

# 功率因数校正用电感材料

## 1 引言

开关电源（硬开关方式）如今已经实用化、商品化，其突出的优点效率高，体积小，重量轻已被人们认可。但是负面效应决不可忽视，由于不可控整流方式网侧输入电流为非正弦周期电流，AC/DC 变换器在投入运行时，将向电网注入大量的高次谐波，因此网侧的功率因数不高，仅有 0.6 左右，并对电网和其它电气设备造成严重谐波污染与干扰。在三相四线制供电方式中，由于多次谐波分量叠加，使中线电流增大，这是一个很棘手的问题。而如今计算机电源、UPS、程控交换机电源、电焊机电源、电子镇流器等早已高频开关化，其对电网的污染已达到必须治理的程度，因此功率因数校正技术正在成为热点，并将成为商家进入市场的关键。

从电工学原理讲，功率因数 PF 是指交流输入有功功率 P 与视在功率 S 的比值。

$$PF=P/S=UI_1\cos\phi/UI_2=DF\cos\phi \quad (1)$$

式中： $I_1$ —基波电流有效值；

$I_2$ —电网电流有效值；

U—电网电压有效值；

$\phi$ —基波电流、电压的相位差；

DF (distortionfactor) 为电流失真因子。

要使  $PF \rightarrow 1$ ，必须对输入电流严重非正弦情况采取相应的措施，使  $DF \rightarrow 1$ ，同时还必须使基波电流与电压相位差  $\phi \rightarrow 0$ ，才能使  $PF \rightarrow 1$ ，所以功率因数校正实际上是对输入电流整形使其尽可能正弦化，同时改善电源系统的输入阻抗，使之尽量呈电阻性，使基波电流与电压同相位。这就是功率因数校正的基本思路。

开关电源的功率因数校正器 (PFC) 可分为两类，一类为有源 PFC，由电感电容及电子元器件组成；另一类为无源 PFC，一般采用电感补偿方法使交流输入的基波电流与电压之间相位差减小来提高功率因数。在校正电路中有源 PFC 较多采用高频升压电路功率因数开关调节器，通常采用 Boost 电路，基本电路拓扑见图 1。

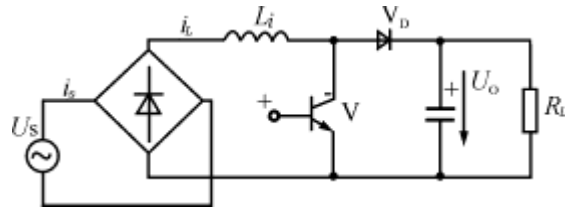


图 1 升压型 Boost 电路

图中  $L_i$  为储能电感，看起来并不复杂的电路，但是如何能够合理选择元件及相关元件的材料是关键所在，本文将就 PFC 技术中的电感元件及材料开展讨论。

## 2 无源 PFC 中的电感材料选择

无源 PFC 是一个由电感、电容组成的低通滤波器，如图 2 所示是一种低通滤波器的电路原理图，其中  $L_1$  是共模电感， $L_2, L_3$  是差模电感。

共模电感是完全对称、线圈匝数相同的两个电感线圈，绕在同一个铁心上，电流同方向流经两组线圈后，根据右手螺旋法则，在电感铁心内产生两个方向相反的磁场，由于流经电流大小，线圈匝数完全相同，磁场强度强弱相当，因而完全抵消，不存在磁饱和问题，主要是要考虑电感铁心材料的初始磁导率  $\mu_0$ ，对于这类材料的  $\mu_0$  越高越好，通常有高  $\mu_0$  系列的铁氧体磁心， $\mu_0=4 \times 10^3, 6 \times 10^3, 8 \times 10^3, 1 \times 10^4$  等类型，铁基超微晶材料  $\mu_0 \geq 5 \times 10^4$ ，坡莫合金系列如 1J79, 1J851 系列， $\mu_0 \geq 5 \times 10^4$ 。在选择金属磁性材料时必须注意频响问题(见图 3) 1J79 或 1J851 系列的磁心  $\mu_0$  随频率上升而下降的幅度比较大，越薄的材料， $\mu_0$  随频率下降的幅度比较小，设计时应注意这一点。

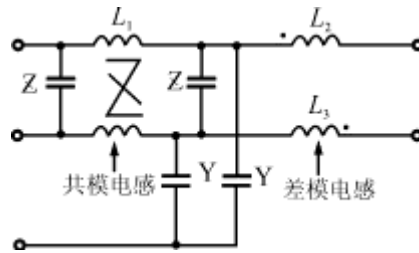


图 2 低通滤波器电路原理图

差模电感主要要解决磁饱和问题，在实际使用过程中，广大电路工作者已经逐步认识到了磁粉心的优越性，使用铁心加气隙的作法（铁氧体磁心加气隙，非晶磁心加气隙，硅钢磁心加气隙）已越来越少。现

