

電聯車電氣設備

何宗軒¹ 田榮生² 黃智強³ 蔡玉麟⁴

摘要

「電聯車」是以電力為車輛原動力而為聯結編組運行的車輛，車輛電力供應分為主要系統與輔助系統兩種。主要系統提供電聯車之推進牽引動力，其設備包括換流器、牽引馬達、主控制器、電力煞車、邏輯控制…等；而輔助電力供應主要系統以外之列車所有用電，包括空調機、空壓機、冷卻風扇、照明系統、清潔用電及所有列車控制。

主要電力系統提供運動力量的來源，而輔助電力系統將電力能源經過適當的處理分配後輸送到車輛上各個用電設備。本文即針對電聯車電力系統主要及輔助兩系統所供應之重要電器設備，包括推進系統、輔助電力系統、照明系統及列車控制提出重點議題介紹與設計分析。

關鍵詞：換流器、推進系統、列車控制

EMU Electrical Equipment

Chung-Hsuan Ho Jung-Sheng Tien Chih-Chiang Huang Yu-Lin Tsai

Abstract

Electrical multiple unit (EMU) trains are multi-car trains that are propelled by electricity. There are two types of power supply system: master and auxiliary. The master power supply controls the propulsion/traction systems and is composed of inverter, traction motor, master controller, electrical braking, logic control...etc. The auxiliary power supply provides electricity to all the other on-train electrical appliances, such as the air conditioning system, air compressor, air cooling fans, lighting system, cleaning equipment and train control systems.

The master power system is the power-source for motion while the auxiliary power system provides power for the functioning of all the other necessary facilities on the train. This paper introduces and analyzes important issues of master and auxiliary power systems such as the propulsion system, auxiliary power system, lighting system and train control.

Key Words : inverter, propulsion system, train control

1. 臺北市政府捷運工程局機電設計處副工程司 10918@trts.dorts.gov.tw
2. 臺北市政府捷運工程局機電設計處幫工程司 10290@trts.dorts.gov.tw
3. 臺北市政府捷運工程局機電設計處幫工程司 10323@trts.dorts.gov.tw
4. 臺北市政府捷運工程局機電設計處幫工程司 41081@trts.dorts.gov.tw

一、前言

台北捷運系統高運量電聯車包括淡水、新店、南港、中和、土城、新莊及蘆洲線等，中運量系統包括木柵及內湖線等。本文之內容以高運量電聯車為主，輔以中運量必要之說明。電聯車其電力來源係由第三軌，集電靴集取電力饋入電聯車，以供電聯車主要電力系統及輔助電力系統等各項電氣設備用電需求。本文即針對「電聯車電氣設備」之相關重要議題逐一說明。

二、推進系統 (Propulsion System)

電聯車基本電力流程為捷運系統第三軌提供 750V 直流電，經集電靴 (Collector Shoe) 進入電聯車之閘刀開關 (Knife Switch) 分成兩路，一至推進設備，另一至輔助電力設備 (Auxiliaries)。集電靴係裝置在電聯車轉向架兩側，藉與供電軌接觸而集取電能以供電聯車使用。閘刀開關主要用於維修時之主電源開關，以手動操作控制。主電源電路經斷路器提供過載及欠載保護，經反應器 (Reactor) 將供應電源濾波以減少電磁干擾雜訊及消除系統本身所產生的諧波，然後饋入換流器，而換流器將直流電轉換成交流電以供應交流馬達；每一動力車各有兩套各自獨立之變頻變壓 (VVVF) 換流器，每個換流器控制供應兩個交流馬達。而因應科技技術之進步，電聯車推進系統之設計亦逐步改善與精進，以下即針對推進系統相關議題提出說明。

(一) 牽引馬達 (如圖1) 之沿革

本局最早規劃之中運量木柵線 Matra 車輛，每車之推進系統有兩個直流馬達，每個馬達的電樞都有一支驅動軸連接，做為行駛或煞車力量的傳導，採並激自冷式 H 級絕緣之設計。

爾後包括高運量或中運量之各線電聯車，均採用非同步交流感應電動機為其牽引動力，其輸入電源為三相平衡電源，馬達定子 (Stator) 有四組線圈繞組，其作用如同同一旋轉變壓器，在變壓器中，原線圈接上電源，產生交流電流，由於原線圈磁通的極性及大小發生變化，使副線圈中感應電壓及電流在感應電動機中，產生一無形的旋轉磁場沿空氣隙而轉動，此旋轉磁場切割轉子銅條，因而在轉子導體內產生電流，同時發生轉矩，使轉子旋轉。旋轉磁場轉速即為同步轉速 (Synchronous Speed)，此旋轉磁場感應轉子 (Rotor)，產生電流，感應轉子轉矩，使轉子轉動即為轉子轉速。當轉子轉速低於同步轉速，產生正轉矩，即為加速轉矩；當轉子轉速高於同步轉速，產生負轉矩，即為煞車轉矩，此為電力煞車基本原理。



圖 1 電聯車交流牽引馬達

近年來交流馬達之應用於軌道車輛日漸普及，幾乎取代直流馬達，本局目前各線電聯車則均採用非同步交流感應馬達，交流馬達與直流馬達相較，其主要特性及優點包括其無需使用整流子 (Commutator) 與碳刷 (Brushes)，因此構造較直流馬達簡單堅固，且維修保養亦較容易，無碳刷與整流子接觸，可完全免除整流不良直流馬達之跳火 (Flash Over) 現象，系統可靠度相對提高，且就同一額定馬力而言，交流馬達較直流馬達為輕，因此可降低車重節省營運成本，另交流馬達應用於電力煞車時，不受整流電壓

之限制，理論上可獨力完成 100% 之煞車功能，無須借助於摩擦煞車。而電力電子元件技術之進步，其耐電壓與耐電流的特性越來越好，切換頻率也越來越高，同時降低高功率交流馬達換流器之成本並提升效能，另微處理機技術之進步，尤其是運算速度提高，使交流馬達許多相當複雜之控制策略得以實現。

(二) 換流器及電力電子開關之相關控制：

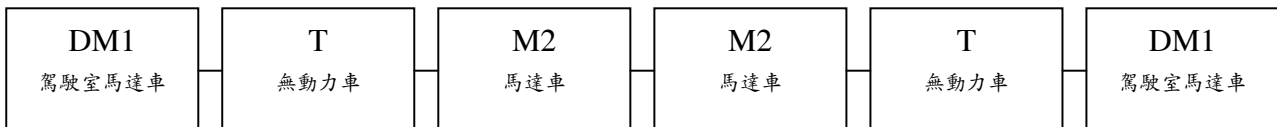


圖 2 高運量電聯車列車編組

高運量電聯車列車編組詳圖 2，DM1 (駕駛室馬達車) 及 M2 (馬達車) 各有兩套各自獨立之變頻變壓 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 換流器 (如圖 3)，每個換流器控制兩個交流馬達，經由換流器內之電力電子開關之高頻切換，可將第三軌提供之 750V 直流電轉換成可變電壓可變頻率之交流電，以供應交流馬達，其電力電子開關為 GTO (Gate Turn-Off) 或 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)。

