

高频变压器分布参数提取及谐振电路设计

金旦辰¹, 顾小卫¹, 刘彬¹, 孙宜琴²

(1. 浙江理工大学 信息学院, 浙江杭州 310018;

2. 杭州电子科技大学 计算机学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 高频变压器中存在漏感和分布电容。首先对其建立简化的二维电路模型。再用有限元软件 Ansoft Maxwell 对高频高压大功率变压器的绕组和铁芯进行二维建模, 对建好的模型进行电场和磁场分析。然后用能量法对漏感和分布电容进行提取, 最后将提取的分布参数整合到谐振电路中, 使电路中的开关元件可以实现软开关, 系统运行的损耗得以减小。

关键词: 高频变压器; 谐振电路; 分布参数; 有限元法

中图分类号: TM4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0057-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.014

The extraction of high frequency transformer distribution parameter and design of resonance circuit

JIN Dan-chen¹, GU Xiao-wei¹, LIU Bin¹, SUN Yi-qin²

1. School of Informatics Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Leakage inductance and distributed capacitance exist in high frequency transformer. In this paper, a simplified two-dimensional circuit model of high frequency transformer is established. Then the finite element software Ansoft Maxwell was used to build the winding and iron core of high frequency high voltage high power transformer in two dimensions to analyze the electric and magnetic fields of the model. Then the leakage inductance and distributed capacitance are extracted by energy method. Finally, the extracted distribution parameters are integrated into the resonant circuit, resultantly realizing soft switching to reduce the power loss of the system.

Key words: high frequency transformer; resonant circuit; distribution parameter; finite element method

1 引言

如今, 伴随着对环保问题的日益重视以及对节能减排战略的大力实施, 治理粉尘对大气污染已是刻不容缓, 因此高效率的电除尘设备获得了广泛应用。高频高压大功率变压器作为新的静电除尘设备电源的一种, 既可以对原边电压进行升压, 把原边的能量通过铁芯传递到副边以及对原副边进行安全电气隔离, 还对电路的运行有直接的影响^[1]。在高频情况下, 要考虑漏感和分布电容, 漏感所引起电压尖峰, 会损坏电路中的部分器件, 而分布电容则会引起电流尖峰并且使充电时间变长, 会对开关和二极管造成较大的损耗, 从而使变压器的效率以及可

靠性降低^[2]。将漏感和分布电容整合到谐振电路中, 可以减小这些分布参数对系统运行的不利影响。

2 高频变压器的特性

电路工作在低频时, 一般不考虑分布参数对电路造成的影响, 但高频时, 分布参数对电路的影响不能忽略, 此时, 它既影响电路的正常运行, 又影响着变压器的工作效率。因此, 简化的高频变压器等效电路如图 1 所示。其中, 分布电容的集总电容用 C_s 来表示。原边和副边的总漏感用 L_1 来表示^[3]。

变压器的漏磁场是由变压器的漏感反映的^[4]。在变压器磁路中, 变压器的磁通分为两部分, 一部分通过铁芯形成闭合回路, 称为主磁通, 另一部分是

收稿日期: 2018-10-08 修回日期: 2018-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407156); 浙江省科技厅公益技术研究社会发展项目(2016C33018)

通讯作者: 顾小卫 E-mail: gxw@zstu.edu.cn

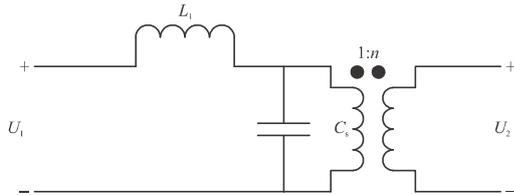


图 1 简化的高频变压器等效电路

通过绕组、空气隙形成闭合回路的称为漏磁通，漏磁通形成漏磁场，漏磁能都集中在漏磁场中。若磁场能量与电感、电流已知，漏感可根据下式求出：

$$w_1 = \frac{L_1 I_0^2}{2} = \int_0^V \frac{H_0 B_0}{2} dv = \int_0^V \frac{\mu' H_0^2}{2} dv \quad (1)$$

