

臺北捷運板南線機電系統節能儲能方案之研究

林文進¹ 彭柏志²

摘要

由於軌道運輸系統的電力成本佔了營運成本相當高的比例，而能源價格不斷的上揚。因此，鐵路運輸的能源消耗佔運作與維護成本的比例將不斷提高，若能採取節省能源之策略，將能降低鐵路運輸的營運成本，並減少能源的消耗。

本報告蒐集、分析與比較國內、外捷運各類機電核心系統節能、儲能設(措)施應用之相關資料，完成列車煞車電阻的探討、國內外捷運列車再生煞車能量儲能之策略以及儲能電池的分析比較。在建立適合臺北都會區捷運機電核心系統路線節能、儲能策略方法及成本效益中，我們探討臺北捷運板南線，根據現行營運條件下，計算板南線列車煞車所產生之再生電力容量理論值，建構以超級電容儲能系統做為回收電能的儲能系統，完成適合臺北捷運現況的超級電容儲能系統參數。

藉由軌道系統軟體 RAILSIM 和 Matlab 模擬板南線運行資料，完成板南線列車的再生煞車電能和班表調度，將模擬結果與公式計算的理論值互相比較，以擇定超級電容儲能系統適合的儲能容量及架設位置，有助改善捷運系統再生能量回收率與節省電能之效果，以達到營運成本減少的目標。

關鍵字：牽引動力負載分析、儲能策略、再生電力、列車煞車電阻、超級電容儲能單元

Research on Energy Saving and Storage Solutions for the E&M System of the Taipei MRT Bannan Line

Lin Wen Chin¹ Pen Bo Chih²

Abstract

Since electricity accounts for a high proportion of a railway transit system's operational costs and energy prices continue to trend upward, adoption of energy conservation strategies and reduction of energy consumption continue to become of even greater importance.

This paper collects, analyzes, and compares various types of E&M core system energy saving and storage facilities, as well as their applications in domestic and overseas MRT system. It explores train braking resistor analyses, train regenerative braking energy recycling strategies, and battery energy storage systems. In terms of energy-saving and energy-storage strategies, and cost-effectiveness of the Taipei MRT E&M core system, this paper calculates theoretical values of

¹ 臺北市政府捷運工程局機電系統設計處 副工程司

11156@trts.dorts.gov.tw

² 台灣科技大學電機系 研究生

10801@ntut.edu.tw

train regenerative power capacity on the Bannan line. It investigates advantages of super capacitor energy storage systems for energy recycling via regenerative braking, and it calculates a set of super capacitor energy storage system parameters suitable for the Taipei MRT. This research uses the railway system software RAILSIM and Matlab to simulate operations of the Bannan line. Having calculated regenerative braking energy values and schedule arrangements of the Bannan and Wenhua lines, simulation results and theoretical values of the formula are compared to determine suitable super capacitor energy storage capacity and location. Findings will help improve regenerative energy recovery rates and energy savings, leading to operational cost reduction.

Keywords : traction load flow study, energy storage strategy, regenerative power capacity, train braking resistor, super capacitor energy storage unit, energy saving

一、列車煞車方式和再生能量回收策略

捷運列車採用電力供能，列車依靠牽引電力運行，因為運量高、班次密集，同時會消耗很大的電能。又捷運車站一般站間距離短，列車需要頻繁的煞車和啟動，列車如採用再生煞車可以產生可觀的電能，回收這部分再生煞車能量可以達到節省電能消耗和用電支出。對捷運列車再生煞車電能進行回收再利用，有下列實質上的意義：

- (1) 提高電能利用率，減少電能的消耗。
- (2) 可以穩定牽引電網的電壓，使供電可靠度提升。
- (3) 可以降低隧道和車站內的溫度上升，改善車站空氣品質。
- (4) 裝設合理的儲能回收裝置，可以減少車載煞車電阻的數量，減輕列車重量，從而降低列車牽引能耗。

隨著捷運系統的發展，世界各國開始重視節能減碳和環境保護的議題，對這方面的研究也越來越多，在捷運運輸系統中廣泛應用再生煞車回收裝置，將有巨大的經濟效益與節能環保之效果。

(一) 捷運列車煞車方式

根據列車的煞車控制模式，捷運列車的煞車方式可以分為兩種：摩擦煞車及電氣煞車。

摩擦煞車是利用壓縮空氣作為動力，所以又稱為空氣煞車。煞車時，閘瓦與車輪接觸摩擦，是一種摩擦煞車的方式。

電氣煞車又可以分為再生煞車和電阻煞車兩種。當列車煞車時，推進馬達同步轉速降低，由於轉子慣性作用，轉子轉速高於同步轉速，產生負轉矩，使牽引馬達由電動機轉為發電機，這時所產生的再生電能可以送回第三軌，供給鄰近的列車使用，這種方式稱為電力煞車或再生煞車。若煞車時，利用電阻負載消耗能量的，稱為動態電力煞車或電阻煞車[1]。

一般情形下，列車煞車是以電氣煞車為主，摩擦煞車為輔，以充分利用電氣煞車及減少摩擦煞車之磨耗，當電氣煞車不足時，再以摩擦煞車輔助以滿足煞車需求，因此有時為了充分利用電氣煞車，會規範當列車車速低於某速度時，摩擦煞車才會作用。

摩擦煞車和電阻煞車都有明顯的缺點。摩擦煞車由於閘瓦與車輪的磨損，造成車輛的維護成本提高，壓縮空氣的釋放會造成環境汙染，影響乘坐的舒適性。電阻煞車由於電阻負載消耗電能會產生大量的熱量，造成隧道內的溫度上升，增加了捷運站內空調通風設備的負擔。相反的，再生煞車能夠節省電能，減少熱汙染，降低空調通風設備的負擔。

目前捷運列車普遍使用VVVF (Variable Voltage Variable Frequency)的動車組列車。煞車方式採用電氣煞車和摩擦煞車相互配合，一般優先採用再生煞車，如果再生煞車電能無法被鄰近列車使用或儲能設備回收，則使用煞車電阻消耗電能，避免網壓升高；當電氣煞車不足以提供所需的煞車力時，啟動摩擦煞車來滿足煞車需求。如遇緊急狀況時，列車一般由摩擦煞車單獨提供緊急煞車力。

(二) 列車煞車電阻設置之探討

在大容量電力電子開關元件普及以前，捷運列車大多採用電阻器變阻調速，列車的電氣煞車沒有再生煞車，只能利用啟動電阻進行電阻煞車，電阻器的功率取決於煞車時的速度。由於煞車時的功率很大，會排放很大的熱能在隧道內，造成隧道的環境溫度上升。

隨著大功率電力電子元件的普及，捷運列車於20世紀70年代開始採用截波調整電壓傳動技術，到了90年代採用更為先進的交流電動機變壓變頻技術VVVF，使得列車啟動不再使用電阻器，電阻器則補充再生煞車的不足，因此稱為煞車電阻[2]。

1. 列車煞車電阻之作用

當列車進行再生煞車時，產生的能量無法完全被其他鄰近的列車使用，造成供電電網的電壓上升，而此時如果沒有裝設再生煞車能量儲能設備回收剩餘的能量，將可能導致再生煞車失效。為了預防再生煞車失效，所以此時將使用煞車電阻，將剩餘的電能轉成熱能消耗掉，使供電網電壓穩定，以保持列車營運的安全。

2. 列車煞車電阻之規格探討

根據廣州地鐵一號線（4動2拖）煞車電阻的試驗中，單列列車全天運轉在煞車電阻上的耗電為608 kWh[2]，如果多部列車全部上線運行，則此耗電量非常可觀，這部分能量以煞車電阻來消耗，會對地鐵環境帶來負面影響。因此日本的地鐵列車大多不在車上設置煞車電阻，但有些路線會將煞車電阻集中設置在牽引變電所內。表1.1為台北捷運信松線煞車電阻的數據，每輛動力車設有四個煞車電阻，以台北捷運4動2拖的編組方式，列車的煞車電阻總重量約4960 kg，未來在考慮有儲能系統的情形下，希望可以減少或移除煞車電阻。

表 1.1 台北捷運信松線煞車電阻的規格與特性

項目	規格和特性
電阻值	0.7 Ω
冷卻方法	自然冷卻
環境溫度	0 °C~38 °C
寬度	2100 mm
高度	800 mm
長度	600 mm
重量	310 kg
最高電阻溫度	500 °C (環境溫度為 38 °C時)

煞車電阻可以設置於車上，也可以集中設置於牽引變電所中，設置於牽引變電所的煞車電阻也稱為再生吸收電阻。比較兩種設置方式的優缺點，可以決定煞車電阻的取捨，如表1.2所示。

表 1.2 煞車電阻設置位置比較

位置	設置於牽引變電所	設置於列車上
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 節省投資。 2. 減輕列車重量。 3. 減少列車風機的耗電。 4. 防止隧道內溫度上升。 5. 列車可為其他節能設備預留空間。 6. 維修方便。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可靠度較高。 2. 煞車電流通路近，不會有線路的壓降。
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 變電所需要加強散熱通風的設備。 2. 再生煞車電流通路較遠，會有線路的壓降。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 增加列車重量。 2. 增加列車風機的耗電。 3. 隧道內溫度上升。

由表1.2比較可知，煞車電阻設置在牽引變電所比設置在列車上優點更多，從列車運行的安全上考量，並不適合將煞車電阻從列車上完全移除，但可以將煞車電阻的容量降低為全功率的40% [2]，其降低的比例可依各營運路線的實際狀況作調整。雖然煞車電阻的成本低、控制簡單、可靠，但將列車再生煞車能量消耗在煞車電阻上，造成能源的白白浪費，不是讓人滿意，故世界各國技術人員也不斷的在研究回收能量的技術，以節省能源的浪費。

(三) 再生能量回收的國內外策略

根據經驗統計，捷運再生煞車產生的再生能量一般為牽引能量的30%甚至更多，這些再生能量按一定比例會被相鄰的列車吸收使用，一般為20%~80% [3][4]，根據列車運行密度和站間距離的不同而異。當列車發車密度較低時，再生能量被其他列車吸收的機會大幅降低，剩餘的再生能量會讓電網電壓快速上升，但捷運系統的電網電壓波動是有限制的，若超過限制值，會導致再生煞車失效的發生，造成再生煞車不能充分被利用，會影響列車的安全和穩定運行。

各國對再生電能的處理方式不盡相同，而自然能源回收(Natural Energy Recovery) 為目前各國捷運營運單位最常使用的方法之一，在下坡時將動能轉換成電能，使得推進馬達所產生的電壓高於供電軌電壓，則將電能回饋給車上其他用電設備，如輔助電力系統之空調、照明、蓄電池、、、等，若有多餘的再生能量，再透過供電軌提供給最近之列車使用，形成自然回收。當再生電壓超過允許最大電壓時，系統由再生煞車模式轉換至動態煞車模式，利用列車上之煞車電阻消耗再生能量，因此再生能量受煞車時的動能影響，再生煞車時之允許最大電壓亦影響能源的回收量[5]。

