

德国 VAC 公司的超微晶材料在高频开关电源 (SMPS) 功率变压器上的应用

一、 VAC 公司的超微晶材料用作开关电源功率变压器的优异性及其标准规格系列

1. VAC 公司的超微晶材料 VITROPERM 500F 用作开关电源功率变压器有着独特的优异性：

- 非常低的铁损，且损耗在 -40 ~ +120 范围内不随温度而变化。
- 非常高的饱和磁通密度 (1.2T，即使在高温下也能保持)。因此开关电源设计者可以考虑选择较低的工作频率，从而节省功率半导体和 EMI 滤波器件的成本。
- 足够高的磁导率，且磁导率随磁通密度和温度的变化都非常小。
- 磁芯由环氧树脂封装，具有非常高的机械强度；由于这种磁芯材料几乎没有磁滞伸缩，因此可以设计铸造元件。VITROPERM 超微晶可以抵抗非常强的振动应力。

2. VAC 功率变压器磁芯的标准规格型号

目前为止，VAC 可以提供外径约 10mm ~ 500mm、高度约 4mm ~ 30mm 的环形磁芯，可以通过叠加磁芯来获得更高的高度。目前标准系列的磁芯外径为 16mm ~ 130mm，由这此磁芯组合可以做出功率高达 40kW 的功率变压器。矩形磁芯可按要求定做。

下表是 VAC 功率变压器磁芯的标准规格型号（注意：VITROPERM 500F 是铁基超微晶材料，用于推挽式（全桥、半桥）变换器

VITROPERM 500 F - cores for transformers in SMPS, standard sizes:													
core dimensions	finished dimensions (limiting values)			iron cross section and path length		core mass m_{Fe}^{**} g	A_L - value at 10 kHz typ. A_L^{**} μH	winding cross section and turn length		thermal resistance R_{th}^{****} K/W	power at 20 kHz typical P W	part number, order code VITROPERM 500F T60004-L2...	
	O.D.	I.D.	H	A_{Fe} cm ²	l_{Fe} cm			A_{Cu}^{***} cm ²	l_{Cu} cm				
mm	mm	mm	mm	cm ²	cm	g	μH	cm ²	cm	K/W	W	T60004-L2...	
16x10x6	17.6	8.3	8	0.14	4.08	4.3	13	0.2	3.26	40	50	016-W373	
20x12.5x8	22	10.5	10	0.24	5.11	9	18	0.32	3.9	27	100	020-W374	
25x16x10	27	14	12	0.36	6.44	17	21	0.55	5.12	19	170	025-W375	
30x20x15	32.3	17.8	17.8	0.6	7.85	35	27	0.8	6.82	13	350	030-W376	
40x25x15	42.3	22.5	17.3	0.9	10.2	68	32	1.3	7.9	9	600	040-W433	
50x40x20	52.3	37.1	22.8	0.8	14.1	83	20	3.5	10.3	5.5	1 200	050-W434	
63x50x25	65.6	46.6	27.8	1.3	17.8	170	26	4.57	11.1	4	2 500	063-W435	
80x63x25	82.6	59.3	27.8	1.62	22.5	267	27	6.97	12.5	3	4 000	080-W436	
100x80x25	104	75	28.5	1.9	28.3	395	25	11.5	14.2	2	6 000	100-W342	
130x100x25	134.5	95	28.5	2.85	36.1	757	30	18.2	16.8	1.5	11 000	130-W352	

