

超微晶材料在開關電源變壓器上的應用



概述

本文獻試圖說明新一族材料的特殊代表—超微晶材料所擁有的非常突出的綜合特性，它是其他的軟磁材料所無法比擬的。正是由於這一點，在用作 SMPS 的變壓器鐵芯方面，它與標準的鐵氧體材料相比，擁有顯著的優勢。通過 VAC 公司的 VITROPERM 500F 超微晶材料與西門子的 N67 鐵氧體材料的實例比較可證明這一點。

本文還進一步闡述了設計一個 VITROPERM 變壓器尺寸大小的基本方法，對變壓器實際線路的設計與使用方面也做了說明。

1 · 簡介

目前開關電源（SMPS）功率變壓器的鐵心一般是鐵氧體材料，原因之一是鐵氧材料的價格便宜，另一個原因是鐵氧體可做成各種形狀的鐵芯，從而設計者可以很方便設計出各種式樣的變壓器，以適應各種應用場合。然而，鐵芯的幾何形狀雖然多，卻無法獲得理想的磁特性和閉合磁路。

許多晶態、非晶態、超微晶結構的金屬材料在互相競爭，在這裏，我們要深入探討，VITROPERM 500F 超微晶材料，因為它有獨特的性能。

2 · 用於功率變壓器的材料

鐵氧體：MnZn 鐵氧體是該應用的典型材料。其優點：低損耗，價格適宜，可製成各種閉合和分離式的鐵芯；缺點：很低的最大電感量，很強的溫度依賴特性，在量特別大的時候才會做特定設計。

晶體金屬材料：早些時候，80%的 Nife 材料（坡莫合金）偶爾會被用到。但現在，在一般的工作頻率下，它們變得不再重要，因為它們的渦流損耗很大。

非晶鐵基材料：在大功率、低頻範圍的 SMPS 上可使用。其優點：很高的最大電感量，價格適中，可設計成閉合和分離狀的鐵芯。缺點：高的磁致伸縮，高損耗。

鈷基非晶材料（含鈷 80%）：用在變壓器體積要求非常小，而磁導率要與鐵氧體相當的場合。例如單端前置變換器。優點：高的最大電感量，低損耗，非常好的機械穩定性和溫度特性，可做成閉合或分離狀的鐵芯。缺點：價格昂貴（因為市場上的鈷的價格很貴）

超微晶材料：它是一種含鐵 73.5%的材料，牌號是 VITROPERM 500F，它可以取代鐵氧體的主導地位。其優點：非常高的最大電感量，非常低的損耗，非常好的機械特性和溫度穩定特性，價格適中；缺點：目前只有環狀封閉的鐵芯形狀可供，但分離式的鐵芯形狀已在開發之中。

表 1：典型的變壓器材料之比較

材料	Co 基非晶材料	Fe 基非晶材料	MnZn 鐵氧體材料	超微晶材料
材料成分	接近 77% Co	接近 79% Fe	Mn Zn	接近 73.5% Fe
μ	2000–3000	4000–8000	1500–2500	20000–30000
$P_{Fe,typ.}(f=20kHz;B^{\wedge}=200mT)$	2 W/kg	18 W/kg	9 W/kg	1.4 W/kg
$P_{Fe,typ.}(f=100kHz;B^{\wedge}=200mT)$	40 W/kg	105 W/kg	110 W/kg	35 W/kg
B_{Sat}	0.8 T	1.55 T	0.48 T	1.2 T
T_{max}	120°C	120°C	100°C	120°C

3 · 超微晶材料的物理特性

低的矯頑磁力 H_c ，表明鐵芯很容易的退磁和低損耗，這是考慮一種好的軟磁材料的一個標志。在晶態鐵芯中，以前人們一直遵循的原則是：排除其他因素影響，金屬顆粒越粗，獲得的矯頑力 H_c 就越低。然而，超細的顆粒也可以獲得好的軟磁特性。這是因為當顆粒的直徑小於鐵磁顆粒間會產生相互影響的長度（約 30nm）的時候，整個磁場就不會隨著單個顆粒方向的改變而變化了。

