

纳米晶合金材料在高频逆变电源中的应用

李玉山

(秦皇岛职业技术学院机电工程系, 秦皇岛 066004)

摘要 纳米晶合金材料的产生和发展推动了高频逆变电源技术的进步, 使电源变压器铁芯具有优良的高频电磁性能。从噪声问题、脆性问题、一致性问题以及关于功率变压器的磁芯规格选择设计问题等几个方面讨论了在高频逆变电源中如何恰当地使用纳米晶合金材料。

关键词 纳米晶合金材料 高频逆变电源 纳米晶磁芯功率变压器 共模电感 尖峰抑制器

Application of Nanocrystalline Alloy Material in High Frequency Inverter Power Supply

LI Yushan

(Department of Electrical and Mechanical Engineering, Qinhuangdao Vocational & Technical College, Qinhuangdao 066004)

Abstract The nanocrystalline alloy material's production and development accelerate the development of high-frequency inverter power technology, allowing the power transformer core to have excellent high-frequency electromagnetic properties. In this article how nanocrystalline alloy material is properly used in high frequency inverter power supply in terms of solution to noise, fragility, conformity, as well as core specification selection and design of power transformers are discussed.

Key words nanocrystalline alloy materials, high-frequency inverter power, nanocrystalline core power transformers, common mode inductors, peak suppressor

电源技术是一种应用功率半导体器件, 综合电力变换技术、现代电子技术、自动控制技术的多学科的边缘交叉技术。随着科学技术的发展, 电源技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关。目前电源技术已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。它对现代通讯、电子仪器、计算机、工业自动化、电力工程、国防及某些高新技术提供高质量、高效率、高可靠性的电源起着关键的作用。电源技术的精髓是电能变换, 即利用电能变换技术, 将市电一次电源变换成适用于各种用电对象的二次电源。逆变开关电源在电源技术中占有重要地位, 从 20kHz 发展到高稳定度、大容量、小体积、开关频率达到兆赫级的高频开关电源, 为高频变换提供了物质基础, 促进了现代电源技术的繁荣和发展。高频化带来的最直接的好处是降低了原材料消耗, 电源装置小型化, 加快了系统的动态反应, 进一步提高了电源装置的效率, 但对材料在高频下的电磁性能提出了更高的要求。

1 纳米晶软磁合金材料的性能

纳米晶软磁合金磁芯作为元器件, 装备了现代电源技术, 促进了产品的升级换代, 使变压器的能量密度大幅度提升。这是由于采用纳米晶合金材料制作器件磁芯具有较高的饱和磁感应强度(1.1~1.2T)、高磁导率、低矫顽力、低损耗及良好的稳定性、耐磨性、耐蚀性, 同时具有较佳的性价比。用于制作微晶铁芯的材料被誉为“绿色材料”, 广泛应用于取代硅钢、坡莫合金及铁氧体, 可作为各种形式的高频(20~

100kHz)开关电源中的大中小功率的主变压器、控制变压器、波电感、储能电感、电抗器、磁放大器、饱和电抗器磁芯、EMC 滤波器共模电感和差模电感磁芯、IDSN 微型隔离变压器磁芯, 也广泛应用于各种相应精度的互感器磁芯。

纳米晶材料同时具备了硅钢、坡莫合金、铁氧体的如下优点。(1)高磁感, 饱和磁感 $B_s=1.2T$, 是坡莫合金的 1 倍, 铁氧体的 2.5 倍。铁芯(性能特点见表 1)功率密度大, 可达 15~20kW/kg。(2)高磁导率, 静态初始导磁率 μ_0 高达 $(1.2\sim1.4)\times 10^5$, 与坡莫合金相当。用于功率变压器铁芯的磁导率是铁氧体的 10 多倍, 大大降低了激磁功率, 提高了变压器的效率。(3)低损耗, 在 20~50kHz 频率范围是铁氧体的 1/2~1/5, 降低了铁芯温升。(4)居里温度高, 纳米晶材料的居里温度达 570℃, 铁氧体的居里温度仅为 180~200℃。