可参考上表，各种规格的磁芯在 20kHz 频率下所传输的功率（仅为典型值，条件不一样所传输的功率值也会不一样）。

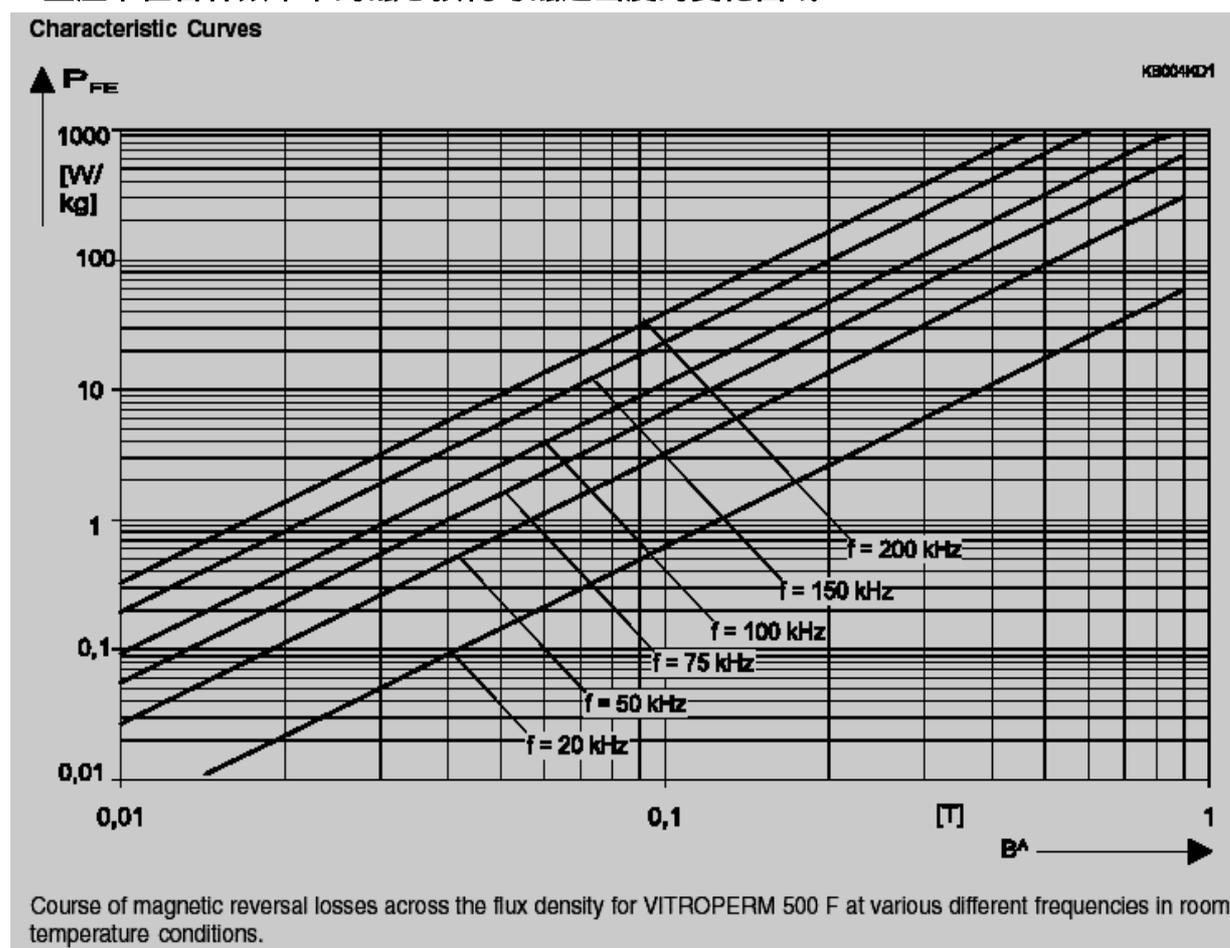
在频率 $f=20\text{kHz}$ ，环境温度 $T = 60$ ，允许的温升 $T = 50\text{K}$ ，变压器为浇铸设计时，变压器磁芯大小和所能传输的功率值列表如下（仅供参考指导）：

磁芯尺寸大小（外径 × 内径 × 高度 mm）	所传输的功率 (W)
50 × 40 × 20	1300
63 × 50 × 25	2800
80 × 63 × 25	4200
100 × 80 × 25	6100
100 × 80 × 25 × 2 (个磁芯)	9000
130 × 100 × 25	11000
130 × 100 × 25 × 2 (2 个磁芯)	16000
130 × 100 × 25 × 2 (2 个磁芯)	20000
130 × 100 × 25 × 4 (4 个磁芯)	24000

如果变压器采用强迫冷却方式，所能输出的功率将可增大 50%。

二、用 VAC 的 VITROPERM 500F 超微晶材料磁芯设计功率变压器

1. 室温下在各种频率下的磁芯损耗与磁通密度的变化曲线



2. 设计计算步骤

在规定最大温升的情况下，每个磁芯的最佳工作磁通密度和电流密度就可以确定，磁芯的最大功率容量也就可以计算出来：

$$\Delta B_{opt} = \Delta B_0 \times \left(\frac{2 \times \Delta T}{(2 + Z) \times R_{th} \times m_{Fe} \times P_0 \times \left(\frac{F}{F_0}\right)^X \times \left(\frac{f}{f_0}\right)^Y} \right)^{\frac{1}{Z}}$$

$$S_{eff,opt} = \sqrt{\frac{Z \times \Delta T}{(Z + 2) \times R_{th} \times \rho_{Cu} \times l_{Cu} \times A_{Cu} \times 10^4}}$$

