

[控制系统]

无接触式受流系统的研究

文/国网绍兴供电公司 薛琦 李勇 李俊华

根据大功率无接触式受流系统的设计要求，利用ANSYS有限元仿真及电容串联补偿的方法，设计了无接触供电系统，并利用MATLAB/simulink完成了对主电路的仿真验证，仿真结果符合理论分析。在此基础上，制作完成了可无接触传输最大功率为10 kW的试验台，传输效率可达85.9%。该试验台的建设为无接触式供电研究提供了宝贵的试验数据，具有重要参考价值。

随着铁路电气化的全面覆盖，高铁、磁浮列车的发展，以及电动汽车的崛起，方便、快捷、高效的电能传输越来越引起了人们的关注。

目前，较常使用的电能传输方式有导线供电和接触式供电（如铁路的接触网）。这两种供电方式虽然能满足绝大多数情况下的电能传输，但也有它们的局限性：不能在水下、易燃易爆的环境下使用；接触式供电虽然能解决铁路电气化的问题，但依然存在机械磨损、增加噪声及存在安全隐患等问题。

为此，一种新型的供电方式——无接触供电系统进入人们的视野。无接触式供电系统是一种基于电磁感应原理，利用磁场耦合进行电能传输的系统。在输电线路和负载方没有电气连接和物理接触，甚至它们之间还有相对运动的情况下，都可以实现电能的传输。

采用该种供电方式可以有效解决上述供电方式产生的不利因素，为设备提供可靠的电能传输，并且能应用于电动汽车充电、城市轨道交通车辆充电等方面。

本文以设计制作一款大功率无接触供电系统为目标，利用ANSYS有限元分析和MATLAB仿真软件对无接触供电系统的理论分析及试验台的设计制造等进行了研究。

无接触式变压器

1. 无接触式变压器基本原理

无接触式变压器原理跟传统变压器类似，将电能转化为磁能，磁能通过空间传输耦合到二次侧，转化为电能，从而实现无接触式电能传输。其空间结构如图1所示。由于考虑到本文设计的无接触式供电系统应用于较大功率的轨道交通方面，供电端（即原边）通常需要铺设较长线路，故设计时采用一次侧无铁心（节省成本），而二次侧有铁心的方式。

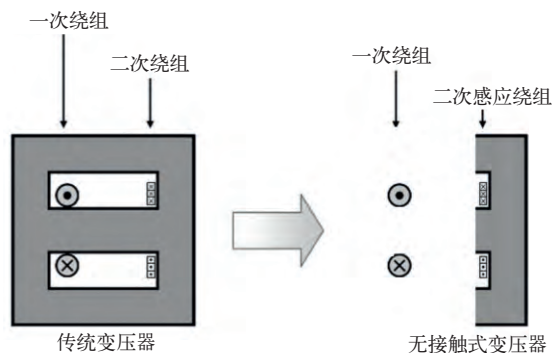


图1 无接触式变压器基本机构图

2. 无接触式变压器磁路仿真

传统变压器一次侧、二次侧都是有铁心包围，磁路基本都集中在铁心部分，漏磁很小，根据公式 $k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}}$ ，耦合系数一般在0.95~0.98之间，接近于1。

通过ANSYS有限元分析软件对无接触式变压器进行磁路仿真(见图2),可以看出,一次侧产生的磁通有一部分没有耦合到二次侧,而是直接通过中间的气隙形成闭合磁路,产生漏感。并且耦合系数随着距二次侧之间的距离变大而减小,本次试验的无接触变压器耦合系数为0.605。

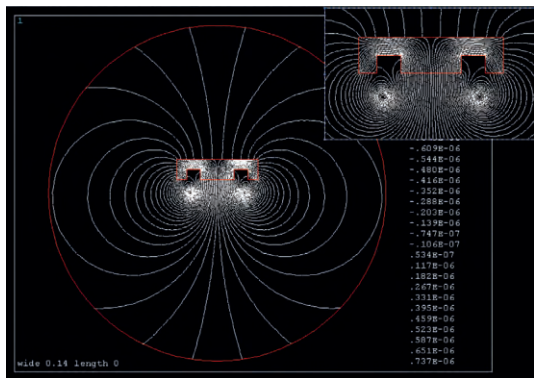


图2 磁场分布图

3. 变压器等效模型

根据变压器稳态运行时的基本方程式,为了计算简便,折合算法得

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 & N_1 \dot{I}_2 = N_2 \dot{I}_2 = \dot{F}_2 \\ \dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2 & N_1 \dot{I}_1 = N_1 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0 \\ \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k & \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0 \\ 1 + \frac{\dot{I}_2}{k} = \dot{I}_m & \rightarrow \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2' \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2' \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0 \\ \dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

