

檢討空氣是不是絕緣材料？

Researching about weather air is material of insulator

邱敏彥 李長興 黃智賢
Min-YenChiu Chang-HsingLee Chih-Hsien Huang

顏世雄
Shih-Hsiung Yen

震江機電技術顧問股份有限公司
Chan-Ching Electric Technique Consulting CO.,LTD
Hsinchu, Taiwan, R. O. C.
Chan.ching@msa.hinet.net

工業研究院 材料所
Industrial Technology Research Institute
Hsinchu, Taiwan, R.O.C.

摘要

介紹某電子工廠電源用斷路器發生絕緣破壞事故，但找不到固体絕緣破壞燒焦的

痕跡，因此推測是氣體，就是空氣的絕緣破壞。原因是氣體與固体形成複合型絕緣體部分的絕緣破壞會發生在介電常數較低的空氣部分。

本文對複合型絕緣材料加電壓時的電位梯度(voltage gradient)作說明，即說明介電常數最低的空氣部為最容易發生絕緣破壞。

關鍵詞：斷路器、絕緣、暫態現象、突波電壓、介電常數、高電壓。

Abstract

There was an eclectic factory with a failure of GCB, however, the burning tracking of breakdown in polymers couldn't be found. Thus, air is the reason to be considered, which is breakdown of GCB. The reason is that air and solid make a composite form insulator will cause some GCBs, which normally happen in dielectrics in lower air situation.

In this article, there will have an explanation about voltage gradient of composite form insulator, which is explaining the dielectrics in lower air situation will more easily.

Keywords: Breaker, Insulation, Transient Phenomena, Surge Voltage, Dielectric Constant, High Voltage

I. 前言

如果有人問『空氣是不是絕緣材料』？真的不知道專家、學者要如何回答。看我們的周圍，如果空氣不是絕緣材料，那麼為什麼電力公司的輸電鐵塔的架空輸電線可以在空氣中輸電？我們周圍常見的乾電池不會漏電？答案當然是『空氣是絕緣材料』。但如果空氣是絕緣材料的話，那麼為什麼會有閃電落雷？由雲導電流下來。當然或有人會反駁說因為是高電壓等道理。但我們

家裡電視機的訊號從那裡來？當然是從電視發射天線來，但是如果認為空氣不導電，那麼電視訊號的電磁波如何『導』進來？。或有人會說，電磁波呀，不是電流。但的確從電視發射台有微小『電能』傳過來，所以可以把此電的訊號處理成為電視畫面。是不是微小的『電能』就可以不算導電電流？當然空氣亦會導電，於是『空氣“亦”是導電材料』了，且低電壓亦會導電的導體了。

其實，絕緣電阻高低與絕緣破壞是兩件獨立的現象，絕緣電阻高不見得不會發生絕緣破壞，絕緣電阻低洩漏電流會大，但反而不會發生絕緣破壞。所以說，如果只是論會不會絕緣破壞，則『絕緣電阻愈高是愈糟糕的！』。

空氣的絕緣電阻多高？如果有人提出問題的話，答覆一定是『廢話』，向來沒有人會問，而回答一定是『非常非常高』，或『 $\infty\Omega$ 』。但就會出現另一問題，就是沒有一樣絕緣材料高到『 $\infty\Omega$ 』，應該是『沒有一樣絕緣材料的電阻率比空氣高』，而常常會聽到『空氣的絕緣破壞』、『空氣跳火』、．．．等。意思就是幾種絕緣材料在一起時，絕緣破壞的可能，其實是『一定』是空氣。所以說會不會發生絕緣破壞並不是絕緣電阻的高低所主導的。

水的絕緣電阻多高？答覆一定亦是『廢話』，向來大家都怕水，因為大家都『認為』水會導電。但其實純水的絕緣電阻很高，高到可以當作很好的絕緣材料使用的。但含電解質的水溶液，則其電阻就很低了。