對於不能被其他車輛吸收的剩餘部分再生煞車能量，在捷運系統中最好的方法是設置再生煞車電能回收裝置加以回收，目前主要採用以下幾種方式：電阻耗能型、逆變回饋型和能量儲存型：

1. 列車煞車電阻之作用

電阻耗能型主要是採用多相的絕緣閘雙極電晶體(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)截波器和吸收電阻配合的恆壓吸收方式，根據再生煞車時直流電網電壓的變化調整截波器的導通比，進而改變吸收功率，將直流電壓恆定在某一個設定值的範圍內，並將煞車能量消耗在吸收電阻上[6]，如圖 1.1 所示。

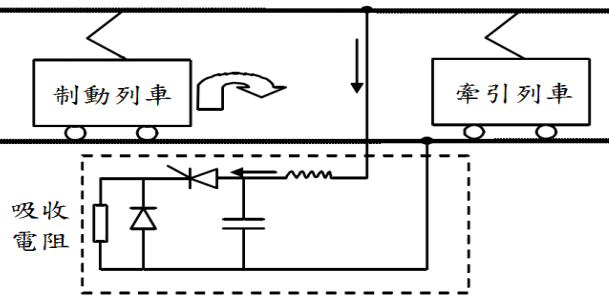


圖 1.1 電阻耗能型原理圖 [6]

電阻耗能型系統的優點是控制簡單、可靠性高、價格較低和維修方便，缺點是再生煞車能量利用吸收電阻以發熱的方式將多餘的再生電能轉換為熱能消耗掉，造成能源的浪費，而且電阻散熱會導致環境溫度上升。因此，該系統設置的位置對通風和溫控設備需要更高的要求，也額外增加了電能的消耗。目前電阻耗能型系統在中國的軌道運輸很常使用，如重慶輕軌 1 號線、廣州地鐵 4 號線、北京機場線即採用在牽引變電所內設置電阻耗能型系統。

2. 逆變回饋型系統

逆變回饋型系統主要採用電力電子元件構成的大功率閘流體(Thyristor)三相逆變器，三相逆變器的直流側和牽引變電站的直流電網相連，交流側接到交流電網上，交流電網可以是電力公司的高壓交流電網，也可以是車站內的中壓交流電網。當再生煞車使得直流電網電壓超過設定值時，逆變器啟動並從直流電網吸收電流，將再生直流電能逆變成交流電，回饋至交流電網中，原理如圖 1.2 所示[7][8]。

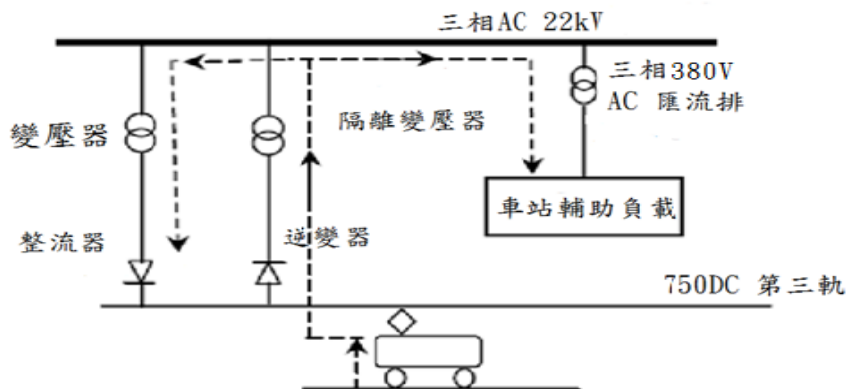


圖 1.2 典型的逆變器牽引圖 [7]

由於逆變回饋型系統的節能效果好，且對環境溫度影響小，在歐洲及日本東京、大阪等城市軌道交通多採用這種方式，已有成熟的技術推廣與應用，但逆變回饋型系統受本身技術的限制，其缺點為控制複雜以及回饋電網的電流會在交流電網中產生較大的諧波問題，需要使用相對應的濾波裝置來降低諧波，因此總體設置成本較高[9]。

3. 能量儲存型系統

能量儲存型系統是採用儲能元件將多餘的再生煞車能量儲存起來，可以在直流電網電壓較高時吸收電能，在電網電壓較低時釋放電能，具有儲存電能和穩定電壓的作用，可以較大限度的利用再生煞車能量。依照儲能元件的不同，主要可以分為以下：飛輪儲能、蓄電池儲能、超級電容儲能等形式。

(1) 飛輪儲能系統

飛輪儲能系統是利用高速旋轉的飛輪來儲存和釋放能量，如圖 1.3 所示。其操作模式有儲能模式和釋能模式兩種[10]。

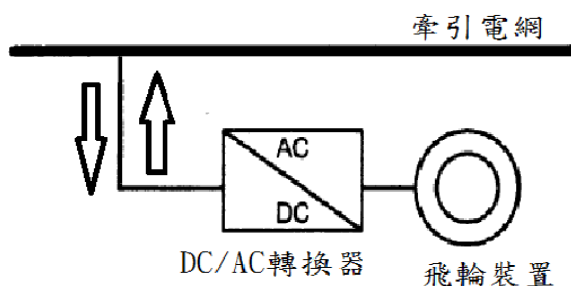


圖 1.3 飛輪儲能系統[10]

儲能模式為當列車之再生煞車能量無法被其他列車吸收造成直流電網電壓高於儲能啟動的設定值時，飛輪儲能系統以儲能模式運轉，將列車過剩的再生煞車電能由 DC/AC 轉換器轉換為交流電能，驅動飛輪裝置的同步電機以馬達模式運轉帶動飛輪儲能器高速旋轉，直到達到所允許的最大轉速，使飛輪儲能器以動能的方式進行儲能。

釋能模式為當有列車啟動或加速行駛造成直流電網電壓低於釋能啟動的設定值時，飛輪儲能系統以釋能模式運轉，原先儲存在飛輪儲能器的動能，帶動同步發電機以發電機模式運轉，直到達到最低工作轉速，將動能變為交流電能，再經 DC/AC 轉換器變為直流電，提供列車牽引電能。

飛輪儲能可以快速充放電，儲能密度與效率都較高，與電池相近，所以也稱為飛輪電池，設置地點也十分靈活，但其零組件壽命容易受到機械磨損的影響而降低，能量也不能較長時間的儲存，因此比較適合短時間、大功率的應用場合。目前在英國 UPT 電力公司有實用化的飛輪產品，在英國、美國等地的地鐵也有少部分的應用實例[10]，在市場有一定的佔有率。

(2) 蓄電池儲能系統

由於蓄電池技術發展成熟，且蓄電池是能量密度很高的儲能元件，藉由蓄電池的充放電達成再生煞車能量的回收與再次利用，這種技術在電動汽車與油電混合車較為常見，在捷運系統供電網路中也不乏用蓄電池來回收再生煞車能量的例子，也是研

發應用較早的技術，德國柏林地鐵在 20 世紀 90 年代就採用了蓄電池儲能系統[11]。當有列車煞車使得直流電網電壓升高到設定值時，系統吸收再生煞車電能，儲存在蓄電池中；附近有列車啟動或加速時，電網電壓下降，此時釋放儲存的電能供列車使用，在一定的程度上達到了穩壓的效果。在軌上無列車時，可以將儲存的電能供給其他的用電負載使用，以達到節能的作用，其能量回收如圖 1.4 所示。

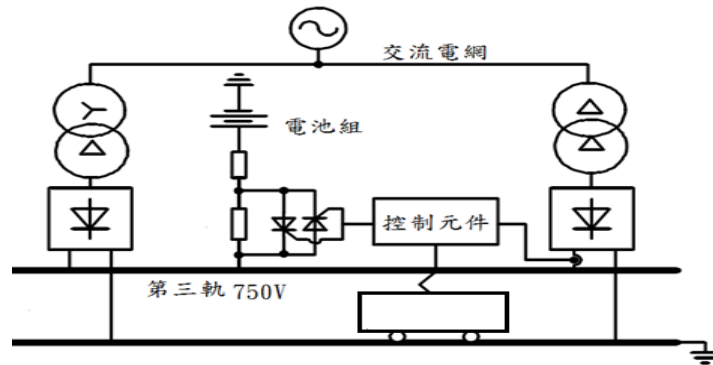


圖 1.4 蓄電池儲能系統圖 [11]

蓄電池儲能系統有明顯的缺點是充放電速度慢；使用壽命短，維護成本高；廢棄蓄電池含有重金屬，如不妥善處置會對環境造成汙染，如大量推廣使用，廢棄電池的處置是必須克服的問題，此技術目前在日本有小規模的應用[12]。

(3) 超級電容儲能系統

由於蓄電池技術發展成熟，且蓄電池是能量密度很高的儲能元件，藉由蓄電池的充放電達成再生煞車能量的回收與再次利用，這種技術在電動汽車與油電混合車較為常見，在捷運系統供電網路中也不乏用蓄電池來回收再生煞車能量的例子，也是研發應用較早的技術，德國柏林地鐵在 20 世紀 90 年代就採用了蓄電池儲能系統[11]。超級電容是近年出現的一種新型能源儲存元件，因為與常規電容器不同，其電容量較大，可以達到數千法拉，且其性能介於常規電容器與化學電池之間的儲能元件，故稱之為超級電容。超級電容儲能系統通常是採用連接開關切換組、雙向 DC/DC 變換器和儲能電容器組等構成，其結構如圖 1.5 所示[13-14]。

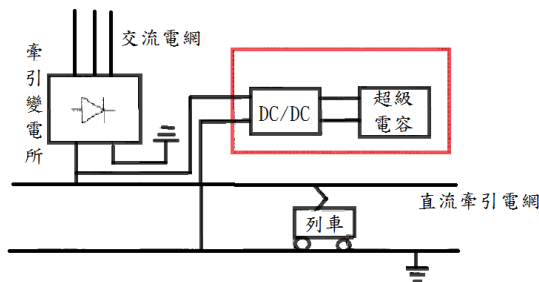


圖 1.5 超級電容儲能系統結構圖 [13]

電容裝置是一個大容量儲能設備，同時具有能量儲能和電壓穩定兩種工作模式，兩種模式之間可以自動切換[15-16]。

- A. 能量儲能模式：當操作在此模式且列車再生煞車能量不能被鄰近列車吸收時，儲能電容器組開始充電，回收列車的再生電能，將其儲存在電容中；當列車需要通過牽引電網取電時，再釋放儲存的電能提供列車牽引用電，因此可以減少牽引變電所的供電用電量，達到減少能源消耗的目的。在操作在此模式之前，儲能電容器組的儲存能量在大部分時間處於低水平處，以備隨時吸收列車的再生制動能量。
- B. 電壓穩定模式：當操作在此模式時，可以藉由列車再生煞車的電能快速充電，在沒有列車煞車的情況下，也可以透過牽引變電站的直流供電設備慢速充電；在牽引電網電壓較低時，可以釋放儲存的電能，以穩定牽引電網的電壓，因此改善牽引電網的供電品質。