折合后,不但磁动势平衡方程式简化成了电流平衡方程式,而且一次、二次绕组电动势相

等,一次侧和二次侧似乎有了电路上的联系。这样,就可以采用等效电路来模拟变压器,使变压器的分析计算大大得以简化。

根据折合后的基本方程式,可将变压器进行T形等效。

无接触式变压器的基本原理跟传统变压器相同,也可采用T形等效电路来进行相同的简化分析。它与全铁心式变压器的区别就在于漏感 $jX_{\sigma 1}$, $jX'_{\sigma 2}$ 比较大,互感 jX_m 比较小。

无接触供电系统主电路设计

1. 串联补偿电容设计

对传统变压器而言,耦合性好,漏磁较少,并且工作在工频50 Hz下, $jX_{\sigma 1}$ 、 $jX'_{\sigma 2}$ 比较小,一般可以忽略;而无接触式变压器只有一半铁心,漏磁较多,漏感较大,并且工作在25 kHz左右频率下(考虑到传输效率及开关变换器的损耗), $jX_{\sigma 1}$ 、 $jX'_{\sigma 2}$ 较大,基本上跟互感是一个数量级,不能忽略。为此我们采用电容串联补偿的方法(即在一次侧、二次绕组处各串联一个电容器)来补偿电感消耗的无功功率,提高系统的功率因数,降低电源输出端视在功率。

2. 主电路设计

无接触供电电源的基本原理如图3所示,采用交直交变换原理,主要由一次侧整流电路、全桥逆变电路、无接触变压器、二次侧整流电路及控制电路构成。一次侧三相无控整流电路将输入的AC 380 V/50 Hz整流为DC 537 V,再通过全桥逆变变为高频(25 kHz左右)交流电。二次侧由单相无控整流电路整成直流,提供给负载。

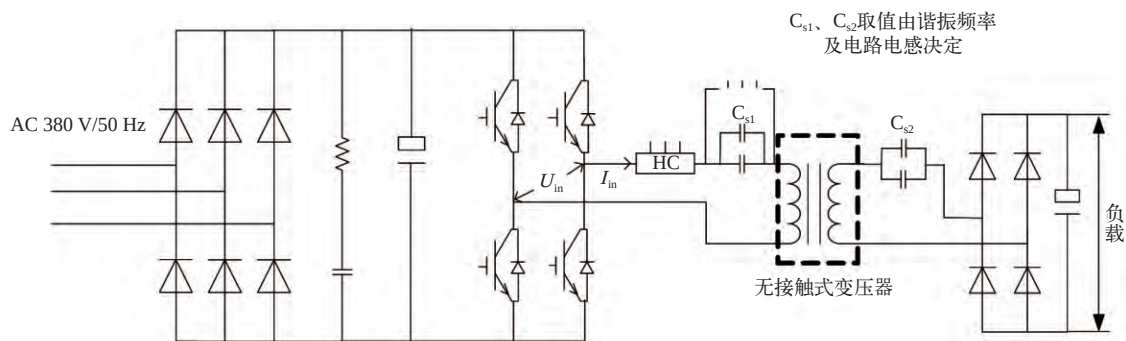


图3 无接触式供电电源基本结构图

3. 主电路MATLAB仿真

根据上文,本次仿真对无接触式变压器部

分采用T型等效,忽略导线电阻,采用电容串联补偿,仿真频率设在25 kHz。无接触变压器的互

感和漏感，我们采取先绕线，实际测量再计算得到，好处是直接准确。根据测量计算得到一次侧漏感 $L_{\sigma 1}=74.25\ \mu\text{H}$ 、二次侧漏感 $L_{\sigma 2}=$

$225.04\ \mu\text{H}$ 、互感 $L_m=159.08\ \mu\text{H}$ 。
 $f=25\ \text{kHz}$ ， $C_1=\frac{1}{4\pi^2 f^2 L_{\sigma 1}}=0.546\ \mu\text{H}$ ，
 $C_2=\frac{1}{4\pi^2 f^2 L_{\sigma 2}}=0.18\ \mu\text{H}$ 。整体仿真结构如图4所示。

