

扁平矩阵变压器在开关电源的应用

王信雄 陈俊德 矩创科技股份有限公司(新竹 310)

摘要:开关电源的设计中,功率变压器的效能一直占有举足轻重的地位。特别在讲求轻薄短小效率高的直流转换器中更显得重要。本文主要探讨扁平矩阵变压器(Flat Matrix Transformer)在开关电源应用的可行性。除了分析扁平矩阵变压器的各种结构特性,如极低的漏电感与电流均分外,同时提出实现磁通完全平衡的半匝(Half Turn)技术。同时亦提出两个应用实例以证明扁平矩阵变压器之优越性能。

叙词:开关电源 变压器 扁平矩阵变压器

1 引言

在开关电源的技术领域中,近几年来有非常大的突破。其中包括软开关(Soft Switching)技术的成熟[1-3],电源并联技术的实用化[4],功率半导体对于损失消耗的降低等等,都再再的让开关电源产品更走向轻薄短小效率高的最高目的。开关电源的规格也随着市场的需求,逐渐地被要求大电流低电压输出、高可靠度的同时,体积小重量轻也同样被重视。电源工程师总是在这些规格条件的限制下,做一些设计上的斟酌(Trade-off)。比方说,为了小型化,提高开关频率是必然的;高频化的结果,功率转换效率差,电磁干扰(EMI)的问题也随之而来。另一个例子,假使要设计一个大电流输出的开关电源,输出整流二极管的体积经常太大而必须用数个小额定的二极管并联;其可靠度完全不能接受。所以电源工程师总是在诸多的限制中,找一个最佳组合。在众多开关电源的技术中,磁性组件就常常被局限在电芯材料的进步;如何开发高频低损失的铁芯材料,变成各铁芯厂最重要的课题。在此同时也有一些对于变压器与电感从结构上改变的研发,如平面变压器(Planar Magnetics)采用低高度的铁芯配上多层印刷电路当绕组[5],又如集成磁性组件(Integrated Magnetics)的研发[6]等等。这些努力也有助于电源技术的进步,但是就成本而言,不同规格就必须有不同的订制(Customized),费用太高且无弹性。

本文提出一个结构性改变的变压器,称之为扁平矩阵变压器(Flat Matrix Transformer)。这种变压器完全改变了传统变压器的结构,其独特的结构非常适合各种开关电源的应用,如(1)极低的漏电感,让电路架构的选择简单化;(2)极佳的散热,让废热不再集中于铁芯内部;(3)二次侧自动分流,让输出二极管的负担降低,适合大电流输出;(4)铁芯单元化,让变压器的组成单一化,降低成本;(5)很容易实现磁通平衡的「半匝」技术,适合低电压输出应用。除此之外,矩阵变压器还有许多优点,将在下一节详述。如果配合电路新技术的应用,将使开关电源的设计更具弹性。

本文第二节将详细介绍矩阵变压器的工作原理与实现。同

时依其结构特性,将于第三节讨论各种布局结构,以说明矩阵变压器的设计弹性。第四节我们将举两个利用矩阵变压器的开关电源设计实例,验证矩阵变压器的相关效能。结论与建议将在最后一节提出。

2 扁平矩阵变压器

图1为一个简单的变压器单元,初次级侧各有一圈绕组。假设在理想变压器的条件下, $V_p = V_s$, $I_p = I_s$ 。如果我们将三个简单的变压器单元作图2的连接,初侧串联两匝,次级侧并联。于是我们得到 $V_p : V_s = 6:1$, 或者 $I_p : I_s = 1:6$ 。

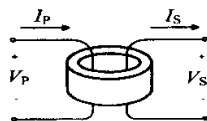


图1 简单的变压器单元

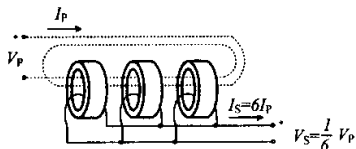


图2 初级串接,次级并接的变压器

利用这个原理,如果总共有K个简单变压器单元,初级侧绕组 N_p 匝,次级侧并联,则可得到有效变比为 $V_p : V_s = (K \cdot N_p) :$

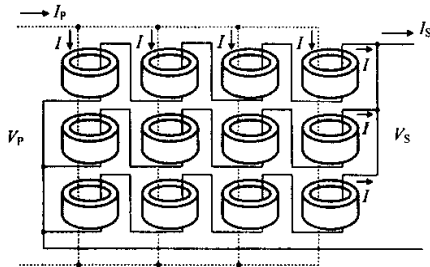


图3 匝数比 3:4 的矩阵变压器

1. 当然次级侧也可以串联,如图 3, $V_p : V_s = 3 : 4$ 。依此类推,可以得到想要的变压比。由于它的样子像一个数学矩阵,所以就称为“矩阵变压器”^[7]。