ΔB_{opt}	[T]	<i>Optimum induction deviation. $\Delta B_{opt} = 2 \times B_{opt}$</i>
$S_{eff,opt}$	[A/mm ²]	<i>Optimum current density</i>
P_0	110 W/kg	<i>Specific eddy-current losses at f_0, ΔB_0 and B_0</i>
m_{Fe}	[kg]	<i>Core mass</i>
f	[kHz]	<i>Operating frequency</i>
f_0	100 kHz	<i>Reference frequency</i>

ΔB_0	0,6 T	<i>Reference flux density deviation. $\Delta B_0 = 2 \times B_{max}$</i>
F		<i>Harmonic factor of the input voltage. For square waveform:</i> $F = \frac{1}{\sqrt{2 \times \tau}}$
F_0	1,11	<i>Harmonic factor of the reference voltage (sine)</i>
X	1,60	<i>Material exponent for the dependence of the losses upon the signal waveform</i>
Y	1,80	<i>Material exponent for the dependence of the losses upon the frequency</i>
Z	2,08	<i>Material exponent for the dependence of the losses on the flux density</i>
ΔT	[K]	<i>Temperature rise</i>
R_{th}	[K/W]	<i>Heat transmission resistance of the transformer. Approximate values by the core manufacturer</i>
ρ_{Cu}	[Ω cm]	<i>Specific resistance of the copper as a function of temperature: $1.786 \times 10^{-6} \times (1 + 3.93 \times 10^{-3} K^{-1} \times \Delta T)$</i>
A_{Cu}	[cm ²]	<i>Copper cross-section possible with the selected core, defined by the internal hole of the core and the copper space factor. Approximate values by the core manufacturer</i>
l_{Cu}	[cm]	<i>Average length of a copper turn. Approximate values by the core manufacturer</i>

功率容量的计算：

$$P_{max} = k \times f \times A_{Fe} \times A_{Cu} \times \Delta B_{opt} \times S_{eff,opt} \times 10$$

P_{max}	[W]	Power capacity
A_{Fe}	[cm ²]	Iron cross-section
k		Power factor depending upon the circuit principle

The factor k is calculated depending upon the circuit principle:

Primary side	Secondary side	Symbol	k =
Full bridge (4 transistors)	Bridge rectification (4 diodes)		$\frac{1}{\sqrt{2 \times \tau_m}}$
Full bridge (4 transistors)	Center-tap rectification (2 diodes)		$\frac{2}{\sqrt{2 \times \tau_m} + \sqrt{2 \times \tau_m + 1}}$
Half bridge (2 transistors)	Bridge rectification (4 diodes)		$\frac{2}{2 \times \sqrt{\tau_m} + \sqrt{2 \times \tau_m}}$
Half bridge (2 transistors)	Center-tap rectification (2 diodes)		$\frac{2}{2 \times \sqrt{\tau_m} + \sqrt{2 \times \tau_m + 1}}$

Where $\tau_m = 0,5 \times \tau_{max} \times \frac{1 + U_{e,min}}{U_{e,max}}$

τ_m		Mean pulse duty factor of the input voltage
τ_{max}		Maximum pulse duty factor of the input voltage
$U_{e,min}$	[V]	Minimum input voltage
$U_{e,max}$	[V]	Maximum input voltage

The primary number of turns is determined so that the applied primary voltage generates a flux density deviation in the core which does not exceed ΔB_{opt} :

原级绕线：

$$N_{prim} = \frac{\tau_{max} \times U_{e,min} \times 10}{f \times A_{Fe} \times \Delta B_{opt}}$$

N_{prim}	Primary number of turns
------------	-------------------------

次级绕线：

The secondary number of turns is determined according to the following relation:

$$N_{sek} = \frac{U_a + \Delta U}{r_{max} \times U_{e,min} \times 2} \times N_{prim}$$

N_{sek}		Secondary number of turns
U_a	[V]	Output direct voltage
ΔU	[V]	Voltage drop through the copper resistances of the windings and through the rectifier diodes

