

解析开关电源对开关变压器的要求及技术特性

周志敏

摘要：本文在简介开关电源对开关变压器的要求的基础上，重点论述了开关电源变压器的特性及普通开关变压器面临的挑战。

关键词：要求，特性，挑战

1 开关电源对开关变压器的要求

开关电源在市场发展中主要追求的目标是：效率高、体积小（轻薄短小）、成本低，因此对开关电源中的开关变压器提出以下几方面要求。

（1）效率

开关电源要求效率高的主要原因是节能和环保，也就是从“绿色电源”概念提出来的。由于开关电源的应用量大面广，可以显著减少所需的电能，也就减少发电厂数量，减少发电厂排放的废气废水和灰潭对环境的污染。现在要求100W以下的小功率开关电源效率超过85%。中大功率开关电源效率超过90%。

变压器和电感器的损耗一般占开关电源的15%左右，要求变压器效率超过95%~98%，其原因是要求减少开关电源的待机损耗。因为变压器的空载损耗和空载电流是造成待机损耗的主要原因之一。现在开关电源的待机损耗要求小于10%，因此，变压器空载损耗只能小于5%，最好小于2%。效率高，发热小，可减少散热面积和体积。

（2）体积

开关电源追求轻薄短小，是它在市场发展中的热门话题，其中变压器和电感器的小型化是最大的难点，受到国内外专家们的普遍关注。表示它的指标是功率密度，希望能达到 100W/in^3 以上。

为了适应开关电源小型化的需要，首先是提高工作频率，其次是改变结构。工作频率提高到250kHz，比20kHz~40kHz的功率密度会显著增加。但是高频损耗也显著增加，可通过改用新的磁性材料和线圈结构来解决；高频电磁干扰也显著增加，可采用抗干扰滤波器和低磁滞伸缩材料来解决。现在开关电源的最高工作频率已达到25~30MHz。1~2MHz在小型开关电源中已比较普遍。

开关变压器结构经历三次创新换代：第一次是平面变压器、体积和重量比立体变压器（普通变压器）减少80%，已形成从5W~20kW，20kHz~2MHz的产品，效率典型值为98%。第二次是片式变压器，对低压大电流特别适用，高度（厚度）进一步降低，电流可达100A以上，采用一个次级绕组多个磁芯组成，代替以前的一个磁芯多个绕组。多个磁芯的初级绕组串联，从而达到降压隔离的要求。内部温升比平面变压器低，只有10℃左右。可以装在额定温升更高的基板上工作。第三次是薄膜变压器，采用薄膜后高度低于1mm。工作频率超过1MHz，达到10~100MHz。由于采用集成电路工艺制造，成本并不增加，是开关电源变压器的最新发展方向。

在现阶段，不同的应用范围和市场，从性能价格比出发，要求的变压器结构形式也不一样。立体变压器仍然大量使用。平面变压器已形成系列，正在推广。片式变压器处于个别和小批量生产阶段。薄膜变压器只是个别情况，仍处于研究开发阶段。因此，开关变压器不单要关注研究开发的新变压器，而且更要关注大量生产的变压器。即使改进某个部件，某个工艺环节，也会取得良好的效益。

（3）成本

开关电源和任何商品一样，在市场发展中都要考虑成本。作为开关变压器也回避不了成本问题。为了降低开关变压器成本，第一个手段是设计，采用的原材料、结构形式对成本有决定性作用。因此在设计开关变压器时，一定要综合考虑开关电源的工作条件，当时原材料的水平和价格，设计出性能满足要求成本最低的开关变压器产品。第二个手段是生产制造工艺，尽量采用工模具和机械加工，减少加工工时，以减少生产成本。在检测中，采用短时间即可确认产品性能的方法，减少检查工时。加强管理，从

备料到产品包装出厂，各个生产环节都尽量减少工时和费用。第三个手段是减少生产的附加费用。包括设计选用的原材料和配件尽可能通用，减少种类和降低库存量，以及尽快缩短交货时间减少产品成品库存量，还有对检测中被剔除的产品进行处理，回收能用的原材料和配件等。

开关变压器是开关电源主要服务对象之一，开关电源市场在中国有比较大的发展。为了推进开关电源市场的发展，对开关变压器提出了高效率、小体积、低成本的要求，以便适应市场发展的要求。

