



高運量電聯車用電量與直流 開關盤保護關係量測分析

Analysis of the EMU Power Consumption and DC Switchgears Protection

陳彥旭 Yen-hsn Chen¹ | 劉智超 Chih-chao Liu²

¹ 臺北捷運公司系統處供電廠副工程師 e01666@trtc.com.tw

² 臺北捷運公司系統處供電廠工程師 e23724@trtc.com.tw



摘要

臺北捷運公司自2007年起引進新購高運量電聯車陸續加入營運，以縮短高運量各路線班距，最小班距由3分30秒縮短為3分鐘，在板南線尖峰班距更縮短至2分15秒，惟新購電聯車陸續加入營運後，與系統磨合期間使得提供牽引動力用電開關盤發生跳脫之件數亦隨之增加，本文描述如何量測各型列車於主線運行之加速、減速、定速及停靠月臺等模式之用電狀況，並試著理出列車行進時用電情形與直流開關盤跳脫保護之設定值，後針對負載用電過高及易發生不明原因跳脫區段加以改善，以期減低直流開關盤不明原因跳脫機率。

關鍵字：不明原因跳脫、電力負載、動態負載

Abstract

In order to shorten the headway of the Taipei MRT System, the Taipei Rapid Transit Corporation (TRTC) has increased the number trains for serving passengers since 2007. The minimum headway was reduced from 3 min 30 sec to 3 min during rush hour, and even down to 2 min 15 sec on the blue line. However, the incidence of abnormal trip of traction power supply circuit breakers were increased consequently. This article describes how we measured the dynamic loading of different train modes and figured out the connection between power flow and train movement. After this investigation, we coordinated the protection and solved the abnormal power failure event.

Keywords : Abnormal Trip, Power Flow, Dynamic Loading

研究背景

為提昇服務水準，臺北捷運公司自2007年起將新購高運量電聯車陸續加入營運，除縮短高運量各路線尖峰時段班距，並延長下午尖峰時段由原17:00至19:00延長為19:30。

淡水、新店、中和線平均班距由原7分鐘縮短為6分鐘，北投站至古亭站重疊路段，亦由原3分30秒縮短為3分鐘。另為加強疏運旅客，中和線另加發加班車至北投站，使南勢角站至北投站間尖峰最密班距縮短至4分40秒。

板橋、南港、土城線：「亞東醫院站至南港展覽館站」區間平均班距由3分30秒縮短為3分鐘，另為加強疏運臺北車站轉乘人潮，加發加班車疏運旅客，因此上午最密班距縮短至2分15秒。

惟新購高運量電聯車陸續加入營運後，造成電聯車用電之直流開關盤發生不明原因跳脫之件數亦隨之增加。有鑑於此，有必要建立各類型電聯車之實際用電背景基礎資料並檢討直流系統的各級過電流保護是否恰當，故規劃進行量測各車型列車於主線運行之用電電流狀況並研究直流開關盤跳脫保護：電流上升率（ di/dt ）及過電流（IDS）保護作動之設定，以釐清直流開關盤不明原因跳脫。

電聯車用電量測方式

電聯車用電量測規劃

電聯車為一移動性之負載設備，其運轉電流、電壓會隨列車加速、恆速、減速、停靠月臺等模式及位置不同而產生劇烈變化，配合目前高運量營運區段4種車型電聯車分別運行於淡新中線及板南土城線，供電系統則有Siemens及Secheron 2種廠牌的直流開關盤，故本量測依不同型式直流開關盤與不同型式列車區分為2階段進行：

第1階段：淡新中線371及301型列車用電量測。【註1】

第2階段：板南土城線341型及321型列車用電量測。

量測地點

因測試供電區間須考慮2站動力變電站（TSS）供電範圍涵蓋車站月臺，以便完整量測列車動態用電，故選擇新店線景美站（G05）~七張站（G03）（如圖1-1），及板南線忠孝敦化站（BL11）~臺北車站（BL07）站為測試區段（如圖1-2）。