這一發現導致了鐵基超微晶材料的發展，而最具代表性的就是 VITROPERM 500 F ($Fe_{735}Cu_1Nb_3Si_{15.5}B_7$)。由於材料價格不貴，應用範圍非常廣泛，它已經在工廠裏被規模生產了，年產量約 50 噸，且在不斷的增加。

用於初始產品的 VITROPERM 帶材的製造是通過快速冷卻技術實現的。熔融金屬合金通過噴嘴噴在高速轉動的冷卻輪上，然後以大約 $1 \times 10^6 k/s$ 的冷卻速度冷卻，就形成了很薄的非晶帶材（典型的厚度為 23 μm 或 1mil），帶材的寬度可由噴嘴調節，一般可達幾釐米。特殊的帶材寬度（例如幾毫米），可通過進一步裁剪獲得。把帶材卷繞起來便可得到環形鐵芯，鐵芯的直徑可做成從幾毫米到 0.5 米不等。

由細晶粒組成，當中鑲嵌非晶相顆粒的超微晶結構。是在做成帶繞鐵芯後，通過選擇熱處理的方法獲得的。通過進一步的熱處理，施加某一方向的磁場，就可以得到 F 狀磁滯回線的鐵芯。用這種方法，根據不同的應用場合，可以獲得 25000~100000 磁導率的鐵芯。

因此，這種材料的結構使它容易磁化，高的電阻和薄的帶材使它的渦流損失很低，磁導率具有好的頻率特性。另外，這種材料的組成成分保證了它有高的飽和電感量和實用價值。

4 · 超微晶材料與鐵氧體材料的特性比較

對於功率變壓器鐵芯材料的最主要的要求是：

- 低損耗，低的溫度依賴性或負溫度效應。
- 高溫下仍可保持高的飽和磁通密度。
- 高磁導率低的飽和磁通密度依賴性和溫度依賴性。

VAC 的 VIROPERM500F 材料與最新的功率鐵氧體（MnZn 材料，這裏指西門子的 N67）的某些特性比較如下：

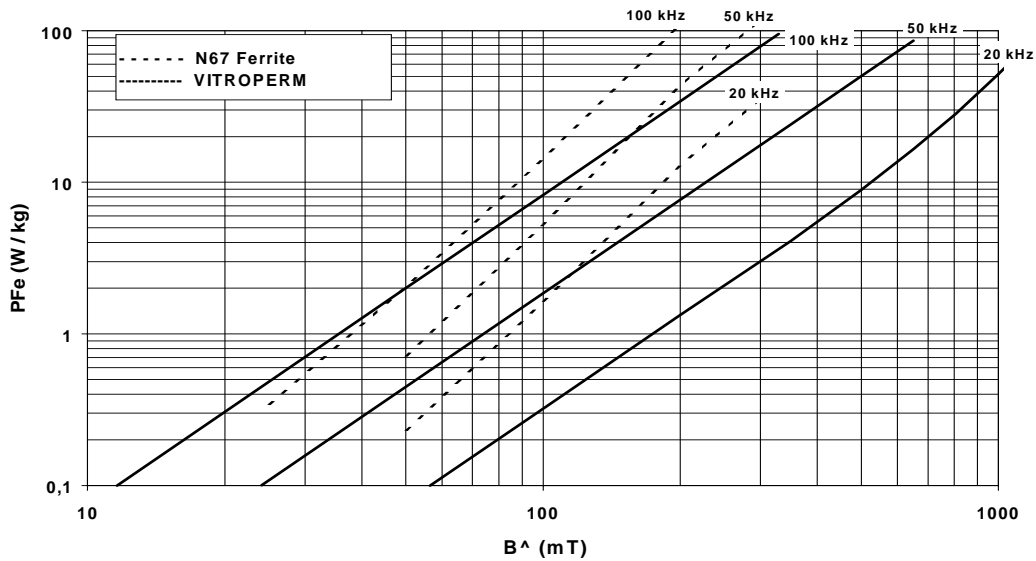


圖 1：不同頻率下典型的鐵損與磁通密度曲線

圖 1 的曲線是在 100 °C — 鐵氧體的最佳工作溫度下測的，在 20kHz 和 520mT 時，超微晶材料與同頻率下鐵氧體鐵損相同，但鐵氧體材料的 B（磁感應強度）只有 180mT。

