

ชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก

STRAIGHT LINE MAGNETIC LEVITATION TRAIN MODEL SET

พูนศรี วรรณการ และ สาคกร วุฒิพัฒน์พันธุ์

Poonsri Wannakarn and Sakhon Woothipatanapan

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส เพื่อนำมาประยุกต์เป็นชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก จะแสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของรถไฟฟ้า โดยแบ่งหลักการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และส่วนของชุดขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว การเคลื่อนที่ของตัวรถจะควบคุมด้วยแมกนีติกคอนแทกเตอร์ สามารถทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง ประโยชน์ของชุดจำลองนี้เพื่อสามารถนำหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นและหลักการทำงานของชุดขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างรถไฟฟ้าลอยเหนือรางความเร็วสูงต่อไป

คำสำคัญ : มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น , แมกนีติกคอนแทกเตอร์

ABSTRACT

This paper presents about a design and development of three phases linear induction motor. Implementation of the electrical train composes of two parts i.e,(1) linear introduction motor part which control dynamic section and (2) float magnetic field part . Body's train moving is controlled by magnetic contactor for forward and reverse movement. Usefulness of this model can work with linear induction motor and float magnetic field theory to apply using high speed levitation train in the future.

Keywords: linear induction motor , magnetic contactor

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Department of Electrical Engineering , Faculty of Engineering , Rajamangala University of Technology Phra Nakorn

_Corresponding author. Email: v_poonsri555@hotmail.com

บทนำ

เทคโนโลยีของยานพาหนะได้รับพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือไฟฟ้า จนกระทั่งมีเทคโนโลยีใหม่โดยใช้เทคนิคการยกตัวและขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบการยกตัวด้วยพลังงานแม่เหล็ก ช่วยให้ขบวนรถลอยแบบไม่สัมผัสกับรางทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ล้อ ส่งผลให้ช่วยลดแรงเสียดทาน ลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ มีแรงในการขับเคลื่อนสูง รถไฟฟ้าระบบขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กนี้เรียกว่า Magnetic levitation train

บทความนี้นำเสนอรถไฟฟ้าจำลองที่อาศัยแรงผลักเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กทำให้ขบวนรถลอยตัวได้ ส่วนการเคลื่อนที่เดินทางหรือถอยหลังจะประยุกต์ใช้หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส มาขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจำลองให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

หลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ทำให้ชุดจำลองรถไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่

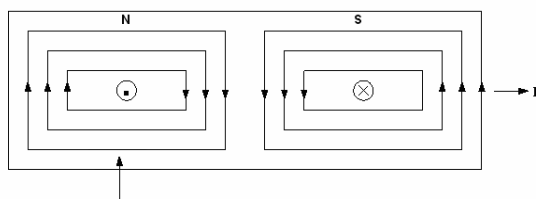
หลักการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เชิงเส้น(เกียรติศักดิ์ และปริญญา , 2546) สามารถอธิบายได้โดยใช้หลักทฤษฎีเดียวกับมอเตอร์แบบหมุน คือเมื่อจ่ายไฟให้แก่ขดลวดด้านปฐมภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ขึ้น แรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วซิงโครนัส มีค่าดังสมการที่ 1

$$U_s = 2\tau f \quad (1)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วซิงโครนัสนี้ จะเคลื่อนที่ตัดตัวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นที่ด้านทุติยภูมิ เมื่อรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิและแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านทุติยภูมิก็จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (2)

$$R = F_1 + F_2 \quad (2)$$

ส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นสามารถเคลื่อนที่ได้ นั้น เกิดจากการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กจากด้านปฐมภูมิตัดผ่านทุติยภูมิทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ด้านทุติยภูมิและทำให้เกิดกระแสไหลวนตามกฎของเลนซ์ซึ่งกล่าวว่า เมื่อมีแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลวนเป็นวงปิดอยู่บนแผ่นโลหะตัวนำ โดยทิศทางกระแสที่เกิขึ้นนี้จะมิติศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้ามาตัดกับแผ่นโลหะตัวนำ



เส้นทางกระแสที่วนรอบขดลวดที่เคลื่อนที่

รูปที่ 1 ทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำเมื่อมองจากด้านบนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางขวา เมื่อมองจากรูปด้านข้างจะเห็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าจากด้านปฐมภูมิและออกทางด้านทุติยภูมิ เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลวนอยู่บนแผ่นทุติยภูมิซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 และจากรูปที่ 1 นี้จะเห็นว่ากระแสไหลวนมีทิศทางพุ่งขึ้น (กระแสเหนี่ยวนำมีทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่) และอยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็กเหนือที่มีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาษ จะเกิดแรงกระทำต่อด้านทุติยภูมิซึ่งมีขนาดดังสมการที่ (3)

$$F = ILB \quad (3)$$

ผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

ผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์ที่สำคัญ(พรชัย และคณะ , 2547) แบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะคือ

