

直流供電捷運系統中牽引變電站之設置 對軌道特性的影響

李建興¹ · 王心民²

摘要

隨著社會經濟的發展與科技的進步，世界各先進國家為了解決城市都會區之交通擁擠問題，已極力推展具有低污染、低耗能、運量大、安全性佳、運輸效率高、佔用土地少等優勢之軌道運輸系統。大部分捷運系統採用直流供電方式經由導電軌或稱第三軌來提供電聯車動力，其直流電力乃由交流電源經整流後所提供。由於電聯車之車行鋼軌對地電阻低，導致部份經車行鋼軌回流至供電系統負端之牽引電流或稱回流電流將經由鋼軌洩出，而造成許多負面影響如車行鋼軌對地電位之上升因而影響人員的安全及造成捷運系統周邊金屬結構之電化學腐蝕影響設備的壽命，此種由軌道洩出之電流稱為洩漏電流或雜散電流。本文之目的在探討直流供電捷運系統中牽引變電站之設置對軌道特性的影響。

關鍵詞：雜散電流、捷運系統、接地系統、非接地系統、二極體接地系統、接觸電位

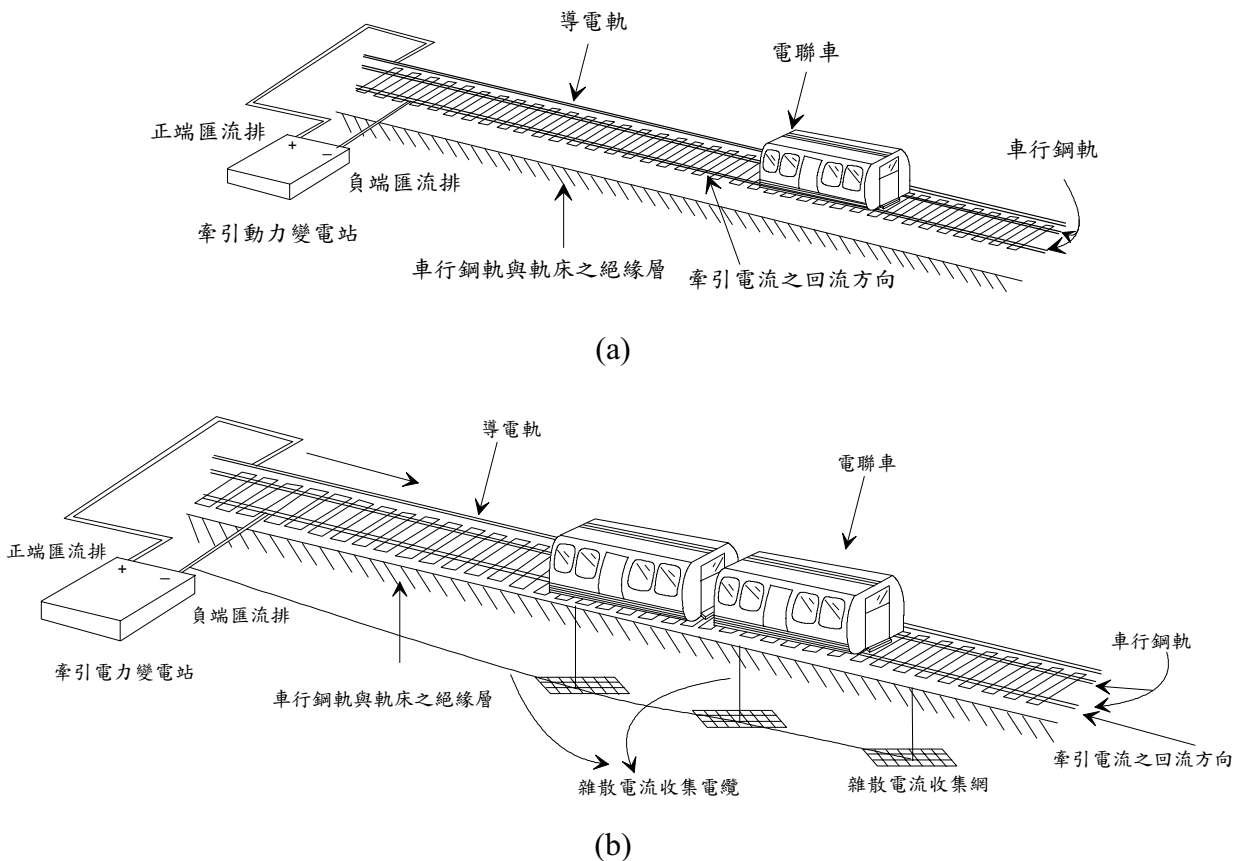
1 義守大學電機工程學系 助理教授

2 義守大學電機工程學系 助理教授

一、簡介

隨著時代的進步，電車系統已逐漸成為先進國家解決空氣污染及交通壅塞的重要方法之一，於1887年第一個以直流電力作為電聯車行駛之牽引動力的系統架設後[1]，許多短程電車系統逐漸開始採用直流電力供應電聯車行駛時所需之動力，但伴隨而來的卻是系統所生成之雜散電流所造成的電化學腐蝕(Electro-Chemical Corrosion)問題以及站內步間電位(Step Voltage)與接觸電位(Touch Voltage)過高的問題，因而針對軌道特性所作的研究也相繼展開。

一般常見的直流供電牽引系統為經由沿著系統設置的牽引動力變電站供電至導電軌(Conductor Rail)或稱第三軌(Third Rail)於電聯車行駛時使用，其牽引電流則將經由車行鋼軌(Running Rail)回流至牽引動力變電站之負端匯流排，其簡易系統架構如圖一a所示，而其軌道下方通常設置截流網以收集由軌道所漏洩之回流電流如圖一b所示。



圖一 簡易捷運直流供電系統示意圖

直流供電牽引系統中，牽引動力變電站負端匯流排採直接接地的方式架設一般被認為是最符合人員安全之設計，因為系統直接接地，可使得變電站處的接地電位無時無刻皆保持於零準位的附近，但其缺點為軌道與大地間的絕緣不良，將使得經由軌道回流的牽引電流有機會從軌道洩漏至大地，並經由地底下阻抗較低之金屬結構如建築物之鋼筋

