



電機電子機具雜訊 電流對 *CNS-1179* 電容器衝擊效應探討

林昆平 / 台南分局技士

一、前言

在大樓及工廠電氣室內，常可發現功因改善電容器，主要是用來提升供電系統變壓器容量、減少電力傳送損失、改善傳輸電線壓降及節省電費。但隨著工業升級，越來越多電機電子機具，安裝電子控制設備，這些設備由於非線性負載特性，衍生大量雜訊電流(諧波電流)，往往被遇高頻呈低阻抗特性的電容器所吸收，嚴重者甚至引起電容器爆炸，燒毀其它供電設備，造成廠商嚴重損失。為探討此現象，本文首先由控制設備中，使用最多的電源變換整流器及控制速度變頻器雜訊特性談起，再以一實際案例，說明雜訊電流如何對電容器產生傷害。文中除了彰顯電機電子產品衍生雜訊的影響層面，也提供本局辦理業務之廠商，對自家工廠用電設備安全的自我檢查能力。

二、整流器及變頻器低頻雜訊特性

2.1 六脈衝整流器

圖 1 所示為一三相六脈衝AC-DC整流器電路(若為單相產品，只要將編號 2,5 支路拿掉即可)，常運用在電機電子產品交流變換為直流

電源的控制基板上，其前端均置有變壓器來調整合適的輸入電壓。假設整流電路操作在理想狀況（交流側輸入阻抗為 0，直流側感抗無限大，SCR 激發角為 0°），則變壓器二次側線電壓與線電流波形的關係可描述如圖 2 所示。每次導通有 2 個 SCR 形成回路，例如 $V_{R2} > V_{T2} > V_{S2}$ 時，1,6 號 SCR 導通，依此類推可把 I_{R2} 、 I_{T2} 、 I_{S2} 二次側線電流描繪出來。但變壓器繞法不同，其一次側線電流也會不同，為了維持二次側線電壓不變，變壓器接成 ΔY 、 $\Delta\Delta$ 、 $Y\Delta$ 、 YY 的匝數比需維持 $\sqrt{3} : 1$ 、 $1 : 1$ 、 $1 : \sqrt{3}$ 、 $1 : 1$ 的關係，參考圖 3 可找到變壓器一次側線電流與二次側線電流之關係式（2-1 式~2-4 式），再依此四式將圖 3 的 I_{R2} 、 I_{T2} 、 I_{S2} 波形相加減，可得對應 ΔY 、 $\Delta\Delta$ 、 $Y\Delta$ 、 YY 接之一次側 R 相電流波形如圖 4 所示。我們可發現 ΔY 與 $Y\Delta$ 為同一組波形， $\Delta\Delta$ 、 YY 為另一組相同波形，為了分析其低頻雜訊成份，我們使用傅利葉級數，將圖 4 方波加以分解，得（2-5 式）及（2-6 式）兩式，可發現由於機具使用整流器電路進行控制，導致產生額定電流 $I_1 \cos \omega t$ 外的其它雜訊電流，其特性有下列兩點：

- 產生雜訊成份具規律性容易掌握
第 h 次雜訊 $h = 6n \pm 1$ ， $n = 1, 2, 3, \dots, n$
- 各次雜訊電流含量容易預估
第 h 次雜訊含量 $I_h = I_1 / h$

例 300hz 雜訊電流（即第五次雜訊） $= I_5 = I_1 \times (60\text{HZ}/300\text{HZ})$

$$\Delta Y \text{ 接 } \quad I_{R1} = (1/\sqrt{3})(I_{T2} - I_{R2}) \quad (2-1)$$

$$\Delta\Delta \text{ 接 } \quad I_{R1} = -I_{R2} = I_{S2} + I_{T2} \quad (2-2)$$

$$Y\Delta \text{ 接 } \quad I_{R1} = -I_3 = (1/\sqrt{3})(I_{S2} - I_{R2}) \quad (2-3)$$

$$YY \text{ 接 } \quad I_{R1} = -I_3 = -I_{3'} = -I_{R2} \quad (2-4)$$

$$I_{R1} = I_1(\cos \omega t + (1/5)\cos 5\omega t - (1/7)\cos 7\omega t + (1/11)\cos 11\omega t - (1/13)\cos 13\omega t \dots (1/h)\cosh \omega t) \quad (2-5)$$

$$I_{R1} = I_1(\cos \omega t - (1/5)\cos 5\omega t + (1/7)\cos 7\omega t + (1/11)\cos 11\omega t - (1/13)\cos 13\omega t \dots (1/h)\cosh \omega t) \quad (2-6)$$