台北捷運包括中運量 (MCT) 木柵線及高運量 (MRT) 之淡水、新店、南港、中和等各線電聯車，均採用 GTO 為其換流器內之電子電力開關，由於 IGBT 製造技術進步，耐電流、耐電壓的特性越來越好，切換頻率也越來越高，成為電力電子開關穩定性相當高的元件之一，自土城線電聯車開始，包括新莊線、蘆洲線及內湖線電聯車，改採 IGBT 為其電子電力開關，其主要優點包括電路簡化、無緩衝電路之設計、電路短路自我保護功能、能達較高切換頻率、較低噪音、體積小型化重量輕量化…等。



圖 3 變頻變壓換流器

換流器內主要由 6 組電力電子開關構成，輸入三項電源分別由各兩組電力電子開關輪流切換，其控制方式採變頻變壓方式，根據交流電動機運轉特性，從一啟動即會保持定轉矩運轉，低速區可以同時變化電壓與頻率以保持定轉矩運轉，直到電壓增加到其最大值，不能再增加電壓來加速，只能增加其頻率，此時轉矩隨速度、頻率增加而降低，且其輸出功率正比於速度乘以轉矩，所以在高速區，保持電壓變化頻率以定功率運轉。以下即依電源及電力電子開關頻率範圍，分述其控制方式：

1. 低頻低速區：

此區域馬達電源頻率於低頻區，亦為馬達轉速之低速區，馬達低頻轉速易產生運轉脈動及諧波干擾，而克服上述缺失唯有使輸入馬達的交流波形接近理想正弦波，高頻電力電子開關切換頻率即是使換流器輸出接近理想正弦波之方法；越低頻之馬達電源具越長之電源週期，亦即單一電源週期內越可能進行多次之電力電子開關切換，因此，低頻區段之高頻次電力電子開關切換，恰可克服低頻轉速易產生運轉脈動及諧波干擾之缺失。

馬達電壓採 PWM (Pulse Width Modulation) 脈衝寬度調變方式控制，電壓大小即為馬達交流波形之振幅，三相電力電子開關分別在每個週期內做切換，由 PWM 控制其切換

寬度，進而控制其相電壓之脈波寬度，寬度越寬其平均振幅越大，表示其相電壓越大。當馬達轉速隨著馬達電源頻率增加而加速，可經由單一電源週期內逐漸減少之電力電子開關切換次數及控制其相電壓脈波寬度而逐漸增加其馬達電壓，此時轉矩正比於電壓反比於頻率，所以在低速區可以同時變化電壓與頻率以保持定轉矩運轉。

2. 高頻高速區：

此區域馬達電源頻率於高頻區，亦為馬達轉速之高速區。越高頻之馬達電源具越短之電源週期，即單一電源週期內只能進行一次之電力電子開關切換，電力電子開關切換即呈現為方波控制，此時電源波形與理想交流電源正弦波有明顯差距，容易產生低頻運轉脈動及諧波干擾等缺失，惟此控制區段屬高頻高速區，恰可避免易於低頻運轉所產生之缺失。

馬達電壓比照低頻低速區採PWM方式控制，電壓大小即為馬達交流波形之振幅，惟此時由PWM控制其切換寬度固定，馬達電源週期長度相等於電力電子開關切換週期，亦相等於其相電壓之脈波寬度。當馬達自低頻低速加速，頻率漸增週期漸減，馬達同時增加電壓與頻率以保持定轉矩運轉，直至電壓達最大值，從此點開始在每個電源週期內電力電子開關只進行一正一負切換，無法用不同之脈波寬度控制其振幅，振幅固定，即電壓固定，且電壓已達其最大值，在此高速運轉區無法再增加電壓來加速，只有增加頻率以補電壓之不足，頻率增加馬達轉矩降低，馬達功率正比於轉矩及轉速，所以在高頻高速區，保持電壓變化頻率以定功率運轉。

3. 電力電子開關之頻率

電力電子開關之頻率相對馬達頻率之倍數，必為1、3、5、7...等奇數，不可能為偶數，其因在一馬達電源基頻周期中，電力電子開關對其正負半周再加以切換，為使馬達電壓具對稱性，電力電子開關對基頻切換也須具對稱性，如在導通之正半周做 n 次截止脈衝，正半周即有 $n+1$ 次導通脈衝，基於對稱原則，負半周有 n 次導通脈衝， $n+1$ 次通截止脈衝，一周其內導通脈衝等於截止脈衝等於 $N = 2n + 1$ ， N 必為奇數，偶數即會破壞基頻頻率（如圖4）。

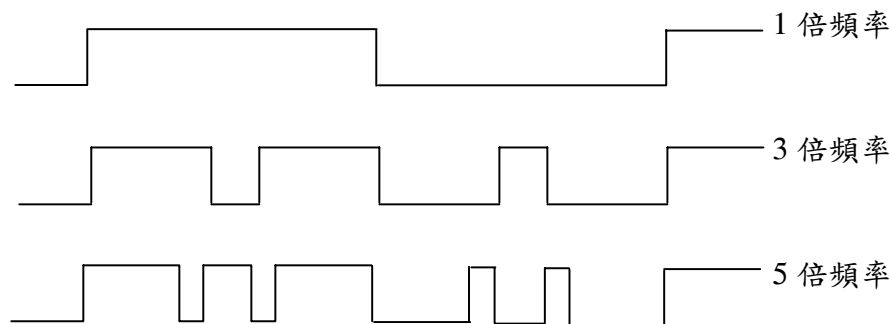


圖 4 電力電子開關切換波形

三、輔助電力系統（Auxiliary Power Supply system）

電聯車輔助電力系統包括靜態換流器、電池充電器、輔助設備箱、電池，主要係供給電源給電聯車上之空調系統、空壓機、推進散熱風扇、照明系統、通訊號誌設備、列車控制系統及所有雜項設備之交、直流電源供應。而輔助電力設備又包含有輸入端的集電靴、輔助開刀開關、車端接線箱、750V DC 插座、380V AC 三相插座、車廂兩端設備櫃內之電機零件（包

括機架、繼電器、可程式化邏輯控制器 (PLC)、控制盤...等)。輔助電力系統是列車上之供電中心 (推進系統電源獨立除外)，將第三軌電力經過適當處理分配後，再輸送到列車上各子系統，提供設備最佳用電狀況及品質，以下將就輔助電力系統中主要設備及其中最重要的靜態換流器之功能需求與設計分析。