在用于滤波器中差模电感铁心大多为有效磁导率为 60~75 的磁粉心， $B_{500}=1.34T$ ，即在  $39788.5A/m$ (即 5000e)的磁场强度下，磁感应强度达 1.34T。

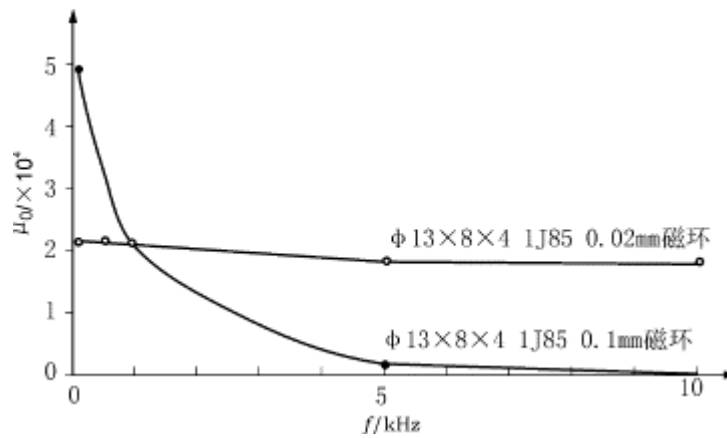


图 3 磁心  $\mu_0$  随频率  $f$  的变化关系

图 4 是有效磁导率为 75 的铁粉心的静态磁滞回线，和铁氧体材料相比，有高的  $B_s$  值，不易饱和，因此体积至少可减小一半，采用廉价的铁粉作原料，并且不需要开口，没有噪声，成本可大大降低，价格可以和铁氧体比拟，以  $27 \times 14 \times 11$  的规格为例，它可以承受 400 安匝而不饱和，优点突出。

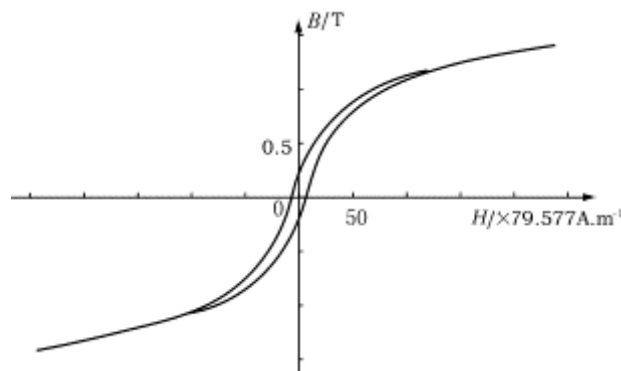


图 4  $\mu_e=75$  铁粉心的 B-H 曲线

但是值得商榷的是，可选择作为滤波器的差模电感的磁粉心不仅仅是  $\mu_e=75$  铁粉心一种，图 5 是铁粉心系列  $\mu_e=75$ ， $\mu_e=55$ ， $\mu_e=35$  磁导率随频率变化的曲线，可见它们磁导率随频率上升而下降的趋势不同。图 6 是 MICROMETERS 公司—8 ( $\mu_e=35$ ) 和上海钢研精密合金器材研究所 SF—33 ( $\mu_e=37.5$ ) 铁粉心材料的插入损耗曲线，可见吸收峰出现在不同的频率范围内，因此除了考虑电感量大小，磁饱和问题，价格等因素外，还应该考虑抑制噪声的频率范围，来选择不同型号的铁粉心。

