

มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้า

Traction motor for railway

พิริวัฒน์ ตั้งเตียงแสงเจริญ , ปิยะวัฒน์ กวินเพ็ญกุล , ญัฐพล ดวงธรรม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อสรุปชนิดและวิธี ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ได้ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในยุคแรก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในปัจจุบันนิยมใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามากที่สุด และ ลิเนียร์มอเตอร์ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่เรียกว่า maglev โดยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากตำราเรียน ,งานวิจัยเกี่ยวกับรถไฟฟ้า , และข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องจากอินเทอร์เน็ต ค้นอกจากมอเตอร์แล้วในงานวิจัยฉบับนี้ยังมีเนื้อหาของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับ รถไฟฟ้าเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

คำสำคัญ: ระบบจ่ายไฟฟ้า,มอเตอร์ขับเคลื่อน,เทคโนโลยีควบคุมมอเตอร์

Abstract

This paper is studied for conclude the type and driving method of electric motor in rolling stock. In the past DC motor is used to drive the rolling stock. But nowadays, AC motor is the most popular to drive rolling stock. And the Linear motor has been using in high speed train technology. That technology's called "Maglev technology". We use 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: Railway Electrification System, Traction motor, Control Technology

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนด้วยรถไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการเดินทางของบุคคลทั่วไปเพราะการขนส่ง มีความรวดเร็ว และความสะดวกสบายอย่างมากในการเดินทาง โดยระบบจ่ายไฟฟ้า สำหรับการ ขับเคลื่อน รถไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นสองส่วนที่สำคัญ สำหรับการขนส่งด้วย รถไฟฟ้า โดยระบบขับเคลื่อนขบวนรถจะเริ่มค้น

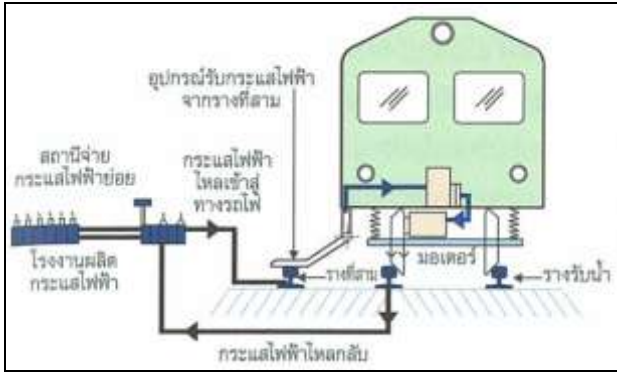
จากโรงจักรไอน้ำจะอาศัยคันชักคันส่ง พลังงาน ไปยังล้อเพื่อขับเคลื่อน ขบวนรถต่อมาเป็นรถจักรดีเซล ซึ่งได้พัฒนาเป็นรถจักรดีเซลไฟฟ้า จะใช้ ดีเซลเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไป ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ต่อมาเป็นช่วงรถไฟฟ้าซึ่งจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเช่นเดียวกันแต่จะไม่มีแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากภายใน ขบวนรถจะรับไฟฟ้าจากภายนอกขบวนรถแทน และ มอเตอร์ไฟฟ้า ที่ถูกนำมาใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเพื่อให้ขบวนรถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้มี หลายชนิดและหลายวิธีที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีความเร็ว ได้ตามต้องการ ทั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ที่ได้รับความนิยมในอดีตเพราะมีคุณสมบัติแรงบิดขณะ เริ่มออกตัวสูง ต่อมาเป็น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ จะมี 2 ชนิด ที่นิยมใช้ในการขับเคลื่อนคือ มอเตอร์ซิงโครนัส กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน และลิเนียร์มอเตอร์ ที่ใช้กับ maglev ที่มีความเร็วสูงกว่าขบวนรถที่ใช้ มอเตอร์กระแสสลับเนื่องจากไม่มีล้อจึงไม่มีแรงต้านระหว่างล้อกับราง

2.ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า

ระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า คือการส่งกระแสไฟฟ้า จากสถานี ไปสู่ ขบวนรถไฟฟ้าเพราะ รถไฟฟ้าไม่มีแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าในขบวนรถ เหมือนรถไฟจึงต้องทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ไปยังขบวน รถไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อน ขบวนรถ โดยระบบจ่าย กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยระบบจ่าย กระแสไฟฟ้าทั้งสองประเภทจะรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิต เหมือนกันแต่จะแตกต่างกันตรงที่กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ตัวรถ

