

大功率非晶态变压器磁偏饱和的预防方法*

孙梅生 徐小鹏 卢 威 方星豪

(清华大学自动化系, 北京 100084)

(2002 年 7 月 9 日收到, 2002 年 8 月 15 日收到修改稿)

概述了非晶态材料的基本特性, 深入分析了大功率非晶态变压器出现磁偏移饱和现象的原因, 提出了幅值递增法, 脉宽递增法和电流积分调宽法等预防磁偏饱和的方法.

关键词: 非晶态磁偏饱和, 幅值递增法, 脉宽递增法, 电流积分调宽法

PACC: 7550

1. 引 言

多年来在原油电脱水、稠油热采、电脉冲除尘、 O_3 发生器和脉冲电镀等领域, 常需要用中频变压器获得大功率高压中频(例如 100kVA, 50kV, 1000Hz)脉冲电源或低压大电流中频(例如 24V, 2000A, 1500Hz)脉冲电源, 其功率一般在 30 至 300kVA 范围内. 由于功率大, 而且频率较高, 用冷轧硅钢片或铁氧体作为这类变压器的磁性材料, 难以令人满意. 自从非晶态材料^[1]开始工业应用以来, 人们开始用非晶态材料研制大功率中频变压器^[2]. 然而非晶态材料具有特殊的磁性能^[3], 容易出现磁偏移饱和, 导致不能正常工作. 本文作者在研制 100kVA/2kHz 非晶态变压器^[4]期间, 深入分析了非晶态变压器磁偏^[5]饱和的成因, 并采取了恰当的预防对策, 获得成功, 而且已在稠油采集电加热特种变频器中实施工业应用.

于超急冷凝, 原子来不及有序排列, 非晶态合金没有晶粒和晶界存在, 因而具有特殊的物理性能. 与用于变压器的传统软磁材料相比, 它具有综合磁性能^[7]好等优点. 表 1 列出三种磁性材料^[8]的主要性能数据, 这三种材料的磁感应强度 B 与磁场强度 H 的关系如图 1 所示.

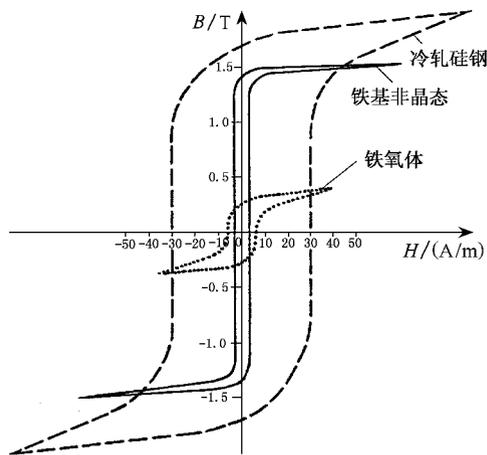


图 1 三种磁性材料的 $B-H$ 曲线示意图

2. 非晶态材料的基本特性

非晶态材料^[6]是特种钢液以约 10^6 °C/s 速率降温超急凝固, 一次薄带成型得到的非晶态合金. 由

表 1 三种磁性材料主要参数表

性能 材 料	最大相对 磁导率/ 10^4	矫顽力(A/m)	剩余磁感 应强度/T	饱和磁感 应强度/T	电阻率 / $M\Omega \cdot cm$	1.0T 和 1kHz 条件下 铁芯损耗(W/kg)
铁基非晶态	45	3	0.9	1.5	130	4
冷轧硅钢片	4	30	50	2	50	20
铁氧体	1	6	0.1	0.4	10^6	不能在 1.0T 条件下工作

* 211 工程 基金(批准号 [1996]498) 资助的课题.

3. 初始磁偏饱和现象与原因

我们在稠油采集电加热科研项目中选用非晶态材料^[9]作为 100kVA 特种变频器(其主要原理电路如图 2 所示)的输出变压器 T_{OUT} 的铁芯材料,正常工作 时变频器输出双极性方波(波形如图 3(a)所示),送给 T_{OUT} 原边.实验时曾在带额定负载、 $U_{DC} = 500V$ 和 $u_1 = 0$ 静态条件下启动主控电路,期望 T_{OUT} 原边的