表 1 纳米晶(超微晶)铁芯性能特点
Table 1 The properties of nanocrystalline core

基本参数	纳米晶(超微晶)铁芯
铁损(20kHz/0.5T)/(W/kg)	≤20
导磁率 $ \mu (20kHz)/(Gs/Oe)$	10000~20000
饱和磁滞伸缩 $\lambda_s/(\times 10^{-6})$	2
饱和磁感 B_s/T	1.25
剩余磁感 B_r/T	0.07~0.15
矫顽力 $H_c/(A/M)$	≤1.60
电阻率 $\mu/(\Omega\cdot cm)$	130
居里温度/℃	570
铁芯填充系数	≥0.7

李玉山: 男, 1966年生, 硕士, 副教授, 主要研究方向为机械设计、数控加工、软磁合金材料应用研究等

2 纳米晶合金磁芯变压器的优点

由于纳米晶合金磁芯具备上述性能特点,以纳米晶合金材料作为磁芯的变压器应用在逆变电源上,对减小电源体积、提高能量密度和工作可靠性起到了很大的作用。纳米晶合金磁芯变压器能量密度高、可靠性好主要表现在以下几个方面。

(1) 损耗小,变压器温升低,长期实际使用证明,纳米晶变压器磁芯的温升远远低于 IGBT 管的温升,并且也低于变压器绕组铜线的温升。

(2) 铁芯磁导率高,降低了激磁功率,减小了铜损,提高了变压器的效率。变压器的初级电感大,减小了电流在开关时对 IGBT 管的冲击。

(3) 工作磁感高,功率密度大,可达到 15kW/kg。铁芯体积减小,特别是大功率逆变电源,体积减小使得机箱内空间增大,有利于 IGBT 管的散热。

(4) 变压器的过载能力强,由于工作磁感选择在饱和磁感的 40%左右,当过载发生时,仅由于磁感增高产生发热,而不会因铁芯饱和而损坏 IGBT 管。

(5) 纳米晶材料的居里温度高,假设温度达到 100℃以上时,铁氧体变压器已经不能工作,纳米晶变压器完全可以正常工作。

正是因为纳米晶合金材料的这些优点,目前纳米晶合金磁芯已经广泛应用在逆变焊机、通信电源、电镀电解电源、感应加热电源、充电电源等领域,今后几年还会有更大幅度的增加。

3 应用纳米晶软磁合金材料需要注意的几个问题

纳米晶合金材料毕竟是软磁材料中的新成员,在实践应用中难免会出现一些问题,在一定程度上对推广应用带来负面影响,从而引起了关注。因此,解决好这些问题是提升高频逆变电源质量的关键。

3.1 噪声问题

尤其是纳米晶磁芯功率变压器,有时会有刺耳的啸叫声。原因是多方面的,主要是材料本身磁致伸缩系数的影响,纳米晶的成分不同,磁致伸缩系数就不同。针对不同用途应采用不同成分的纳米晶材料,特别是低致滞伸缩、低损耗、高性能新成分功率变压器用纳米晶合金带材的问世,从根本上解决了噪音问题。因此,作为功率输出变压器、电流互感器、共模电感等不同器件,都应由专用成分的纳米晶合金材料制造。根据使用条件调整合金成分后,降低了磁致伸缩系数,噪声问题已经大大改善;其次,是铁芯卷绕松紧的原因,这与使用的带材质量有很大关系,带材尺寸偏差、厚薄不均匀都会造成铁芯卷绕不紧,容易产生噪声。调整成分后,钢水流动性好,有利于提高带材的成型质量,在带材厚度均匀方面也为降低铁芯噪声提供了有利保证。再次,噪声也与逆变电路方面的问题有关,器件之间耦合也会引起噪声。实验证明,噪声随工作磁感的提高而增大。有人在电路上采取了隔直措施,使用纳米晶铁芯多年来没有出现噪声问题。

通过以上的改进,噪声问题基本可以得到有效控制。

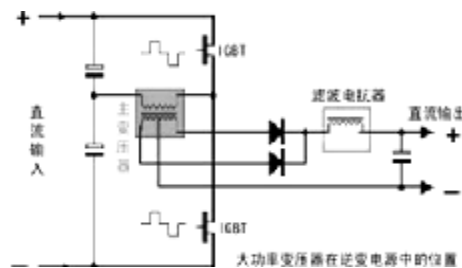


图 1 变压器及滤波电抗器在逆变电源中的位置
Fig.1 Transformer and filter reactor in the inverter power supply position

