

适用于低压大电流开关电源的多组变压器设计

Design of Multibank Transformer Used for Low Voltage and High Current SPS

薛蕙 供稿

摘要：文章对用于低电压大电流开关电源的一种多组变压器的结构和特性作了研究与介绍，并与传统的一组类型的变压器结构、性能进行了比较。以及在 12V/100A 移相全桥零电压开关 (ZVS) 之开关电源的应用中，用 SPICE 软件进行了性能仿真与验证，证明了多组变压器结构的优点。

关键词：低电压大电流开关电源，零电压开关 (ZVS)，SPICE 仿真，多组变压器

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2014) 11-2-129

1 引言

随着半导体技术、微电子技术、集成化技术及逆变技术的高频化、智能化、模块化的进步，以及电子产品的多功能化和小型化的发展，不断地推动着开关电源的发展，其中，低电压大电流开关电源的应用也不断被推向多个领域。

关于低电压大电流开关电源的结构，其次级输出一般采用全波整流方式。因为受单个整流二极管容量的限制，经常采用一组变压器多组副边，如图 1(a)；或者采用一组副边和多只二极管并联的结构，如图 1(b) 所示。图 1 所示的一组变压器结构图，可以在原、副边的能量传递期间，将变压器等效为电压源，而将副边电路中的阻抗等效为电压源内阻。由于电压源的内阻比整流二极管的等效电阻小，故可忽略不计。假设变压器的原、副边完全耦合，则其等效电路可以简化为如图 2 所示的电路。由此可见，图 1 所示的两种结构变压器的等效电路图相同，都属于整流二极

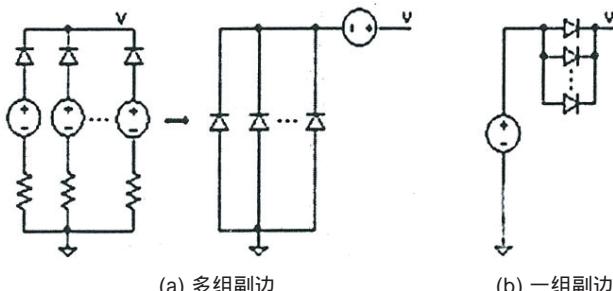


图 2 一组变压器的等效电路

管并联均流电路。

由于整流二极管存在正的电流温度系数，所以在实际应用过程中，很难保证器件的一致性，这样，将会使流经整流二极管的电流不相同，严重的时候还会因负载过重而损坏变压器。

为了达到均流的目的，二极管并联使用时，可以采用串入电阻的方式并联，如图 3(a) 所示；或者采用串入动态均流互感器进行并联等方法，如图 3(b) 所示。由于邻近效应和趋肤效应的作用，对于串入电阻的并联方式，二极管的均流效果随输出电流的大小而改变，故其均流效果较差。对于低压大电流而言，为了减小串入电阻上产生的损耗，其电阻值不宜较大，否则会降低均流效果。而串入动态均流互感器的并联方式，则可以获得较好的均流效果。但是，大电流互感器的制作工艺复杂、成本高，而且，因为动态

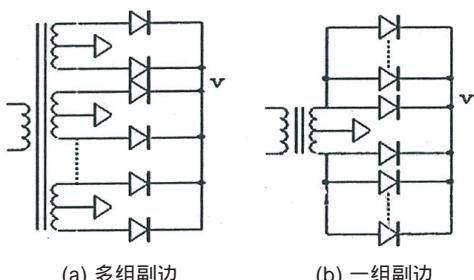


图 1 一组变压器示意图

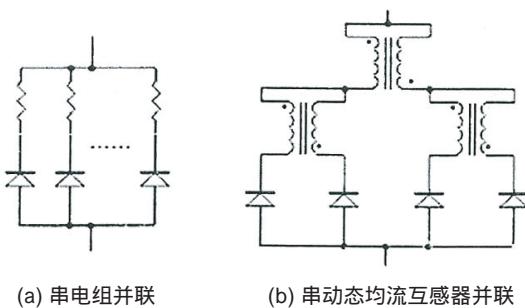


图 3 二极管均流方式

均流互感器的漏感及引线电感的存在，使得二极管在关断时的反向尖峰电压增大，电磁干扰(EMI)及电路损耗随之增加。

2 多组变压器的性能分析

本案例采用的多组变压器是原边串联、副边并联的结构，如图 4(a) 所示，这可以克服很多以上所述的缺点，通过该变压器实现副边均流。

假设变压器的原边、副边完全耦合，不计磁芯损耗和铜损，也忽略变压器原副边线路的阻抗，在原副边能量的传递期间，其等效电路可以简化为如图 4(b) 所示，同时可以获得以下的关系式：

$$nE_{11}=E_1 \quad (1)$$

$$nE_{12}=E_2 \quad (2)$$

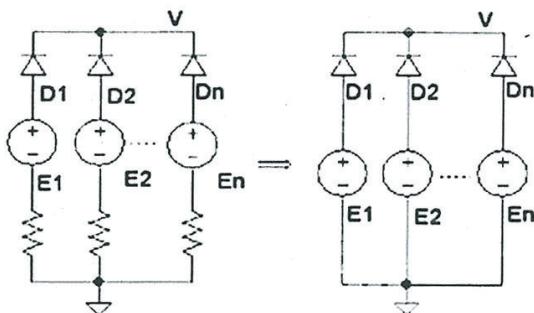
.....

$$U_1=U_{D1}+U=E_1 \quad (3)$$

$$U_2=U_{D2}+U=E_2 \quad (4)$$

.....

