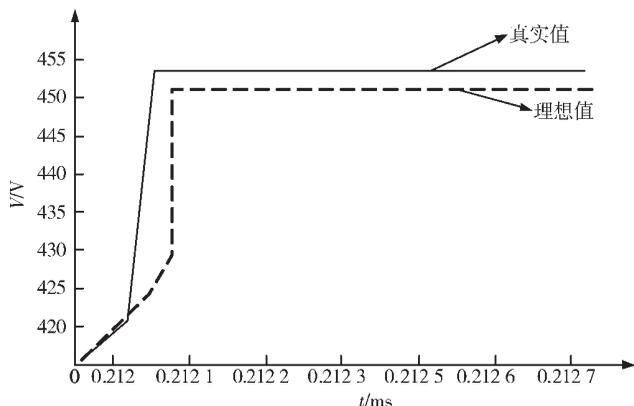


图 8 电路输出对比

图 9 为理论谐振频率与实际谐振频率的对比,从图中可以看出,理论的谐振频率较实际的谐振频率要高,这是因为寄生电容的存在,导致等效电容变大,根据谐振频率计算公式可知,整体的频率将降低。通过对比可知,实际频率大概有 70 kHz,较正常值减少了大概 5 kHz,说明寄生电容的存在对系统的频率影响较大。在实际的电路设计中,在选择谐振电容、电感参数时,应将寄生参数的影响计入参数设计中,最大程度地消除寄生参数的影响。

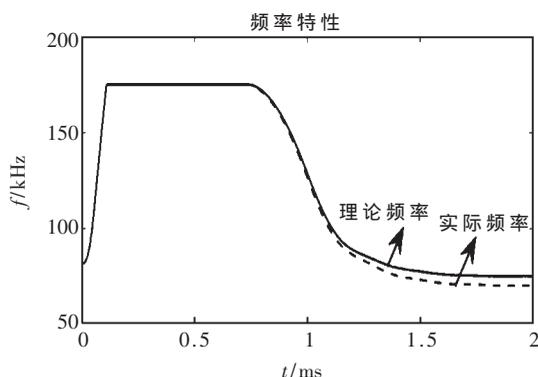


图 9 谐振频率对比

4 结论

本文分析了开关器件 MOSFET 的寄生参数对 LLC 谐振电路性能的影响。本文首先从寄生参数模型入手,对 MOSFET 的寄生参数建立了等效分析模型,并基于该

分析模型,分析了寄生参数在 MOSFET 工作各阶段的影响,最后在 MATLAB 下建立了 LLC 谐振电路模型,实现了整个系统的仿真。仿真结果表明,本文利用的等效模型,可以准确反映 MOSFET 寄生参数对于 LLC 谐振变换器的影响。通过仿真结果对比发现,寄生参数的存在将对输出电压、谐振频率都有影响,尤其是谐振频率的影响较大,因此在高频电路设计时,需要对寄生参数重点关注,在电路参数选择时,需要计入寄生参数的影响。

参考文献

- [1] 陈启超,纪延超,王建曈,等.MOSFET 输出电容对 CLLC 谐振变换器特性影响分析[J].电工技术学报,2015,30(17):26-35.
- [2] 孟茜倩,程加力,高建军.基于 MESFET 非线性模型的 MOSFET DC 建模技术[J].电子器件,2012,35(3):263-266.
- [3] 刘平,宋慧娜,刘晓芳,等.MOSFET 输出电容的非线性对振荡谐波的影响[J].微计算机信息,2007(32):283-285.
- [4] Ren Yuancheng, Xu Ming, Zhou Jinghai, et al. Analytical loss model of power MOSFET[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2006, 21(2): 310-319.
- [5] GRANT D A, GOWAR J. Power MOSFETS: theory and applications[M]. New York: Willy, 1989.
- [6] SAFARI S, CASTELLAZZI A, WHEELER P. Experimental study of parasitic inductance influence on SiC MOSFET switching performance in matrix converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2584-2596.
- [7] Wang Jianjing, Chung Shuhuang. Characterization and experimental assessment of the effects of parasitic elements on the MOSFET switching performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 573-590.
- [8] 丁犇.LLC 谐振 DC/DC 变换器调制性能分析[J].控制工程,2019,26(9):1717-1721.
- [9] 薛佳男.深亚微米 MOSFET 器件非线性电容模型研究[D].上海:华东师范大学,2019.
- [10] 马建光.LLC 半桥谐振变换器及其应用研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [11] 冯雪.LLC 谐振变换器损耗分析与效率优化[D].北京:北京交通大学,2017.

(收稿日期:2020-06-24)

作者简介:

沈华(1981-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。

甄昊涵(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。

童涛(1992-),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所