

ชุดจำลองรถไฟฟาลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก

STRAIGHT LINE MAGNETIC LEVITATION TRAIN MODEL SET

พูนศรี วรรณการ และ สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
Poonsri Wannakran and Sakhon Woothipatanapan

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส เพื่อนำมาประยุกต์เป็นชุดจำลองรถไฟฟาลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก จะแสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของรถไฟฟาลอย โดยแบ่งหลักการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และส่วนของชุดขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว การเคลื่อนที่ของตัวรถจะควบคุมด้วยแมกนีติกคอนแทกเตอร์ สามารถทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง ประโยชน์ของชุดจำลองนี้เพื่อสามารถนำหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นและหลักการทำงานของชุดขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว ไปประยุกต์ใช้งานในโอกาสต่อไปได้

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น , แมกนีติกคอนแทกเตอร์ , ข้างหน้า , ถอยหลัง

ABSTRACT

This paper presents about studying and three-phases linear induction motor development were explained the electrical train working by categorized in two types are linear introduction motor part which control dynamic section and float magnetic field part . Body's train moving was controlled by magnetic contactor that can be forward and reverse moved . Usefulness of this model can work with linear induction motor and float magnetic field theory to apply next appoint time .

Keywords: linear induction motor , magnetic contactor , forward , reverse

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของยานพาหนะถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือไฟฟ้า จนกระทั่งได้มีการนำเสนอเทคโนโลยี ซึ่งเป็นระบบการยกตัวและขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยระบบการยกตัวให้ขบวนรถลอยไม่สัมผัสกับรางด้วยพลังงานแม่เหล็กทำให้รถไฟขบวนนี้ไม่มีล้อ ส่งผลให้ช่วยลดแรงเสียดทาน ระหว่างล้อและราง ลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ มีแรงในการขับเคลื่อนสูง รถไฟฟ้าระบบขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กนี้เรียกว่า Magnetic levitation train

บทความนี้นำเสนอรถไฟฟ้าจำลองที่อาศัยแรงผลักดันเนื่องจากสนามแม่เหล็กทำให้ขบวนรถ
ลอยตัวได้ ส่วนการเคลื่อนที่เดินทางหรือถอยหลังจะประยุกต์ใช้หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
เชิงเส้น 3 เฟส มาขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจำลองให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ทำให้ชุดจำลองรถไฟเกิดการเคลื่อนที่

หลักการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เชิงเส้น[1] สามารถอธิบายได้โดยใช้หลักทฤษฎีเดียวกับมอเตอร์แบบหมุน คือเมื่อจ่ายไฟให้แก่ขดลวดด้านปฐมภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ขึ้น ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโครนส์ มีค่าคงสมการ

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

โดยที่

U_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)

τ คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch)

f คือ ความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์ (Input frequency)

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัลนี้ จะเคลื่อนที่ตัดตัวนำของขดลวดด้าน
หุติยภูมิซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นที่ด้านหุติยภูมิ เมื่อรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ
และแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านหุติยภูมิก็จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ซึ่งมีค่าดังสมการ

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

โดยที่

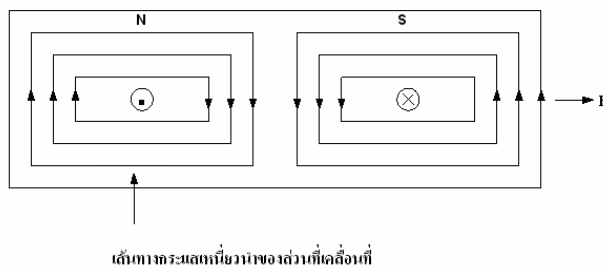
R คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กกลับ

F1 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ

F2 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ

ส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นสามารถเคลื่อนที่ได้ นั้น เกิดจากการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กจากด้านปฐมภูมิตัดผ่านทุติยภูมิทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ด้านทุติยภูมิและทำให้เกิดกระแสไหลวนตามกฎของเลนซ์ซึ่งกล่าวว่า เมื่อมีแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านแผ่นตัวนำจะทำให้เกิด

ให้เกิดกระแสไหลเป็นวงปิดอยู่บนแผ่นโลหะตัวนำ โดยทิศทางการไหลของกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้ามาตัดกับแผ่นโลหะตัวนำ