其中， w_1 为漏磁场能量， L_1 为漏感， I_0 为负载电流， H_0 为磁场强度， B_0 为磁感应强度， μ' 为绝缘材料的磁导率， V 为漏磁空间的体积。

变压器的电场能是由变压器的分布电容反映的。电场能主要集中在原边绕组、副边绕组以及原副边绕组之间。若电场能量与电容、电压已知，分布电容可根据下式求出：

$$W_{cs} = \frac{C_s \Delta U^2}{2} = \int_0^V \frac{\xi_0 E^2}{2} dv \quad (2)$$

其中， W_{cs} 为电场能量， C_s 为分布电容， ΔU 为两绕组间的电位差， E 为场强， ξ_0 为绝缘材料的介电常数。

3 分布参数的提取

Ansoft 是基于有限元的一款计算软件，可用来分析电磁场领域的多项问题，在电机、变压器、互感器等领域应用广泛^[5]。本文的高频高压变压器用于静电除尘电源系统。基本参数为：输入电压 510 V，输出电压为 52 kV，输出功率为 60 kW，工作频率 20 kHz，效率 96 %，铁芯材料采用超微晶(纳米晶)磁芯^[6]。变压器基本参数及绝缘性能如表 1 所示。

实际变压器的结构很复杂，按照变压器的实际模型进行建模分析会加大计算机的运算量，网格剖分量，而要达到在一定计算机资源条件下(包括计算时间和计算机能力)内得出结果，网格剖分不能太细，从而影响结果精度。因此，在本文中我们只对变压器的铁芯、原边绕组以及副边绕组进行建模。各绕组之间按串联关系进行绕制，由于电流在绕组中的分布是均匀的，原边按每匝进行建模，副边按每层绕组进行建模。考虑模型的对称性，我们只需要建立 1/2 模型。用 Ansoft Maxwell 建立变压器二维

表 1 变压器基本参数及绝缘数据

铁芯	长 360 mm，高 470 mm，窗口长 110 mm，高 400 mm
原边绕组	0.4 mm (宽)×250 mm(高)，匝数 9 匝，匝间距 0.32 mm
副边绕组	0.8 mm (宽)×250 mm(高)，匝数 900 匝，7 层，层间距 0.2 mm
电气参数	硅钢片的磁导率 20000，非铁磁物质的磁导率 μ_0 ，铜导线电阻率 $2.135 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
绝缘数据	绕组到铁芯上下表面间距都为 75 mm，副边与原边绕组间距为 30.02 mm，副边绕组在外，原边绕组在内。原边绕组与铁芯间距 23 mm

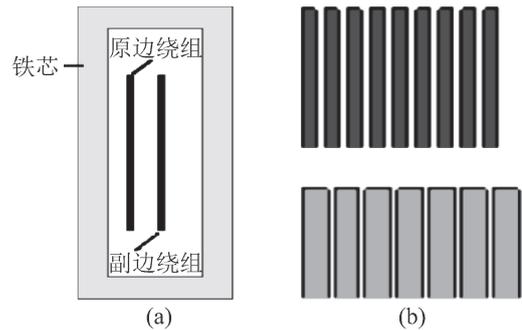


图 2 变压器的(a)二维模型和(b)绕组的局部放大图

模型，如图 2 所示。

这里我们采用涡流场对模型进行漏感分析。为该模型添加材料属性(铁芯材料为超微晶材料，两绕组为铜箔，其余部分为空气)，原边每匝的电流为 122.549 A，副边每层电流为 1.154 A。自适应网格剖分后进行求解，求解频率设置为 20 kHz。可得到变压器中的磁力线和磁场能量分布如图 3 所示。

