

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในขบวนรถไฟฟ้า

Induction Motor Drive in Rolling Stock

ชื่อผู้วิจัย นายปิยะวัฒน์ กวินเพ็ญพุกกุล, นายณัฐพล ดวงธรรม, นายพิริวัฒน์ ตั้งเคียงแสงเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขบวนรถไฟฟ้าและจำลองการขับเคลื่อนด้วยโปรแกรม “MATLAB Simulink” และ นำผลที่ได้จากการจำลองนำไปวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะต่างๆ โดยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากตำราเรียน ,งานวิจัยเกี่ยวกับรถไฟฟ้า ,และข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องจากอินเทอร์เน็ต นอกจากมอเตอร์แล้วในงานวิจัยฉบับนี้ยังมีเนื้อหาของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าเพื่อง่ายแก่การทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า

Abstract

Content of the research is rolling stock motor driving for simulation designed by MATLAB Simulink. The simulation can be analyzed load curve and characteristic of induction motor in many situations. In this paper uses textbooks, researches about railway and other sources for study and integrate data. This work has including a path of Railway electrification system for easily to understand too.

Keywords: Induction motor, Railway electrification, v/f Control

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนด้วยรถไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการเดินทางของบุคคลทั่วไปเพราะการขนส่งเป็นไปด้วยความรวดเร็ว ปลอดภัย และตรงต่อเวลาในการเดินทาง ซึ่งการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า จำเป็นจะต้องมีระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้า และมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า โดยมอเตอร์ถือเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนให้กับขบวนรถไฟฟ้า นั่นคือถ้าไม่มีมอเตอร์ไฟฟ้าขบวนรถไฟฟ้าก็จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และมอเตอร์ไฟฟ้ายังถือเป็นโหนดหลักในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับขบวนรถไฟฟ้าซึ่งในสถานะต่างๆการเคลื่อนที่ของขบวนรถจะมีการใช้พลังงานของมอเตอร์จะมีค่าไม่เท่ากันซึ่งจะมีความสำคัญสำหรับการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าในสถานีรถไฟฟ้าอีกด้วย

สำหรับในประเทศไทย มีการใช้มอเตอร์เพียงชนิดเดียวในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า คือมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในขบวนรถไฟฟ้า จึงเป็นที่มาและความสำคัญในการศึกษาวิจัย โดยจะจัดทำ Simulation คุณลักษณะของ แรงบิด แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปวิเคราะห์การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในขบวนรถไฟฟ้าในสถานะต่างๆ

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

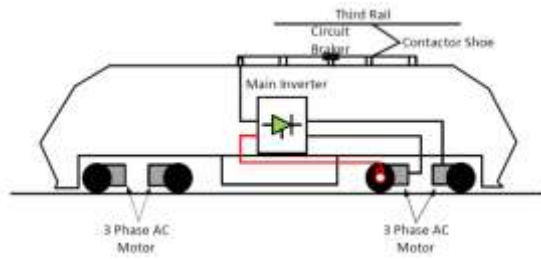
2.1 ระบบไฟฟ้าในโครงการรถไฟฟ้า

ในโครงการรถไฟฟ้าทั้งที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งแยกระบบจ่ายไฟฟ้าในโครงการได้ 3 แบบดังนี้

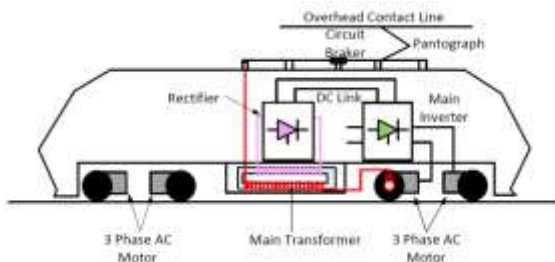
- Bulk Substation (BSS) : เป็นระบบจ่ายไฟฟ้าที่รับไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้า และทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าอื่นในระบบ
- Traction Substation (TSS) : รับไฟฟ้าจาก BSS และทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้า
- Service Substation (SSS) : รับไฟฟ้าจาก BSS และทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับสิ่งอำนวยความสะดวกในสถานี

2.2 ระบบขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า

รถไฟฟ้าที่มีให้บริการอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งชนิดไฟฟ้าที่รับเข้าตัวรถได้ 2 แบบ คือ รับไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current) และรับไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Current) แต่สิ่งที่เหมือนกันของรถไฟฟ้าทั้ง 2 แบบนี้ก็คือ มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นต้นกำลังนั้นเป็นมอเตอร์ชนิดเดียวกัน นั่นคือมอเตอร์เหนี่ยวนำ ชนิดกรงกระรอก ด้วยความที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 แบบใช้มอเตอร์ลากจูงชนิดเดียวกัน แต่มีการรับไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน จึงทำให้มีระบบขับเคลื่อนที่ต่างกันดัง รูปที่ 1 แสดงระบบขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่รับไฟฟ้ากระแสตรง และรูปที่ 2 แสดงระบบขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่รับไฟฟ้ากระแสสลับ ตามลำดับ