2.1ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

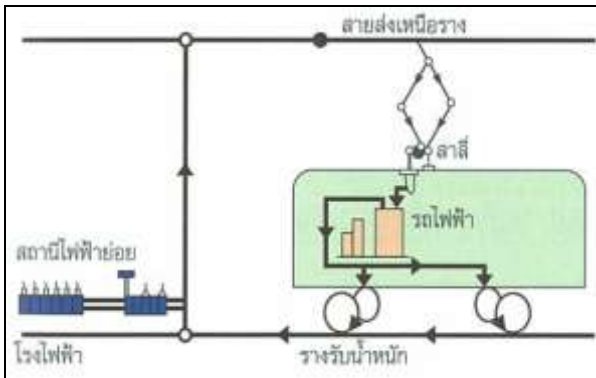
ระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งระดับ แรงดันไฟฟ้า ที่ใช้จ่ายเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้า ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 600 V , 750 V , 1500 V , 3000 V สำหรับแรงดันไฟฟ้า1500Vและ3000 V จ่ายกระแสไฟฟ้า ทางสายส่งเหนือหัว สำหรับแรงดันไฟฟ้า 600 V และ 750 V จะจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รางที่ 3 หรือรางที่ 4 สำหรับในประเทศไทยใช้แรงดันไฟฟ้า 750V จ่ายไฟฟ้าเข้ารางที่สาม ขบวนรถไฟฟ้าจะรับ กระแสไฟฟ้าผ่านทาง Collector shoeเพื่อนำไปใช้ในขบวนรถแล้วใช้ราง วิ่งเป็นทางให้กระแสไหลกลับสู่แหล่งจ่ายซึ่งจะมีใช้ในBTSและ MRTA



รูปที่ 1 ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านทางรางที่สาม

2.2 ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จ่ายเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 15 kV , 25 kV และ 50 kV ที่ความถี่ 16.7 Hz ,50 Hz ,60 Hz โดยระบบที่นิยมใช้จะเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า 25 kV ที่ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ขึ้นอยู่กับประเทศที่ใช้ไฟ ผ่านสายส่งเหนือหัว ในประเทศไทยก็มีการใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 25 kV 50 Hz ที่ Airport Rail Link ขบวนรถไฟฟ้าจะรับกระแส ไฟฟ้าจากสายส่งเหนือหัวผ่านทาง Pantograph เพื่อนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ในตัวขบวนรถและใช้สร้างเป็นพลังงานให้กระแสไหลกลับเข้าสู่แหล่งจ่าย



รูปที่ 2 ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบสายส่งเหนือหัว

3. มอเตอร์ขับเคลื่อน

สำหรับมอเตอร์ที่ใช้สำหรับขบวนรถมี 3 ชนิด คือ DC motor , AC motor และ Linear motor

3.1 มอเตอร์กระแสตรง(DC motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องกลชนิดแรกที่ถูกสร้างขึ้นจะใช้สำหรับการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากลายเป็นพลังงานกล และ เนื่องจาก

มอเตอร์ขับเคลื่อนกระแสตรง ควบคุมความเร็ว ง่ายและ High Starting Torque โดย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท

1. Separately excited motor หรือ Sepex จะเป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมในการใช้ควบคุมความเร็ว ในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโหลดที่ต้องการแรงบิดคงที่ตลอดย่านความเร็ว

2. Series motor จะต่อขดลวดกระตุ้นอนุกรมกับarmature โดยมอเตอร์แบบอนุกรม จะให้แรงบิดขณะเริ่มต้นสูงจึงนิยมใช้ในรถไฟ เครื่องไฟฟ้า และใช้ในงานหนักได้ดี แต่เมื่อใช้ในงานหนักความเร็วรอบจะลดลง จึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ไม่เหมาะกับการใช้งานที่ความเร็วรอบคงที่

3. Shunt motor จะต่อขดลวดกระตุ้นขนานกับ armature ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ความเร็ว จะคงที่ และแรงบิดขณะเริ่มต้นต่ำ จึงเหมาะกับงานที่ความเร็วรอบคงที่ แรงบิดขณะเริ่มน้อย และเปลี่ยนความเร็วได้ง่าย

4. Compound motor จะรวมการต่อแบบอนุกรมและขนานเข้าด้วยกัน โดยรวมคุณสมบัติของมอเตอร์ อนุกรมและขนานไว้คือ แรงบิดขณะเริ่มต้นสูงและความเร็วรอบคงที่ การต่อขดลวดอนุกรม 2 แบบ คือ Cumulative Compound Motor มีแรงบิดที่สูงขึ้นและความเร็วช้ากว่าแบบขนาน มักไปใช้กับงานการขับเคลื่อน Load หนักๆ และ Differential Compound Motor จะนำไปใช้กับมอเตอร์ที่ต้องการความเร็วคงที่มากๆแต่มีข้อเสียตรงจะไม่เสถียรภาพขณะที่ได้รับ Load มากเกินไป