1) ผลกระทบจากส่วนปลาย ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นจะเกิดผลกระทบจากส่วนปลายเป็นสองประเภทคือ

ก) ผลกระทบจากส่วนปลายชนิดอยู่กับที่ (Static end effect) ผลกระทบชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติการเปิดวงจรทางแม่เหล็กของมอเตอร์เชิงเส้น ซึ่งจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองต่อเฟส (Self inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วมต่อเฟส (mutual inductance) ทางด้านปฐมภูมิเกิดความไม่สมมาตรขึ้น

ข) ผลกระทบจากส่วนปลายชนิดเคลื่อนที่ (Dynamic end effect) ผลกระทบชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างด้านปฐมภูมิที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องจากกฎของเลนซ์ เมื่อตัวนำทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกจากช่องอากาศทางด้านออกนั้น กระแสของตัวนำทุติยภูมิทางด้านเข้าจะพยายามต้านการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ จึงส่งผลให้เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ จะทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องอากาศของขั้วแรกที่อยู่ใกล้ทางด้านเข้ามีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับขั้วถัดไป และหลังจากที่ตัวนำทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกไปทางด้านออก ตัวนำทุติยภูมิจะมีกระแสเพิ่มขึ้นเพื่อพยายามรักษาให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ ซึ่งกระแสนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อนโดยไม่มีผลในการสร้างแรง เสมือนกับทำให้เกิดค่าความต้านทานประสิทธิผลมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพและแรงสูงสุดที่มอเตอร์สร้างได้มีค่าลดลง ผลกระทบประเภทนี้จะเกิดขึ้นมากกับมอเตอร์เชิงเส้นที่มีความเร็วสูง

2) ผลกระทบจากขอบด้านข้าง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า และเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางแนวขวาง อันเนื่องมาจากตัวนำทุติยภูมิมีความกว้างมากกว่าด้านปฐมภูมิ ซึ่งจะพบว่าส่วนของตัวนำทุติยภูมิที่ยื่นเกินออกไปจากด้านปฐมภูมิจะมีกระแสไหลวนอยู่เช่นเดียวกับส่วนของตัวนำทุติยภูมิที่อยู่ภายในของปฐมภูมิ ซึ่งกระแสในส่วนที่เกินออกมานี้จะไม่มีผลต่อการสร้างแรงให้กับตัวนำทุติยภูมิ แต่กลับจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กออกมารบกวนเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายไม่สม่ำเสมอ

3) ผลกระทบจาก การรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากช่องอากาศมีค่ามาก ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นส่วนใหญ่จะได้รับผลกระทบนี้

ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องอากาศทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะรูปร่างเมื่อทางเดินของฟลักซ์ผ่านช่องอากาศอย่างไม่สมบูรณ์ ภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการรั่วไหลบางส่วนขึ้นที่ช่องอากาศ ในกรณีเช่นนี้จึงต้องมีสมการสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาอีกค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าคงที่เรียกว่า ค่าปรับปรุงความถูกต้อง (Correction factor K_1) ดังแสดงได้ตามสมการที่ (4)

$$K_1 = \frac{\sinh \frac{\pi}{\tau} g_0}{\frac{\pi}{\tau} g_0} \quad (4)$$

4) ผลกระทบที่ผิวเนื่องมาจากความหนาแน่นของแผ่นเพลททางด้านทุติยภูมิการกระจายความเข้มของกระแสเหนี่ยวนำในกรณีของผลกระทบที่ผิว เมื่อแผ่นเพลททางด้านทุติยภูมิมีแกนเหล็กตามอุดมคติซ้อนอยู่ด้านหลัง (Solid back iron) ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่าความนำจริงของแผ่นเพลทมีค่าตามสมการที่ (5)

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{k_{sk}} \quad (5)$$

$$k_{sk} = \frac{2d}{ds} \left[\frac{\sinh \left(\frac{2d}{ds} \right) + \sin \left(\frac{2d}{ds} \right)}{\cosh \left(\frac{2d}{ds} \right) - \cos \left(\frac{2d}{ds} \right)} \right] \quad (6)$$

และ ds คือ ความลึกหยั่งเห็น (The depth of penetration) ซึ่งคำนวณค่าได้จากสมการที่ 7

$$ds = \frac{1}{\sqrt{\left(\pi \sigma f_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 \right)}} \quad (7)$$

ส่วนในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบสองด้านจะเปลี่ยนจาก d เป็น $d/2$

วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

ในวงจรเสมือนของมอเตอร์เชิงเส้นต้องคำนึงถึงผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากด้านข้างด้วย โดยผลกระทบจากด้านข้างจะรวมได้โดยตรงกับอิมพีแดนซ์ทางด้าน ทุติยภูมิ ส่วนผลกระทบจากส่วนปลายนั้นจะรวมอยู่ในวงจรโดยเป็นอิมพีแดนซ์ที่แปรผันตามสลิปซึ่งเรียกว่าอิมพีแดนซ์จากผลกระทบของส่วนปลาย (End effect impedance) แต่ในการใช้งานที่ความเร็วต่ำจะมีผลกระทบจากส่วนปลายน้อยมาก จึงสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากโครงสร้างด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นทำมาจากแผ่นตัวนำบาง ๆ จึงต้องพิจารณาถึงสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (8)

$$\rho_r = \frac{\rho}{d} \quad (8)$$

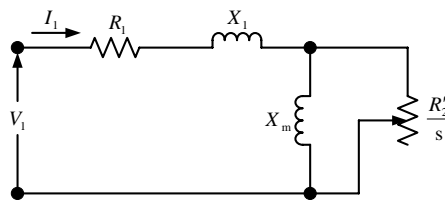
เมื่อ ρ_r คือ สภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว

ρ คือ สภาพความต้านทานเชิงปริมาตร

d คือ ความหนาของแผ่นโลหะบางที่ใช้ทำทุติยภูมิ

เงื่อนไขของการใช้วงจรเสมือนในการวิเคราะห์ตามรูปที่ 2

1. วงจรเสมือนนี้ใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าวิเคราะห์
2. ตัวแปรต่าง ๆ ภายในวงจรเสมือนจะพิจารณาเป็นค่าต่อเฟสเท่านั้น
3. เนื่องจากพิจารณาว่าค่าลี้คเจอร์แอคแทนซ์ด้านทุติยภูมิ (X_2) นั้น มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับทางด้านปฐมภูมิ (X_1) ดังนั้นจึงประมาณว่า $X_2 = 0$ ดังรูป



รูปที่ 2 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่พิจารณาตามเงื่อนไขแล้ว

การหาค่าตัวแปรต่างๆในวงจรเสมือนสามารถหาได้ดังนี้

ความต้านทานด้านปฐมภูมิ R_1 แสดงได้ดังสมการที่ (9) ดังนี้

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q K_p^2 m^2 D_{avp} N^2}{K_f K_d p \tau^2} \quad (9)$$

ลี้คเจอร์แอคแทนซ์ด้านปฐมภูมิ

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 \omega D_{avp} \lambda_c N^2}{pq} \quad (10)$$

ความต้านทานด้านทุติยภูมิ

$$R'_2 = \frac{6\pi D_{avp} \rho_r (K_w N)^2}{\tau p} \quad (11)$$

ลี้คเจอร์แอคแทนซ์ด้านทุติยภูมิ

$$X'_2 = 0 \quad (12)$$

แมกนีไทซ์ลี้คเจอร์แอคแทนซ์

$$X_m = \frac{6\mu_0 \omega \tau}{\pi^2} (K_w N)^2 \left(\frac{\pi D_0}{pg} \right) \quad (13)$$

ค่าตัวประกอบการออกแบบที่ดี (Goodness factor)

$$G = \frac{X_m}{R'_2} = \frac{2\mu_0 f \tau^2}{\rho'_r \pi g} \quad (14)$$

โดยทฤษฎีกฎมือขวาเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นทางเดินปิด ซึ่งจะทำให้เกิด

$$mmf = Ni = F = H\ell \quad (15)$$

จะทำให้ได้แรงที่เกิดในแกนเหล็กวงปิดรูปตัวยูดังสมการที่ 16

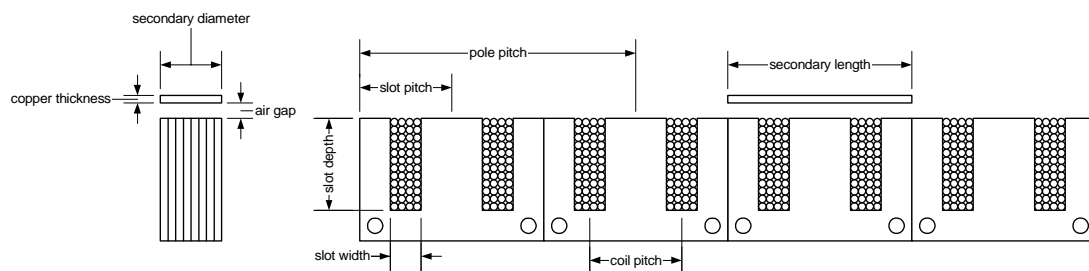
$$\text{Force} = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{A\mu N^2 i^2}{l^2} \quad (16)$$

