分享一个反激变压器 Ap 算法（改进版 02）

在设计反激变压器时经常会采用 Ap 法来选择磁芯，然而常见的 Ap 法公式算出的结果并不准确（普遍偏小）通常还要结合经验法。从原理讲 Ap 法并无不妥，造成偏差的原因就在于波形系数设置的不正确，下面将用公式逐一的推出和验证反激变压器的正确的波形系数。

变压器主要是由磁芯和导线绕组构成，正常工作的变压器要同时满足磁芯不饱和导线不过流的要求，Ap 法正是基于这个原理设置了一个最大的 Bm 和 Jm 计算出最小的 Ae 和 Aw(Ae 磁芯截面积、Aw 窗口面积)，$\mathrm{Ap} = \mathrm{Ae} \times \mathrm{Aw}$单位是面积乘积。这里的波形系数也是由两部分组成的（内部有关联）一个是从磁的角度一个从电的角度。

从磁的角度由法拉第电磁感应开始

$$E = Kf \times Bm1 \times Ac \times N \times f \times 10^n \qquad \text{公式(1-1)}$$

公式后面的10^n跟所选取的单位有关，常数 Kf 在正弦波工作时选取 4.44，方波时取 4，对于正弦波或方波默认的占空比为 0.5。

对于反激变压器作用在磁芯上的只有正半周的占空比为 0.5 的方波（脉冲矩形波），公式(1-1)中的 Bm1=Bm/2(Bm 表示峰峰值)，将公式变换一下得

$$E \times 0.5 = 2 \times Bm1 \times Ac \times N \times f \times 10^n \qquad \text{公式(1-2)}$$

等式前面的 0.5 表占空比，后面的$2 \times \mathrm{Bm1}$表峰值，公式再变换得

$$Uin \times Don = Bm \times Ac \times N \times f \ \times 10^n \qquad \text{公式(1-3)}$$

从公式（1-3）可以看出对于反击变压器这种脉冲矩形波，波形系数中是没有 4.44 或 1.11 的。

公式（1-3）属临界状态方程更准确的表达式如下式

$$Uin \times Don = \Delta B \times Ac \times N \times f \times 10^n \quad (\Delta B = Bm) \qquad \text{公式(1-4)}$$

法拉第电磁感应只跟变化的磁通有关，在临界模式刚好变化的磁通=峰值磁通既$\Delta B = Bm$。

连续模式下的磁通先参看下图

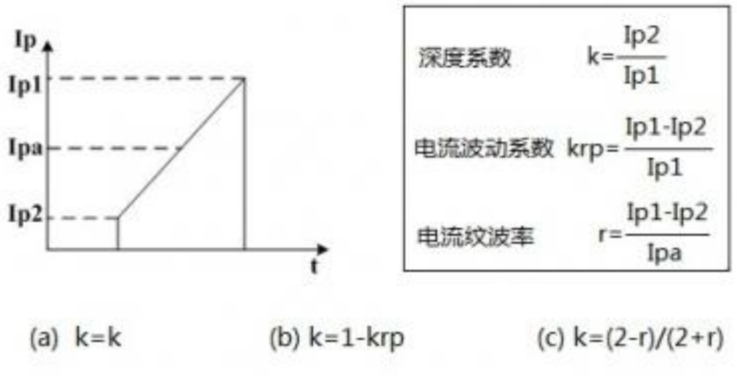

图 1-1 电流波形系数定义

电和磁是紧密关联的，有电就有磁有磁既有电（这里的电指“净”电，对于正激变压器“净电”=输入电流-输出电流），通过观察电流的情况既可得知磁通的变化情况。通过图 1-1 可知变化的电流$\Delta I=(1-k)\times Ipk$，则可推出变化的磁通$\Delta B=$（$1-k$）$\times Bm$，将ΔB代入公式（1-4）

$$Uin\times Don=(1-k)\times Bm\times Ac\times N\times f\times 10^{n} \qquad \text{公式(1-5)}$$