รูปที่ 1 แสดงทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำเมื่อมองจากด้านบนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางขวา เมื่อมองจากรูปด้านข้างจะเห็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าจากด้านปฐมภูมิและออกทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลวนอยู่บนแผ่นทุติยภูมิซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 และจากรูปที่ 1 นี้จะเห็นว่ากระแสไหลวนมีทิศทางพุ่งขึ้น (กระแสเหนี่ยวนำมีทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่) และอยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็กเหนือที่มีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาษ จะเกิดแรงกระทำต่อต้านทุติยภูมิซึ่งมีขนาดดังสมการ

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

โดย

- F คือ แรงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ
- I คือ กระแสเหนี่ยวนำ
- L คือ ความยาวของตัวนำ
- B คือ ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า

ผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

แบ่งออกเป็นผลกระทบ[2] ที่สำคัญ 4 ลักษณะคือ

1) ผลกระทบจากส่วนปลาย ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นจะเกิดผลกระทบจากส่วนปลายเป็นสองประเภทคือ

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

ข) ผลกระทบจากส่วนปลายชนิดเคลื่อนที่ (Dynamic end effect) ผลกระทบชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างด้านปฐมภูมิที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องจากกฎของเลนซ์ เมื่อตัวนำทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกจากช่องอากาศทางด้านออกนั้น กระแสของตัวนำทุติยภูมิทางด้านเข้าจะพยายามต้านการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ จึงส่งผลให้เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ จะทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องอากาศของผู้ขั้วแรกที่อยู่ใกล้ทางด้านเข้ามีค่าลดลงอย่างมาก

เมื่อเทียบกับคู่ชั่วคราว และหลังจากที่ตัวนำทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกไปทางด้านนอก ตัวนำทุติยภูมิจะมีกระแสเพิ่มขึ้นเพื่อพยายามรักษาให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ ซึ่งกระแสนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อนโดยไม่มีผลในการสร้างแรง เสมือนกับทำให้เกิดค่าความต้านทานประสิทธิผลมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพและแรงสูงสุดที่มอเตอร์สร้างได้มีค่าลดลง ผลกระทบประเภทนี้จะเกิดขึ้นมากกับมอเตอร์เชิงเส้นที่มีความเร็วสูง

2) ผลกระทบจากขอบด้านข้าง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางแนวขวาง อันเนื่องมาจากตัวนำทุติยภูมิมีความกว้างมากกว่าด้านปฐมภูมิ ซึ่งจะพบว่าส่วนของตัวนำทุติยภูมิที่ยื่นเกินออกไปจากด้านปฐมภูมิจะมีกระแสไหลวนอยู่เช่นเดียวกับส่วนของตัวนำทุติยภูมิที่อยู่ภายในของปฐมภูมิ ซึ่งกระแสในส่วนที่เกินออกมาจะไม่มีส่วนต่อการสร้างแรงให้กับตัวนำทุติยภูมิ แต่กลับจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กออกมารบกวนเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายไม่สม่ำเสมอ

3) ผลกระทบจาก การรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากช่องอากาศมีค่ามาก มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นส่วนใหญ่จะมีข้อมูลอยู่ในช่วงนี้คือ

ช่องอากาศทางกล $g_m \cong 2 \text{ ถึง } 5 \text{ mm.}$

$$g_m / \tau \cong 0.44 \text{ mm. } (\tau = \text{pole pitch})$$

ความหนาของแผ่นเพลทด้านทุติยภูมิ $d \cong 9 \text{ ถึง } 6 \text{ mm.}$

ช่องอากาศทางแม่เหล็ก $g_o = g_m + d$

ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องอากาศทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะรูปร่างเมื่อทางเดินของฟลักซ์ผ่านช่องอากาศอย่างไม่สมบูรณ์ ภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการรั่วไหลบางส่วนขึ้นที่ช่องอากาศในกรณีเช่นนี้จึงต้องมีสมการสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาอีกค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าคงที่เรียกว่า ค่าปรับปรุงความถูกต้อง (Correction factor K_1)