การออกแบบและการสร้าง

ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนื่อรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของมอเตอร์เหนียวนำเชิงเส้น(สาคร, 2545) และส่วนของชุดขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว โดยมีรายละเอียดดังจะได้กล่าวต่อไป

การออกแบบสร้างมอเตอร์เหนียวนำเชิงเส้น

วงจรเสมือนโดยประมาณของมอเตอร์เหนียวนำเชิงเส้นในรูปที่ 2 นั้นเหมือนกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนียวนำแบบหมุนโดยทั่วไป โดยในรูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 3 รายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

รายละเอียดในการออกแบบ

แรงดันเฟส (V_1)	220 โวลท์
ความถี่ไฟฟ้า (f)	50 เฮิรตซ์
ความเร็วเชิงมุม ($\omega = 2\pi f$)	314.16 รอบ/วินาที
จำนวนเฟส (m)	3 เฟส
ความกว้างของส่วนปฐมภูมิ (D_0)	0.0254 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดปฐมภูมิ (D_{av})	0.00163 เมตร
จำนวนรอบ/นิ้ว (n)	120 รอบ

จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก (p)	6 คู่ขั้ว
Pole Pitch (τ)	0.115 เมตร
Slot Pitch (t_c)	0.038 เมตร
Coil Pitch (C_c)	0.0383 เมตร
Slot Width (w)	0.0127 เมตร
Slot Depth (t)	0.0382 เมตร
สล็อต/โพล/เฟส (q)	1
ความกว้างของส่วนทุติยภูมิ (D_{avs})	0.0254 เมตร
ความยาวของส่วนทุติยภูมิ (Secondary Length)	0.0762 เมตร
ความหนาของส่วนทุติยภูมิ (d)	0.0005 เมตร
ช่องอากาศทางกล (g_m)	0.01 เมตร
ช่องอากาศทางแม่เหล็ก ($g = g_m + d$)	0.0105 เมตร
จำนวนรอบของขดลวด/เฟส (N)	1440 รอบ
Copper Volume Resistance (ρ_c)	$2 \times 10^{-8} \Omega/m^3$
Secondary Part Surface Resistance ($\rho_r = \rho_c / d$)	$4 \times 10^{-5} \Omega/m^3$
Primary Winding Distribution factor (K_w)	0.9
Slot Filling Factor (K_f)	0.5
K_p ($K_p = t_c / w$)	2.99
K_d ($K_d = t / w$)	3
β ($\beta = C_c / \tau$)	0.33
λ_s ($\lambda_s = \frac{1}{12} K_d (1 + 3\beta)$)	0.5
λ_d ($\lambda_d = \frac{(5g/w)}{(5+4g/w)}$)	0.004
λ_c ($\lambda_c = \lambda_s + \lambda_d$)	0.504

จากข้อมูลที่มีและวงจรเสมือนในรูปที่ 3 ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณา จะไม่คิดเรื่องผลกระทบที่ผิวด้านทุติยภูมิ ใช้งานความเร็วต่ำ และให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว ซึ่งจะหาค่าต่างๆได้ดังนี้

1) ความต้านทานด้านปฐมภูมิ (จากสมการที่ 9)

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q K_p^2 m^2 D_{avs} N^2}{K_f K_d p \tau^2}$$

แทนค่า

$$R_1 = \frac{\pi (2 \times 10^{-8}) (1) (2.99^2) (3^2) (0.00163) (1440^2)}{(0.5)(3)(6)(0.115^2)}$$

$$R_1 = 0.1436 \Omega / \text{phase}$$

2) รีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านปฏิกิริยา (จากสมการที่ 10)

$$X_1 = \frac{2\pi\mu_0\omega D_{avp}\lambda_c N^2}{pq}$$

แทนค่า

$$X_1 = \frac{2\pi(4\pi \times 10^{-7})(314.16)(0.00163)(0.504)(1440^2)}{6 \times 1}$$

$$= 0.7043 \text{ } \Omega / \text{phase}$$

3) แมกนีไทซ์รีแอกแตนซ์ (จากสมการที่ 13)

$$X_m = \frac{6\mu_0\omega\tau}{\pi^2} (K_w N)^2 \left(\frac{\pi D_0}{pg} \right)$$

