



การหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟที่เหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
โดยใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

OPTIMIZING TRAIN SPEED PROFILE FOR A MASS TRANSIT SYSTEM USING DIFFERENTIAL
EVOLUTION

ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์¹ และธณัตชัย กุลวรวานิชพงษ์¹

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวางแผนการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามวลขนส่งมวลชนระหว่างสถานีโดยมีเป้าหมายให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด การทำงานของรถไฟฟ้านำมาใช้ทั้งหมด 4 โหมดตามลำดับ คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก ปัญหาที่นำเสนอเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟฟ้ามวลขนส่งมวลชนโดยการควบคุมผ่านตัวแปร 3 ตัว คือ อัตราเร่ง ในโหมดการเร่ง อัตราหน่วงในโหมดการเบรก และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น เพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามวลขนส่งมวลชนใช้พลังงานน้อยที่สุด การแก้ปัญหาใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน (Differential Evolution: DE) เปรียบเทียบผลเฉลยและประสิทธิภาพ ในการค้นหาคำตอบกับวิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์ 2 วิธี คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) และวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ระบบทดสอบที่นำมาใช้เป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ระยะทางระหว่างสถานีมีค่าเท่ากับ 2 กิโลเมตร กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้ที่ 80 และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการจำลองผลพบว่า การควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้ามวลขนส่งมวลชนด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามวลขนส่งมวลชนได้เป็นอย่างดี และมีประสิทธิภาพกว่าวิธีอื่น ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

คำสำคัญ: ลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟฟ้ามวลขนส่ง, ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, ดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

ABSTRACT

This paper presents a movement planning of a mass transit section between two-passenger stopping stations with the goal to minimize total energy consumption during the journey. Train movement in this work is based on a sequence of four mode operations: i) accelerating mode, ii) constant speed or cruising mode, iii) coasting mode and iv) braking mode. The presented problem is one of optimization problems in which train speed profile is optimized by controlling three parameters: i) acceleration rate ii) deceleration rate and iii) location of coasting point. To achieve this goal the overall energy consumption of the proposed journey is minimized. This paper described the use of Differential Evolution as a potential tool to solve the problem and compared to some well-known and efficient intelligent search techniques (Genetics Algorithm: GA and Particle Swarm Optimization: PSO). The test system used in this work is a simple mass transit section between two-passenger stopping stations with the service distance of 2 km and the maximum speed limit of 60 km/h and 80 km/h. The results showed that solving such a problem by using DE can considerably reduce the overall energy consumption and efficient than other methods under the same conditions.

KEYWORDS: Train Speed Profile, Mass Transit System, Differential Evolution

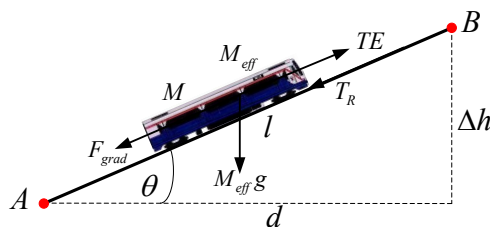
1. บทนำ

การประหยัดพลังงานในระบบรถไฟมีการศึกษามานานหลายปี มีวิธีที่ช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้หลากหลายวิธี เช่น กลยุทธ์ในการขับรถไฟตามข้อมูลความเร็วของรถไฟที่เหมาะสมที่สุด [1] การใช้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมาจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนเพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายภายนอก และการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงาน เป็นต้น การเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยควบคุมการทำงานของรถไฟ แบ่งเป็น 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก [2,3] แต่การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟนั้นมีความซับซ้อนและมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จึงไม่สามารถทำได้ง่ายตาย [4] ซึ่งที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยหลากหลายในประเด็นดังกล่าว เช่น การลดพลังงานโดยใช้ระบบชาญฉลาดสำหรับการควบคุมการแล่นแบบไดนามิก (dynamic coast control) ในรถไฟขนส่งมวลชน [5] การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟขนส่งมวลชนโดยการควบคุมเวลาการวิ่งของรถไฟ [6] วิธีการเดินรถให้ประหยัดพลังงานสำหรับรถไฟขนส่งสินค้า [7] เป็นต้น ส่วนงานวิจัยที่นำวิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์มาใช้กับประเด็นดังกล่าว เช่น การเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยการควบคุมการแล่นโดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม [8,9] เป็นต้น