3.2 脆性问题

纳米晶铁芯的脆性主要反应在铁芯掉渣,是使用中的一大难题,不仅安装操作麻烦,而且存在给电路造成短路的隐患。经过多年的实践、研究,笔者认为脆性问题可以通过对成分、工艺的调整得到大大改善。成分调整后,带材的柔韧性显著改善,同时带材厚度的减薄也降低了脆性。此外在制造铁芯的工艺上,对铁芯浸注无应力胶,也使得铁芯不易破碎,彻底解决了铁芯的掉渣脆性问题。同时,由于无应力胶将铁芯带材的层间隙固定,使其不易产生共振,进一步减少了噪声产生的机会。

3.3 一致性问题

一致性跟生产设备的容量及生产规模有关。从带材的质量看,一台 500kg 产量的设备和一台 50kg 产量的设备比较,同样生产 500kg 带材,显然前者产品在成分、磁性能的一致性方面要好于后者。生产过程中的热处理也是一样。所以生产规模大、生产设备容量大对产品一致性有利。

纳米晶合金材料的一致性差,主要表现在饱和电压和电感量离散性大,有时会相差 1 倍多。主要原因是磁场热处理的效果差、生产检验没有分类筛选。随着用于功率变压器的合金材料成分的调整,不仅改善了脆性,而且降低了材料的剩余磁感应强度,因此,提高了磁场热处理的效果,增大了铁芯的饱和电压,对产品一致性起到了积极重要的作用。

对逆变电源所要求的磁性能有一个逐步认识过程,前几年,由于用量较小,只强调损耗达到要求就可以了。所以,性能检验只测量损耗这 1 个参数。对特定的用户,应增加检验感应电压值。随着应用量越来越大,各种各样的要求随之被提出,尤其是性能一致性的要求特别突出。由于对这种要求有一个认识过程,所以无论在成分改进、生产组织、测试标准等方面,都有些滞后,因此对推广应用有一定影响。现在这个问题得到了足够的认识,并采取了多种有效措施,产品一致性已大大提高。

3.4 关于功率变压器的磁芯规格选择设计问题

图 2 为某种型号的功率变压器,通常是按式(1)计算选择磁芯规格:

$$V = 4.44fNBS \times 10^{-8}, IN = S_w(100/2)(1/3)j \quad (1)$$

其中: 2 是考虑有 2 个绕组——原、付绕组,两者各占总面积的 1/2, 3 为占空系数, 100 为 cm^2 换为 mm^2 的关系, 因

为 j 的单位为 mm^2 , S_w 的单位为 cm^2 。

由式(1)可以得到变压器的大小,也就得到铁芯的大小:

$$V_1 = 0.7fS_cS_wB_mj \times 10^{-6} \quad (2)$$

其中: j 为铜线的电流密度,一般选 $3 \sim 8\text{A}/\text{mm}^2$; S_w 为铁芯的窗口面积(cm^2); S_c 为铁芯的截面积(cm^2); B 为工作磁感(Gs); f 为频率(Hz); 对单端脉冲式 $B=B_m - B_r$, 对于全桥式 $B=B_m - (-B_m)=2B_m$, B_m 为工作点。

在实际应用中, B_m 的选择和确定是用好式(2)的关键,工程技术人员往往按照纳米晶的理论磁化曲线来选择和确定 B_m , 忽略了纳米晶磁芯电磁性能的离散性,导致设计计算出入很大。为解决好这一问题,可以对磁芯按照电磁性能的不同来分组,每组性能接近。没有条件每只磁芯都进行测量磁化曲线的,可以测量饱和电压,这样分组也比较直观。

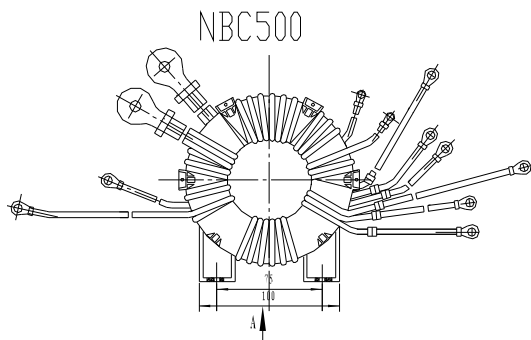


图2 NBC500型变压器
Fig.2 Transformer NBC500

3.5 纳米晶磁芯在共模电感中的应用

采用纳米晶磁芯制作共模电感(亦称共模扼流圈)时,只须绕很少的匝数即可获得很大的电感量,从而降低了铜损,节省了线材,减小了共模电感的体积。用纳米晶磁芯制成的共模电感具有很高的共模插入损耗,能在很宽的频率范围内对共模干扰起抑制作用,因而不需要使用复杂的滤波电路。