矩阵变压器从电路角度来看,与传统变压器的原理是完全一样的,甚至在许多升压的电路里,已经被广泛的应用了。为了将矩阵变压器的观念实际应用于开关电源中,必要的结构性变化是必须的,称之为“扁平矩阵变压器”(Flat Matrix Transformer)。图 4(a)为一实现扁平矩阵变压器的一个基本单元铁芯(Basic Core Element),一般使用的材料为 Ferrite,如 TDK PC40 或 PC50,中空方型结构有助于废热的传导与散逸。图 4(b)为加入两个次级绕组,称为扁平矩阵变压器的基本单元(Basic Element)。次级绕组是用铜箔片直接贴在铁心上,特别要注意的是绕组出线的位置。利用铜箔片型状使得铁心两端的对顶脚为同一绕组。这么做的好处是可以让组成矩阵变压器的各基本单元可以紧密连结,降低所需的底面积,有助于提高功率密度。

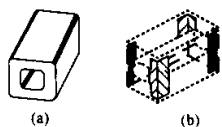


图 4 (a) 基本单元铁芯; (b) 变压器基本单元

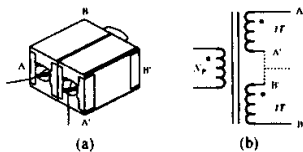


图 5 (a) 变压器组成 (b) 等效回路

我们试图将两个基本单元合并如图 5。从图上很容易的发现图 5(a) 宛如一组 EE 型铁心绕着两组各一匝的次级线圈。加上初级侧绕组就便成一个完整的变压器了。特别值得注意的是这种方型结构,可以设计成很高的铁芯截面积,如此一来,初级侧的匝数少,可有效的降低邻近效应(Proximity Effect)造成的损失。同时次级侧导体短而宽,等效电阻极低。而且铜片紧贴铁芯,有助于散热,避免废热集中(Hot Spot)。

这样的结构可以藉由外部接线成为正激式(Forward)转换器的变压器,如果将 A' 与 B' 接在一起就变成中间抽头的变压器,适合推挽式(Push-Pull)、半桥式(Half-Bridge)及全桥式(Full-Bridge)电路应用。同时由于结构上上次级绕组几乎完全包围初级绕组,所以初次级耦合程度非常好,漏电感大约只有传统变压器 1/10 [8]。这个事实让电路架构的选择更具弹性,效能更高。即使应用传统的硬切换(Hard-Switching)电路也不需担心漏电感造成的问题。

3 应用矩阵变压器的电路

从上一节的有关矩阵变压器的概念中,只要将基本单元做适当的串并联组合,很容易设计一个所需的变压器。为了达到所需的轻薄短小特性,本节介绍扁平矩阵变压器实际应用的电路。图 5 中次级线圈只有一匝,在实际应用上仍有限制。假设

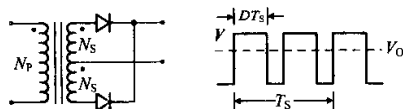


图 6 变压器中间抽头电路

在一个中间抽头的应用电路中如图 6,根据法拉第定律所得的变压器公式为 $V \cdot D \cdot T_s = N_s \cdot (2B_m) \cdot A_c$ 。其中, N_s 为次级匝数, B_m 为铁芯最大磁通密度, A_c 为铁芯等效截面积, T_s 为开关周期。由于 N_s 总是等于 1,所以输出电压 $V_o = V \cdot 2D$ 就受到 $B_m A_c / T_s$ 乘积的影响。当铁芯单元材料与大小决定以后,输出电压就受到限制了。在此我们介绍三种不同的布局结构可以解决输出电压限制的问题。

结构一如图 7 所示。变压器含有四个基本单元,初级绕一匝,以此结构可以得到 $N_p : N_s = 2 : 1$ 。这个结构同时有两个独立并联的次级。这种结构适合低电压高电流输出的应用。我们再仔细探讨,因为每一组次级线圈都是一匝,所以流过的电流自然均分。因此每一个二极管流经的电流也相同。这在高电流输出的应用里更重要。一般应用大额定值的二极管体积过于庞大而且价格昂贵,并不符合轻薄短小的原则;如果并联小额定二极管又无法保证电流可以平均分摊。所以利用矩阵变压器的特性,自然的分流,不仅成本低,更重要的是可靠度大大的提升。