变压器领域的革新关键在于降低变压器的成本，解决普通变压器的过热点、工艺复杂以及漏感高的问题。新型扁平式变压器具有体积小、隔离好、密度高、功率大、漏感小及电流均分的特点。鉴于这种新型扁平式变压器所具备的上述特点，使它成为 DC/DC 变换器中理想的部件。比如说，一个普通的输出电压为 5V；电流 150A 半桥式 DC/DC 变换器，采用了这种部件后，该变换器厚度仅为 12mm。其输出能力超过了所有小外形电源。此外，由于这种扁平式变压器的漏感极低、散热特好，所以比其它一半输出电流的电源在工作温度上要低得多。同时在满负载条件下，该开关电源的效率高达 82% 以上，而该开关电源的变压器、电感器部件的效率为 98.5%。

目前的 DC/DC 变换器广泛采用半桥、全桥、推挽式结构，因此采用体积小、漏感低、散热好及成本低的扁平式变压器，是为设计变换器提供的一个绝佳选择方案。

2 开关电源变压器的特性

开关变压器是开关电源中非常重要的部件，它和普通电源变压器一样也是通过磁耦合来传输能量的。不过在这种功率变压器中实现磁耦合的磁路不是普通变压器中的硅钢片，而是在高频情况下工作的磁导率较高的铁氧体磁心或铍莫合金等磁性材料，其目的是为了获得较大的励磁电感、减小磁路中的功率损耗，使之能以最小的损耗和相位失真传输具有宽频带的脉冲能量。

(1) 等效电路

在开关变压器输入端加的矩形脉冲波如图 1 (a) 所示，输出端得到的输出波形如图 1 (b) 所示，可以看出开关变压器带来的波形失真主要有以下几个方面：

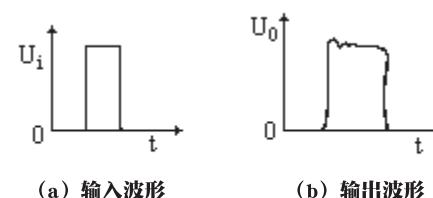


图 1 开关变压器输入、输出波形

- 1) 上升沿和下降沿变得倾斜，即存在上升时间和下降时间。
- 2) 上升过程的末了时刻，有上冲，甚至出现振荡现象。
- 3) 下降过程的末了时刻，有下冲，也可能出现振荡波形。
- 4) 平顶部分是逐渐降落的。

这些失真反映了实际开关变压器和理想变压器的区别，考虑到各种因素对波形的影响，可以得到如图 2 所示的开关变压器等效电路。

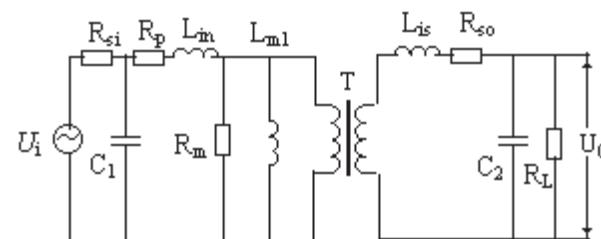


图 2 开关变压器的等效电路

在图 2 中： R_{si} 为信号源 U_i 的内阻； R_p 为一次绕组的电阻； R_m 为磁心损耗（对铁氧体磁心，可以忽略）； T 为理想变压器； R_{so} 为二次绕组的电阻； R_L 为负载电阻； C_1 、 C_2 为一次和二次绕组的等效分布电容； L_{in} 、 L_{is} 为一次和二次绕组的漏感； L_{m1} 为一次绕组电感，也叫励磁电感； n 为理想变压器的匝数比， $n=N_1/N_2$ 。

将图 2 所示电路的二次回路折合到一次，做近似处理，合并某些参数，可得图 3 所示电路，漏感 L_i 包括 L_{in} 和 L_{is} ，总分布电容 C 包括 C_1 和 C_2 ；总电阻 R_s 包括 R_{si} 、 R_p 和 R_{so} ； L_{m1} 是励磁电感，和前述的 L_{m1} 相同； R_L' 是 R_L 等效到一次侧的阻值， $R_L' = R_L / N^2$ ，折合后的输出电压 $U'_o = U_o / N$ 。