บทความนี้เสนอการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุด โดยควบคุมการทำงานผ่านตัวแปร 3 ตัว คือ อัตราเร่งในโหมดการเร่ง (α_{acc}) อัตราเร่งในโหมดการเบรก (α_{dec}) และตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) เพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุด ด้วยวิธีดัดเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน ในส่วนแรกของบทความกล่าวถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ ส่วนที่สองแสดงรายละเอียดการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดัดเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน ส่วนที่สามแสดงรายละเอียดการทดสอบและผลการทดสอบ ส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์และสรุปผล

2. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟแสดงดังรูปที่ 1 มีแรงที่ต้องนำมาพิจารณาดังนี้ คือ แรงจุดขบวนรถไฟ (tractive effort) แรงเกรเดียนต์ (gradient force) ความต้านทานของรถไฟ (train resistance) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ดังสมการที่ (1) โดยที่ M_{eff} คือ ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ (effective vehicle mass; kg) TE คือ แรงจุดขบวนรถไฟ (tractive effort; N) T_R คือ ความต้านทานของรถไฟ (train resistance, N) F_{grad} คือ แรงเกรเดียนต์ (gradient force, N) และ α คือ ความเร่งของรถไฟ (train acceleration; m/s^2) ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกสำหรับทางขึ้นเนินและมีค่าเป็นลบสำหรับทางลงเนิน



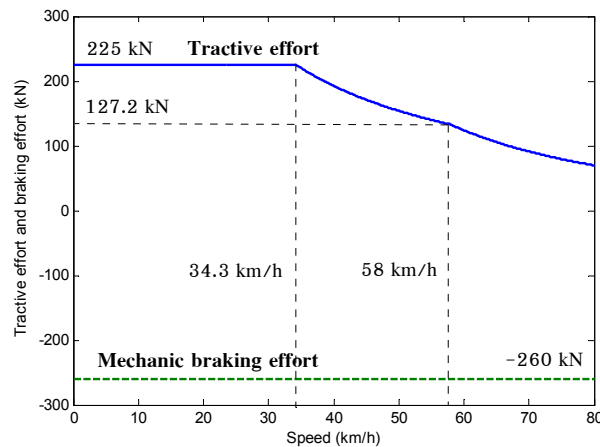
รูปที่ 1 แผนภาพการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ

$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

2.1 แรงจุดและแรงเบรกขบวนรถไฟ

แรงขับเคลื่อนรถไฟหรือแรงจุดขบวนรถไฟได้มาจากมอเตอร์ลากจูงขับเคลื่อนผ่านเพลาของมอเตอร์ซึ่งนำมาขับเคลื่อนล้อของรถไฟ คำนวณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะที่สำคัญ ได้แก่ น้ำหนักและความเร็วของรถไฟ [10] ผู้ผลิตรถไฟจะทำการทดสอบและนำเสนอในรูปของแรงจุดขบวนรถไฟเทียบกับความเร็วของรถไฟ คุณลักษณะโดยทั่วไปของแรงจุดขบวนรถไฟแสดงดังรูป

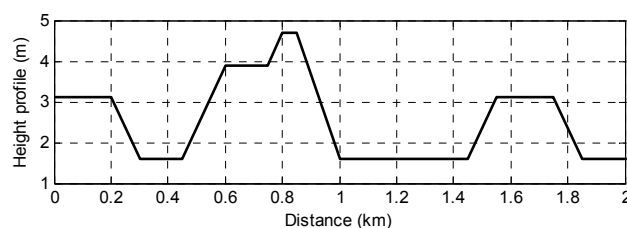
ที่ 2 ส่วนแรงเบรกขบวนรถไฟก็จะได้มาจากการทดสอบของผู้ผลิตรถไฟฟ้เช่นกันขึ้นอยู่กับใช้เบรกทางกล (mechanical brake) หรือเบรกทางไฟฟ้า (electrical brake)