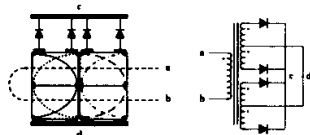


图 7 结构一:初级串联,次能并联

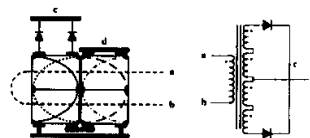
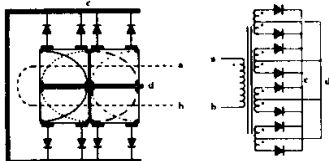


图 8 结构二:初级串联,次级串联

如果要求较高的输出电压,提高切换频率或是提高最大磁通密度使用是最直接的。但是两者都将造成可观的效率损失。图 8 为矩阵变压器的另一种结构布局。同样使用四个基本单元,同样的排列方式,我们只稍微改变接线方式,将次级绕组串联即可得到 $N_p : N_s = 2 : 2$ 的效果。很容易得到较高的输出电压而不必改变切换频率或最大磁通密度。与上图比较,如果同样的输出功率,虽然没有电流分流,但是电压高,输出电流小,小额

定的二极管即已足够。

扁平矩阵变压器尚有一个特点,就是可以达成“半匝”(Half Turn)的效果,同时完全没有磁通不平衡的问题。由于半导体的工作电压越来越低,从5V而3.3V而2V,甚至将低到1V。输出电压的降低,对直流转换器的设计却是一个非常严厉的挑战。除了各种可能的高效率电路外,最被检讨的恐怕是变压器半匝的问题。铁心内部磁通不平衡的严重缺点。用扁平矩阵变压器



9 结构三:初级串联,次级半匝并联

磁通不平衡的问题马上迎刃而解。图9为另一种电路布局应用。同样利用四个基本单元,不同的外部接线,我们可以得到 $N_p: N_s = 2:0.5$ 。因为结构上的完全对称,所以磁通也完全平衡。从图中看出二极管可以完全分流并联。这个优异特性特别适合极低压输出的场合。

除此之外,变压器还可以和次级侧电路整合为一,图10是

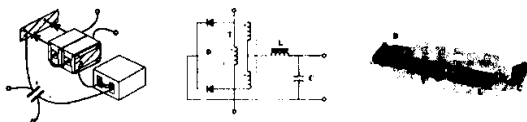


图10 变压器与次级电路整合

其中一例。利用次级电路的共通性(中间抽头)巧妙的将电感、二极管与电容整合成一个模块。这个模块最大的优点是可以根据输出电流的需求,可以一直并联。同时在大电流的应用中,输出的正负极铜板可以变成变压器、二极管及电感的散热器。这对于废热的散逸有很大的帮助,大大提升电路的可靠度。

4 扁平变压器的应用实例

了解了扁平矩阵变压器原理与应用后,以两个实例来印证。

表1所示为本文所采用之矩阵变压器铁芯基本单元结构尺寸。

表1 矩阵变压器铁芯基本单元结构尺寸

长 (mm)	宽 (mm)	高 (mm)	体积 (cm^3)	截面积 (cm^2)
13.67	10.2	10.2	1.0	0.34

材料为P4(ACME Magnetics),其材质大概与TDK PC40相当。饱和磁通密度为0.5T(25℃),0.39T(100℃)。Al值(一匝的电感量)为5 μ H。次级侧用厚度0.25mm铜箔片制成。以实验量得,两个基本单元构成的变压器其初级漏电感为40nH。换句话说,漏电感与初级电感的比值为0.8%。第一个例子为一个500W的直流转换器。规格如下:

- * 输入电压:380 Vdc
- * 输出电压:5 Vdc
- * 输出电流:100 A

电路则采用PWM半桥式架构,切换频率为250KHz。变压器初级绕组为5匝。变压器及输出侧的布局说明如下:采用10个基本单元构成5个EE型变压器。每个变压器有各自独立的整流二极管及输出电感器,完全达到均分电流的目的。同时输出的正负极以铜板制成,既可固定变压器、电感器及整流二极管,同时也是散热器。图11为次级侧示意图,图12为硬件样品照片。变压器等效匝数比 $N_p:N_s = 25:1$ 。量测的电功转换效率为85%。

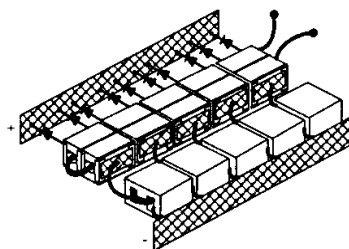


图11 扁平矩阵变太器实例一,次级电路

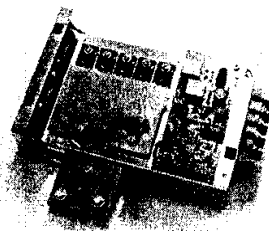


图12 扁平矩阵就压器实例一照片

第二个例子为通信用全砖型直流电源模块。规格如下:

