

高速鐵路諧波抑制策略

萬鼎工程服務股份有限公司 林宗志

一、緒論

台灣地區地狹人稠，大都市、重要的工業區及商業中心等大多位居於台灣的西半部，南北向之城際運輸需求量極為龐大。目前西部走廊的長途交通運輸主要是仰賴高速公路、傳統鐵路及民航飛機，但數年之後，國內每日的長途客運量將超越現有長程交通工具所能提供之運能。高速鐵路(High-Speed Railway, HSR)擁有安全、運量高、用地少、能源省及污染低等優點，若引進運輸市場，將能即刻解決台灣西部走廊日趨嚴重的交通壅塞問題[1]。

高鐵列車之馬達驅動系統包含有脈寬調變轉換器及脈寬調變換流器等電力電子轉換器，這類裝置屬於非線性負載，運轉時會產生諧波電流，為主要諧波源之一。諧波電流注入至公用電力系統後，不但會影響電力品質，還可能引發串並聯共振，致使電力設備遭受破壞，甚至危及人員安全，其影響程度甚為深遠，實不容忽視。

關於諧波改善，工業界普遍的做法是裝設被動式諧波濾波器，以濾波器來吸收負載所產生的諧波電流，並藉由濾波器去改變系統之阻抗特性，避免並聯共振之情形發生。對於鐵路系統所衍生的諧波問題，一般的做法均是於牽引動力變電站設置被動式濾波器[2-6]，藉著濾波器吸收列車所產生的諧波電流。倘若不是如此，則此諧波電流將會經由牽引動力變電站注入至公用電力系統。

被動式濾波器不僅是用來濾除諧波電流，通常亦同時用來改善系統的功率因數。一般來說，被動式濾波器幾乎是全天候投入於系統，只有在某些時候才會自系統切離。這樣的做法，對應用在負載不經常變動或負載變動幅度不大的場合是合宜的，但若應用於負載快速變動或負載變動劇烈之場合，則有待商榷。傳統被動式濾波器是以機械式開關進行濾波器的投入與切離，而此一隨機之投切行為可能會造成嚴重的開關暫態問題。因此有學者建議，諸如鐵路系統這類負載快速變動且變動劇烈的場合，可考慮以附帶濾波功能的開流體切換電容器(Thyristor-Switched Capacitor, TSC)做為電力品質改善裝置[7-9]。

二、高速鐵路牽引電力系統概要

高速鐵路之核心機電系統包括有車輛系統、號誌系統、通訊系統及供電系統等。供電系統的主要內容包括供電架構、饋電方式、牽引變壓器及牽引負載等。各國高鐵所採用的饋電方式及牽引變壓器種類不盡相同。

台灣高鐵各牽引動力變電站皆自台電引接三相雙迴路 161kV 電源，由牽引變壓器變換為 2×25kV 之單相電力，並將此單相電力送至電車線，再由列車之集電弓來擷取。供電架構如圖 2-1 所示。

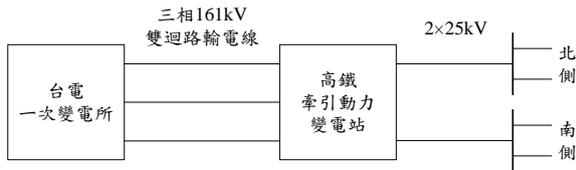


圖 2-1 台灣高鐵供電架構示意圖

為減輕牽引負載所帶來的電壓不平衡問題，高鐵採用特殊結線牽引變壓器，包括單相連接、V 型連接、史考特連接及拉伯朗克連接變壓器等，不同結線型式的變壓器對電壓不平衡有不一樣的影響。

高速鐵路牽引電力系統的饋電方式大約有五種，包括直接饋電、吸流變壓器饋電、設置迴流線的直接饋電、自耦變壓器饋電及同軸電纜饋電等，各饋電方式均有其優缺點，應視實際需求選擇。

高鐵牽引負載的主要特點為非線性、單相用電且變動劇烈，因而衍生出諧波、電壓不平衡及電壓變動等問題，這些問題會影響到公用電力系統的供電品質，實有必要提出因應之策。

三、被動式濾波器

因為電力系統中含有非線性負載(諧波源)，所以會產生諧波問題。此類非線性負載包括電力電子轉換器、鐵磁性設備及電弧性設備。目前常見的諧波改善因應對策是加裝被動式濾波器或主動式濾波器。其中被動式濾波器可分為調諧濾波器(Tuned Filter)與阻尼濾波器(Damped Filter)兩類。調諧濾波器主要有單調諧濾波器及雙調諧濾波器兩種，可提供某一特定頻率諧波電流一個低阻抗路徑，比較適合用來濾除低次諧波電流；阻尼濾波器主要有一階、二階、三階及 C 型等四種，可提供較大頻寬之低阻抗路徑，比較適合用來濾除高次諧波電流。

四、高速鐵路虛功補償及諧波改善

一般來說，電氣化鐵路會面臨到兩個主要課題，即虛功補償與諧波改善。對於這樣的問題，通常是以機械式開關控制電容器(兼做濾波器)的方式一併解決。但考量到牽引負載變動劇烈及機械開關電氣壽命等，有些國家開始採用電子式開關來控制補償裝置。這類型補償裝置使用最多的為靜態虛功補償器(Static Var Compensator, SVC)，包括南非、澳大利亞、日本、英國等，皆使用 SVC 於電氣化鐵路[6-9,14]。

靜態虛功補償器能產生大小可加以控制的虛功率，具有響應速度快、可連續操作、維護簡便等特性，在現階段虛功補償上佔有重要的一席之地。其應用範圍廣泛，許多問題皆可透過 SVC 之裝設而獲得改善。靜態虛功補償器由電容器、電抗器、開流體及控制器所組成，大致上可分為以下幾種類型[10,15]

- (1) 開流體控制電抗器 (Thyristor-Controlled Reactor, TCR)
- (2) 開流體控制變壓器 (Thyristor-Controlled Transformer, TCT)
- (3) 開流體控制電抗器－固定式電容器 (Thyristor-Controlled Reactor－Fixed Capacitor, TCR-FC)
- (4) 開流體切換電容器 (Thyristor-Switched Capacitor, TSC)
- (5) 開流體控制電抗器－開流體切換電容器 (TCR-TSC)
- (6) 飽和電抗器 (Saturated-Reactor, SR)

關於交流電氣化鐵路的虛功及諧波問題，有幾個可行的解決方案，例如單調諧濾波器、雙調諧濾波器、TCR 加單調諧濾波器、TCR 加濾波器加固定電容器、TSC(附帶調諧電抗器)等。雙調諧濾波器

為台鐵所採用，主要是濾除 3、5 次諧波，並做虛功補償。TCR-FC-Filter 則是應用於英法海底隧道鐵路系統，利用 TCR 及 FC 進行虛功補償，而以濾波器進行諧波改善。中國大陸現階段對於鐵路系統虛功補償及諧波改善的處理是採用多次單調諧濾波器，但早在數年前便已開始著手研究採用 TSC 之可行性[3,4,8,9,14]。