結構或地下輸油管線為路徑回流至牽引動力變電站之負端匯流排，並且會在流出該金屬結構物的地方造成電化學腐蝕而破壞結構物進而縮短結構物及軌道本身的安全使用年限。

變電站負端匯流排處以浮接的方式可降低牽引電流從軌道洩漏，但系統浮接將使變電站處的接地電位有可能高於或低於大地電位數十伏特的情形，此乃非接地系統最大的缺點；為使雜散電流的生成量及變電站處接地電位浮動的情形能控制在某範圍內，可利用二極體單向導通的特性，將變電站負端匯流排經由二極體接地，以避免當電聯車行駛造成變電站處軌道電位上升時，有電流從變電站處直接洩漏至大地的情形，但二極體接地的方式其技術層面的要求較嚴格，成本方面也較其他兩種接地方式來的高，因而與抑制電蝕的成本相較並不一定經濟可行。

一般來說，軌道每公里之電阻值、軌道與大地間每公里之電導值、牽引變電站之接地方式、牽引電流值以及牽引變電站之設置方式將會影響軌道的特性如軌道電位或雜散電流。本文之目的將只探討直流供電捷運系統中牽引變電站之設置對軌道特性的影響。

二、影響軌道特性的因素

由於車行鋼軌在目前的研究上並沒有一特定的數學模型，所以其在電力上的特性將其視為一傳輸線模型[1-4]，也就是電車所汲取之牽引電流在經由軌道回流至牽引動力變電站負極匯流排時，將軌道視作傳輸線，並且為了簡化分析，假設此傳輸線系統的參數為均勻不變的，亦即軌道電阻 R 及軌道對地導納 G 皆為不隨時間及位置改變的已知常數，以此可求得軌道上任意點之軌道電壓及軌道電流的特性方程式(1)及(2)。

$$i(x) = c_1 e^{\gamma x} + c_2 e^{-\gamma x} \quad (1)$$

$$v(x) = -R_0 (c_1 e^{\gamma x} - c_2 e^{-\gamma x}) \quad (2)$$

定義

$$\gamma = \sqrt{RG} = \text{傳輸常數(Propagation Constant)}$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{R}{G}} = \text{特性阻抗(Characteristic Resistance)}$$