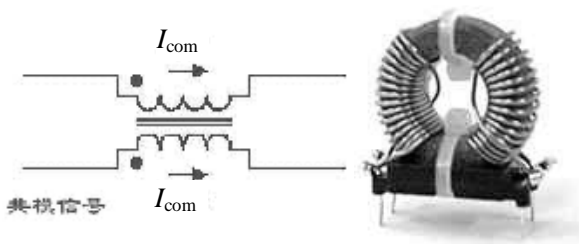


图3 共模电感
Fig.3 Common-mode inductance

3.6 纳米晶磁芯在 EMI 滤波器中的应用

由 VAC 公司生产的钴基纳米晶磁芯 VITROVAC6025Z 可广泛用于开关电源的 EMI 滤波器中,能有效地抑制由电流快速变化所产生的尖峰电压。在纳米晶磁芯上绕 1 圈或几圈铜线,即可制成一个尖峰抑制器,其构造非常简单,而且对噪声干扰的抑制效果非常好。

VITROVAC6025Z 纳米晶磁芯具有极低的磁芯损耗和很高的矩形比,当电流突变为 0 时呈现出很大的电感量,能对整流管的反向电流起到阻碍作用。由尖峰抑制器构成 EMI

滤波器的电路如图 4 所示。D1 为输出整流管, D2 为续流二极管。在 D1、D2 上分别串联 1 个尖峰抑制器。L 为储能电感, C 为滤波电容。不加尖峰抑制器时通过整流管的电流波形如图 5(a)所示, I_F 、 I_R 分别代表整流管的正向工作电流和反向工作电流, t_{rr} 代表反向恢复时间。由图 5(b)可见,整流管在反向工作区域会产生尖峰电流,而接入尖峰抑制器后,尖峰电流就被抑制了。

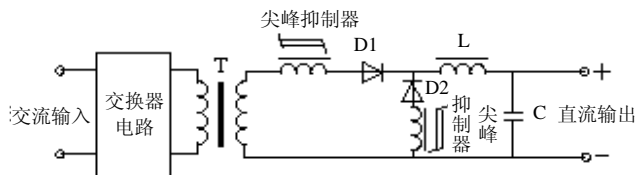


图4 由尖峰抑制器构成 EMI 滤波器的电路

Fig.4 Posed by the peak suppressor circuit EMI filter

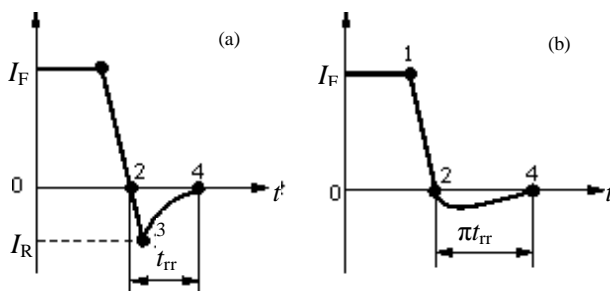


图5 2种情况下通过整流管电流波形的比较

Fig.5 Both cases through the rectifier current waveform comparison

尖峰抑制器典型的磁滞回线如图 6 所示,在到达工作点 1 之前(电流导通时),磁芯处于饱和状态,具有非常低的电感量;当电流关断,即到达工作点 2(亦称剩磁点)时,由于整流管存在反向恢复时间,使得电流继续沿着负的方向减小,但微晶磁芯具有非常高的磁导率,这时会呈现很大的电感量,所以它不会经过理论工作点 3(该点本应对应于出现反向尖峰电流 I_R 的时刻),而是直接到达工作点 4(即反向剩磁点),然后又被磁化开始另一循环。这种抑制整流管尖峰电流的特性被称为“软恢复”。图 6 中的 I_{Fe} 为激励电流。