รูปที่ 2 คุณลักษณะแรงจุดและแรงเบรกขบวนรถไฟ

2.2 แรงเกรเดียนต์

การลากรถไฟฟ้าซึ่งมีน้ำหนักมากขึ้นนั้นต้องใช้แรงลากอย่างมาก โดยทั่วไปเส้นทางการเดินรถไฟฟ้ขนส่งมวลชน ระดับเกรเดียนต์หรือความชันจะน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อย [11] ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 และมักแสดงในรูปของ ซึ่ง คือ ระยะในแนวตั้ง l คือ ระยะความชันหรือระยะในแนวระนาบจากจุด A ไปยังจุด B แสดงดังรูปที่ 1 แรงเกรเดียนต์หรือแรงเนื่องจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 3 Gradient profile

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g h}{l} \quad (2)$$

2.3 แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้จะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางและแรงต้านอากาศ เรียกโดยรวมว่า แรงต้านการเคลื่อนที่ (resistance force) ค่าความต้านทานโดยรวมของรถไฟฟ้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [11]

$$T_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h) และ A (kN), B (kNh/km) และ C (kNh²/km²) คือ สัมประสิทธิ์เดวิส (Davis coefficients) ซึ่งทุกตัวเป็นค่าคงที่ [12]

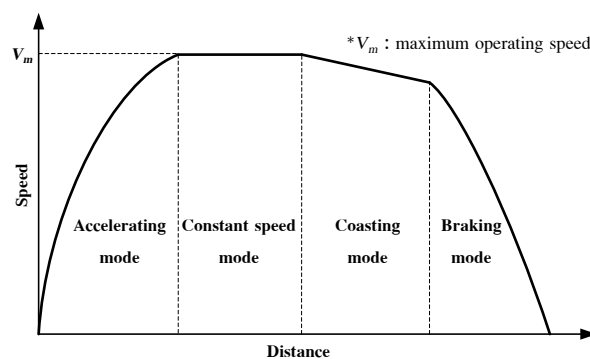
2.4 ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟฟ้า

ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (4) [11] โดยที่ M_t คือ น้ำหนักเปล่า (tare weight) และ λ_w คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร (passenger mass factor)

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) \quad (4)$$

2.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

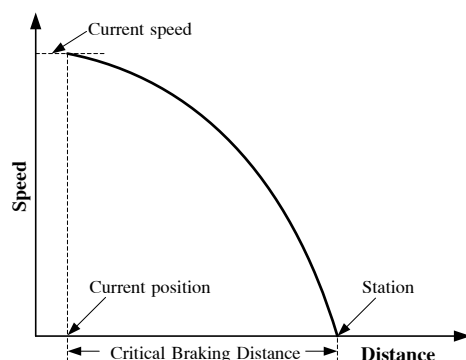
รูปแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะพิจารณาจากโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) โหมดการแล่น (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) [3,13] ดังรูปที่ 4 โดยแรงจุดขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละโหมดขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมที่ใช้



รูปที่ 4 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

โหมดการเร่งจะเริ่มเร่งความเร็วออกจากสถานีด้วยความเร่งที่กำหนดจนถึงที่ความเร็วทำงาน (service speed) โดยค่าความเร่งของรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก (α_{acc}) และแรงจุดขบวนรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) เมื่อความเร็วของรถไฟฟ้าถึงความเร็วทำงานก็จะเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ โหมดนี้จะรักษาความเร็วไว้ที่ความเร็วทำงาน ($\alpha = 0$) จนกระทั่งถึงตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) เมื่อถึงโหมดการแล่น โหมดนี้แรงจุดขบวนรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ ($TE = 0$) และค่าความเร่งจะมีค่าเป็นลบ แต่อย่างไรก็ตามความเร่งสามารถมีค่าเป็นบวกได้ในกรณีที่ลงเนินลาดชัน และจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกก็ต่อเมื่อถึงความเร็วที่ต้องเบรกด้วยความเร่งเป็นลบ (α_{dec}) หรือถึงระยะที่จะต้องเบรก ในบทความนี้จะหาระยะที่จะต้องเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อจะเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 5 โดยค่า CBD สามารถหาได้จากสมการที่ (5) [11]