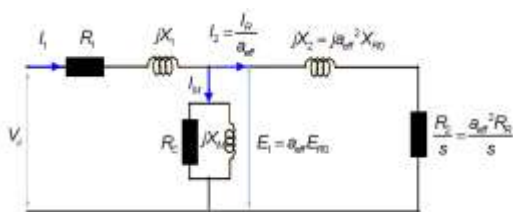
รูปที่ 1 แสดงระบบขับเคลื่อนของขบวนรถไฟที่รับไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2 แสดงระบบขับเคลื่อนของขบวนรถไฟที่รับไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำและการควบคุมความเร็ว

มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่นำมาใช้งานนี้ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดซิงโครนัส ซึ่งมี วงจรสมมูลมอเตอร์ เหนี่ยวนำจึงสามารถอ้างอิงกับวงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ โดยการย้ายพารามิเตอร์ด้านโรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์ เมื่อทำการกำหนดให้ a_{cr} เป็นอัตราส่วน อัตราส่วนการแปลง ตามรูปที่ 3

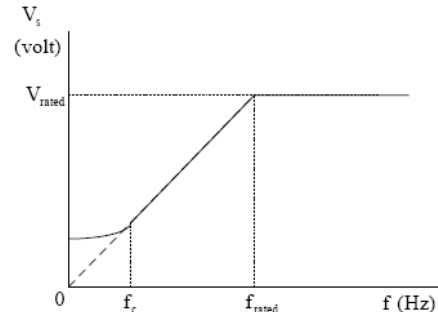


รูปที่ 3 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้างอิงด้านสเตเตอร์

- เมื่อ
- R_s = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Ω)
 - R_r = ความต้านทานที่สูญเสียในแกนเหล็ก (Ω)
 - R_r = ความต้านทานของขดลวด โรเตอร์ (Ω)
 - jX_s = รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์ (Ω)
 - jX_r = รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวด โรเตอร์ (Ω)
 - V_s = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวด สเตเตอร์ (V)
 - E_r = แรงดันเหนี่ยวนำบน โรเตอร์ (V)

เทคนิคการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากคือ V/f Control หรือ Scalar control เป็นเทคนิค

ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่เพื่อรักษาขนาดของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ช่องว่างอากาศให้มีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการปรับแรงดันและความถี่ ของวิธี V/f Control



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับความถี่ วิธี V/f Control

2.4 แรงลากจูงที่ใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟ

แรงลากจูงนี้เป็นแรงในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของล้อขับเคลื่อนซึ่งมีหน่วย Newton ผลรวมแรงลากจูงทั้งหมดของรถไฟที่ต้องการใช้วิ่งบนราง (Ft) เป็นผลรวมของแรงจากความเร่ง แรงจาก การขึ้นลงทาง ลาดชัน แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ โดยเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$F_t = F_a \pm F_g + F_r \quad (1)$$

เมื่อ F_t = แรงลากจูงของขบวนรถไฟ (N)

F_a = แรงเนื่องจากความเร่งของขบวนรถไฟ (N)

F_g = แรงเนื่องจากการขึ้นลงทางลาดชัน (N)

F_r = แรงเสียดทานในการเคลื่อนที่เนื่องจากรูปทรงของขบวนรถไฟ (N)

แรงจากความเร่งนั้นเป็นแรงที่ได้มาจากน้ำหนักเนื่องจากโมเมนต์ jX_s = รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์ (Ω)
ความถี่ของขดลวดของขบวนรถไฟ ดังสมการที่ (2)
 jX_m = รีแอกแตนซ์กระตุ้น (Ω)

$$F_a = 277.8 w_c \alpha \quad (2)$$

แรงจากความลาดชันจะเป็นบวกเมื่อตัวรถเคลื่อนที่ขึ้นทางลาดชัน และจะเป็นลบเมื่อตัวรถเคลื่อนที่ลง ดังสมการที่ (3)

$$F_g = \pm 98.1 w G \quad (3)$$

แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ของรถไฟ จะมีความสัมพันธ์กับมวลและความเร็วของขบวนรถไฟ ดังสมการที่ (4)

$$F_r = R_0 + R_1 V + R_2 V^2 \quad (4)$$

เมื่อ W_e = weight include rotating inertia (tonne)

W = Dead weight (tonne)