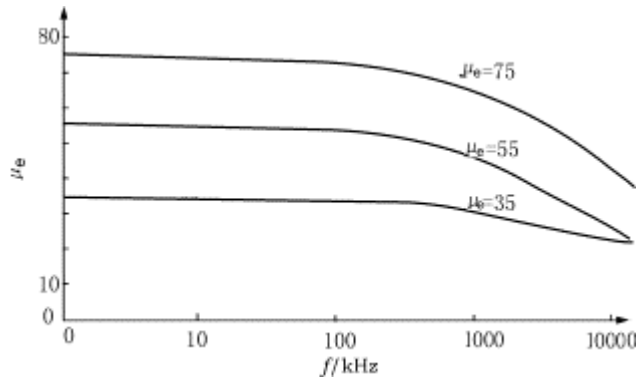


图 5 有效磁导率与频率的关系曲线

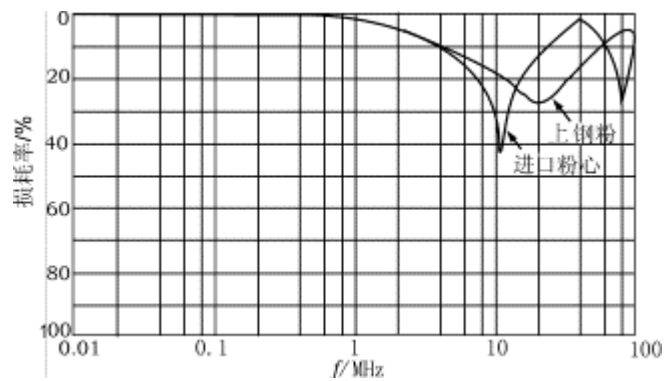


图 6 两种铁粉心的插入损耗曲线

### 3 有源 PFC 中的电感材料选择

在功率放大的功率因数校正中基本上是采用升压式变换电路，而升压电感是串在输入回路中，电感电流等于输入电流，只要控制电感电流就可以达到控制输入电流。功率开关器件的切换速率  $\omega_S$  远大于工频  $\omega_0$  ( $\omega_S = K\omega_0$ ,  $K \gg 1$ )；L 值大得足以使电感中的电流连续，当功率器件开关切换脉冲占空比的变化遵循正弦规律时，即所谓正弦波脉宽调制 (SPWM) 时电感中流过的电流为：

$$i_L = U_p \sin \omega_0 t / I_p \sin \omega_0 t / U_p \sin [\sin \omega_0 t + (D\pi/K)] \quad (2)$$

当  $K \gg 1$  时，

$$i_L = I_p \sin \omega_0 t \quad (3)$$

即  $i_L$  与输入电压一样，都是正弦波，相位又相同，从而实现了  $DF=1$ ,  $\cos \phi=1$ ，达到功率因数校正的目的。

从图 7 中可见，S 的控制信号实际上受控于输入电压，开通时由全波整流电路为 L 充电，关断后 L 上的电压与输入电压叠加为电容 C 和负载提供能量，因此 PFC 中的电感是一个储能电感而且电感量又必须足够的大，在 50Hz 基波电流上又叠加了高频成份，对于该电感铁心材料提出了相当高的要求，即在强的基波电流作用下不饱和又在高频下有低的损耗。

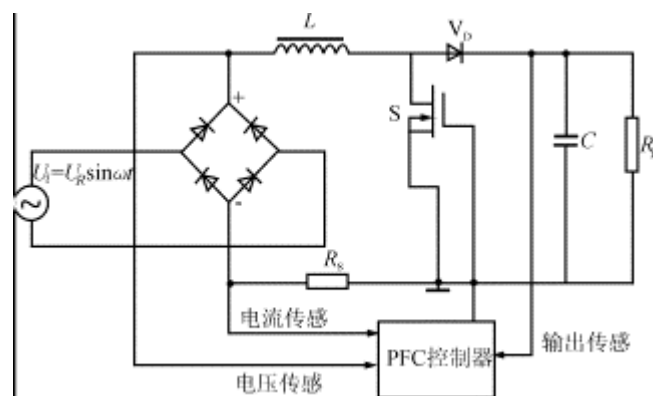


图 7 基本升压型有源功率因数校正电路

目前扼流圈铁心使用的材料主要有两类，一类是功率铁氧体磁心加开气隙，另一类是磁粉心。表 1 是它们的饱和磁感应强度 ( $B_s$ ) 的比较，其中锰锌软磁铁氧体  $B_s$  值最低，为 0.5T，约为铁粉心的一半左右，因此在同样安匝数下和铁粉心相比截面将增加 1 倍左右，因而体积势必增大。

表 1 不同材料的  $B_s$  值比较

材料	Fe 粉心	80NiFe	FeSiAl	Mn-Zn 铁氧体
$B_s/T$	1.38	0.75~0.80	0.60~0.80	0.45~0.50

另外由于加开气隙，在铁氧体开气隙处表面，形成表面涡流，造成铁氧体磁心局部升温，使铁氧体磁心发热，当温度超过铁氧体居里点时，有效磁导率  $\mu_e$  急剧下降为 0，这也是功率铁氧体磁心用作电感不利的一面，许多电源工作者对铁氧体磁心在有源 PFC 线路中用作储能电感铁心持否定态度，可能主要就是这个问题吧。

关于磁粉心在 PFC 电感中的应用，已被很多电源工作者所认可。目前磁粉心材料大致有铁粉心，Sendust 粉心 (FeSiAl)，坡莫合金粉心 (P.P.M)，从损耗曲线上可以看出，P.P.M ( $\mu_e=60$ ) 及 Sendust ( $\mu_e=60$ ) 和铁粉心 ( $\mu_e=35$ ) 相比，前二者约为后者的 1/10~1/6，因此，铁粉心可以排除，无法用作 PFC 电感材料，除非大大增加体积，降低工作 B 值。

