

高频链中高频变压器的分析与设计

龙海峰¹, 芮道静², 郭世明¹

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

(2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 高频链逆变技术用高频变压器代替传统逆变器中笨重的工频变压器, 大大减小了逆变器的体积和重量。在高频链的硬件电路设计中, 高频变压器是重要的一环。叙述了高频变压器的设计过程。实验结果证明该设计满足要求。

关键词: 高频链; 高频变压器; 逆变器

Analysis and Design of High-frequency Transformer in High-frequency Link

LONG Hai-feng¹, GUO Dao-jing², GUO Shi-ming¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031 China)

(2. Nanjing Automation Co Ltd, Nanjing Jiangsu 210003 China)

Abstract: By the means of the HF link inverter technique, the heavy and bulky commercial frequency transformers in conventional inverters can be replaced by small HF transformers. Hence, the size and weight of system can be greatly reduced. In HF link, the design of HF transformer is important. The HF transformer's design procedure is described. The experimental results verified that the HF transformer is satisfied.

Keywords: high-frequency link; high-frequency transformer; inverter

中图分类号: TM4 文献标识码: A 文章编号: 0219-2713(2004)04-0197-03

0 引言

MESPELAGE 于 1977 年提出了高频链逆变技术的新概念^[1]。高频链逆变技术与常规的逆变技术最大的不同, 在于利用高频变压器实现了输入与输出的电气隔离, 减小了变压器的体积和重量。近年来, 高频链技术引起人们越来越多的兴趣。

1 概述

图 1 是传统的逆变器框图。其缺点是采用了笨重庞大的工频变压器和滤波电感, 导致效率低, 噪音大, 可靠性差。另外, 谐波含量大, 波形畸变严重, 与要求的优质正弦波相差甚远。

图 2 所示为电压源高频链逆变器的框图, 该

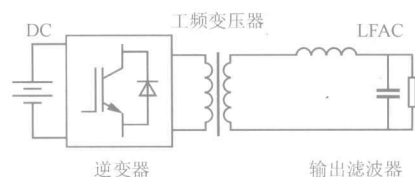


图 1 传统的逆变器

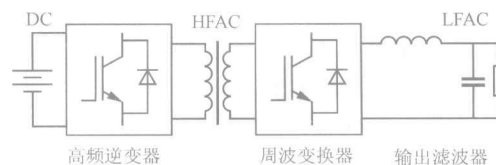


图 2 电压源高频链逆变器

方案是当今研究的最先进方案^[2], 也是本文中采用的方案。采用此方案有其一系列的优点, 诸如, 以小型的高频变压器替代工频变压器; 只有两级功率变换; 正弦波质量高; 控制灵活等。

收稿日期: 2003-10-28

高频变压器是高频链的核心部件，肩负着隔离和传输功率的重任，其性能好坏直接决定逆变器的性能好坏。不合格的变压器温升高，效率低，漏感严重，输出波形畸变大，直接影响电路的稳定性和可靠性，甚至损坏开关器件，导致实验失败。

2 高频变压器的设计

设计高频变压器首先应该从磁芯开始。开关电源变压器磁芯多是在低磁场下使用的软磁材料，它有较高磁导率，低的矫顽力，高的电阻率。磁导率高，在一定线圈匝数时，通过不大的激磁电流就能承受较高的外加电压，因此，在输出一定功率要求下，可减轻磁芯体积。磁芯矫顽力低，磁滞面积小，则铁耗也少。高的电阻率，则涡流小，铁耗小。各种磁芯物理性能及价格比如表1所列。铁氧体材料是复合氧化物烧结体，电阻率很高，适合高频下使用，但 B_s 值比较小，常使用在开关电源中。本文采用的就是铁氧体材料。

表1 各种磁芯特性比较表

磁芯类型	非晶合金	薄硅钢片	坡莫合金	铁氧体
铁损	低	高	中	低
磁导率	高	低	高	中
饱和磁密	高	高	中	低
温度影响	中	小	小	中
加工	难	易	易	易
价格	中	低	中	低