量測目的

由測試取得：直流盤電流、電壓量、電聯車行車速率、號誌電腦軌道佔據等資料，進而評估：

- 一、各種電聯車啟動、加速、定速、減速及停靠月臺怠速用電量。
- 二、供電區間內兩端動力變電站共同供給前項電聯車負載時，負載率變化情形。

量測模式

模式1：以單一直流盤供電，量測1部電聯車行駛總用電量。

目的：各種電聯車用電量。

方法：各型式電聯車於單一供電區間運行，量測單一直流盤電流、電壓。

模式2：以單一直流盤供電，量測2部電聯車同時啟動用電量。

目的：各種電聯車用電量分析瞬間過電流設定值（IDS）。驗證直流斷路器過電流保護之精確度。

方法：各型式電聯車2部以最短間距運轉量測單一直流盤電流、電壓。

模式3：由兩直流盤併聯供電，量測一部電聯車用電量。

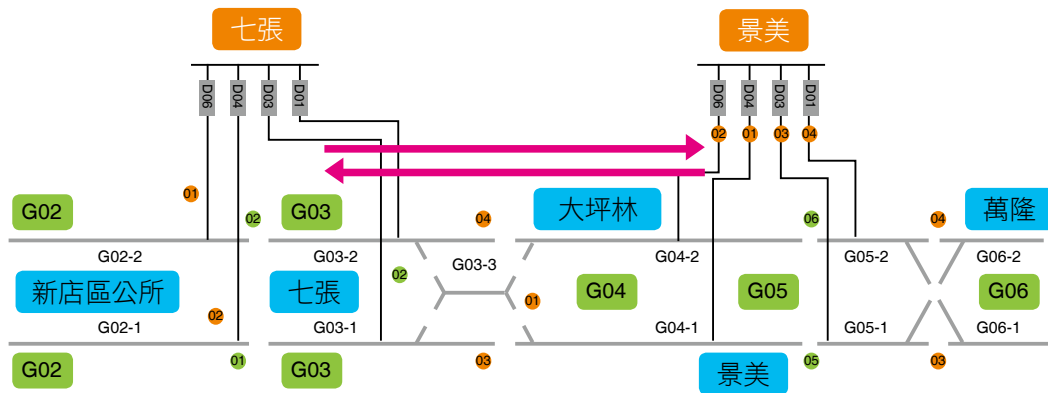
目的：正常營運模式下，列車行進時，該供電區段內2直流盤負載電流分佈狀況。

方法：各型式電聯車於單一供電區間運行，量測2直流盤電流、電壓。

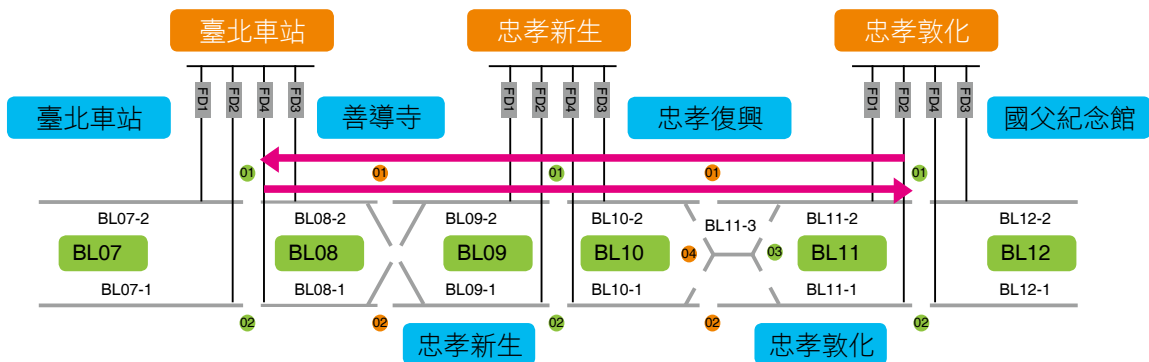
模式4：由兩直流盤併聯供電，量測2部電聯車同時啟動用電量。

目的：正常供電模式下2部電聯車負載電流分佈狀況，驗證班距對電流變化以求最大裕度。

方法：各型式電聯車以正常間距、尖峰間距、最小間距量測直流盤電流、電壓。



▲圖1-1 量測地點示意圖



▲圖1-2 量測地點示意圖

各模式實車量測結果

電聯車運轉用電量測試

依第二章所擬定之4種測試模式，分別於淡新中線及板南土城線進行實車測試。

淡新中線測試模式:景美站 (G05) -直流開關盤D06盤投入供一部電聯車 (371型、301型) 用電，列車依速度碼自景美站 (G05) 下行行駛至七張站 (G03)。

板南土城線測試模式:忠孝敦化站 (BL11) -直流開關盤FD1盤投入供一部電聯車 (341型、321型) 用電，列車依速度碼自忠孝敦化站 (BL11) 下行行駛至忠孝新生站 (BL09)。

模式1測試結果

371型電聯車 (如圖2)

- 一、由0加速至65km時，最大電流發生於65Km時電流值為6,958A。
- 二、由65加速至80km時，最大電流發生於80Km時電流值為7,089A。
- 三、列車停車怠速時電流值平均約62A。

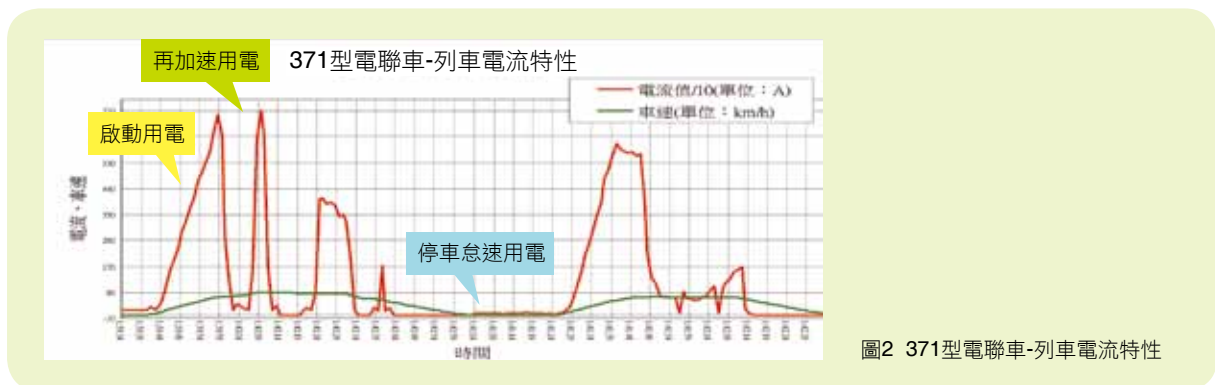


圖2 371型電聯車-列車電流特性

301型電聯車 (如圖3)

- 一、由0加速至65km時，最大電流發生於65Km時電流值為6,181A。
- 二、由65加速至80km時，最大電流發生於79Km時電流值為4,995A。
- 三、列車停車怠速時電流值平均約192A。