(一) 靜態換流器設計需求

為使電聯車電力設備之運轉並適用於軌道環境，靜態換流器設計應滿足下列需求，以達成營運需求：

1. 輸入設備及電壓選取範圍：

現今電聯車集取電力之方式為架空線及第三軌供電，台北捷運路網因絕大部分採地下隧道之型式，為節省開挖段面所以採用第三軌底觸式集取電力 (如圖5)。台北捷運供電系統採用世界上大部分都市所使用的750 伏直流電源供電，而電聯車之輔助高壓設備應能在500至900 VDC之電壓範圍內正常運轉。

2. 輔助閘刀開關 (如圖6)：

為確保電聯車輔助電力維修便利及安全，每節車底裝置一可由車側操作之閘刀開關。閘刀開關在"開路" (Open) 位置時，集電靴到所有車輛子系統的電力均應被切斷，且閘刀開關箱體箱蓋應設計為無法關閉之防愚措施。閘刀開關內之插座設計應與既有機廠之750 VDC滑動式供電系統 (Stinger) 可以相容，以備電聯車在任何維修廠內均可測試輔助電力及推進系統之電源供給，但不得同時對主推進電路及集電靴通電。閘刀開關應位於一個由絕緣材料製成的箱體中，以避免因電線與箱體碰觸而造成重大短路，另可避免於開、關切換之際所產生電弧危險。

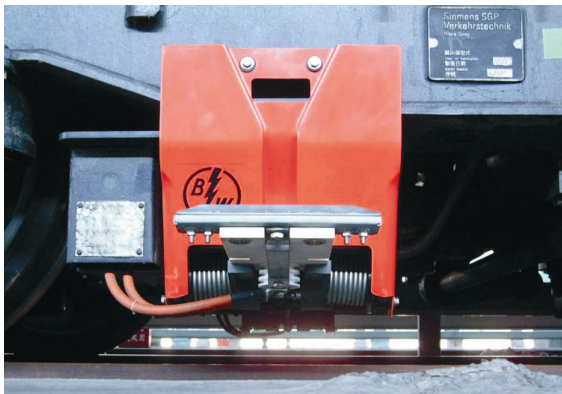


圖 5 底觸式集電靴

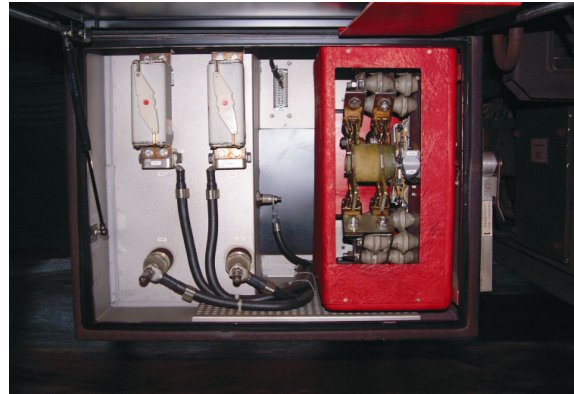


圖 6 輔助閘刀開關

3. 預充電路之設計：

為防止主線上第三軌斷電且斷電達15 sec.以上時，主線上之所有電聯車之輔助電力系統應使用順序啟動或隨機選取之方式啟動，以限制輔助電力系統瞬間啟動電流值，同時有預充之機制亦可防止電流之劇增而達保護之效。

4. 濾波電路之設計：

為預防供電系統動力變電站因任何原因所產生之高壓直流暫態行為，或因動力變電站斷路器因短路造成之跳脫而引起靜態換流器設備損壞，靜態換流器之輸入端需考量設計濾波電路，以消弭第三軌突波的任何影響。

5. 功率半導體 (如圖7)：

換流器應採用電力電子開關IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 或更佳之功率半導體。功率半導體因會產生大量熱反應，故宜安裝在經冷卻設計之接地散熱板 (Heat Sink) 上。若採用液態熱交換式之冷卻設計，則需注意傳熱介質的防漏及密封，且應使用非浸式之半導體冷卻方式。

6. 機廠維修電源插座 (如圖8)：

6.1 配備有靜態換流器之車廂兩側均宜配備一個3相380 VAC電源插座，以連接機廠維修交流電源。因插座配置於車側外緣為避免雨水進入，插座之蓋子應設計為一耐候水密型式。當該蓋掀開時，應有隔離或切斷原靜態換流器供給之電源功能，且該插座額定容量應相當於靜態換流器所提供之電力容量。本插座應與機廠維修電源設施之位置及插頭相容。

6.2 為因應維修需求，於配備有靜態換流器之車廂在其開刀開關之另一側應考量設置一具750 VDC之電源插座，並可經由機廠內滑動式供電系統對該車之靜態換流器供電。此電源插座應考量一個由絕緣材料製成之耐候水密型箱體中。

7. 靜態換流器配電方式：

因每一三車組之輔助電力均依賴靜態換流器供給電源，因此為避免單一靜態換流器故障而影響該三車組完全無輔助電力，故應考量設計為有兩套相同之靜態換流器機組，當任一靜態換流器故障，另一機組可提供部分之電源。靜態換流器可供應電池充電器、空氣壓縮機、推進散熱風扇及空調設備等所需之電力，每車之兩套空調機應分別由不同靜態換流器所提供之交流電源供電。

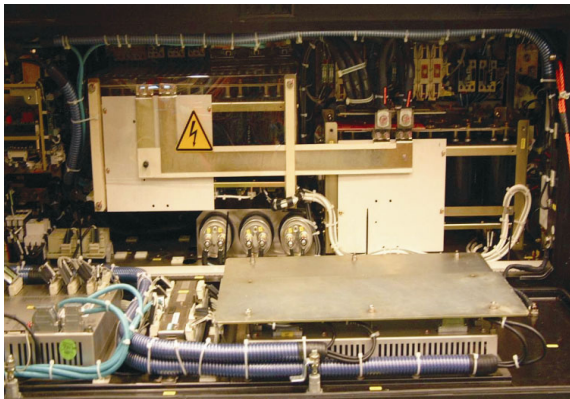


圖 7 換流器功率半導體模組及其周邊電路

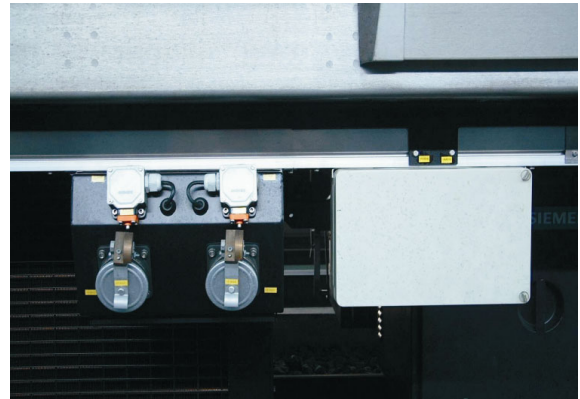


圖 8 380V AC 3 相及 750V DC 插座

8. 電池充電器配電及品質：

8.1 低壓電源係由電池充電器提供，而低壓電源為控制設備首要供電來源，於電聯車上益顯重要，故當提供電池充電器電源之靜態換流器故障時，電路應能自動切換至同一三車組之另一靜態換流器。當其中一組電池充電器故障時，另一組電池充電器應能支援其原有負載。