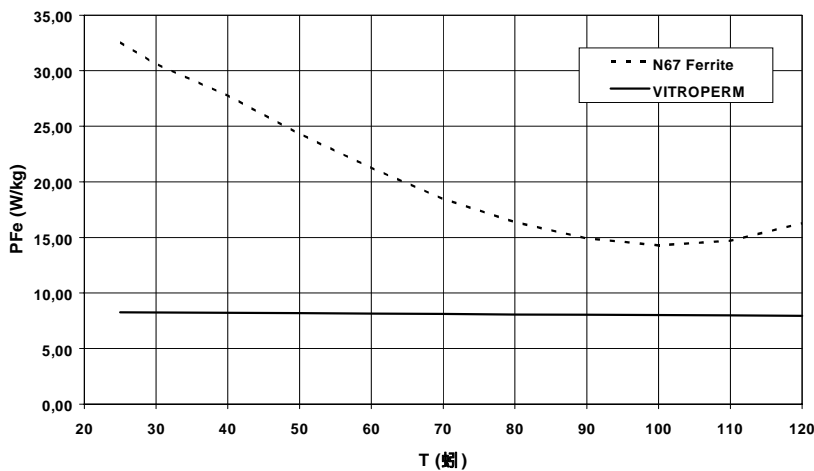


圖 2：不同工作溫度下的鐵損曲線

圖 2 中，超微晶材料的鐵損基本不受溫度的影響，在趨向高溫時，可見稍有降低，而鐵氧體的最小鐵損是在 100℃，任何情況下都不能超出這個溫度，否則會有不可控制的發熱發生。室溫下，鐵氧體的鐵損要比它的最小鐵損高兩倍，這就意味著在從電源中獲取功率時，它的效率會降低。

表 2：室溫和 100℃ 下的飽和磁通密度

Bsat	25(C)	100(C)	偏離率
Ferrite N67	480 mT	375 mT	-22%
VITROPERM 500F	1200 mT	1100 mT	-8%

飽和磁通密度：表 2 給出了室溫和 100℃ 下的比較情況，鐵氧體的基本值很低，表明它的應用會有很多限制，特別是在較大的電壓—時間面積必須要求被吸收，鐵損就無法決定主要的體積尺寸。這是低頻範圍應用下的原則。