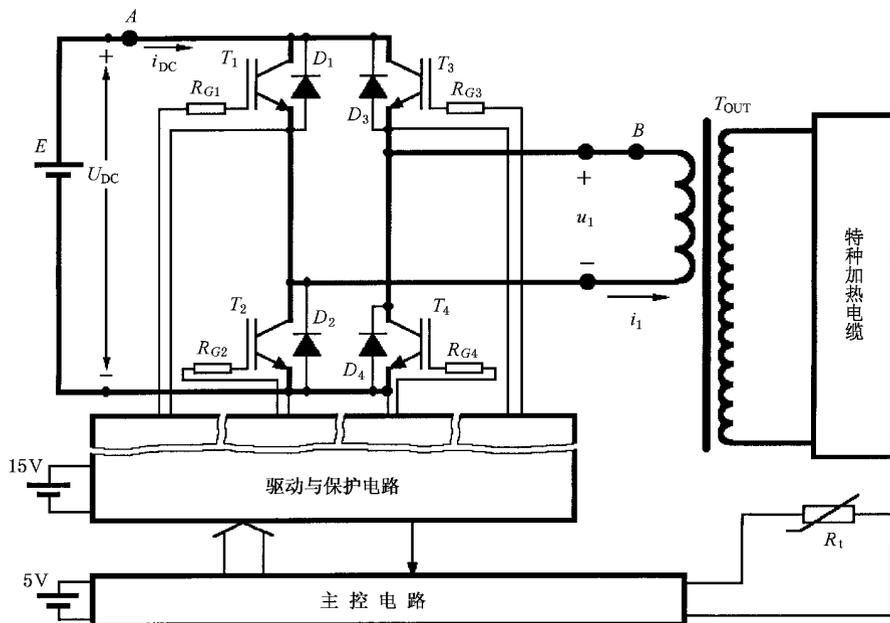


图 2 100kVA 特种变频器主电路基本原理图

$$U_1 = 4f_w N_1 B_w A_c, \quad (1)$$

计算变压器原边绕组匝数等参数时,曾取工作磁感应强度 $B_w = \Delta B = +0.75B_m - (-0.75B_m) = 1.5B_m$.如此设计,不仅可提高效率,而且在稳态条件下磁感应强度 B 在 $+0.75B_m$ 与 $-0.75B_m$ 之间变化,可以正常工作,并留有裕量.但在合闸上电启动之前,变压器的磁感应强度 $B = 0$,带额定负载启动后很快会出现 $B > B_m$,即出现磁饱和,因此引起过电流保护电路动作.此现象可称为“初始磁偏饱和”.为了避免出现这种现象,启动时应当设法使 B 经过由小到大逐渐变化的过渡过程后再进入稳态工作.

4. 初始磁偏饱和的预防方法

4.1. 幅值递增法

避免出现初始磁偏饱和的方法之一是在母线电

电压 u_1 波形如图 3(a)所示,但实验结果没有出现这种波形,而是过电流保护电路动作(其动作临界电流为 400A,响应时间为 $5\mu s$),逆变电路停止正常工作,观察数字存储示波器记录的 T_{OUT} 原边电流瞬时值波形,它如图 3(b)所示.分析其原因,出现这种现象是“初始磁偏饱和”所致.具体而言,设计变压器按法拉第定律

压接近于零的条件下启动主控电路,使图 2 中 IGBT (绝缘栅双极型三极管) T_1 和 T_4 与“ T_2 和 T_3 ”轮流导通各半个周期,然后让母线电压逐渐增大,使变压器原边电压 u_1 按下式描述的规律变化:

$$u_1 = \begin{cases} +\frac{n}{200} U_{DC} & [nT < t < (n+0.5)T, \\ & 0 \leq n < 200], \\ -\frac{n}{200} U_{DC} & [(n+0.5)T < t < (n+1)T, \\ & 0 \leq n < 200], \\ +U_{DC} & [nT < t < (n+0.5)T, \\ & n \geq 200], \\ -U_{DC} & [(n+0.5)T < t < (n+1)T, \\ & n \geq 200], \end{cases}$$

