การศึกษา ออกแบบ และสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมระบบรถไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นประโยชน์สำหรับการพิจารณาเปรียบเทียบและตัดสินใจต่อโครงการขนส่งระบบราง

The study design and construction of a engineering model railway system is useful as the comparison and decision making for the future railway transportation system project

จักรกฤษณ์ จันทร์เขียว*, สุดาพร อร่ามรุณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพฯ

* *E-mail address: green.days@hotmail.co.th*

บทคัดย่อ

แบบจำลองทางวิศวกรรมระบบรถไฟฟ้าได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นประโยชน์สำหรับการสาธิตเชิงแนวคิดในการพิจารณาเปรียบเทียบและตัดสินใจต่อโครงการก่อสร้างขนส่งมวลชนด้วยระบบราง ระบบรถไฟฟ้าได้ถูกศึกษา ออกแบบ และสร้างเป็นแบบจำลองขึ้นมา สำหรับรถไฟฟ้าทั้ง 2 ระบบ คือ 1) รถไฟฟ้าที่ถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ประเภทหมุนรอบตัวเองแบบดั้งเดิมหมุนล้อรถที่เกี่ยวข้องให้วิ่งไปบนรางเดินรถ และ 2) รถไฟฟ้าที่ถูกขับดันโดยมอเตอร์ประเภทเชิงเส้นแบบด้านเดียวชนิดขดลวดปฐมภูมิสั้นสมัยใหม่ซึ่งไม่มีส่วนหมุนที่จะหมุนล้อรถ ผลการศึกษาพบว่า ระบบรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ประเภทเชิงเส้นฯ มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูง และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ถูกต้องและทันสมัยสำหรับผู้บริหารระดับสูงที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องและรับผิดชอบโครงการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาและตัดสินใจที่ดีขึ้นได้ในโครงการก่อสร้างขนส่งมวลชนด้วยระบบรางที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง

คำสำคัญ: ระบบรถไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้าประเภทหมุนรอบตัวเอง, มอเตอร์ไฟฟ้าประเภทเชิงเส้น

ABSTRACT

The engineering model railway system is useful as the conceptual demonstration in the consideration of the comparison and decision making for the future railway transportation system project. The railway system can be studied, designed, constructed and proposed into 2 systems: 1) the railway system using classical rotating motor to rotate its associated wheels on the railway, and 2) the railway system using modern single-sided short primary linear induction motor with no rotating part to rotate such wheels on the railway. The results showed that railway

system using modern single-sided short primary linear induction motor levels are highly energy efficient. And the operating costs are lower. This important, accurate and up to date information can be used as a model that is useful in terms planning and decision-making for executives who are functionally related and responsible for the high investment rail transit systems projects.

Keyword: Railway Systems, Rotary Type Motor, Linear Type Motor

1. บทนำ

การขนส่งด้วยระบบรางร่วมสมัยในปัจจุบัน ระบบรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ประเภทเชิงเส้นแบบด้านเดียวชนิดขดลวดปฐมภูมิสั้น (Single-Sided Short Primary Linear Induction Motor: SSSP-LIM) มีแนวโน้มสูงที่จะเป็นรถไฟฟ้าสมัยใหม่ที่จะเข้ามาแทนที่รถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ประเภทหมุนรอบตัวเอง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น 1) มีอัตราการเร่งอยู่ในเกณฑ์ดีมาก 2) การเดินรถมีความนุ่มนวลสูง 3) มีการบำรุงรักษาในระดับที่ต่ำ 4) มีขีดความสามารถในการไต่ความลาดชันได้สูง

รูปที่ 1 การขนส่งระบบรางร่วมสมัยในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ประเภทหมุนรอบตัวเอง ตามด้วยการศึกษาการวิจัยและการพัฒนา (Study of Research and Development) ระบบรถไฟฟ้าที่ขับดันโดยมอเตอร์ประเภทเชิงเส้นฯ และท้ายที่สุดเป็นการออกแบบและจัดสร้างแบบจำลองรถไฟฟ้าเพื่อการสาธิตเชิงแนวความคิดให้เห็นว่าระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทมีข้อเด่นและข้อจำกัดแตกต่างกันอย่างไร ในช่วงรอยต่อของเทคโนโลยี เก่า-ใหม่ เช่นนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ข้อมูลทางเทคนิคที่ถูกต้องและทันสมัยเข้ามาช่วยทำให้การวางแผนและการตัดสินใจในโครงการขนส่งระบบรางที่ต้องใช้เงินลงทุนสูงมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. ระบบรถไฟฟ้าที่ถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทหมุนรอบตัวเอง