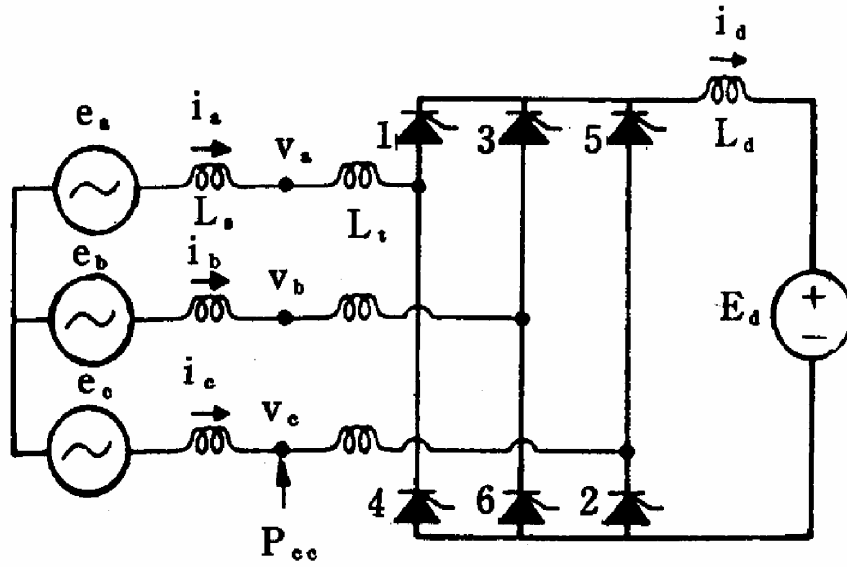


圖 1 六脈衝整流器電路結構

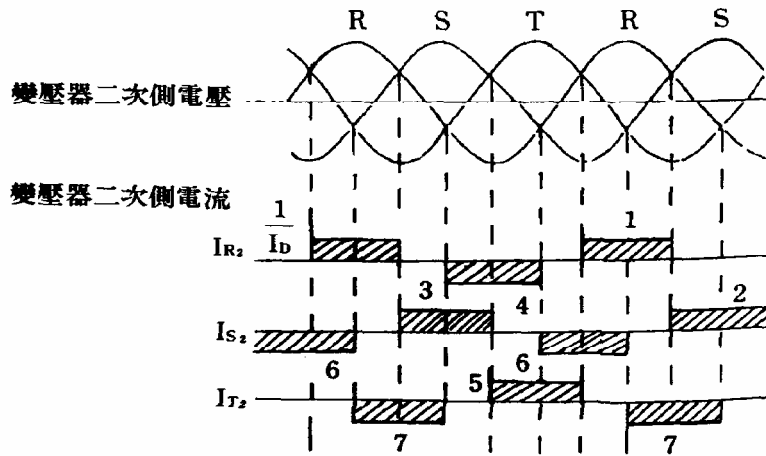


圖 2 整流器導通時 V_2 與 I_{R2} 、 I_{T2} 、 I_{S2} 的關係圖

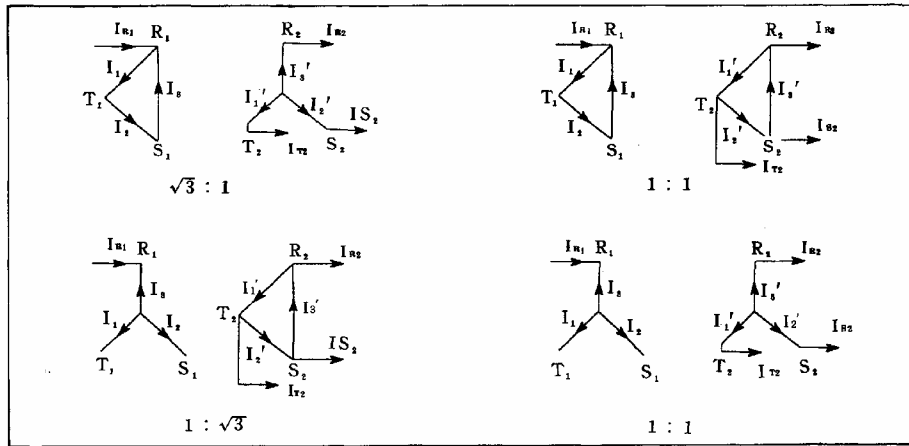


圖 3 變壓器一次側與二次側線電流關係圖

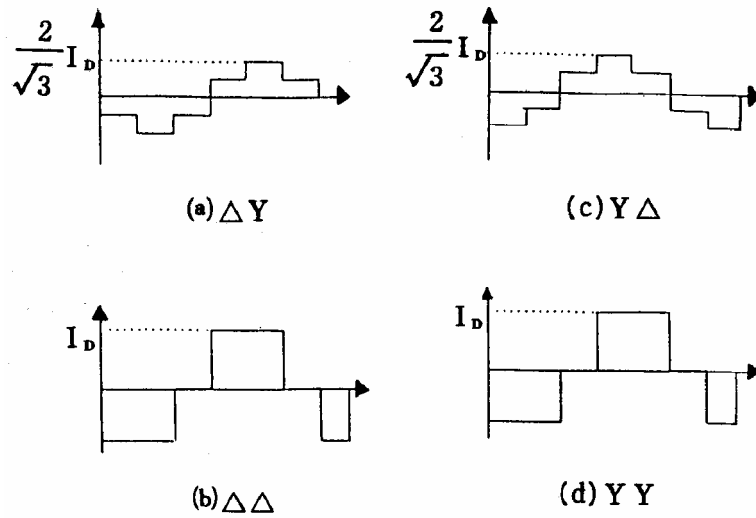


圖 4 一次側 R 相線電流波形

2.2 變頻器

圖 5 所示為變頻器外觀，大多用在省能及速度控制電機電子產品上(如變頻冷氣機)，藉由改變供電頻率作速度控制；其產生低頻雜訊成份，可由圖 6 來說明。例如當變頻器輸出頻率為 $f_2 = 3.5\text{HZ}$ 時，其

產生 1.1、1.7、6.88、6.94、7、7.1、7.12……次等整數或非整數次雜訊，一旦輸出頻率改變（如 f_1 ），產生雜訊成份會立即改變，至於雜訊量多少，則完全取決於負載本身、負載功因、SCR 激發角及輸出頻率而定，其特性如下：