其中 R 表示軌道每公里之電阻， G 則為每公里軌道與大地間之電導。根據圖一以及方程式(1)與(2)可得到影響軌道特性的因素主要為：

1. 軌道每公里之電阻值。
2. 軌道與大地間每公里之電導值。

3. 牽引變電站之接地方式 [5]。
4. 牽引電流值。
5. 牽引變電站之設置方式。

此處針對牽引變電站之設置方式，將其分做兩部分作探討：(A)牽引變電站之間距對軌道特性的影響，(B)兩變電站間設有旅客轉運站時對軌道特性的影響。並以牽引變電站處為浮接時，經由兩變電站供應單一系列車行駛時之情形作電腦模擬並比較其結果。

1. 牽引變電站之間距對軌道特性的影響

非接地系統，又可稱作高電阻接地系統，意思是指牽引變電站的負極匯流排採浮接(Floating)或經由一高電阻接地，圖二所示為雙電源單一電車的直流供電牽引系統的簡易架構，圖中 P_1 及 P_3 表示位置固定之牽引動力變電站(TSS)， P_2 表示會移動之電車負載。為簡化計算，本文將假設軌道參數皆為均勻的，所以軌道與大地的特性將不隨時間以及位置而改變，如此則可求得方程式(1)及(2)中之未知常數如方程式(3)到(6)所示

$$c_1 = \Delta^{-1} [-(1-k_2)e^{-\gamma\ell} I_{11} + (1+k_1)I_{12} + (1+k_1)k_p \frac{I_1}{2}] \quad (3)$$

$$c_2 = \Delta^{-1} [(1+k_2)e^{\gamma\ell} I_{11} - (1-k_1)I_{12} - (1-k_1)k_p \frac{I_1}{2}] \quad (4)$$

$$c_3 = \Delta^{-1} [-(1-k_2)e^{-\gamma\ell} I_{11} + (1+k_1)I_{12} + (1+k_1)k_p \frac{I_1}{2}] + \frac{I_1}{2} e^{-\gamma\ell_0} \quad (5)$$

$$c_4 = \Delta^{-1} [(1+k_2)e^{\gamma\ell} I_{11} - (1-k_1)I_{12} - (1-k_1)k_p \frac{I_1}{2}] + \frac{I_1}{2} e^{\gamma\ell_0} \quad (6)$$