式中 n 为整数,该式描述的 u_1 的波形如图 3(c)所示.显然,为了实施上述方法,需在图 2 中 A 点处增加幅值自动调节电路,虽然可行,但会使电路复杂,

并增加成本, 因此可考虑选用下述脉宽递增法。

上不需要增加硬件和生产成本。

5. 累积磁偏饱和现象

用上述方法实现磁感应强度软启动后, 可测出稳态时非晶态变压器原边电流 i_1 的波形如图 4(a) 所示。然而在稳态工作一段时间后, T_{OUT} 原边电流 i_1 的波形有时会发生变化, 例如出现图 4(b) 所示波形中的尖峰, 这种电流尖峰有时会越来越来大, 严重时会引起过电流保护电路动作, 造成停机。分析其原因是每个工作周期内 T_{OUT} 原边电流 i_1 的平均值不恒等于零。 i_1 的大小与图 2 所示电路中 U_{DC} 的瞬时值 u_{DC} , T_1 至 T_4 导通压降和特种加热电缆的等效阻抗实时值 Z_L 等多项因素有关, 其函数关系可表示为

$$i_1 = F_1(u_{DC}, U_{ONT_1}, U_{ONT_2}, U_{ONT_3}, U_{ONT_4}, Z_L \dots),$$

式中 $U_{ONT_1}, U_{ONT_2}, U_{ONT_3}$ 和 U_{ONT_4} 分别为 T_1, T_2, T_3 和 T_4 的导通压降, u_{DC} 的瞬时值与电网电压波动、三相不平衡程度和高次谐波有关。

由图 4 所示波形可知, 在 N 个工作周期 NT 时间内, i_1 的平均值 $(i_1)_{AV}$ 与 i_1 的函数关系为

$$(i_1)_{AV} = \frac{1}{NT} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\int_{nT}^{(n+0.5)T} i_1 dt + \int_{(n+0.5)T}^{(n+1)T} i_1 dt \right]. \quad (2)$$

由于图 2 所示电路中“ T_1 和 T_4 同时导通 ”转换到

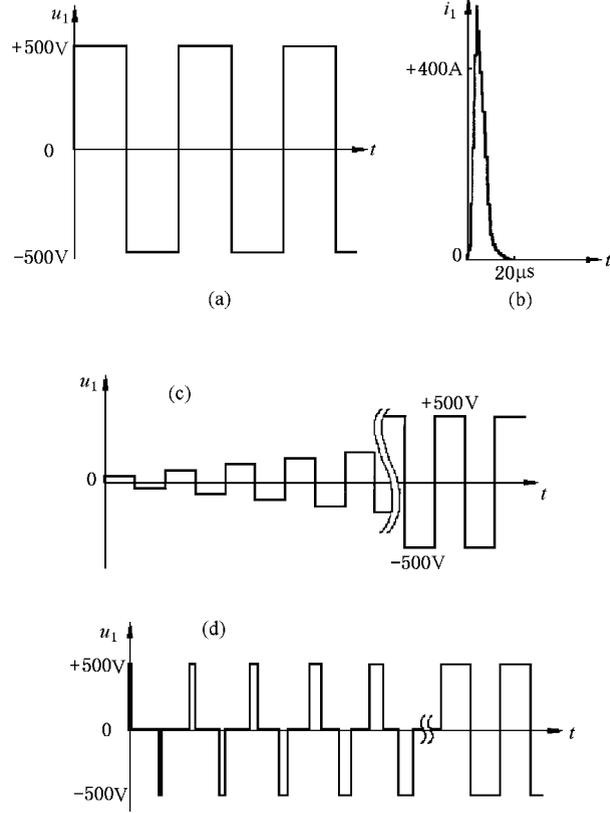


图 3 输出变压器原边电压和电流波形示意图

4.2. 脉宽递增法

脉宽递增法是从启动时刻起, 主控制器自动控制 T_{OUT} 原边电压 u_1 的双极性脉冲宽度 t_w 由零逐渐增大到 $0.5T$, 即 u_1 按下式描述的规律变化(设 $T = 500\mu s$):

$$u_1 = \begin{cases} +U_{DC} & [(n-1)T < t < (n-1)T + 0.002nT, \rho < n < 250 \text{ 或者 } (n-1)T < t < (n-0.5)T, n \geq 250], \\ 0 & [(n-1)T + 0.002nT < t < (n-0.5)T \text{ 或者 } (n-0.5)T + 0.002nT < t < nT, \rho < n < 250], \\ -U_{DC} & [(n-0.5)T < t < (n-0.5)T + 0.002nT, \rho < n < 250 \text{ 或者 } (n-0.5)T < t < nT, n \geq 250], \end{cases}$$