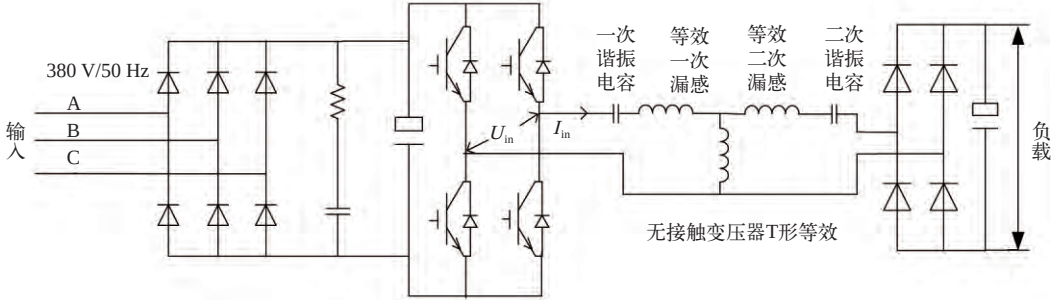


图4 主电路仿真结构图

采用三相AC 380 V/50 Hz电源，给支撑电容充电，容值取 $2\ 200\ \mu\text{H}$ 。

不同负载下仿真波形比较如下。

1) 不接负载，负载端开路时，一次电压、电流波形如图5所示。

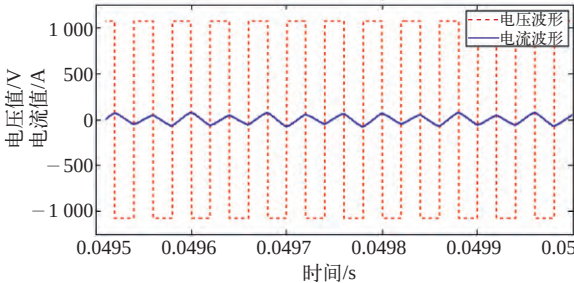


图5 负载开路时，一次电压、电流波形

2) 负载为 $2\ \Omega$ 时，一次和二次电压、电流波形如图6所示。

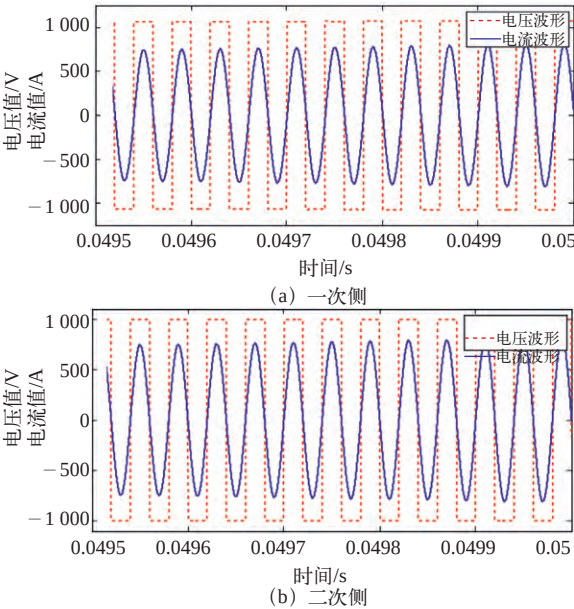


图6 负载为 $2\ \Omega$ 时，一次和二次电压、电流波形

根据以上波形可以看到，当负载端开路时，二次侧不输出电流，一次电流为三角波，并且相位滞后电压 90° ，体现为纯感性；当负载比较大时（负载电阻值比较小）电流为正弦波，并且二次电压电流同相位，一次电压电流相位虽有一定偏差（叠加了励磁电流分量），但也几乎同相位。仿真结果符合理论分析。

无接触电源试验平台及结果分析

1. 无接触供电电源主要参数及主电路图

无接触供电电源主要参数如表1所示。

表1 无接触供电电源主要参数

额定容量/kW	20
输入电源	三相AC380 V，50 Hz
输出频率/kHz	20~30
输出电流有效值/A	≤ 40
一次绕组/匝	12
二次绕组/匝	8
一次绕组尺寸/(mm×mm)	3 200×150
二次绕组尺寸/(mm×mm)	3 200×160
一次与二次铁心距离/mm	40
二次铁心	铁氧体（磁导率 $10^3\sim 10^4$ ）