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec}} \quad (5)$$



รูปที่ 5 การควบคุมการทำงานโหมดเบรก

2.6 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแรงฉุดขบวนรถไฟไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (η) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) [3]

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (6)$$

2.7 การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ โดยที่ v_i และ v_i คือ ความเร็วรถไฟไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง Δt คือ time step (ในบทความนี้ใช้ 0.01 วินาที) s_i และ s_i คือ ตำแหน่งรถไฟไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง

$$v_i = v_i + \alpha \Delta t \quad (7)$$

$$s_i = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (8)$$

2.8 สรุปขั้นตอนการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ใช้ค่าความเร็วของรถไฟไฟฟ้าจากการปรับปรุงครั้งก่อนหน้าและความเร่งที่ตำแหน่งปัจจุบันประเมินแรงฉุดขบวนรถไฟไฟฟ้า (สมการที่ (1)) และกำลังไฟฟ้าที่รถไฟไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ (สมการที่ (6))

ขั้นตอนที่ 2 : หาค่าแรงเกรเดียนต์ (สมการที่ (2)) ความต้านทานของรถไฟไฟฟ้า (สมการที่ (3)) ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟไฟฟ้า (สมการที่ (4)) และคำนวณความเร่งของรถไฟไฟฟ้า (สมการที่ (1))

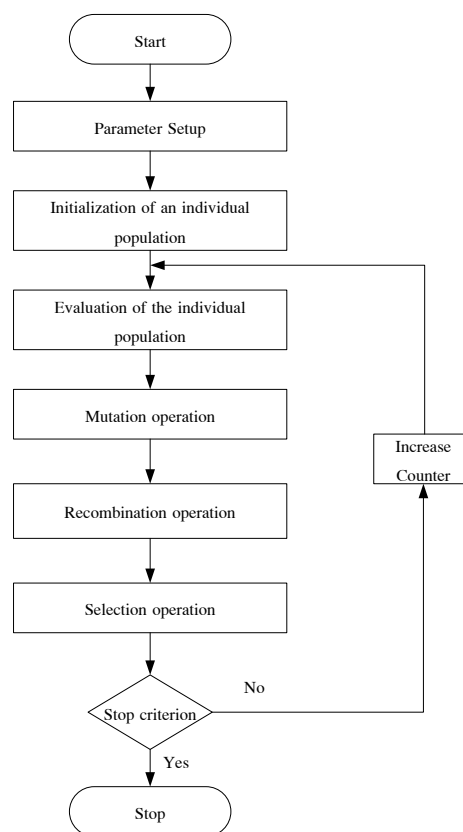
ขั้นตอนที่ 3 : ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า (สมการที่ (7) และ (8))

3. การเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิวอี้เฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

วิธีดิวอี้เฟอเรนเชียลอีโวลูชัน ถูกคิดค้นขึ้นโดย Price และ Storn ในปีค.ศ.1995 [14] จากความพยายามแก้ปัญหา

polynomial fitting โครงสร้างของวิธีดัดแปลงพันธุกรรมคล้ายกับวิธีพันธุกรรม ข้อแตกต่างที่สำคัญ คือ วิธีพันธุกรรมจะแปลงตัวแปรการตัดสินใจ (decision variables) ให้เป็นรหัสเลขฐานสอง (binary code) แต่วิธีดัดแปลงพันธุกรรมจะใช้ค่าจริง (floating point number) แทน ข้อได้เปรียบของวิธีดัดแปลงพันธุกรรม คือ ความเร็วและประสิทธิภาพในการหาคำตอบ โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการนำไปใช้ [15]

รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยวิธีดัดแปลงพันธุกรรมเบื้องต้น แทนด้วยรูปแบบ DE/x/y/z โดยที่ x แทนเวกเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างเวกเตอร์การผ่าเหล่า (mutant vector) y แทนจำนวนของ difference vector ที่ใช้สำหรับกระบวนการผ่าเหล่า (Mutation) และ z แทนรูปแบบของการครอสโอเวอร์ (Crossover) นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนด ได้แก่ จำนวนตัวแปร ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัว จำนวนประชากร (Number of population: NP) ค่าอัตราครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR) ค่าคงที่การผ่าเหล่า (Mutation factor: F) และกำหนดเงื่อนไขการหยุด นั่นคือ จำนวนรอบสูงสุดหรือจำนวนรุ่นการถ่ายทอดสูงสุด (Number of iterations (generations): G_{max}) โดยขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดัดแปลงพันธุกรรม แสดงดังรูปที่ 6