電化鐵路牽引負載變動劇烈，若以傳統被動式濾波器進行虛功補償及諧波改善是不合適、不理想的。該裝置無法隨著負載的變動而調節其輸出，造成輕載時過補償、空載時的負序比較突出(若超過負載時的負序屬異常行為，應加以限制)[9]。為此，考慮以 TCR 或 TSC 做為牽引負載的補償器是有其必要的。

TSC 之組成簡單、壽命與開關次數無關、切換暫態非常短且響應速度快，是一經濟且實用的補償裝置，非常適合應用於電氣化鐵路系統。至於 TCR，不僅價格昂貴、控制系統複雜，而且本身還會產

生諧波，因而暫不考慮。

TSC 分組數量的多寡將會直接影響改善效果及工程投資費用。既有研究指出，若牽引變電站饋線空載率小於等於 40 % 時，用適量的一組 TSC 即可達到所要求之改善效果。多組 TSC 之採用將使改善效果更臻完善[9]。

TSC 之投入與切離是根據變電站二次側虛功率(列車所消耗的虛功率)大小來決定的。當虛功率達到某一定值時，便投入第一組 TSC，若虛功率繼續增加至超過某一定值時，則投入第二組 TSC，依此類推，直到所有 TSC 皆投入為止。在這期間，若虛功率有出現減少的情形，當其降低至某一定值時，即刻切離一組 TSC，若虛功率繼續低減，當降至某一定值時，就再切離一組 TSC，依此類推，直到所有 TSC 皆切離為止，如圖 4-1 所示。如此的安排可減少向電源端取用虛功率，並將電壓降及電壓變動限制在某一範圍之內。

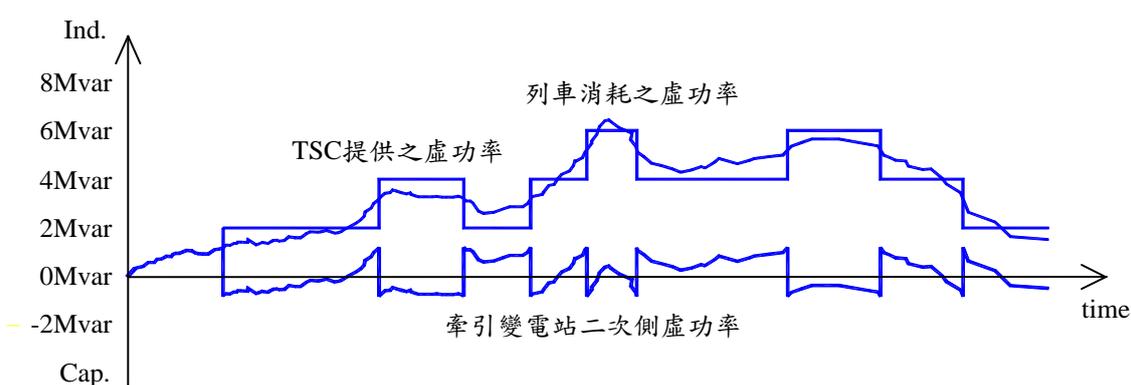


圖 4-1 牽引動力變電站 TSC 補償示意圖

五、諧波改善模擬分析

5.1 前言

高鐵牽引電力系統的主要諧波

源為列車之驅動電路，而此一驅動電路所產生的諧波電流會經由牽引動力變電站注入至共同耦合點。若台灣高鐵共同耦合點的諧波電流不

符合諧波管制標準，就必須裝設諧波改善設備。據此，本文就先估算由台灣高鐵注入至台電系統的諧波電流量，並依此判斷是否不符合管制標準而需加裝諧波改善設備。其次，探討當牽引動力變電站設置濾波器後，其對諧波的改善效果為何。本文將選擇三種不同的濾波方案，而且分別對不同接線方式之牽引變壓器做一演算，並說明這些組合對於諧波改善的差異性。

5.2 濾波設計流程與分析方法

諧波分析方法分為時域分析及頻域分析兩大類。時域分析著重在系統非線性特性的動態行為模擬，而頻域分析則是著重在諧波電流、電壓的計算及頻率掃描。計算共同耦合點之諧波電流、電壓可評估是否符合管制標準，而藉由頻率掃描可得知匯流排的驅動點阻抗頻率響應。

對於諧波電流之計算，本文採用電流注入法，此法廣泛的應用於諧波潮流之計算，電流注入法忽略了諧波電壓對諧波電流源的影響，即將諧波產生源視為一定電流源。由於不考慮諧波電壓與諧波電流之間的交互作用，電流注入法無法獲知非特性諧波之大小，因而準確度的不確定性為其缺點。關於這一點，文獻[13]指出，當諧波源匯流排上的電壓總諧波失真率小於 10 % 時，電流注入法是可以被接受的。

圖 5-1 所示為高速鐵路濾波設計流程圖，內容包含系統等效諧波阻抗矩陣之建立、濾波支路等效三相導納矩陣之求取、諧波源換算及諧

波電流之計算。以下簡單描述此一設計流程。

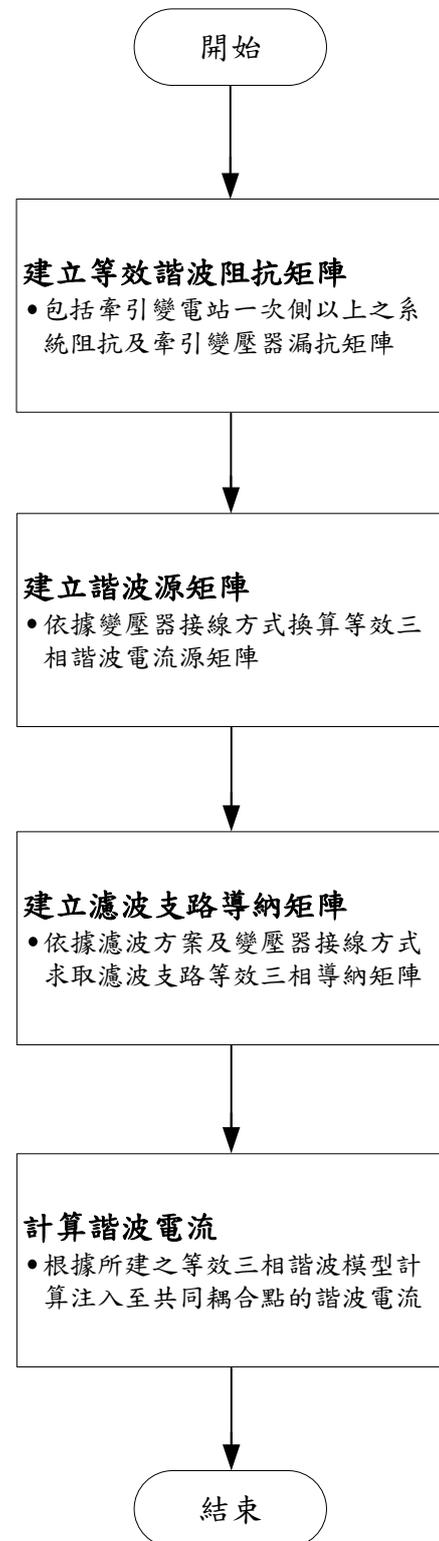


圖 5-1 高速鐵路濾波設計流程圖

步驟 1：建立等效諧波阻抗矩陣

牽引變壓器一次側以上之等效系統阻抗可藉由系統短路容量來評估，此一等效系統阻抗會隨著系統狀況之變動而改變，若不考慮電阻成分而僅考慮電抗成分，則此運算式為

$$[\mathbf{Z}_{jj}^{(n)}] = jn \frac{V_\ell^2}{S_{3\phi}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