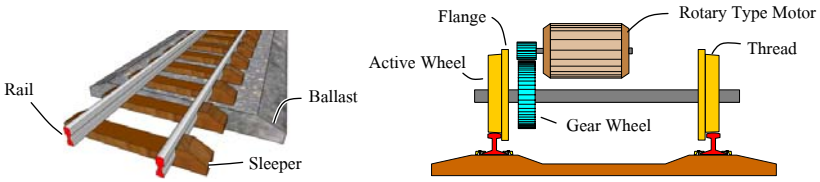
การขับเคลื่อนระบบรถไฟฟ้าประเภทนี้ในปัจจุบันนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ตามหลักการโดยทั่วไป ซึ่งมีข้อเด่น คือ มีความคงทนสูง และการบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำ ดังมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.1 การขับเคลื่อน (Driving) นิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส อินดัคชั่นแบบกรงกระรอก (3 Phase Squirrel Cage Induction Motor) การควบคุมความเร็วการเดินรถโดยเครื่องอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ด้วยการปรับแรงดันและความถี่ไฟฟ้า (Variable Voltage Variable Frequency Drive: VVVF) ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้า โดยพิจารณาได้จากสมการ คือ

$$n_s = \frac{2 f_s}{Pole} .....(rps) \qquad (1)$$

2.2 การส่งกำลัง (Power Transmission) จากมอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นตัวต้นกำลังส่งกำลังทางกลผ่านชุดเกียร์ไปยังล้อลากจูง (Active Wheels) ซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนด้วยแรงเสียดทาน (Friction Force) ไปบนรางเดินรถ วิธีการนี้จะต้องมีการหล่อลื่นอย่างเหมาะสมและต่อเนื่องตลอดอายุการใช้งาน

2.3 รางเดินรถ (Guidance) ประกอบด้วยเส้นรางเหล็ก 2 เส้น ที่วางบนไม้หมอน (Sleepers) เพื่อรองรับน้ำหนักจากล้อรถและถูกยึดแน่นบนไม้หมอน ใต้ไม้หมอนเป็นหินโรยทาง (Ballast) เพื่อยึดไม้หมอนไว้กับที่แล้วถ่ายเทน้ำหนักเฉลี่ยลงสู่ดินคันทาง (Sub-Structure)



รูปที่ 2 ส่วนประกอบหลักของล้อ รางเดินรถ และการส่งกำลังขับเคลื่อน

รางเดินรถรถไฟฟ้าประเภทนี้จะมีส่วนที่เรียกว่า บังใบ (Flange) ซึ่งอยู่ด้านในของล้อ เป็นตัวบังคับตำแหน่งพื้นล้อ (Thread) ได้สัมผัสกับหัวราง (Rail Head) ในขณะจอดและขณะทำการเดินรถ

3. ระบบรถไฟฟ้าที่ถูกขับดันโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภท SSSP-LIM

ในการศึกษา การวิเคราะห์หลักการทำงานของมอเตอร์ประเภทนี้ จำเป็นต้องอาศัยสมการแมกซ์เวลล์และทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงสมการแมกซ์เวลล์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยสังเขปเท่านั้น เพื่อให้ผู้ที่ไม่มีพื้นฐานทฤษฎีทางด้านสนามและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเข้าใจการทำงานและสามารถพิจารณาเลือกใช้ระบบรถไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีที่เหมาะสมได้โดยประมาณ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- สมการของแมกซ์เวลล์รูปแบบสมการดิฟเฟอเรนเชียล ที่ใช้ได้กับสัญญาณแบบ Time Harmonics ความถี่เชิงมุม ω ในตัวกลางแบบ Isotropic และแบบ Linear ที่มีค่าของตัวกลางคือ μ, ε และ σ