其中

$$\Delta = (1-k_1)(1-k_2)e^{-\gamma\ell} - (1+k_1)(1+k_2)e^{\gamma\ell}$$

$$k_1 = \frac{R_0}{R_{210}}$$

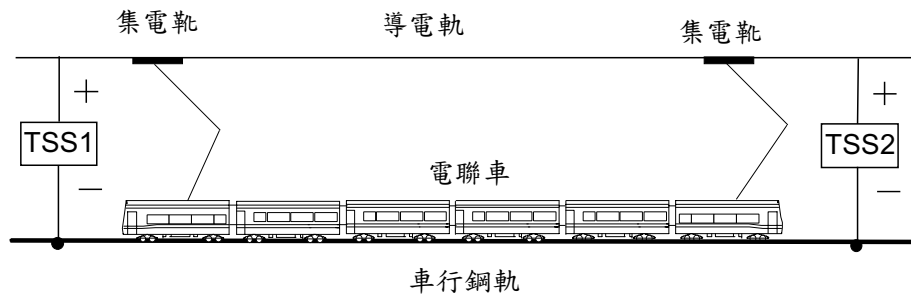
$$k_2 = \frac{R_0}{R_{221}}$$

$$k_p = (1+k_2)e^{\gamma\ell_p} + (1-k_2)e^{-\gamma\ell_p}$$

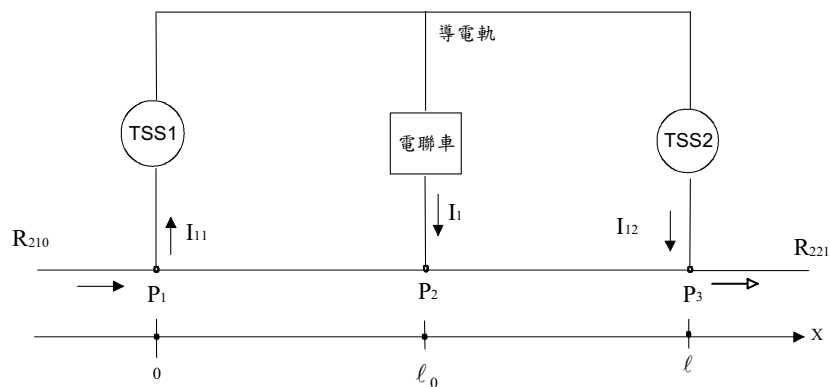
R_{210} 為 TSS1 前端軌對地等效輸入電阻(Ω)

R_{221} 為 TSS2 前端軌對地等效輸入電阻(Ω)