而牽引變壓器本身之漏磁阻抗可以(6-1)式求得，為簡化計算過程，將電阻成分忽略。

$$[\mathbf{Z}_{TK}^{(n)}] = jn \frac{V_\ell^2}{S_{tr}} X_{pu} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

其中

V_ℓ ：牽引變壓器之一次側線電壓

S_{tr} ：牽引變壓器之容量

X_{pu} ：牽引變壓器之標么電抗

步驟 2：建立濾波支路等效三相導納矩陣

首先依據諧波電流之分佈情形來決定濾波器級數及數量(或說 TSC 分組數)，接著再根據需求之系統功率因數計算出總補償虛功率值，然後按照各級諧波電流佔總諧波電流之比例來線性分配各級濾波器所應提供的虛功率值，最後才依據調諧點決定各級濾波器之參數。當濾波方案確定後，便可建構濾波支路的等效三相導納矩陣。

步驟 3：建立諧波源矩陣

在獲知牽引變電站二次側之諧波電流後，根據不同的變壓器接線方式，分別求出換算至牽引動力變電站一次側之諧波電流。

步驟 4：計算諧波電流

藉由所完成之牽引電力系統等效三相諧波模型計算注入至共同耦合點的諧波電流值，各級諧波電流失真率定義為

$$I_n(\%) = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6-2)$$

其中

I_n ：諧波電流值

I_1 ：基頻電流值

總諧波電流失真率 (Total Harmonic Distortion of Current) 定義為

$$THDI(\%) = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (6-3)$$

其中

I_n ：諧波電流值

I_1 ：基頻電流值

5.3 範例系統說明

圖 5-2 所示為本文之模擬系統架構圖，牽引動力變電站自台電一次變電所引接 161kV 三相雙迴路電源，並經由兩座容量各為 80MVA 之牽引變壓器轉換成為兩組 25kV 單相電源，藉以供給北側及南側之列車使用。假設範例中之牽引動力變電站為高鐵新營變電站，其自台電柳營變電所引接特高壓電源，共同耦合點位於高鐵新營變電站的 161kV 匯流排外，最小短路容量約為 5228MVA[11]。

台灣高鐵 700T 型列車於行駛時所產生的諧波電流量如表 5-1 所示 [11、12]，將其值與台電諧波管制標準相比較後，發現在責任分界點的第 3、5 次諧波電流百分率及總諧波電流失真率未符合管制標準。為此，必須裝設諧波改善設備。

為了抑制高鐵列車產生的諧波電流流向台電電力網路，因而決定於牽引動力變電站設置被動式濾波器，並以開流體控制濾波器之投入與切離，亦可謂之具濾波功能的TSC。考量到濾波效果和工程投資，TSC分組數量選擇為3。為瞭解不同

的濾波器組合對諧波改善之影響，於此提出三個濾波方案，分別為
 方案一：安裝3、5次單調諧濾波器
 方案二：安裝3、5、7次單調諧濾波器
 方案三：安裝3、5次單調諧濾波器及7次阻尼濾波器

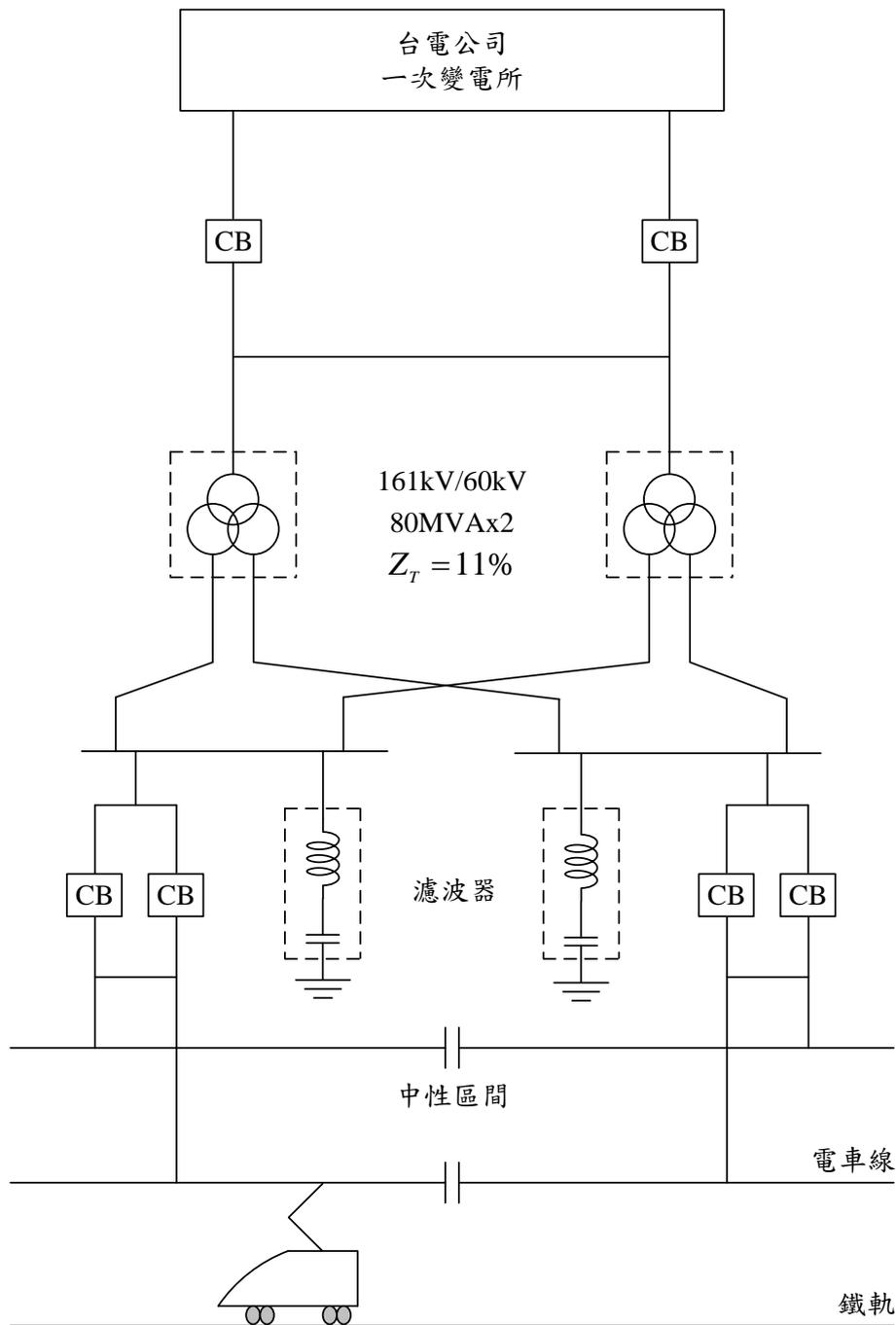


圖 5-2 高速鐵路牽引動力變電站單線圖

表 5-1 700T 型列車諧波電流百分率

諧波級數	1	3	5	7	9	11
諧波百分率(%)	100	15	7.1	3.7	2	1.2
諧波級數	13	15	17	19	21	23
諧波百分率(%)	0.71	0.49	0.35	0.31	0.215	0.165
諧波級數	25	27	29	31	33	35
諧波百分率(%)	0.115	0.089	0.072	0.06	0.053	0.042