แทนค่า

$$X_m = \frac{6(4\pi \times 10^{-7})(314.16)(0.115)}{\pi^2} \times (0.9 \times 1440)^2 \times \left(\frac{\pi \times 0.0254}{6 \times 0.0105} \right)$$

$$= 58.7169 \text{ } \Omega / \text{phase}$$

4) ความต้านทานด้านปฏิกิริยา (จากสมการที่ 11)

$$R'_2 = \frac{6\pi D_{avp}\rho_{r'}}{\tau p} (K_w N)^2$$

แทนค่า

$$R'_2 = \frac{6\pi(0.0254)(4 \times 10^{-5})}{(0.115)(6)} \times (0.9 \times 1440)^2$$

$$= 46.6182 \text{ } \Omega / \text{phase}$$

5) ดีเคจรีแอกแตนซ์ด้านปฏิกิริยา (จากสมการที่ 12)

$$X'_2 = 0$$

6) Goodnees Factor (จากสมการที่ 14)

$$G = \frac{X_m}{R'_2}$$

$$= \frac{58.7169}{46.6182} = 1.26$$

เงื่อนไขการออกแบบที่เหมาะสมกำหนดให้

$$S.G = 1$$

$$S = \frac{1}{G} = \frac{1}{1.26} = 0.794$$

7) กระแสด้านปฐมภูมิ (I_1) คำนวณได้จาก

$$I_1 = \frac{V_1}{(R_1 + jX_1) + (R'_2 // jX_m)}$$

$$I_1 = \frac{220}{(0.1436 + j0.7043) + \left(\frac{46.6182 \times j58.7169}{46.6182 + j58.7169} \right)}$$

$$I_1 = 5.935 \text{ A}$$

8) แรงผลักดันที่ได้ (F_x) คำนวณได้จาก

$$F_x = \frac{3I_1^2 R'_2}{SU_s \left[\frac{1}{(SG)^2} + 1 \right]}$$

และความเร็วเชิงโคโรน่า (จากสมการที่ 1)

$$U_s = 2f$$

ดังนั้น

$$F_x = \frac{3 \times (5.935)^2 \times (46.6182)}{0.794 \times (2 \times 0.115 \times 50) \times \left[\frac{1}{1^2} + 1 \right]} = 269.755 \text{ N}$$

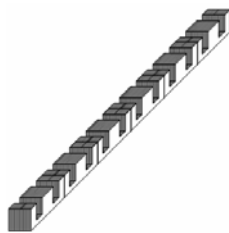
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของส่วนทุติยภูมิ (U_r) คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} U_r &= (1-S)U_s \\ &= (1-0.794) \times (2 \times 0.115 \times 50) = 2.4 \text{ m / sec} \end{aligned}$$

การออกแบบนี้จะไม่นำผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากขอบด้านข้างมาเกี่ยวข้องเพื่อให้
ง่ายและสะดวกในการคำนวณ โดยค่าแรงผลักดันและความเร็วของส่วนทุติยภูมิที่ได้จากการออกแบบนี้เมื่อสร้างชุด
เครื่องกลไฟฟ้าขึ้นมาอาจจะได้ค่าที่น้อยกว่าที่ออกแบบเนื่องจากการสูญเสียในส่วนต่าง ๆ คุณภาพของวัสดุที่ใช้
และความคลาดเคลื่อนทางกลในส่วนต่าง ๆ ซึ่งการสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนี้จะมีข้อจำกัดคือความยาว
ของขั้วแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของแกนเหล็กรูปตัว E ขนาด 1 นิ้ว และน้ำหนักของส่วนที่เคลื่อนที่ ซึ่งมีผลต่อ
ความเร็วในการเคลื่อนที่

โครงสร้างของส่วนอยู่กับที่ (Stator)

ใช้แกนเหล็กกลาไมเนทรูปตัว E ที่ใช้ในหม้อแปลงมาประกอบกันตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 การประกอบแผ่นเหล็กกลาไมเนท

จากโครงสร้างของสเตเตอร์ที่ประกอบขึ้นทำให้ได้จำนวนร่องสลิตทั้งหมด 36 Slot ดังนั้นจึงมีขดลวดสเตเตอร์อยู่ 36 ชุด ซึ่งขนาดและจำนวนรอบของลวดทองแดงสามารถคำนวณได้ดังนี้