三、 VAC 用于功率变压器的超微晶材料 VITROPERM 500F 优异磁特性的详细介绍

超微晶材料与传统的铁氧体相比，有着显著的优异性。电路设计者只有深入去探讨和了解这种材料的优异特性，才能充分利用好这种材料，做出最优秀的设计。

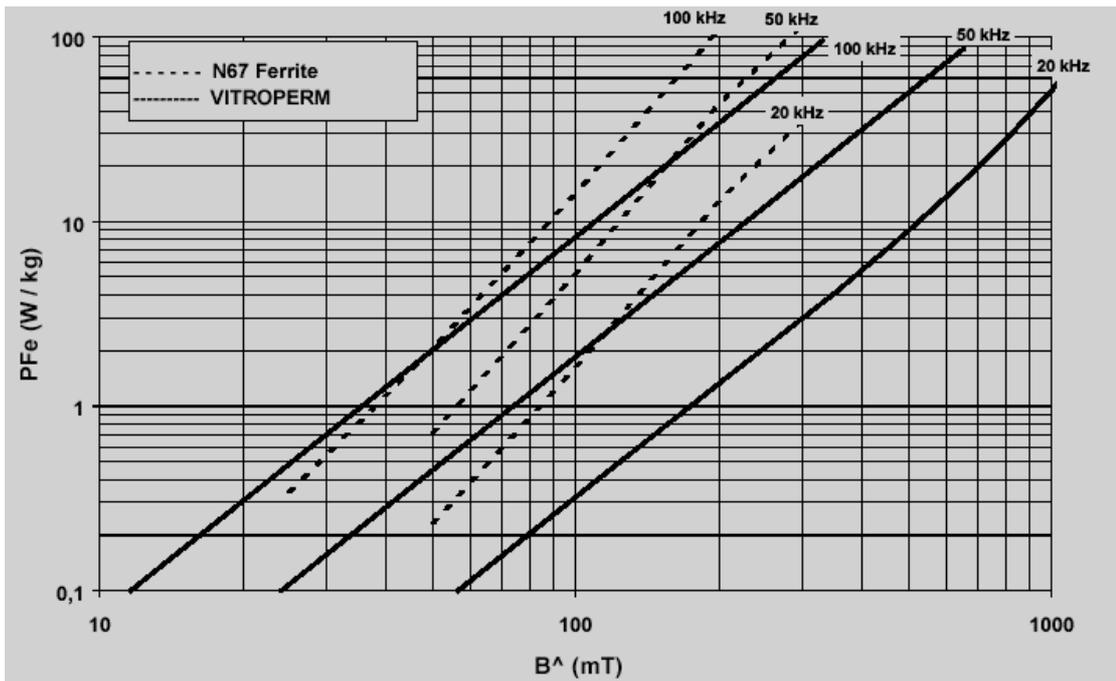
1. 用于功率变压器的各种磁性材料特性的比较：

材料	钴基非晶	铁基非晶	锰锌铁氧体	超微晶
材料基本组成	约 77%钴	约 79%铁	MnZn	约 73.5%铁
磁导率	2000 ~ 3000	4000 ~ 80000	1500 ~ 2500	20000 ~ 30000
铁损 P _{fe} (f=20kHz; B [^] =200mT)	2W/kg	18W/kg	9W/kg	1.4W/kg
铁损 P _{fe} (f=100kHz; B [^] =200mT)	40W/kg	105W/kg	110W/kg	35W/kg
饱和磁密 B _s	0.8T	1.55T	0.48T	1.2T
T _{max} (最高工作温度)	90	120	100	120