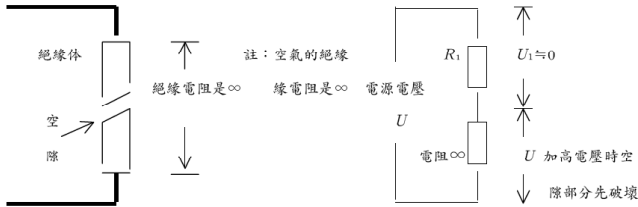
水會不會發生絕緣破壞？大家都知道空氣會發生絕緣破壞(break down)，但大家都認為絕緣非常差的水(不是純水·溶解電解質的水)會不會發生『絕緣破壞』？沒有聽過。等於說，沒有人會問導電體的銅線裡面(不是對外)會不會發生絕緣破壞？

絕緣電阻低，洩漏電流會增高，可能會造成『過電流破壞』，但不會發生絕緣破壞。

II. 為什麼絕緣電阻愈高是愈糟糕？

以電阻體模擬絕緣體：

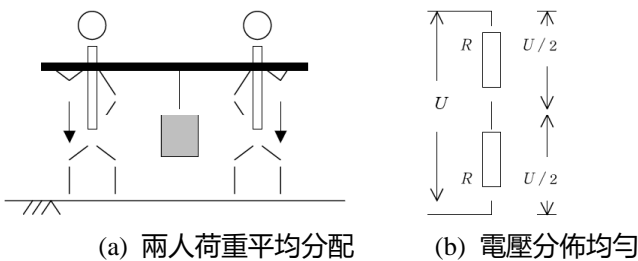
本來絕緣體是以電阻與電容的並聯電路作等效的，如簡化先檢討電阻成分。假定內部有瑕疵，就是含有氣隙的絕緣體（不包括表面有污染等洩漏狀況）的等效電路如圖 1。氣隙的絕緣電阻很高，可以說達到 $\infty \Omega$ 。



(a) 有瑕疵（空隙）狀態示意圖 (b) 等效電路

圖 1 有瑕疵絕緣體

由圖 1 可以看出當加高電壓時，絕緣電阻特別高的空隙的絕緣會先破壞。因此絕緣電阻高並不能代表絕緣體內部沒有瑕疵，且如加高電壓後會破壞，是會從絕緣電阻最高點破壞。此情況可由不同身高的兩人扛東西荷重量會不平均可比喻，如圖 2 (a) 兩人荷重平均分配時，其電壓分佈則會均勻，如圖 2 (b)；而若兩人荷重不平均的話，則電壓分佈將會不均勻，如圖 2 (c) 及 (d)。



(a) 兩人荷重平均分配

(b) 電壓分佈均勻

(c) 兩人荷重不平均

(d) 電壓分佈不均勻

圖 2 荷重量、電位的分佈

以電容體模擬絕緣體：

假定有兩種介電體如圖 3 (a) 成串聯狀態，則電容的串聯電路如圖 3 (b)，容抗的分佈成如圖 3 (c)。因為兩

電極板間的電容量 C 的計算公式如(1)式，因此兩不同介電常數材質絕緣體成串聯時，兩不同材質的電壓分佈會如(2)式，與介電常數成反比。

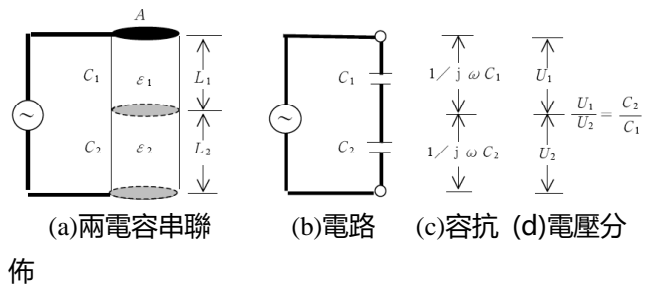


圖 3 兩不同介電常數電容串聯時的電壓分佈

$$C = \epsilon \frac{A}{L} \quad (1)$$

其中： A —— 電極面積

L —— 兩電極間隔

C —— 電容量

ϵ —— 比介電常數 (ϵ_0 空氣 ≈ 0)

$$U_1/U_2 = C_2/C_1 = \epsilon_2/\epsilon_1 \quad (2)$$

其中： U_1 、 U_2 —— 電壓的分佈

由以上分析，如果假定形狀相同的兩種不同介電常數材質的絕緣體串聯時，各層電壓分佈與介電常數成反比例。但請注意如此解述是有瑕疵的，不是很正確，只是為容易瞭解的很勉強的解述。如果套用圖 2 (c)，則 ϵ 小的是圖中的矮人。就是 ϵ 小的與 ρ 高的都會吃虧。如果要平均分配力量，必須找 ϵ 、 ρ 相同材質的材料始可。