圖 5-3 至 5-5 所示為各濾波方案的濾波器組架構圖，圖 5-6 與 5-7 所示分別為北側及南側各濾波器組之阻抗頻率響應圖。若高鐵新營變電站的最高平均負載值分別為北側 50.9MW、南側 42.7MW[18]，則功率因數從 0.95 改善至 1.0 時，各濾波方案之每組 TSC 的容量分別為北側 5.6Mvar、南側 4.5Mvar。而各級濾波器所提供的虛功率則是以各級諧波電流佔總諧波電流之百分比來

決定。另外，考慮到設備製造誤差、溫度的變化及系統頻率的變動等，濾波器調諧階次應低於所欲濾除之諧波階次，即調諧階次應為

$$t_n = \frac{X_L^{(n)}}{X_C^{(n)}} \geq \frac{1}{n^2(1-\delta f)^2}$$

其中

n ：諧波級數

X_L ：電感器基頻感抗

X_C ：電容器基頻容抗

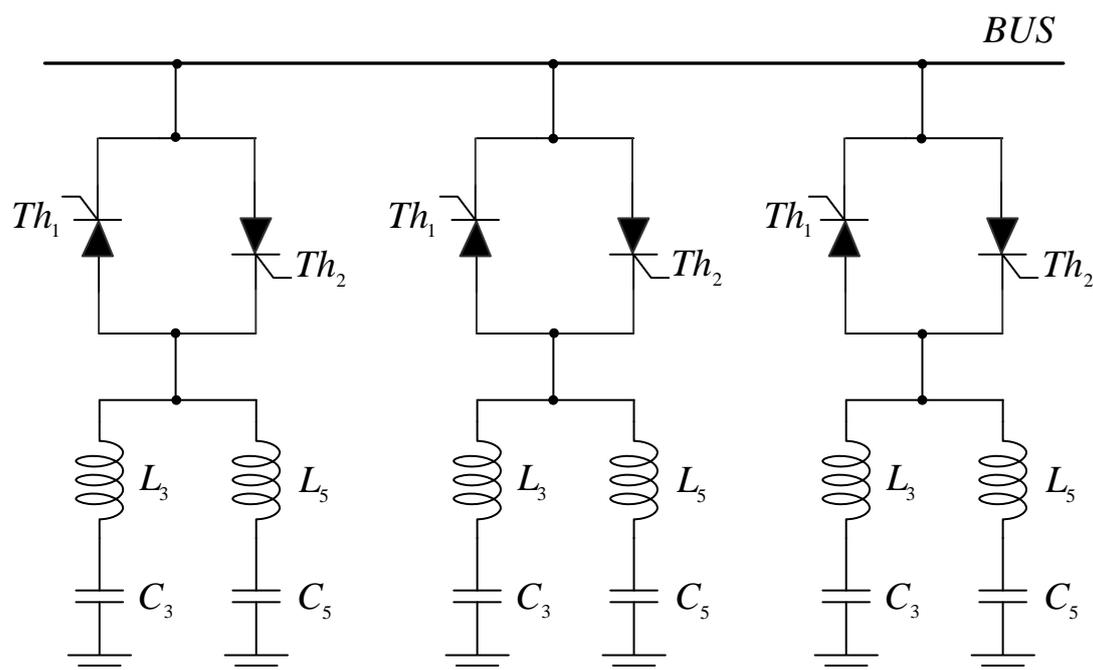


圖 5-3 濾波方案一之濾波器組架構圖