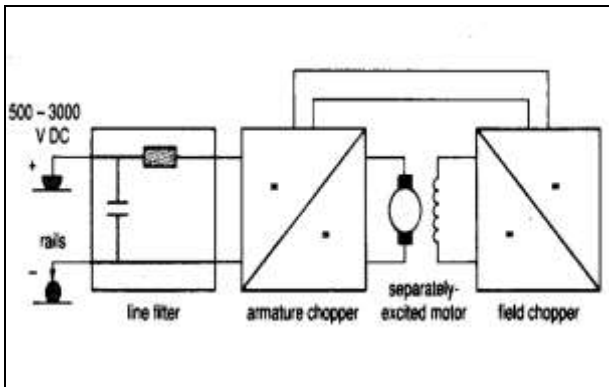
จากคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ 4 ชนิด มอเตอร์ที่นิยมใช้สำหรับรถไฟ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมเพราะแรงบิดขณะเริ่มต้นสูงซึ่งเป็นคุณสมบัติ ที่ขบวนรถต้องการขณะออกตัวจึงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับความนิยมมากกว่ามอเตอร์ชนิดอื่น

Control Technology สำหรับการควบคุมความเร็วของ มอเตอร์กระแสตรง สำหรับ ขบวนรถ ควบคุมได้หลายวิธียกตัวอย่างดังนี้

Resistance Control สำหรับการควบคุมมอเตอร์โดยวิธีการต่อตัวต้านทานอนุกรมเข้าไปจะใช้หลักการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์ด้วยการเปลี่ยนวามต้านทานเพื่อปรับเปลี่ยนระดับความเร็วโดยวิธีนี้ใช้ในรถไฟส มัยก่อนเพราะมีข้อสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียในตัวต้านทานในรูปของความร้อนที่สูง

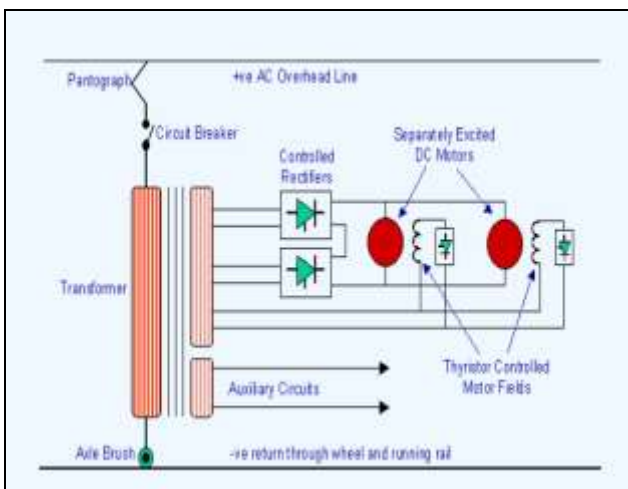
Series - Parallel Control จะใช้สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีจำนวนคู่ โดยเริ่มต้นจะต่อมอเตอร์แบบอนุกรมเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ไม่สูงเกินไปและเมื่อความเร็วถึงครึ่งหนึ่งของความเร็วปกติจะทำการเปลี่ยนให้มอเตอร์ทั้งสองตัวต่อแบบขนานกันเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์เพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วมอเตอร์ และจะมีตัวต้านทานเพื่อควบคุมความเร็วรอบอีกระดับหนึ่ง ข้อเสียของ Series parallel control คือการสูญเสียในตัวต้านทานอนุกรมในรูปความร้อนเนื่องจากจะต้องมีตัวต้านทาน

DC Chopper เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกระดับหนึ่ง โดยอาศัยการ On และ Off ของ Switch เพื่อทำการปรับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่เข้ามอเตอร์ไฟฟ้า ในทั่วโลกใช้ DC Chopper ในระบบขนส่งทั้งรถรางขนส่ง รถยก จะใช้ DC Chopper ในการควบคุมความเร็วและเบรก นี่มีข้อดีตรงที่ประสิทธิภาพสูง ตอบสนองเร็ว ขึ้นตอนในการควบคุมน้อย และสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้หลายค่า



รูปที่ 3 วงจร Chopper ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์กับขดลวดสนาม

