

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 คำนำ

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยเรียงลำดับตั้งแต่การทำความเข้าใจเกี่ยวกับการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ ทฤษฎีของยานยนต์ทั่วไป การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าร่วมกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ในการขับเคลื่อนรถยนต์ ทฤษฎีและส่วนประกอบในการขับเคลื่อนยานยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ระบบพลังงานร่วม (Hybrid System) การขับเคลื่อนด้วยชุดมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงโครงสร้างและระบบการทำงานของชุดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ในอนาคตที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในโครงการวิจัยนี้ได้ดียิ่งขึ้น

2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้

1. การขับเคลื่อนแบบปรับความเร็ว (Adjustable-speed drives) การใช้งานของการขับเคลื่อนแบบนี้ เป็นการควบคุมความเร็วของพัดลม คอมเพรสเซอร์ ปั๊มไฮดรอลิกและอื่นๆ
2. การขับเคลื่อนแบบความเร็วคงที่ (Constant-speed drives) เช่นการลำเลียงของบนสายพานลำเลียงที่ต้องการความเร็วคงที่ในการลำเลียงวัตถุดิบ

การขับเคลื่อนแบบปรับความเร็ว (Adjustable-speed drive) สามารถทำได้โดยการลดกำลังงานขาเข้าลงโดยการลดความเร็วของมอเตอร์ลงก็จะทำให้อัตราการไหลลดลงด้วย ซึ่งกำลังที่ลดลงสามารถคำนวณได้

$$\text{Torque} \approx k \frac{1}{\text{Speed}^2} \quad (2.1)$$

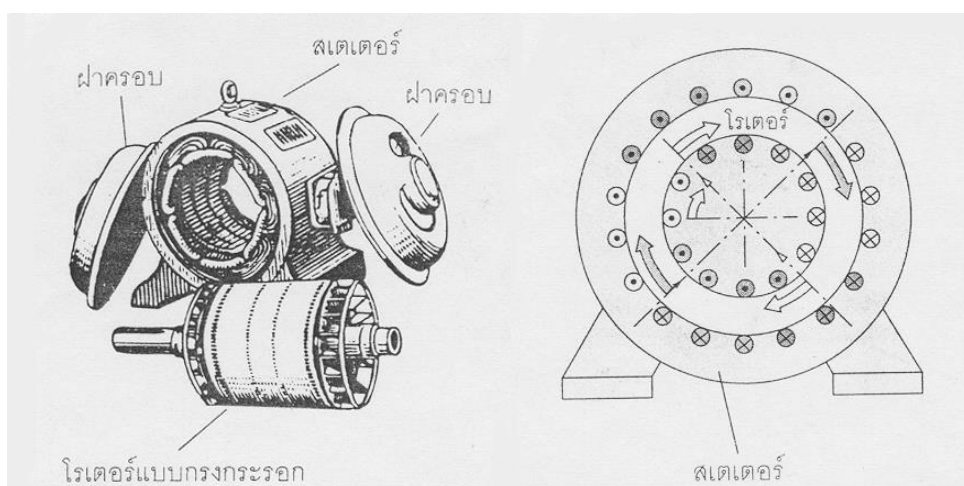
ดังนั้นกำลังที่ต้องการจากมอเตอร์

$$\text{Power} = \text{Speed} \times \text{Torque} \approx k \frac{(\text{speed})^3}{2} \quad (2.2)$$

โดย k_1 และ k_2 เป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่ากำลังที่ต้องการของมอเตอร์จะแปรผันตามความเร็วกำลังสาม เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมการทำงานของโหลด

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบโรเตอร์กรงกระรอกประกอบด้วยสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งมีขดลวด 3 เฟสพันอยู่บนร่องของสเตเตอร์โดยวางเรียงห่างกันทำมุม 120° และส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือโรเตอร์ (Rotor) แบบกรงกระรอกที่ประกอบด้วยแท่งตัวนำวางเรียงกันโดยคั่นกลางด้วยฉนวนและที่ปลายทั้งสองข้างจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวนทำให้มีรูปร่างคล้ายกับกรงกระรอกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายและมีราคาต่ำ