输出频率与逆变电路中IGBT的开关频率有关。

主电路如图7所示。

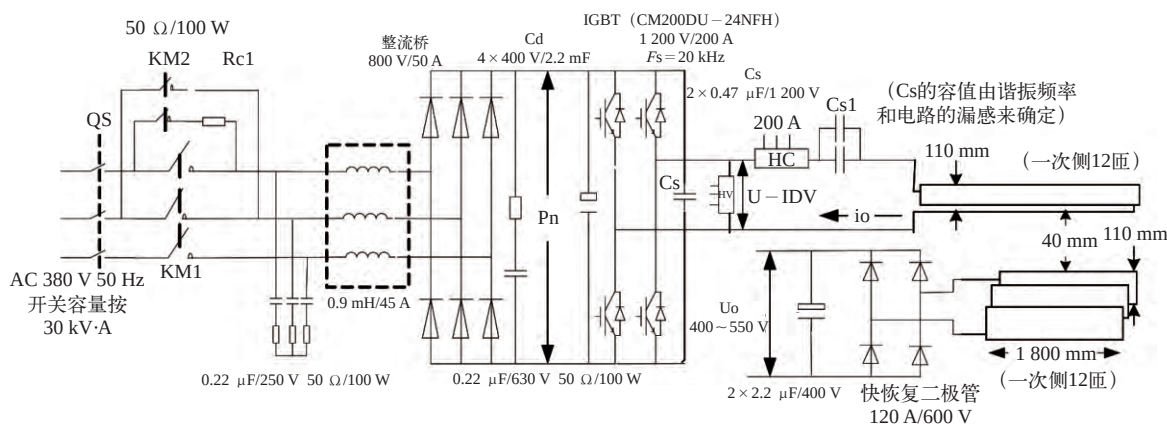


图7 主电路图

2. 实验平台介绍

实验平台照片如图8所示。图中左边所示的为感应电源主电路试验台，右边的则为二次侧升压斩波器部分试验台，右前方的是整个系统的检测控制台。



图8 试验平台照片

3. 实验波形比较

一次电压、电流波形如图9所示。CH1（黄色）为一次侧两端电压波形，为一个高频交流方波。CH2（蓝色）为通过一次电流波形，谐振时为一直弦值，相位基本与电压波形相同，符合理论要求。图10所示为仿真波形，试验波形中的毛刺是由于开关管导通关断时产生的电压尖峰及一些干扰毛刺。

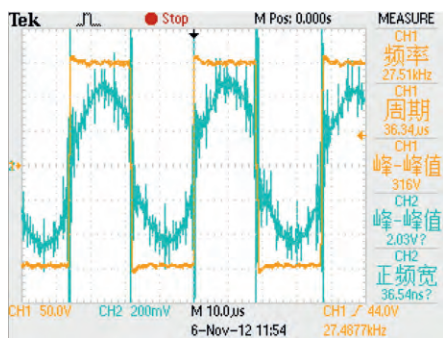


图9 一次电压电流试验波形

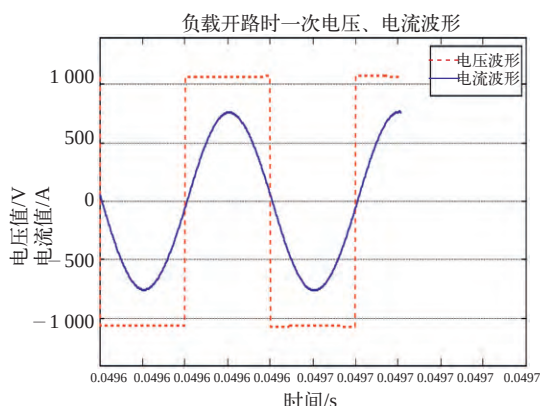


图10 一次电压电流仿真波形

二次侧电压、电流波形如图11所示。CH1（黄色）为二次侧两端电压波形，CH2（蓝色）为二次电流波形。图12所示为二次侧仿真波形，跟试验波形比较可以看出，在开关导通关断过程有一定尖峰。试验基本符合仿真波形。

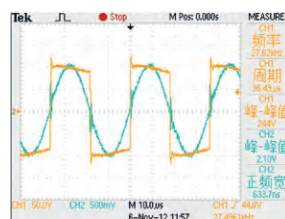


图11 二次电压、电流试验波形

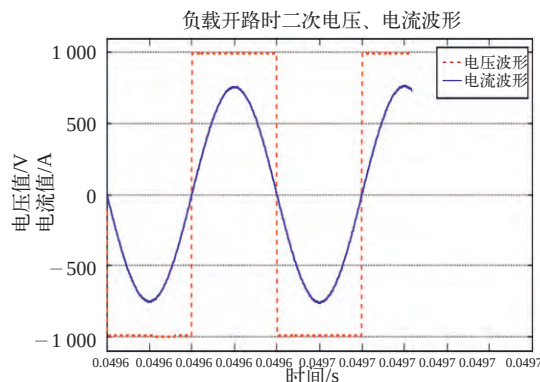
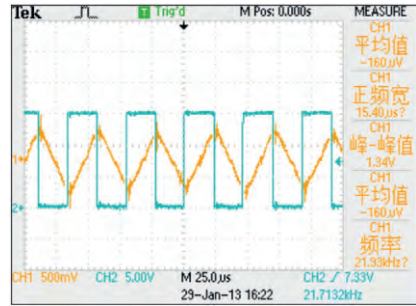
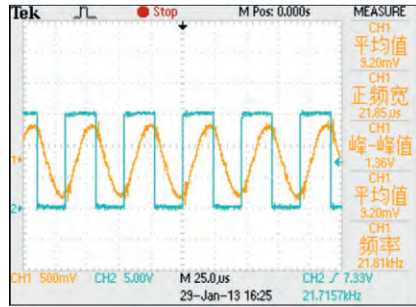