由图 3 可知，磁力线在原副边绕组之间分布比较集中，铁芯的拐角处磁力线比较稀疏，空气隙中的漏磁较小。磁场能量在铁芯和空气隙也很小，主要分布在原副边绕组之间和绕组的两端。通过 Maxwell 后处理以及根据 $L=2W/I^2$ ，可得漏感 $L=5.6 \mu H$ 。

这里我们用静电场对模型进行分布电容分析。从理论上讲，变压器的分布电容模型是很复杂的，但对于该文应用的变压器来说，我们关注的是变压器的谐振特性，因此变压器模型可以简化为图 2。为模型添加材料属性，由于变压器副边匝数比较多，为了方便仿真时激励电压源的添加，选取副边绕组的第一层和最后一层，按电压线性增加的分布特点，为每一层绕组分别单独添加电压激励。原边给每匝绕组按线性增加的分布特点添加电压激励。自适应网格剖分后进行求解，可得到变压器中的电位和电场能量分布，如图 4 所示。

可以看出，铁芯上的电压很小，几乎为 0，由于副边绕组给的电压激励值很大，电压主要集中在副

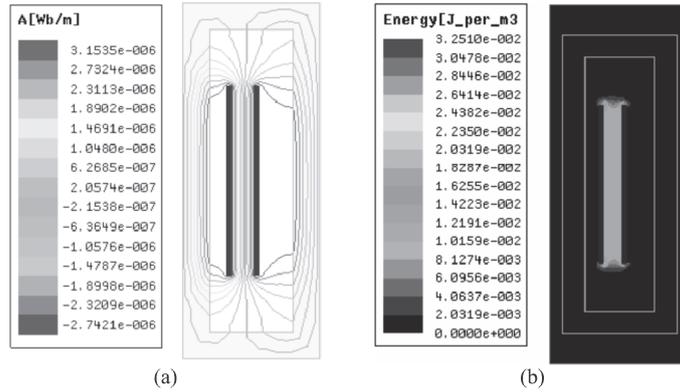


图3 变压器的(a)磁力线和(b)磁场能量分布

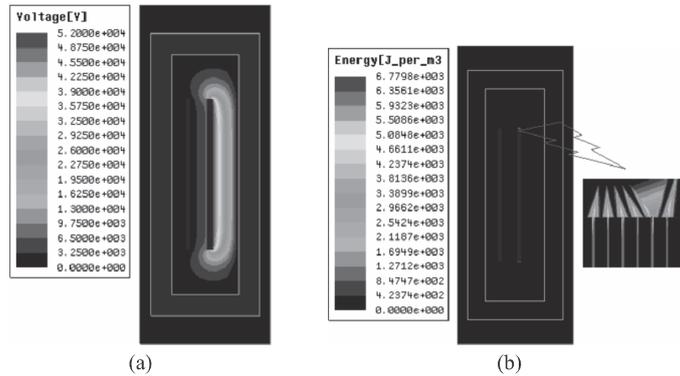


图4 变压器的(a)电位和(b)电场能量分布

边绕组上。副边绕组的右侧，随着距离的增大电压逐渐减小。从图 4b 的变压器电场能量分布可知，电场能量主要集中在副边绕组之间、绕组两端，铁芯、空气隙和原边绕组上电场能量几乎为 0。经过有限元后处理以及根据 $C=2W/U^2$ ，可得电容 $C=35.8 \mu\text{F}$ 。

4 谐振电路设计

图 5 为含 LCC 串并联谐振变换器的大功率高频高压电除尘电源软开关主电路拓扑。低输入电压 U_{in} 经过由开关 k1、k2、k3、k4 和反并联二极管组成的逆变电路变换成高频电压，再经过由匝比 1:n 的变压器升压成高电压，最后将高频高压交流电经过由