高频变压器的设计通常采用两种方法^[3]：第一种是先求出磁芯窗口面积 A_w 与磁芯有效截面积 A_e 的乘积 A_p ($A_p = A_w \times A_e$ ，称磁芯面积乘积)，根据 A_p 值，查表找出所需磁性材料之编号；第二种是先求出几何参数，查表找出磁芯编号，再进行设计。本文详细讨论如何用 A_p 法设计高频变压器。

原边 N_p 匝，副边 N_s 匝的变压器，在 N_p 匝上以电压 V_1 开关工作时，根据法拉第定律，有

$$V_1 = K_t f_s N_p B_w A_e \quad (1)$$

式中： K_t 为波形系数，即有效值和平均值之比，正

弦波为 4.44，方波为 4；

f_s 为工作频率；

B_w 为工作磁通密度。

$$N_p = \frac{V_1}{K_t f_s B_w A_e} \quad (2)$$

铁芯窗口面积 A_w 乘以窗口使用系数 K_0 (一般取 0.4) 为有效面积，该面积为原边绕组 N_p 占据的窗口面积 $N_p A_p'$ 与副边绕组 N_s 占据的窗口面积 $N_s A_s'$ 之和，即

$$K_0 A_w = N_p A_p' + N_s A_s' \quad (3)$$

式中： A_p' 及 A_s' 分别为原、副边绕组每匝的截面积。

每匝所占用面积与流过该匝的电流值 I 和电流密度 J 有关，如式(4)所示。

$$A_p' = \frac{I_1}{J}$$

$$A_s' = \frac{I_2}{J} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)，则得

$$K_0 A_w = \frac{V_1}{K_t f_s B_w A_e} \frac{I_1}{J} + \frac{V_2}{K_t f_s B_w A_e} \frac{I_2}{J}$$

$$\text{即 } A_w A_e = \frac{V_1 I_1 + V_2 I_2}{K_0 K_t f_s B_w J} \quad (5)$$

电流密度 J 直接影响到温升，亦影响到 $A_w A_e$ ，其关系可用式(6)表示。

$$J = K_J (A_w A_e)^X \quad (6)$$

式中： K_J 为电流密度系数；

X 为常数，由所用磁芯确定。

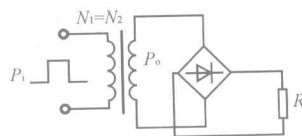
若变压器的视在功率 $P_T = V_1 I_1 + V_2 I_2$ ，则

$$A_w A_e = \frac{P_T}{K_0 K_t f_s B_w J (A_w A_e)^X}$$

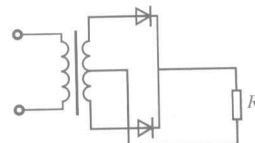
$$\text{即 } A_p = \left(\frac{P_T \times 10^4}{K_0 K_t f_s B_w K_J} \right)^{\frac{1}{1+X}} \quad (7)$$

式中： A_p 单位为 cm^4 ，其余的单位为国际单位制。

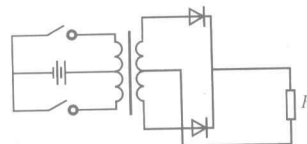
视在功率随线路结构不同而不同。如图3所示。



(a) 二次桥式整流



(b) 二次全波整流



(c) 一次推挽二次半波整流

图3 视在功率与线路结构关系

变压器效率为 η ，则在图3(a)中

$$P_T = P_o + P_i = P_o + \frac{P_o}{\eta} = P_o \left(1 + \frac{1}{\eta} \right)$$

在图3(b)中

$$P_T = P_o \left(\frac{1}{\eta} + \sqrt{2} \right)$$

在图 3(c) 中

$$P_T = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) \sqrt{2}$$

本文采用图 3(b) 的结构, $V_{DC} = 24 \text{ V}$, $P_o = 250 \text{ W}$, 设 $\eta = 0.95$, 则

$$P_T = P_o \left(\frac{1}{\eta} + \sqrt{2} \right) \approx 617 \text{ W}$$

若采用 E 型磁芯, 允许温升 25°C , 则有 $K_J = 323$, $X = -0.14$ 。饱和磁密约为 0.35 T , 考虑到高温时饱和磁密会下降, 同时, 为了防止合闸瞬间高频变压器饱和, 取饱和磁密的 $1/3$ 为变压器的工作磁密, 即 $B_w = 0.117 \text{ T}$ 。工作频率为 20 kHz , 由式(7) 可得

$$A_p = \left(\frac{P_T \times 10^4}{K_J K_f B_w K_J} \right)^{\frac{1}{1+X}} \approx 6.65 (\text{cm}^4)$$

