

# 漫談非晶質鐵心變壓器

■ 梁瑞勳、朱識允

國立雲林技術學院電機工程技術系

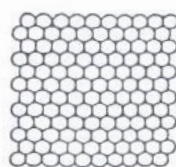
## 壹、前言

近年來，台灣飽受電力不足的壓力，一到夏天便有限電危機，引起多方指稱，推究其原因，主要是因為電力開發困難所致。基於電力開發不易，如能有效降低電力損失，提高輸電效率，成為補償電力不足的對策之一。

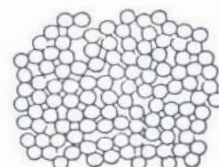
在輸配電系統中，配電變壓器的電力損耗，約佔系統總損耗的60%，其中鐵損約佔80%；所以鐵損約佔整個配電系統總損耗的45%。但自從1970年發現非晶質金屬材料具有良的電磁特性，經美、日等國投入龐大經費，歷經不斷的努力研究，已成功開發出電力耗損極低的低損型變壓器--非晶質鐵心變壓器，以非晶質金屬合金替代傳統矽鋼片鐵心材料。目前已有相當數量的非晶質鐵心變壓器使用於配電系統中，並證實其低損耗及高可靠性的特性，未來將替代傳統矽鋼片變壓器，成為市場的主要產品。

## 貳、非晶質金屬材料

非晶質金屬是將適成份熔融的液態金屬，以每秒攝氏一百萬度急速冷卻固化，使固態金屬保持液態時的原子排列，呈類似玻璃或塑膠不規則的金屬結晶形狀，和一般金屬規則結晶形狀不同，如圖一原子模型所示。



一般金屬原子模型



非晶質金屬原子模型

圖一、原子模型圖

非晶質合金材料由美國首先開發，經長期努力，美國 **Allied Signal** 公司開發出非晶質金屬薄帶，適合做為變壓器鐵心材料；在 1981 年 **Allied Signal** 公司推出非晶質合金材料 **METGLAS 2605 S-2**，鐵損極

低；由於 METGLAS 2605 S-2 非晶質金屬薄帶，價格適中，鐵損又低，目前市場上所生產的非晶質鐵心變壓器，其鐵心均使用 METGLAS 2605 S-2 材料。

### 參、非晶質合金材料特性

非晶質合金材料的獨特特性，使變壓器鐵心製造的困難度增加，其中包括：厚度薄、低佔積率、鐵損對應力靈敏度高、硬度高、易脆等。

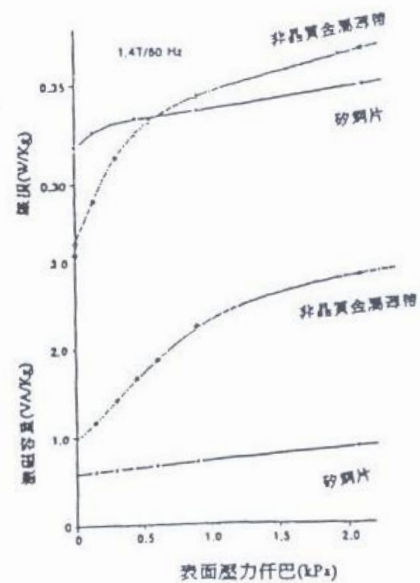
其中引起鐵心製造困難最大的問題是，非晶質合金材料硬度太高，其硬度約為矽鋼片的四到五倍；由於硬度高，分條、剪切均極為不易。比如使用傳統切銷工具(錫鋼刀具)，剪切 0.03mm 厚度的非晶質金屬薄帶的次數，約為剪切同材料厚度矽鋼片次數的 1/1000 次。

非晶質金屬材料本身厚度極薄，約為 0.03mm，僅為傳統方向性矽鋼片厚度的 1/10，材料表面又粗糙，疊積成鐵心時，其佔積率僅有 80% 左右，遠低於方向性矽鋼片鐵心佔積率 96%，在相同鐵心磁路的有效面積下，低佔積率造成較大尺寸的鐵心，因此冷卻系統、線圈及外殼尺寸也隨之加大，這雖然和一般追求重量輕、體積小的小型化目標相違背；惟其具有低損耗(約為方向性矽鋼片的 1/3)，以及省電的特性，仍是未來市場的主力產品。