Control of the motor voltage with AC system by phase control rectifiers เป็นวงจรที่ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและใช้สำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนมุมเริ่มนำกระแสของ Thyristor ก่อนที่จะทำการจ่ายเข้ามอเตอร์ โดยวงจร Phase controlled rectifier แบ่งได้ 2 แบบ คือ half controlled bridge rectifier และ full controlled ซึ่ง half controlled bridge rectifier มีข้อดีกว่า full controlled ตรงที่ใช้ Thyristor น้อยกว่า ถูกกว่าและค่า power factor มีค่าสูงกว่า



รูปที่ 4 รูปวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย Phase controlled rectifier

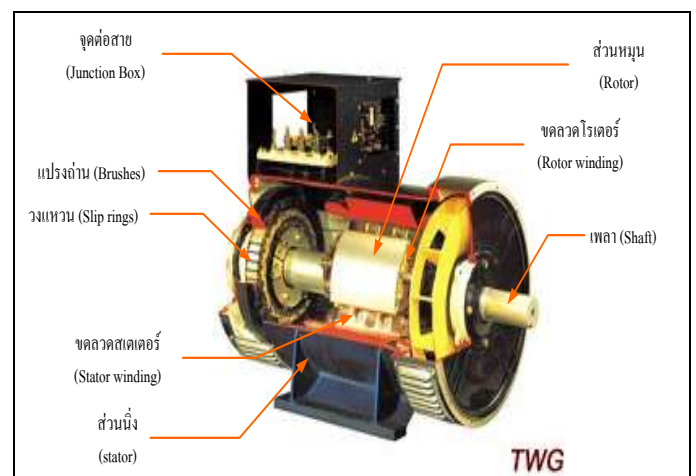
ข้อดีข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ การควบคุมแรงบิดและความเร็วสามารถทำได้ง่าย มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วและสามารถปรับความเร็วได้ในช่วงกว้างและข้อเสีย คือ มีการบำรุงรักษาบ่อยเนื่องจากแปรงถ่าน มีราคาแพงและใหญ่กว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงม้าเท่ากัน

3.2 มอเตอร์กระแสสลับ (AC motor)

มอเตอร์กระแสสลับ เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นพลังงานกล ซึ่งในอดีตยังไม่ค่อยนิยมใช้ในรถไฟเนื่องจากยังไม่มีวิธีที่สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ จนกระทั่งอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้พัฒนาขึ้นและได้มีการผลิต Inverter ที่ใช้ในการเปลี่ยนความเร็วรอบ ขึ้นและได้มีการปรับปรุงคุณภาพให้ใช้งานได้ยาวนาน เชื่อถือ จึงทำให้มอเตอร์กระแสสลับเป็นที่นิยมใช้สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟและรถไฟฟ้ามหานคร อย่างแพร่หลายปัจจุบัน ซึ่งมีมอเตอร์กระแสสลับที่แรงบิดขณะเริ่มต้นสูงที่เหมาะสมสำหรับรถไฟและรถไฟฟ้ามหานคร 2 ประเภท คือ Synchronous motor และ Induction motor

3.2.1 ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบคงที่คือความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ไม่ว่าจะมีโหลดหรือไม่ก็ตาม โดยมอเตอร์แบบซิงโครนัส ยังคงต้องใช้แปรงถ่านเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ rotor แต่ก็ไม่เป็นภาระในการบำรุงรักษาเท่ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในยุคแรกๆของรถไฟฟ้ามหานครความเร็วสูงฝรั่งเศส ใช้ Synchronous motor ในการขับเคลื่อนเพราะเทคโนโลยีในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ยังไม่ถูกพัฒนาให้มีความเสถียรภาพ โดยใช้ใน รถไฟความเร็วสูง TGVs , AVEs เป็นต้น



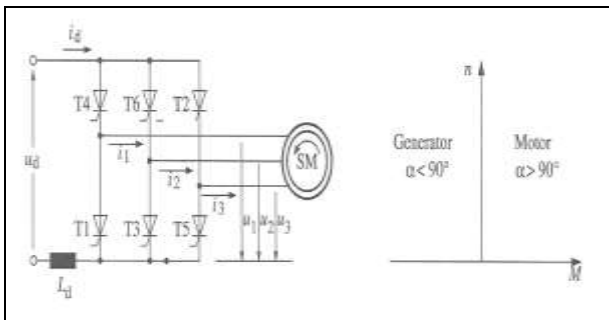
รูปที่ 5 ส่วนประกอบของ Synchronous motor