III. 複合體絕緣材料的絕緣破壞

許多絕緣體是兩種以上材料組成的複合體絕緣材料。其實亦是不太可能有單一材料所組成的絕緣體。複合體絕緣材料有並列型與串接型。

如圖 4 的絕緣礙子是典型的並列型複合體的一例。絕緣礙子是固體絕緣材料，但其實絕緣礙子周圍是絕緣材料空氣，亦就是瓷與空氣並列的複合體絕緣。所以 A、B 兩導體間的絕緣是固體絕緣材料瓷與氣體絕緣體空氣共同。

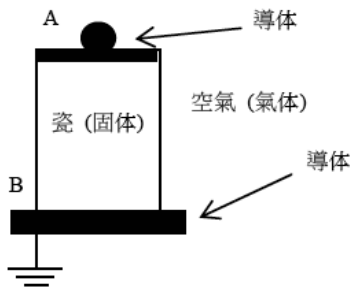


圖 4 並列型複合絕緣

圖 5 是串接型複合體，典型的此類絕緣是例如電力電纜絕緣體內的空洞(void)、乾式變壓器內的裂縫等。

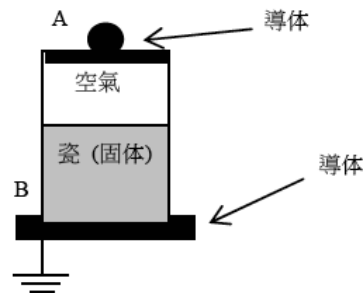
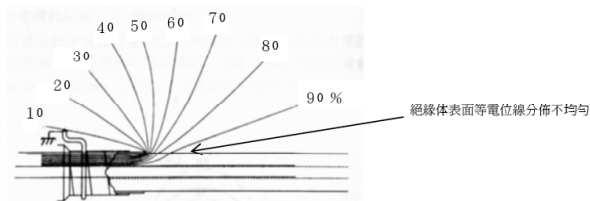


圖 5 串接型複合絕緣

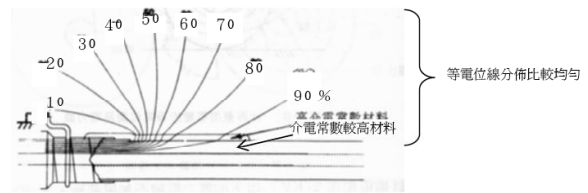
在均勻電場內的並列複合絕緣體的電位梯度，其代表性的有沒有加電纜頭(cable head)的電力電纜，當心線與外側遮蔽層間加高電壓時，電力線與等電位線的分佈會如圖 6。

(a)圖是因為比(relative)介電常數較高電纜絕緣體表面直接與比介電常數為 1 的空氣接觸，因此電纜絕緣體表面上的等電位線分佈不均勻而容易發生表面的部分放電(surface partial discharge)，甚至閃絡。(b)圖是電纜絕緣體表面加比介電常數較高絕緣體緩和等電位線的分佈的結果。(c)圖是完成電纜頭後的等電位線的分佈，顯然表面的部分放電以及閃絡可得以避免。

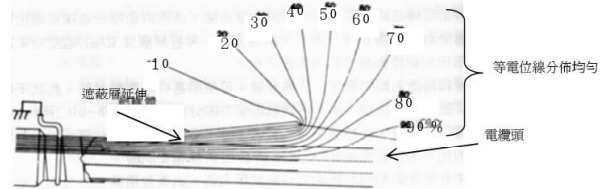
因為本文目的不在此類複合絕緣體的說明，故不再深入說明。



(a) 沒有加處理的電力電纜



(b) 加高介電常數材料



(c) 以電纜頭處理

圖 6 電力電纜表面的電位分佈

由圖 7 (a)可分析在串列型複合體均勻電場裡的 A(此例是空氣)、B(此例是 FRP 類) 兩種介電常數 ϵ 不同的介質內的電場。

假定由(+)電極射出來的電力線密度(flux density)為 D ，則進入介電質 A 內與介電質 B 內，以及進入(-)電極的電力線密度都是 D 。因此可得(3)式。