非晶質金屬材料的另一個缺點是，飽

和磁通密度較方向性矽鋼片為低。方向性矽鋼片飽和磁通密度為 2.0 tesla，而非晶質金屬材料飽和磁通密度大約為 1.58 tesla，這也會造成增加鐵心尺寸。

非晶質金屬材料鐵損--應力的關係極為密切，由圖二所示。隨著應力加大，鐵損也有明顯增加的趨勢，和矽鋼片對於應力的關係明顯不同。當鐵心成型後，由於鐵心內部存在應力或非晶質金屬材料鑄造過程急速冷卻時，內部殘留高應力，所以鐵心必須在磁場中退火，可使材料大幅改善鐵損及激磁特性。退火後，鐵心更加硬更脆弱，所以應在鐵心兩邊側做噴膠處理，使之膠凝，以防止鐵心鬆動。



圖二、非晶質金屬材料鐵損--應力關係圖

僅管有上述缺點，非晶質合金鐵心變壓器製造成本，較一般變壓器高出 30% 到 40%，加上非晶質鐵心材料價格高於矽鋼片材料，使得目前非晶質鐵心變壓器價格高於傳統矽鋼片變壓器，這並非意味著非晶質鐵心變壓器將會失去市場競爭力，因為非晶質鐵心變壓器的經濟價值正確評估應由耗損比來認定，即變壓器總評價格為變壓器交易價格加鐵損之評價額再加上銅損之評價額，總評價格愈低，其評價愈高；而非晶質鐵心變壓器有較低的總評價格，所以非晶質鐵心變壓器仍有其經濟及實用價值。

#### 肆、非晶質鐵心變壓器之開發

非晶質鐵心變壓器開發史如下：

1. 1779 年，Allied Signal 公司成功開發出第一具單相非晶質鐵心變壓器，容量為 15KVA。
2. 1982 年，GE 公司再成功開發出一具單相非晶質鐵心變壓器，容量為 25KVA。
- 1983 年，美國電力研究所(EPRI)資助 GE 公司，再製造 25KVA 非晶質鐵心變壓器 25 具，以便確立非晶質鐵心變壓器之性能。
3. 美國電力研究所於 1985 年再資助 GE 公司生產 1000 具單相 25KVA 非晶質鐵心變壓器，並分別安裝於遍布全美國的 90 家電力公司使用。各電力公司於使用一年

後，將所用非晶質變壓器總量的 10% 進行測試鐵損及激磁電流。使用兩年後，再測試不同之另外 10% 的變壓器。測試結果，顯示非晶質鐵心變壓器之特性與傳統矽鋼片變壓器一樣穩定，長期使用也不會起變化。另外也做短路試驗及激磁突入電流試驗與輸送振動試驗。測試結果均符合美國國家標準，證實非晶質鐵心變壓器與傳統矽鋼片變壓器具有相同之可靠性與安全性。而前者又具有超低鐵損的優異性。

4. 美國 GE 公司於 1986 年即開始商業化生產非晶質變壓器，大量供應各電力公司使用。

美國 GE 公司目前生產的非晶質鐵心變壓器，容量有單相 10~100KVA 與三相 75~2500KVA，是美國最大規模生產非晶質鐵心變壓器之廠商。除 GE 公司外，美國還有 ABB、Kuhlman 及 Howard 等廠家均能生產非晶質變壓器。

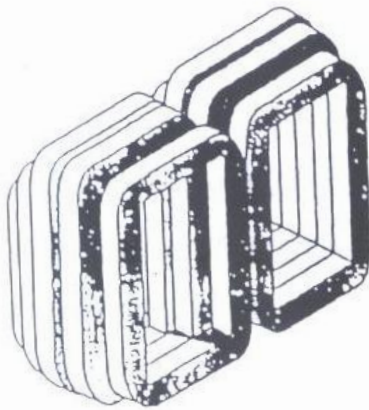
#### 伍、非晶質鐵心變壓器製造

非晶質鐵心變壓器製造，大致可分為兩部分，一為鐵心製造，二為心體裝配。其中非晶質合金材料硬度高、易脆特性，導致鐵心製造困難，所以鐵心製造技術的改良，成為改善變壓器性能的主要方向。

