

高频变压器的设计与实验研究

刘修泉¹, 曾昭瑞², 黄平²

(1. 广州番禺职业技术学院, 广东 广州 511483; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 给出了感应电能传输系统高频变压器的设计方法, 并进行了实验和分析。

关键词: 高频变压器; 感应电能传输; 损耗; 温升

中图分类号: TM402 文献标识码: B 文章编号: 1001-8425(2009)03-0013-04

Design and Experimental Research of HF Transformer

LIU Xiu-quan¹, ZENG Zhao-rui², HUANG Ping²

(1. Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou 511483, China;
2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The design method of HF transformer for inductive electric energy transmission system is presented. The experiment and analysis are made.

Key words: HF transformer; Inductive electric energy transmission; Loss; Temperature rise

1 引言

移动机电设备, 如电力机车和城市电车等, 其传统供电方式一般为滑动接触方式, 存在磨损和电火花等一系列问题。由此一种新的能量供应方式感应电能传输被提出来。感应电能传输系统可以无接触供电, 消除了传统接触供电的安全隐患, 提高了系统供电的灵活性^[1]。感应电能传输系统主要是利用变压器来传递能量, 利用耦合式电磁感应原理, 电磁耦合结构相当于一个分离变压器, 即变压器初级和次级绕组是分离的, 存在空隙的。工频交流电经整流且逆变成高频交流电提供给初级绕组, 根据电磁感应定律, 次级绕组两端产生高频的感应电动势, 经过整流和稳压等环节之后, 为用电负载供应电能, 实现电能传输。

感应电能传输系统变压器初、次级绕组的频率很高, 其绕组参数受频率影响很大, 电感和电阻均随着频率变化而变化, 电感变化一般很小, 但电阻变化很大, 称为交流电阻, 是直流电阻的几倍、几十倍甚至更大^[2,3]。因此, 高频变压器设计是感应电能

传输系统的核心。

笔者介绍了高频变压器设计中主要考虑的因素, 根据面积法给出了设计高频变压器的一般方法, 并对其进行了实验和分析。

2 高频变压器设计中考虑的因素

在高频变压器的设计中, 对铁心有以下要求:

- (1) 高的饱和磁通密度或高的振幅磁导率。
- (2) 在工作频率范围有低的铁心总损耗。

软磁铁氧体满足上述要求, 因此高频变压器铁心选择铁氧体 PC30。但是在设计中必须考虑铁心损耗、绕组损耗和温升等问题, 才能获得高效的系统。

2.1 铁心损耗

铁心损耗取决于磁感应增量、频率和温度, 在这里忽略温度的影响。软磁铁氧体铁心总损耗通常由三部分构成: 磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 和剩余损耗 P_r 。每种损耗产生的频率范围是不同的。但是铁心总损耗为^[4]:

$$P_{\text{coreless}} = K_p V_{\text{core}} f^n B^n \quad (1)$$

式中 K_p ——铁心损耗系数, 忽略温度变化时为常数

V_{core} ——铁心体积

f ——工作频率

B ——磁感应强度

m, n ——分别是工作频率和磁感应的指数, 它们与铁心的材料有关, 可以通过查表得到

2.2 绕组损耗

在绕组损耗的一维 Dowell 模型中, 把复杂的三维电磁场问题处理为易处理的精确的一维计算^[5]。由于集肤效应和邻近效应的影响, 不同频率下导体电阻不一样, 一般称为交流电阻, 其与直流电阻的比值为 F_R :

$$F_R(n, X) = \frac{R_A}{R_D} = A(X) + \frac{n^2 - 1}{3} = B(X) \quad (2)$$

式中 n ——绕组层数

$$X = \frac{h}{\delta}$$

式中 h ——等效铜带的厚度

δ ——集肤深度

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_0 \omega}}$$

式中 σ ——铜电导率

μ_0 ——空气磁导率

ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$

$$A(X) = X \frac{e^{2X} - e^{-2X} + 2\sin(2X)}{e^{2X} + e^{-2X} - 2\cos(2X)}$$

$$B(X) = 2X \frac{e^X - e^{-X} - 2\sin(X)}{e^X + e^{-X} + 2\cos(X)}$$

变压器绕组损耗为:

$$P_{\text{cu}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 F_{R1} R_{d1} + I_2^2 F_{R2} R_{d2} \quad (3)$$