α = Acceleration (km/h/s)

G = % Gradient (%)

R_0, R_1, R_2 = constant depend on each train

V = Velocity (km/h)

การเปลี่ยนแรงลากจูงเป็นแรงบิด สามารถเปลี่ยนได้ตามสมการที่ (5)

$$T = \frac{DF_t}{2\gamma \eta} \quad (5)$$

เมื่อ T = แรงบิดของขบวนรถไฟฟ้า (Nm)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ (m)

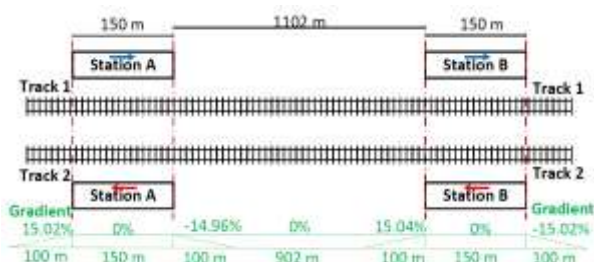
γ = อัตราทดเกียร์

η = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

3. การออกแบบ

3.1 เส้นทางในการ Simulation

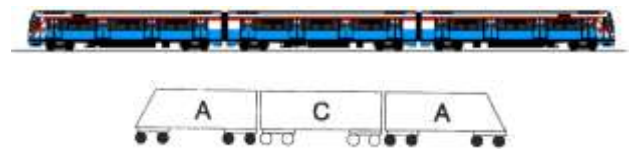
ข้อมูลเส้นทางรถไฟฟ้าที่ใช้จำลองจะเคลื่อนที่ระหว่าง 2 สถานีรถไฟฟ้า กำหนดดังรูปที่ 3.1 จากรูปมีรายละเอียดดังนี้ ระยะทางระหว่างสองสถานีเท่ากับ 1252 เมตร ซึ่งประกอบด้วยระยะทางของสถานียาว 150 เมตร และ ระยะทางระหว่างสถานียาว 1102 เมตร โดยทั้ง 2 สถานีมีทางลาดขึ้นและลงเป็นระยะทาง 100 เมตร ซึ่งประกอบไปด้วย สถานี A มีทางลาดขึ้น 15.02% และทางลาดลง 14.96% สถานี B ทางลาดขึ้น 15.04% และทางลาดลง 15.02% ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ข้อมูลเส้นทางที่ใช้จำลองในการ Simulation

3.2 ข้อมูลเฉพาะของขบวนรถไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ ทำการ Simulation การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยอ้างอิงขบวนรถไฟฟ้าในโครงการ Bangkok Mass Transit System Public Company Limited (BTS) ขบวนรถไฟฟ้าเป็นแบบ 3 car train ซึ่งในขบวนรถไฟฟ้า 1 ขบวนจะมี ตู้โดยสาร 3 ตู้โดยสารดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขบวนรถไฟฟ้าเป็นแบบ 3 car train ในโครงการ BTS

เมื่อ A-Car (Motor car) มีระบบขับเคลื่อนและมีห้องคนขับ

C-Car (Trialer car) ไม่มีทั้งระบบขับเคลื่อน และห้องคนขับ

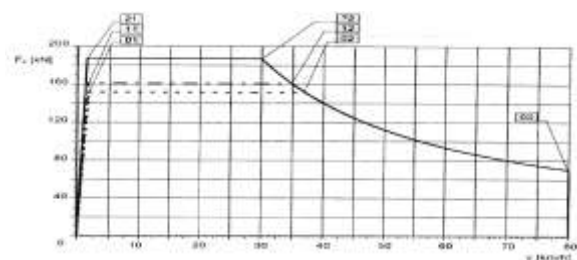
ขบวนรถไฟฟ้าไม่มีภาระมีน้ำหนัก 105.6 tone ที่สภาวะการต่างๆของขบวนรถไฟฟ้าจะมีน้ำหนักตามตารางที่ 1

Load condition	Standees density	Seats occupied	Number of Passengers	Total Load [t]	Total Weight [t]	Weight incl. Rotating Inertia [t]
AW0	0/m ²	0	0	0	105.6	118.105
AW1	0/m ²	all (126)	126	7.182	112.644	125.287
AW2	3/m ²	all (126)	492	28.044	133.644	146.149
CC	6/m ²	all (126)	861	49.077	154.677	178.798
AW3	7/m ²	all (126)	982	55.934	161.574	174.079
AW4	8/m ²	all (126)	1006	63.042	168.642	181.147