$$\nabla \times H = J_o + j\omega\varepsilon E + \sigma E \quad (2)$$

$$\nabla \times E = - j\omega\mu H \quad (3)$$

- ค่าความสัมพันธ์ในรูปแบบคณิตศาสตร์เชิงซ้อน ระหว่างความเข้มและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในตัวกลางประเภท Ferromagnetic ระหว่างความเข้มและความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าในตัวกลางประเภท Dielectric และระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวกลางประเภท Conductor

$$B = \mu H = (\mu_o + \mu_o \mathbf{X}_m) H = (\mu_o + M) H \quad (4)$$

$$D = \varepsilon E = (\varepsilon_o + \varepsilon_o \mathbf{X}_e) E = (\varepsilon_o + P) E \quad (5)$$

$$J_c = \sigma E \quad (6)$$

- สมการความลึกของการเคลื่อนที่ผ่าน (Penetration Depth) ของคลื่นระนาบของสนามไฟฟ้าในตัวกลางแบบ Conductor สำหรับกรณีที่สัญญาณเป็นแบบ Time Harmonics ความถี่เชิงมุม ω

$$Ex = Ex\, e^{-(\alpha+j\beta)z} = \{ Ex\, e^{-\alpha z} \}\, e^{-j\beta z} \quad (7)$$

- สมการวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\sum_m H_m l_m = nI \quad \text{[Analogous to KVL]} \quad (8)$$

$$\sum_m B_m A_m = 0 \quad \text{[Analogous to KCL]} \quad (9)$$

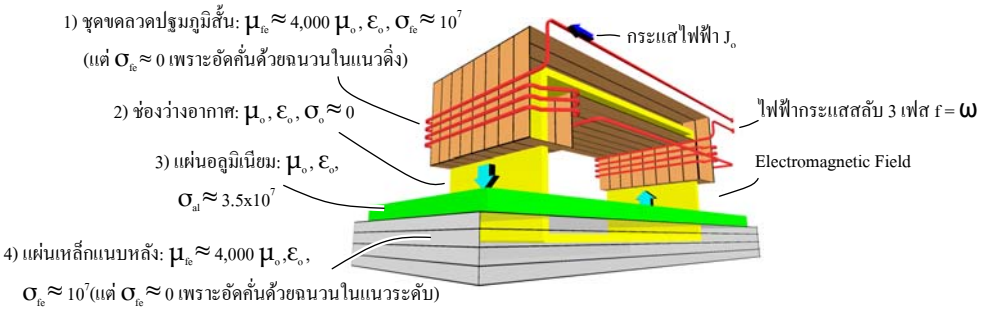
- สมการแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานกล

$$F_v = \rho E + \rho v \times B \quad (10)$$

3.1 โครงสร้างเชิงทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภท SSSP-LIM

ในรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างเชิงทฤษฎีของมอเตอร์ประเภท SSSP-LIM ที่ประกอบด้วย ชุดขดลวดปฐมภูมิสั้นที่มีแกนเหล็กทำด้วยแผ่นเหล็กบางอัดคั่นด้วยฉนวนแนวดิ่งติดตั้งบนตัวรถซึ่งรองรับอยู่บนล้อรถ ใช้พลังงานภายนอกชนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสผลิตสนามแม่เหล็กในแนวดิ่งผ่านช่องว่างอากาศ ผ่านแผ่นอลูมิเนียมที่ติดตั้งบนรางเดินรถ และผ่านแผ่นเหล็กแนบหลังที่ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอัดคั่นด้วยฉนวนแนวระดับติดตั้งแนบหลังแผ่นอลูมิเนียม วกกลับในแนวระดับผ่านแผ่นเหล็กแนบหลัง ผ่านแผ่นอลูมิเนียม และผ่านช่องว่างอากาศ กลับเข้าสู่ชุดขดลวดปฐมภูมิในลักษณะของวงจรความเข้มสนามแม่เหล็ก H ที่ใช้สมการ (8) และสมการ (9) ช่วยพิจารณา

3.2 การวิเคราะห์การทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำประเภท SSSP-LIM สามารถพิจารณาโดยสังเขปตามลำดับต่อไปนี้



รูปที่ 3 โครงสร้างเชิงทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภท SSSP-LIM