式中 n 为整数, 该式描述的 u_1 的波形如图 3(d) 所示。实验证明脉宽递增法与幅值递增法一样可以有效地避免出现初始磁偏饱和, 而且脉宽递增法基本

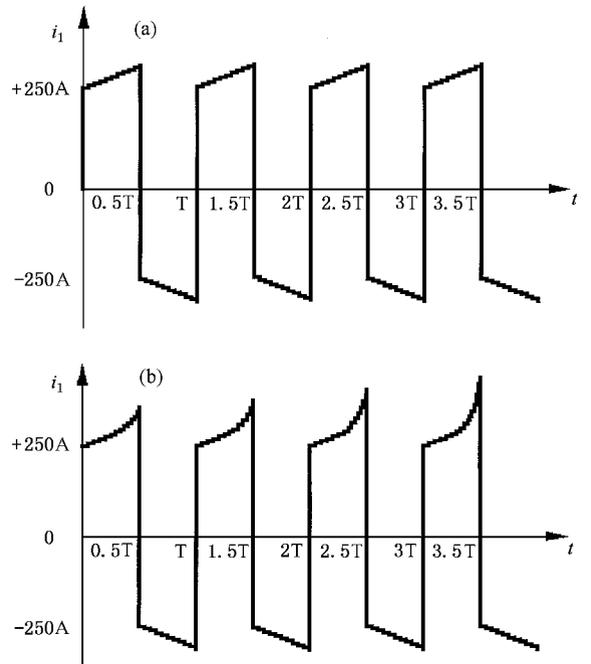


图 4 输出变压器原边电流波形示意图

“ T_2 和 T_3 同时导通”或者与之相反的转换,都需要经过过渡过程,此过程的长短与器件的开通延迟时间 t_{ONd} 、开通瞬间电流上升时间 t_r 、关断延迟时间 t_{OFFd} 和关断瞬间电流下降时间 t_f 等有关。

由以上所述可知,影响每个工作周期内 i_1 平均值 $(i_1)_{\text{AV}}$ 的因素相当多,其中有些因素是随机的(例如电网电压波动或三相不平衡程度等),有些因素在选定器件后是基本确定的(例如 T_1 至 T_4 的导通压降、开通时间、关断时间等)。在特定条件下(例如我们曾实测到“ T_1 与 T_4 的导通压降之和”比“ T_2 与 T_3 的导通压降之和”低 0.45V),每个工作周期内 $(i_1)_{\text{AV}}$ 可能总是略大于零,即 i_1 的直流分量不等于零,其值虽然不大,但足够多个工作周期逐渐累积,可能会造成变压器非晶态铁芯的磁感应强度逐渐向 $+B_m$ 偏移,图 5(a)至(e)示意性描述了磁感应强度逐渐向 $+B_m$ 偏移的过程。当接近饱和区时, i_1 的波形会出现图 4(b)所示尖峰;当进入饱和区时, i_1 将超过允许值,使过电流保护电路动作,导致不能正常工作。这种现象可称为“非零直流分量累积磁偏移饱和”或简称为“累积磁偏饱和”。

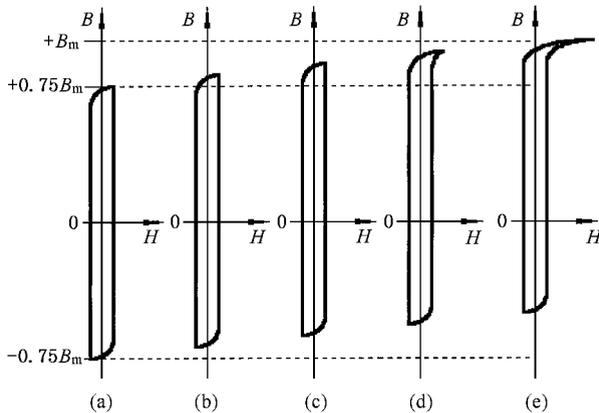


图 5 累积磁偏饱和过程示意图

6. 预防累积磁偏饱和的方法

6.1. 隔直电容法

避免出现累积磁偏饱和的简单方法是在图 2 所

示电路中 B 点串入隔直电容 C_s 。这种方法虽然简单易行,但由于电流大、电压高, C_s 的体积大、成本高,而且改变了输出电压的波形,这对原油电脱水等应用场合不利。