8.2 既然低壓之電源如此重要，因此對於電池充電器之品質要求也較高，所以設計考量理應在最大環境溫度 55°C 以及線電壓為500-900 VDC條件下，對於電池充電器之輸出電壓值最大偏移量、漣波最大峰對峰值等均應審慎考量，而為達到8.1節之需求，充電器額定容量至少應為三車組所有低壓負載所需容量總和的133%，並可在3小時內將已完全放電之電池充電至80%。充電器且能在額定容量及最大環境溫度下，持續操作8小時且無任何電子元件超過其額定功率或額定電流的80%，亦無變壓器或電感器超過其額定電流

的90%，其相關設計之計算書及測試應加以驗證。

9. 靜態換流器性能：

靜態換流器為輔助電力供應源頭（如圖9），對於第三軌直流高壓之變化應有足夠的能力因應，因此特別規範輸出輸入電壓的範圍而靜態換流器應具備有至少的功能。

9.1 在輸入電壓600-800 VDC任何電壓下，靜態換流器滿載之效率至少應有92%。

9.2 在輸入電壓500-900（含）VDC時，靜態換流器應能連續滿載運轉。

9.3 在輸入電壓為500-950 VDC時，靜態換流器在任何負載（含滿載）應能正常操作；但當持續輸入電壓900-950 VDC時，靜態換流器輸出額定值應可線性遞減，在持續輸入電壓950 VDC及最大環境溫度55°C下，靜態換流器每10 min.應能滿載運轉1 min.。

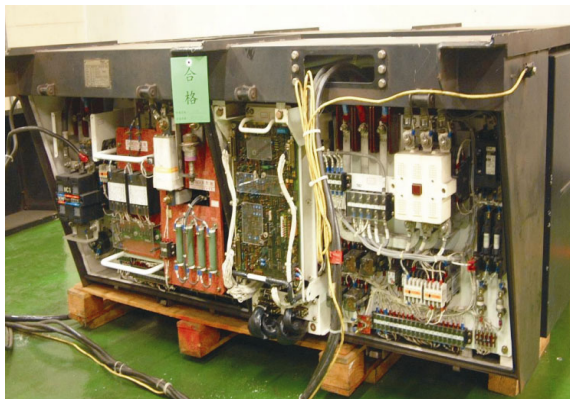


圖 9 檢修完成之靜態換流器

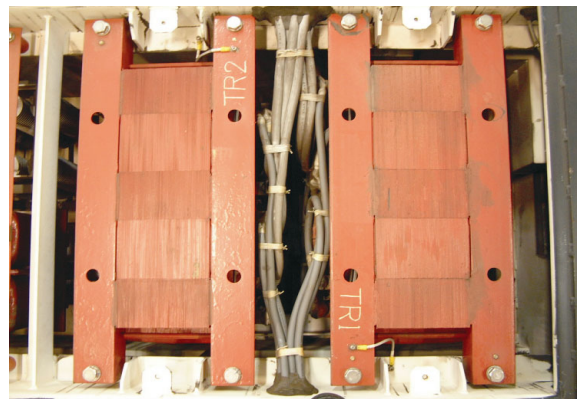


圖 10 隔離變壓器

9.4 每個靜態換流器之輸出電壓應進行穩壓，使輸入之電機設備能有較優之電源品質，因此交流輸出電壓需維持在下述限值內：

電壓：380 VAC \pm 6%及 110 VAC \pm 6%

頻率：兩種電壓均為 60 Hz \pm 1.5%

9.5 為避免靜態換流器輸出之交流電壓，出現高壓直流成分造成設備的損壞，因此應考量在隔離變壓器（如圖10）繞組間裝置接地屏障安全保護裝置，如遇有變壓器線圈短路等現象將可由接地系統將故障電流引導排出。

(二) 靜態換流器具備之功能

1. 輸入濾波器：

輸入濾波器由電感線圈、電容器、電阻器、開流體及控制單元所組成其功能敘述如下：

1.1 為輸入後之後續組件做電壓限制及部分穩壓動作。

1.2 可抑制瞬間切換之換流器線電壓所產生之巨大突波。

1.3 出現極大或持久之線電壓突波時可切斷換流器。

1.4 換流器有遮蔽設計以抵抗線上低頻率干擾電流。

1.5 抑制線上換流器之相位延遲。

1.6 限制換流器之啟動電流。

1.7 保護換流器以抵抗極性逆向。

2. 電壓保護限制：

利用電路模組化之設計配合二極體、閘流體及電阻器之組合，係為保護下一級之組合電路做輸入電壓限制作準備。

3. 啓動電流限制及電極逆向保護：

3.1 為避免輸入大電壓大電流之衝擊，在設計上將考慮使用預充電壓濾波電容器，如此則可避免過大之啓動電流。當輸入線電壓時，充電電流經由所設計之電容器及電阻器因而受到限制。

3.2 電路上之閘流體同時充當極性逆向保護作用，於預充電路狀態下，二極體即為逆向保護作用。當發生主線路短路時，輸入濾波電容器為免於放電過於快速，並經由旁路電阻器放電。

4. 12脈衝閘門電路斷開換流器：

12脈衝換流器係以兩組三相脈波頻寬調變控制PWM (Pulse Width Modulation) 的功率半導體所組成，以逐一相位方式導通，兩組三相換流器各相相差 30° 相角，並將濾波後之輸入交流電壓切換至變壓器之主繞組上，於低切換頻率時 (大約120HZ)，可產生十分良好之正弦波輸出電壓，其優點有下列數點：