3.2 การวิเคราะห์การทำงานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภท SSSP-LIM สามารถพิจารณาโดยสังเขป ตามลำดับต่อไปนี้

ลำดับแรก ความเข้มสนามแม่เหล็ก H ในแนวดิ่งในชุดขดลวดปฐมภูมิ ถูกผลิตขึ้นด้วยกระแสไฟฟ้า J_o โดยไม่มี Eddy Current Loss เนื่องจาก $\sigma_{fe} \approx 10^7$ (≈ 0 อัดคั่นด้วยฉนวนแนวดิ่ง) พิจารณาได้จากรูปที่ 3 ในสมการ (2) และสมการ (6) และสามารถกระทำให้เคลื่อนที่ในลักษณะ Travelling H-Field ด้วยการป้อน J_o เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ ω แบบสามเฟส

ลำดับที่สอง ความเข้มสนามแม่เหล็ก H ถูกกระทำให้อยู่ในแนวดิ่งผ่านช่องว่างอากาศและแผ่นอลูมิเนียมด้วยแรงดึงดูดที่เกิดจาก Magnetization Vector, M ของแผ่นเหล็กแบบหลัง พิจารณาได้จากสมการ (4) และความหนาของแผ่นอลูมิเนียม Z ไม่มากเกินไป พิจารณาจากสมการ (7) รวมทั้งไม่มี Eddy Current Loss เนื่องจาก $\sigma_{fe} \approx 10^7$ (≈ 0 อัดคั่นด้วยฉนวนแนวระดับ)

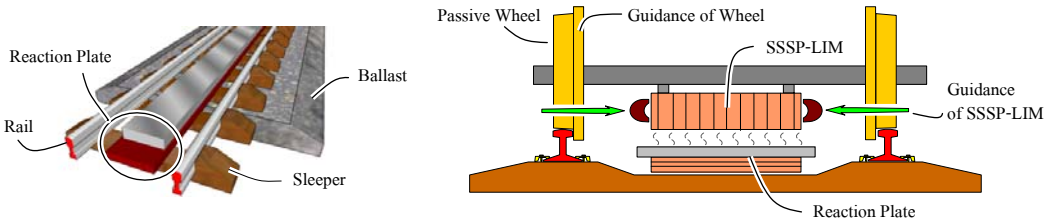
ลำดับที่สาม ถ้าปรับความถี่ ω ให้มีความถี่หนึ่งใดก็ตาม จะทำให้เกิดค่า Electromotive Force, $\nabla \times E$ ในช่องว่างอากาศ ในแผ่นอลูมิเนียม และในแผ่นเหล็กแบบหลัง ตามสมการ (2) และ (3) ทำให้เกิดผลต่างๆ ที่สามารถพิจารณาจาก สมการ (4), (5) และ (6) ขึ้น คือ ในแผ่นอลูมิเนียมเกิดค่า Current Density, J ขึ้น เนื่องจากมีค่า $\sigma_{al} \approx 3.5x10^7$ ซึ่งมีค่าสูง เป็นผลทำให้เกิด Thrust Force หรือ Propulsion Force ขึ้นตาม Lorentz Force Law ตามแนวระดับขึ้นในแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งใช้เป็นแรงขับดันตัวรถให้เคลื่อนที่ไปบนรางเดินรถ สามารถพิจารณาเพิ่มเติมจากสมการ (10)

3.3 การขับดัน (Propulsion) จากหลักการข้างต้นสามารถเกิดแรงขับดัน (Propulsion Force) ของมอเตอร์ขึ้นซึ่งเป็นแรงในการเคลื่อนตัวรถให้เคลื่อนที่ได้ทั้งในทิศทางเดินหน้า ถอยหลัง และเบรก แรงขับดันนี้สามารถควบคุมความเร็วได้ด้วยการปรับความถี่ไฟฟ้า (ω) โดยเครื่องอินเวอร์เตอร์ (Inverter) แบบ VVVF โดยพิจารณาจากสมการ คือ

$$V_s = 2tf_s .....(mps) \quad (11)$$

3.4 การส่งกำลัง (Power Transmission) กำลังงานถูกส่งออกมาในรูปของสนามและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเลื่อนไหลในแนวเชิงเส้น (Travelling Magnetic Field) จากตัวรถไปยังแผ่น Reaction Plate ที่ถูกติดตั้งบนรางเดินรถ ด้วยวิธีการเช่นนี้ ทำให้ไม่ต้องผ่านชุดเกียร์ใดๆ เป็นผลให้การบำรุงรักษาและการซ่อมแซมเป็นศูนย์ ซึ่งถือว่ามีความคงทนและความเชื่อถือสูง