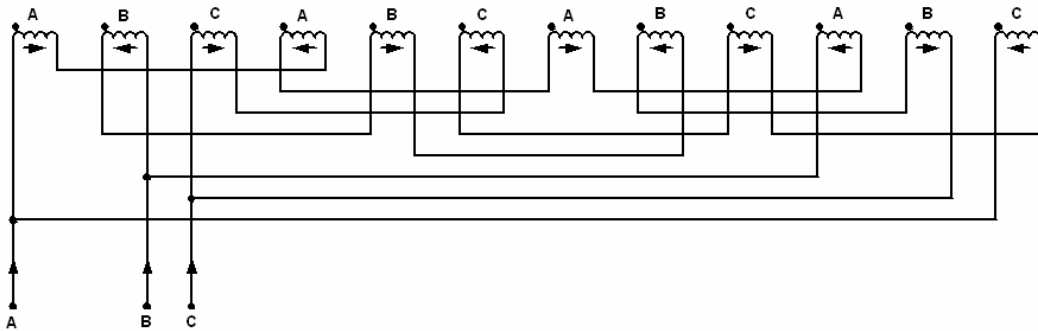
- พื้นที่หน้าตัดของแต่ละขั้ว

$$\begin{aligned} A &= X \times Y \\ &= 0.0254 \times 0.0254 \\ &= 6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ในการออกแบบต้องไม่ให้เกิดการอิ่มตัว และค่า Saturation Flux Density ของ Electrical iron คือ 2.15 T หรือค่า $B_{\max} = 2.15 \text{ wb/m}^2$

- เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

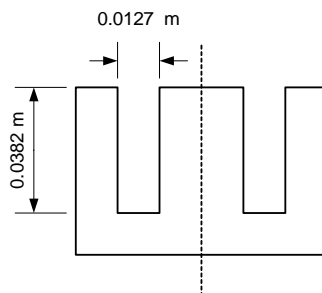
$$\begin{aligned} \phi &= B_{\max} \cdot A \\ &= 2.15 \times 6.4516 \times 10^{-4} \\ &= 1.3871 \times 10^{-3} \text{ wb} \end{aligned}$$



รูปที่ 5 การต่อขดลวดมอเตอร์ 3 เฟสแบบเดลต้า

จากสเตเตอร์ที่มี 36 สลิต ใช้ขดลวด 36 ชุด เพื่อลงในสลิตโดยออกแบบเป็น 12 ขั้ว ในแต่ละเฟสจึงมีขดลวด 12 ชุด ถ้าพิจารณาที่เฟสใดเฟสหนึ่ง เช่น เฟส A จะเสมือนว่ามีขดลวด 12 ชุด ต่ออนุกรมกันอยู่ ถ้าจ่ายแรงดัน 450 V จะมีแรงดันตกคร่อม 37.5 V ต่อขดลวด 1 ชุด ถ้ามองว่าขดลวด 1 ชุด ที่พื้นบนแกนเหล็กเปรียบเสมือนหม้อแปลง ถ้าไม่คิดความต้านทานในขดลวด จะได้

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{V_1}{4.44 \times f \times \phi_{\max}} \\ &= \frac{37.5}{4.44 \times 50 \times 1.3871 \times 10^{-3}} \\ &= 120 \text{ รอบ} \end{aligned}$$



รูปที่ 6 พื้นที่ในการลงขดลวดของร่องสลิต

จากรูปที่ 6 พื้นที่ในการลงขดลวด = $0.0382 \times 0.0127 = 4.85 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

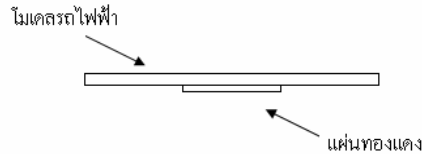
Filling factor (kf) = 0.5

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้ = $\frac{0.5 \times 4.85 \times 10^{-4}}{120} = 2.021 \text{ mm}^2$

เปิดตารางเทียบขนาดลวดตัวนำเพื่อเลือกขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงที่ใกล้เคียงกับขนาดที่คำนวณได้ จึงเลือกใช้เบอร์ 16 SWG (2.112 mm^2)

โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่ (Rotor)

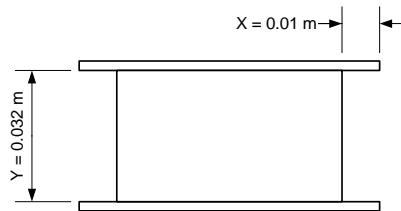
โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่เป็นแผ่นทองแดง ติดอยู่กับตัวโมเดลรถไฟฟ้าดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่ (Rotor)

- คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว

เลือกลวดทองแดงเบอร์ 16 มีเนื้อที่หน้าตัด (A_d) 2.112 mm^2



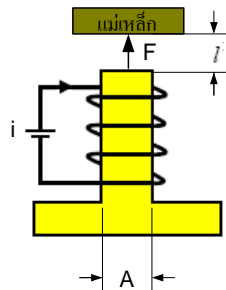
รูปที่ 8 ขนาดของบ็อบบินที่ใช้ทำขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว

ดังนั้น

$$N = \frac{K_f \times X \times Y}{A_d} = \frac{0.5 \times 10 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}}{2.112 \text{ mm}^2} \approx 80 \text{ turns}$$

- คำนวณหาแรง (F) ของขดลวดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว

แกนเหล็กมีพื้นที่หน้าตัด (A) = 0.000645 m^2 ใช้กระแส (i) ประมาณ 10 A. และระยะห่างช่องอากาศ (l) ประมาณ 0.01 m.