- 產生雜訊成份不具規律性，不易掌握，由量測決定
- 各次雜訊電流含量，無法預估，靠長期統計來估算



圖 5 工業用控制設備變頻器外觀圖

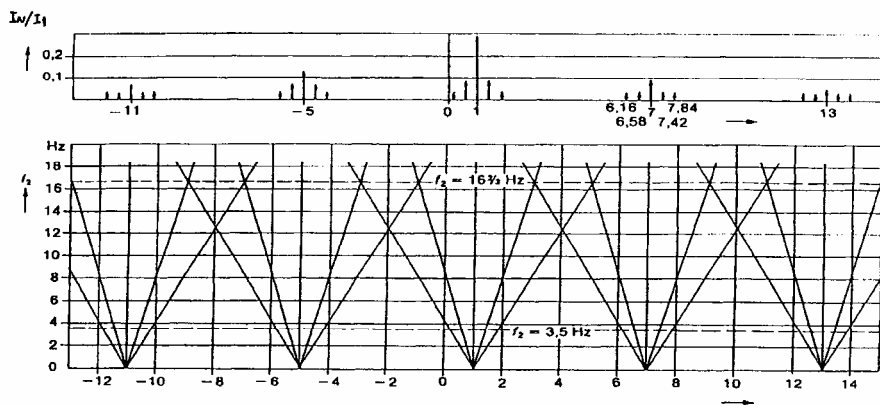


圖 6 變頻器產生低頻雜訊成份

三、雜訊電流對電容器的衝擊

某工廠供電系統如圖 7 所示，其作功因改善之電容器常不明原因燒燬，後來發現其廠內擁有四台 180KVA 電鍍金屬板的電鍍機，由於屬於直流供電，機台內部安裝有變換電源的整流器，將交流電源 380V 變換成直流電源 60V。根據前述 2.1 節對整流器產生雜訊的描述，我們已經可預期，該整流電路將在 380V 電源端產生第 5,7,11,13,17,19... 次雜訊電流，分別流向台電供電端 I_{sh} 及電容器端 I_{ch} ，雜訊電流量由 2-5 式決定，底下我們利用圖中基礎電路中的分流原理與疊加效應，來探討雜訊電流對電容器的衝擊。