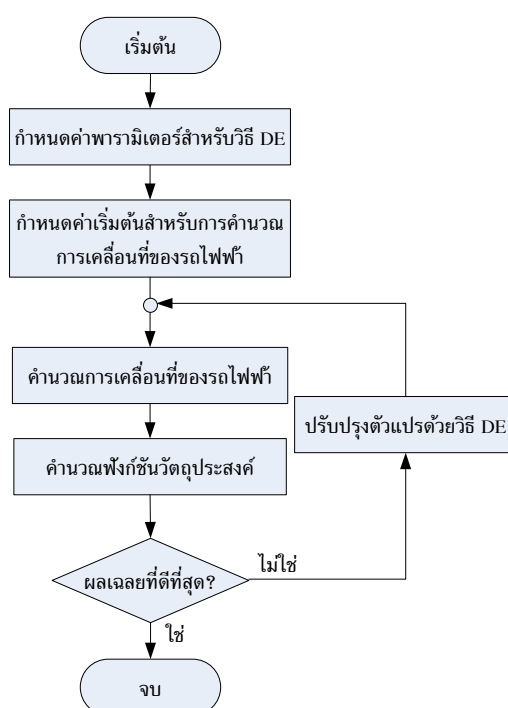
รูปที่ 6 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดัดแปลงพันธุกรรม [10]

ในบทความนี้จะทำการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ามหานครใช้ในการเคลื่อนที่โดยรวม (E) ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งตัวแปรที่มีผลกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ามหานครใช้ในการเคลื่อนที่ คือ อัตราเร่งในโหมดการเร่ง อัตราหน่วงในโหมดการเบรก และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น ซึ่งจะเป็นระยะทางจากตำแหน่งเริ่มต้นโหมดความเร็วคงที่จนถึงตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น ดังนั้นจะได้รูปแบบฟังก์ชันจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุดดังสมการที่ (9)

$$\text{Minimize } E = \sum_{i=1}^N P_i \times \Delta t_i \quad (9)$$

Subject to $\alpha_{acc}^{\min} \leq \alpha_{acc} \leq \alpha_{acc}^{\max}, \alpha_{dec}^{\min} \leq \alpha_{dec} \leq \alpha_{dec}^{\max}, L_{coast}^{\min} \leq L_{coast} \leq L_{coast}^{\max}$, Time and distance services

ขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน แสดงดังรูปที่ 7 และค่าพารามิเตอร์ของวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชันในการจำลองผล แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 7 ขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

Parameter	Value
Strategy	DE/rand/1/bin
Number of population (NP)	50
Maximum generation (G_{max})	100
Mutation factor (F)	1
Crossover rate (CR)	0.8

4. ระบบทดสอบและผลการทดสอบ

ระบบทดสอบเป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทความจุมาก (high-capacity mass transit) ตัวอย่างมีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ระยะทาง 2 กิโลเมตร การทดสอบจะพิจารณาการนำพลังงานจากการเบรกมาใช้งาน โดยกำหนดให้พลังงานที่นำมาใช้จากการเบรกมีประสิทธิภาพ 100% และไม่พิจารณาแหล่งจ่ายไฟ รายละเอียดพารามิเตอร์และเงื่อนไขสำหรับการจำลองผลแสดงดังตารางที่ 2 การจำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Intel Core i5 2.53 GHz RAM 4 GB แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h ทำการทดสอบโดยใช้วิธีดัดเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน เปรียบเทียบผลเฉลยและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบกับวิธี GA [16] และวิธี PSO [17] ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 2 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล

Specific data	Information	
Unit configuration	4car-train	
Voltage Conditions	nominal voltage	750 V
Weight Conditions	tare weight	153 ton
	max. payload	85 ton
Movement Features	max. speed	80 km/h
	max. acceleration	0.87 m/s ²
	max. deceleration	1.00 m/s ²
Efficiencies	gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
Max. Auxiliaries	constant load	270 kW
Train resistance formula	A = 4025, B = 118.67, C = 0.871	สมการที่ (4)
Tractive effort diagram and Braking effort diagram	รูปที่ 2	
Gradient profile	รูปที่ 3	
Number of trains	1 ขบวน	

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลเฉลี่ยของแต่ละวิธี

Speed limit	Control variables	GA		PSO		DE	
		Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD
60 km/h	α_{acc}	0.8464	0.0325	0.8408	0.0492	0.8648	0.0079
	α_{dec}	-0.7086	0.1072	-0.9866	0.0229	-0.9995	0.0103
	L_{coast} (km)	0.411	0.0088	0.3905	0.0040	0.3907	0.0021
80 km/h	α_{acc}	0.8539	0.0210	0.8397	0.0158	0.8698	0.0035
	α_{dec}	-0.9894	0.0285	-0.9638	0.0148	-0.9986	0.0034
	L_{coast} (km)	0.6135	0.1362	0.6147	0.1404	0.3341	0.0040

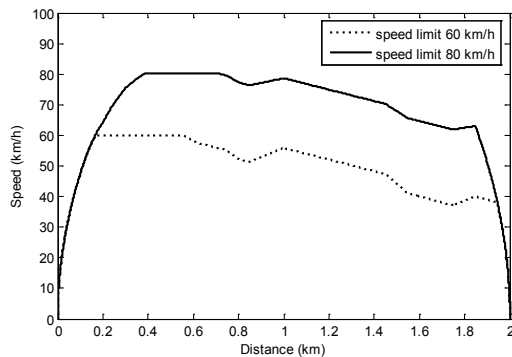
หมายเหตุ SD ย่อมาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของแต่ละวิธี

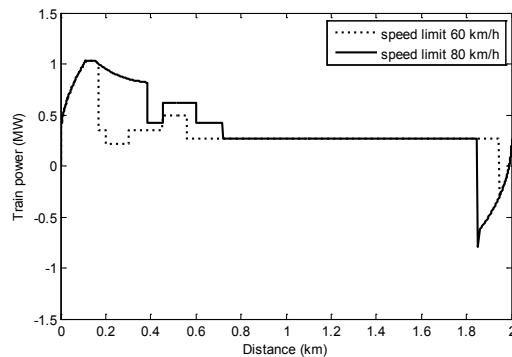
Speed limit	Methods	E (kWh)			SD
		Min	Average	Max	
60 km/h	GA	15.6589	15.6691	15.6800	0.0261
	PSO	15.6524	15.6552	15.6626	0.0106
	DE	15.6523	15.6537	15.6544	0.0023
80 km/h	GA	12.0057	12.0297	12.0365	0.0419
	PSO	12.0067	12.0251	12.0309	0.0357
	DE	12.0007	12.0038	12.0055	0.0064

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h พบว่าทั้ง 3 วิธีให้ผลเฉลี่ยไปในทิศทางเดียวกัน แต่วิธี DE จะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งหมายถึงค่าของตัวแปรควบคุมที่หาได้ด้วยวิธี DE มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของแต่ละวิธีในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h พบว่าทั้ง 3 วิธีสามารถหาค่าพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่วิธี DE มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี GA และ PSO ทั้ง 2 กรณี โดยกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h จะใช้พลังงานโดยรวมในการเคลื่อนที่น้อยกว่ากรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h ดังนั้นสรุปได้ว่าวิธี DE สามารถหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟได้เหมาะสมที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ผลลัพธ์ที่หาได้จากวิธี DE แสดงได้ดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 ลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟทั้ง 2 กรณี เมื่อใช้วิธี DE



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เคลื่อนที่ทั้ง 2 กรณี เมื่อใช้วิธี DE

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h เมื่อใช้วิธี DE จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงโหมดการทำงานอยู่ตลอด ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของเกรเดียนต์ดังรูปที่ 3 ซึ่งทั้ง 2 กรณีให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h จะใช้เวลาในการเดินทางทั้งสิ้น 157.9 วินาที จากสถานีต้นทางจนถึงสถานีปลายทาง ส่วนกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h จะใช้เวลาในการเดินทางเพียง 118.8 วินาที เท่านั้น