式中 R_1, R_2 ——分别是初、次级绕组的交流电阻

I_1, I_2 ——分别是初级和次级绕组的电流有效值

F_{R1}, F_{R2} ——分别是初、次级绕组交流电阻与直流电阻的比值

2.3 温升

高频变压器的温升影响系统的工作状态和输出功率。损耗包括铁心损耗和绕组损耗, 温升与能量损耗一般成正比关系, 即:

$$\Delta T = R_{th} P \quad (4)$$

式中 R_{th} ——比例常数, 即热阻

ΔT ——温升

P ——损耗功率

从式(4)可知, 为了降低温升, 必须减少能量的损耗。而能量的损耗又直接与铁心损耗和绕组损耗有关, 因此在设计中必须考虑降低它们的损耗量。

3 高频变压器的设计

变压器铁心的设计方法一般有面积乘法(AP)和铁心几何参数法。这里选用 AP 面积法, 其普遍应用的选心方程为^[6]:

$$AP = \frac{11.1 P_{IN}^{1.32}}{K \cdot \Delta B \cdot f} \quad (5)$$

式中 ΔB ——磁感应增量, 约为 0.15T~0.2T

f ——变压器的工作频率

其中, $K = K_u K_p K_t$

式中 K_u ——窗口利用系数, $K_u = A_w' / A_w$

K_p ——初级绕组面积系数, $K_p = A_p' / A_w'$

K_t ——拓扑系数

根据文献[5], 取 $K_u = 0.4$ 、 $K_p = 0.5$ 、 $K_t = 0.71$, 则可得 $K = 0.141$ 。

V_e 与热阻的经验公式 $R_{th} = \frac{61}{V_e^{0.54}}$ 和 V_e 与 AP 的

经验关系 $V_e = 5.7 \times (AP)^{0.68}$, 可得:

$$V_e = \frac{29.3 \times P_{IN}^{0.9}}{(K \cdot \Delta B \cdot f)^{0.68}} \quad (6)$$

由此可以快速选择铁心, 查出铁心有效截面积和面积乘积等。

另外, 初级绕组匝数按下式计算:

$$N_p = \frac{V_p}{K_f B_w A_e} \quad (7)$$

式中 K_f ——波形系数, 有效值与平均值之比, 正弦波时为 4.44, 方波时为 4.0

A_e ——铁心有效截面积

B_w ——工作磁通密度

f ——工作频率

根据变压器匝数比 N 可求出次级绕组匝数:

$$N_s = \frac{N_p}{N} = \frac{N_p \cdot V_s}{V_p} \quad (8)$$

初、次级绕组导线截面积的选择:

$$\begin{cases} S_p = \frac{I_p}{J} \\ S_s = \frac{I_s}{J} \end{cases} \quad (9)$$

式中 J ——电流密度, 一般取 300A/cm²

I ——电流, 下标 p 和 s 分别表示初级和次级参数

为了计算绕组损耗, 需要考虑高频下集肤效应的影响。导线应该选用多股导线并绕, 这样铜导体的集肤深度表达式为^[7]:

$$\delta = \frac{66.1 \times [1 + 0.0042(T - 20)]}{\sqrt{f}} \quad (10)$$

式中 T ——绕组温度

根据以上公式,选用 E60 的铁心,最后计算结果如表 1 所示。

表 1 参数计算结果
Table 1 Calculated data of parameters

参数名称	数值
电源电压 V/V	5
频率 k/kHz	100
初级绕组匝数 $n_1/匝$	40
次级绕组匝数 $n_2/匝$	30
负载电阻 R/Ω	76
气隙 h/mm	10
集肤深度 δ/mm	0.2
导线直径 d/mm	0.3

注:导线直径 $d < 2\delta$ 。

4 实验与分析

高频变压器的实验系统如图 1 所示。WL3866B 宽带大功率信号源的输入电源是工频交流电,可以输出 8kHz~1MHz 高频正弦交流电,最大功率可达 100W。电流、电压和输入功率均可由 WL258 功耗仪测量。负载电压采用 IVT-321 毫伏表测量,这样可以求出负载电阻、电流和功率。