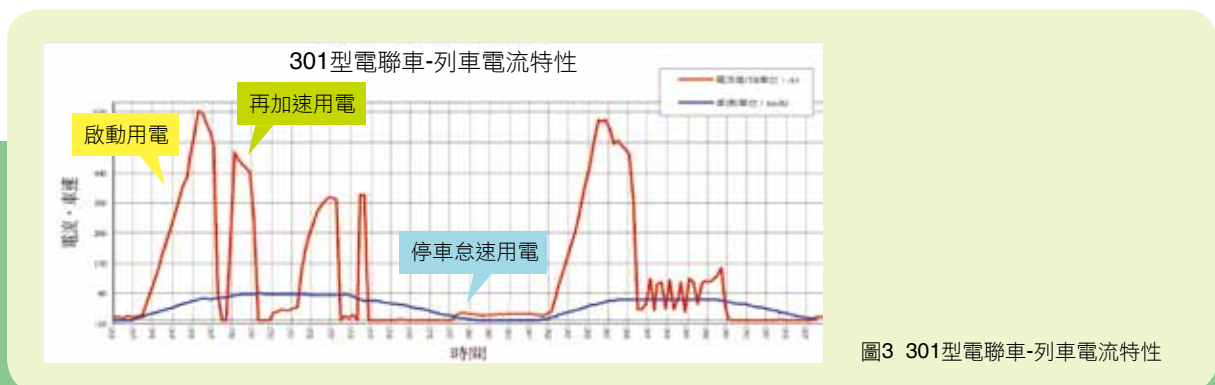


圖3 301型電聯車-列車電流特性

341型電聯車（如圖4）

- 一、由0加速至60km時，最大電流發生於60Km時電流值為6,632A。
- 二、由65加速至80km時，最大電流發生於80Km時電流值為6,765A。
- 三、列車停車怠速時電流值平均約81A。

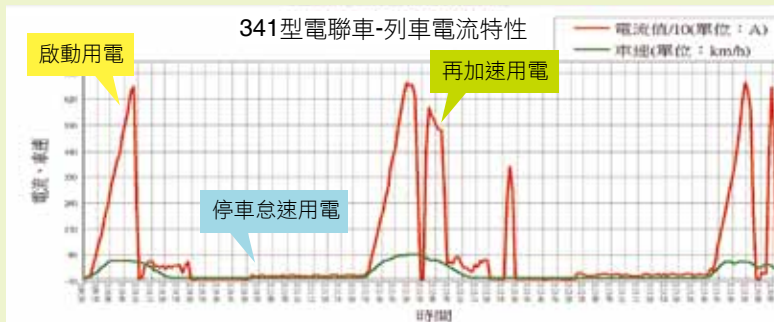


圖4 341型電聯車-列車電流特性

321型電聯車（如圖5）

- 一、由0加速至60km時，最大電流發生於60Km時電流值為6,312A。
- 二、由60再加速至80km時，最大電流發生於75Km時電流值為5,304A。
- 三、列車停車怠速時電流值平均約90A。

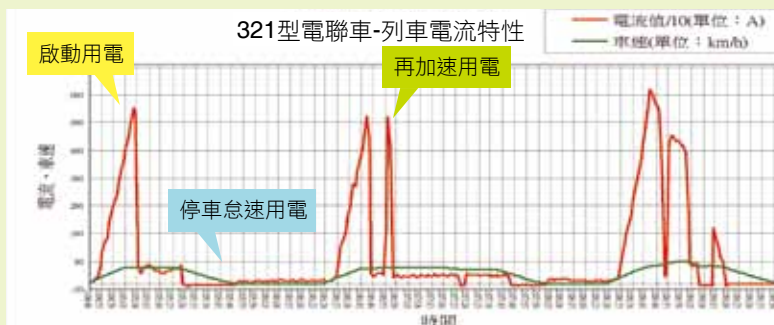


圖5 321型電聯車-列車電流特性

模式2測試結果

371型電聯車（如圖6）

電聯車運行狀態:319列車由景美站/323列車由大坪林站同時出發，319經大坪林站至七張站 / 323列車經七張站至新店區公所站。

- 一、兩列車同時出發時因啟動最大電流值超過轉換器工作區間（150mV/10V），使轉換器飽和，故只量測到10KA無法量測到實際電流值。
- 二、目前淡新中線直流盤過電流設定值（IDS）為11KA。

341型電聯車（如圖7）

電聯車運行狀態:982列車由忠孝敦化站/981列車由忠孝復興站同時出發，982車經忠孝復興站及忠孝新生站至善導寺站 / 981列車經忠孝新生站及善導寺站至臺北車站。