Synchronous motor มีความเร็วคงที่ตลอดไม่ว่าจะมีโหลดหรือไม่ มี โหลดก็ตาม โดยความเร็วจะเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน (N_s) แม้ ในขณะที่มอเตอร์ได้รับการ (Load) มากขึ้นก็ไม่ทำให้ความเร็วของ มอเตอร์หรือเปลี่ยนแปลงแต่เมื่อมอเตอร์ต้องการกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่ง ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะเป็นไปตามสมการ

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

Control Technology แบบ load-commutated inverter

ในการทำงานของ Synchronous ที่โหมด Over-excited มอเตอร์จะถูก ควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์แบบแปลงความถี่ด้วย Thyristor bridge ใน inverter เพื่อควบคุมความเร็ว โดยการเปลี่ยนความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ จ่ายเข้ามอเตอร์ โดยเครื่องกลซึ่งโครนัสจะทำงานเป็นมอเตอร์เมื่อ $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ และเมื่อเบรกจะทำงานเป็น Generator ที่ $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ โดย α คือมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า นอกจากนี้การ ขับเคลื่อนแบบ LCI มีคุณสมบัติในการทำให้เกิดการเบรกแบบคืนพลังงาน อีกด้วยซึ่งจะเป็นการคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

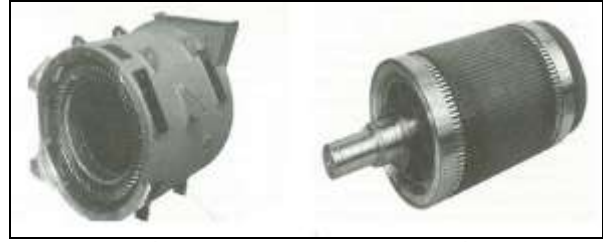


รูปที่ 6 วงจรขับเคลื่อนซึ่งโครนัสมอเตอร์แบบ load-commutated inverter

การพัฒนาและประสิทธิภาพในเทคโนโลยีการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ซึ่งโครนัสนี้ได้รับการ ขอมรับค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีขีดจำกัดทางด้าน น้ำหนักและการสูญเสียของ DC-link reactor และปัญหาในกรณีขวนวรค รังไปมาระหว่างประเทศที่มีความถี่ของระบบต่างกัน

3.2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor)

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำได้มีการ ใช้อย่างแพร่หลายเพราะเป็นมอเตอร์ที่มีราคาต่ำโครงสร้างง่ายแข็งแรง ทนทานและมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นไม่มีระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับ Rotor จึง สามารถขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของ rotor ให้ได้ขึ้นเพื่อให้มอเตอร์มี แรงบิดสูงขึ้นซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในรถไฟ อีกทั้งการพัฒนาของ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทำให้การควบคุมความเร็ว วรอบของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสสลับทำให้อมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับความนิยมในปัจจุบัน



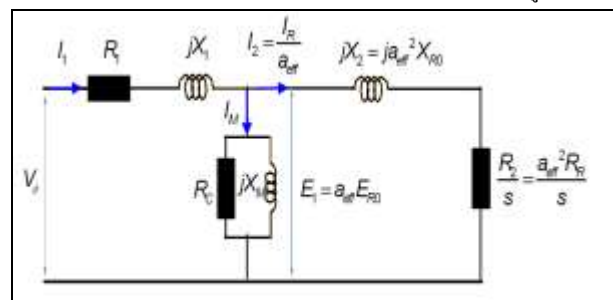
รูปที่ 7 Stator และ Rotor ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าที่ขดลวด Stator กระแสที่ไหลในขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งหมุนด้วยความเร็ว $N_s = 120f/p$ ซึ่งสนามแม่เหล็กจะตัดผ่านขดลวด Rotor ทำให้เกิดแรง เคลื่อนเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลที่ Rotor ซึ่งกระแสจะ สร้างสนามแม่เหล็กไปตัดกับสนามแม่เหล็กที่ขดลวด Stator ทำให้เกิด แรงบิดทำให้ Rotor เริ่มหมุนแต่ Rotor จะหมุนที่ความเร็วต่ำกว่า ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งความแตกต่างระหว่างความเร็วจะเรียกว่า ความเร็ว Slip $= N_s - N_r$ โดย $Slip = (N_s - N_r)/N_s$ เมื่อมอเตอร์อยู่นิ่ง $S = 1$ และเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน $S = 0$