3.5 รางเดินรถ (Guidance) มีส่วนประกอบของล้อและรางเดินรถเช่นเดียวกับรถไฟที่ใช้มอเตอร์ประเภทหมุนรอบตัวเอง และมีส่วนที่เพิ่มเติม คือ Reaction Plate ที่ประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียมและแผ่นเหล็กแนบหลัง (Back-Iron) Reaction Plate จะทำหน้าที่รองรับสนามแม่เหล็กเลื่อนไหลจากตัวรถเพื่อสร้างแรงขับดันขึ้นให้กับตัวรถ และนอกจากนี้ Reaction Plate ยังจะสามารถสร้างแรงขับดันทางข้าง (Side Propulsion Force) ได้ เมื่อตัวรถมีการเดินรถเบี่ยงเบนออกนอกแนว Reaction Plate ส่งผลให้การเดินรถมีความนุ่มนวลขึ้นจากระยะการส่ายตัวขณะเดินรถที่น้อยลง



รูปที่ 4 ส่วนประกอบหลักของล้อ รางเดินรถ และการส่งกำลังขับดัน

4. การออกแบบ และสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท

ระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทได้ถูกออกแบบ และสร้าง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม มีรายละเอียดและส่วนประกอบหลักๆ ดังต่อไปนี้

4.1 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าที่ถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทหมุนรอบตัวเอง

- การขับเคลื่อน (Driving) โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟสแบบกรงกระรอก (3 Phase Squirrel Cage Induction Motor) พิกัดแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ 6 ขั้วแม่เหล็ก กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์ จำนวน 2 ตัว

- การส่งกำลัง (Power Transmission) จากเพลามอเตอร์ผ่านชุดเกียร์ (Gearwheel) ด้วยเฟืองชนิดเกลียวสกรู (Spiral Gear) ไปยังเพลาของล้อลากจูง (Active Wheels) เพื่อการขับเคลื่อน

รูปที่ 5 ระบบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ประเภทหมุนรอบตัวเอง

- การควบคุมความเร็วการเดินรถ (Speed Control) ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ VVVF 3 เฟส พิกัดแรงดัน 12 โวลต์ 200 วัตต์ ความถี่ไฟฟ้า 5-50 เฮิรตซ์

- รางเดินรถ (Guidance) ใช้วัสดุอลูมิเนียมเป็นรางเดินรถซึ่งถูกยึดแน่นบนไม้หมอนรองรางที่ทำจากวัสดุเบกาไลท์ (Bakelite) รางเดินรถมีขนาดรางกว้าง 52 มิลลิเมตร และยาว 800 เซนติเมตร

4.2 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าที่ถูกขับดันโดยมอเตอร์ประเภท SSSP-LIM

- การขับดัน (Propulsion) โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภท SSSP-LIM 3 เฟส พิกัดแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ 6 ขั้วแม่เหล็ก กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์

- การส่งกำลัง (Power Transmission) โดยวิธีการทางสนามและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) มากระทำต่อ Reaction Plate ในระยะห่าง Air-Gap 1.5-2.0 มิลลิเมตร

รูปที่ 6 ระบบการขับดันของรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ประเภท SSSP-LIM

- การควบคุมความเร็วการเดินรถ (Speed Control) ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ VVVF 3 เฟส พิกัดแรงดัน 12 โวลต์ 200 วัตต์ ความถี่ไฟฟ้า 5-50 เฮิรตซ์

- รางเดินรถ (Guidance) ใช้วัสดุอลูมิเนียมเป็นรางเดินรถซึ่งถูกยึดแน่นบนไม้หมอนรองรางที่ทำจากวัสดุเบกาไลท์ (Bakelite) กึ่งกลางบนไม้หมอนติดตั้ง Reaction Plate ที่ถูกยึดแน่นบนไม้หมอนรองรางเช่นกัน รางเดินรถมีขนาดรางกว้าง 52 มิลลิเมตร และยาว 800 เซนติเมตร