兩列車同時出發時因啟動電流值超過直流盤過電流設定值（IDS）設定值10KA，實際值為（10,080A）故CB跳脫。

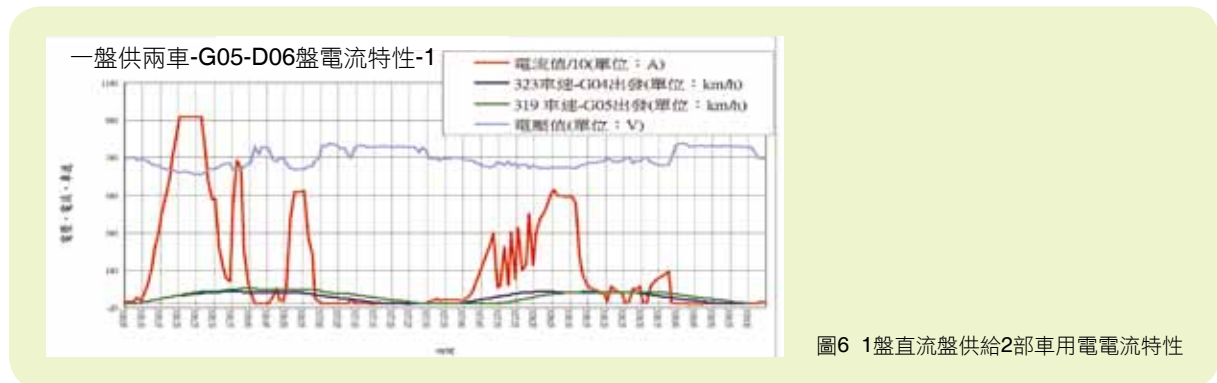


圖6 1盤直流盤供給2部車用電電流特性

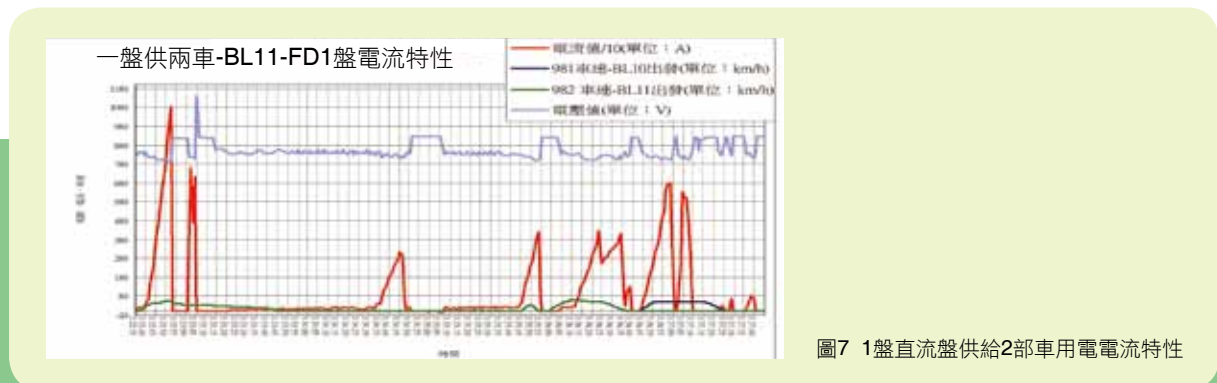


圖7 1盤直流盤供給2部車用電電流特性

模式3測試結果

371型電聯車（如圖8）

電聯車運行狀態：列車由景美站（G05）月臺出發往大坪林站（G04）至七張站（G03）。

- 一、列車由G05月臺出發至65Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為5,239A 約佔總電流的79%、G03-D01電流值為1,495A 約佔總電流的21%；總用電電流為6,630A。
- 二、列車由65Km加速至80Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為5,136A 約佔總電流的74%、G03-D01電流值為2,031A 約佔總電流的26%；總用電電流為6,933A。
- 三、列車由G04月臺出發至65Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為2,753A 約佔總電流的41%、G03-D01電流值為4,150A 約佔總電流的59%；總用電電流為6,645A。

301型電聯車（如圖9）

電聯車運行狀態：列車由景美站（G05）月臺出發往大坪林站（G04）至七張站（G03）。

- 一、列車由G05月臺出發至60Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為4,814A 約佔總電流的77%、G03-D01電流值為1,440A 約佔總電流的23%；總用電電流為6,254A。
- 二、列車由65Km加速至80Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為3,711A 約佔總電流的73%、G03-D01電流值為1,391A 約佔總電流的27%；總用電電流為5,102A。
- 三、列車由G04月臺出發至53Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為2,606A 約佔總電流的42%、G03-D01電流值為3,652A 約佔總電流的58%；總用電電流為6,259A。

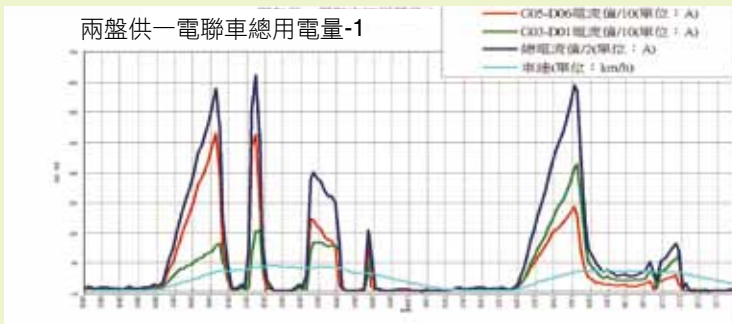


圖8 2盤直流盤供給1部車用電電流特性

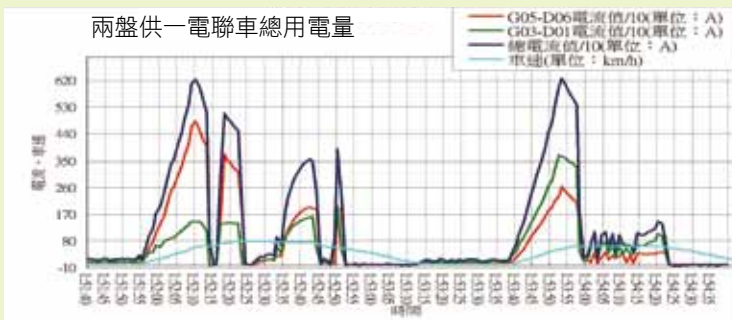


圖9 2盤直流盤供給1部車用電電流特性

341型電聯車（如圖10）

電聯車運行狀態：列車由忠孝敦化站（BL11）月臺出發往忠孝復興站（BL10）至忠孝新生站（BL09）、善導寺站（BL08）

- 一、列車由BL11月臺出發至65Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為5,710A 約佔總電流的91%、BL07-FD3電流值為547A 約佔總電流的9%；總用電電流為6,257A。
- 二、列車由BL10站出發至80Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為4,797A 約佔總電流的78%、BL07-FD3電流值為1,343A 約佔總電流的22%；總用電電流為6,140A。
- 三、列車由BL09月臺出發至80Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為2,703A 約佔總電流的49%、BL07-FD3電流值為2,765A 約佔總電流的51%；總用電電流為5,468A。