ℓ_0 為電聯車所在位置



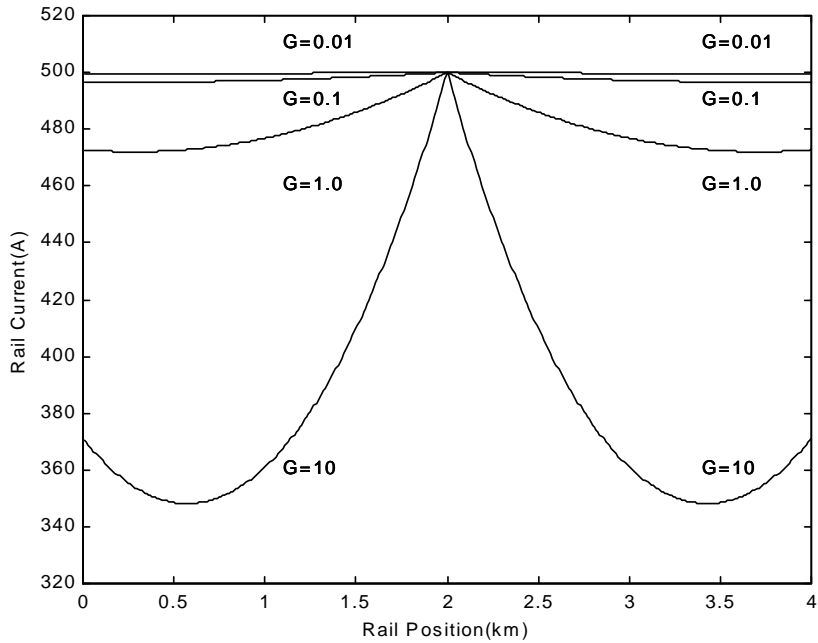
(a) 供電系統之簡意圖



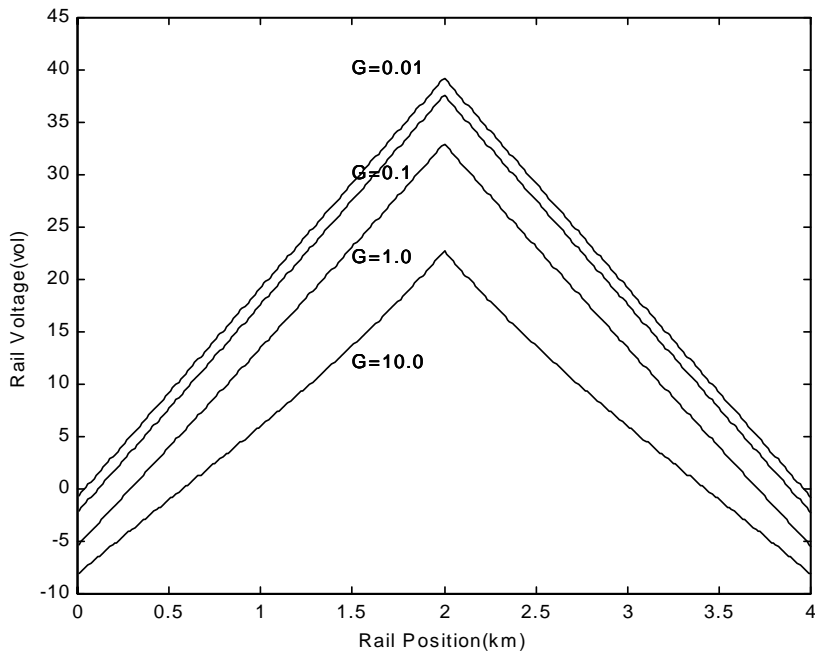
(b) 等效電路圖

圖二 雙電源供電軌道系統之簡單示意圖

考慮一長度為 4 公里雙電源單一車廂之軌道系統，亦即兩牽引變電站的距離為4公里，電車則位於兩變電站間行駛；此時假設每公里之軌道電阻 R 為 0.04歐姆，兩個牽引動力變電站的總輸入電流 $I_1=1000$ 安培，同時為了簡化分析，假設兩端之輸入電阻 R_{210} ， R_{221} 皆等於特性阻抗 R_0 ，如此則不用考慮反射激發突波的效應。如果以每公里軌道對大地之導納分別為0.01, 0.1, 1.0及10西門來模擬軌道電流和電壓與軌道位置的關係圖，其結果如圖三及圖四所示。



圖三 不同 G 值時軌道電流與位置關係圖 (雙電源之非接地系統)



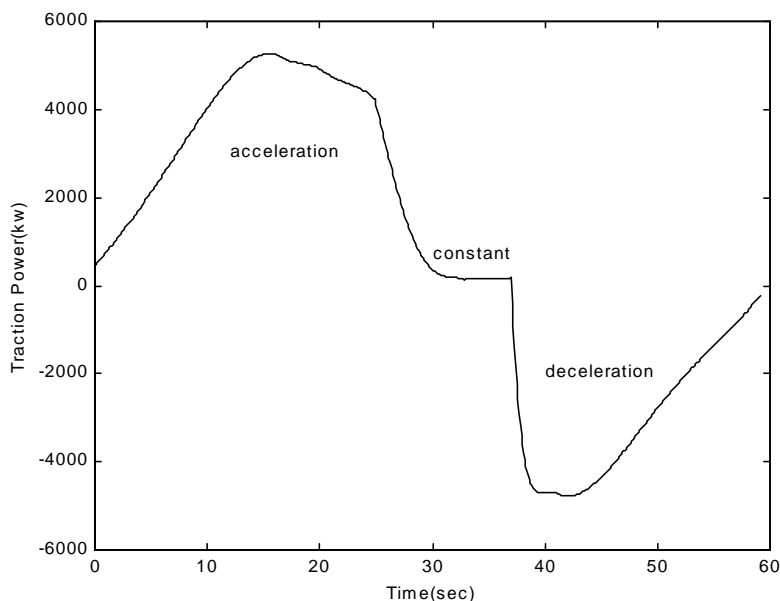
圖四 不同 G 值時軌道電壓與位置關係圖 (雙電源之非接地系統)

圖三及圖四所示為電車車廂位於兩個牽引變電站正中央，也就是與變電站 P_1 及 P_3 皆距離2公里處之軌道電流及電壓與位置的關係。顯而易見的，當軌道與大地間之絕緣越好(G越小時)，流於軌道之電流幾乎接近於500安培，換句話說，從軌道上洩漏出的電流值就會越小，同時這也是非接地系統最大的優點，只要絕緣設計作的好，洩漏電流便得以

由於經由軌道回流之牽引電流是從電車所在的位置進入軌道的，所以軌道上電位最高的地方是位於電車所在的位置，如圖五所示，電聯車行駛期間軌道上最高電位約為34.1伏特，位置則恰好為電車所在之處，而且由於軌道上的電阻值不為零，所以當牽引電流在軌道上流動時，軌道電位將朝著牽引動力變電站的方向逐漸遞減。換句話說，在電聯車行駛的期間內，影響軌道特性的因素除了軌道電阻和軌道與大地間的導納之外，電車車廂所在的位置也是一個不可忽視的重要因素；同時由於此處是假設系統參數為均勻不變的，所以軌道電壓等位圖的分佈顯得非常的均勻。