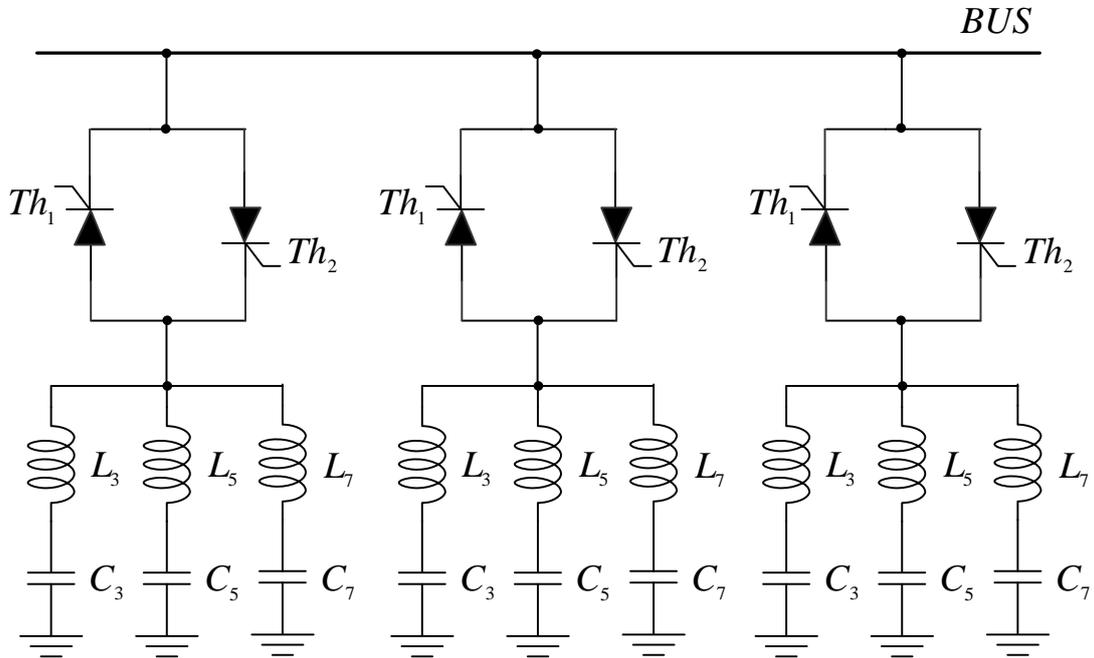


圖 5-4 濾波方案二之濾波器組架構圖

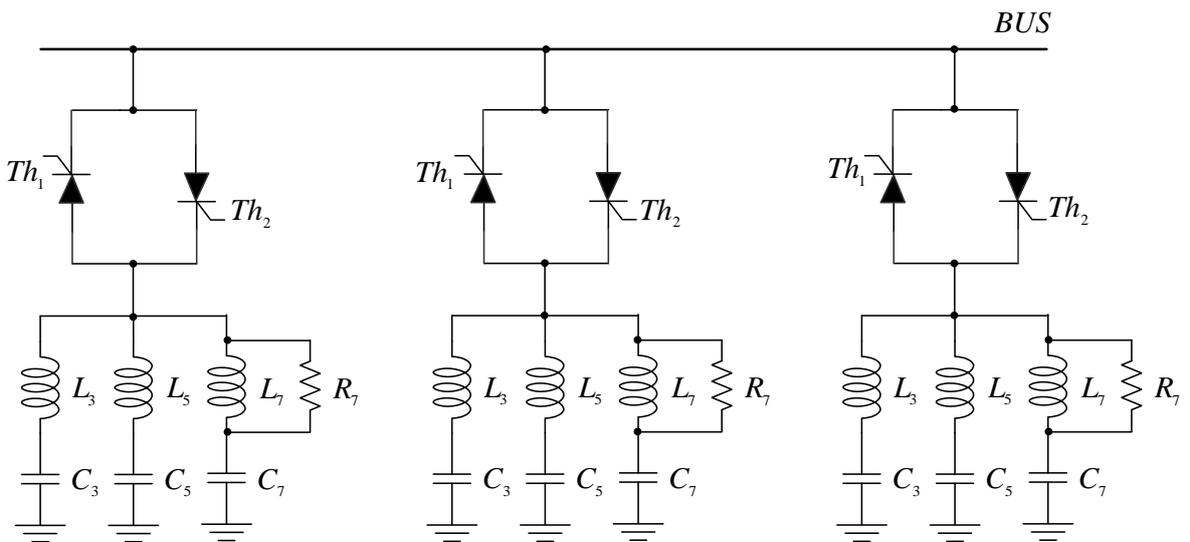
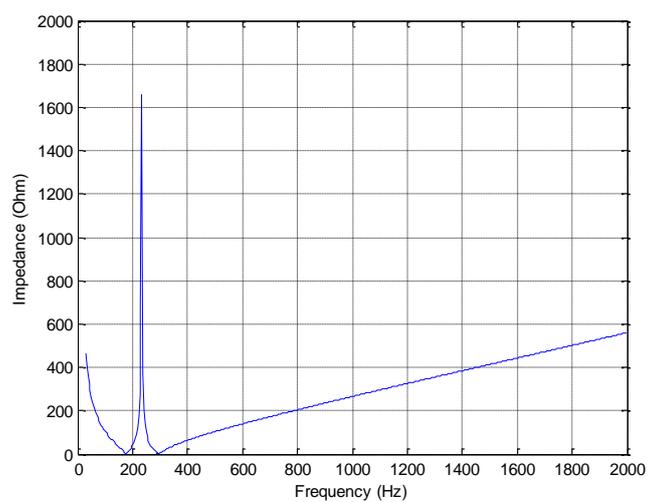
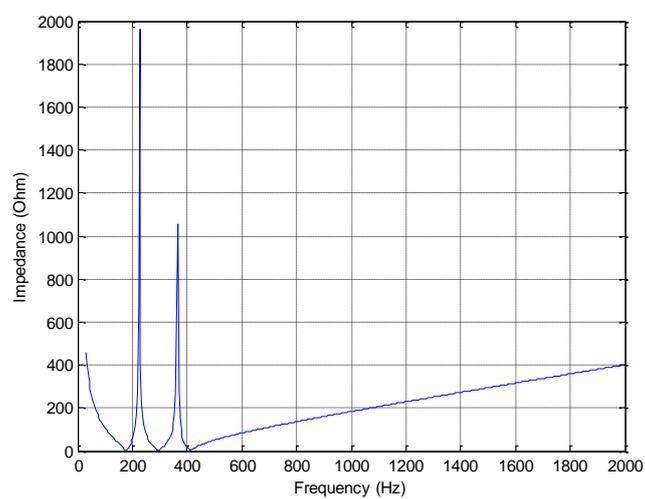


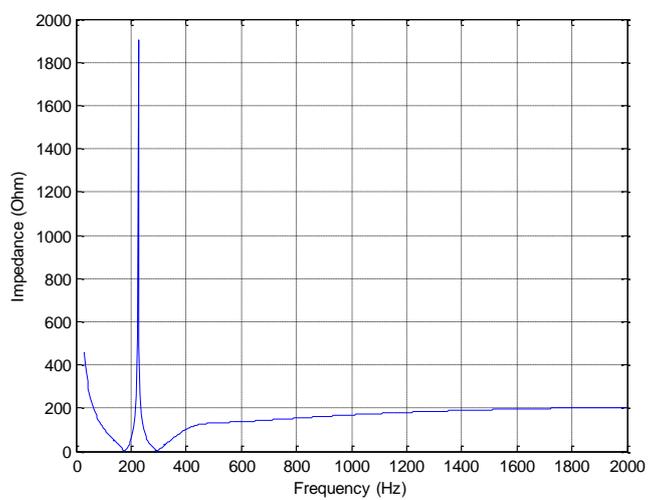
圖 5-5 濾波方案三之濾波器組架構圖



(a)

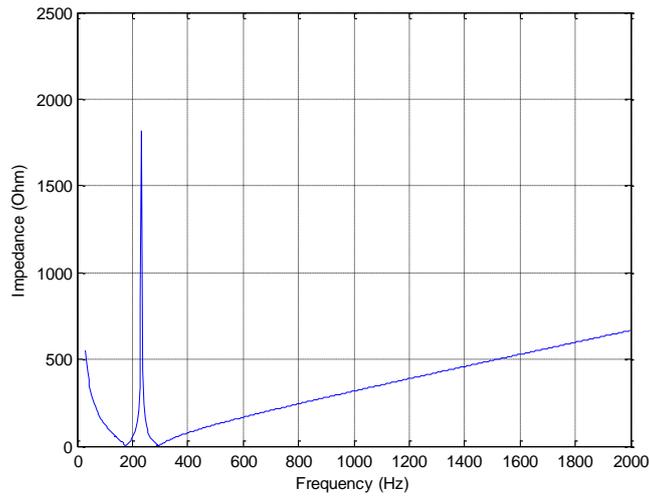


(b)

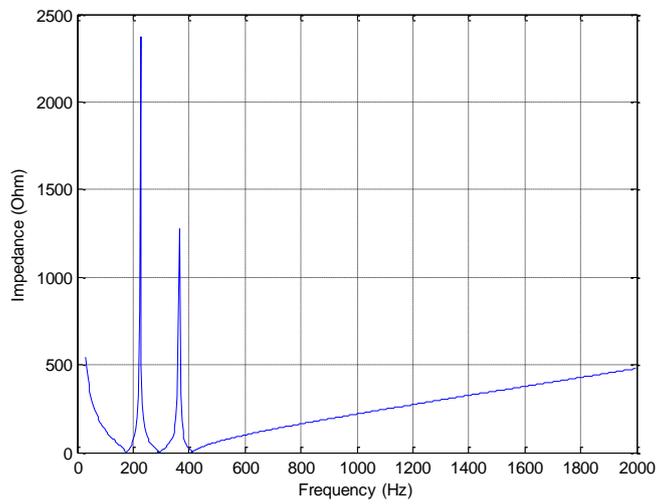


(c)

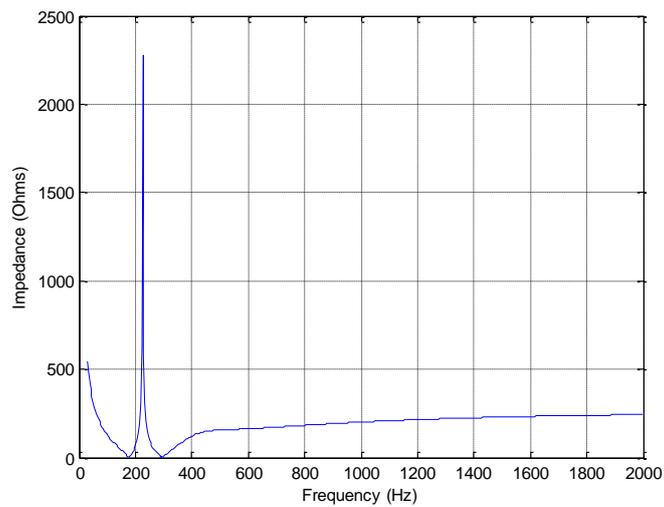
圖 5-6 北側各濾波器組之阻抗-頻率響應圖(a)方案一(b)方案二(c)方案三