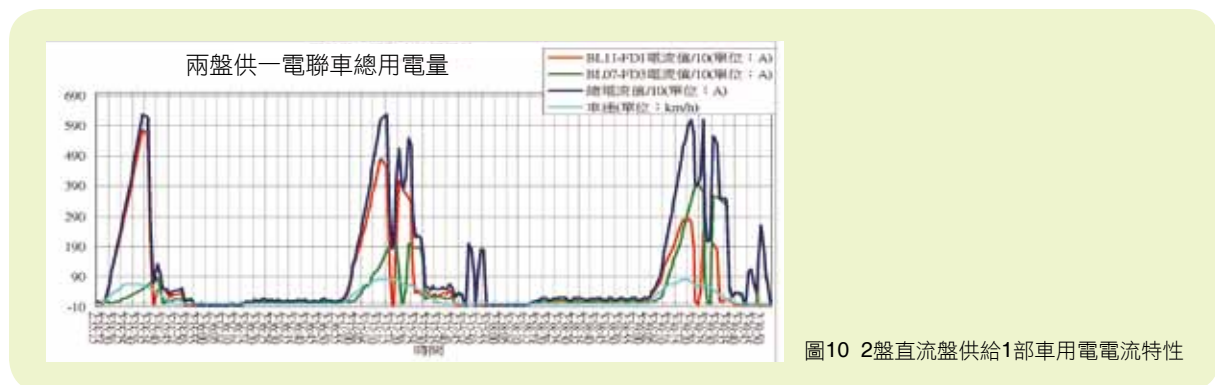


圖10 2盤直流盤供給1部車用電電流特性

321型電聯車（如圖11）

電聯車運行狀態：列車由忠孝敦化站（BL11）月臺出發往忠孝復興站（BL10）至忠孝新生站（BL09）、善導寺站（BL08）。

- 一、列車由BL11月臺出發至60Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為5,859A 約佔總電流的91%、BL07-FD3電流值為578A 約佔總電流的9%；總用電電流為6,437A。
- 二、列車由BL10站出發至62Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為4,914A 約佔總電流的76%、BL07-FD3電流值為1,554A 約佔總電流的24%；總用電電流為6,468A。
 列車由65Km時加速至80Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為3,578A 約佔總電流的65%、BL07-FD3電流值為1,945A 約佔總電流的35%；總用電電流為5,523A。
- 三、列車由BL09月臺出發至62Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為2,882A 約佔總電流的46%、BL07-FD3電流值為3,414A 約佔總電流的54%；總用電電流為6,296A。
 列車由65Km時加速至78Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為2,086A 約佔總電流的36%、BL07-FD3電流值為3,718A 約佔總電流的64%；總用電電流為5,804A。

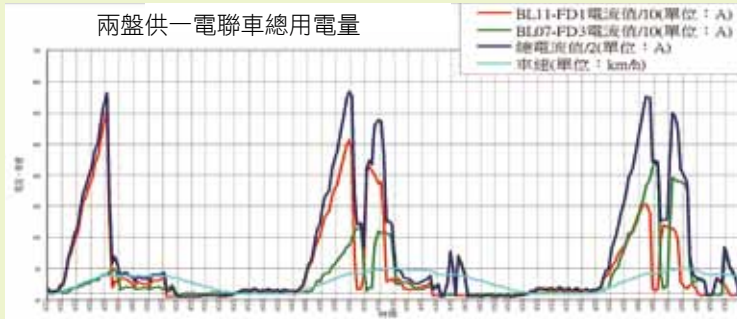


圖11 2盤直流盤供給1部車用電電流特性

模式4測試結果

371型電聯車（如圖12）

電聯車運行狀態:319列車由G05/323列車由G04同時出發，319經G04至G03 / 323列車經G03至G02。

- 一、319/323兩列車同時出發加速至65Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為8,232A 約佔總電流的66%、G03-D01電流值為4,306A 約佔總電流的34%；總用電電流為12,538A。
- 二、319列車由G04月臺出發加速至65Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為2,754A 約佔總電流的45%、G03-D01電流值為3,339A 約佔總電流的55%；總用電電流為6,092A。
- 三、323列車由G03月臺出發經月臺區後即通過GAP區及不同供電區間故產生電流震盪效應，因此時G05-D06盤有投入故電流震盪情形較單一盤供電輕微。

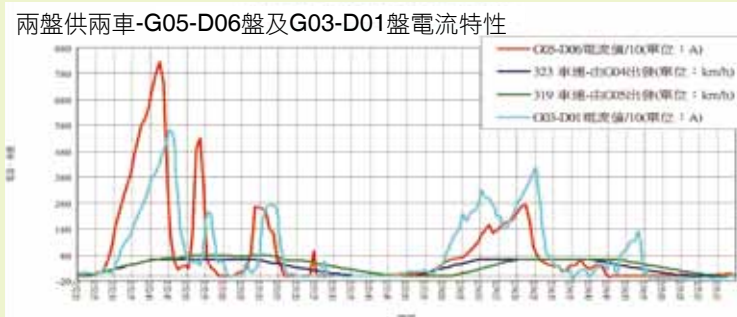


圖12 2盤直流盤供給2部車用電電流特性

301型電聯車（如圖13）

電聯車運行狀態: 1033列車由G05/323列車由G04同時出發，1025經G04至G03 / 323列車經G03至G02

- 一、1033/1025兩列車同時出發加速至58Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為7,285A 約佔總電流的60%、G03-D01電流值為4,858A 約佔總電流的40%；總用電電流為12,143A。
- 二、1033列車由G04月臺出發加速至62Km時，直流盤供電狀態為G05-D06電流值為2,568A 約佔總電流的41%、G03-D01電流值為3,642A 約佔總電流的59%；總用電電流為6,210A。
- 三、1025列車由G03月臺出發經月臺區後即通過GAP區及不同供電區間故產生電流震盪效應，因此時G05-D06盤有投入故電流震盪情形較單一盤供電輕微。