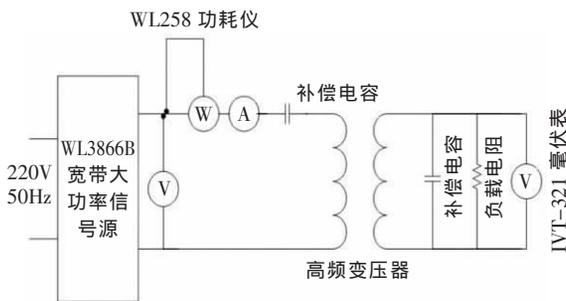


图 1 高频变压器实验系统

Fig.1 Experimental system of HF transformer

4.1 交流电阻

采用高频精密 LCR 数字电桥 (YD2817A),初、次级绕组的交流电阻可以直接测量,电阻与频率的实验和计算结果如表 2 所示。

在频率较低的情况下,交流电阻与直流电阻差别不大,可以用直流电阻来代替交流电阻,计算采用直流电阻模型,计算值和实验值几乎很接近。但在频率较高的时候,交流电阻就急剧增加,在 100kHz 时,交流电阻实验值约为 1.61Ω,约为直流电阻的 5.68 倍,计算值和实验值误差相对来说较大些,这可能与实际绕组绕线紧密程度等有关。

4.2 功率损耗与温度关系

表 2 交流电阻与频率的关系

Table 2 Relation between AC resistance and frequency

频率 /Hz	初级绕组电阻/Ω			次级绕组电阻/Ω		
	实验值	计算值	误差/%	实验值	计算值	误差/%
直流	0.282	0.283	—	0.217	0.218	—
100	0.283	0.283	—	0.217	0.218	—
1k	0.285	0.283	—	0.219	0.218	—
10k	0.294	0.306	3.9	0.240	0.248	3.2
100k	1.61	1.76	8.5	1.23	1.36	9.5

变压器次级绕组短路,初级绕组提供高频电压,测试功率为变压器的功率损耗,也就是绕组损耗和铁心损耗之和。变压器的功率损耗与温升的计算值和测量值如图 2 所示。随着功耗的增加,温升也随着增加,近似正比关系,只是测量值比计算值要小,但是反映的趋势是基本一致的。