2. 兩變電站間設有旅客轉運站時對軌道特性的影響

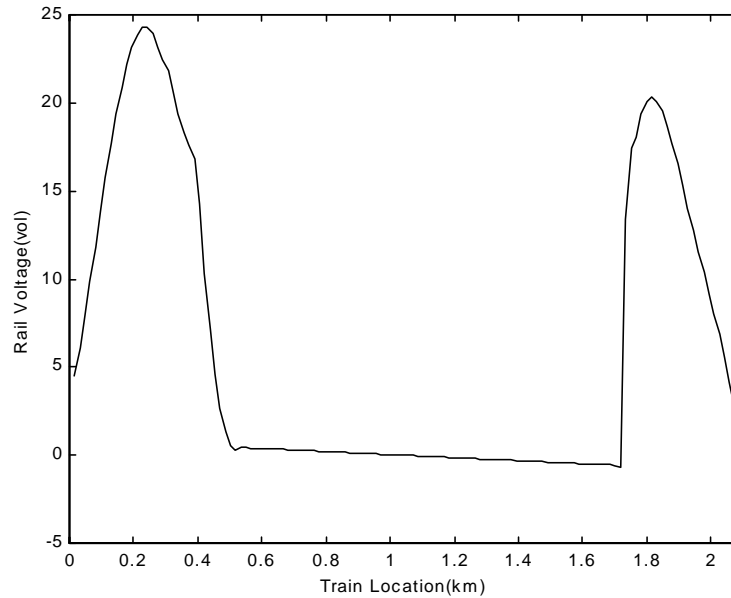
前節所述乃假設電車以定速行駛時之軌道特性，然於實際系統中，電車會經由一段時間之加速至某一行駛速度，最後於進站之前會減速至完全靜止，換句話說，電車於行駛期間所需之牽引電流於每一時刻皆是不同的，假設圖七所示為電車行駛時之功率需求。此時所考慮的是電車於兩相鄰之牽引變電站行駛時之軌道電位變化情形，通常由於在車站處才需考量人員及設施的安全，所以圖八及圖九之模擬結果，分別代表當電聯車從起站行駛至訖站期間，兩變電站處軌道電位隨電車位置變化的情形。



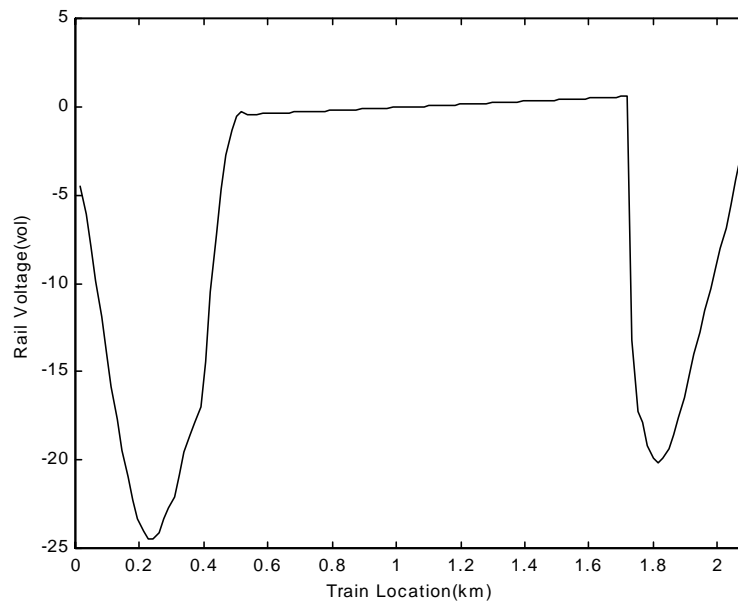
圖七 直流捷運系統兩站間牽引動力運轉模式

如果我們觀察台北捷運系統，可以發現某些兩相鄰牽引變電站間有旅客轉運站的情形，且該站並未設置有牽引變電站。其簡易系統架構如圖十所示，其中 P_1 以及 P_3 分別表示位置固定的牽引動力變電站， P_2 則為旅客轉運站，且該站並未設置牽引動力變電站，電車則是位於 L_0 處，此處假設 P_1 與 P_3 間之距離為4公里，而 P_2 則位於正中央之2公里處。當一電車從 P_1 駛向 P_3 時，因為電車必須於 P_2 處稍作停留，所以供應電車行駛之牽引動力必須分做兩部份，分別是軌道上 P_1 與 P_2 之間以及 P_2 與 P_3 之間兩段，如圖十一所示；此處