西門子和龐巴迪是世界上較早進行此產品研發的兩家公司，近幾年，在西班牙首都馬德里、德國的波昂和科隆、美國的波特蘭等城市的軌道交通，有其設備的試驗性使用。在 2009 年，北京地鐵五號線採用了 4 套德國西門子公司的 SITRA-SES 電容儲能式再生電能回收裝置。超級電容儲能具有充放電速度快、節能效果好、循環壽命長、工作溫度範圍廣以及環保無污染等優點，但價格較高、占地空間大、儲能容量小，不能完全回收列車再生煞車能量是其缺點。

綜合上述各種再生煞車能量回收裝置的特性，在下表 1.3 中整理上述五種再生電能回收裝置的優缺點和分析比較[17]。

表 1.3 各種再生煞車能量回收裝置之比較

方式	電阻耗能	飛輪儲能	電池儲能	電容儲能	逆變回饋
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 控制簡單 2. 電阻可以集中設置 3. 維修方便 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 節能效果好 2. 儲能密度高 3. 設置地點靈活 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 具穩壓作用 2. 技術較成熟 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 節能效果好 2. 具穩壓作用 3. 壽命長 4. 維護費用低 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 節能效果最好 2. 對環境溫度影響小
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 沒有達到回收再利用的效果 2. 熱能釋放到空氣中，影響環境溫度 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 體積龐大 2. 成本高 3. 機械部件因磨損造成使用壽命短 4. 維護費用高 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電池使用壽命短 2. 充放電速度較慢 3. 廢棄電池的處理問題 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 控制複雜 2. 體積龐大 3. 成本高 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 控制複雜 2. 回饋至交流電網有很大的諧波影響 3. 成本較高
使用國家	<ol style="list-style-type: none"> 1. 重慶輕軌 2. 廣州地鐵 4 號線 3. 深圳地鐵 2 號線 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 日本京濱快速鐵路 2. 里昂地鐵 3. 倫敦地鐵 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 德國柏林地鐵 2. 日本大阪地鐵 3. 紐約地鐵 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 北京地鐵 5 號線 2. 西班牙馬德里地鐵 3. 美國波特蘭地鐵 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 日本神戶地鐵 2. 日本札幌地鐵 3. 巴西聖保羅地鐵

(四) 能量儲存系統在車載和軌旁的比較

在上節當中，介紹了各種再生煞車能量儲存系統的操作原理和特性，而這些儲能系統依設置的位置可以分為在列車上的車載儲能系統以及設在軌道旁牽引變電所內的軌旁儲能系統，目的都是為了確保再生煞車能量可以順利回收。

1. 車載儲能系統

目前可以設置在車上的儲能系統有飛輪、蓄電池、超級電容等裝置。設置在列車上有系統可靠度高和可以回收較多的再生能量，但會增加列車的重量和佔用了列車的空間。由於捷運列車再生煞車之週期快又頻繁，蓄電池充放電速度慢的特性，故不適用於捷運列車上，有逐漸被超級電容取代的趨勢。

2. 軌旁儲能系統

目前可以設置在軌道旁的儲能系統有飛輪、蓄電池、超級電容以及逆變回饋裝置。主要設置在牽引變電所內，有維護方便和不增加列車重量等優點。由於捷運列車再生煞車之週期快又頻繁，蓄電池充放電速度慢的特性，故較不適宜用於捷運系統的軌旁儲能系統中。

綜合上述，除了逆變回饋型系統因其設備體積較大和電路設計較複雜，需設置在軌旁的牽引變電所內，其它裝置如飛輪、蓄電池、超級電容都可以依照各營運路段的需求設置在車載或是軌旁，下表1.4做了車載和軌旁的分析比較[18-20]。

表 1.4 儲能裝置在車載和軌旁的比較

位置	車載 (On-board)	軌旁 (Wayside)
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在設計適合的容量下，可以吸收全部的制動電能。 2. 可以減少線路的損失。 3. 可以抑制電網的峰值。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 沒有重量跟空間的限制。 2. 可以同時回收多部列車的煞車電能。 3. 可以減少電網的電壓降。 4. 在離峰可以儲存能量，可以在尖峰期使用。
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 增加列車重量。 2. 需要較大的空間設置。 3. 需要更新列車驅動電路的設計。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 充放電時都會有線路的損失。 2. 較遠的車輛要傳送所有的煞車能量到儲能系統是不可能的，因為會受到線路壓降的影響。

在根據文獻[18]的研究，詳細的對車載儲能系統和軌旁儲能系統做了定量的數據分析，如表1.5所示。

表 1.5 車載和軌旁儲能系統的定量數據[18]

	軌旁		車載	
	原始	理想	原始	理想
所需儲能設備的數量		6		5/車 × 11 車 = 55
儲能設備可用的容量 (kWh)		4.53		1.46
所需總能量容量(kWh)		27.18		80.3
節約能源 (%)				
高運量系統	11.7	16.1	19.6	26.3
中運量系統	17.1	22.3	22.8	29.3
低運量系統	25.7	33.4	29.3	35.8

由表1.5的比較可知，車載儲能系統理想上在尖峰、次尖峰及離峰時段所回收的再生煞車電能比軌旁儲能系統多，但車載儲能系統的儲能能量較低以及每列車所需裝設的數量較多，會增加列車的車重及建置的成本。軌旁儲能系統所需數量少，單一組儲能系統容量較大以及設置在變電站中，維修方便，但回收再生煞車電能較少。車載儲能系統與軌旁儲能系統各有利弊，如何做選擇視各捷運營運單位的需求與成本考量。

(五) 國外再生回收裝置應用實例

從經濟的角度來看，捷運系統的能源成本是交通運輸系統的主要關注焦點，交通系統將消耗大量的電能以維持大眾的運輸需求，各國也極力研究節能回收的策略與系統，下面將介紹一些在市場上已經經過驗證及被使用的儲能回收系統。

1. 德國西門子超級電容儲能系統

德國西門子在能量回收技術上投入了很大的研究，其中的 Sitras SES 系列靜態超級電容儲能系統使現代捷運列車的剩餘的煞車能量得以回收再利用成為可能[16]。此儲能系統採用雙層電容器(超級電容)為儲能的元件，超級電容能量儲存系統與現有的牽引變電站中的供電系統並聯操作，將剩餘的再生煞車電能回收。本系統主要特色為：每年減少能源需求可達 50 萬 kwh、節省營運的成本、提升系統供電可靠度、具有穩定電網電壓的作用、此系統有兩種操作模式：能量儲能模式及電壓穩定模式、SITRAS SES 充放電速度極快。

Sitras SES 靜態超級電容能量存儲系統由以下幾部分組成，系統的結構如圖 1.6 所示。

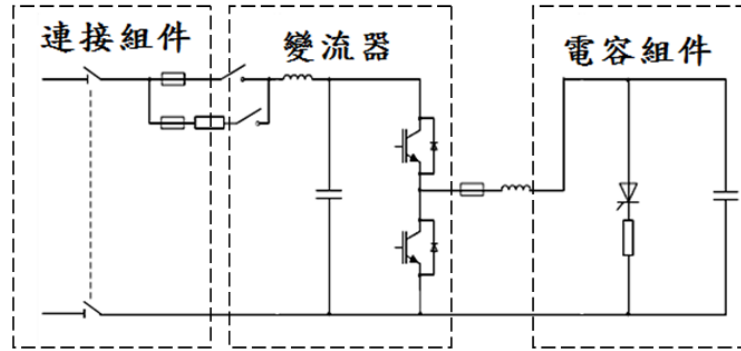


圖 1.6 超級電容儲能系統結構圖 [16]

本設備設計參數如表 1.6 所示。

表 1.6 SES 系統參數表 [16]

Technical data			
Input voltage (tolerance range according to EN 50163)	[VDC]	600	750
Total number of double-layer capacitors		1,050	1,344
Total Capacity	[F]	103	80
Usable Energy Content	[kWh]	1.7	2.5
Maximum Energy Saving Possible Per Hour	[kWh/h]	50	80
Peak Power	[MW]	1	1
Auxiliaries Supply (50 Hz)	[V]	3Φ AC 400	3Φ AC 400
Permissible Ambient Temperature	[°C]	-20~+40	-20~+40
Maximum Operating Height Above Sea Level	[m]	2,000	2,000
Dimensions of The Four Double Cubicles (width x depth x height)	[m]	1.4 x 0.7 x 2.7	1.4 x 0.7 x 2.7
- Cubicle + S1/+S2 and S3/+S4	[m]	1.2 x 0.9 x 2.7	1.2 x 0.9 x 2.7
- Cubicle + S5/+S6 and S7/+S8			
Weight	[t]	4	4.3

3. 德國西門子逆變回饋系統

德國西門子的 SITRAS TCI 系列為採用 THYRISTOR 控制逆變器的直流牽引供電系統，通過這樣的逆變器並聯連接，可以將剩餘的再生煞車電能回送到車站內的中壓電網，提供車站負載或其他列車使用[21]，如圖 1.7 所示。本系統主要特色為：可以將煞車能量傳輸到中壓電力系統，供給電能給較遠的負載。中壓電網通常是一個可以接受大能量的系統。車載煞車電阻的數量可以減少或維持在最小值。遠程參數的設置、控制和診斷，可以通過標準化的通信介面控制。堅固可靠的 Thyristor 控制技術。

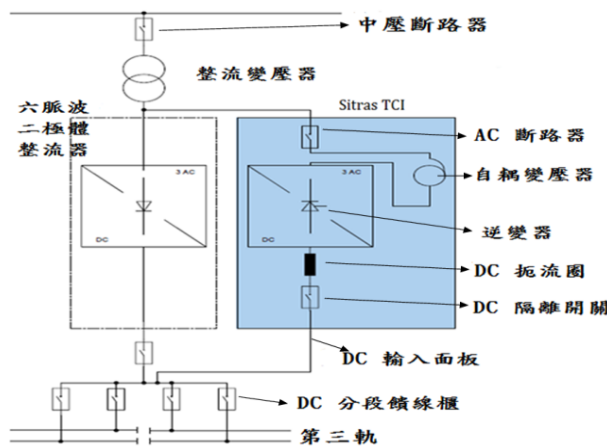


圖 1.7 逆變回饋架構圖 [21]

本系統設計參數如表1.7所示。

表 1.7 TCI 系統參數表[21]

Technical data t			
Nominal voltage	[V DC]	750	1500
Rated recovery current	[A]	3,000	1,000
	[A]	0	0
Efficiency		0.96	0.96
Auxiliary voltage	[V AC]	110~230	110~230
	or [V DC]	60~230	60~230
Width	[mm]	2,400	1,800 ²⁾
Height	[mm]	2,300	2,300
Depth	[mm]	1,000	1,000
Weight	[kg]	2,600	5,000
Maximum ambient temperature	[°C]	+40	+40
Maximum site altitude above sea level	[m]	1,000	1,000
Degree of protection acc. IEC 60529		IP20	IP20

3. 日本川崎鎳氫電池儲能系統

日本川崎重工公司在鐵路工業有長期經驗，使電池供電系統（Battery Power System, BPS）成功的經過驗證測試，已在紐約地鐵、大阪地鐵、東京單軌鐵路中使用[22]。