兩盤供兩車-G05-D06盤及G03-D01電流特性

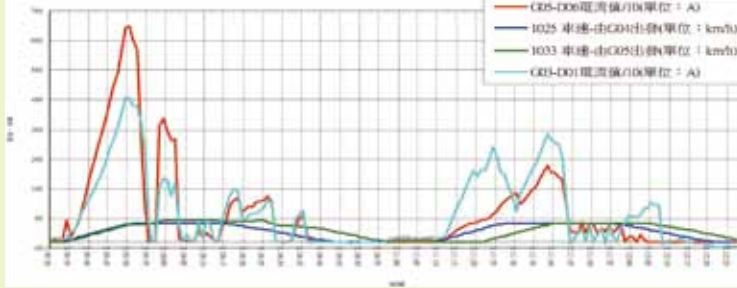


圖13 2盤直流盤供給2部車用電電流特性

341型電聯車（如圖14）

電聯車運行狀態:982列車由BL11/981列車由BL10同時出發，982經BL10及BL09至BL08 / 981列車經BL09至BL08。

981/982兩列車同時啟動加速至73Km，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為10,562A 約佔總電流的88%、BL07-FD3電流值為1,493A 約佔總電流的12%；總用電電流為12,055A。

兩盤供兩車-BL11-FD1盤及BL07-FD3電流特性

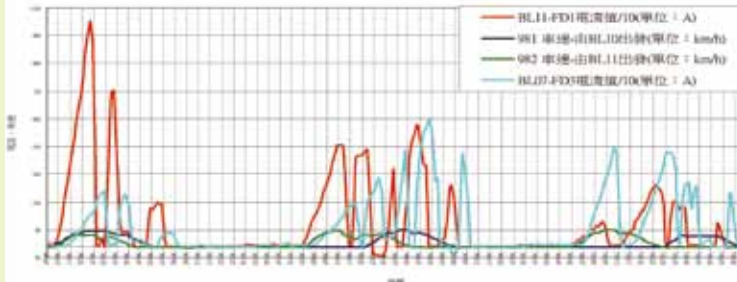


圖14 2盤直流盤供給2部車用電電流特性

321型電聯車（如圖15）

電聯車運行狀態:124列車由BL11/122列車由BL10同時出發，124經BL10及BL09至BL08 / 122列車經BL09至BL08。

124列車由BL11月臺出發加速至55Km時，直流盤供電狀態為BL11-FD1電流值為1,034A 約佔總電流的85%、BL07-FD3電流值為1,851A 約佔總電流的15%；總用電電流為12,085A。

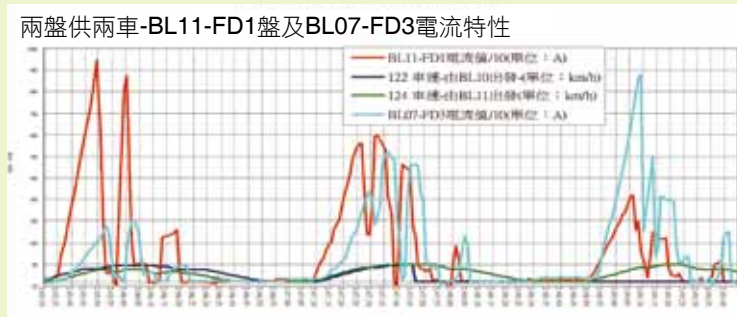


圖15 2盤直流盤供給2部車用電電流特性

直流開關盤不明原因跳脫問題分析

臺北捷運公司無論是Siemens或Secheron 廠牌的直流開關盤，其故障偵測方式均以電流上升率 di/dt 、與過電流（IDS）為主。

一、電流上升率 di/dt （用電量變化速率過快）：

此保護方式可分為延時跳脫保護及瞬時跳脫保護，只要其中一個先達到跳脫條件直流斷路器即動作跳脫。其中瞬時跳脫保護，可以較快速偵測出故障現象並迅速將故障區域隔離，其主要用於偵測近端線路短路故障及中端線路短路故障。延時跳脫保護可以偵測區分較低的短路故障電流及較大的負載電流，適用於遠端線路短路故障偵測。

電流上升率設定值的參考指標除了偵測故障電流特定之上升率外，亦須克服電聯車集電器跨過不同供電區域所可能引起的突波干擾，所以會適度的調整延遲時間。

二、過電流 (IDS) :

此保護為大電流故障偵測之主保護，為避免大故障電流造成設備破壞，因此當電流一超過IDS設定值時，直流斷路器即立刻動作跳脫。

其主要做為偵測近端故障保護之用，為機械式之動作元件與電流大小有關，其設定值是考慮在最密行車間距（2分鐘一班車）時之直流負載分析（含列車特性參數資料）下的數據，並避免對列車啟動電流產生誤動作之原則下，而取其保護協調之裕度設定值。

發生不明原因電流上升率 di/dt 保護作動分析 發生保護作動之特性

- 一、371型列車最高用電7,089A比301列車6,181A高約14%。
- 二、發生於臺北車站（R13）~民權西路站（R16），景美站（G05）~七張站（G03）及北投站（R26）。
- 三、發生時段不定。