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

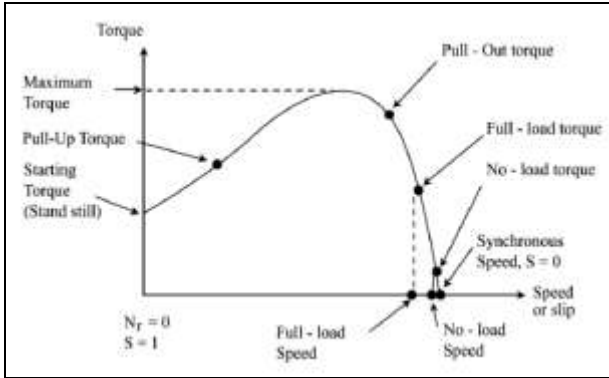
โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำคล้ายคลึงกับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ต่างกันตรงที่ Secondary ของมอเตอร์สามารถหมุนได้ วงจรสมมูล ของมอเตอร์จึงคล้ายคลึงกับหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อทำการกำหนดให้ a_{eff} เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของตัวนำด้าน Stator ต่อจำนวนรอบ ของตัวนำด้าน Rotor จึงสามารถเปลี่ยนวงจรสมมูลให้ง่ายขึ้นโดยการ ย้ายพารามิเตอร์ทางด้าน Rotor ไปด้าน Stator ซึ่งทำให้ได้ค่าตามรูปที่ 43



รูปที่ 8 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อ้างอิงไปทาง Stator

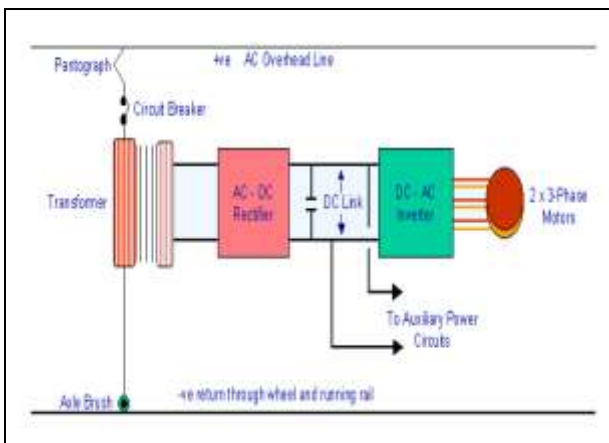
คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ขณะที่มอเตอร์หมุนตัวเปล่า (No - Load) ความเร็วของ มอเตอร์จะใกล้กับความเร็วซิงโครนัสและค่า Slip จะมีค่าน้อยมาก เมื่อ มอเตอร์ขับโหลด ความเร็วของมอเตอร์จะช้ากว่าความเร็วซิงโครนัสและ ค่า Slip จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำได้โดย ด้วยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนตามสมการ $N_s = 120f/P$ แต่ก็ทำให้กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย ต่อมาก็ได้มีการพัฒนา Inverter เพื่อควบคุมความเร็วรอบ ในปัจจุบัน Inverter สามารถแบ่งออกหลายประเภท ถ้าแบ่งตามวงจรภาคควบคุมจะแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ Scalar control และ Vector control โดยการควบคุมแบบ V/f คงที่ กรณีที่วงจรภาคกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าซึ่งอยู่ในประเภทของ Scalar control เป็นวิธีที่มีการใช้ในรถไฟที่จะทำการเปลี่ยนความเร็วรอบโดยการเปลี่ยนความถี่เมื่อเปลี่ยนความถี่จะทำให้พารามิเตอร์ในมอเตอร์เปลี่ยนจึงต้องทำการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้สมดุลเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ได้จากมอเตอร์

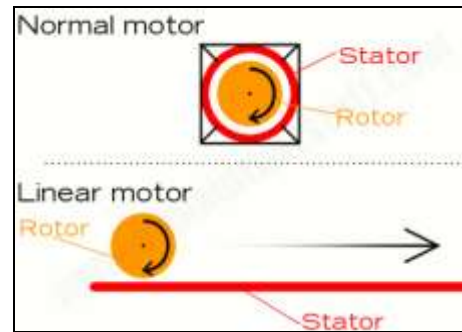


รูปที่ 10 รูประบบจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ข้อดีและข้อเสียของ AC motor จะมีข้อดีคือราคาถูก เล็ก และ เบากว่า DC motor ที่ขนาดพิกัดกำลังเท่ากัน มีลักษณะ โครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน การบำรุงรักษาน้อย แข็งแรงทนทาน จะมีข้อเสียคือ การควบคุมความเร็วจะต้องใช้อุปกรณ์ทาง power electronics มาควบคุมคือ inverter ซึ่งค่อนข้างจะมีราคา และเป็นตัวสร้าง Harmonic ขึ้น