目前變壓器鐵心可分為下列五種型式(針對單相變壓器而言)：

##### 1. 十字型(Cruciform)

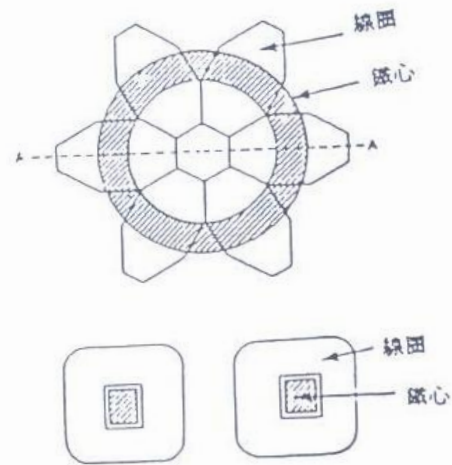
十字型鐵心設計概念是最先應用在非晶質鐵心變壓器，如圖三所示，十字型鐵心是由不同大小尺寸的環圈疊積而成，使鐵心截面積形成類似圓形。十字型鐵心一般由 5~9 個環圈疊積而成，如此可使佔積率提高，這種型式的鐵心優點是當鐵心退火時，可以避免繞組線圈對鐵心造成傷害；但缺點是需要較大的變壓器外殼及較多的絕緣油，另外必須使用同一規格的 leads 及 tap，以使繞組尺寸最小化。



圖三、十字型鐵心

## 2.環型鐵心(toroid)

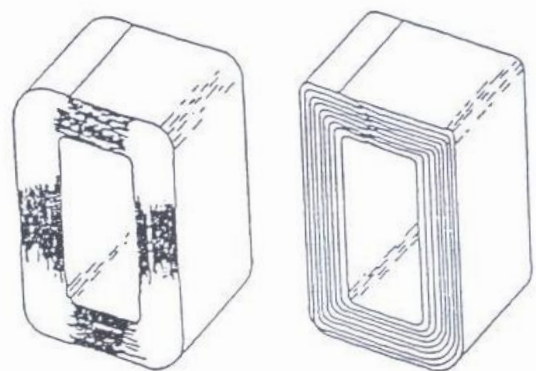
環型鐵心是由非晶質薄帶纏繞一圓軸形成的，如圖四所示，其鐵心截面積呈類似長方形，繞組線圈纏繞鐵心足(leg)上。這種型式的鐵心為理想形狀和提供較佳的性能，缺點是繞線方式複雜度提高及需新式繞線機器，使成本較其他型式鐵心高。不過由於鐵心性能優良，目前這種型式鐵心設計，已經廣泛使用在各種型式、容量的單相非晶質鐵心變壓器上。



圖四、環形鐵心

## 3.D形鐵心

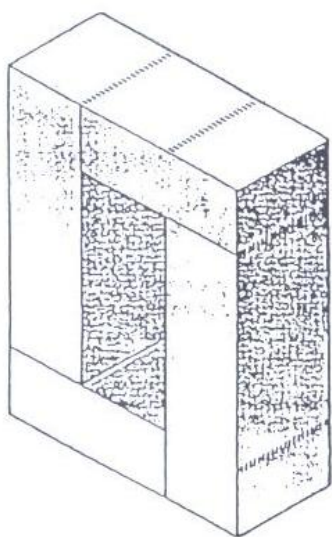
D形鐵心設計已經使用在矽鋼片變壓器將近三十年之久，如圖五所示。這種鐵心性能比十字形鐵心或環形鐵心差，主要是因為當繞組線圈在鐵心退火時，會使鐵心性能產生劣化。不過繞組線圈和傳統變壓器一樣，可使用傳統工具製造，可以降低成本。剪切非晶質材料成為製造鐵心的最大問題，這種形式的鐵心設計，已被使用在商用非晶質配電變壓器上。



圖五、D形鐵心

#### 4. 疊形鐵心(stacked)

疊形鐵心是由每層四片非晶質金屬疊片疊積而成的，如圖六所示。這種鐵心性能尚佳，且可使用目前傳統線圈繞組設計，此類鐵心製造上的問題是，每一匝須剪切成四段，故須使用高效率的剪切工具，且每一層有四個接合處，所以激磁容量較其他形式鐵心較大，有一些三相非晶質鐵心變壓器使用這種形式設計。