$$E_A \cdot \epsilon_A = D = E_B \cdot \epsilon_B \quad (3)$$

其中： E_A —— 電介質 A 內的電場強度 kV/mm

E_B —— 電介質 B 內的電場強度 kV/mm

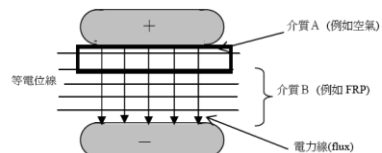
ϵ_A 、 ϵ_B —— 介電常數，空氣 $\epsilon_A = 1$ 、 $\epsilon_B = 2.4$

D —— 電力線密度 條/cm²

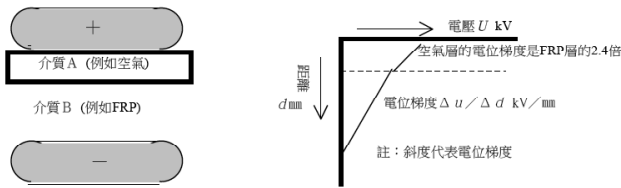
由(3)式可得(4)式。

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_A} = 2.4 \quad (\text{FRP 為例}) \quad (4)$$

即如果是空氣與 FRP 所組成複合絕緣材料中，空氣層的電場強度將是 FRP 層的電場強度的 2.4 倍。因此，兩電極間出現異常電壓時，首先會發生絕緣破壞的往往是空氣。空氣的絕緣破壞電壓大約是 3 kV/mm。



(a) 電力線與等電位線



(b) 電位梯度的差異

圖 7 串接型複合體絕緣體內的電場分佈

由圖 7 (a)與(b)圖可以看出當加重量 (高電壓) 時，兩人所承受重量 (電壓) 不同，是會從介電常數低的部分先破壞。

IV. 事故實例分析

某電子公司電源 GCB 遭受絕緣破壞而跳脫，經分解檢查發現如下各點。

- (1) 接點以及導體並沒有過電流的跡象 (熔解 變色等)。參考圖 8(a)、圖 8 (b)。
- (2) 絕緣套管內部除了事故後電弧燻黑的現象並沒有沿面放電的痕跡，參考圖 9。
- (3) 而 CB 其他部位同樣除了事故後電弧燻黑的現象外，也沒有任何電壓破壞的痕跡，如圖 10。

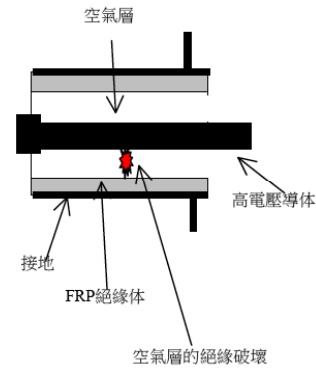


(a)背後連接導體 (b)活動端子完好

圖 8 導體部分沒有過電流異常



(a) 套管外觀



(b) 分析

圖 9 絕緣套管表面沒有出現絕緣破壞跡象



(a)固定接點端子 (b) 活動端子桿

圖 10 都沒有損傷的其他部分

- (4) 事於歲修時發覺部分絕緣套管內部與銅排接近處有異常粉狀物存在，如圖 11。是空氣部分的局部絕緣破壞，而非固体絕緣材料的絕緣破壞。

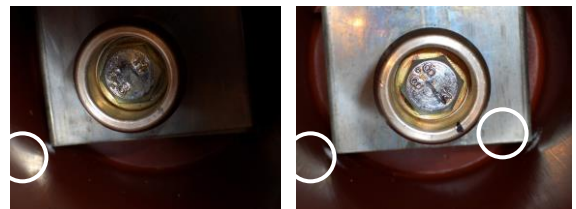


圖 11 空氣絕緣破壞痕跡

事故分析：

- (1) 此為串接型複合體與圖 9 的分析，是空氣層的絕緣破壞，因此沒有留下放電痕跡。
- (2) 該廠因為已發生絕緣破壞放電的事實，因此電驛動作，斷路器跳脫。