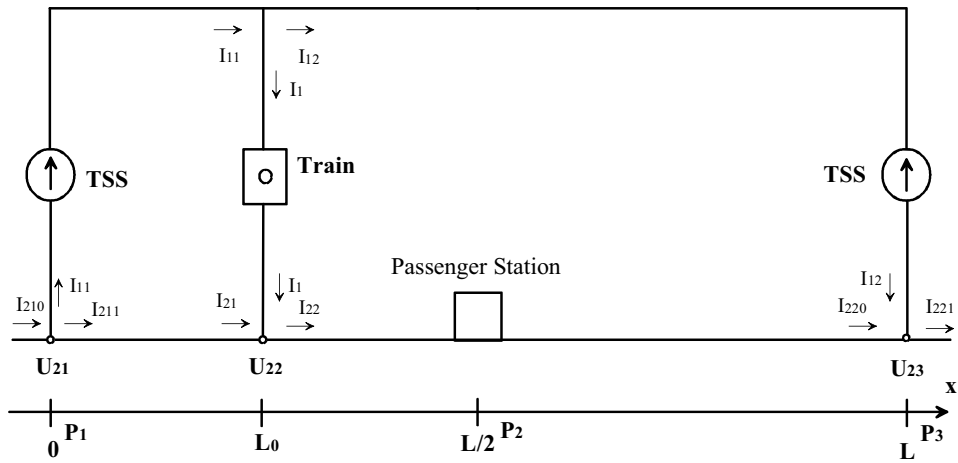
假設電車於 P_2 處停靠後立即啓動，所以牽引動力呈現連續的狀態。模擬結果則如圖十二與圖十三所示，同樣的亦代表起站與訖站之軌道電位變化情形，當兩相鄰變電站間具有旅客轉運站時，軌道電位則浮動的較明顯。