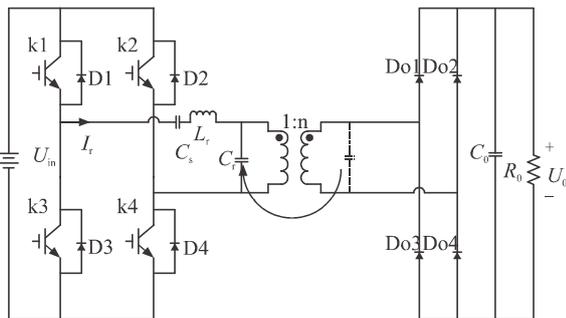


图5 LCC 串并联谐振电路

Do1、Do2、Do3、Do4 二极管组成的整流电路整流成直流电，再经过滤波电容 C_0 滤波，最后输出高压直流电压 U_0 ^[7]。

该电路工作在断续电流双波头输出模式，一个周期分为 8 个工作状态($t_0 \sim t_8$)。考虑到电路工作的对称性，只需对 t_0 到 t_4 时间段进行分析。从 t_0 时刻开始，k1 和 k4 闭合， $V_{Cr}=V_o/n$ ，电容 C_r 被箝位，电感 L_r 、电容 C_s 两元件谐振，电流 I_r 从 0 按正弦规律增大，k1、k4 开通时电流为 0。原边向副边传递能量，Do1、Do4 导通。 t_1 时刻 I_r 为 0，在 t_1 到 t_2 这段时间内， I_r 反向， V_{Cr} 减小， C_r 、 L_r 、 C_s 反向谐振， I_r 经过 D1、D4 续流，原边不向副边传递能量，此时若打开 k1 和 k4 可以实现零电流关断。 t_2 时刻， $V_{Cr}=-V_o/n$ ， C_r 再次被箝位，由于此时 I_r 是反向的，所以 L_r 、 C_s 继续反向谐振，谐振电流通过 D1、D4 续流，若此时打开 k1 和 k4 也可以实现零电流关断，原边又开始向副边传递能量，Do2、Do3 导通。 t_3 时刻 I_r 为 0， t_3 到 t_4 时间段电路不工作。

通过以上分析，可以用 Matlab 中的 Simulink 对电路进行仿真设计。利用 Simulink 提供的现成模块建立全桥逆变、变压器升压、整流以及逆变的高频