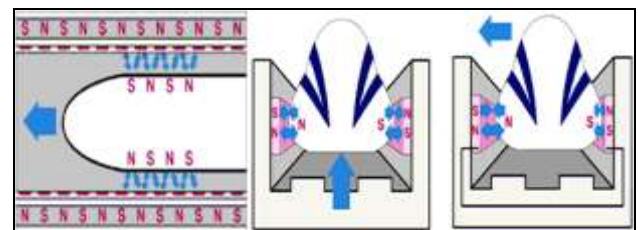
3.3 ลิเนียร์มอเตอร์ (Linear Motor)

Linear Motor ที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรม เฉพาะงานรถไฟไฟฟ้าคือ Linear Induction Motor(LIM) และ Linear Synchronous Motor(LSM) ที่พื้นฐานมาจาก Induction Motor แบบกรงกระรอกที่มี Rotor หมุนรอบจุดศูนย์กลางและมีช่องอากาศเป็นวงกลมแต่ linear Motor นี้จะมีช่องอากาศไม่ครบเป็นวงกลมแต่จะเป็นเส้นตรง



รูป 11 ความแตกต่างของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับกับ Linear motor

สำหรับรูปแบบของรถไฟไฟฟ้าที่ใช้ Linear Motor ในการขับเคลื่อนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบล้อยึดกับราง (Short stator linear motor) จะติดตั้ง Reaction Plate ไว้ระหว่างรางตลอดทางรถไฟ จะติดตั้งขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าไว้บนขบวนรถเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในแผ่นทองแดงที่รางและเกิดแรงดูดลากขบวนรถไฟ ซึ่งการใช้งานนี้จะมีประสิทธิภาพเพียง 60% ต่างจากมอเตอร์ธรรมดาซึ่งมีประสิทธิภาพ 90%

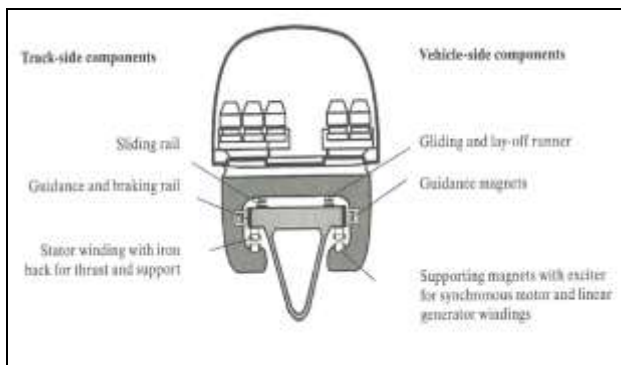


รูปที่ 12 ตัวอย่างระบบขับเคลื่อน ระบบยกตัวและระบบนำทาง Maglev

แบบที่สองคือแบบไม่มีล้อ Magnetic levitation (Maglev) จะใช้ Linear motorสร้างแรงจากสนามแม่เหล็กเพื่อยกและ ขับเคลื่อนตัวรถ ไปพร้อมๆ กัน ซึ่ง Maglev มีข้อได้เปรียบกว่ารถไฟที่ใช้ล้อ คือสามารถทำความเร็วได้สูงกว่า เคลื่อนที่เงียบ นุ่มนวลกว่า และไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแรงเสียดทานในการเพิ่มหรือลดความเร็ว แต่มีต้นทุนที่สูงกว่ามาก

Control Technology การควบคุมความเร็วของ Maglev จะมีอยู่เทคโนโลยีของประเทศเยอรมันและประเทศญี่ปุ่น สำหรับรายงานนี้จะขอกล่าวถึงเทคโนโลยี “TRANDRAPID” ของเยอรมันซึ่งมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์แล้วที่ประเทศจีน จะใช้ Linear synchronous motor แบบ long stator คือ Statorอยู่ที่รางตามแนวความยาวทั้ง 2 ข้าง ส่วน Rotorจะอยู่ในตัวรถ ในการขับเคลื่อน ซึ่ง “TRANDRAPID” จะมีระบบที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่หลักๆ 2 ระบบคือ Support system คือ ระบบที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อน

และ ขดตัวรถไฟทำให้ลอยเหนือพื้น และ Guidance system คือ ระบบที่ทำหน้าที่ประคองตัวรถไฟให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 13 ภาพตัววางของ รถไฟฟ้า TRANSRAPID TR06