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เคลื่อนที่ในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h เมื่อใช้วิธี DE จะเห็นได้ว่าเมื่อการทำงานของรถไฟอยู่โหมดการเร่งจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าสูงถึง 1.03 MW และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ เมื่อเข้าสู่โหมดการแล่นกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีเพียงโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในรถเท่านั้นซึ่งจะใช้กำลังไฟฟ้า 270 kW และเมื่อถึงโหมดเบรกจะมีการนำพลังงานจากการเบรกมาใช้ในการประหยัพลังงานด้วย สังเกตจากกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ โดยกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h จะใช้พลังงานโดยรวมในการเคลื่อนที่น้อยกว่าความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h เนื่องจากได้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมากกว่านั่นเอง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของรถไฟฟ้าเพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุดด้วยวิธีดัดเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน ทดสอบกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนตัวอย่างมี 2 สถานีโดยสาร ระยะทาง 2 กิโลเมตร และทำการเปรียบเทียบผลเฉลยและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบกับวิธี GA และวิธี PSO ผลการเปรียบเทียบพบว่า การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ DE สามารถหาผลเฉลยได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าวิธีอื่น โดยมีการเบี่ยงเบนของคำตอบน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน อีกทั้งสามารถนำเอาวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้ในกรณีพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก ประจำปีการศึกษา 2556 (PHD/0038/2556)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hillmans, S. and Goodman, C.J. (2007). "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways", *IET Electric Power Applications*, Vol. 1, No. 5, 675–682.
- [2] Goodman, C.J. "Train performance and simulation", Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, IEE Power Division, April 1997.

-
- [3] Kulworawanichpong, T. “Optimising AC electric railway power flows with power electronic control”, PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
 - [4] Jong, J.C. and Chang, S. (2005) “Algorithms for generating train speed profiles” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, 356 – 371.
 - [5] Mellitt, B., Sujitjorn, S., Goodman, C.J., and Rambukwella, N.B. “Energy minimisation using an expert system or dynamic coast control in rapid transit trains”. Proceeding of International Conference on Railway Engineering, 1987, pp. 48–52.
 - [6] Albrecht, T. “Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control”, Proceeding of Computers in railways IX (WIT Press, 2004), 2004, pp. 885–894.
 - [7] Lukaszewicz, P. “Energy-saving driving methods for freight trains”, Proceeding of Computers in railways IX, (WIT Press, 2004), 2004, pp. 901–909.
 - [8] Chang, C.S., and Sim, S.S. (1997) “Optimising train movements through coast control using genetic algorithms”, *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 144, No. 1, 65–73.
 - [9] Wong, K.K., and Ho, T.K. (2004) “Coast control for mass rapid transit railways with searching methods”, *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No. 3, 365–376.
 - [10] Applications of Mathematics, “Tractive effort, acceleration and braking”, The Mathematical Association, 2004. (www.m-a.org.uk)
 - [11] Lu, S. “Optimising power management strategies for railway traction”, PhD Thesis, University of Birmingham, UK, October 2011.
 - [12] Rochard, B. P. and Schmid, F. (2000) “A review of methods to measure and calculate train resistances,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 214, No. 4, 185–199.
 - [13] Kim, K. “Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints”, PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA, January 2010.
 - [14] Price, K. V., Storn, R. M. and Lampinen, J. A., “Differential evolution: a practical approach to global optimization”, Springer, 2005.
 - [15] Sumpavakup, C., Kampeerawat, W. and Kulworawanichpong, T. (2011) “Differential Evolution Method for Solving Combined Economic and Emission Dispatch Problems”, *Research and Development Journal*, Vol.22, No.2, 25–31.
 - [16] The MathWorks Inc., Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX, CD-ROM Manual, 2004.
 - [17] Pao-la-or, P., Oonsivilai, A. and Kulworawanichpong, T. (2005) “Combined Economic and Emission Dispatch Using Particle Swarm Optimization”, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Vol. 6, No. 4, 296–305.