4.1 低切換損失少、效率高。

4.2 輸出電壓波形接近正弦波形。

4.3 功率半導體之模組化構造。

4.4 短路保護與過電流負載保護。

4.5 低失真。

5. 交流穩壓板：

交流穩壓板之AC/DC現多以微處理化控制，用以監測功率半導體 (換流器) 輸出之交流電壓。此一調控電路由穩壓板與換流器之間許多模組所組成。

5.1 穩壓板持續收到換流器模組之真值報告，此一真值報告將與設定值比較，其比較結果將影響換流器的操作狀況，而使其有更正確之穩定電壓功能。

5.2 若有設定電壓範圍外的偏差，穩壓板立即反應並啓動緊急操作功能，例如關閉換流器 (以避免造成重大損害) 等。

6. 主變壓器 (隔離變壓器)：

為避免在次級繞組上 (380V或110V) 交流電路中出現高壓直流成份，故變壓器的初級繞組與次級繞組在設計上係分開處理，中間以空氣作適度之間隔，且變壓器的鐵心接地，因此即使繞組絕緣被破壞，初級繞組的直流電壓亦不會出現在交流側。

7. 三相380V交流濾波穩壓器：

由變壓器輸出之類似正弦波型之三相380V交流電，其中含有若干諧波，此諧波來自各個方波的疊加，因此需要交流濾波器以降低交流電中之諧波。

8. 三相交流變壓器 (如圖11)：

由濾波後之三相交流電壓380V，抽出兩相經變壓降壓後產生一單相110V/60HZ電壓。

9. 整流器模組 (如圖12)：

兩組電池充電器連接於主變壓器之後，其包含有閘流體、電容器、電阻器...等，設計為模組化，不但易於維修、更換快速，而且體積小，在整體設計上形成一整流器模組。現將整流器模組分析如下：

9.1 內有一直流穩壓板，除決定某一閘流體何時要被觸發外，同時兩組輸出的直流電壓將回饋於直流穩壓板上，使輸出之真實電壓值與設定值（例如直流電壓110V）作一比對，若真實電壓值在設定值範圍內，則將調整閘流體驅動瞬間變化以接近輸出設定電壓值，如此周而復始。

9.2 直流穩壓板上所偵測的真實電壓值在設定值範圍外時，將立即關閉閘流體之驅動，並將此偏離誤差值傳送於顯示板並加以儲存，以備維修判讀使用。

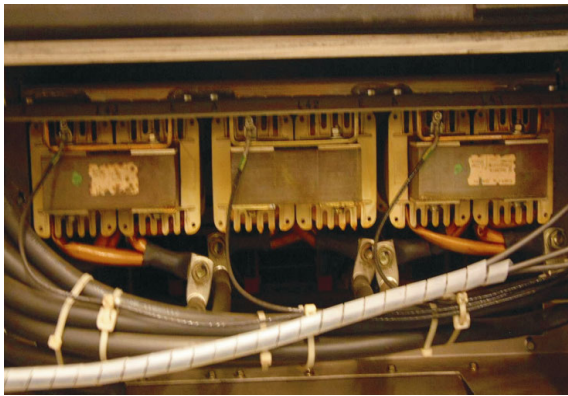


圖 11 三相交流變壓器

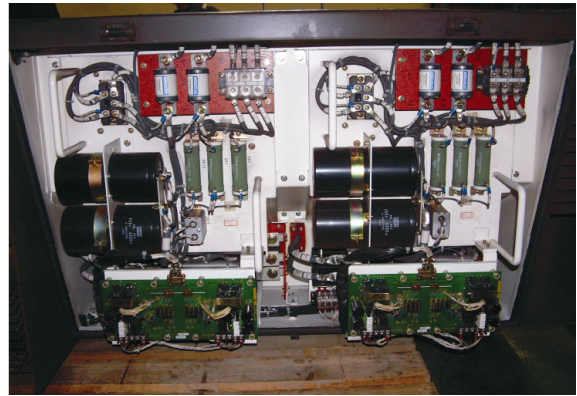


圖 12 整流器模組電路板

四、照明系統 (Lighting System)

近年來，隨著電力電子技術應用於照明領域，照明需求不在侷限於以往「亮不亮」之狹隘認定，而係提昇到「品質」、「省電」、「環保」、「美觀」等之要求，尤其在國外，主要先進國家均將車輛燈具定位為重要安全裝置，燈具產生之光度分配，除須滿足基本照明、指示、標識及警示等功能外，尚須通過一連串之環境測試及認證，以確保其符合實務需要。

台北捷運高運量電聯車之照明系統，依其配置、特性可概分為車內照明及車外照明兩部份。基本上，在進行電聯車之照明系統規設時，除須考量車燈（含燈具）應滿足：配光性能、燈光色度、裝配位置（如離地或月台之高度、視覺性等）、機械性能及環境條件外，並應符合下列諸項基本規設要求：

- 須符合在車輛靜、動態包絡線範圍內之要求。
- 須能適用於軌道環境，並具有防鬆脫、抗震之設計。
- 須符合安全、高效率、舒適、省電等之需求。
- 須與車廂內裝及車輛外觀取得協調性。
- 須為已商業化之產品，以利後續維修之備品來源無虞。
- 須有適當之防護措施，以使光源或燈具不易受到外在因素受損。
- 須有足夠的照度及適當的色溫與演色性。
- 須考慮維修與換裝之簡便性，而且不需使用特殊工具。

- 須具有緊急照明功能及電磁干擾防護之設計。
- 須適用車輛輔助電力系統之低壓供電方式。

(一) 車內照明

電聯車之車內照明，依列車之乘客區及駕駛區可概分為車廂照明及駕駛室照明兩部份。

照明設計的意義就在如何有效控制光線，使光線能夠發揮最大效果，並達到實質、經濟之照明目的。一般而言，車廂照明依燈具之配光可概分為：直接照明、半直接照明、全漫射照明、半間接照明、間接照明等類，而此五類照明燈具，不管係用於全般照明或局部照明，其效果當然不同，故如何按實際需求適當地考量其配光方式及選用燈具（含其光源之相互間隔及燈具構件，如反射材料、...等）是非常重要的。當然空間使用性質不同，對照明之訴求重點及設計方式當然也不同，以台北捷運高運量電聯車之車內照明為例，於規設時須兼納下列諸項考量：