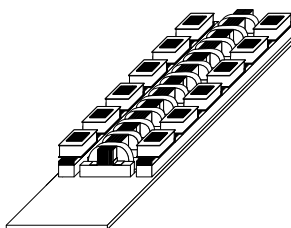
รูปที่ 9 รายละเอียดการคำนวณของขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว

ดังนั้น (จากสมการที่ 16)

$$F = \frac{A \mu N^2 i^2}{l^2} = \frac{0.000645 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 80^2 \times 10^2}{0.01^2} = 5.187 \text{ N}$$

- โครงสร้างของชุดขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว

ประกอบด้วยแกนเหล็กจำนวน 40 ตัววางต่อกัน 2 แถว แถวละ 20 ตัว การต่อวงจรขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัวนั้นจะต่อแบบปลายต่อต้นทำให้ได้ขั้วแม่เหล็กเดียวกันตลอด



รูปที่ 10 การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นและชุดสนามแม่เหล็กลอยตัวประกอบเข้าด้วยกัน

การออกแบบสร้างส่วนตัวรถไฟฟ้า

ส่วนตัวรถไฟฟ้าจะประกอบกันดังรูป



รูปที่ 11 ส่วนประกอบของตัวรถไฟฟ้า

การออกแบบวงจรชุดควบคุม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ชุดควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น จะเป็นการควบคุมให้สามารถเคลื่อนที่แบบ Forward และ Reverse จะมี Limit Switch ทำหน้าที่เป็นตัวตัดวงจรการทำงานของชุดมอเตอร์ เมื่อส่วนเคลื่อนที่ของโมเดลรถไฟฟ้าวิ่งมาชน

- ชุดควบคุมขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว จะใช้หน้าสัมผัสปกติเปิดของ Magnetic Contactor เป็นตัวควบคุมการ เปิด - ปิด ของขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว โดยเมื่อชุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นทำงานจะทำให้ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัวเริ่มทำงานพร้อมกัน และจะหยุดการทำงานพร้อมกันเมื่อส่วนที่เคลื่อนที่วิ่งไปชน Limit Switch

ผลการทดลอง

ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง และกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพ เมื่อน้ำหนักตัวรถ 100 กรัม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพ เมื่อน้ำหนักตัวรถ 100 กรัม ลอยตัวสูง 0.4 เซนติเมตร

แรงดันไฟฟ้าอินพุต (V)	เวลาเฉลี่ย (s)	อัตราเร็ว (m/s)	แรง (N)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
300	1.694	0.885	52.271	46.285	1.076
310	1.538	0.975	63.413	61.846	1.344
320	1.444	1.039	71.938	74.728	1.541

ตารางที่ 1(ต่อ) ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพ ที่น้ำหนักตัวรถ 100 กรัม ลอยตัวสูง 0.4 เซนติเมตร

แรงดันไฟฟ้า อินพุต (V)	เวลาเฉลี่ย (s)	อัตราเร็ว (m/s)	แรง (N)	กำลังไฟฟ้า เอาต์พุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
330	1.344	1.116	83.041	92.679	1.799
340	1.252	1.198	95.694	114.649	2.085
350	1.142	1.313	115.016	151.072	2.539
360	1.042	1.439	138.152	198.875	3.207
370	0.892	1.682	188.522	317.021	4.877
380	0.804	1.866	232.049	432.927	6.320
390	0.752	1.995	265.250	529.089	7.399
400	0.708	2.119	299.244	633.990	8.453

ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง และกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพ เมื่อน้ำหนักตัวรถ 115 กรัม แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพ ที่น้ำหนักตัวรถ 115 กรัม ลอยตัวสูง 0.2 เซนติเมตร