(a)



(b)



(c)

圖 5-7 南側各濾波器組之阻抗頻-率響應圖(a)方案一(b)方案二(c)方案三

於此假設綜合偏差係數為 δf 為 2%。據此，各濾波方案之濾波器參數如表 5-2 及 5-3 所示。

表 5-2 各濾波方案之濾波器參數(北側)

濾波方案	濾波器組合	電容 (μF)	電感 (mH)	並聯電阻 (Ω)	調諧頻率 (Hz)
方案一	3 次單調諧濾波器	2.467	327.68	×	176.4
	5 次單調諧濾波器	1.264	231.83	×	294.0
方案二	3 次單調諧濾波器	2.113	382.60	×	176.4
	5 次單調諧濾波器	1.083	270.56	×	294.0
	7 次單調諧濾波器	0.576	259.47	×	411.6
方案三	3 次單調諧濾波器	2.113	382.60	×	176.4
	5 次單調諧濾波器	1.082	270.56	×	294.0
	7 次阻尼濾波器	0.576	259.47	671	411.6

表 5-3 各濾波方案之濾波器參數(南側)

濾波方案	濾波器組合	電容 (μF)	電感 (mH)	並聯電阻 (Ω)	調諧頻率 (Hz)
方案一	3 次單調諧濾波器	2.07	390.56	×	176.4
	5 次單調諧濾波器	1.061	276.3	×	294
方案二	3 次單調諧濾波器	1.773	455.91	×	176.4
	5 次單調諧濾波器	0.909	322.45	×	294
	7 次單調諧濾波器	0.483	309.44	×	411.6
方案三	3 次單調諧濾波器	1.773	455.91	×	176.4
	5 次單調諧濾波器	0.909	322.45	×	294
	7 次阻尼濾波器	0.483	309.44	800	411.6

5.4 模擬結果及分析

本文針對高鐵諧波改善提出三個較可行之方案，並分別針對不同接線變壓器進行演算。單相連接、V 型連接及史考特與拉伯朗克連接在各濾波方案時的諧波電流值如表 5-4 至 5-6 及圖 5-8 至 5-10 所示。

從三個方案之間的比較來看，

3、5 次諧波電流濾除率以方案一最高，其次為方案三，再其次為方案二。7 次諧波電流之濾除率以方案二最高，而且明顯高於另兩個方案。高次諧波電流之濾除率以方案三最好，方案二次之，方案一最差。總諧波電流失真率以方案二最低，方案三最高。總的來說，方案一有很

好的 3、5 次諧波電流濾除能力，但因為不含 7 次單調諧濾波器或 7 次阻尼濾波器，所以 7 次以上之諧波電流改善效果並不好。方案二有非常好的 7 次諧波電流濾除能力，3、5 次諧波電流濾除率與方案三差不多，在高次諧波電流部份，由於比方案一多了 7 次單調諧濾波器，所以改善效果較其來得好，但比具有 7 次阻尼濾波器之方案三來得差。方案三具有良好的高次諧波電流濾除率，此一濾除率隨著頻率的增加而提高，這是因為方案三含有阻尼濾波器的緣故。

上述各濾波方案的比較在不同接線變壓器之情況下亦適用，差別在於諧波電流改善程度的高低，這句話的意思是說，在相同的條件之下，諧波電流改善效果會因牽引變壓器接線方式的不同而有所差異。各濾波方案在不同變壓器接線型式

下的改善效果如表 5-7 所示，從表中可發現，不論是哪一個濾波方案，都是以單相連接之情況下的總諧波電流失真率為最低，而以 V 型連接之情況下的總諧波電流失真率為最高。若比較各次諧波失真率亦可發現，單相連接時的各次諧波電流失真率均低於 V 型連接或史考特與拉伯朗克連接時的各次諧波電流失真率。此外，不同接線方式對基頻電流及諧波電流在三相上的分佈亦會有所不同。基頻電流及諧波電流於三相上之分佈以史考特及拉伯朗克連接時最為平均，其次為 V 型連接，單相連接最差。換句話說，對於三相電流不平衡的改善，採用史考特及拉伯朗克連接會比採用 V 型連接或單相連接來得好。同樣的，對於三相電壓不平衡的改善也是以史考特及拉伯朗克連接最好。

表 5-4 單相連接時不同濾波方案之各階諧波電流值

諧波階次	方案一 I_A (A)	方案二 I_A (A)	方案三 I_A (A)	方案一 I_A (%)	方案二 I_A (%)	方案三 I_A (%)
1	611.6380	611.6380	611.6380	100.000	100.000	100.000
3	8.8482	10.2637	10.2587	1.447	1.678	1.677
5	3.3836	4.0557	3.9970	0.553	0.663	0.653
7	9.9838	1.8414	12.4875	1.632	0.301	2.042
9	6.1349	4.3433	6.4751	1.003	0.710	1.059
11	3.8548	3.0146	3.6310	0.630	0.493	0.594
13	2.3360	1.8890	2.0396	0.382	0.309	0.333
15	1.6331	1.3466	1.3491	0.267	0.220	0.221
17	1.1778	0.9807	0.9240	0.193	0.160	0.151
19	1.0484	0.8801	0.7877	0.171	0.144	0.129
21	0.7307	0.6157	0.5241	0.119	0.101	0.086
23	0.5624	0.4756	0.3864	0.092	0.078	0.063
25	0.3928	0.3330	0.2602	0.064	0.054	0.043
27	0.3045	0.2587	0.1940	0.050	0.042	0.032
29	0.2469	0.2101	0.1511	0.040	0.034	0.025

31	0.2058	0.1761	0.1214	0.034	0.029	0.020
33	0.1821	0.1553	0.1037	0.030	0.025	0.017
35	0.1444	0.1232	0.0794	0.024	0.020	0.013
THDI	15.9300	12.6950	18.4470	2.605	2.075	3.016