2. VAC 的 VITROPERM 500F 超微晶材料与西门子 N67 锰锌铁氧体材料磁特性的比较

A. 损耗

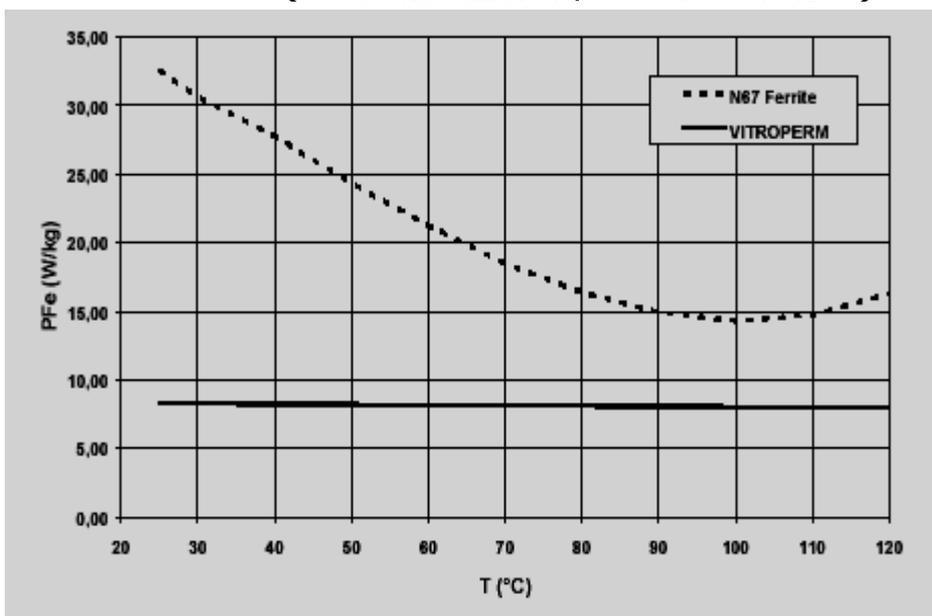
VAC 的 VITROPERM 500F 超微晶材料与西门子的 N67 锰锌铁氧体材料在不同频率下铁损与磁通密度的变化曲线：



从上表可看出，VITROPERM 500F 在磁通密度及损耗方面远远优于铁氧体材料。在 100 铁氧体的最佳工作温度下，20kHz、520mT 时超微晶材料的损耗与相同频率 180mT 时铁氧体材料的损耗相同。因此电路设计者在设计时可考虑选择较低的工作频率和较大的磁通密度，一方面可以达到减小变压器体积的目的，另一方面又可节省功率半导体(如 IGBT)和 EMI 滤波的成本。

B. 温度特性

损耗随温度变化的曲线关系
(实线为超微晶材料，虚线为铁氧体材料)



从上表可以看出，VAC 的 VITROPERM 500F 超微晶材料具有优异的温度特性。在功率铁氧体材料方面，功率损耗在低于 100 时最低。在较高温度时，这些损耗不仅增高，而且温度越高，损耗又会越大。相反，VITROPERM 500F

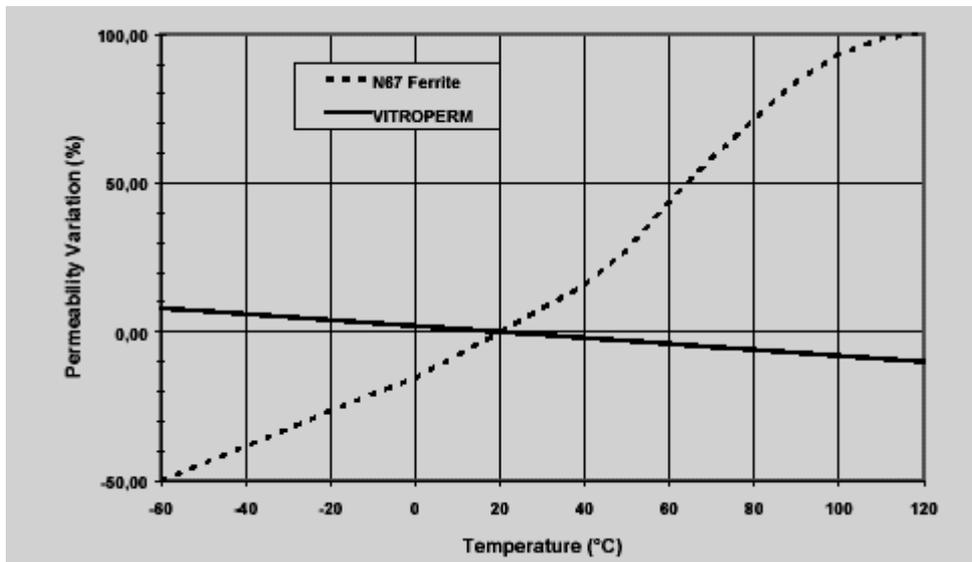
超微晶材料具有负温度系数,即使在高达 120 左右的工作温度时也不例外。这样可以防止变压器的内部过热并且确保工作可靠性。原则上,由于 VITROPERM 超微晶材料只受绝缘材料的稳定性的限制而不受磁性材料本身的限制,所以它的最高工作温度甚至可以超过 200 。