這套電池電力系統採用川崎重工自主生產的簡單安全、環境汙染較小、快速充放電的鎳氫電池，型號：30-K5 Type，作為儲能的元件，容量：141 Ah、36 V、5.1 kWh；

電池單體重量：250 kg；充放電電流：1C~5C， $C\ Rate = \frac{\text{充放電電流(A)}}{\text{容量(Ah)}}$ ；放電時間：12

分鐘；大小：1287×218×350 mm，電池電力系統示意圖如圖 1.8 所示。

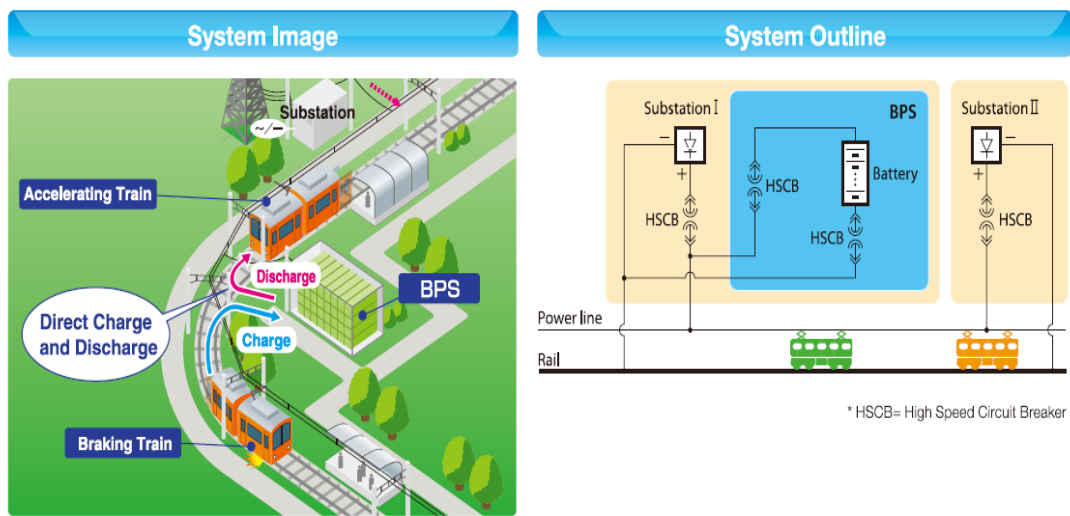


圖 1.8 電池電力系統示意圖[22]

根據日本川崎重工在東京特急鐵路的試驗結果，使用此電池電力系統設備裝置在附近的牽引變電站內，一年可以節省 1600 MWh，相當於 4.8% 的總能源消耗，有達到節能的功效[22]。對能量儲存型系統的蓄電池系統與超級電容系統產品做整理比較，如表 1.8 所示。

表 1.8 鎳金屬電池系統與超級電容儲能系統之比較

	川崎鎳金屬電池儲能系統	西門子超級電容儲能系統
單體參數	容量：141 Ah 36 V 5.1 kWh 大小：1287×218×350 mm 重量：單體約 250 kg	容量：2600 F 2.5 V 大小：60×60×172 mm 重量：單體約 0.8 kg
需要單體數量	19 個	1344 個
系統儲能能量	100 kWh	2.5 kWh
系統整體重量	17.3 tons	4.3 tons
節能效果	一年可節省 電能約 1600 MWh	一年可節省 電能約 500 MWh
循環壽命	約 500~2000 次以上	達 100000 次以上

由上表的比較數據可以知道鎳金屬電池系統儲能容量較大，當直流牽引系統發生跳電事故時，還可以提供站間列車緩慢運行到車站的電能，達到緊急疏散的優點，相反的超級電容的儲能容量較小，但充放電速度快，適合即充即用的場合，可以迅速反應在變電站的供電變化，若需要讓超級電容可以有讓列車緊急疏散的功能，則需要並聯多組超級電容設備以提升儲能容量，造成設備佔地空間加大，故若需要有列車緊急疏散的功能，鎳金屬電池儲能系統為較可行的選擇。

另外在表 2.9 中的電池循環壽命並不是單純依照充電次數來計算的，真正直接影響電池循環壽命的是深度放電的次數，即所謂的 DOD 值，目前國內的鋰電池在 100 % 深度放電（即 DOD 值是 100 %）情況下的循環壽命一般就在 200~300 次，國外質量好的電池可以達到近千次左右，多數的都是在 200~500 次之間，但如果這個 DOD 值是 50 %，那電池的循環壽命就會大幅提高，也就是說如果電池電量在用掉一半的時候充電，那麼循環壽命也會有相應的增多，所以並不是每充電一次都損失一次循環壽命，而是以電池 100 % 深度放電一次來視為循環壽命減少一次。

二、再生煞車能量之計算與儲能系統設計

在選擇使用何種儲能設備之前，最重要的課題是必須先確定儲能設備的容量等基本參數，藉由分析列車再生煞車的物理過程和再生能量回饋的特性，計算出再生煞車能量的大小，分析這些數據，才能確定儲能系統的電容量等參數，讓儲能系統得到有效的運用。

(一) 再生煞車能量計算

目前捷運列車煞車主要採用再生煞車和摩擦煞車，必要時使用電阻煞車，現在對再生煞車能量進行計算和分析[26]。

假設列車運行在最高速度80 km/h (22.2 m/s)，惰性運行一段時間後，開始煞車，速度降到5 km/h (1.389 m/s)以下時開始採用摩擦煞車，當再生煞車失效時再輔以電阻煞車。在不考慮節能坡的情況下，列車煞車時動能將轉換為再生煞車電能和熱能。其公式如(4-1)[15]：

$$E = \frac{1}{2}(MV_0^2 - MV_t^2) - F_w \cdot S \quad (4-1)$$

上式中：

M：列車總重量，單位為 kg

V_0 ：列車再生煞車時的初速度，單位為 m/s

V_t ：列車再生煞車時的末速度，單位為 m/s

S：煞車的距離，單位為 m

$F_w = (a+bV+cV^2) \cdot M \cdot g$ ，列車運行阻力，單位為 N。其中 a、b、c 為阻力參數，與列車類型有關的經驗常數；g 為重力加速度=9.8 N/kg。

為了簡化繁雜的計算過程，假設從最高速度80 km/h (22.2 m/s)開始煞車到速度為0 km/h 全程皆採用再生煞車，忽略列車運行阻力及不使用電阻煞車，可以將(4-1)式簡化得到如(4-2)的經驗公式[15]：

$$E = \frac{0.85(MV_0^2)}{2} \quad (4-2)$$

經過簡單的將數值代入(4-1)式與(4-2)式運算，兩式所得到的結果非常接近，誤差很小，故經驗公式(4-2)式是可以被使用的，也可以由比較(4-1)式與(4-2)式的結果得知(4-2)式中的0.85是有考慮摩擦煞車的情況下所得到的係數。

分析台北捷運板南線及文湖線的營運狀況，每天運行約18小時，其中4.5小時在尖峰時段；13.5小時在離峰時段，假設列車尖峰時平均每1分鐘煞車一次，離峰時平均每2分鐘煞車一次，則一部列車每天煞車共675次，全年運行365天，則全年總煞車246375次，並考量板南線與文湖線在尖峰時段和離峰時段的車重，離峰時段為列車每節車廂的座位坐滿(每節車廂有60個座位)，乘客重量以60 kg計算，所得結果如表2.1所示[27][28]。

表 2.1 尖峰與離峰時的車重表

板南線	空車車重	尖峰時段	離峰時段
	226 ton	341 ton	247.6 ton
文湖線	空車車重	尖峰時段	離峰時段
	78.2 ton	112.28 ton	83.96 ton

利用表4.1所示的列車重量以及經驗公式(4-2)計算，假設板南線和文湖線在初速度為80 km/h (22.2 m/s)開始煞車到末速為0 km/h，全程採用再生煞車以簡化計算，忽略列車運行阻力及不使用電阻煞車，可以得到單部列車運行一年所產生的再生煞車能量理論值，如表2.2及表2.3所示。

表 2.2 板南線單部列車運行之再生煞車能量

板南線	列車總重量(kg)	一次再生煞車能量(MJ)	一次再生煞車能量(kWh)	一年總煞車次數(次)	一年電氣煞車產生電量(kWh)
尖峰	341000	71.4	19.83	98550	1954246.5
離峰	247600	51.7	14.36	147825	2122767

表 2.3 文湖線單部列車運行之再生煞車能量

文湖線	列車總重量(kg)	一次再生煞車能量(MJ)	一次再生煞車能量(kWh)	一年總煞車次數(次)	一年電氣煞車產生電量(kWh)
尖峰	112280	23.5	6.5	98550	640575
離峰	83960	17.6	4.89	147825	722864.25

在設計規劃之初，無法有效得知列車詳細參數，可以從物理動力學的觀點出發，將列車採用最簡單的編組、車重等信息，由於列車運行阻力遠小於列車動能，可以忽略不考慮，利用公式(4-2)可以計算出再生煞車電能的理論值。

(二) 再生煞車能量之儲能系統設計

對台北捷運來說，平日每日載運量已逾165萬人旅次，因此，列車班次密集再加上列車的煞車次數頻繁，將產生很大的煞車能量。為了提供安全穩定的運輸，儲能設備必須要有充放電快速、可以穩定電網電壓、使用壽命長、系統可靠度高、可以長時間儲能以及在停電時還能提供列車電能的條件下，使用超級電容儲能系統會比較適合台北捷運的節能儲能方案，雖然初期建設成本較高，但使用壽命長及維護費用低等，後期可以在節省營運電能支出當中回收。

由前述的計算，板南線及文湖線單列列車在尖峰時段和離峰時段從最高速度開始煞車，板南線回饋到牽引電網的再生電能總量分別約為19.83 Kwh和14.36 kwh；文湖線回饋到牽引電網的再生電能總量分別約為6.5 kwh和4.89 kwh，在考慮離峰和尖峰時段會有約20%~80%的再生煞車電能會被鄰車吸收使用[3][4]，所以一列捷運列車煞車的再生煞車電能回饋到儲能系統的電能會比較少，表2.4為儲能系統實際所能回收的再生煞車電能。

表 2.4 儲能系統實際回收的再生煞車電能

路線	尖峰回收的再生電能 (kWh)	離峰回收的再生電能 (kWh)
板南線	3.97	11.49
文湖線	1.3	3.91

若考慮可以同時吸收兩列車的再生煞車電能，設計容量較大，建置成本太高，同時大部分再生煞車能量會被鄰車吸收使用，儲能設備不會達到有效利用，而且在離峰時刻儲能系統可以回收較多的再生電能，所以儲能設計容量以離峰為主要依據，板南線和文湖線分別為 11.49 kwh (41.36 MJ) 和 3.91 kwh (14.08 MJ) [29]。