模擬測試之發現

於模式2及4測試中可發現，當列車經月臺區出發後通過GAP區及不同供電區間時發生大小不等之電弧，此時電流出現震盪現象。

電聯車通過不同供電區間（GAP區）時產生電弧

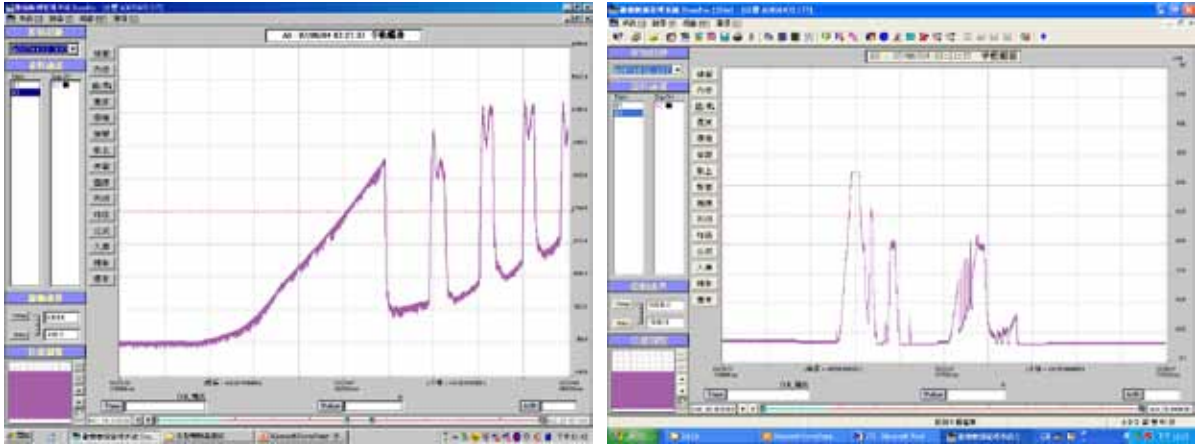
為縮短主線導電軌（3軌）發生短路故障時之停電範圍及考量軌道維修之便利性，故目前主線導電軌並非一連續軌道即非一連續之供電狀態，當電聯車行使於該供電不連續區（GAP區）時，因集電靴電流中斷而於導電軌末端與氣隙間產生電弧（如圖16）（類似開關切換動作），因電弧發生時其時間極短、高電壓、大電流。

分析-不明原因 di/dt delay trip

- 一、依所執行之模式2列車用電量測資料（圖17）可發現，當列車通過不同供電區間（GAP區）時產生突波干擾（類似開關切換動作），此干擾特性與直流開關盤 di/dt delay trip 保護之波形特性相同。
故直流盤保護設定必須克服電聯車集電靴跨過不同供電區間所可能引起的突波干擾。
- 二、依統計資料可發現淡水新店線371型列車加入運轉後，2007年度不明原因跳脫為13次，其中11次當時列車為371型。11次不明原因跳脫，經追查為2007年1-3月並以景美站（G05）D01~公館站（G07）D06及華捷主變電站（HUA）D03~民權西路站（R16）D04之供電區段各發生5次最多。



▲圖16 列車通過不同供電區間（GAP區）時產生電弧（R26往R28）



▲圖17 列車通過不同供電區間（GAP區）時產生突波干擾

發生不明原因過電流（IDS）保護作動分析

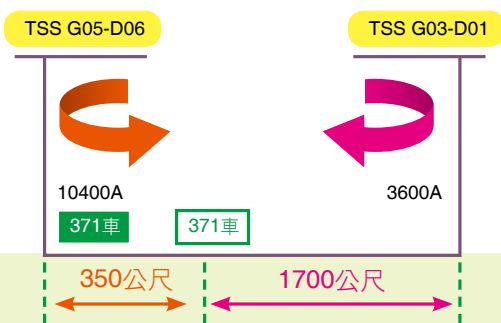
發生用電量過大保護動作特性

- 一、發生於BL04~BL05、BL02~BL04。
- 二、無集中發生於特定車型之情形。
- 三、早上尖峰時段較多。

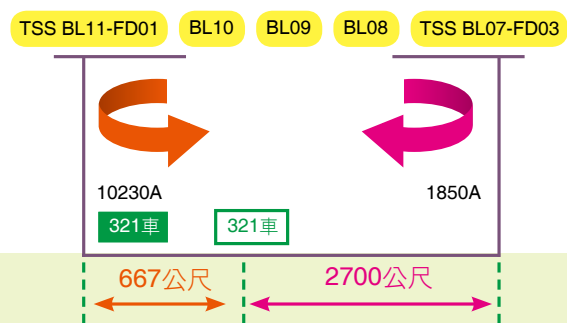
模擬測試之發現

隨著負載移動直流開關盤輸出電流亦隨之變動，離負載較近之動力變電站其供電量較大。

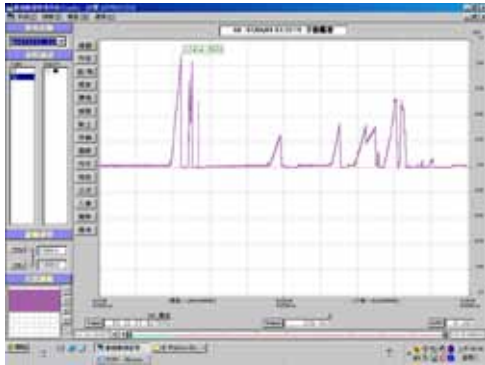
- 一、依模式4實車量測結果加以概算，當1部列車位於景美站（G05），1部列車位於景美站（G05）前350公尺處（距離相鄰七張站（G03 TSS）動力變電站約1,700公尺），若此時2部列車同時啟動或再加速，則景美站（G05）動力變電站直流開關盤-D06盤電流可達10,400A（如圖18）。
- 二、依模式4實車量測結果加以概算，當1部列車位於忠孝敦化站（BL11），1部列車位於忠孝復興站（BL10）（距離相鄰臺北車站（BL07-TSS）動力變電站約2,700公尺），若此時2部列車同時啟動或再加速，則忠孝敦化站動力變電站直流開關盤-FD01盤電流可達10,230A（如圖19）。