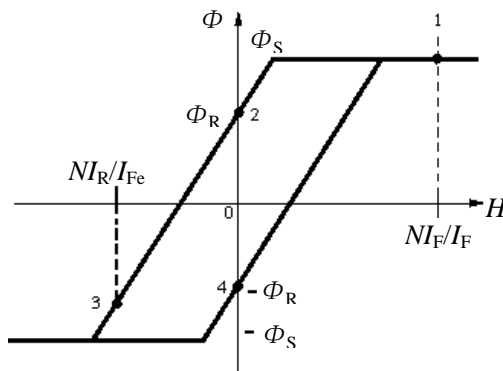


图6 尖峰抑制器的磁滞回线

Fig.6 Peak of the hysteresis loop suppressor

下面介绍设计尖峰抑制器的公式。若令整流管的反向恢复时间为 $t_{rr}(s)$, 反向电压为 $U_R(V)$, 通过整流管的电流为 $I_F(A)$, 则尖峰抑制器必须满足下述条件:

$$\Phi \cdot S \geq 1.5 t_{\pi} U_R I_F \quad (1)$$

式中： Φ 为磁通； S 为磁芯的绕线面积。

计算铜导线线径的公式为：

$$D = \sqrt{\frac{4 I_F}{\pi S}} \cdot \pi \quad (2)$$

$$\text{所需绕制的匝数为：} N > \pi t_{\pi} U_R / \Phi \quad (3)$$

4 应用前景

随着电力电子技术的发展和成熟，人们逐渐认识到磁性元件不仅是电源中的功能元件，同时其体积、重量、损耗在整机中也占相当比例。据统计，磁性元件的重量一般是变换器总重量的30%~40%，体积占总体积的20%~30%，对于模块化设计的高频逆变电源，磁性元件的体积、重量所占的比例还会更高。另外，磁性元件还是影响电源输出动态性能和输出纹波的一个重要因素。因此，要提高电源的功率密度、效率和输出品质，就应对减小磁性元件的体积、重量及损耗的相关技术进行深入研究，选择合适的软磁材料以满足电源发展的需要。越来越多的人认识了非晶、纳米晶材料，除了变压器以外，非晶、纳米晶材料还可以作为互感器、电抗器、传感器、滤波器等器件的铁芯材料应用到高频逆变电源中，范围涉及到家用电器、直流变频空调、电力系统控制电源、电力机车逆变电源以及航天、航空、航海等多项军工和国家高科技领域。

纳米晶软磁材料由于它的优异电磁特性，在不同领域弥补了硅钢和铁氧体材料的不足，使各类逆变电源提高到一个

新水平，效率的提高取得了明显的节能效果，新材料显示了朝气蓬勃的生命力。

参考文献

- 1 孙筱琳, 李国勇, 王志海. [J]. 动化技术与应用, 2008, (6):53
- 2 黎建荣. [J]. 科技信息, 2007, (29): 89
- 3 杜贵平, 黄石生. [J]. 佛山科学技术学院学报, 2005, (6):26
- 4 刘芝福, 李学勇, 高思远. [J]. 现代电子技术, 2008, (19):63
- 5 杨磊, 严彪, 陈成澍. [J]. 同济大学学报, 2006, (8): 1084
- 6 程韬波, 杜贵平. [J]. 电工技术, 2004, (11):55
- 7 李志勇, 陈孝文, 张德芬. [J]. 金属功能材料, 2007, (8): 28
- 8 纪松, 钱坤明, 张彦松, 等. [J]. 兵器材料科学与工程, 2005, (1):51
- 9 Ruthner M J. Advances in ferrites[C]//Proc ICF-7. France, 1996:53
- 10 Yoshizawa Y, et al. [J]. Appl Phys, 1988, 64(10):6044
- 11 Hilzinger H R. [J]. J Magn Magn Mater, 1990, 83:370
- 12 Chen W Z, et al. [J]. Mater Sci Eng, 1994, B34:204
- 13 Herzer G. Soft magnetic nanocrystalline materials[C]// Proc Int Symp on 3D Transition-Semimetal Thin Films. Sendai, Japan, 1991:130
- 14 Herzer G. [J]. Mater Sci Eng, 1991, A133:1
- 15 Hirage K, et al. [J]. Mater Trans JIM, 1991, 33(9):868