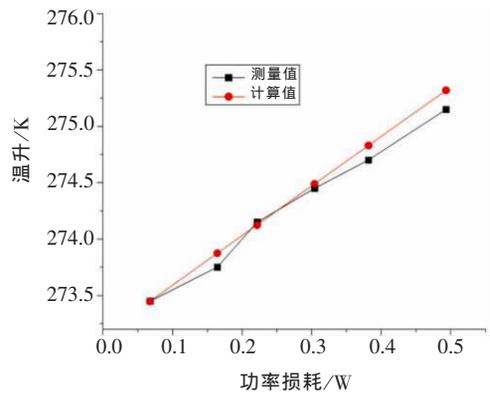


图 2 功率损耗与绕组温升的关系

Fig.2 Relation between power loss and winding temperature rise

4.3 系统输出功率、传输效率与负载的关系

系统输出功率和传输效率随负载的变化情况如图 3 和图 4 所示。从图 3 和图 4 中可知,在额定负载 76Ω 时,系统输出功率达到最大值,系统传输效率

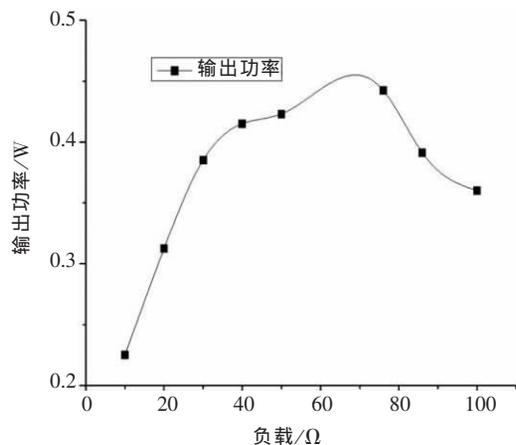


图 3 系统输出功率与负载的关系

Fig.3 Relation between system output power and load

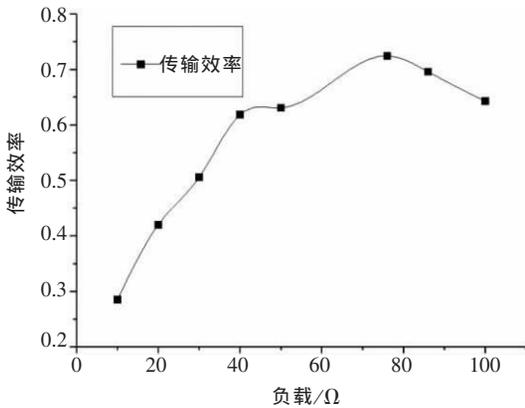


图 4 系统传输效率与负载的关系

Fig.4 Relation between system transmission efficiency and load

也达到最大值,当负载偏离额定负载时,系统输出功率和传输效率均下降,所以负载最好在额定负载附近范围内工作。

4.4 系统功率与工作频率的关系

系统输入功率和输出功率随系统工作频率的变化情况如图 5 所示。从图 5 中可知,当系统工作频率在 100kHz 时,即系统的额定工作频率(即系统的谐振频率)时,系统的输入和输出功率达到最大值,当系统运行频率小于或者大于系统的额定工作频率时,系统功率都会降低,系统功率与频率成正

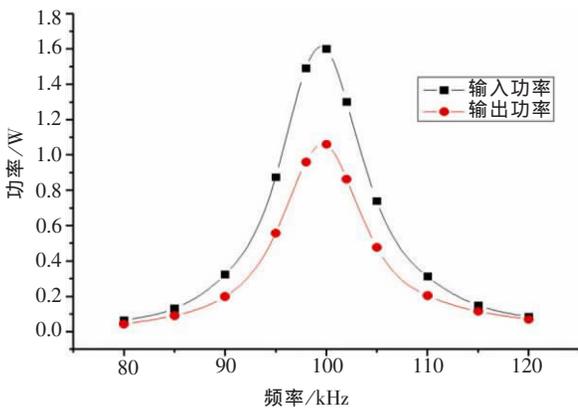


图 5 系统功率与工作频率的关系

Fig.5 Relation between system power and frequency

态分布,在 95kHz 和 105kHz 时,输入功率约为最大值的 55%,输出功率大约为最大值的 60%,因此在实际系统中尽量保持工作频率不要偏离系统的谐振频率,如果偏离,幅度不宜过大,应保持在 5% 范围内。

5 结论

高频变压器是感应能量传输系统的核心部分,考虑变压器损耗和温升,建立了一维涡流损耗模型,在此基础上设计了高频变压器并进行实验研究,得出如下结论。

- (1) 低频时,交流电阻可以用直流电阻来描述,在高频时一维 Dowell 模型可以较精确描述绕组损耗。
- (2) 温度随着功率损耗增大而增加,近似成正比关系。
- (3) 负载最好在额定负载附近范围内工作。
- (4) 实际系统中尽量保持工作频率不要偏离系统的谐振频率。

参考文献:

- [1] 李宏. 感应电能传输-电力电子及电气自动化的新领域[J]. 电气传动, 2001, (2): 62-64.
- [2] 赵同贺. 刘军开关电源设计技术与应用实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [3] 李智华, 罗恒廉. 高频变压器绕组交流电阻和漏感的一维模型[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(2): 55-59.
- [4] Sippola M, Sepponen R E. Accurate prediction of high-frequency power-transformer losses and temperature rise [J]. IEEE Trans. Power Elect., 2002, 17: 835-847.
- [5] Sanjaya Maniktala 著. 开关电源设计与优化[M]. 王志强, 郑俊杰译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [6] 毛行奎, 陈为. 高频开关电源功率变压器优化设计技术[J]. 电气应用, 2005, 24(2): 77-79.
- [7] 赵修科. 开关电源中磁性元器件[M]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2004.

收稿日期: 2007-09-21

作者简介: 刘修泉(1973-), 男, 湖北阳新人, 广州番禺职业技术学院讲师, 研究方向为生物微机电系统和感应能量传输研究;

曾昭瑞(1979-), 男, 江西吉安人, 华南理工大学机械与汽车工程学院硕士生, 研究方向为生物微机电系统;

黄平(1957-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 华南理工大学机械与汽车工程学院教授, 研究方向为微机电系统。

硅钢价格下调

近日, 武钢出台了明年一季度产品价格表, 其中取向硅钢价格下调近 18%。预计在售价不变的前提下, 将提升变压器毛利率 5 个百分点。