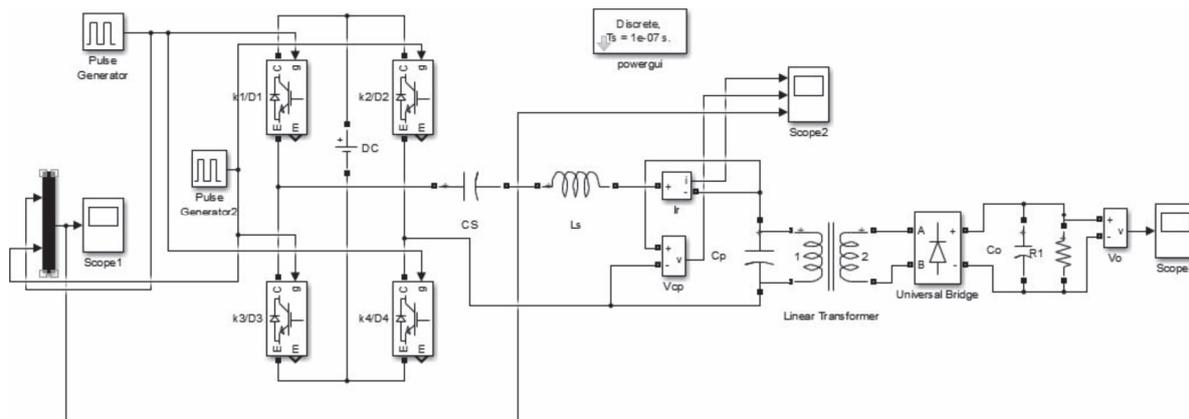


图 6 用 Simulink 建立的仿真电路

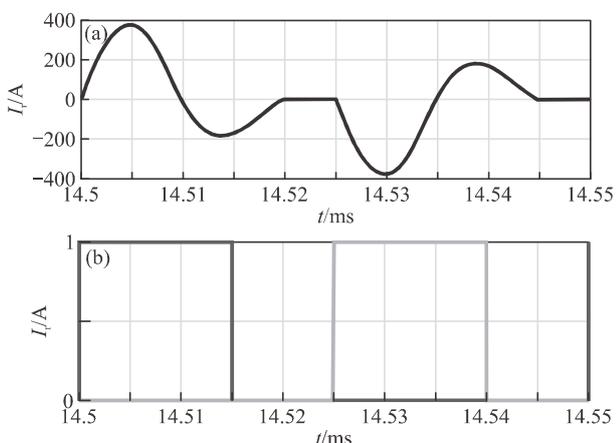


图 7 电路的(a)谐振电流和(b)开关管脉冲波形

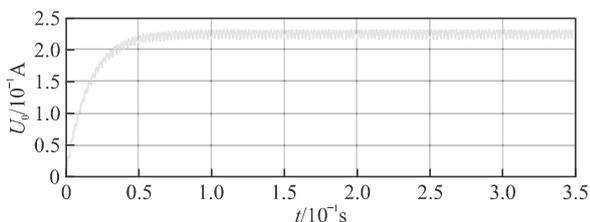


图 8 稳态后负载输出的直流电压

除尘电源主电路系统与控制系统的模型，仿真模型如图 6 所示。

将 Maxwell 中求取的漏感和分布电容放入谐振电路中进行仿真，对谐振电路理论分析可知，为了获得需要的输出电压，取 $k=0.2$ ，电路工作在断续电流双波头输出，此时的仿真参数： $C_s=35.8 \mu\text{F}$ ， $C_r=1.79 \mu\text{F}$ ， $L_r=5.6 \mu\text{H}$ ， $n=100$ ，输入电压 $V_{in}=500 \text{ V}$ ，谐振频率 $f_s=20 \text{ kHz}$ 。按此进行仿真。取 $m=0.45$ ，输出电压 $V_o=22.5 \text{ kV}$ 。由文献[8]可知， t_0 到 t_1 时间 $t_{01}=10 \mu\text{s}$ ， t_1 到 t_3 时间 $t_{13}=8.3 \mu\text{s}$ ， t_0 到 t_4 时间 $t_{04}=T_s/2=25 \mu\text{s}$ 。一个周期内 T_s 的仿真结果如图 7 和图 8 所示。

由图可知， $t'_{01}=10 \mu\text{s}$ ， $t'_{13}=8.423 \mu\text{s}$ ， $t'_{04}=T_s/2$

$=25 \mu\text{s}$ 。 V_o' 基本上稳定在 22.5 kV 。因此，实验结果与理论分析基本吻合，验证了该仿真电路的正确性。该仿真电路实现了软开关，大大减小了电路的损耗，并且最终输出电压达到了稳定的直流高压的要求。

5 结语

本文运用有限元软件 Ansoft Maxwell 对高频变压器的分布参数进行提取，再将提取的分布参数整合到谐振电路中作为谐振电路的谐振单元。通过仿真验证，证明了该方法可以消除变压器高频下寄生参数对电路造成的不利影响，实现了软开关，减小了开关损耗，从而提高了系统的运行效率。

参考文献：

- [1] 伦学敏. 低电压、大电流直流开关电源的设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [2] 甘焯欣. 高频开关电源变压器优化设计分析[J]. 电子制作, 2016, (2): 28.
- [3] Robert, W E., Dragan, M. Fundamentals of power electronics[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [4] 王瑞华. 脉冲变压器设计[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 张洪亮, 等. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [6] 王延安. 大功率高频高压 ESP 电源及其监控系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [7] 贺超. 基于谐振软开关的电除尘高频高压电源研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] 杨明印. 静电除尘高频电源及控制系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.

作者简介: 金旦辰(1993—), 男, 浙江义乌人, 硕士研究生, 研究方向为计算机控制技术。