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

4) ผลกระทบที่ผิวเนื่องมาจากความหนาแน่นของแผ่นเพลททางด้านทุติยภูมิการกระจายความเข้มของกระแสเหนี่ยวนำในกรณีของผลกระทบที่ผิว เมื่อแผ่นเพลททางด้านทุติยภูมิมีแกนเหล็กตามอุดมคติซ้อนอยู่ด้านหลัง (Solid back iron)

ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่าความนำจริงของแผ่นเพลทมีค่า

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

โดยที่ σ_e คือ ค่าความนำจริงของแผ่นเพลท

σ คือ ค่าความนำอุดมคติ

และ k_{sk} คือ ค่าตัวประกอบความถูกต้องซึ่งหาได้จาก

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

โดยที่ d คือ ความหนาแน่นของแผ่นเพลท

และ ds คือ ความลึกหยั่งเห็น (The depth of penetration) ซึ่งหาได้จาก

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

โดยที่ f_1 คือ ความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์

s คือ สลิป

τ คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก

ส่วนในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบสองด้านจะเปลี่ยนจาก d เป็น $d/2$

วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

ในวงจรเสมือนของมอเตอร์เชิงเส้นต้องคำนึงถึงผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากด้านข้างด้วย โดยผลกระทบจากด้านข้างจะรวมได้โดยตรงกับอิมพีแดนซ์ทางด้าน ทฤษฎี ส่วนผลกระทบจากส่วนปลายนั้นจะรวมอยู่ในวงจรโดยเป็นอิมพีแดนซ์ที่แปรผันตามสลิปซึ่งเรียกว่าอิมพีแดนซ์จากผลกระทบของส่วนปลาย (End effect impedance) แต่ในการใช้งานที่ความเร็วต่ำจะมีผลกระทบจากส่วนปลายน้อยมาก จึงสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากโครงสร้างด้านทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นทำมาจากแผ่นตัวนำบาง ๆ จึงต้องพิจารณาถึงสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว ซึ่งมีค่าเท่ากับ

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

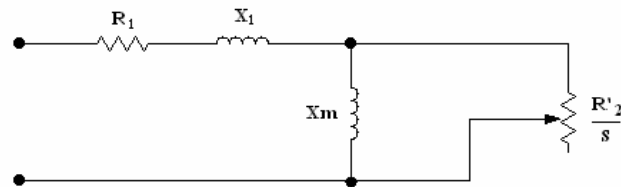
โดยที่ ρ_r คือ สภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว

ρ คือ สภาพความต้านทานเชิงปริมาตร

d คือ ความหนาของแผ่นโลหะบางที่ใช้ทำทฤษฎี

เงื่อนไขของการใช้วงจรเสมือนในการวิเคราะห์

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



รูปที่ 2 แสดงวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่พิจารณาตามเงื่อนไขแล้ว

การหาค่าตัวแปรต่างๆในวงจรเสมือนสามารถหาได้ดังนี้

ความต้านทานด้านปฐมภูมิ

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

ลี้คเกจรีแอคแตนซ์ด้านปฐมภูมิ

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

ความต้านทานด้านทุติยภูมิ

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

ลี้คเกจรีแอคแตนซ์ด้านทุติยภูมิ

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

แมกนีไทซิงรีแอคแตนซ์

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

ค่าตัวประกอบการออกแบบที่ดี (Goodness factor)

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

โดยที่ K_1 คือ Mean length of coil end connection/ Pole pitch = 1.2 - 1.8

K_2 คือ Winding breadth factor

K_p คือ Slot pitch/ Slot width = 2-3

K_f คือ Slot filling factor = 0.5 – 0.6

K_d คือ Slot depth / Slot width = 3 – 5

K_w คือ Primary winding distribution factor = 0.9

N คือ จำนวนรอบขดลวดต่อเฟส

U_s คือ ความเร็วเชิงโคโรนัส = $2\pi f$

f คือ ความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

P คือ คู่ขั้วแม่เหล็ก

m คือ จำนวนเฟส

l คือ Stack width

q คือ Slot/Pole/Phase

g คือ ช่องอากาศทางแม่เหล็ก = ช่องอากาศทางกล+ความหนาแผ่นตัวนำทุติยภูมิ

ω คือ $2\pi f$

τ คือ Pole pitch

μ_0 คือ $4\pi \times 10^{-7}$

β คือ Cording factor = Coil pitch / Pole pitch

ρ_c คือ ค่าความต้านทานเชิงปริมาตรของทองแดง

ρ'_r คือ ค่าความต้านทานประสิทธิผลของแผ่นตัวนำด้านทุติยภูมิ

λ_s คือ Slot specific permeances = $\frac{1}{12}K_d(1+3\beta)$

λ_d คือ Differential specific permeances = $\frac{(5g / slotpitch)}{((5 + 4g) / slotwidth)}$