此外,磁性材料工作温度的下限对非静态应用尤为重要,例如铁路运输及航空。在这些应用领域中,变压器需要暴露于只有 -40 的环境温度中。与超微晶材料 VITROPERM 500F 相反,功率铁氧体的损耗在温度 10 时,会急剧上升。

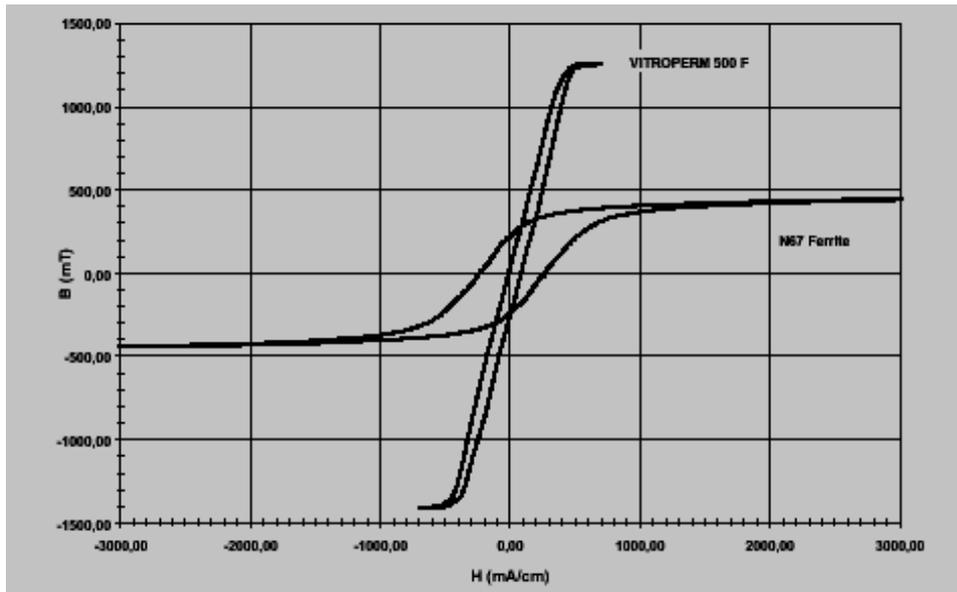
室温时和 100 时的饱和磁通密度

Bsat	25 °C	100 °C	Deviation
Ferrite N67	480 mT	375 mT	- 22 %
VITROPERM 500 F	1200 mT	1100 mT	- 8 %

磁导率随温度的变化曲线
(实线为超微晶材料,虚线为铁氧体材料)



C. 磁滞回线的比较



D. 工作频率的选择

根据实际电路设计和应用，可在 20kHz ~ 100kHz 之间选择。

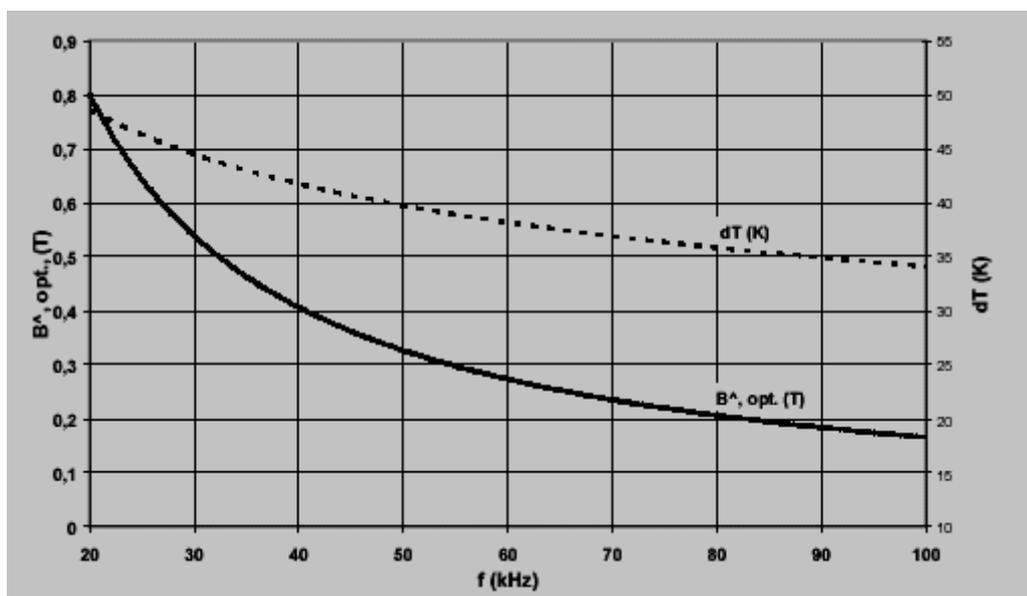
从总体性能成本考虑(IGBT 等功率半导体器件 ,EMI 滤波器件) ,20kHz~50kHz 为最佳工作频率。