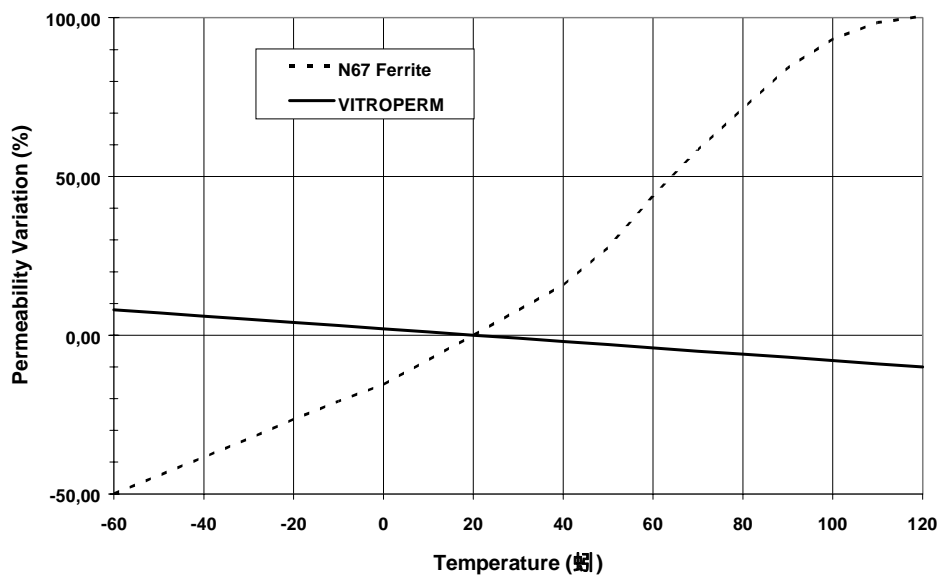


圖 3：溫度變化與磁導率變化曲線

磁導率：超微晶材料的磁導率比鐵氧體高 10 倍左右。這就意味著超微晶材料有高的電感值和低的磁化電流。在單極磁感應強度（單端正向變換器）情況下，脈沖間隔的恢復表現是有問題的，然而在雙級磁感應強度（推換式正向變換器）方案中是無可挑剔的。這裏好的驅動信號對穩定性是很重要的。因為驅動信號中不同大小的電壓—時間面積會很快使這種高磁導率的鐵芯達到飽和。圖 3 表明了兩種材料的溫度特性。

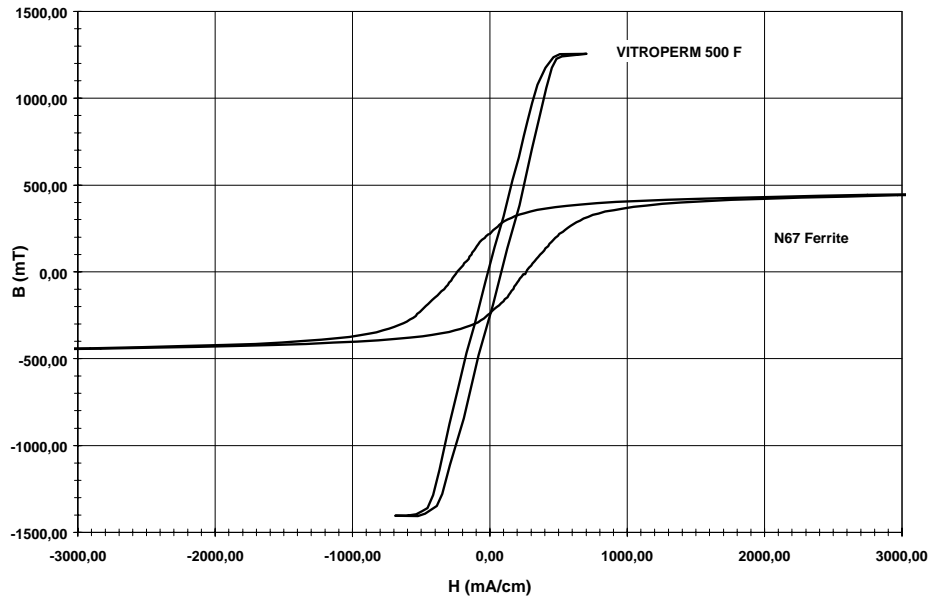


圖 4：磁滯回線

磁滯回線：圖 4 畫出了兩種材料在 $f=10\text{kHz}$ ，室溫下的磁滯回線。超微晶材料的高飽和磁通密度（Y 軸）、高磁導率（斜度），和低損耗（面積）在圖中尤為明顯。