公式(1-5)中的 *1-k* 既为磁的波形系数，对于临界和断续模式 *k*=0。

从电的角度考虑的是导线损耗和发热，对于磁关注的是最大磁通密度 *Bm*，对于电关注的是有效电流值，导线的峰值电流并不是主要问题。

关于有效值波形系数的几种表达式如下图

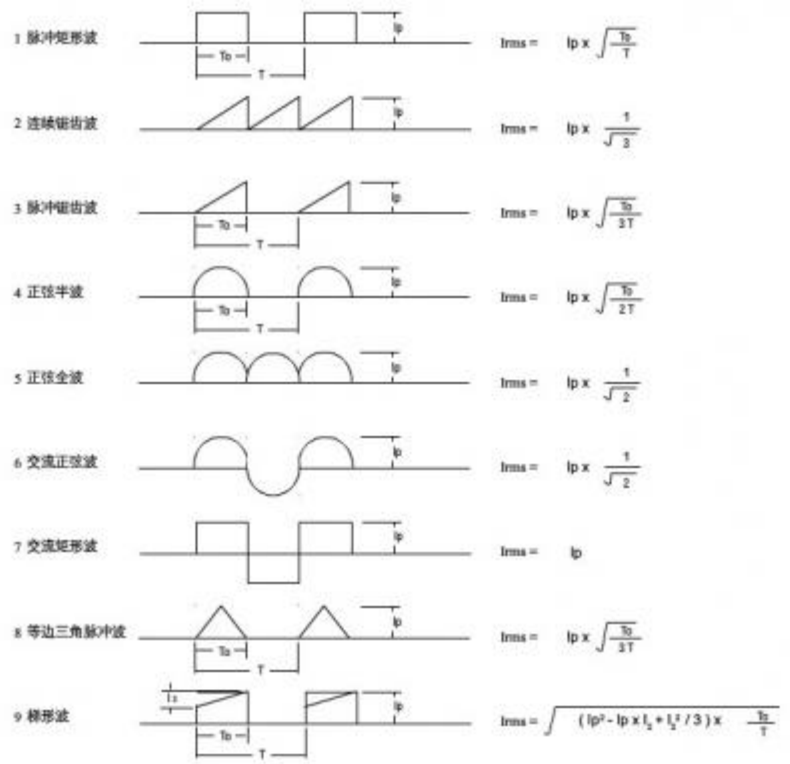

图 1-2 有效值波形系数

对于反激变压器断续、临界模式是波形(3)脉冲锯齿波，连续模式是波形(9)梯形波。电流密度和电流有效值的关系公式如下：

$$Irms\times N=Jm\times Aw\times ku \qquad \text{公式(2-1)}$$

式中 *ku* 表示窗口系数一般取 0.3-0.5。

公式（2-1）中的电流有效值是初级+次级总的有效值，有些公式直接代用了图 1-2 的波形 (9)梯形波公式并不合适，总的电流有效值计算起来有些麻烦所以用一种等效法来简化这个问题。

等效法参考下图：

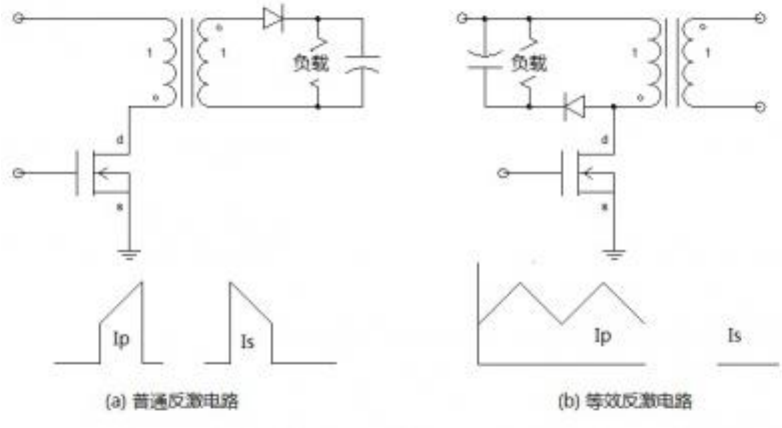

图 1-3 等效法分析有效电流

图 1-3 中为简化分析将匝比设为 1:1，图(a)为正常的反激工作方式，在 Ton 时刻初级线圈导通初级电流为 Ip，在 Toff 时刻次级线圈导通次级电流为 Is，在整个 T 周期初、次级线圈是轮流导通的导线利用率是 0.5。图(b)与图(a)在功率处理上是完全相同的，由于电流都在初级所以分析起来比较容易。图(b)与图(a)的区别就是没有隔离功能，次级线圈虽然没有电流但占了窗口面积，导线利用率也是 0.5。电流的波形系数将由图(b)推导出来。