由前述的分析，我們選用超級電容做為儲能裝置，台北捷運板南線的設計容量為 11.49 kwh (41.36 MJ)；文湖線為 3.91 kwh (14.08 MJ)，選用美國 Maxwell 公司生產的型號 PC2500C 超級電容單體，詳細參數在表 3-3，設定超級電容工作電壓 2.3 V；放電終止電壓為 0.7 V，由公式(4-3) 計算可得板南線及文湖線達到設計儲能容量所需的超級電容單體總數分別為 6382 個及 2173 個。

$$M \times N = \frac{2W_{\text{total}}}{C_0(V_{\text{max}}^2 - V_{\text{min}}^2)} \quad (4-3)$$

C_0 ：電容容量，取 2700 F

W_{total} ：電能能量大小，單位 J

V_{max} ：最高(額定)工作電壓，取 2.3 V

V_{min} ：最低工作電壓，取 0.7 V

M：並聯支路總數

N：單條並聯支路上串聯的電容個數

對於台北捷運 DC 750 V 供電網，牽引電網可允許的電壓波動範圍 500 V ~ 900 V DC，在供電網與儲能系統之間設有 DC/DC Converter 調整系統電壓對儲能系統進行充放電。設定板南線之超級電容儲能系統的最高工作電壓為 500 V，已知超級電容單體工作電壓為 2.3 V，則可算出每一條支路由 218 個電容串聯，再將這樣的支路並聯 30 組，使用這樣的串並聯組合方式的超級電容儲能系統，充滿電的最高電壓為 501.4 V，最低電壓 152.6 V，最大工作電流為 12 kA，滿足設定要求，即儲能系統設定電壓範圍在 160 V ~ 500 V DC。

根據超級電容串並聯的特性，可以計算得到板南線和文湖線的超級電容儲能系統的最大儲能、總容量等基本性能參數如表 2.5 和表 2.6 所示。

表 2.5 板南線超級電容儲能系統基本參數

項目	參數
最大儲能 (kwh)	11.49
最高電壓 (V)	500
最低電壓 (V)	160
最大工作電流 (kA)	12
總容量 (F)	371.56
等效電阻 (mΩ)	6.18
單體個數	218×30

表 2.6 文湖線超級電容儲能系統基本參數

項目	參數
最大儲能 (kwh)	3.91
最高電壓 (V)	500
最低電壓 (V)	160
最大工作電流 (kA)	4
總容量 (F)	123.85
等效電阻 (mΩ)	18.53
單體個數	218×10

(三) 台北捷運已營運路段檢討分析與執行建議

研究台北捷運列車系統，牽引電網可允許的電壓波動範圍500 V~900 V DC。當電壓範圍在650~900 V DC，可以維持全運轉特性，最大速度可達80 km/h；當電壓低於500 V DC將無法產生牽引力，此時列車會滑行直到停止[28]。當再生煞車電壓在超過900 V DC 時，列車的再生煞車電能將由列車煞車電阻消耗，再生煞車電壓越高，消耗再生煞車電能的時間也跟著越長，使牽引電網電壓不再上升，直到再生煞車電壓低於900 V DC，大部分的煞車電流經過煞車電阻，以熱能的方式消耗，使得隧道溫度上升以及再生煞車電能被白白浪費。因此考量裝設再生煞車電能回收設備，設定當再生煞車電壓介於850 V~900 V的範圍，啟動儲能系統，將剩餘的再生煞車電能回收，使電網電壓不再上升，避免再生煞車失效的情形發生。

由4.1節的計算可知，台北捷運板南線和文湖線一年的總再生煞車電能分別約為4077013.5 kwh和1363439.25 kwh，如果能回收部份的再生煞車電能，必能節省能源的消耗。一般來說，捷運列車電氣煞車中，電阻煞車佔比例大約40%，如果將電阻煞車能量的80%進行回收[9]，假設電費每度以3元計算，以台北捷運板南線及文湖線為例，將先前算得的總再生煞車電能乘以0.4得到電阻煞車的耗能，再回收電阻煞車的80 %能量，可以估算節省的電費支出如表2.7所示。

表 2.7 電阻煞車能量及節省電費

路線	一年電阻煞車能量 (kWh)	一年回收電量 (kWh)	一年節省電費 (萬元)
板南線	1630805	1304644	391.4
文湖線	545375.7	436300	130.9

由上表可知，有效的回收捷運系統消耗在煞車電阻的能量，可以達到節省捷運營運電費的支出，也可以改善隧道的環境溫度，所以回收捷運列車剩餘的再生煞車電能已成為現今節能綠化環境的研究目標。

分析電阻耗能型、逆變回饋型和能量儲存型等儲能策略、台北捷運營運需求以及比較儲能設備設置於車載或軌旁的特性，選用在軌旁牽引變電所設置超級電容儲能系統的架構比較適合台北捷運系統，原因如下：

1. 超級電容充放電快速，且具有穩定電網電壓的效果。
2. 超級電容儲存的電能可以提供緊急時刻用電或提供車站 380 V AC 用電負載使用。
3. 儲能設備安裝在牽引變電所可以回收多部列車的再生煞車電能。
4. 採用車載儲能系統，會增加列車重量和減少列車空間，且只能回收單部列車的再生煞車電能。
5. 如果每部列車都設再生煞車回收設備，建置成本太高且需要更改列車的電路結構。
6. 採用飛輪儲能系統，裝置零組件因摩擦造成使用壽命減短。
7. 採用逆變回饋儲能系統，會產生諧波，影響供電網的穩定。

基於以上的理由，在 2.2 節本文對再生煞車儲能系統的設計，採用超級電容儲能系統的架構去設計，設定在電網電壓達到 850 V DC 時，儲能系統開始回收再生煞車電能；當電網電壓低於 650 V DC 時，儲能系統開始釋放電能提供電網牽引電力。在離峰時刻儲能系統可以回收較多的再生煞車電能，在尖峰時將電能提供列車牽引電力或車站用電設備，雖然超級電容儲能系統初期建設成本較高，但系統使用壽命長、維護週期長、可提供緊急電源，以及減少通風散熱設備的耗能，在建設後期可以藉由節省支出的電費，回收建置成本，滿足台北捷運節能儲能設備的應用成本與經濟效益的需求。

在探討板南線及文湖線牽引變電所的空間之後，板南線的儲能設備可以設置於牽引變電站的電力用電池室周圍的空間；文湖線則因牽引變電站內已無多餘空間可以設置儲能設備，但可以考慮採用戶外貨櫃型式，安裝在高架軌道的下方空間，為目前較可行的辦法。

三、捷運板南線系統再生煞車能量之模擬計算

本研究報告使用 RAILSIM 第 8 版做為模擬軟體，RAILSIM 模擬軟體是由美國 SYSTRA 顧問公司所開發，主要應用於現代軌道系統之分析工具，此套軟體於 1990 年問世，到目前為止已

歷經多次改版，使該程式更趨於成熟及便於使用。主要使用列車性能計算(TPC)和電力潮流分析儀(LFA)兩部分作為捷運系統直流電力潮流分析的工具，並利用報告產生器(RG)將模擬結果輸出為Excel檔，以利分析模擬結果。板南線全線之牽引變電站(TSS)均處於正常供電，整流器額定均為6000 kW，模擬列車班距分別為110、120、180、240、300及360秒之牽引變電站情況，可得各TSS之尖峰負載與均方根負載值，而牽引整流器之過載容量採用IEC 60146-1-1責任等級六：1.5倍額定滿載2小時、3倍額定過載1分鐘。在模擬不同的列車班距之下，分析捷運板南線16座牽引變電站在1小時中的電能消耗如下表3.1所示。由表可以得知當列車班距逐漸的縮短，軌道上運行的列車數目逐漸增加，因此增加牽引變電站的電能消耗，電費的支出也會跟著上升，將尖峰班距從360秒縮短到120秒，每小時的牽引變電站總電能消耗將增加21281.54 kWh。

表 3.1 板南線 16 座牽引變電站在 1 小時中的電能消耗

列車班距 (s)	電能 (kWh)
360	12828.54
300	15713.75
240	18140.33
180	23720.57
120	34110.08
110	39237.02

(一) 板南線設置儲能設備之模擬結果

在板南線捷運系統設置儲能系統進行再生煞車電能回收，對舊有系統有什麼影響，由模擬結果為參考依據，在本節將探討板南線的牽引變電站安裝儲能設備後的電力潮流分析模組(LFA)的變化、牽引變電站的電能變化、再生能量回收成效及儲能設備的節能效果。表3.2為板南線在尚未安裝儲能設備時，各TSS電壓高於無載電壓795 V的時間(當電壓超過795 V，TSS的整流二極體將截止不再提供電能給第三軌)，由表中可以知道當TSS電壓高於795 V的時間越長，代表有較多的再生煞車電能存在而無法送回到牽引變電站，則在這些TSS安裝儲能設備之後可以回收到再生煞車電能也就越多。

表 3.2 板南線各 TSS 電壓高於 795 V 的時間表 (單位：秒)

班距	360 s	300 s	180 s	120 s
BL 36	1067	1261	795	799
BL 37	1088	1359	886	640
BL 39	1187	1370	871	1000
BL 40	1372	1351	1115	999
BL 01	1326	1345	1191	1037
BL 02	1231	1411	1220	1075
BL 04	1383	1351	947	902
BL 05	1217	1357	1015	1120
BL 06	1397	1376	1213	1173
BL 07	1262	1388	1251	942
BL 09	1276	1444	1096	788
BL 11	1219	1321	1008	618
BL 13	1203	1303	1044	399
BL 15	1113	1080	899	879
BL 16	1032	1024	728	854
BL 18	1045	1051	772	759

評估設置儲能系統是否可以減少用電契約容量，主要設定參數如表3.3所示。設置儲能設備的方式有兩種，分別為全部的TSS都設置儲能設備以及選定在班距為360秒時，TSS電壓高於795 V的時間高於1200秒的TSS設置儲能設備，其結果比較如表3.4所示。

表 3.3 板南線儲能設備參數

設定項目	參數
儲能容量	10 kWh
最低能量	0 kWh
初始能量	0 kWh
額定功率	1 MW
最大承受電流	12000 A
最低放電電壓	600 V
最高充電電壓	850 V
充、放電效率	90 %
功率損耗	5 kW
初始儲能設備平均電壓	750 V

表 3.4 板南線 TSS 有無設置儲能設備之比較

儲能設備設置情形	TSS 總電能 (kWh)	再生能量回收率 Receptivity (%)	節省電能(%)
班距 360 s，不設置儲能設備	12828.54	77.42	31.69
班距 360 s，每座 TSS 都設置儲能設備	8815.07	89.35	37.39
班距 360 s，選定適合的 TSS 設置儲能設備	9816.58	85.91	35.95
班距 120 s，不設置儲能設備	34110.08	92.58	37.88
班距 120 s，每座 TSS 都設置儲能設備	17925.15	95.58	39.97
班距 120 s，選定適合的 TSS 設置儲能設備	28485.65	93.24	38.99

由表3.3可知無論是每座TSS或是經過選定適合的TSS設置儲能設備，TSS提供的總電能都有降低。在班距為360秒時，每座TSS均設置儲能設備後，每小時可以節省約31.3 %的總電能需求；選定適合的TSS設置儲能設備後，則每小時節省約23.5 %的總電能需求。在班距為120秒時，每座TSS均設置儲能設備後，每小時可以節省約47 %的總電能需求；選定適合的TSS設置儲能設備後，則每小時可以節省約16.5 %的總電能需求，故設置儲能設備真的能夠達到減少電能需求，可以減少用電契約容量。