V. 空氣的絕緣特性

絕緣材料的絕緣破壞是以 kV / mm 的絕緣破壞強度評估的，空氣、SF₆ 氣體等在均勻電場裡，改變間隙長時的絕緣破壞電壓如圖 12 所示例。由本圖可以看出：

- (1) 間隙長加長，則高真空、絕緣油的破壞電壓有

飽和的趨勢，但空氣、SF₆ 等氣體的絕緣破壞電壓較不會飽和。

- (2) 同樣是 1 大氣壓下，SF₆的破壞電壓大約是空氣的 3 倍高。
- (3) 5 大氣壓的 SF₆的破壞電壓可達到 1 大氣壓空氣的約 10 倍之高。
- (4) 以上是均勻電場下的狀況，但如果是在不均勻電場的環境試驗，則 SF₆ 容易飽和，空氣較不會飽和。

由以上分析來評估，單純的空氣仍然是破壞電壓非常高的非常好的絕緣材料。表 1 的資料，雖然不是特別有意義，但容易瞭解空氣是絕緣破壞相當高的氣體絕緣材料。

表 1

均勻電場內の間隙	30 kV / cm
長達 10 cm 以下的不均勻電場	5 kV / cm
符數 m 長の間隙 (開關突波)	~3 kV / cm
落雷 (雷雲對大地)	0.5~1 kV / cm

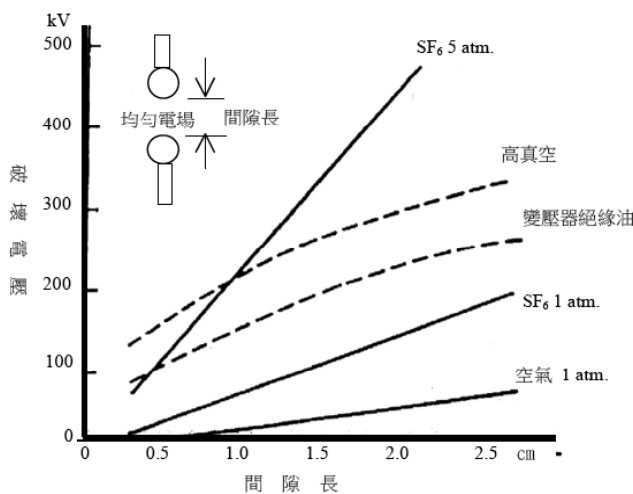


圖 12 空氣等的絕緣破壞強度

似沒有人會提到『空氣的絕緣電阻，或電阻率 ρ 多高？』，可能高到不必提的高。而空氣的介電常數非常低，與真空差不多，大約等於 1。

VI. 結論

空氣可能用在低電壓設備的絕緣，例如電話線的絕緣，這時根本不需要考慮絕緣破壞。但有時卻是與高電壓設備的絕緣有關，即電力設備周遭的氣體。氣體在此兩種狀況的角色都不同。故筆者的結論如下。即：

- (1) 空氣的絕緣電阻非常高，故對如通信器材等當作怕洩漏電流的器材的絕緣時『空氣是最好的絕緣材料』之一。
- (2) 如果形成為複合體絕緣時，因為空氣的介電常數最低，因此當加高電壓時，空氣層的電位梯度最高，故當作電力器材的絕緣之用，而加高電壓時容易造成電場的分佈不均勻，致使成為『空氣是最壞的絕緣材料』之一。

因此需注意到，原來空氣是絕緣電阻非常高，不太會洩漏電流的絕緣材料，而同時破壞強度 (kV / mm) 亦頗高的很好的絕緣材料，但一旦與其他 (非氣體) 絕緣材料形成『複合型絕緣器材』時，比介電常數較低的空氣一定會犧牲自己，成為絕緣最脆弱的部位，先發生絕緣破壞，故於絕緣設計時必須注意。

參考文獻

- [1] 宅間 董 “絕緣物あれこれ” 日本電氣設備學會誌 Vol. 24, No. 11 (Nov., 2005)
- [2] N. H. MALIK, A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, “Electrical Insulation in Power System,” Air insulation, Chapter 3, pp. 49-82.