λ_e คือ End connection specific permeances = $0.3(3\beta + 1)$

λ_c คือ $\lambda_s + \lambda_d$

โดยทฤษฎีกฎมือขวาเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นทางเดินปิด ซึ่งจะทำให้เกิด

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

จะทำให้ได้แรงที่เกิดในแกนเหล็กวงปิดรูปตัวยูดังสมการที่ 16

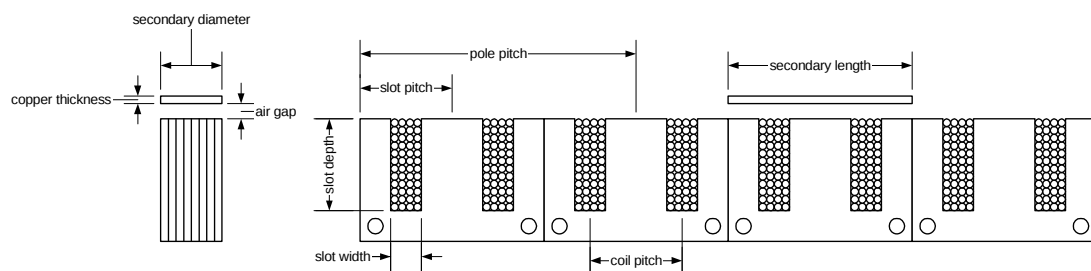
$$\text{Force} = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{A\mu N^2 i^2}{l^2} \quad (16)$$

การออกแบบและการสร้าง

ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดจำลองรถไฟฟ้าลอยเหนือรางขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงด้วยสนามแม่เหล็ก จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นและส่วนของชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กลอยตัว โดยมีรายละเอียดดังจะได้กล่าวต่อไป

การออกแบบสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น[3]

วงจรเสมือนโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นเหมือนกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน (Rotary) โดยทั่วไป



รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

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
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชุดลวดปฐมภูมิ (D_{avp})	0.00163 เมตร
จำนวนรอบ/ขั้ว (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
สล๊อต/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)

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

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) รีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านปฐมภูมิ (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) แมกนีไทซ์รีแอคแตนซ์ (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) ความต้านทานด้านทุติยภูมิ (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) ลีเกจรีแอคแตนซ์ด้านทุติยภูมิ (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) แรงผลักที่ได้ (F_x) คำนวณได้จาก

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

และความเร็วเชิงโคโรนา (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

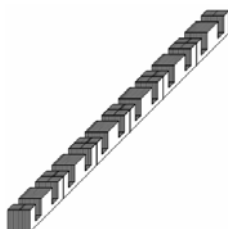
$$U_r = (1-S)U_s$$

$$= (1-0.794) \times (2 \times 0.115 \times 50) = 2.4 \text{ m/sec}$$

การออกแบบนี้จะไม่นำผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากขอบด้านข้างมาเกี่ยวข้อง เพื่อให้่ายและสะดวกในการคำนวณ โดยค่าแรงผลักและความเร็วของส่วนทุติยภูมิที่ได้จากการออกแบบนี้เมื่อสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าขึ้นมาอาจจะได้ค่าที่น้อยกว่าที่ออกแบบเนื่องจากการสูญเสียในส่วนต่าง ๆ คุณภาพของวัสดุที่ใช้ และความคลาดเคลื่อนทางกลในส่วนต่าง ๆ ซึ่งการสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนี้จะมีข้อจำกัดคือความยาวของขั้วแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของแกนเหล็กรูปตัว E ขนาด 1 นิ้ว และน้ำหนักของส่วนที่เคลื่อนที่ ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่

โครงสร้างของส่วนอยู่กับที่ (Stator)

ใช้แกนเหล็กลามิเนตรูปตัว E ที่ใช้ในหม้อแปลงมาประกอบกันตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 การประกอบแผ่นเหล็กลามิเนต