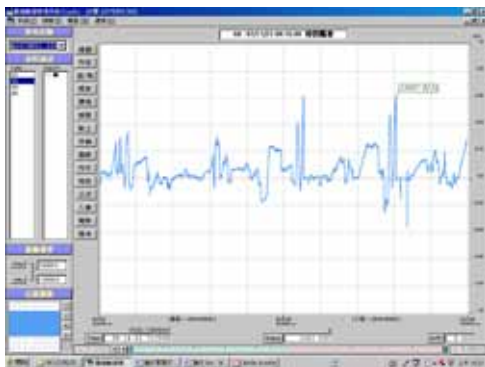
▲圖18 列車用電量與距離關係圖



▲圖19 列車用電量與距離關係圖



▲圖20、列車用電量分配不均造成IDS保護動作



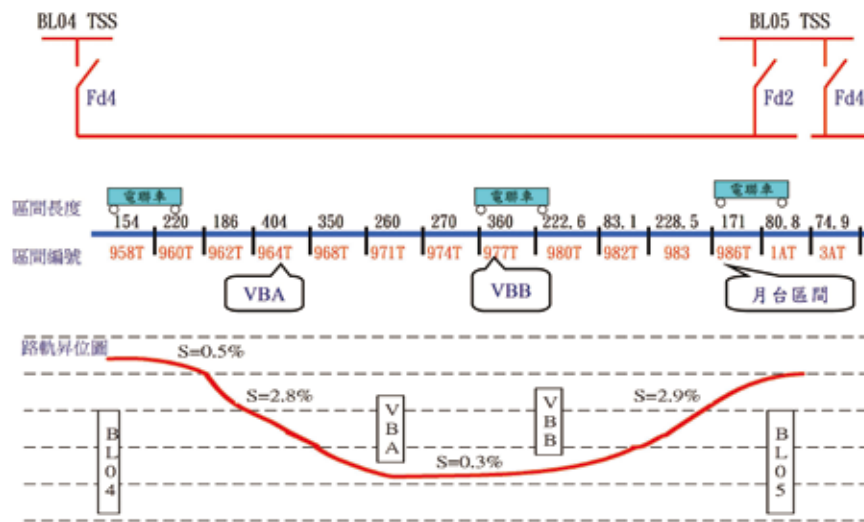
▲圖22 列車位於江子翠站 (BL04) 至龍山寺站 (BL05) 上行軌980T及月臺986T時，用電量分配不均造成IDS保護動作

三、捷運系統每一直流供電電區間皆由2盤直流盤採並聯方式供電，而依實車量測結果可發現，當2列車運行間距太短時電流分配不均，容易產生單一盤需供應2列車用電情形（圖20），即易造成IDS保護動作（保護設定值為10KA）。

過電流-IDS/保護動作

以江子翠站 (BL04) 至龍山寺站 (BL05) 上行軌相關特性為例 (圖21)

- 一、站間距離長度 (供電區段) 為3公里，約為其他區段長度2倍。
- 二、龍山寺站 (BL05) 前1公里處為上坡路段，坡度約為2.9%，電聯車行經此路段若未達速限時須加速。
- 三、於尖峰時段易發生1列車由龍山寺 (BL05) 出發，後1列車位於龍山寺站前1公里處進行加速，此時2列車之用電均集中於龍山寺站 (BL05)，造成IDS/保護動作。



▲圖21 江子翠站 (BL04) 至龍山寺站 (BL05) 上行軌特性圖

研究結果與應用

當列車通過不同供電區間GAP區時產生類似開關切換動作突波干擾，此干擾特性與直流開關盤di/dt delay trip 保護之波形特性相同。故直流盤保護設定必須考慮克服電聯車集電靴跨過不同供電區間所可能引起的突波干擾，以避免引發保護跳脫。在本次研究後，清查淡新中線直流盤相關保護設定值，發現華捷主變電站（HUA）及公館站（G07）直流開關盤di/dt delay trip之設定值為（50A/ms，25ms）與其他站設定不同（50A/ms，35ms），故依圖17實車測試資料，若延時時間太短則不易避開電聯車集電靴跨過不同供電區域所可能引起的突波干擾，即易造成保護動作。將華捷主變電站（HUA）及公館站（G07）之動力變電站直流開關盤原di/dt delay trip保護設定值（50A/ms，25ms）修正為（50A/ms，35ms）後，已降低不明原因跳脫之案例。

營運時於龍山寺站（BL05）直流開關盤FD02架設紀錄器，尖峰時段列車位於江子翠站（BL04）至龍山寺站（BL05）上行軌（軌道區間980T）及月臺（軌道區間986T）時，此時兩列車於啟動及加速狀態，直流開關盤FD2量測到之最大電流為10,007A，造成直流開關盤FD2 IDS/保護動作（保護設定值為10KA）（圖22）。

依測試結果驗證直流開關盤輸出電流量大小，取決於列車距離直流開關盤位置及當時列車運轉狀態（啟動、加速等），而當列車班距不平均極易發生單一直流盤需供應2列車之用電情形，而造成電流分配不均，產生用電量大於直流開關盤保護設定值而引起直流開關盤跳脫。

江子翠站（BL04）至龍山寺站（BL05）間易發生列車過於密集而造成用電電流分配不均造成IDS保護動作，目前經適度調整IDS保護設定值已獲改善。

參考文獻

- 1.李育榮（2006），「捷運直流供電系統故障偵測與保護之研究」，國立臺灣科技大學碩士論文。
- 2.曾乙申，「捷運牽引電力系統直流短路故障探討」。
- 3.曾乙申、林文進（1996），「捷運直流供電系統分析實例與節能方案探討」，捷運技術半年刊，第35期。
- 4.臺北大眾捷運股份有限公司（2006），「高運量行車路線供電區間圖」。
- 5.臺北大眾捷運股份有限公司，CD313標 板橋/土城線供電系統工程「操作維修手冊5/10」。

註解

註1：301, 321, 341, 371型電聯車分別為臺北市政府捷運工程局採購電聯車標別簡稱。

術語

TSS：traction supply station 動力變電站。

G05-D06：G05為新店線車站代碼、D06為直流開關盤編號。

BL11-FD1：BL11為南港線車站代碼、FD1為直流開關盤編號。