在建設初期，因預算問題或不確定實際成效而無法一次建設太多的儲能設備，需要減少儲能設備設置的數量，選擇最迫切需要的TSS站設置為可嘗試的方法，故在板南線選擇BL06、BL04與BL40這三站設置（在表3.2中，班距為360秒時，整流二極體截止時間最長之前三名），評估其成效如下表3.5所示。

表 3.5 BL06、BL04 與 BL40 設置儲能設備之比較

儲能設備設置情形	TSS 總電能 (kWh)	再生能量回收率 Receptivity (%)	節省電能(%)
班距 360 s，不設置儲能設備	12828.54	77.42	31.69
班距 360 s，僅 BL06 設置	12334.37	77.69	32.51
班距 360 s，僅 BL06 與 BL04 設置	11379.08	78.98	33.05
班距 360 s，僅 BL06 與 BL04 與 BL40 設置	11202.66	80.46	33.67
班距 120 s，不設置儲能設備	34110.08	92.58	37.88
班距 120 s，僅 BL06 設置	34060.98	91.88	38.42
班距 120 s，僅 BL06 與 BL04 設置	32905.11	92.23	38.57
班距 120 s，僅 BL06、BL04 與 BL40 設置	31905.15	93.04	38.90

由上表可以知道，在班距為360秒時，在設置1~3座儲能設備的情形下均有助於改善再生能量回收率、節省電能的效果與降低TSS總電能；反觀班距在120秒時，在設置1~2座儲能設備沒有改善再生能量回收率，主因為僅靠BL04與BL06這兩站的儲能設備是無法有效回收在班次如此密集下的再生煞車電能，因此至少需設置3座儲能設備的情形下才有望提升再生能量回

收率，因此在板南線的儲能設備至少需設置3座才可以在班距為360秒及120秒之間的班表調度之下均有助於再生電能的回收。

對現有的捷運系統設置儲能系統進行再生煞車電能回收後，應該要以不影響目前的行車安全為前提，則此儲能設備系統方可被採用。在表3.6顯示班距在360秒與120秒時，在選定適合的TSS設置儲能設備後，板南線各TSS的整流器尖峰負載值與均方根負載值，由此表可以得知安裝儲能設備系統之後，各個TSS的整流器負載值均符合整流器過載容量IEC 60146-1-1：1.5倍額定滿載2小時、3倍額定過載1分鐘的要求之內，故安裝儲能設備之後，不會影響列車運行之安全與電網之穩定。

表 3.6 板南線設置儲能設備之牽引變電站負載

TSS名稱	班距360秒		班距120秒		整流器組容量(kW) 連續/2小時/1分鐘
	尖峰負載 (kW)	均方根負載 (kW)	尖峰負載 (kW)	均方根負載 (kW)	
BL 36	4969.76	1008.98	5806.72	2083.17	6000 / 9000 / 18000
BL 37	5288.41	1440.48	7387.74	2747.03	6000 / 9000 / 18000
BL 39	4458.18	1213.52	11242.83	3479.98	6000 / 9000 / 18000
BL 40	3512.42	802.56	5802.01	2354.94	6000 / 9000 / 18000
BL 01	5780.82	1126.51	6423.01	2242.46	6000 / 9000 / 18000
BL 02	3682.43	1094	8024.56	2765.86	6000 / 9000 / 18000
BL 04	4449.87	1311.30	9540.48	3239.85	6000 / 9000 / 18000
BL 05	4403.66	1388.49	9650.12	3794.15	6000 / 9000 / 18000
BL 06	4581.51	1062.18	8002.27	3217.45	6000 / 9000 / 18000
BL 07	4168.33	1302.71	8704.34	3054.89	6000 / 9000 / 18000
BL 09	4161.02	1320.18	7485.79	2700.39	6000 / 9000 / 18000
BL 11	4018.50	1466.35	7324.14	2821.35	6000 / 9000 / 18000
BL 13	4030.77	1156.77	5681.28	2242.88	6000 / 9000 / 18000
BL 15	3907.54	1089.40	7959.59	3220.04	6000 / 9000 / 18000
BL 16	4341.69	1214.54	8241.08	3203.22	6000 / 9000 / 18000
BL 18	4898.38	1265.40	5739.82	2624.64	6000 / 9000 / 18000

牽引電網可允許的電壓波動範圍在500 V~900 V DC之間，當列車煞車時，第三軌電壓有可能超過900 V，評估設置儲能設備後對系統可靠度及安全性均無影響，是否進而可以拆除電聯車上局部的煞車電阻，因此分析板南線牽引變電站有無設置儲能設備對第三軌電壓的影響如圖3.1所示，由圖可知設置儲能設備後列車煞車時電壓不會上升至900 V，最高電壓為865.37 V，最低電壓為624.48 V，故儲能設備具有穩定第三軌電壓的效果，可以降低使用煞車電阻的次數，未來可以視營運情況逐步減少煞車電阻。

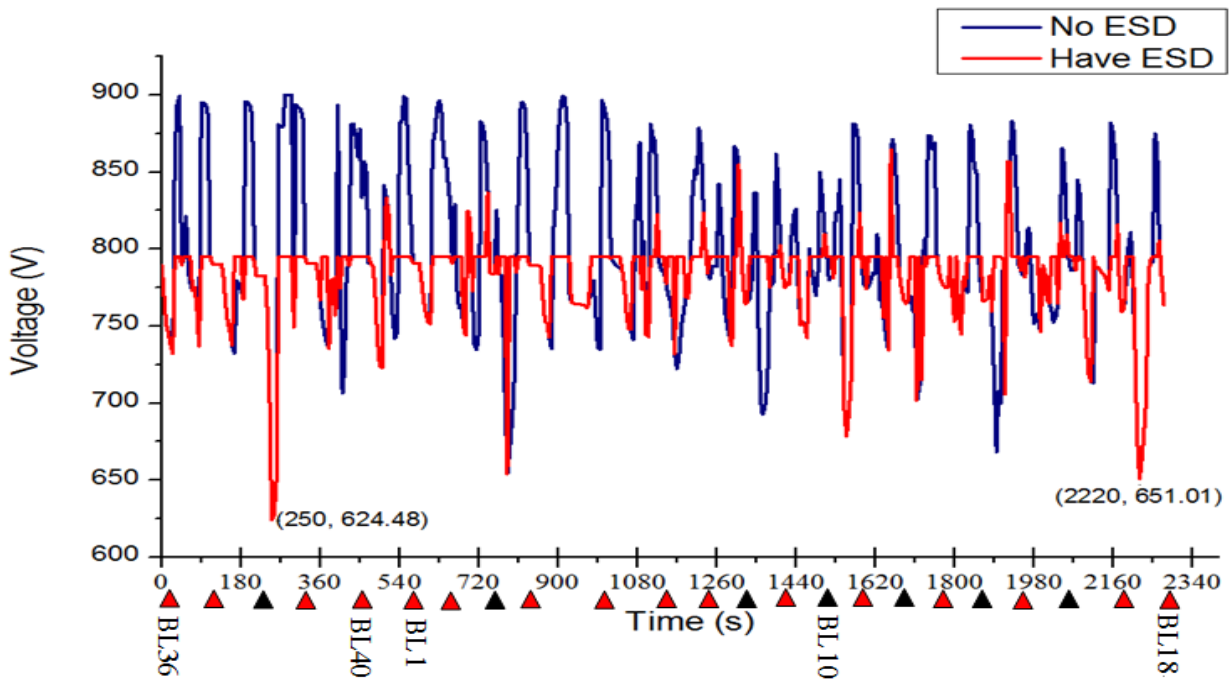


圖 3.1 板南線有無儲能設備對第三軌電壓的影響

(二) 板南線之儲能設備成本效益

建構儲能設備的成本對捷運營運單位的營運成本勢必會增加，需要運行多少年才能回收建置成本，所以其成本效益為各國捷運單位考慮的主要依據。首先需要知道在安裝儲能設備之後的尖峰時段與離峰時段的電能變化，然後再去評估成本效益。板南線尖峰時段的模擬數據已在表6.18所示；而板南線離峰時段從南港展覽館站－永寧站的列車班距為8分鐘一班，但因為從南港展覽館站－亞東醫院站屬於重疊區，班距最長不會超過4分鐘一班列車，故在此處的模擬離峰班距採用4分鐘且以W2的列車情況模擬有無安裝儲能設備的比較，結果如表3.7所示。

表 3.7 板南線離峰有無設置儲能設備之比較

儲能設備設置情形	TSS 總電能 (kWh)	再生能量回收率 Receptivity (%)	節省電能(%)
班距 240 s，不設置儲能設備	15201.61	88.23	32.21
班距 240 s，每座 TSS 都設置儲能設備	8385.47	94.64	34.55
班距 240 s，選定適合的 TSS 設置儲能設備	10572.7	92.5	33.77

由上表可知，板南線在離峰班距240秒時，無論是每座TSS或是選定適合的TSS設置儲能設備，TSS提供的總電能都有降低，分別減少6816.14 kWh和4628.91 kWh，再生能量回收率都有明顯的提升。比較表6.18與表6.21的再生能量回收率，顯示在離峰時段(240秒)可以被回收的再生電能比尖峰時段(360秒)多，再生能量回收率的提升也最多。

由於無法得知市場上有實際運行經驗的供應商其超級電容儲能設備之價格，因此僅單純考慮符合板南線之儲能設備費用一套約為1300萬元(以本實驗室購買的1顆2700 F超級電容為1800元計算，滿足10 kWh 需要5556顆，假設控制電路約為300萬)，但不包含土建、環控、消防與維護等費用。板南線列車全年運行365天，每天18小時，其中列車每天以尖峰W3的情況運行4.5小時，以離峰W2(班距為240秒)的情況運行13.5小時，利用表6.18與表6.21的結果以及電費用每度3元計算，可得每年板南線的節省電能與成本效益如表3.8所示。1年可節省電能之計算公式為：

$[(\text{尖峰有無儲能設備的TSS總電能差}) \times 4.5 + (\text{離峰有無儲能設備的TSS總電能差}) \times 13.5] \times 365。$

表 3.8 板南線的成本效益

設置數量	設備成本	1年可節省電能	1年可節省電費	回收年限
班距 360 秒，設置 16 座儲能設備	20800 萬元	40178.65 MWh	12053 萬元	約 1.72 年
班距 360 秒，設置 10 座儲能設備	13000 萬元	27756.10 MWh	8326 萬元	約 1.56 年
班距 120 秒，設置 16 座儲能設備	20800 萬元	60170.25 MWh	18051 萬元	約 1.15 年
班距 120 秒，設置 10 座儲能設備	13000 萬元	32047.08 MWh	9614 萬元	約 1.35 年