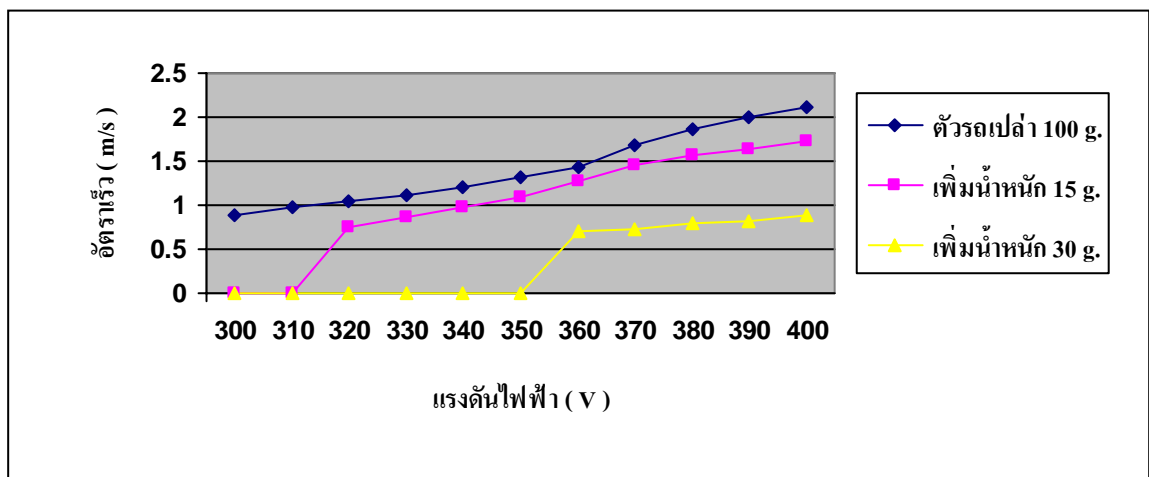
Volt (V)	Time (s)	อัตราเร็ว (m/s)	F (N)	P _{out} (w)	ประสิทธิภาพ (%)
320	1.970	0.761	44.448	33.843	0.698
330	1.750	0.857	56.327	48.279	0.937
340	1.546	0.970	72.172	70.025	1.273
350	1.374	1.092	91.373	99.752	1.677
360	1.184	1.267	123.051	155.893	2.514
370	1.032	1.453	161.968	235.418	3.622
380	0.958	1.566	187.957	294.295	4.296
390	0.920	1.630	203.804	332.289	4.647
400	0.872	1.720	226.859	390.239	5.203

ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง และกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต และประสิทธิภาพ เมื่อน้ำหนักตัวรถ 130 กรัม แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยและการคำนวณหาค่าอัตราเร็ว แรง กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต และ ประสิทธิภาพ ที่น้ำหนักตัวรถ 130 กรัม ลอยตัวสูง 0.2 เซนติเมตร

Volt (V)	Time (s)	อัตราเร็ว (m/s)	F (N)	P _{out} (w)	ประสิทธิภาพ (%)
360	2.146	0.698	42.342	29.596	0.477
370	2.034	0.737	47.134	34.759	0.535
380	1.912	0.785	53.341	41.847	0.611
390	1.814	0.827	59.259	49.002	0.685
400	1.684	0.891	68.762	61.249	0.817
410	1.552	0.966	80.956	78.244	1.009
420	1.410	1.064	98.084	104.344	1.296
430	1.278	1.174	119.391	140.131	1.678
440	1.098	1.366	161.765	220.962	2.554
450	0.930	1.613	225.459	363.645	4.063

กราฟการเปรียบเทียบอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบลอยตัวที่น้ำหนักตัวรถเปล่า 100 กรัม 115 กรัม และ 130 กรัม แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟการเปรียบเทียบอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบลอยตัวที่น้ำหนักต่างๆ

การทดสอบชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก โดยการป้อน แรงดันทดสอบทางด้านอินพุต แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การทดสอบชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก

บทสรุป

ผลทดลองการเคลื่อนที่พร้อมกับการลอยตัวเพื่อหาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ ในการทดลองจะเริ่มจ่ายแรงดันที่ 300 Vac ไปจนถึง 400 Vac โดยเพิ่มครั้งละ 10 Vac ถ้าจ่ายเกินอาจทำให้ชุดขดลวดของชุดเคลื่อนที่เสียหายได้ และผลการทดลองจากกราฟรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่า ถ้าจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทดลองเพิ่มน้ำหนักให้กับตัวรถไฟฟ้า จากเดิม 100 กรัม เป็น 115 กรัม และ 130 กรัม และระยะการลอยตัวจะลดต่ำลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักให้กับตัวรถจำลองส่วนที่ลอยตัว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายชวลิต ทองศรี นายณพพล ศิริวัฒน์ และนายชินโรส ศรีวาทิต ที่ให้ความช่วยเหลือในการค้นคว้าข้อมูลและทดสอบชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก

เอกสารอ้างอิง

เกียรติศักดิ์ พิมพ์ภา ; ปริญา รอดแก้ว. “แบบจำลองการลอยตัวของรถไฟฟ้า ระยะที่ 3.” ปริญยานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2546

พรชัย สุวรรณะ ; อาทร สุกใส ; เมธิ อุดมสุข. “ เครื่องเจาะรูแผ่นอลูมิเนียมโดยใช้หลักการมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส แบบทรงกระบอก ” ปริญยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ , 2547

สาคร วุฒิปัทธพันธ์. “ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก.”ปริญยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2545