- 燈具之設計型式應考量車廂天花板之最低淨高需求，並兼顧整體內裝之美學需求。
- 車廂照度需求應符合交通部 87 年 9 月所頒布「捷運規道車輛技術標準規範」之規定，車廂地板上方 1,000 mm 處之平均照度須達 250 lx. 以上，最小照度值不得低於 200 lx.，故於規設時除應考量照度之均勻性、舒適性外，另應兼顧乘客進出車廂時與車站月臺間之照度漸變性。
- 車廂內之每一乘客進出之車廂門通道區（Door Vestibule）應配置一兼具緊急照明功能之嵌入式照明燈具，以利緊急狀況之需。
- 臺北捷運高運量電聯車之車廂照明燈源係規範採日光燈燈管，故於進行照明設計時應特別留意安定器與燈管間之相互匹配關係，因其若匹配不當不僅將無法正常點燈，甚至會燒壞燈管或安定器，因安定器是一種用於放電燈管之點燈裝置，其主要功用是在提供一高壓以啟動點亮燈管，然後再提供燈管穩定的工作電流，目前傳統式安定器已漸由電子式安定器取代，電子式安定器不但能瞬間點亮不閃爍，且其工作效率高，可達節能之目的。
- 基於經濟性、互換性、市場來源及簡化備品整備等之考量，車廂照明燈源建議應採用長壽命型、規格相同之燈源，而燈源色溫度之選擇應含納內裝材料、顏色、配置等考量，以達溫馨之效。
- 另外照明品質之優劣與否，眩光亦是其評定指標之一，但常常被忽略，通常眩光的產生與燈具及車廂內裝材質有關，而不均勻的照度也是產生間接眩光原因之一，因此，燈具設計要有適當之遮光角，車廂之內裝材質不宜採用太光滑面之材質，以免造成反光情形。
- 駕駛室照明基於駕駛員操作操控台及列車兩端逃生之必要照明等之考量，駕駛室內應有一盞具有聚焦功能之閱讀燈及一具兼具有緊急照明功能之嵌入式燈具之配置。
- 閱讀燈之照度需求應符合交通部 87 年 9 月所頒布「捷運規道車輛技術標準規範」之規定，於駕駛位置之操控台上方處之閱讀面上應有 450 lx. 以上之照度要求。
- 為利緊急狀況疏散旅客之需，當非駕駛員所在（Non-occupied）端之駕駛室/車廂隔門被開啓時，該端駕駛室內之日光燈應具有自動亮啓功能之設計。

(二) 車外照明

所有車外照明設計及燈具之選用應充分考量防蝕、抗候性，不需使用特殊工具可自車外更換燈源、防水性及免於受到車輛清洗設備的損壞，且其外緣應在車輛靜、動態包絡線之範

圍內。除頭燈之燈源類型、規格應依實際需求評估選定外，車外照明之燈源建議採用長壽命型多個高亮度LED組成，以提高可靠度。車外照明應至少包括但不限於頭燈、尾燈、標識燈、呼叫/故障指示燈、門開指示燈、閃光燈及調車燈等，其基本規設考量：

- 基於照亮列車前方之軌道之需，頭燈應足夠之亮度及投射距離，以利行車安全，故頭燈之燈源類型、規格應依實際需求妥予評估選定，頭燈燈具應具有光束角度之調整裝置 (Aiming Devices)，該裝置應可調整頭燈光束方向 (含垂直、水平)，頭燈並應可經由駕駛室控制台之開關控制燈光之強、弱亮度。
- 為利於分辨列車行駛方向，駕駛室外部前端應配置二具紅色尾燈。
- 駕駛室外部前端、車頂附近應配置二具琥珀色標識燈，其亮度應可在日照下 150 m 處仍可看見。
- 駕駛室兩側靠近車頂附近應各配置一具呼叫/故障指示燈，以利車外運務人員瞭解列車之基本運行狀況，其亮度應可在日照下 150 m 處仍可看見，臺北捷運電聯車係以下列三種顏色來指示列車之操控狀態：

藍色：表示客用對講機使用中/無線電通信中。

琥珀色：表示列車摩擦煞車中。

紅色：表示自動列車保護 (Automatic Train Protection, ATP) 手動模式操作中。

- 每節車廂兩側中間處應各配置一具紅色門開指示燈，該指示燈之顯示狀態應與車廂門之開、關控制同步。當任一車廂門未完全關閉時，該節車廂之門開指示燈應保持亮啓，門開指示燈之型式及其亮度，在日照環境下於列車頭、尾之任一端駕駛室門旁，應可清楚看見全列車各車門開指示燈之狀態。
- 為利緊急狀況之警示照明之需，駕駛室外部前端靠近車頂之中央位置 (位於兩標識燈中間) 應配置一具紅色閃光燈，駕駛室內應有一閃光燈開關之設置，以利緊急狀況之操作；當列車任何一端駕駛室開啓閃光燈時，其頭、尾兩端之閃光燈均應同時亮燈，並呈一明一暗閃爍。閃光燈開關應有護蓋裝置，且平時應予鉛封以防誤觸。
- 為利於列車解聯為三車組時，得以分辨車輛行駛方向，M2 車 No.2 端外部下緣處應配置紅色及白色調車燈各乙具，當以三車組運行並由 M2 車操控時，白色調車燈應亮啓；如由 DM1 車操控時，則紅色調車燈應亮啓。

(三) 照明電路與控制

以臺北捷運高運量電聯車之設計考量為例，電聯車駕駛室內裝置可經由列車線控制全列車車廂照明之開關，車廂照明電路係以三迴路方式設計，其中一迴路應兼具平時及緊急照明之用 (詳如圖13)，當發生緊急狀況時，應保持車廂照明1/3數量之緊急照明開啓，其餘照明自動關閉之延遲時間應具可0~60秒調整設定之功能，而車外照明仍應維持正常亮啓狀態。在操控上，當輔助電力按鍵為“開啓”狀態時，列車兩端之尾燈及標識燈均應亮啓；當於列車頭、尾任一端駕駛室控制台啓動主鑰匙時，該端尾燈應關閉，頭燈及控制台儀表燈應開啓，M2車No.2端之調車燈應保持“關閉”。為使列車得以其尾端駕駛室進行緊急疏散，駕駛室之開關面板上應有一頭燈旁通開關，俾將列車尾端的頭燈開啓、尾燈關閉，而該旁通開關應有護蓋裝置，且平時應予鉛封以防誤觸。

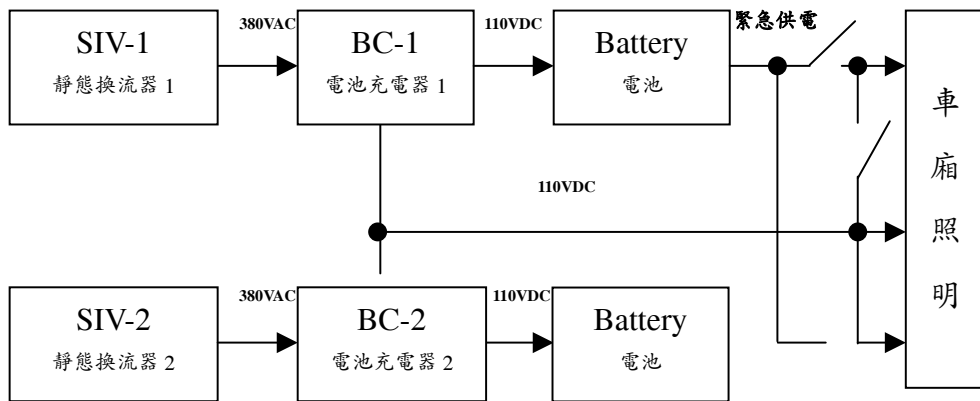


圖 13 車廂照明電路示意圖

隨著資訊時代的來臨，照明之電路設計與控制方式已經不同於以往觀念，照明管理系統已逐漸成為目前之設計主流。一般傳統式之照明電路與控制，大多以主電路與控制電路串聯在一起，所以當需由二處控制同一照明電路時，即需三條控制線，控制開關愈多，則控制線愈複雜，施工困難且維修不易。目前新式之照明電路與控制，則將主電路與控制電路完全分離，全部之照明設備可經由一控制器透過二條信號線，連結所有的控制元件及開關，分區或集中控制所屬的照明設備。