6.2. 电流积分调宽法

预防累积磁偏移的另一种方法是利用主控器内高性能单片微机(例如 196 或 DSP)随时对 T_{OUT} 原边电流 i_1 的瞬时值进行数字积分运算,避免 $(i_1)_{\text{AV}}$ 单向累积。具体做法是:从每个工作周期开始时刻起, T_2 和 T_3 都关断,同时 T_1 和 T_4 开始导通,经过 $0.4T$ 后, T_1 和 T_4 由导通变关断;在 $0.5T$ 时刻, T_1 和 T_4 仍保持关断,同时 T_2 和 T_3 开始导通,直至 t_{w23} 时刻, T_1 至 T_4 都关断。 t_{w23} 由下式求出:

$$\int_{(n+0.5)T}^{(n+0.5)T+t_{w23}} (-i_1) dt = \int_{nT}^{(n+0.4)T} i_1 dt + \int_0^{nT} i_1 dt,$$

式中 n 为正整数, t_{w23} 在 $0.4T$ 左右自动调整,从而避免 i_1 的直流分量逐渐累积,可有效地预防累积磁偏移饱和。

7. 应用实例

在上述理论研究的基础上,我们在研制特种变频器中 $100\text{kVA}/2\text{kHz}$ 非晶态铁芯变压器时,先后实施了上述 4.2, 6.1 和 6.2 三种预防磁偏饱和的方法,在多次实验和两个月现场试运行中,均未出现磁偏饱和现象。而且 5 台装有这种变频器的特种变频器已在辽河油田稠油采集电加热现场实施工业应用 9 个多月,效果良好。

8. 结 语

非晶态材料是继硅钢片和铁氧体之后出现的一种磁性^[10]新材料,为研究开发 100kVA 量级中频变压器提供了良好基础,但需深入分析非晶态铁芯的磁特性^[11],采取相应的控制方法,才能取得好效果。

- [1] Li Y F ,Chen D X and Shen B G 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 953 (in Chinese) [李印峰、陈笃行、沈保根 2001 物理学报 **50** 953]
- [2] Zhang H W , Zhang S Y , Shen B G , Goll D and Kronmüller H 2001 *Chin. Phys.* **10** 1169
- [3] Zhou X ,Liang B Q and Wang H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 159 (in Chinese) [周 勋、梁冰青、王 海 2001 物理学报 **50** 159]
- [4] Li Y F , Chen D X , Guo H Q ,Vazquez M and Hernando A 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1591 (in Chinese) [李印峰、陈笃行、郭慧群、Vazquzz M ,Hernando A 2000 物理学报 **49** 1591]
- [5] Xiao S H , Chao Y S and Zhou B L 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 288 (in Chinese) [肖素红、晁月盛、周本濂 2000 物理学报 **49** 288]
- [6] Rong C B , Zhao Y H and Xu M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2235 (in Chinese) [荣传兵、赵玉华、徐 民 2001 物理学报 **50** 2235]
- [7] Gao X S , Chen X Y and Yin J 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 942 (in Chinese) [高兴森、陈晓原、殷 江 1999 物理学报 **48** 942]
- [8] Wang Y Z , Hu J F and Zhang S Y 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 520 (in Chinese) [王亦忠、胡季帆、张绍英 1999 物理学报 **48** 520]
- [9] Lou J X , Liu Y H and Huang B X 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 508 (in Chinese) [娄坚鑫、刘宜华、黄宝歆 1998 物理学报 **47** 508]
- [10] Li B H , Zhang H W , Zhang J , Wang Y and Zhang S Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 1054
- [11] Li Y Z , Lin L , Wang W C , Xiong C S and Shen B G 2000 *Chin. Phys.* **9** 304

Methods for preventing magnetic deviation saturation of high power amorphous transformer^{*}

Sun Mei-Sheng Xu Xiao-Peng Lu Wei Fang Xing-Hao

(Department of Automation ,Tsinghua University ,Beijing 100084 ,China)

(Received 9 July 2002 ; revised manuscript received 15 August 2002)

Abstract

This paper summarizes the basic characteristics of amorphous materials , and thoroughly analyses the reason why magnetic deviation saturation occurs in high-power amorphous transformers . And also , the incremental amplitude method , the incremental pulse width method , the current integral pulse width adjustment method and some other methods are proposed to prevent magnetic deviation saturation .

Keywords : amorphous magnetic deviation saturation , incremental amplitude method , incremental pulse width method , current integral pulse width adjustment method

PACC : 7550

* Project supported by the " 21st Century ,100 High Quality Universities " Project (Grant No. [1996] 498) .