建议在设计时把最大磁通密度 B^{\wedge} 选在 0.55T ~ 0.6T 以下。

实例分析：

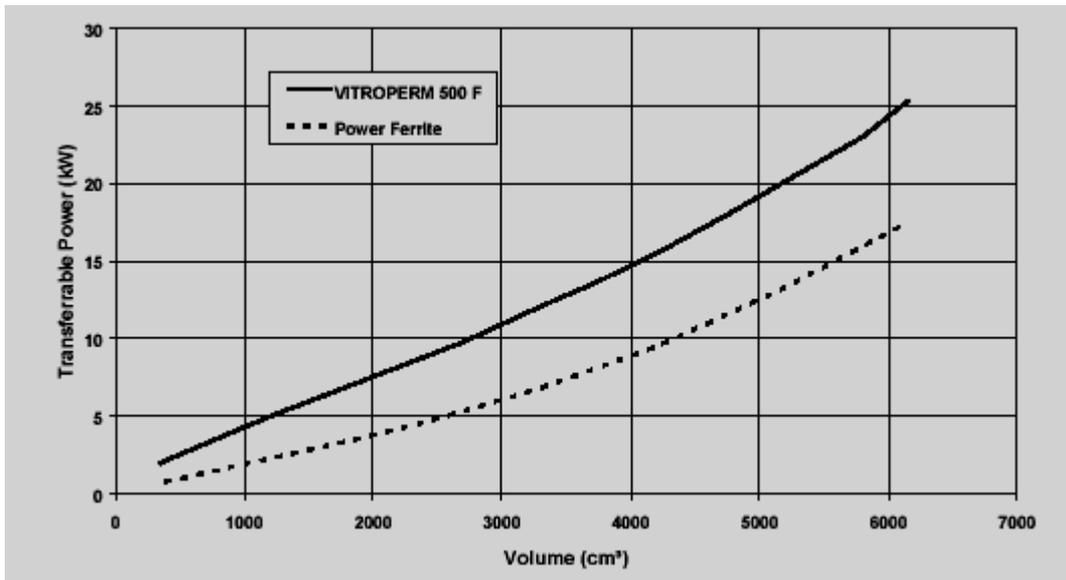
一个功率容量约为 10kW 的功率变压器，用一个大小为 100 × 80 × 25mm 的 VITROPERM 500F 超微晶材料磁芯来做，通过调整其绕线圈数来适应 20 ~ 100kHz 的工作频率，经数学建模和优化分析后得出以下关系曲线图：

磁通密度、温升与频率的关系曲线



从上表可以看出，30kHz 时的温升仅比 100kHz 时的温升约大 10K。相反，在 100kHz 时的磁通密度为 170mT，而在 30kHz 时的磁通密度为 550mT。传输这样大小的功率，如果用相同大小的铁氧体磁芯是远远达不到的。

E. 用 VITROPERM 500F 超微晶材料磁芯来做的功率变压器与用铁氧体磁芯做的功率变压器体积大小的比较



从上表可以看出，用 VITROPERM 500F 超微晶材料做的变压器在体积方面有着明显的优势。例如：转换功率为 10kW 的 VITROPERM 500F 变压器只有铁氧体变压器的一半大小。当然，这种优势对减轻变压器的重量也有着正面的影响。

四、特殊用途的功率变压器的设计及注意事项

我们不但可以给客户提供各种规格的 VITROPERM 500F 磁芯，而且也可以根据客户的要求设计和提供用于千瓦级开关电源的变压器。

根据不同的要求，变压器的体积也会随指定输出、每个磁芯的转换输出的不同而变化。要决定一个变压器的尺寸，首先要决定所采用的转换器的原理。此外，有关工作频率、负载周期、传输功率、输入及输出电压和电流、环境温度及散热条件等数据是必不可少的。任何需要遵守的标准及绝缘与测试电压也一定要考虑在内。