好的照明設計，所呈現出之照明品質，可令親臨其境者感受到明亮、溫馨、親切，甚或可襯托出電聯車之整體質感及提昇捷運形象。隨著光源之新技術的不斷開發，以及照明管理系統之新觀念的導入，電聯車之照明設計不再僅是考量實用及美學之需要，並應兼顧「節能、輕量」之需求。

五、列車控制 (Train Control)

列車控制為列車運轉時，能否提供旅客安全、舒適、便捷服務之關鍵。列車控制除了道旁號誌系統對電聯車推進系統與煞車系統之控制外，尚包括列車本身對各車廂機電子系統設備如輔助電力系統之輔助設備控制、空調系統、車門系統、照明系統、列車監控資訊顯示系統 TSIS (Train Supervision Information System) . . . 等等之控制。為達到高可靠度與低壽年成本和減少人機界面，很多捷運、鐵路公司於車上安裝列車監控資訊系統來監控所有子系統設備。列車控制線，因應數位通訊網路之進步，利用串列式列車數據通訊網路 (Serial Train Line and Data Communication Network) 與受監控之子系統及設備進行監控資訊交換與數據通訊來監控所有子系統設備之狀況。以下即針對「電聯車控制系統」及其各子系統作功能介紹與設計分析。

(一) 推進/煞車系統

煞車系統可分為正常煞車與緊急煞車兩種，這兩套系統之控制迴路在功能上應互相獨立設計，中運量/高運量之推進系統提供實際電力煞車力相對於總煞車力需求，俾由摩擦煞車系統補足總煞車力需求與實際電力煞車力間之差值。

正常煞車時，摩擦煞車系統應能平穩地與電力煞車混合。

緊急煞車完全使用摩擦煞車，該控制迴路是採用"激磁-釋放"(Energize - to - Release為Fail

to Safe) 原理，亦即該迴路失磁時，由緊急煞車來作用。此控制迴路串聯駕駛員失能裝置 (Deadman Control) 及各車氣動煞車系統之低壓保護開關 (Low Air Pressure Governors) 等接點。各車之緊急煞車閘由此迴路控制，並同時與牽引設備之電驛聯鎖，以避免緊急煞車時推進系統仍有動力。

推進及煞車控制系統具有每根車軸之偵測輪/軌界面上的空轉/打滑，並調節牽引力/煞車力直至修正完成。緊急煞車時，因安全考量空轉/打滑修正功能不得列入設計範圍。

煞車打滑修正時間不得超過 5 sec.，若車輪打滑無法於 5 sec. 內修正，則以所需之煞車力完全作用至煞車完成。空轉/打滑修正完成後，牽引力應再受到急衝度的限制。空轉/打滑修正系統對於推進空轉之修正效率不得低於 45%，對於煞車打滑之修正效率不得低於 85%。空轉/打滑功能故障時，牽引系統依所需之推進或煞車力作用。

(二) 輔助設備控制

輔助電力系統之測試運轉為發車前之準備項目之一，因中運量系統為無人駕駛，電聯車營運出發前之準備由行控中心於遙控處理。高運量系統電聯車營運出發前之準備由司機員親自上車測試各次系統之設備正常運轉後才能發車營運。

輔助電力系統於列車控制上之設計應注意下列事項：

1. 任一駕駛室所"啓動"之全列車輔助設備，應能由任一駕駛室內以單一動作加以"關閉"。輔助系統之"啓動"應包含：
 - (1) 無線電及ATO設備。
 - (2) 所有其他輔助設備。承包商應考慮採用依序啓動或其他方式，以限制啓動峰值電流。除了空調設備應有冷媒回收所需之延遲電路外，所有其他輔助設備應在"關閉"後立即切斷電源。
 - (3) 卸載及復載：輸出感應裝置應能偵測任何原因所造成之低壓直流電壓停止輸出。該裝置應量測停止之持續時間，當時間持續 10-12 sec. 時，除緊急照明外之其他車內照明應自動切離。當時間持續 40-50 sec. 時，除規定之緊急負載外，其他電力子系統設備亦應自動切離。另一方面，此感應裝置亦應能偵測電壓之恢復輸出，當恢復時間持續 1 sec. 時，原先切離之各項負載要能自動重新連接。
2. 緊急負載 (下列之低壓負載屬於緊急負載，因此不得被卸載電驛 (Load Shedding Relay) 自動切離)：
 - (1) 煞車控制。
 - (2) 車廂廣播/乘客對講機/無線電/駕駛室間電話。
 - (3) 車外照明 (頭燈、尾燈、呼叫/故障指示燈、標識燈、閃光燈、門開指示燈)。
 - (4) 車內緊急照明 (含駕駛室照明)。
 - (5) 車門控制及門鈴。
 - (6) 推進控制。
 - (7) 空調控制。
 - (8) 通風扇。

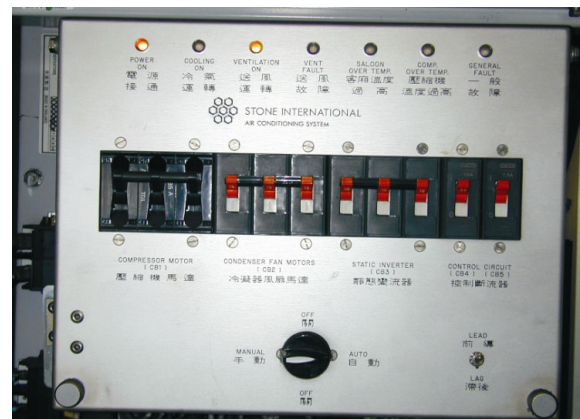


圖 14 空調系統控制盤

(9) ATC設備 (ATP/ATO/ATS)。

(10)故障監測面板。

(11)列車監控資訊系統。

(三) 空調系統

正常營運下、每車之兩套空調機是由不同靜態換流器所提供之交流電源供電。在任一駕駛室內以單一動作"關閉"輔助系統時，除了空調設備應有冷媒回收所需之延遲電路外，所有其他輔助設備應在"關閉"後立即切斷電源。空調系統應有一單獨關閉開關，當關閉時不會影響其他設備之正常運轉。