国外文献对于 PFC 电感材料一般都介绍坡莫合金系列，笔者以为，2Mo80NiFe 磁粉系列（ $\mu_e=160, 147, 125, 60$  等）有优良的性能，其频率特性、电流特性，损耗特性均为目前最高水平，而且系列化，有可选择余地，但是价格比较昂贵，在电源价格竞争激烈的今天，很多使用者无法接受，我们向广大电源工作者推荐比较廉价的 FeSiAl 粉心。

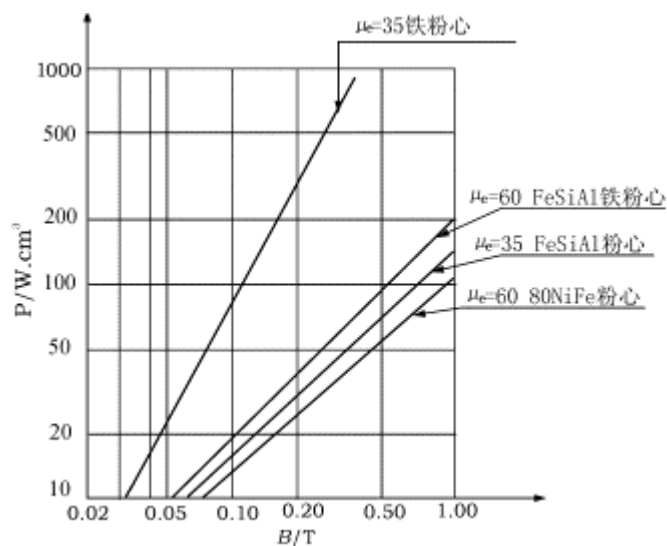


图 8 FeSiAl 系列  $\mu_e$ -f 曲线

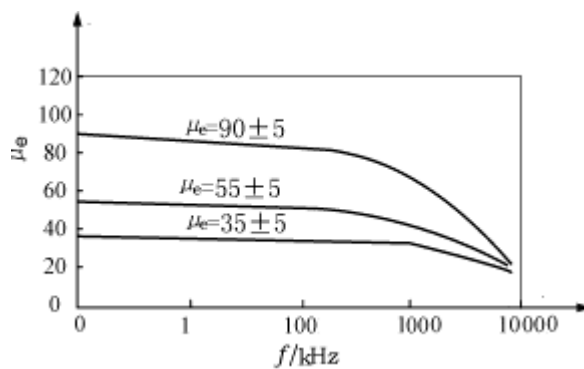


图 9 FeSiAl 粉心  $\mu / \mu_0$ -I 曲线

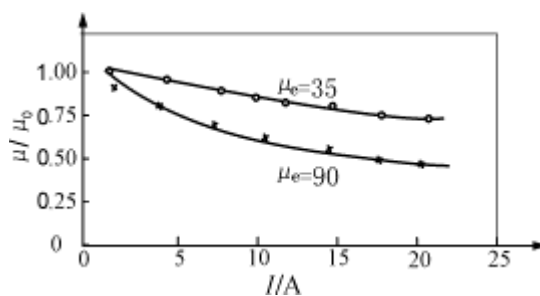


图 10 损耗曲线 (f=20kHz)

FeSiAl 材料很早就被发现具有优良的磁性能（可以和坡莫合金相比拟），高  $\mu$  值（ $\mu_0=8\times 10^4\sim 10\times 10^4$ ），低损耗， $B_s=1.1T$ ，但由于其脆性，加工困难，而没有大量使用。我所经过几年的研制开发，形成了系列的 FeSiAl 磁粉心产品， $\mu_e=90\pm 5$ ， $55\pm 5$ ， $35\pm 5$ ，目前进一步推向市场，图 8，9 是它们的  $\mu_e-f$  曲线和电流特性曲线，可以和 2Mo80NiFe 相比拟，从图 10 中所介绍的损耗曲线中可以发现，它的损耗高于坡莫合金磁粉心，但远低于铁粉心，可用在 PFC 中作电感材料。

#### 4 结论

功率因数校正技术将得到越来越广泛的应用，广大电源工作者希望找到合适的材料来满足电路的要求。笔者本着这一目的介绍有关电感材料的一些情况及特性。介绍了铁粉心在 PFC 中的应用，提出了抑制噪声频段不同，在差模中应用可选择不同磁导率铁粉心的观点。根据有源 PFC 电感的特点，指出使用磁粉心作为有源 PFC 电感铁心优于使用功率铁氧体开气隙磁心，并介绍了 FeSiAl 材料的系列磁粉心，旨在增加广大电源工作者选择余地，制造出体积更小、温升更低、价格更廉的功率因数校正器。