一种比较简单的方法是采用中心电流法，如下图

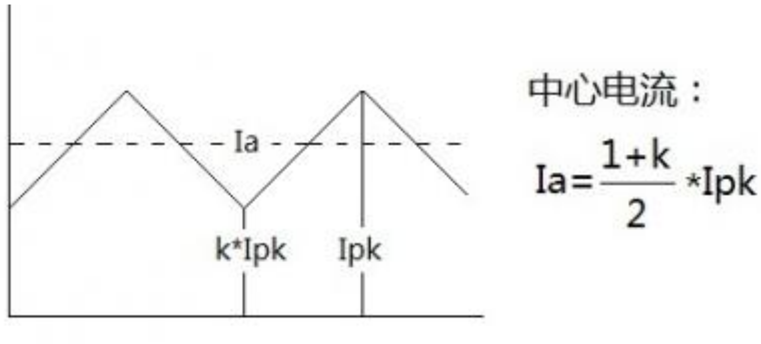

图 1-4 中心电流 Ia

用中心电流 Ia 来代替有效电流，方程如下

$$Ia \times N = Jm \times Aw \times Ku \times 0.5 \qquad \text{公式(2-2)}$$

前面提到反激电路或其等效电路导线利用率只有 0.5，所以公式中要多乘以 0.5

将中心电流方程代入公式（2-2）得

$$Ipk \times N = Jm \times Aw \times Ku/(1+k) \qquad \text{公式(2-3)}$$

公式(2-3)中的 (1+k)/2 既为电流的波形系数。

将公式(2-3)电方程和公式(1-5)磁方程等式两边分别相乘，

$\mathrm{Uin \times Don \times Ipk \times 10^4 = f \times Jm \times Bm \times Ae \times Aw \times ku \times (1-k)/(1+k)}$ 整理得

$$\boldsymbol{Ap = \frac{1+k}{1-k} \times \frac{Uin \times Ipk \times Don \times 10^4}{Jm \times Bm \times ku \times f}} \qquad \text{公式(2-4)}$$

单位：$Ap(\mathrm{cm}^4)$ $Jm(\mathrm{A/cm^2})$ $Bm(\mathrm{T})$ $f(\mathrm{Hz})$

公式(2-4)为简洁版 AP 算法，（1+k）/(1-k)既为波形系数。

图 1-4 的电流是锯齿波，其有效值的表达式为

$$Irms=\sqrt{\frac{1}{3}\times I_{AC}{}^{2}+I_{DC}{}^{2}}$$

（有兴趣的可自行推导）

代入深度系数 k

$$Irms = Ipk\times\sqrt{1/3\times(1/2-k/2)^2+1/4\times(1+k)^2}$$
$$= Ipk\times\sqrt{1/3\times(1+k+k^2)}$$

导线的发热功耗为

$$Irms^2\times\rho\times\frac{MLT\times N}{Aw\times Ku\times 0.5/N}$$
$$=(Jm\times Aw\times Ku)^2\times\rho\times\frac{MLT}{Aw\times Ku} \qquad 公式(2-5)$$

代入电流有效值并化简得

$$N\times Ipk\times\sqrt{1/3\times(1+k+k^2)}=\sqrt{0.5}\times Jm\times Aw\times Ku \qquad 公式(2-6)$$

最终推出比较精确的 AP 算法为：

$$\boldsymbol{Ap=\frac{\sqrt{2\times(1+k+k^2)/3}}{1-k}\times\frac{Uin\times Ipk\times Don\times 10^4}{Bm\times Jm\times ku\times f}} \qquad 公式(2\text{-}7)$$

单位： $Ap(\mathrm{cm}^4)$ $Jm(\mathrm{A/cm^2})$ $Bm(\mathrm{T})$ $f(\mathrm{Hz})$

（02 版修正了 Ap 算法中的电流波形，$2\to\sqrt{2}$）

下面的是直接由初级导线功耗+次级导线功耗=总导线功耗推导的电流波形系数。

$$Ip.rms^2\times Rp+Is.rms^2\times Rs=(Aw\times J\times Ku)^2\times R \qquad 公式（3-1）$$

$$Ip^2\times(D/3)\times(1+k+k^2)\times\rho\times\frac{MLT\times Np}{0.5\times Ku\times Aw/Np}$$
$$+(Ip\times n)^2\times(1-D)/3\times(1+k+k^2)\times\rho\times\frac{MLT\times Ns}{0.5\times Ku\times Aw/Ns}$$
$$=(Aw\times J\times Ku)^2\times\rho\times\frac{MLT}{Ku\times Aw} \qquad 公式（3-2）$$

$$Ip^2\times(1/3)\times(1+k+k^2)\times\rho\times\frac{MLT\times Np}{0.5\times Ku\times Aw/Np}=(Aw\times J\times Ku)^2\times\rho\times\frac{MLT}{Ku\times Aw} \qquad 公式（3-3）$$

$$Np\times Ip\times\sqrt{(1+k+k^2)/3}=\sqrt{0.5}\times Aw\times J\times Ku \qquad 公式（3-4）$$

推导结果同等效法一致,证明匝比不影响等效法。