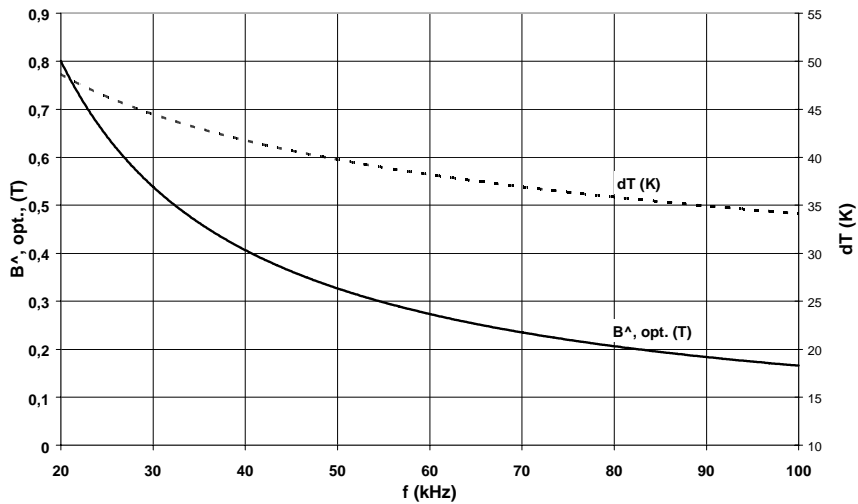


圖 5：不同頻率下磁通密度和溫昇變化曲線

工作頻率：以上內容已表明，超微晶材料的特性與鐵氧體明顯不同，然而，電路設計師只有深入細節才能充分利用這種材料優點，圖 5 就是一個例子，一個容量約 10kW 的變壓器，可用 $100\times 80\times 25\text{mm}$ 大小的 VITROPERM500F 材料鐵芯，繞上最佳的線圈數做成，它可以在 $20-100\text{kHz}$ 頻率範圍內工作。它在 30kHz 下的溫昇比在 100kHz 下的溫昇僅高約 10K 。另外，它的磁感應強度在 100kHz 時是 170mT ，在 30kHz 時是 550mT 。

傳導這樣的功率如果用相同尺寸的鐵氧體是遠遠達不到的。

以下是使用 VITROPERM500F 鐵芯的例子：根據驅動電路的設計，不提倡用大於 0.55

—

0.6T 的最大磁通密度，於是工作頻率至少應該是 30kHz。而當頻率遠高於 30kHz 時，就不適合使用價格便宜的標準 IGBTs。因此我們認為 30kHz 在這時是最佳的選擇。

機械特性：這種高強度的 VITROPERM 鐵芯是以環氧樹脂封套的。材料實際小的磁滯伸縮特性，使它可以做成鑄造元件。而鐵氧體在縫合或者在低溫下改變負載時，澆鑄樹脂的壓力會破壞它的磁特性。在高的震動壓力下（例如在火車或者電動機車的應用場合），鐵氧體的磁性損壞會更嚴重，而 VITROPERM 就不會有多大影響。