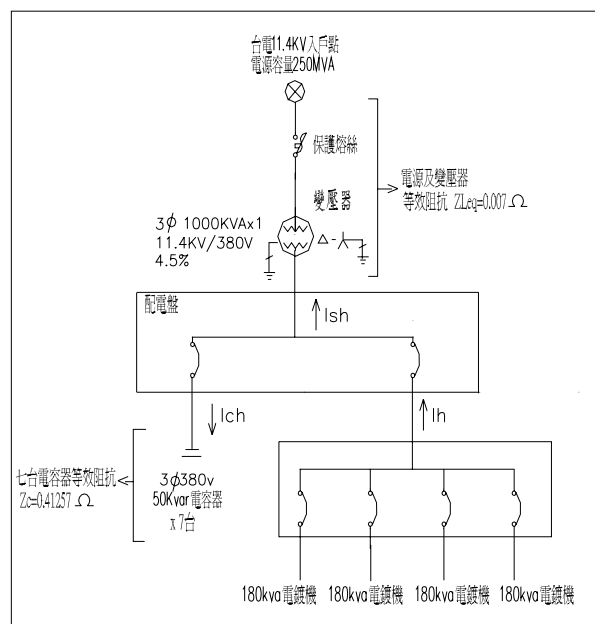


圖 7 某工廠供電系統圖

3.1 負載產生的雜訊電流預估

設備名稱：電鍍機，容量：180.0 KVA		
電源變換電子電路：180KVA 整流器		
注入處電壓：0.38 KV		
每台額定電流 $I_1 = 180\text{kva}/(\sqrt{3} \times 0.38\text{kv}) = 273\text{A}$		
因此產生低頻雜訊電流依 2-5 式		
雜訊(次)	雜訊頻率	產生雜訊電流 I_h
5	$5 \times 60 = 300\text{HZ}$	$273\text{A}/5 = 54.6\text{A}$
7	$7 \times 60 = 420\text{HZ}$	$273\text{A}/7 = 39\text{A}$
11	$11 \times 60 = 660\text{HZ}$	$273\text{A}/11 = 24.8\text{A}$
13	$13 \times 60 = 780\text{HZ}$	$273\text{A}/13 = 21\text{A}$
17	$17 \times 60 = 1020\text{HZ}$	$273\text{A}/17 = 16\text{A}$
19	$19 \times 60 = 1140\text{HZ}$	$273/19 = 14.3\text{A}$

3.2 電感性及電容器元件與雜訊電流的關係

構成供電系統的電感性元件，主要有台電電源(深山內的發電機)及業主受電變壓器，由於磁場耦合效應，其阻抗與供電頻率有關並非定值如 3-1 式；電容器則如 3-2 式所示。

$$ZL_0 = jW_0 \times L \quad 3-1 \text{ 式}$$

$$Zc_0 = -j 1/(W_0 \times C) \quad 3-2 \text{ 式}$$

其中

$$f_0 = \text{台電目前供電頻率} = 60\text{HZ}$$

$$W_0 = 2\pi f_0$$

L = 變壓器電感值

C = 電容器電容值

當 h 次雜訊電流 (h 倍於市電頻率) 流入供電系統時，系統電感性阻抗依 3-1 式及電容性阻抗如 3-2 式關係，可表示如 3-3 式及 3-4 式。

$$ZLh = jWL = j(h \times W_0) \times L = (jW_0L) \times h = ZL_0 \times h \quad 3-3 \text{ 式}$$

$$Zch = -j1/(WC) = -j1/(h \times W_0 \times C) = -j1/(W_0 \times C) \times (1/h) = Zc_0/h \quad 3-4 \text{ 式}$$

由 3-4 式可發現，功因改善電容器阻抗會因雜訊高頻特性而形成低阻抗效應且越高次雜訊（h 越大），越會發生類似短路現象，引來大量雜訊電流。故圖 7 所示供電系統，其電感性及電容性等效阻抗遇 h 次雜訊電流通過時，比照 3-3 式及 3-4 式可表示如下。

$$ZLeq_h = 0.007\Omega \times h \quad 3-5 \text{ 式}$$

$$Zceq_h = -0.41257\Omega / h \quad 3-6 \text{ 式}$$

3.3 雜訊電流對電容器的衝擊分析

爲了了解有多少雜訊電流被電容器吸收，我們利用一下圖中基礎電路分流原理，進行分析，則電容器吸收 h 次雜訊電流量，可表示如下。

$$\begin{aligned} Ich &= Ih \times 4 \text{ 台} \times [(ZLeq_h) / (ZLeq_h + Zceq_h)] \\ &= Ih \times 4 \text{ 台} \times [(0.007h) / (0.007h - 0.41257/h)] \end{aligned} \quad 3-7 \text{ 式}$$