5. การทดสอบแบบจำลองทางวิศวกรรมระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท

เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ทั้ง 2 ประเภทต่างดึงนำไปใช้แปรสภาพเป็นการ

ขับเคลื่อนและการขับดันขบวนรถไฟด้วยความเร็วสูงสุด โดยมีผลการทดสอบ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเดินรถด้วยความเร็วสูงสุด (เมตรต่อนาที)

ประเภทรถไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า (V)	พลังงานไฟฟ้า (W)	ความเร็ว (mpm.)
มอเตอร์แบบหมุน	12.2	93.167	185.78
มอเตอร์แบบเชิงเส้นฯ	12.2	91.174	188.07

จากผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่า รถไฟฟ้าประเภทหมุนรอบตัวเองสามารถทำการเดินรถได้ด้วยความเร็ว 185.78 เมตรต่อนาที โดยใช้พลังงาน 93.167 วัตต์ และรถไฟฟ้าประเภทเชิงเส้นฯ สามารถทำการเดินรถได้ด้วยความเร็ว 188.07 เมตรต่อนาที โดยใช้พลังงาน 91.174 วัตต์

รูปที่ 7 ผลความสำเร็จแบบจำลองทางวิศวกรรมระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท

7. การศึกษาและวิเคราะห์ต้นทุนโดยรวม (Life Cycle Costing) ระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท

งานวิจัยนี้มีกรอบการศึกษาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนระบบรถไฟฟ้า ดังนั้น การวิเคราะห์ต้นทุนต่างๆ การเปรียบเทียบโครงสร้างต้นทุนการประกอบการเดินรถของระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท ได้ถูกนำเสนอโดยวิธีประมวลเปรียบเทียบจากแหล่งข้อมูลที่ประกอบด้วย หนังสือ บทความวิชาการ บทความวิจัย จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ และรวมทั้งการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางวิศวกรรมที่สร้างขึ้นนี้ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่ในระดับที่ค่อนข้างจำกัด ข้อมูลบางรายการต้องมีการประมาณการซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อน จึงต้องมีการศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมต่อไป

การวิเคราะห์ต้นทุนด้านต่างๆ ได้แสดงถึงโครงสร้างต้นทุนและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อต้นทุนการประกอบการเดินรถของระบบรถไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับประกอบการพิจารณานำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการวางแผนและการตัดสินใจที่ดีขึ้นในโครงการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนด้วยระบบรางที่ต้องใช้เงินลงทุนสูงได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบโครงสร้างต้นทุนโดยรวมสำหรับระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท

ต้นทุน (Costing)		**ระบบรถไฟฟ้า**	
		มอเตอร์ประเภทหมุนรอบตัวเอง	มอเตอร์ประเภทเชิงเส้นฯ
ต้นทุนเริ่มต้น (Initial Costs)	อุปกรณ์ในระบบ (Equipment Costs)	ตามพิกัดกำลังขบวนรถไฟ	ตามพิกัดกำลังขบวนรถไฟ และเพิ่มเติมสำหรับ Reaction Plate
	การติดตั้ง (Installation Costs)	ตามระยะทางของรางเดินรถ	ตามระยะทางของรางเดินรถ และเพิ่มเติมสำหรับ Reaction Plate
ต้นทุนการดำเนินงาน (Operation Costs)	พลังงาน (Energy Costs)	ตามพิกัดและจำนวนขบวนรถในการประกอบการ	ตามพิกัดและจำนวนขบวนรถในการประกอบการ
	การบำรุงรักษาและการซ่อมแซม (Maintenance and Repair Costs)	มีการบำรุงรักษาระบบส่งกำลังตามอายุงาน มีการสึกหรอของพื้นล้อ บังใบ และหัวราง จากการทำงานของล้อลากจูงด้วยแรงเสียดทาน	ไม่มีการบำรุงรักษาระบบส่งกำลังใดๆ การสึกหรอของพื้นล้อ บังใบ และหัวรางมีในระดับที่ต่ำ
	การเสียโอกาสที่ต้องหยุดเดินรถ (Downtime Costs)	มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบการส่งกำลัง ล้อรถ และรางเดินรถ ตามอายุการใช้งาน	ไม่มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบการส่งกำลังใดๆ ล้อรถ และรางเดินรถ มีอายุการใช้งานสูง
	ความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม (Environment Costs)	มีมลภาวะทางเสียงจากการทำงานของล้อลากจูงที่บดเสียดสีกับหัวรางด้วยแรงเสียดทานเพื่อการขับเคลื่อน	ไม่มีมลภาวะทางเสียงใดๆ ที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ขับดันเพื่อการขับเคลื่อน