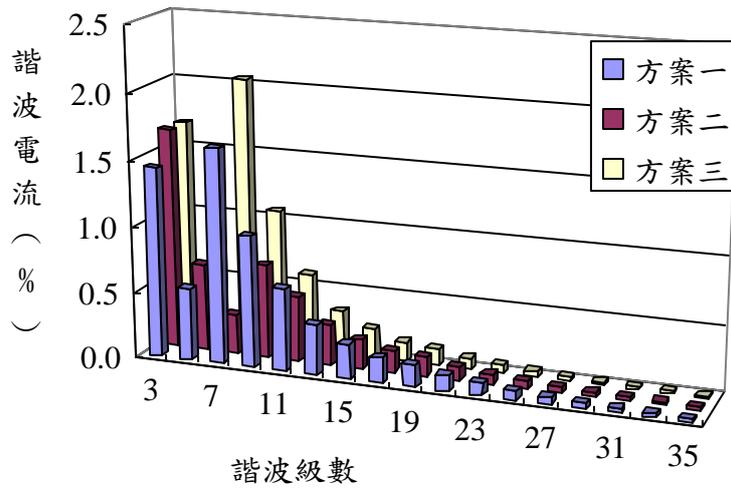


圖 5-8 單相連接時不同濾波方案之各階諧波電流值

表 5-54 V 型連接時各濾波方案之諧波電流值

諧波階次	方案一 I _c (A)	方案二 I _c (A)	方案三 I _c (A)	方案一 I _c (%)	方案二 I _c (%)	方案三 I _c (%)
1	279.0450	279.0450	279.0450	100	100	100
3	8.3144	9.3783	9.3790	2.980	3.361	3.361
5	3.2912	3.8177	3.7791	1.179	1.368	1.354
7	6.2162	1.7698	7.1694	2.228	0.634	2.569
9	3.6498	2.9109	3.7711	1.308	1.043	1.351
11	2.2570	1.9296	2.1709	0.809	0.692	0.778
13	1.3551	1.1826	1.2413	0.486	0.424	0.445
15	0.9428	1.3521	0.8337	0.338	0.299	0.299
17	0.6775	0.9823	0.5799	0.243	0.216	0.208
19	0.6023	0.5389	0.5006	0.216	0.193	0.179
21	0.4191	0.3755	0.3384	0.150	0.135	0.121
23	0.3218	0.2895	0.2525	0.115	0.104	0.090
25	0.2247	0.2024	0.1724	0.081	0.073	0.062
27	0.1740	0.1570	0.1300	0.062	0.056	0.047
29	0.1410	0.1272	0.1026	0.051	0.046	0.037
31	0.1175	0.1061	0.0834	0.042	0.038	0.030
33	0.1040	0.0940	0.0721	0.037	0.034	0.026
35	0.0823	0.0744	0.0557	0.029	0.027	0.020
THDI	11.8730	11.0760	13.2530	4.255	3.941	4.750

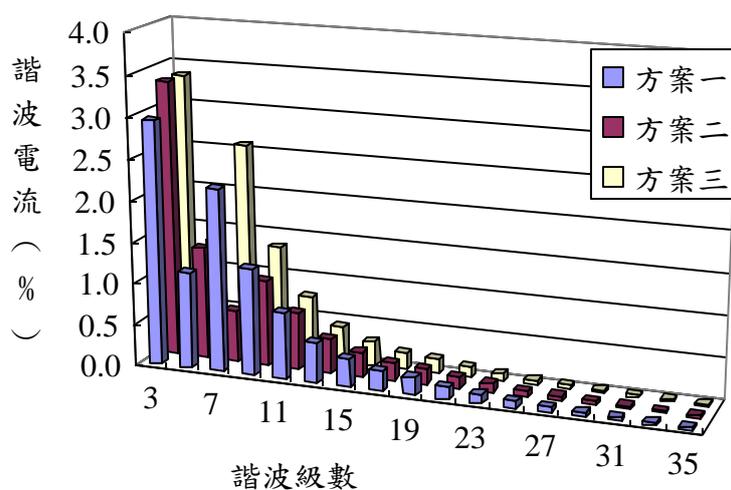


圖 5-9 V 型連接時不同濾波方案之各階諧波電流值

表 5-6 史考特與拉伯朗克連接時不同濾波方案之各階諧波電流值

諧波階次	方案一 I_c (A)	方案二 I_c (A)	方案三 I_c (A)	方案一 I_c (%)	方案二 I_c (%)	方案三 I_c (%)
1	338.7310	338.7310	338.7310	100.000	100.000	100.000
3	9.2382	10.5513	10.5490	2.727	3.115	3.114
5	3.5985	4.2398	4.1879	1.062	1.252	1.236
7	7.7751	1.9510	8.9992	2.295	0.576	2.657
9	4.5781	3.6095	4.7366	1.352	1.066	1.398
11	2.8301	2.4039	2.7222	0.836	0.710	0.804
13	1.6999	1.4784	1.5560	0.502	0.436	0.459
15	1.1828	1.0432	1.0439	0.349	0.308	0.308
17	0.8500	0.7548	0.7249	0.251	0.223	0.214
19	0.7553	0.6745	0.6252	0.223	0.199	0.185
21	0.5255	0.4704	0.4216	0.155	0.139	0.124
23	0.4038	0.3626	0.3143	0.119	0.107	0.093
25	0.2819	0.2535	0.2139	0.083	0.075	0.063
27	0.2183	0.1967	0.1611	0.064	0.058	0.048
29	0.1769	0.1595	0.1268	0.052	0.047	0.037
31	0.1474	0.1333	0.1029	0.044	0.039	0.030
33	0.1304	0.1178	0.0887	0.038	0.035	0.026
35	0.1033	0.0933	0.0684	0.030	0.028	0.020
THDI	13.9260	12.5200	15.6350	4.111	3.696	4.616

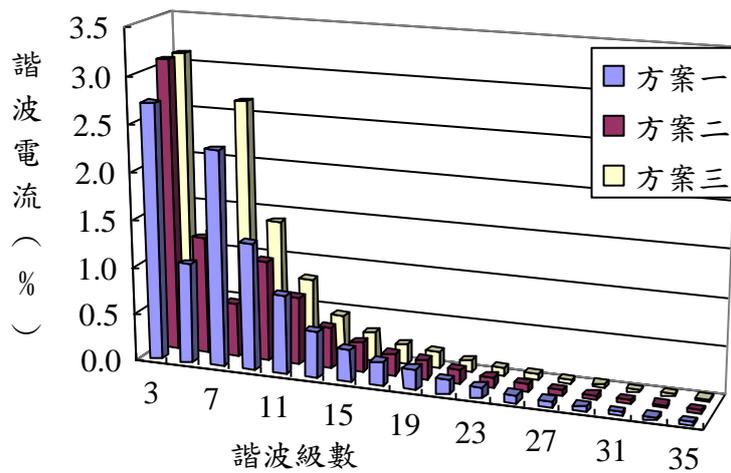


圖 5-10 史考特與拉伯朗克連接時不同濾波方案之各階諧波電流值

表 5-7 不同變壓器連接型式諧波濾波效果之比較

變壓器 接線方式	改善前 THD(%)	方案一 THD(%)	方案二 THD(%)	方案三 THD(%)
單相連接	17.193	2.605	2.075	3.016
V 型連接	17.193	4.255	3.941	4.750
史考特與 拉伯朗克連接	17.193	4.111	3.696	4.616

若從相別之間的比較來看，可發現到各相的諧波電流失真率(各次諧波電流失真率及總諧波電流失真率)並不相同，這與牽引變壓器接線型式、牽引變壓器一次側相別之分配及牽引變壓器二次側各相負載量有關。以史考特連接來說，當 M 座

變壓器一次側接於 B、C 相且 M 相之負載較 T 相之負載為重時，最嚴重之諧波電流失真率將發生在 B、C 相，而最嚴重之諧波電壓失真率也將發生在 B、C 相。不同接線方式下，各相總諧波電流失真率之比較如表 5-8 至表 5-10 所示。