取 10% 的裕度, 即 $A_p = 6.65 \times (1 + 10\%) \approx 7.28 \text{ cm}^4$, 查手册选取 E17 铁氧体磁芯, 其 $A_w = 2.56 \text{ cm}^2$, $A_e = 3.80 \text{ cm}^2$, $A_p = 9.73 \text{ cm}^4$, 满足要求。

确定磁芯材料后, 则其他参数计算如下:

1) 原边绕组匝数 N_p

$$N_p = \frac{V_1}{K_f B_w A_s} \approx 7 \text{ 匝};$$

2) 原边电流 I_p

$$I_p = \frac{P_o}{V_{DC} \eta} \approx 10.96 \text{ A};$$

3) 电流密度 J

$$J = K_J (A_w A_e)^x = 234.9 \text{ A/cm}^2;$$

4) 原边绕组裸线面积 A_{XP}

$$A_{XP} = \frac{I_p}{J} \approx 0.04666 \text{ cm}^2;$$

5) 副边绕组匝数 N_s 逆变器工作时占空比

$D = 0.75$, 幅值为 $\sqrt{2} 220 \text{ V}$, 则

$$N_s = \frac{N_p V_2}{D V_1} = 120.99 \approx 121 \text{ 匝}$$

6) 副边绕组裸线面积 A_{XS} 注意中间抽头变压器 I_s 须乘 0.707 的校正系数, 则

$$A_{XS} = \frac{I_o \times 0.707}{J} = \frac{P_o \times 0.707}{V_o \times J} = \frac{250 \times 0.707}{220 \times 234.9} = 0.00342 \text{ cm}^2.$$

3 实验结果

实验采用图 3(b) 的结构, 参数如下:

输入电压 DC 24 V;

开关频率 20 kHz;

占空比 $D = 0.75$;

输出电压 AC 220 V;

输出功率 250 W;

输出频率 50 Hz;

变压器磁芯 E17 铁氧体磁芯;

原边绕组匝数 7 匝;

副边绕组匝数 121 匝。

该高频链工作稳定可靠, 噪声很小, 实验结果证明该高频变压器满足实际要求。

4 结语

1) 设计中, 在最大输出功率时, 磁芯中的磁感应强度不应达到饱和, 以免在大信号时产生失真。

2) 在瞬变过程中, 高频链漏感和分布电容会引起浪涌电流和尖峰电压及脉冲顶部振荡, 使损耗增加, 严重时会造成开关管损坏。同时, 输出绕组匝数多, 层数多时, 应考虑分布电容的影响, 降低分布电容有利于抑制高频信号对负载的干扰。对同一变压器同时减少分布电容和漏感是困难的, 应根据不同的工作要求, 保证合适的电容和电感。

3) 本文采用的工作频率为 20 kHz, 由于工作频率较高, 趋肤效应影响比较大, 因此, 在设计时应注意趋肤效应引起的有效面积的减少。

参考文献

- [1] Sspelage P M, Bose B K. High Frequency Link Power Conversion[J]. *IEEE Trans on IA*, 1977, 13(5): 388 - 394.
- [2] Yamato I Kuo, New Conversion System for UPS Using High Frequency Link[A]. *IEEE PESC[C]*. 1989: 658 - 663.
- [3] 张占松. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [4] 电子变压器专业委员会. 电子变压器手册[Z]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1998.

作者简介

刘海峰 (1977 -), 男, 西南交通大学电力电子专业在读硕士生, 研究方向为开关电源技术及应用。

吴道静 (1976 -), 男, 国电南京自动化股份有限公司工程师。

郭世明 (1954 -), 男, 西南交通大学教授, 研究领域为计算机应用技术与故障诊断。