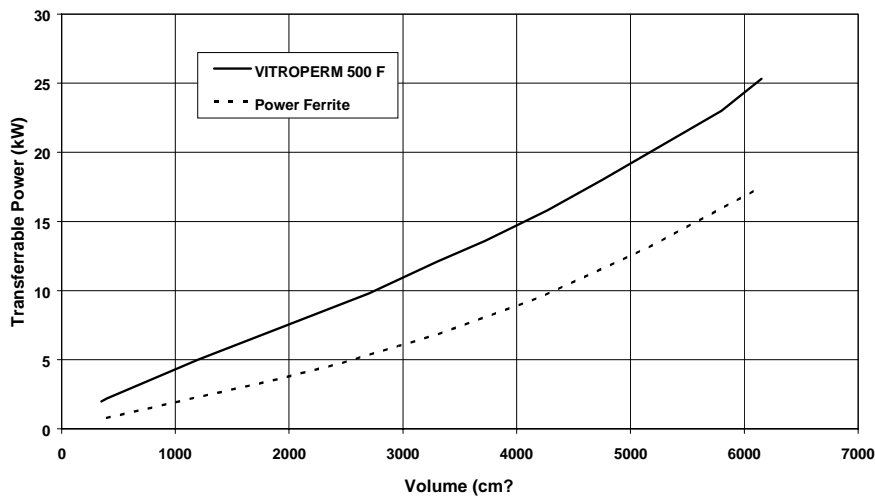


圖 6：變壓器體積的比較

尺寸大小比較：圖 6 表示了 $f=20\text{kHz}$ 下，用 VITROPERM 和鐵氧體鐵芯做的變壓器體積與所能傳輸功率的粗略比較。

5 · 用 VITROPERM 500F 鐵芯設計功率變壓器

當最大溫昇和鐵芯材料確定後，就可以確定每個鐵芯形狀的最佳磁感應強度和電流密度，所能達到的最大功率容量：

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

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





ΔB_{opt}	[T]	最佳磁感應強度偏差. $\Delta B_{opt} = 2 \times B_{opt}$
$S_{eff, opt}$	[A/mm ²]	最佳電流密度
P_0	110 W/kg	在 f_0 , ΔB_0 和 B_0 時的特定渦流損失
m_{Fe}	[kg]	鐵芯質量
f	[kHz]	工作頻率
f_0	100 kHz	參考頻率
ΔB_0	0,6 T	參考磁通密度偏差. $\Delta B_0 = 2 \times B_{max}$
F		輸入電壓的不利因素，對於方波: $F = \frac{1}{\sqrt{2 \times \tau}}$
F_0	1,11	參考電壓的不利因素，(sine)
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]	溫昇
R_{th}	[K/W]	變壓器的熱傳導阻抗，鐵芯製造廠家確定
ρ_{Cu}	[Ωcm]	在某溫度下的特定阻率: $1.786 \times 10^{-6} \times (1 + 3.93 \times 10^{-3} K^{-1} \times \Delta T)$
A_{Cu}	[cm ²]	銅磁截面積，與所選鐵芯有關，由鐵芯的內孔和銅磁空間因素決定，基本值由生產廠家決定。
l_{Cu}	[cm]	銅繞線的平均長度，基本值由生產廠家決定

功率容量計算如下：

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

P_{max}	[W]	功率容量
A_{Fe}	[cm ²]	鐵芯橫截面積
k		功率因數，由電路原理決定

功率因數 k 是根據電路原理計算出來的。

原級	次級	符號	$k =$
全橋 (4 電晶體)	橋式整流 (4 二級管)		$\frac{1}{\sqrt{2 \times \tau_m}}$
全橋 (4 電晶體)	中心抽頭整流 (2 二級管)		$\frac{2}{\sqrt{2 \times \tau_m} + \sqrt{2 \times \tau_m + 1}}$
半橋 (2 電晶體)	橋式整流 (4 二級管)		$\frac{2}{2 \times \sqrt{\tau_m} + \sqrt{2 \times \tau_m}}$
半橋 (2 電晶體)	中心抽頭整流 (2 二級管)		$\frac{2}{2 \times \sqrt{\tau_m} + \sqrt{2 \times \tau_m + 1}}$

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

τ_m		輸入電壓的平均脈沖占空比
τ_{max}		輸入電壓的最大脈沖占空比
$U_{e, min}$	[V]	最小輸入電壓
$U_{e, max}$	[V]	最大輸入電壓

原級的繞線圈數決定後，加上原級的電壓就會在鐵芯裏產生一個磁通密度偏差，它不超過

ΔB_{opt} :

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

N_{prim} 原級繞線圈數

次級繞線圈數由以下關係決定：

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

N_{sek}		次級繞線圈數
U_a	[V]	輸出直流電壓
ΔU	[V]	通過線圈銅阻和整流二極體的壓降

6 · VITROPERM 500F 做的鐵芯用於功率變壓器的實際設計

鐵芯形狀：

目前有提供外徑約 10mm 到 500mm 的環形封閉鐵芯。高度約 4mm—30mm，更高的鐵芯可通過堆疊方式獲得。短期內以外徑為 16mm—130mm 的鐵芯作為標準系列。40kw 以下的變壓器可由這些鐵芯做成。