图12 二次电压电流仿真波形

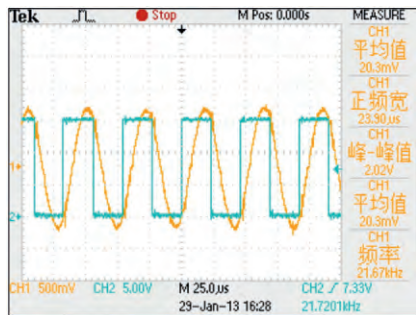
根据前文电路仿真部分，一次侧和二次侧的电压电流波形会随着负载的变化而变化，我们对试验平台进行相同的试验。波形比较如图13所示，图中方波为一次侧两端输入电压波形，另一个波形为一次电流波形。试验采用有源电子负载，可以控制负载电压、负载电流、负载电阻及负载功率。本试验采用控制负载电流。



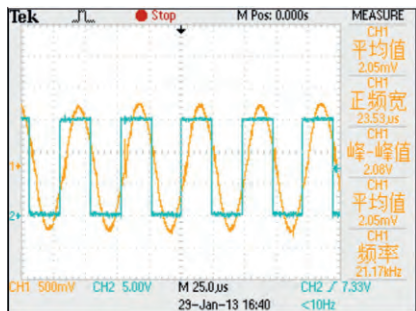
(a) 控制负载电流为0.5 A



(b) 控制负载电流为8 A



(c) 控制负载电流为16 A



(d) 控制负载电流为20 A

图13 不同负载情况下一次电压电流波形

可以发现，当电流比较小时，一次电流波形为三角波，并且电流相位滞后电压 90° ，以励磁电流分量为主；随着负载电流的增加，一次侧和电流幅值越来越大，并且越来越接近正弦，说明一次侧和电流开始以负载电流分量为主，并且由于谐振的频率选择性，只体现了基波分量。

4. 试验台效率

试验台效率的定义是电子负载的功率除以总的输入功率。各项参数如表2所示。效率的趋势如图14所示。

表2 系统输入输出及效率参数

输出功率 /kW	输入电压 /V	输入电流 /A	输出电压 /V	输出电流 /A	效率 (%)
1	553	3.18	352.1	2.84	56.9
2	547	5.08	344.1	5.84	72.3
3	543	6.98	334.2	8.97	79.1
4	542	8.88	320.9	12.5	83.3
5	538	10.9	305.3	16.4	85.4
6	536	13.02	280.5	21.37	85.9

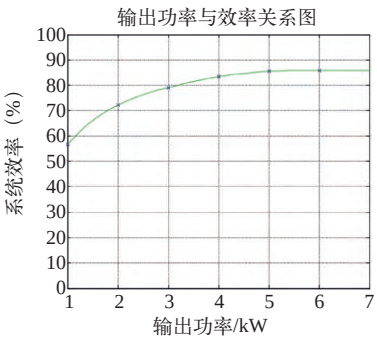


图14 效率图

从图中可以看出，当输出功率比较低时系统效率也低，随着输出功率的增加，效率也呈增加趋势。主要原因是系统有些固定功率损耗，在负载功率较小时所占比例就比较大，影响系统效率。

结束语

本文以设计制作一款无接触供电系统试验台为目标，旨在解决特殊情况下的供电问题。利用ANSYS电磁场仿真软件及MATLAB/simulink对无接触式变压器及主电路进行理论分析，无接触式变压器进行T形等效简化分析，并采用谐振电容串联补偿的方法解决了耦合变压器的漏感压降及无功问题，提高了电源功率因数。设计搭建的试验平台，实现了电能的无接触式传输。试验结果符合仿真结果及理论分析，达到了预期的设计要求。该平台的建立对无接触供电的研究具有重要参考价值。EA

(收稿日期：2016.01.09)

(编辑：杨得润)