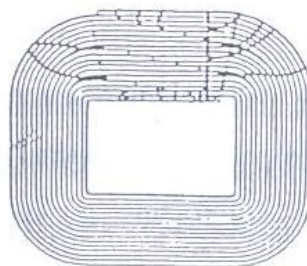


圖六、疊積形鐵心

#### 5. Lap-joint 鐵心

Lap-joint 鐵心是由非晶質金屬薄帶纏繞而成，如圖七所示。要注意的是其薄帶的 tap 是疊在一起，形成空氣隙，這和 D 形鐵心 tap 接碰一起是不同的。由於 Lap-joint 鐵心 tap 形成額外的長度，所以材料較 D 形鐵心多。Lap-joint 鐵心可使用傳統線圈繞組。這種鐵心設計仍需使用較高效率的剪切工具，剪切次數比 D 形鐵

心少。在 1985 製造的 1000 具變壓器做磁性測試，就是使用這種鐵心設計，現在已經廣泛使用於商用單相及三相變壓器鐵心設計。



圖七、Lap-joint 鐵心

鐵心製成後，經半成品測試合格者，即可配合線圈進行心體裝配。由於傳統之裝配方法，會使非晶質鐵心承受應力，造成鐵損大幅增加，無法發揮非晶質鐵心低鐵損的特性。因此，裝配技術是製造非晶質變壓器成敗的另一關鍵。

1. 將選定成組的鐵心與線圈各置放於工作桌平台上，撥開鐵心的 tap 部位，將之緩緩插入穿過線圈。穿過線圈後，再把鐵心切斷口依疊接方式逐次撥正，恢復鐵心原來的形狀。本階段的作業困難度高，裝配技術甚為重要。
2. 完成鐵心插入作業後，仍需用夾件固緊。惟非晶質鐵心對應力很敏感，不容許承受任何彎曲應力。只要有應力加於鐵

心，將使鐵損增加許多。因此，傳統之夾件固緊方式並不適合，必須另想新方法解決。

3.心體裝配完成之後，後續之心體裝箱、零配件組裝、注油與完成試驗等作業，均與傳統矽鋼片鐵心變壓器相同，沒有特殊之處。

綜合以上製造程序與經驗，可知非晶質鐵心材料因厚度薄，需疊積相當張數才能達到鐵心所須之厚度，加上其硬度高，鐵心切斷口之 tap 接縫製造不易，裝配時 lap 撥正技術困難，使得鐵心製造與心體裝配耗費相當多工時。

#### 伍、對未來發展之期許

台灣電力年年不足，加上能源取得不易，因此採用低耗損、高效率的非晶質鐵心變壓器是提高能源效率，節約自然資源最可行的方案。

目前全世界已有 40 萬具非晶質鐵心變壓器使用於配電系統中，美國大約有 30 萬到 35 萬具，日本也有約 3.5 萬具於使用或測試中，每年預估以 5% 速度成長。現在已有各種標準型式的非晶質鐵心變壓器，單相者從 10KVA 到 167KVA，三相者從 75KVA 到 2500KVA。而國內最大配電變壓器使用者---台灣電力公司，每年的需求量約四萬具。似可 1. 每年適量採用非晶質鐵心變壓器， 2. 充分考量變壓器製

造廠家對國產化投入的鐵心製造設備，訂出合理價位。

如此，當可使電力公司及變壓器製造廠皆受惠，也能帶動國內其他使用者積極採用非晶質變壓器，因而獲得以下助益：

1. 減少國內整體能源的耗損，對改善電力不足亦有所助益。
2. 減少發電用油(或煤)所產生的空氣污染及溫室效應，降低環保問題。
3. 減少用電成本，降低企業營運支出，有利於企業經營及社會整體的繁榮進步。

#### 參考資料：

1. Harry W. Ng, A.C. Lee, L.A. Lodermilk Amorphous Alloy Core Distribution Transformer Proceeding of the IEE, Vol. 79, No. 11. Nov. 1991.
2. 工業技術研究院「材料社與社會」76-5 期
3. P.M Curran "Metglas Alloy For Distribution Transformer Cover" July 26, 1988, IEEE Power Engineering Society Meeting.
4. For a more detailed account, see "Amorphous Metals and Semiconductor, Acta-Scripta Metallurgica Proceedings Series", Vol. 3, P. Haasen and R.I. Jaffee, Eds New York: Pergamon, 1966, p. 2.
5. H. Liebermann and K.S. Tan, ibid p. 1.
6. P. Duwez, R.H. Willens, and R.C. Crewdson, J. Appl. phys., Vol. 50, p. 3603, 1979.
7. W. Buckel and R. Hilsch, Z. Phys., Vol. 138, p. 109, 1954.