板南線離峰班距均設為240秒；尖峰用360秒與120秒兩種班距來評估，尖峰班距從360秒縮短到120秒，每年尖峰時段的用電電費將會增加6746.3萬元，但由上表的結果可知，班距從360秒縮短到120秒，無論設置16座或10座儲能設備，每年可以節省的電能均增加，儲能設備的利用率可以提升13.39%~33.23%，而且回收設置成本的時間縮短，但無論在班距為360秒或120秒時設置儲能設備，均可以節省電能與達到節省電費支出的效果。

四、整體評估與總結

(一) 評估儲能設備之成效

本報告蒐集國內、外捷運各類機電核心系統節能、儲能設(措)施應用之相關資料，無論是逆變回饋系統、飛輪儲能系統、電池儲能系統以及新興的超級電容儲能系統均具有達到節省電能與儲存再生電能的效果。台北捷運列車系統，牽引電網可允許的電壓波動範圍在500 V~900 V DC之間。當再生煞車電壓超過900 V DC時，列車的再生煞車電能將由列車煞車電阻放電，再生煞車電壓越高，放電的時間也跟著越長，大部分的煞車電流經過煞車電阻，以熱能的方式消耗，使得隧道溫度上升以及再生煞車電能被白白浪費。

本研究報告希望設置儲能設備之後可以回收再生煞車電能與降低煞車電阻的使用率，因此利用軌道列車軟體RAILSIM模擬板南線列車的TPC、LFA與設置儲能設備之後的成效。由模擬結果也驗證了儲能設備是具有提升再生能量回收率與減少牽引變電站的電力供應；由模擬結果亦可得知儲能設備具有穩定電壓的效果，使第三軌電壓不會超過900 V，而不會將再生

煞車電能消耗在煞車電阻上，故列車可以移除或減少煞車電阻，減輕列車車重，列車輸出的牽引力也可以減少，達到節電的效果。但基於系統安全考量，初期建置儲能系統之後不建議馬上移除全部的煞車電阻，應視營運情況穩定之後再逐步減少。

近幾年超級電容因具有功率密度高、循環壽命長、充放電速度快等特性而受各國研發單位的重視，目前主要有美國、俄羅斯、日本、中國與韓國等先進國家投入研發[43]，在本研究案的儲能設備也採用超級電容為儲能元件進行評估，而本實驗室有針對超級電容快速充電的研究[44]，其輸出電壓為600 V，超級電容器容量為5 kWh，可以在23秒快速充滿超級電容，在0秒到13秒為定電流充電，13秒到23秒轉為定電壓充電，其模擬如圖3.2所示。以板南線車站時間25秒來說，可以在乘客上下車的時間內就可以充滿超級電容，可見超級電容充放電之快速，達到省時與儲能之效果。

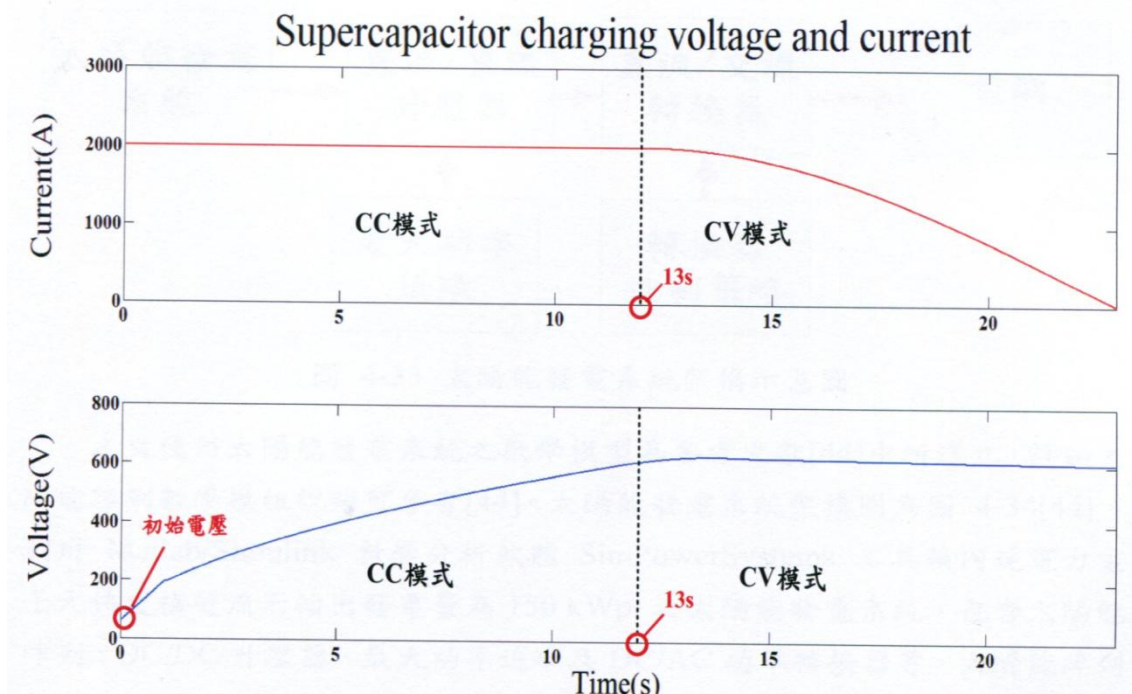


圖 3.2 超級電容充電電流和充電電壓圖[44]

(二) 適合台北捷運儲能設備之規範

總結儲能設備系統的整體運作架構可以如圖3.3所示[45]，簡單來說系統可以劃分成再生時段和用電時段兩部分來看。無儲能系統在再生與用電時段會造成電網電壓有很大的變動；相反的有儲能系統，在處於再生時段時，儲能設備視為一吸收負載，吸收電網多餘的電能，以達到穩定電網電壓的效果，在處於用電時段時，儲能設備將吸收的電能提供給列車負載使用，因此牽引變電站可以減少電能的輸出，以達到節省電費的支出。

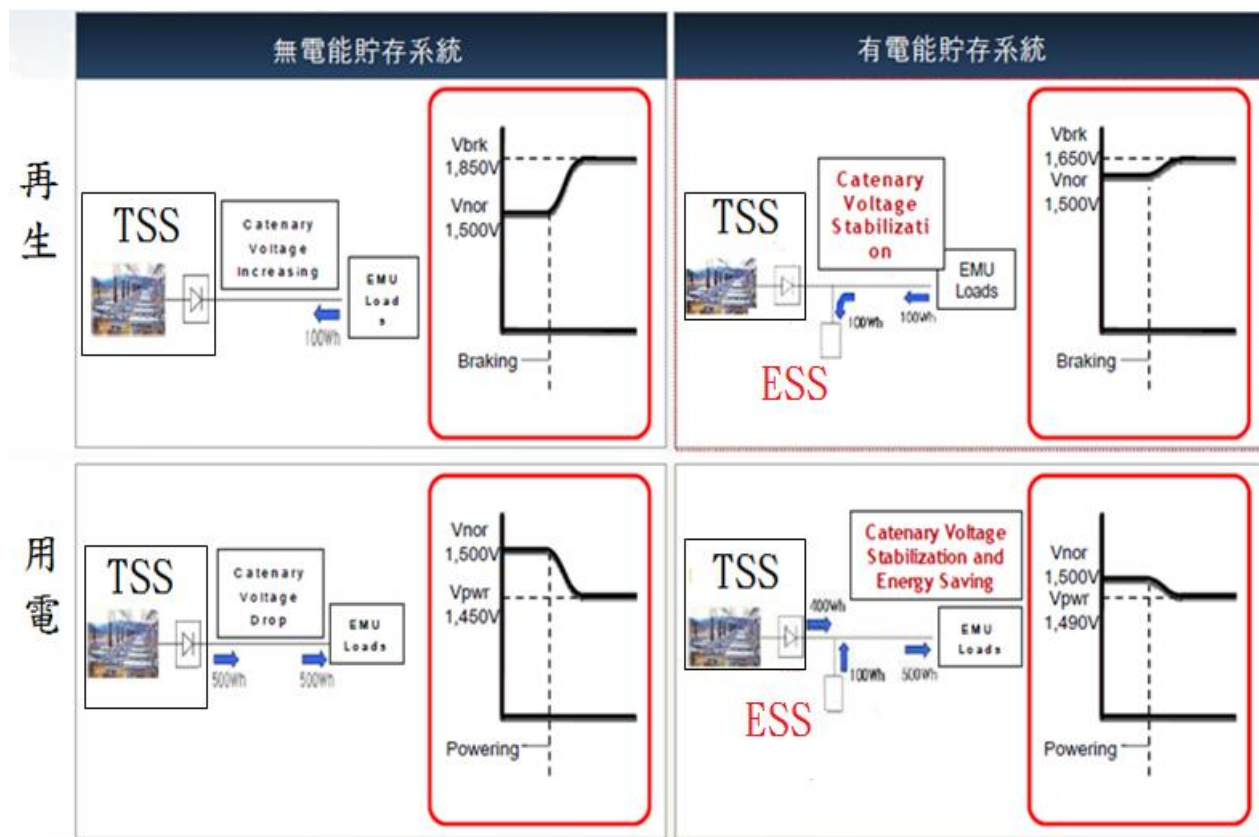


圖 3.3 儲能系統的整體運作架構圖 [45]

在建置台北捷運儲能設備的同時，除了知道儲能系統的運作架構，也要考慮儲能設備能否符合台北捷運的機房環境、設備需求的空間、附屬搭配措施以及對現有捷運系統之影響，於既有路網各車站採行之可行性評估，使儲能設備可以有效的發揮以及延長使用之壽命，以下說明適合台北捷運之儲能設備需要符合的條件規範[16,21-22]：

1. 系統公稱電壓為 750 VDC，最小電壓 500 VDC，最大電壓 900 VDC，額定功率 1~2 MW，在板南線最大可承受電流達 12 kA；在文湖線最大可承受電流達 4 kA。
2. 工作環境溫度可在 0 度~40 度。
3. 最大工作高度可達海平面上 2000 公尺。
4. 設備的防護等級至少需有 IP20 或以上的等級。
5. 儲能設備儲存之電能欲提供車站用電需可以輸出為台北捷運車站用電負載所需的 3ΦAC 380 V。
6. 儲能設備可以透過並聯擴充儲能容量。
7. 儲能設備有現場控制系統、電力監控系統與標準化的通信介面控制，讓監控人員在行控中心得以遠端控制。
8. 儲能設備的充放電可以在駐站的時間內完成，使儲存的再生電能可以即充即用，不影響往後儲能設備抑制網壓的功能。
9. 提出儲能設備符合規定認證標準與節能測試報告，如 EN 50121-5：2006 Railway applications、EN 60146-1：2010 Semiconductor converters 與 CE、UL 安全認證。
10. 系統供應商必須能提供軌道交通的儲能解決方案與至少 2 年以上的實務經驗累積。

11. 需有儲能系統的電氣保護機制，如過流保護、手動保護、儲能斷路保護與聯鎖保護等。
12. 儲能元件應採用超級電容，且最低使用壽命至少 10 年。
13. 儲能設備的電纜表面與內部銅線必須有足夠的抗氧化保護接觸面；必須標示正確的極性和保護措施，以防止在安裝過程中意外短路，並根據故障級別和電氣規範要求電纜大小。