为了保证小体积也有好的散热及高绝缘强度，变压器由密封于树脂中的一个或几个层叠 VITROPERM 超微晶材料环形磁芯装配而成。成本低的铝壳用作模箱及固定件，这已证明在散热方面非常成功。在初级和次级绕组间的特殊绝缘系统可防止局部放电。绕组通常由特殊的绞合线制成，这包括几千根相互绝缘的细电线并且允许诸如 IGBT 模块或整流块等相邻元件直接连接。

为了保证变压器在极端恶劣的条件下长期可靠地工作，如铁路运输中承受着不断的冲击与振动以及温度的巨大影响(尽管如此，通常对于千伏级电压源，仍要求有 25 年以上的高工作可靠性)。设计者对材料以及彼此之间相互影响的深入了解是必须和非常重要的。例如，由于使用过程中温度升高，树脂及其它材料之间可能出现松动，这就有可能出现电晕放电，结果就可能发生高压击穿，引起开关电源的整个损坏。这在设计变压器时一定要考虑在内。因此用户在选择变压器供应商时，经验也是一个关键的因素。

五、带有 VITROPERM 500F 超微晶磁芯的功率变压器的应用

由于带有 VITROPERM 500F 磁芯的功率变压器具有体积小、重量轻、效率高、稳定性高等特点，它将越来越广泛地应用在各领域的开关电源上：

- 铁路运输中的开关电源
 - 电动交通工具、电车充电器
 - 轮船上用的开关电源
 - 400HZ 飞机电源
 - 通信电源
 - 焊接、电镀用电源
 - 无线电及 TV 的发射器电源
 - 风力设备电源
 - 核磁共振层析 X 射线摄影机开关电源
 - 粒子加速器轻量级开关电源
- 等等

应用举例：

铁路运输中用的开关电源：现代铁路列车的功率分配在几个开关电源上。基于安全的原因，每个车厢都被视作独立的单元。例如，如果架线电源不工作或火车头出现故障，每个车厢必须能独立刹车并启动车厢上的照明、通风及车门的控制系统。因此，每个车厢都配有许多需要配有充电设备的蓄电池。实际上，充电设备是通过汇流排提供的。输出电压约为 30V DC，最大电流可达 180A(约 5kW)，工作频率约为 20kHz。用带有 VITROPERM 超微晶材料磁芯的功率变压器仅重 7 kg。

此外，启动车上的暖气、照明、空调等设施需要一个高压转换器。它可以转换火车头所提供的高电压。输出电路的电流隔离作用在高压转换器的功率变压器上。应用于此领域的功率变压器可设计成转换功率为 18kW，仅重 15 kg，并带一组三个尺寸为 130 × 100 × 25mm 的 VITROPERM 超微晶磁芯的功率变压器。

另一个铁路电源的实例是副转换器（开关模式），含一个 10kW 推挽式（全桥、半桥）变压器电池充电器，四个 18kW 推挽式（全桥、半桥）变压器的供能装置以及带有一个 3kW 推挽式（全桥、半桥）变压器的应急电源。在供能装置中，所有设备达 70kW 的总输出功率分布到工作在 16kHz 频率的四个变压器上，每一个 18kW 的带有 VITROPERM 超微晶磁芯的变压器重 5.7 kg，总共四个变压器，功率达 70kW，重量却不过 25 kg。相比之下，以前利用传统的 16 2/3Hz 技术设计的供能装置中，70kW 的变压器则重达 800 kg。

用于 400Hz 的飞机电源的新型发动机也取得了进展。在这个对重量极其敏感的应用中，飞机发动机以高速旋转获得的能量必须被转换为具有高效率 and 轻量化、固定工作频率为 400Hz 的电源(VFCF)。依据飞机的大小，所需的功率变化范围可以从 50kW 直到几百千瓦。

VITROPERM 500F 超微晶材料的显著优点是功率变压器的体积与重量。目前市场上可提供的带有铁氧体磁芯的单个变压器的功率转换范围为 15kW 到 20kW，而带有 VITROPERM 500F 磁芯变压器的转换功率现可达 500kW。而将几个变压器并联，甚至可以获得高达百万瓦级的输出功率。