Electromagnetic levitation จะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดตามสมการดังต่อไปนี้

$$F = \frac{1}{2} AH^2 \mu_0 \mu_r^2 \quad (2)$$

สมการความเร็วของ linear synchronous motor

$$v = 2f\tau_p \quad (3)$$

เมื่อ v = ความเร็วของมอเตอร์ (m/s), f = ความถี่ (Hz), τ_p = pole pitch (m) ของ “TRANDRAPID” มีค่า $\tau_p = 258 \text{ mm}$ ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มหรือลดความเร็วของ linear synchronous motor จะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ สำหรับ “TRANDRAPID” ถูกออกแบบมาให้มี Maximum speed = 500 km/h จะต้องมีค่าความถี่ $f = 268 \text{ Hz}$ ที่ stator

กรณีต้องการลดกำลังสูญเสียจากการทำงาน และต้องการให้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีการแบ่ง section ของ stator เมื่อมีการแบ่ง section ของ stator จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเปลี่ยน section ของ stator ด้วย สำหรับระยะค่าสุดของรอยต่อระหว่าง stator จะขึ้นอยู่กับ ความเร่งและความยาวของขบวนรถนั่นเองการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ stator coil ใน section ต่างๆนั้น จะต้อง synchronized กับตำแหน่งของรถไฟ ดังนั้นจะต้องมีระบบตรวจจับตำแหน่งของรถไฟที่มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ เพื่อส่งข้อมูลกลับไป Power converter station ซึ่ง Power converter station นี้จะทำหน้าที่ ปรับความถี่ ,แรงดัน และ เฟส เพื่อควบคุมให้รถไฟมีความเร็วได้ตามต้องการนั่นเอง

ข้อดีและข้อเสียของ Linear motor มีข้อดีคือการตอบสนองที่รวดเร็ว ความเร็วของมอเตอร์ไม่ขึ้นกับความถี่ และ เมื่อใช้กับงานรถไฟจะช่วยลดน้ำหนักของรถไฟได้มากจะมีข้อเสียคือมอเตอร์มีราคาแพง

สรุป

สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 750 V เข้าสู่ขบวนรถผ่านรางที่สามจะมีใช้ใน BTS และ MRTA ส่วนอีกระบบหนึ่งคือระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 25kV เข้าสู่ขบวนรถผ่านสายส่งเหนือหัว จะใช้ใน ARL เพื่อนำไปจ่ายให้มอเตอร์ขับเคลื่อนและระบบอื่นๆในขบวนรถ

สำหรับมอเตอร์ที่ใช้สำหรับขบวนรถมี 3 ชนิด คือ DC motor , AC motor และ Linear motor โดย DC motor จะใช้ในขบวนรถไฟ และมีความนิยมเป็นอย่างมากในอดีตเพราะสามารถควบคุมความเร็วรอบได้ง่าย แต่จะเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาสูงต่อมาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาขึ้นทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบของ AC motor ได้ง่ายขึ้น จึงได้รับความนิยมมากกว่าในปัจจุบันโดยจะมีใช้อยู่ในรถไฟในปัจจุบัน ต่อมาเป็นช่วง Linear motor ใช้อยู่ใน Maglev จะใช้แรงแม่เหล็กในการยกขบวนรถและขับเคลื่อนมีข้อดีคือการไม่มีล้อของขบวนรถไฟทำให้สามารถสร้างความเร็วได้มากกว่ารถไฟธรรมดา

บรรณานุกรม

- [1]นคร จันทพร (2554). ข่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ (พิมพ์ครั้งที่1). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [2]รศ.สัมพันธ์ ชาญเชล(2543).เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง(พิมพ์ครั้งที่18)
- [3] สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. **Electrical Machines I_Ch6**
- [4]สุชิน เสือช้อย .พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น.
- [5]A.Steimel, **Electric Traction- Motive Power and Energy Supply**, Oldenbourg Industrieverlag
- [6]Railway Technical Web Pages,<http://www.railway-technical.com/>
- [7]R. J. Hill. **Electric railway traction Part 1 Electric traction and DC traction motor drives**.
- [8] R.J. Kaye and Prof. Eisuke Masada. **Comparison of Linear Synchronous and Induction Motors**, Japan
- [9] **SYNCHRONIZED OPERATION OF A MAGNETICALLY LEVITATED VEHICLE**. Marcos Dantas Alves dos Santos, Richard Magdalena Stephan
- [10]http://www.slideshare.net/Eng_Ahmad/linear-motor-in-maglev-train