จากโครงสร้างของสเตเตอร์ที่ประกอบขึ้นทำให้ได้จำนวนร่องสลิตทั้งหมด 36 Slot ดังนั้นจึงมีขดลวดสเตเตอร์อยู่ 36 ชุด ซึ่งขนาดและจำนวนรอบของลวดทองแดงสามารถคำนวณได้ดังนี้

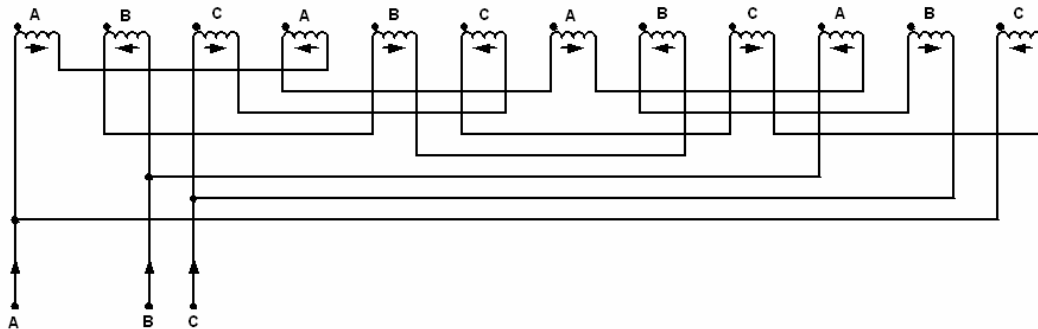
- พื้นที่หน้าตัดของแต่ละขั้ว

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

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

- เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

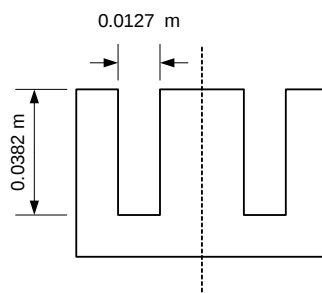
$$\begin{aligned} \phi &= B_{\max} \cdot A \\ &= 2.15 \times 6.4516 \times 10^{-4} \\ &= 1.3871 \times 10^{-3} \text{ wb} \end{aligned}$$



รูปที่ 5 แสดงการต่อขดลวดมอเตอร์ 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 ที่พันบนแกนเหล็กเปรียบเสมือนหม้อแปลง 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 แสดงพื้นที่ในการลงขดลวดของร่องสลิต

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

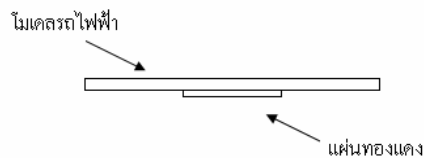
Filling factor (kf) = 0.5

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

เปิดตารางเทียบขนาดลวดตัวนำเพื่อเลือกขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงที่ใกล้เคียงกับขนาดที่คำนวณได้ จึงเลือกใช้เบอร์ 16 SWG (2.112 mm²)

โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่ (Rotor)

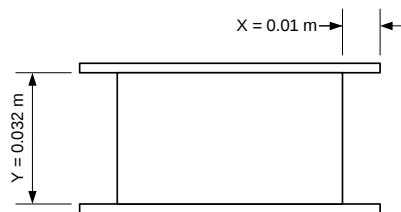
โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่เป็นแผ่นทองแดง ติดอยู่กับตัวโมเดลรถไฟฟ้าดังรูป



รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่ (Rotor)

- คำนวณหาจำนวนรอบของขดขดลวดสนามแม่เหล็กถาวร

เลือกลวดทองแดงเบอร์ 16 มีเนื้อที่หน้าตัด (Ad) 2.112 mm²



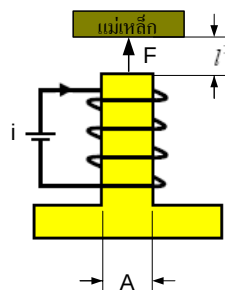
รูปที่ 8 แสดงขนาดของบ๊อบบินที่ใช้ทำขดลวดสนามแม่เหล็กถาวร

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) ของขดขดลวดสนามแม่เหล็กถาวร

แกนเหล็กมีพื้นที่หน้าตัด (A) = 0.000645 m² ใช้กระแส (i) ประมาณ 10 A. และระยะห่างช่องอากาศ (l) ประมาณ 0.01 m.