ตารางที่ 1 เป็นตารางแสดงน้ำหนักของขบวนรถที่สภาวะการต่างๆ

3.3 ขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขนาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสามารถหาได้จากกราฟของ Tractive effort ต่อความเร็วที่สมรรถนะสูงสุดของขบวนรถในรูปที่ 7 จากกราฟสามารถหาค่ากำลังทางกลสูงสุดที่ขบวนรถสามารถทำได้จากสมการ (6)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแรงลากจูงและความเร็วที่สมรรถนะสูงสุด

$$P = FV \quad (6)$$

$$P = 187(30 \times \frac{5}{18}) = 1558.33 \text{ kW}$$

กำลังที่คำนวณได้เป็นกำลังทางกลที่ขบวนแล้วนำกำลังที่ได้ไปหารด้วยจำนวนมอเตอร์ที่ใช้เพื่อนำไปหากำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง โดยขบวนที่ใช้ในการจำลองมีมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งสามารถคำนวณกำลังของมอเตอร์แต่ละตัวได้เท่ากับ

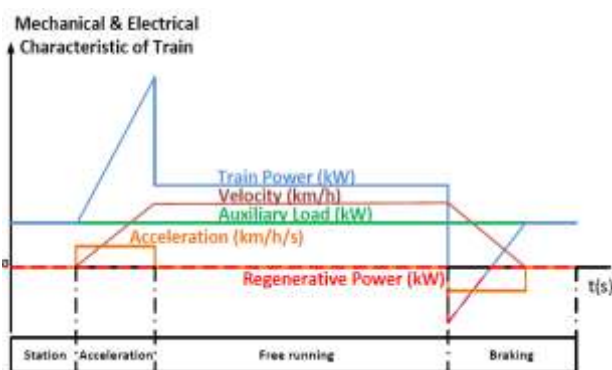
$$P = \frac{1558.33}{8} = 194.79 \text{ kW}$$

จากกำลังที่คำนวณได้ต้องมีกรเพื่อค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน ทำให้เลือกใช้มอเตอร์กระแสรอกขนาด 250 kW ซึ่งมีพารามิเตอร์ดังนี้

$$P = 250 \text{ kW}, U_s = 750 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, \text{ Pole} = 2, \cos\phi = 0.85, R_s = 0.289\Omega, R_r = 0.217\Omega, L_s = 0.0019 \text{ H}, L_r = 0.00239 \text{ H}, L_m = 0.0559 \text{ H}$$

4.ผลการทดลอง

การขับเคลื่อนขบวนรถ คุณลักษณะของมอเตอร์ในแต่ละช่วงของการขับเคลื่อนมีความแตกต่างกันดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 คุณลักษณะและกำลังที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างสถานี

กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่ขบวนรถเริ่มออกตัวเป็นช่วงที่มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดเพื่อให้ขบวนรถสามารถเร่งความเร็วให้ถึงความเร็วที่กำหนดไว้ได้ ต่อมาในขณะที่ขบวนรถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ก็มีค่าลดลงและเป็นช่วงที่มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางลดลง

5.สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้ การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในขบวนรถไฟฟ้า ทำให้ทราบกำลังและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของขบวนรถระหว่างสถานี หรือตลอดเส้นทาง เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบโครงการรถไฟฟ้า เช่น การหาขนาดสายไฟฟ้า ขนาดรางที่สาม เป็นต้น และยังเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาและพัฒนาความรู้เกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนของขบวนรถไฟฟ้าสำหรับบุคลากรในประเทศให้มีความรู้ทัดเทียมผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ

6.กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้จาก ผศ.ดร.มงคล กงส์หิรัญณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยให้ความแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอบคุณวิศวกรที่เลี้ยงคุณอนุพล สอนเฟือก บริษัท ITALIAN – THAI DEVELOPMENT Public Company Limited

ขอบคุณอาจารย์มานะชัย วัฒนหัตถกรรม อาจารย์พยุษศักดิ์ อัลอุมารี อาจารย์ศุติศ เลิศสวัสดิ์วิชา จากทางบริษัท SIEMENS

ขอบคุณพี่เลี้ยงประจำห้องวิจัย Power Electronic & Motor Drive และทุกๆท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] มานะชัย วัฒนหัตถกรรม, (2556), ระบบควบคุมรถไฟ และ การอาณัติสัญญาณเบื้องต้น.
- [2] M. Tulbure, R.Both, R. Festila, (2012), Analysis of the induction railway traction motor in regenerative braking
- [3] SIEMENS, เอกสารประกอบการสอน Session 7 Power Supply System Overview for DC Railway
- [4] ผศ.ดร.มงคล กงส์หิรัญณ์, เอกสารประกอบการสอนวิชา Railway Traction Systems
- [5] A.Steimel, Electric Traction- Motive Power and Energy Supply
- [6] BTS Document, No:G00.RST.90102.EEE.0001.D, Train performance Calculation