有關空調系統列車線電路係當駕駛員在駕駛室內啟動輔助電力開關後，列車線應操作各車之空調控制電驛。當電驛定位 (Set) 後，各車之空調及通風設備應開始運轉。駕駛室內設置一空調隔離開關，以切斷全列車之空調系統。

另有關本車控制為每套空調系統應有其專屬之本車控制盤 (Local Control Panel)，且應裝設於其所在端之設備櫃內 (除 DM1 車外)。控制盤上應至少配備，具"自動"、"手動"及"關閉"等功能之選擇開關、控制冷媒壓縮機/冷凝器風扇及蒸發器通風扇等馬達斷路器之電驛以及故障指示燈等 (詳圖 14 空調系統控制盤)。空調系統通電後，壓縮機、冷凝器風扇及蒸發器通風扇應開始運轉。空調系統關閉時，應在壓縮機停機之前，先將冷媒打入 (Pump Down) 集液器內。每車之兩套空調系統應分別由不同之輔助電源供電。

每車之空調系統應依序啟動，以降低輔助電源之瞬間電流。當冷凝器環境溫度 (Ambient Temperature) 低於 46°C 時，空調系統應能全額 (100% Capacity) 運轉；46°C (含) 以上時，則應至少維持半額 (50% Capacity) 運轉；超過 56°C (含) 時，空調系統應能自動停止運轉。當環境溫度降低時，則應具備自動重置 (Automatic Reset) 之功能。用以控制冷媒壓縮機及冷凝器風扇之冷媒低壓開關，應具自動重置功能，而其高壓開關則應以手動方式重置。列車於第三軌斷電後復電或於通過第三軌非橋接間隙 (Non-bridgeable Gap) 時，空調系統應能自動重置並依序啟動。

冷媒壓縮機馬達應有過熱保護裝置及相關偵測功能，以確保其在下列各項異常狀態發生時能自動切離並停止運轉：

兩相操作。

交流電壓過低。

過載。

每車設備櫃內之空調控制盤應至少包含下列故障指示燈：

壓縮機過熱跳脫。

通風扇故障。

車廂溫度過高 (上升至 33°C 或更高)。每個回風口處應有溫度感應器。

(四) 車門系統

駕駛室內之兩側各有其專屬之車門控制開關，以控制列車該側之車廂門。當主控鑰匙開啓時，車廂門操作迴路即處於"可作動" (Active) 狀態。當主控鑰匙從開至關時，車門應能保持在原來的狀態。列車有一聯鎖迴路以偵測全列車所有車廂門之各門扇、前後緊急逃生門以及所有駕駛室側門的狀態。該聯鎖迴路能觸發車門控制盤上的"車門開啓"指示燈，且若有任何車門 (包括駕駛室側門、緊急逃生門) 開啓或沒有關妥時，停止之列車不得起動，

行駛中之列車則立即自動啓動緊急煞車；列車在機廠手動模式時，不受到該聯鎖功能之限制。

列車每側車廂門皆有獨立的操作迴路及致能控制線 (Door Enable)，當車門在關閉位置時，兩種控制線皆切離。車廂門之開門/關門時間可在 1.5 至 4.0 sec. 間調整。每組車廂門均有多重音符門鈴 (Multi-note Door Chime)，門鈴在開門時及關門前一段時間將分別以不同音調響起，並在車門開啓/關閉定位後停止。

車廂門具備障礙偵測及自動重開/關功能，並能偵測出兩門扇之間直徑 20 mm 之圓棒或 10 mm 厚、75 mm 高之物體。當關門途中偵測到障礙物時，受影響之車門應能自動切換成開門動作，並在接到車門重關訊號後再次關閉，其車門重關週期可在 2 sec. 至 6 sec. 間調整，且受影響之車門能一再重複此開/關循環直到障礙物清除為止。

(五) 照明系統

每節車廂之車內照明電路應以低壓直流供電之三迴路方式設計，相關細節詳見本文「四、照明系統」。

(六) 列車監控資訊顯示系統

安全是軌道運輸之最大的特色，但在安全之外，亦應兼顧可靠、適舒、便捷與便宜，否則旅客仍不會完全利用。現代化電子時代即是隨時把握時機、爭取效率，真正要達到這個目標需要嚴密、完整、確實的系統監控。

自動化列車監控設備，其全名為「智慧型電聯車即時故障顯示及行車狀態資訊系統」，一般軌道運輸界簡稱為「列車監控資訊顯示系統」。現代化的捷運列車安裝該即時顯示系統是一種必然的趨勢。以往，設備的維修是在設備故障時才作修理或定期維護，現在若採用此系統即可在設備呈不穩定狀態時，即可先作預防維修事宜，且即時巡迴偵測所有偵測點，可在第一時間使駕駛員或行控中心瞭解列車即時狀態，以節省故障排除時間並確保旅客與行車安全。

列車監控資訊顯示系統係採用先進技術，利用中央微處理機、軟體、資料傳輸控制和區域控制單元，以監視所有子系統 (包括車載號誌設備、車門、煞車、推進系統等)。列車兩端駕駛室內，均設有列車監控資訊顯示系統，並借由獨立之遮蔽電纜、光纖或電線傳輸列車同步控制訊號。列車監控資訊顯示系統應具故障即時顯示功能，且列車前後兩端之列車監控資訊顯示系統應能相互備援 (Backup & Supporting)，不得因任一端列車監控資訊顯示系統 (TSIS) 故障而影響系統對全列車之正常監控紀錄。

五、結語

電聯車主要電力系統為提供其聯結編組運行之原動力，輔助電力系統則提供動力以外其他電氣設備之電力來源，照明系統為乘客滿意度之重要指標，列車控制則為串列全列車控制之神經系統。隨著科技之進步，電聯車電氣系統也隨之提昇與更新，包括電力電子開關之型式、照明安定器與燈管之型式、列車控制網路系統等。進步且新穎之電聯車電氣系統，配合電聯車各機械結構子系統，提供民眾一個安全、舒適且又便捷之「行」的服務。

參考文獻

1. 新莊線/蘆洲支線/南港東延段/新店線小碧潭站/捷運公司 24 列電聯車特別技術規範，臺北市政府捷運工程局，民國九十三年三月。
2. 捷運軌道車輛技術標準規範，交通部，民國九十三年五月。
3. 台北都會區捷運系統工程研討會論文集，臺北市政府捷運工程局，民國八十二年。
4. 捷運技術期刊，臺北市政府捷運工程局，民國九十一年。
5. 捷運常用詞彙，臺北市政府捷運工程局，民國八十年。