在蒐集的資料當中，得知目前有在生產研發超級電容儲能設備的廠商有德國西門子、德國ABB以及韓國WOOJIN等等[16,45-46]，這些廠商的產品都有實際運用在軌道交通上面的實例，未來本局可以委託顧問公司去取得詳細的設備規格、運轉成效與整體建置之成本，以評估在未來新建路線上設置儲能設備的利弊。

在探討既有板南線及文湖線牽引動力配電室空間後，發現板南線的儲能設備可以設置於牽引動力用電池室周圍的空間；文湖線則因牽引變電站內已無多餘空間可以設置儲能設備，儲能設備體積將是重要的關鍵因素，但就整體可行性而言，現有已營運路網要增設此儲能裝置均有一定之困難度，比較有可能於未來新路線設置此項具環境保護之設施。因此未來在規劃新建的捷運路線時，需將設置儲能設備的空間與管線一併考量，在建設初期可以分析評估列車在新建路線上測試運行的列車運行資料與電力潮流資料，應用在新路線規劃時可以評估減少變電站安裝的設備容量與支出[45]，並決定儲能設備容量與裝設之位置。

五、結論

隨著未來能源價格的逐漸上漲，捷運營運單位的電費支出勢必隨著時間不斷增加，加上環保意識的提升，積極的減少能源的消耗為世界各國努力研究的課題。

本研究計畫在初期為蒐集國內、外各捷運營運單位回收再生煞車電能的策略，分析比較電阻耗能型、逆變回饋型和能量儲存型等儲能策略的優缺點，比較儲能設備設置於車載或軌旁的特性，透過物理公式計算，得到台北捷運板南線及文湖線的再生煞車能量可以回饋到儲能設備的電能理論值，最後利用軌道系統軟體模擬得到的模擬值，將表4.2與表6.2~6.5分析比較，可知兩者所得的數值相當接近，說明物理公式的計算是可以用來估計單部列車在站間運行產生的再生煞車電能。

為了提供台北捷運營運的安全和穩定的運輸，儲能設備必須要有充放電快速、可以穩定電網電壓、使用壽命長、系統可靠度高、可以長時間儲能以及在停電或緊急狀況時還能提供列車電能，所以採用超級電容做為儲能系統是比較適合台北捷運的節能儲能方案，完成了超級電容儲能的系統參數設計，雖然超級電容儲能系統初期建設成本較高，但使用壽命長、維護費用低，以及減少通風散熱設備的耗能，在營運後期可以在節省電費支出當中回收，滿足台北捷運節能儲能設備的應用成本與經濟效益的需求。

本研究案在中後期根據台北捷運的營運狀況，選擇適合台北捷運的儲能策略，並以台北捷運高運量的板南線及中運量的文湖線為研究對象，利用RAILSIM分別完成板南線與文湖線列車的TPC模擬、LFA模擬與設置儲能設備的成效與經濟效益的評估，提出適合台北捷運之儲能設備需要符合的條件規範。

現階段經濟效益評估結果雖極有可能不敷成本概念，而目前的超級電容儲能設備價格較高，在成本效益評估，採樂觀評估則需要約2~3年的時間才能回收建置儲能設備的成本，且不包含土建、環控、消防與維護等費用，但是超級電容壽命長可以減少設備維護的費用，若5

年至10年後科技進步神速後，或許建設經費將有可能大幅下降，回收投資成本的時間將縮短，將更符合經濟效益，因此朝著綠色環保之研究方向來看，這也是執行本研究案之意義所在。

在未來建設儲能設備之後，可以導入電網級儲能的概念，把所有可以回收的二次電能儲能裝置予以統合收集篩選及加以利用串併聯組合，經濟有效的電網級儲能系統對再生能源的助益為增加再生能源的穩定性；降低尖峰時的供電成本，進而降低電費支出，提供經濟效益；提供有效的負載管理機制；改善系統的可靠度、穩定度以及電力品質[47]。

參考文獻

1. 林仁生，陳勇全，「軌道機電系統概論」，高立圖書有限公司，民國九十三年1月初版。
2. 陳穗九，「地鐵列車制動電阻設置的探討」，都市快軌交通，第22卷第2期，2009年4月。
3. 王彥崢，蘇鵬程，「城市軌道交通再生電能回收技術方案的研究」，電氣化鐵道，第2期，第37-39頁，2004。
4. H. Lee, G. Kim, S. Oh, C. Lee, "A Study on Energy Storage System for Gold Line of LA Metro," IEEE Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, 2009.
5. 蕭永豐，「臺北捷運電聯車再生電力利用評估研究」，碩士論文，台灣科技大學電機工程系，民國九十二年七月。
6. 劉培棟，王衛東，容仕寬，「再生制動吸收裝置在重慶輕軌中的應用」，都市快軌交通，第19卷，第3期，第84-86頁，2006年6月。
7. M. Thong, M. Ho, P.S. Siow, "Energy Conservation Measures for Rapid Transit System in Singapore," IPEC International Power Engineering Conference, Singapore, Nov. 2005.
8. Y.S. Tzeng, R.N. Wu, N. Chen, "Electric Network Solutions of DC Transit System with Inverting Substations," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.47 No.4, pp.1405-1412, Nov.1998.
9. 楊儉，李發揚，宋瑞剛，方宇，「城市軌道交通車輛制動能量回收技術現狀與研究發展」，鐵道學報，第33卷，第2期，第26-33頁，2011年2月。
10. 張邦力，「飛輪儲能裝置在機車車輛上的應用研究」，碩士論文，中國西南交通大學，2011年5月。
11. 許愛國，「城市軌道交通再生制動能量利用技術研究」，博士論文，南京航空航天大學自動化學院，2009年9月。
12. 張育宗，「捷運列車車載電池儲能系統之再生制動分析」，碩士論文，彰化師範大學工業教育與技術學系，民國九十九年五月。
13. J. W. Dixon, M. Ortúzar, E. Wiechmann, "Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter," Catholic University of Chile, Department of Electrical Engineering, Correo 22, 2011.
14. A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Diez, H. Biechl, "Ultracapacitor Assisted Regenerative Braking in Metropolitan Railway Systems," IEEE Intelligent Transportation Systems Symposium, Bogota, Colombia, 2012.
15. 曾之煜，「地鐵逆變回饋型再生制動能量吸收裝置仿真研究」，碩士論文，中國西南交通大學，2012年5月。
16. SIEMENS, Citras SES, Energy System for Mass Transit Systems.

17. 連鵬飛,「深圳地鐵 2 號線工程再生制動能量吸收裝置設置方案研究」,鐵道工程學報,第 6 期,2007 年 6 月。
18. R. Barrero, X. Tackoen, J. Mierlo, “Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network,” Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part F : Journal of Rail and Rapid Transit, 2010.
19. A. Karal, K. Mardikyan , S. Baran, “Application of Regenerative Braking Energy to Istanbul Metro Operation System,” IEEE Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy, 2012.
20. J.G. Yu, M.P. Schroeder, D. Teumin, “Utilizing Wayside Energy Storage Substations in Rail Transit Systems— Some Modeling and Simulation Results,” Technical Forums Energy, Environment, & Transit, Vancouver, Canada, 2011.
21. SIEMENS, Sitras TCI, Thyristor Controlled Inverter for DC Traction Power Supply.
22. Kawasaki Heavy Industries. Ltd, Battery Power System (BPS) for Railways, Dec.2012.
23. 吳曜先,「動力電池模組電量平衡之研究」,碩士論文,台灣科技大學電機工程系,民國一百年七月。
24. 林素琴,「大好前景-鋰電池材料發展分析」,工研院電子報,第 9810 期,2009 年十月。
25. 劉偉,「基於超級電容的地鐵再生制動能量存儲利用研究」,碩士論文,中國西南交通大學,2011 年 5 月。
26. 曾建軍,林知明,張建德,「地鐵制動能量分析及再生技術研究」,電氣化鐵道,第六期,第 33-36 頁,2006。
27. 台北市政府捷運工程局,內湖線牽引電力系統分析,民國九十五年八月。
28. 台北市政府捷運工程局,南港線東延段牽引動力直流分析,民國九十八年四月。
29. 繆曉宇,曾之煜,方雨函,「基於超級電容的再生制動能量吸收裝置分析」,電氣化鐵道,第 23 卷,第 4 期,第 44-47 頁,2012。
30. “TPC-LFA User Manual-Train Performance Calculator and Load Flow Analyzer of RAILSIM Simulation Software Suit V7,” SYSTRA Consulting Inc, 2003.
31. 黃郁文,「捷運供電系統分析及負載轉供研究」,碩士論文,台灣科技大學電機工程系,民國九十四年六月。
32. B. Mellitt, Z.S. Mouneimne, C.J. Goodman ,“Simulation Study of DC Transit Systems with Inverting Substations,” Electric Power Applications, IEE Proceedings B, pp.38-50, March ,1984.
33. 台北市政府捷運工程局,南港線東延段列車運行模擬及牽引動力系統分析,民國九十八年四月。
34. 台北市政府捷運工程局,“TRACTION POWER SYSTEM STUDY ,” Submittal No. 4031-0, July, 1994.
35. IEC 60146-1-1, Semiconductor Converters, General Requirements and Line Commuted Converters, Part 1-1 : Specifications of Basic Requirements, 1991.
36. R. Barrero, R. Tackoen, J. V. Mierlo, “Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction In a Metro Network,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2010.

37. Kachitvichyanukul, Voratas. "Comparison of Three Evolutionary Algorithms : GA, PSO, and DE," KIIE, 2012.
38. M. Miyatake, H.Ko, "Numerical Analyses of Minimum Energy Operation of Multiple Trains Under DC Power Feeding Circuit," European Conference.2007.
39. J.F. Chen, ; R.L. Lin, ; Y.C. Liu, "Optimization of an MRT Train Schedule : Reducing Maximum Traction Power by Using GA," Power Systems, IEEE Transactions on, pp.1366-1372, 2005.
40. 台北市政府捷運工程局，內湖線牽引電力系統分析，民國九十五年八月。
41. 台北市政府捷運工程局，台北都會區捷運系統工程內湖線 CB410 區段標工程，民國九十五年六月。
42. 郭家和，「新一代之內湖線電聯車系統」，捷運技術半年刊，第 40 期，第 127-136 頁，民國九十八年七月。
43. 林宜慶，「超級電容技術發展與應用趨勢分析」，車輛研究測試中心，民國九十八年六月。
44. 李泓震，「含超級電容的電動公車快速充電站探討」，碩士論文，台灣科技大學電機工程系，民國一百零二年七月。
45. WOOJIN Technology Co. LTD, "Energy Storage System," 產品介紹簡報檔, May, 2013
46. ABB Group, "ENVILINETM EMS – Energy Management System for Train Braking Energy Recovery," 產品介紹簡報檔, September, 2013.
47. 楊昌中，「電網級儲能系統及併網技術研發」，能源知識庫，工業技術研究院，民國一百零二年四月。