经过这样处理后，等效电路中只有 5 个元件，但在脉冲作用的各段时间内，每个元件并不都是同时起主要作用，因任何一个脉冲波形可以分解成基波与许多谐波的叠加。脉冲的上升沿和下降沿包含着各种高频分量，而脉冲的平顶部分包含着各种低频分量。因此在上升、下降和平顶过程中，各元件（L、C 等）表现出来的阻抗也不一样，因此把这一过程分成几个阶段来分析，分别找出各阶段起主要作用的元件，而忽略次要的因素。例如，当输入信号为矩形脉冲时，可以分 3 个阶段来分析，即上升阶段、平顶阶段和下降阶段。

（2）电路分析

1) 上升阶段。对于通常的正脉冲而言，上升阶段即脉冲前沿，信号中包含丰富的高频成分，当高频分量通过开关变压器时，在图 3 所示的等效电路中，C 的容抗 $1/\omega C$ 很小，而 L_{m1} 的感抗 ωL_{m1} 很大，相比起来，可将 L_{m1} 的作用忽略，而在串联的支路中， L_i 的作用较为显著。于是可以把图 3 所示的等效电路简化成图 4 所示的等效电路。

在图 4 所示电路中，频率越高， ωL_i 越大，而 $1/\omega C$ 越小，因而高频信号大多降在 L_i 上，输出的高频分量就减少了，可见输入信号 U_{sm} 前沿中所包含的高频分量就不能完全传输到输出端，频率越高的成分到达输出端越小，结果在输出端得到的波形前沿就和输入波形不同，即产生了失真。

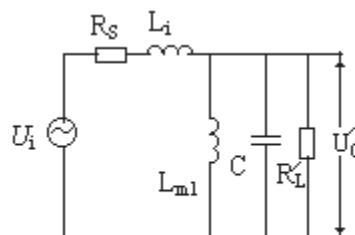


图 3 图 2 的等效电路

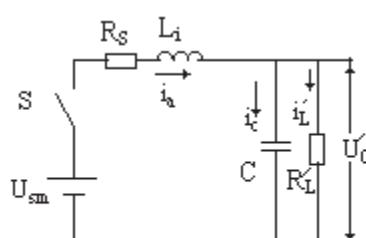


图 4 图 3 的简化电路

要想减小这种波形失真，就要尽量减小分布电容 C（应减小变压器一次绕组的匝数）。但又要得到一定的绕组电感量，所以需要用高磁导率的磁心。在绕制上也可以采取一些措施来减小分布电容，例如用分段绕法；为了减小漏感 L_1 ，可采用一、二次绕组交叠绕法等。

2) 平顶阶段。脉冲的平顶包含着各种低频分量，在低频情况下，并联在输出端的 3 个元件中，电容 C 的容抗 $1/\omega C$ 很大，因此电容 C 可以忽略。同时在串联支路中， L_i 的感抗 ωL_i 很小，也可以略去。所以又可以把图 3 电路简化为图 5 所示的低频等效电路。信号源也可以等效成电动势为 U_{sm} 的直流电源。输出电压可用下述公式表达。

$$U' = (U_{sm} R_{L'}) e^{-\tau / (R_s + R_{L'})}$$

式中： $\tau = L_{m1} (R_s + R_{L'}) R_s R_{L'}$

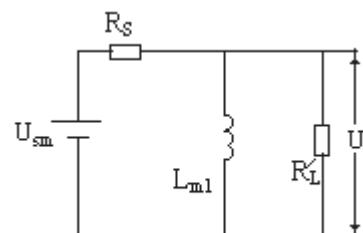


图 5 图 3 的低频等效电路

可见 $U' = (U_{sm} R_{L'}) e^{-\tau / (R_s + R_{L'})}$ 为一下降的指数波形，其下降速度决定于时间常数 τ ， τ 越大，下降越慢，即波形失真越小。为此，应尽量加大 L_{m1} ，而减小 R_s 和 $R_{L'}$ ，但这是有限的。如果 L_{m1} 太大，必然使绕组的匝数很多，这将导致绕组分布电容加大，致使脉冲上升沿变坏。

3) 下降阶段。下降阶段的信号源相当于直流电源 U_{sm} 串联的开关 S 由闭合到断开的阶段，它与上升阶段虽然是相对的过程，但有两个不同：一是电感 L_{m1} 中有励磁电流，并开始释放，因此 L_{m1} 不能略去；二是开关 S 断开后， R_s 便不起作用，由此得出下降阶段的等效电路，如图 6 所示。