- * 输入电压:36 - 75V Vdc
- * 输出电压:5 Vdc
- * 输出电流:80 A

设计这种电源最大的考验在体积小(4.6 \times 2.4 \times 0.5英寸),功率密度达73W/in³。加上输出电压低电流大,最适合扁平矩阵变压器的应用。在这个设计中,采用了推挽式架构以及扁平矩阵变压器“半匝”的技术,成功的完成。图13为功率电路示意图,图14为成品的照片。整体转换效率在48V输入时为86%。

这两个实例印证了扁平矩阵变压器的适用性。由于两个例子都是用PWM硬开关电路,整体转换效率都在85%左右。如果采用软开关(如零电压开关相移全桥)电路以及同步整流(Synchronous Rectification)技术,效率将可达90%以上。

5 结论

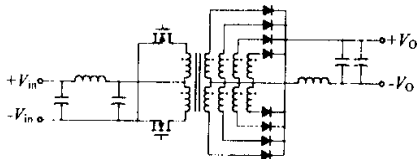


图 13 扁平矩阵变压器实例二, 等效电路

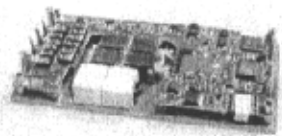


图 14 扁平矩阵变压器实例二照片

本文介绍有别于传统式的扁平矩阵变压器。除了说明矩阵变压器的组成与工作原理。同时提出三种不同的布局结构, 藉由外部结线达到应用于高功率密度的目标。虽然次级线圈只有一匝, 可藉由次级串联的方式提供较高电压输出。在极低电压输出的需求下, 扁平矩阵变压器可达成完全磁通平衡的半匝技术, 有效的提高铁心的利用率。

总的来说, 扁平矩阵变压器有以下优点, 极适合应用在低电压大电流的开关电源与高功率密度直流转换器的应用中:

- (1) 变压器组成单元标准化, 降低成本。
- (2) 变压器设计单纯化, 节省设计时间。
- (3) 漏电感极低, 电路架构的选用更有弹性。
- (4) 自然均分次级电流, 提高可靠度。
- (5) 扁平设计, 散热容易, 不会造成热累积。

另外, 配合次级电路的特性, 可以将变压器、电感、电容以及二极管整合成一个单一模块, 有助于废热的散逸与电路的可靠性。

两个利用扁平矩阵变压器的硬件实现, 可以完全体现在开关电源与直流转换器应用的可行性。如果加上软开关与同步整流技术, 更可以提高整体效能。

每一个铁芯单元的差异对于整个变压器的效能影响与扁平矩阵变压器的可制性, 则犹待继续探讨研究。

参考文献

- [1] G. Hua, C. Leu and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters," Proceeding of IEEE PESC., 1992, pp.56-61.
- [2] W. Andreycak, "Active Clamp and Reset Technique Enhances Forward Converter Performance," Unitrode Power Supply Design Seminar SEM-1000, 1994.
- [3] W. Andreycak, "Designing a Phase Shifted ZVT Power Converter," Unitrode Power Supply Design Seminar SEM-900, 1993.
- [4] "UC3907 Load Share IC Simplifies Parallels Power Supply Design," Unitrode Application Note, U-129.
- [5] "Design of Planar Power Transformer," Application Note, Philips Magnetic Products.
- [6] L. P. Wong, Y. S. Lee and K. W. Chen, "A New Approach to the Analysis and Design of Integrated Magnetics," Proceeding of APEC., 2001.
- [7] E. Herbert, "Design and Application of Matrix Transformers and Symmetric Converters," a tutorial present at the High Frequency Power Conversion Conference '90, Santa Clara, CA, May 11, 1990.
- [8] D. T. Holmes and K. K. Sum, "Flat Transformer for Low Voltage, High Current, High Frequency Power Converters," Proceeding of High frequency Power Conversion Conference, 1996, pp.183-192.

作者简介

王信雄, 1959 年出生, 于 1981 年毕业于新竹清华大学电机系, 1989 年毕业于清华大学电机研究所博士班, 曾于 1987 至 1988 年到美国维吉尼亚理工暨州立大学(VPEC, VPI&SU)研究。毕业后一直从事开关电源相关技术研究及教学。现为矩创科技股份有限公司总经理, 以及清华大学电机系兼任副教授。

陈俊德, 1971 年出生, 1992 年毕业于高雄工专电机科。从事高功率密度直流转换器之开发。现为矩创科技资深工程师, 并为逢甲大学电子研究所硕士生。