8. บทสรุป

การศึกษาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าถือเป็นข้อมูลอันสำคัญในการประกอบการพิจารณาตัดสินใจต่อโครงการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนด้วยระบบราง คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาประมวลเปรียบเทียบด้านต้นทุนเริ่มต้น (Initial Costs) และต้นทุนในการดำเนินงาน (Operating Costs) ของระบบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท พบว่า ระบบรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทหมุนรอบตัวเอง (Rotary Type Induction Motor) มีต้นทุนเริ่มต้นในระดับที่ต่ำกว่ารถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทเชิงเส้นฯ (Linear Type Induction Motor) และเมื่อทำการพิจารณาต้นทุนในการดำเนินงานต่อไปในระยะยาวแล้ว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ระบบ

รถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทเชิงเส้นฯ นี้กลับมีต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำกว่าเป็นอย่างมาก ซึ่งหากระบบขนส่งมวลชนระบบรางใดๆ ในอนาคต ที่มีอายุโครงการในระดับระยะยาวด้วยแล้วจะส่งผลดีอย่างยิ่งที่จะสามารถให้องค์กรสามารถประกอบการเดินรถที่สร้างผลกำไรได้สูงจากต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การวางแผนและการตัดสินใจในโครงการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนด้วยระบบรางที่ต้องใช้เงินลงทุนสูงในวันนี้ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี เก่า-ใหม่ สามารถถูกกระทำได้อย่างมั่นใจมากยิ่งขึ้นได้ด้วยแบบจำลองนี้

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่าน ดร. พรชัย มงคลวนิช อธิการบดีมหาวิทยาลัยสยาม ที่ให้ทุนและเครื่องมือสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบพระคุณท่าน พลโท ดร. สมพงษ์ ตุ้มสวัสดิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย ทำให้บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดียิ่ง

10. เอกสารอ้างอิง

Hyung-Woo Lee, Sung Gu Lee, Chanbae Park and Hyun-June Park. (2008). "Characteristic Analysis of a linear Induction Motor for a Lightweight Train according to Various Secondary Schemes." International Journal of Railway, 1(1),6-11.

Korea Railroad Research Institute. (2007). "Linear Electric Railway System.",1(1),1-8.

H.-W. Lee, C. Park, K.-H. Han, B. Lee, S.Y.Kwon and H.-J. Park. "Optimal-Airgap Control of a Linear Induction Motor for Korean Railway Transit." Korea Railroad Research Institute.

Kurt Vollenwyder. "Linear Motor Propulsion for urban Transit." Bombardier Transportation Mass Transit-North America, Kingston, Ontario, Canada.

จักรกฤษณ์ จันทร์เขียว, อาทิตย์ โสตรโยม. (2557). "การขยายช่องว่างอากาศระหว่างตัวรถและรางเดินรถสำหรับรถไฟความเร็วสูงชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้นด้านเดียวแบบขดลวดปฐมภูมิสั้น." การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 6(1),993-996.

จักรกฤษณ์ จันทร์เขียว, อาทิตย์ โสตรโยม. (2557). "ระบบรางแบบไฮบริดที่ใช้งานได้กับรถไฟความเร็วสูงประเภทขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์หมุนรอบตัวเองและประเภทขับดันด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นด้านเดียวชนิดขดลวดปฐมภูมิสั้น: แบบจำลองทางวิศวกรรมที่มีประโยชน์ต่อการวางแผนและการตัดสินใจในโครงการขนส่งระบบรางที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง." การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า, 37(2),987-991.