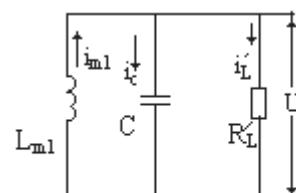


图 6 脉冲下降阶段的等效电路

一般来说，在开关变压器平顶阶段以后， L_{m1} 中存储了比较大的磁能，因此在开关断开后，会出现剧烈的振荡，并产生很大的下冲。为了消除下冲往往采用阻尼措施。

3 普通开关变压器面临的挑战

普通开关变压器面临的挑战有：

1) 普通变压器在结构上采用单个磁心，多匝的初级绕组。单个磁心变压器无法满足电源的大功率密度。因为它是单个磁心的结构，所以在磁心中心只有一个过热点，散热能力差。随着工作频率的增加，必须降低通过的磁通密度才能减少发热量。而只有当尺寸缩小到无增益时，才可能获得较高的频率。

2) 初级线圈匝数多。普通变压器是由多层线圈绕制的。第一层与最底层之间有着相当大的电压差。对于一个单匝线圈输出的普通变压器来说，其初级线圈的绕制大约为 32 匝。单匝比使多层初级线圈存在漏感、趋肤效应、邻近效应以及线圈间电容等缺点。

3) 漏感相当大。目前脉宽调制式变换器在开关波形中具有快速上升的特点，这是由于在开关电路中所采用的普通变压器漏感大，这种开关波形就会产生电磁干扰。对于一个理想（耦合得非常好）的变压器来说，所有的磁流穿过次级线圈时应没有漏磁通。对普通变压器来说，并不是初级线圈中产生的所有磁通都穿过次级线圈。也就是说，初级线圈所产生的磁通并非穿过伴随次级线圈的所有绕线和导体。线圈或导体未耦合的部分就产生了自感，并且该能量储存在“电感器”中，由于该“电感器”与主要功率传递电路无耦合，故不能完全满足在电源断电时，对隔离度的要求。另外，为使电磁干扰（EMI）达到更好的特性需要，电磁耦合的紧密要求也无法满足。

4) 高频特性差。在高频工作中，普通变压器过热，开关损耗增大。

5) 绕制工艺冗长，封装体积大。

上接152页

该系统对比其它系统，由于功率损耗最小而具有最高的效率。改变变压器的匝数比到 5:4，输出电压下降到约 80%，系统的输入和输出功率分别降低到 1977W 和 1894W，而且，在 1:0.2 时，系统的功率仅剩下 113W，效率则下降到 91.92%。

表 3 列出实时 HIL 模拟的性能。在 HIL 模拟中系统的性能与 MATLAB 的模拟结果差不多（类似）。因在软件模拟中呈现出相同的趋势，变压器的变比为 1 的接线下，是以系统的最高效率运行的。在 HIL 模拟中，对应于变压器匝数比的变压器二次输出电压关系，比在 MATLAB 的模拟结果要相对准确。虽然如此，但匝数比 5:1 的输出效率，仍显示与 MATLAB 的模拟结果有较大差别，MATLAB 模拟结果，效率为 91.92%，而在 HIL 模拟中却为 95.08%。尽管如此，DAB 系统的效率仍然达到了 90% 以上。

5 结论

本文，在 DAB 变换器的变压器匝数比改变时，在

MATLAB 模拟平台以及通过 HIL 作为实时的模拟平台下，对其影响及效果进行了验证。两种模拟结果的性能参数表明：DAB 变换器的响应特性是类似的。按照 MATLAB 模拟的 DAB 变换器的效率，与由 HIL 模拟结果得到的效率近似。因此，这就显示出 DAB 变换器具有高的转换效率以及同时产生的低功率损耗。作为结论，这还表明 HIL 模拟平台是可靠的、相对简单且性价比高的试验平台。

原文出处：Suliana Ab Chani, Hamdan Daniyal, Nur Huda Ramli and Meng Chung Tiong, Effects of Transformer's Turn Ratio Mismatch Towards the Performance of Dual Active Bridge Converter, «Proceedings of the 10th National Technical Seminar on Underwater System Technology 2018» P587-P594.