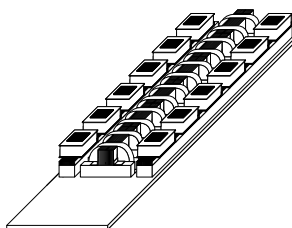
รูปที่ 9 แสดงรายละเอียดการคำนวณของขดขดลวดสนามแม่เหล็กถาวร

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 แสดงการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นและชุดสนามแม่เหล็กลอยตัวประกอบเข้าด้วยกัน

การออกแบบสร้างส่วนตัวรถไฟฟ้า

ส่วนตัวรถไฟฟ้าจะประกอบกันดังรูป



รูปที่ 11 แสดงส่วนประกอบของตัวรถไฟฟ้า

การออกแบบวงจรชุดควบคุม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ชุดควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น จะเป็นการควบคุมให้สามารถเคลื่อนที่แบบ Forward และ Reverse จะมี Limit Switch ทำหน้าที่เป็นตัวตัดวงจรการทำงานของชุดมอเตอร์ เมื่อส่วนเคลื่อนที่ของโมเดลรถไฟฟ้าวิ่งมาชน
- ชุดควบคุมขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว จะใช้น้ำสัมผัสปกติเปิดของ Magnetic Contactor เป็นตัวควบคุมการ เปิด – ปิด ของขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัว โดยเมื่อชุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นทำงานจะทำให้ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กลอยตัวเริ่มทำงานพร้อมกัน และจะหยุดการทำงานพร้อมกันเมื่อส่วนที่เคลื่อนที่วิ่งไปชน Limit Switch

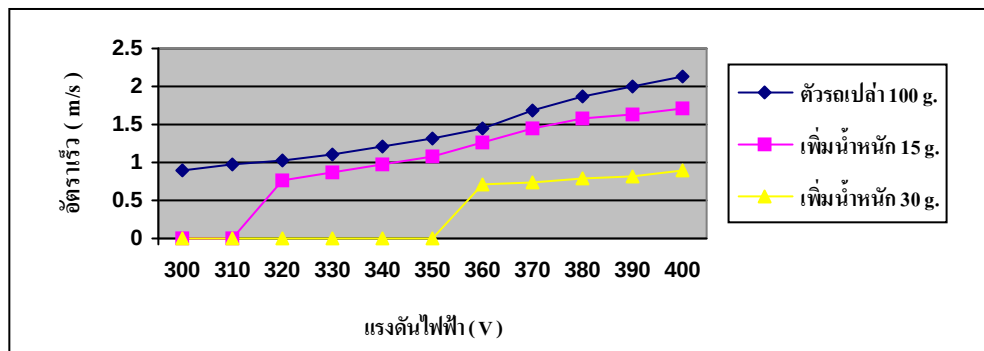
ผลการทดลอง

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนกับค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบลอยตัว เมื่อน้ำหนักตัวรถเปล่า 100 กรัม , 115 กรัม และ 130 กรัม แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 12 แสดงกราฟการเปรียบเทียบอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบลอยตัวที่น้ำหนักต่างๆ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบลอยตัว เมื่อน้ำหนักตัวรถขนาดต่างๆ

แรงดัน (V)	น้ำหนักรถ 100 กรัม	น้ำหนักรถ 115 กรัม	น้ำหนักรถ 130 กรัม
300	1.694	-	-
310	1.538	-	-
320	1.444	1.970	-
330	1.344	1.750	-

340	1.252	1.546	-
350	1.142	1.374	-
360	1.042	1.184	2.146
370	0.892	1.032	2.034
380	0.804	0.958	1.912
390	0.752	0.920	1.814
400	0.708	0.872	1.684



รูปที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบลอยตัวที่น้ำหนักต่างๆ

บทสรุป

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

เอกสารอ้างอิง

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

ปริญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2546

พรชัย สุวรรณะ ; อาทร สุขใส ; เมธิ อุดมสุข. “ เครื่องเจาะรูแผ่นอลูมิเนียมโดยใช้หลักการมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส แบบทรงกระบอก ” ปริญาณิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ , 2547

สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์. “ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2545