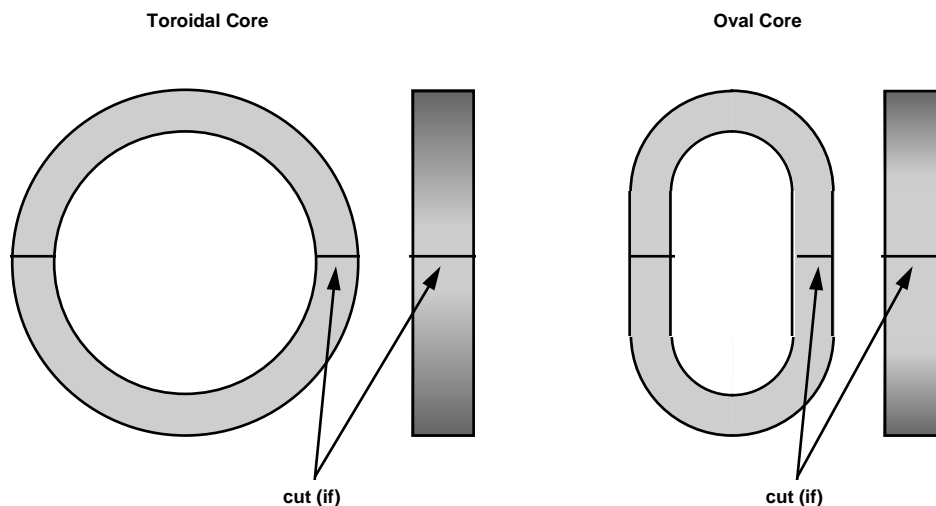


圖 7：鐵芯形狀

在某些場合為了繞線更方便，效果更佳，會做成橢圓形的鐵芯和由它而做成變壓器（圖 7）。分離狀的鐵芯也已經在測試當中。這些形狀的鐵芯為設計變壓器提供了更多的靈活調整空間，磁導率水平也可降低一些，但損耗會略有上昇。分離式變壓器也可能會發展，比如用作電動機車收費站的電感性功率連接器。

變壓器結構：

到目前為止，我們對閉合的環繞鐵芯，已有非常豐富的經驗。它的原級和次級線圈由各種線繞成，聯接處用連接端子接緊。為實現絕緣要求，先要用特殊的塑膠件把線圈包住，然後用熱導 PU 樹脂真空澆注填充。鋁制殼子作固定保護作用，它可以安裝在散熱盤上。當然，生產這樣的變壓器必須要有非常豐富的專業製造技能。

典型的電路原理：

在變壓器的原級，大部分採用半橋或全橋電路形成。這是根據變壓器的容量，輸入電壓和電流，以及成本而定的。15kw 以下一般用半橋電路，15kw 以上用全橋電路。輸出端如果是低電壓（20V 以下）一般用中心抽頭整流模式，20V 以上用橋式整流模式。UNITRODE 型 UC3875 被認為是典型的控制模組，它代表了整個全橋驅動電路，它是通過固定頻率而調節脈沖寬度（PWM）而工作的。其特點是低損耗，零電壓變換。

應用範圍：

實際上，以下的應用有的已經實現，有的正在實現之中：通信電源；電力電源；鐵路工程中發動機的輔助裝置和電池充電器；輪船和飛機構件上的輔助電源單元；電鍍電源供應器；Tomographs 電源供應器（醫療工程）；電車；鐳射電源裝置；粒子加速器；風力電廠等。

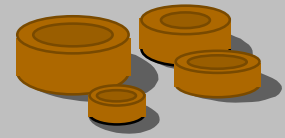
7 · 結論

VITROPERM500F 功率變壓器比鐵氧體變壓器的體積小得多，高的飽和電感，低損耗和高磁導率，它為開發工程師設計提供了非常大的靈活調整空間。他可以減少繞線圈數，從而減少線長和增大銅截面積，以獲得低的銅損。低的雜散電感，使它具有更好的高頻特性。由於大部分使用理想閉環磁場的鐵芯，外部擴散磁場亦會降低。高的耐溫特性，使體積選擇更優。所有材料都有高的溫度穩定性，這使變壓器的設計變得非常簡單和安全。還有一點必須強調，用 VITROPERM500F 鐵芯做的變壓器有非常廣的環境溫度範圍和高的機械穩定性。

目前 VITROPERM 500F 的應用範圍主要是在千瓦級的功率電源上。

8, 附：VAC 公司生產功率變壓器鐵心的標準系列

我們也可按照客戶的特定要求進行開發定做。



For power transformers in switched-mode power supplies, the nanocrystalline material VITROPERM 500 F and in certain applications the amorphous alloy VITROVAC 6030 F offer unique advantages:

- low losses with very small temperature dependence or even negative temperature coefficients.
- high saturation flux density which is almost completely retained at high temperatures. So the SMPS - designer can choose lower operating frequencies to save on power semiconductors and EMI - filtering.
- sufficiently high permeability and its low dependence of flux density and temperature.
- mechanical sturdiness of the coated cores and nearly no magnetostriction of the core material enables the design of moulded components. High vibration stresses are not critical for VITROPERM.