式中， E_{11} 、 $E_{12}...$ 为原边感应电动势； E_1 、 E_2 为副边感应电动势； U_1 、 U_2 为副边绕组上的电压； U_{D1} 、 U_{D2} 为副边整流二极管上的电压降； U 为经过整流二极管后的直流电



(a) 原边串联副边并联

(b) 图 (a) 之等效电路

图 4 多组变压器示图 5 等效电路

压； I_1 、 I_2 为副边绕组上的电流。把以上式 (1) 与式 (2) 分别代入式 (3) 与式 (4)，则得出：

$$U_{D1}=nE_{11}-U \quad (5)$$

$$U_{D2}=nE_{12}-U \quad (6)$$

.....

由能量守恒(即不计入损耗)定律可得：

$$E_{11} \cdot I_1=E_1 \cdot I_1 \quad (7)$$

$$E_{12} \cdot I_2=E_2 \cdot I_2 \quad (8)$$

.....

得出：

$$I_1=nI_1=nI_2=\dots \quad (9)$$

由式 (9) 可以看出，副边各路是均流的，因此，流过输出整流二极管的电流相同，实现了自动均流。从式 (5) 和式 (6) 可以看出，虽然整流二极管的特性不同，但是可以借助调整各组变压器原边的电压来实现副边的均流。多个变压器的这种连接方式可以使得变压器设计模块化，也可简化变压器的制作工艺。

在整流二极管换流期间，由于变压器原副边短路，因此 E_{11} 、 E_{12} ； E_1 、 E_2 ...为零，变压器不起作用。此时，副边所有整流二极管均同时导通，换流之前导能的整流二极管电流逐渐减小为零，未导通的整流二极管电流逐渐增加为最大值，在换流过程中，副边电流变化曲线与整流二极管的特性有关。

3 仿真结论

现在，以 12V/1000A 的电镀电源为例对上述结构进行 SPICE 仿真分析。其主电路采用移相全桥 ZVS(零电压开关)软开关形式，开关频率为 20kHz，副边为全波整流，使用了三组变压器，每组的匝比为 8 : 1。变压器的原边串联、副边并联，输出整流二极管使用耐压为 80V、电流为 400A 的肖特基二极管，其仿真主电路示于图 5。

建立不同的仿真模型，可改变肖特基二极管的特性曲

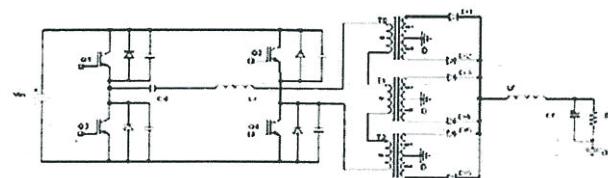


图 5 仿真主电路原理图

线。通过仿真可以得到各组变压器原边电压的仿真波形，现示于图 6。流经 D_1 、 D_3 、 D_5 的电流波形，则示于图 7。

由图 6 所示可以看出，在原副边能量传递期间，其各

组变压器原边的电压是不相同的，而在换流期间，其原边电压为零。

从图 6 所示可以看出，在原副边能量传递期间，变压器副边输出的电流是相等的；而在换流期间，变压器副边输出的电流是不相等的，流经副边各肖特基二极管的电流小于原副边能量传递时通过的电流。

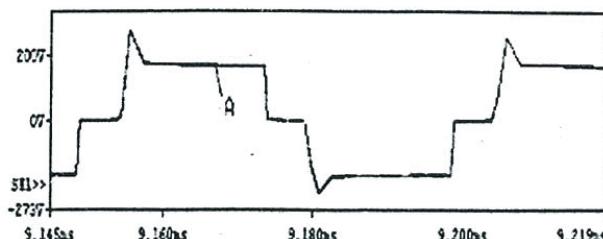
从上述仿真分析可知，在原副边能量传递期间，由于各肖特基二极管的特性不尽相同，从而导致各组变压器原边的电压不相等；但变压器副边的输出电流是相等的，与肖特基二极管的特性没有关联。

在换流期间，由于变压器原副边短路，可以忽略变压器原副边线路的阻抗，因此原边电压为零，此时变压器对副边电流的均衡不起作用，副边的输出电流因为各肖特基二极管的特性差异而不相等。在此期间，虽然副边电流可能不相等，但由于副边所有的肖特基二极管同时导通，共同分担电流，故电流小于能量传递时流过的电流。

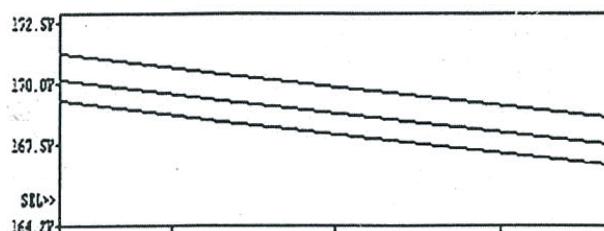
4 小结

通过使用多组变压器原边串联、副边并联的结构，可以避免由于肖特基二极管正的电流温度系数导致并联不均流的问题，并通过变压器实现副边的自动均流。多组变压器原边串联、副边并联的结构，在低电压大电流开关电源中有较广泛的应用，它可以使变压器设计模块化，同时简化了变压器的制作工艺。

(参考资料略)



(a) 三组变压器原边电压波形



(b) A 点电压波放大图

图 6 三组变压器原边电压波形

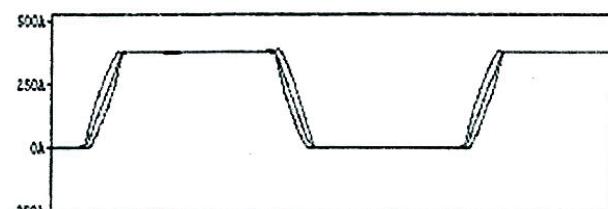


图 7 D_1 、 D_3 、 D_5 的电流波形