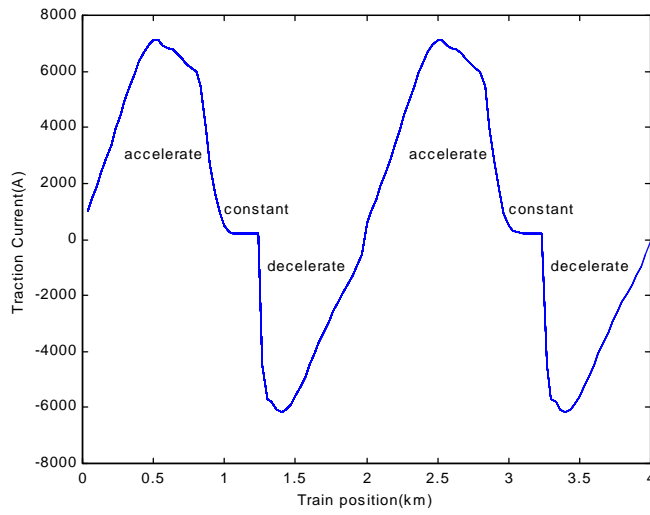
圖八 起站軌道電位隨電車位置的變化曲線



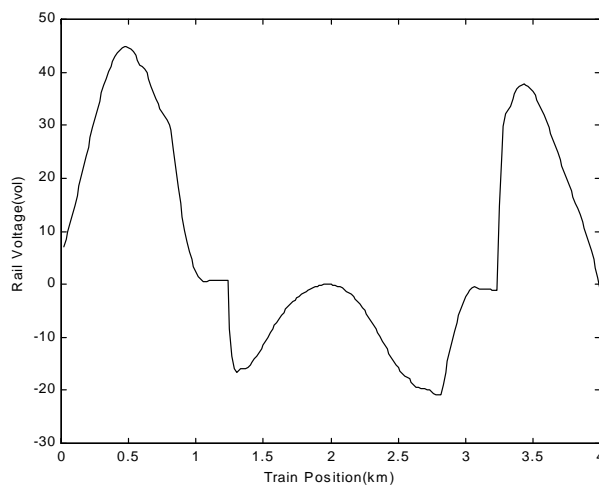
圖九 訖站軌道電位隨電車位置的變化曲線



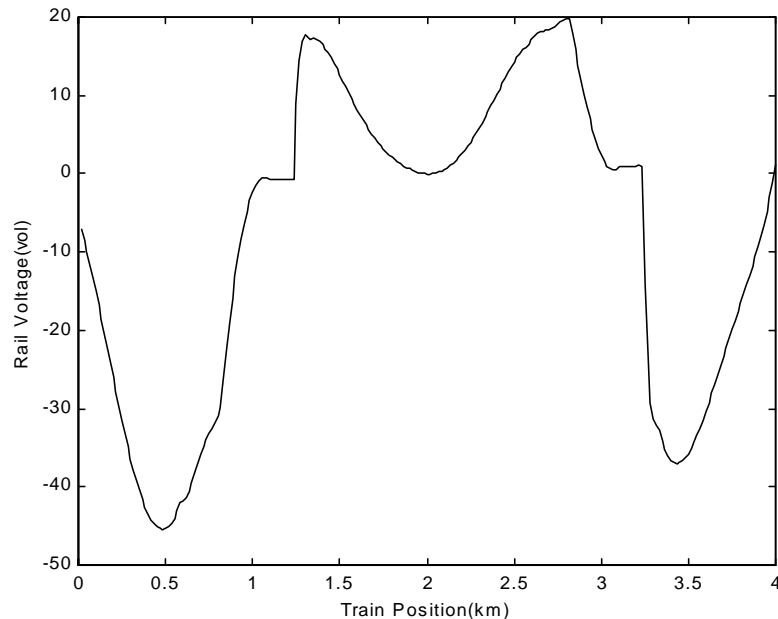
圖十 兩相鄰變電站間有旅客轉運站之簡單系統架構



圖十一 兩相鄰變電站間有旅客轉運站之牽引動力運轉模式



圖十二 電車行駛期間起站處之軌道電壓變化情形



圖十三 電車行駛期間訖站處之軌道電壓變化情形

三、結論

由於軌道電壓的浮動問題及雜散電流所造成的電化學腐蝕在捷運系統開始營運後，對系統本身以及鄰近區域都有著深切的影響，所以在系統架設初期就必須針對各種會影響軌道特性的因素作完善的考量，而其中變電站的設置方式是一個極為重要的因素，如果能配合系統架設地區的地形及旅客載運需求盡量縮短牽引變電站之間距，則可大幅改善軌道電位浮動及雜散電流的生成量。

在實際的電車系統中，電聯車行駛時所需的牽引動力是會隨著電聯車所在位置及行駛狀態的變化而不停改變，如此一來系統所生成的洩漏電流值也會不停的改變。台北捷運系統重運量路線的架設，為使軌道電壓的浮動情形及雜散電流的生成量皆能同時控制在一定範圍內，在目前已通車營運之初期路網中，係採用二極體接地並配合雜散電流截流網的方式架設系統，惟後續之路網將改採非接地與二極體接地可彈性切換選擇之架構。

參考文獻

1. Yu J. G. and Goodman C. J., "Computer Simulation of Stray Currents in D.C. Supplied Rail Transit Systems and Their Corrosive Effects," *Proceeding of the ImechE International Conference on Transit 2020*, pp. 121-127, London, October 1990.
2. Yu J. G. and Goodman C. J., "Modeling of Railway Potential Rise and Leakage Current in D.C. Supplied Railway Systems," *IEE Colloquium Digest No. 1990/129*. Presented to the

IEE Colloquium on Stray Current Effects of DC Railways and Tramways,” pp. 1-6, London, October 1990.

3. Yu J. G., “The Effects of Earthing Strategies on Rail Potential and Stray Currents in D.C. Transit Railways,” *IEE international Conference on Electric Railways in a United Europe*, No. 543, pp. 303-309, 1998.
4. Yu J. G. and Goodman C. J., “Stray Current Design Parameters for D.C Railways,” *Proc. of the ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, pp.19-28, Atlanta, March 1992.
5. 王心民及李建興, “直流供電牽引系統中不同接地方式對軌道特性的影響,” 中華民國第二十屆電力工程研討會.