Usually nanocrystalline VITROPERM 500 F is the best choice due to the higher saturation flux density, the improved performance and lower cost compared to amorphous VITROVAC 6030 F. But, the higher permeability of VITROPERM transformers may be problematic for the reset behaviour in high-frequency single-ended forward converter topologies. We recommend to use VITROVAC 6030 F instead. In push-pull forward converters however, high permeabilities are advantageous in most cases.

Informations on core finish:

The cores are supplied epoxy coated (Fix 350) and are suitable for direct winding. The upper limiting temperature is 120 °C.

UL - File Nummer E 98282 and flame class are applied for.

Material data of VITROPERM 500 F/ VITROVAC 6030 F (typical values):

	VITROPERM 500 F	VITROVAC 6030 F
Saturation flux density (25 °C), B_s	1.2 T	0.8 T
Saturation flux density (100 °C), B_s	1.1 T	0.75 T
Losses (f = 20 kHz, at $B_{max} = 0.2$ T)	1.4 W/kg	2 W/kg
Losses (f = 100 kHz, at $B_{max} = 0.2$ T)	35 W/kg	40 W/kg
Curie temperature, T_c	600 °C	365 °C
Continuous upper operation temperature	120 °C	110 °C

VITROPERM 500 F and VITROVAC 6030 F - cores for transformers in SMPS, standard sizes:

core dimensions	finished dimensions (limiting values)			iron cross section and path length		core mass		A_L - value at 10 kHz typ.		winding cross section and turn length		thermal resistance	power at 20 kHz typical	part number, order code	
	O.D.	I.D.	H	A_{Fe}	l_{Fe}	m_{Fe} *	m_{Fe} **	A_L *	A_L **	A_{Cu} ***	l_{Cu}	R_{th} ****	P	VITROPERM 500 F	VITROVAC 6030 F
mm	mm	mm	mm	cm ²	cm	g	g	μH	μH	cm ²	cm	K/W	W	T60004-L2...	T60004-E3...
16x10x6	17.6	8.3	8	0.14	4.08	4.6	4.3	1.3	13	0.2	3.26	40	50	016-W373	016-F002
20x12.5x8	22	10.5	10	0.24	5.11	9.5	9	1.8	18	0.32	3.9	27	100	020-W374	020-F008
25x16x10	27	14	12	0.36	6.44	18	17	2.1	21	0.55	5.12	19	170	025-W375	025-F006
30x20x15	32.3	17.8	17.8	0.6	7.85	37	35	2.7	27	0.8	6.82	13	350	030-W376	030-F003
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	-

* VITROVAC 6030 F

** VITROPERM 500 F

*** At a winding factor of 0.5

**** Thermal resistance values are calculated based on an imaginary component using typical windings and a moulded design. No forced cooling. Values are valid for core- and windings losses and understood for a rough orientation only.

聯繫我們:

VAC 中國地區總代理:

Gredmann Taiwan Ltd.

Taipei Office: Tel: (+2) 27193456 Fax: (+2) 27165500

Guangzhou Office: Tel: (+20)81302302,81302413,81302375,81300967,81302411 Fax: (+20) 81300969

Beijing Office: Tel: (+10)62177128 Fax: (+10)62170205

Shanghai Office: Tel: (+21)62129101*1015 Fax: (+21) 32033696

VACUUMSCHMELZE GMBH 有限公司



Advanced Materials – The Key to Progress 先進的材料 – 成功的金鑰匙

VACUUMSCHMELZE GMBH 有限公司出版, KG, Hanau

© VACUUMSCHMELZE GMBH 有限公司 KG2001, 保留所有權利

至於第三方的專利或其他權利, 責任僅限於產品本身, 責任不包括這些產品的應用, 過程及內部線路, 這本手冊描述了產品類型, 但不應被認為是確切的特性。保留交貨條件和改變設計的權利, 本手冊代替以前版本。

在無氯製造的紙張印刷