因此代入 3-7 式，可計算七台電容器(350kvar)，所吸收各次雜訊電流 5 次雜訊量：

$$Ic5 = 54.6A \times 4 \times [(0.007 \times 5) / (0.007 \times 5 - 0.41257/5)] = -160.93A$$

7 次雜訊量：

$$Ic7 = 39A \times 4 \times [(0.007 \times 7) / (0.007 \times 7 - 0.41257/7)] = -769.12A$$

11 次雜訊量：

$$Ic11 = 24.8A \times 4 \times [(0.007 \times 11) / (0.007 \times 11 - 0.41257/11)] = 193.4A$$

13 次雜訊量：

$$Ic13 = 21A \times 4 \times [(0.007 \times 13) / (0.007 \times 13 - 0.41257/13)] = 128A$$

17 次雜訊量：

$$Ic17 = 16A \times 4 \times [(0.007 \times 17) / (0.007 \times 17 - 0.41257/17)] = 80.1A$$

19 次雜訊量：

$$I_{c19} = 14.3A \times 4 \times [(0.007 \times 19) / (0.007 \times 19 - 0.41257 / 19)] = 68.4A$$

故

(1) 七台電容器共吸收雜訊電流

$$\sqrt{[(I_{c5})^2 + (I_{c7})^2 + (I_{c11})^2 + (I_{c13})^2 + (I_{c17})^2 + (I_{c19})^2]} = 826A$$

(2) 七台電容器等效額定電流

$$350KVAR / (\sqrt{3} \times 0.38KV) = 532A$$

(3) 七台電容器實際承受淨電流

$$\sqrt{[(826)^2 + (532)^2]} = 982A$$

因此

(1) 每台電容器吸收雜訊電流

$$826 / 7 = 118A$$

(2) 每台電容器額定電流

$$532A / 7 = 76A$$

(3) 每台電容器實際承受淨電流

$$982A / 7 = 140A$$

3.4 評論

依上述分析數據，可發現安裝於具雜訊污染供電系統的電容器，很容易因吸收額外雜訊電流而發生下列現象

1. 額定過載

140A > 76A，電容器內部單體易受損

2. 耐流不夠

依 CNS1179 規定，電容器最大容許電流不可超過額定電流之 130%。

140A > 76A × 130%，電容器燒毀

四、結論

IEC1000-3-2 及 IEC1000-3-4 對電機電子產品低頻雜訊管制已有詳

盡的規定，美國 IEEE-519 從 2001 年起，已開始對 240V 系統以下電機電子產品進行管制建議。隨著越來越多電子控制設備的引用，電機電子機具雜訊電流對供電系統的危害，將日形顯現。本文除了詳盡說明雜訊電流產生的來龍去脈，也舉一實際案例，分析其對工廠功因改善電容器的傷害；總之這還只是冰山一角，雜訊電流甚至有能力造成精密機台當機，產品報廢，全廠停電，這些案例往往發生在精密產業聚集的科學園區內，其損失不可謂不大，值得大家重視。

📖 參考文獻

1. C.K. Duffey, and R.P. Stratford. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Std 519-1992.
2. 林昆平著，「工業配電諧波問題改善」，國立台灣大學電機工程研究所碩士論文，1995.7。
3. 林昆平著，「相移操作技術解決電機電子機具產生諧波問題」，電機月刊，1996，11。
4. 林昆平著，"An Advanced Computer Code For Single-Tuned Harmonic Filter Design", IEEE Industry & Commercial Power system Conference, pp.105-114, 1997。
5. 林昆平著，"An Advanced Computer Code For Single-Tuned Harmonic Filter Design", IEEE Transation on Industry Application, Vol.34, No.4, July / Aug 1998, PP.640-648.
6. 林昆平著，「三繞組變壓器應用在諧波上的抑制」，電機月刊，1998，10。
7. 林昆平著，「從 12 吋晶圓製造廠談諧波抑制及評估技術」，第 71 期電機技師期刊，Oct 1998。
8. CNS 1179 「低壓電容器」。