表 5-8 單相連接各相諧波濾波效果之比較

THDI(%)				
相別	改善前	方案一	方案二	方案三
A	17.193	2.605	2.075	3.016
B	17.193	2.605	2.075	3.016
C	0.000	0.000	0.000	0.000

表 5-9 V 型連接各相諧波濾波效果之比較

THDI(%)				
相別	改善前	方案一	方案二	方案三
A	17.193	3.833	3.465	4.312
B	17.193	3.130	2.618	3.578
C	17.193	4.255	3.941	4.750

表 5-10 史考特與拉伯朗克連接各相諧波濾波效果之比較

THDI(%)				
相別	改善前	方案一	方案二	方案三
A	17.193	3.821	3.372	4.312
B	17.193	4.111	3.696	4.616
C	17.193	4.111	3.696	4.616

以諧波管制要求(如表 5-11 所示)檢視所有的模擬結果可得知，採用單相連接時，三個濾波方案均可使各次諧波電流失真率及總諧波電流失真率符合管制標準。在 V 型連接之情況下，任一濾波方案皆可使各次諧波電流失真率符合管制標準，但方案一會使 C 相的總諧波電流失真率不符合管制標準，而方案三會使 A 相及 C 相的總諧波電流失真率不符合管制標準。在史考特及拉伯朗克連接的情況下，所有濾波方案都可使各次諧波電流失真率符合管制標準，但方案一會使 B 相及 C 相的總諧波電流失真率超出管制標準，而方案三會使 A、B、C 相的總諧波電流失真率都超出管制標準。總的來講，無論牽引變壓器採用何種接線方式，所有方案均可使各次諧波電流失真率符合管制標準。當採用方案二的時候，不管是哪種接線方式，各次諧波電流失真率及總諧波電流失真率均能符合管

制標準。而方案一及方案三會使 V 型連接或史考特與拉伯朗克連接的某幾相的總諧波電流失真率不符合管制標準，解決辦法是提高濾波器的調諧次數。

由模擬結果可知，諧波改善效果最好的是方案二，其次為方案一，最差的是方案三，主要原因是在 7 次及 9 次諧波電流的改善。高鐵 700T 型列車所產生的諧波電流以 3、5、7 次為主，9 次以上的諧波電流含量並不高，因而濾波器的設計應該以濾除 3、5、7 次諧波電流成份為首要考量。基於此，三個方案皆包含 3、5 次單調諧濾波器，而方案二比方案一多了 7 次單調諧濾波器，方案三則比方案一多了 7 次阻尼濾波器。從模擬所得的數據來看，各個方案的 3、5 次諧波電流濾除率相差不大，但方案二的 7 次諧波電流濾除效果比方案一及方案三要好上許多，9 次諧波電流濾除效果也是方案二比較好。雖然方案三有

較佳的高次諧波電流抑制能力，但因為諧波源中的高次諧波電流含量本來就不高，所以抑制高次諧波電流對降低總諧波電流失真率的幫助

並不大。因此，就諧波改善的效果來看，方案二優於方案一及方案三。

表 5-11 高鐵新營變電站於共同耦合點之諧波電流管制要求

I_{sc}/I_L	諧波電流失真率(%)限制值					總合諧波 THD(%)
	各級諧波個別值(奇次)					
	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	
* <20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

六、結論

電力品質乃目前相當熱門之話題，包括電力公司、學術機構及工業界等，皆投入大量的人力進行全面性的研究。電力諧波是造成電力品質不良的眾多因素中的其中一個，而這諧波是由電力系統中的非線性負載所造成的。高鐵列車上裝有電力電子轉換器，該設備會產生諧波電流，若沒有加裝諧波改善設備，則這些諧波電流將全數流向公用電力系統，致使電力品質受到污染，進而影響到系統上的其他用戶。特別是台灣高鐵的供電電源引接自台電一次變電所，因而諧波污染所影響的層面將更為廣大。基於此，台灣電力公司制定了一套諧波電流管制標準，限制用戶注入公用電力系統的諧波電流量，尤其是對於161kV用戶，管制更是嚴格。有鑑於此，本文提出三個諧波改善方案，期望藉此減輕高鐵列車所造成的諧波問題。

高鐵 700T 型列車所產生的諧波電流主要集中在 3、5、7 次，若濾波器之設計

可以濾除大部分的 3、5、7 次諧波電流，則總諧波電流失真率即可符合台電所訂定之諧波管制標準。本文以 MATLAB 套裝軟體撰寫濾波分析程式，由模擬結果可知，方案二對於諧波改善有最好的效果，其次為方案一，最差的是方案三。此外，牽引變壓器的接線方式也會影響諧波改善的成效。根據研究結果所示，若牽引變壓器採用單相連接，將有助於濾波裝置的諧波改善。

參考文獻

- [1] 台灣高鐵公司網站
<http://www.thsrc.com.tw/>
- [2] 林智偉，「利用系統變換法分析鐵路牽引系統之諧波分佈與改善」，國立台灣科技大學電機工程系碩士論文，民國九十年。3
- [3] 李群湛，「電氣化鐵道並聯綜合補償及其應用」，中國鐵道出版社，1994。
- [4] 黃炎煌，「台鐵電化路線電力供應概

- 要」，台灣鐵路管理局，民國八十七年。
- [5] S. R. Huang and B. N. Chen, "Harmonic Study of the Le Blanc Transformer for Taiwan Railway's Electrification System," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.2, pp. 495-499, 2002.
- [6] L. Hu, R. E. Morrison, D. J. Young, "Reduction of Harmonic Distortion and Improvement of Voltage Form Factor in Compensated Railway Systems by Means of A Single Arm Filter," Proceedings of the IEEE Conference on Harmonics in power Systems, Atlanta, pp. 83-88, 1992.
- [7] G. Celli, F. Pilo, S. B. Tennakoon, "Voltage Regulation on 25kV AC Railway Systems by Using Thyristor Switched Capacitor", Harmonics and Quality of Power, 2000, Proceedings, Vol.2, pp. 633-638, 2000.
- [8] Z. Li, Q. Z. Li, "Application of TSC in Reactive Compensation in Traction Substations," Autonomous Decentralized Systems, 2000, Proceedings, pp. 149-153, September 2000.
- [9] 李群湛等，「諧波綜合治理試點方案可行性研究報告—晶閘管投切濾波器」，西南交通大學電氣工程學院/鐵道部電氣化工程局電氣化勘測設計研究院/鐵道部第二勘測設計院，1998。
- [10] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, New York, 1993.
- [11] 陳士麟等，「高速鐵路牽引動力主變電站設計與越區饋電之影響評估」，交通部高速鐵路工程局，民國九十一年。
- [12] 陳保成，「台灣高速鐵路系統責任分界點電力品質分析」，國立清華大學電機工程學系碩士論文，民國九十一年。
- [13] M. F. McGranaghan, R. C. Dugan and W.L. Sponsler, "Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics," IEEE Transactions Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.3, pp. 1362-1369, March 1983.
- [14] R. Barnes and K. T. Wong, "Unbalance and Harmonic Studies for the Channel Tunnel Railway System," IEE Proceedings-B, Vol.138, No.2, pp. 41-50, March 1991.
- [15] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electric System, John Wiley & Sons, New York, 1982.