รูปที่ 2.1 ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก

เมื่อจ่ายสัญญาณรูปไซน์เวฟสมมูล 3 เฟสที่มีความถี่ $f = \omega / 2\pi$ ให้กับสเตเตอร์ กระแสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะสมมูลทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก B_{ag} กระจายออกมาในช่องว่างอากาศ (air gap) ซึ่งมีขนาดที่คงที่และหมุนรอบโรเตอร์ด้วยความเร็วที่คงที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ω_s มีหน่วยเป็นเรเดียนต์ต่อวินาที ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\omega_s = \frac{2\pi / (p/2)}{1/f} = \frac{2}{p} (2\pi f) = \frac{2}{p} \omega \quad (2.3)$$

โดยที่ p คือจำนวนขั้วของมอเตอร์

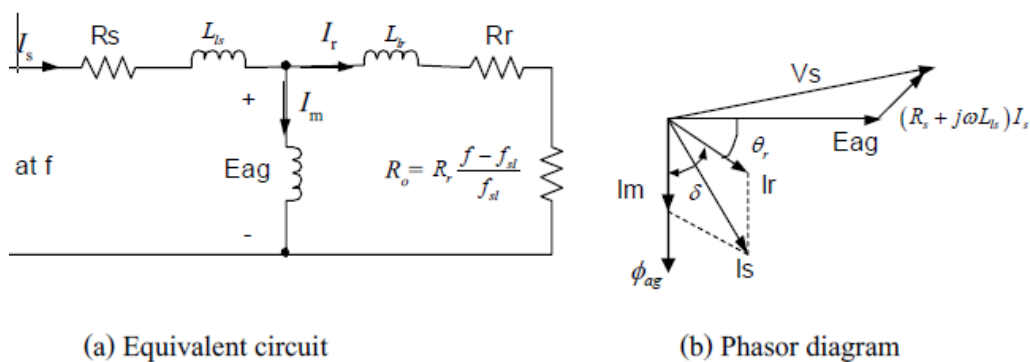
ที่ความถี่ ซึ่งเป็นความถี่ของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับสเตเตอร์เราสามารถคำนวณหาความเร็วเชิงโคโรนัสในหน่วยของรอบ/นาทีได้จาก

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f \quad (2.4)$$

2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.2 แสดงวงจรเสมือนและ Phasor diagram ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เฟสโวลเตจ V_s จะทำให้กระแสสเตเตอร์ I_s ไหลในวงจรของขดลวดสเตเตอร์ที่ความถี่ f จากนั้น I_s จะสร้างสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ Φ_{ag} (ช่องว่างระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ หรือ Air gap) และ Φ_{ag} นี้จะหมุนรอบโรเตอร์โดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัส เมื่อ Φ_{ag} หมุนรอบตัวโรเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน E_{ag} ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดจากการสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กที่ Air gap แรงดัน E_{ag} นี้เองที่ทำให้กระแสลูปของวงจรโรเตอร์ (I_r) ไหล

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ากระแส I_r ขึ้นอยู่กับค่า R_o ซึ่งเป็นตัวชี้การใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์และเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของระบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ค่า R_o จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่สลิป f_{sl} (f_{sl} จะอธิบายในภายหลัง) ซึ่งความถี่สลิปจะมีค่าตั้งแต่ $0 - f$ ดังนั้นค่า R_o จะมีค่าตั้งแต่ $0 - \infty$ ต่อไปนี้จะแสดงหลักการออกแบบวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.2 Per phase representation

เมื่อ V_s คือ เฟสโวลเตจ (เท่ากับแรงดัน $V_{LL}/\sqrt{3}$)

E_{ag} คือ Air gap voltage

R_s คือ ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

L_{ls} คือ Leakage inductance ของขดลวดสเตเตอร์

I_m คือ Magnetizing current

sI คือ Stator current

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์

L_m คือ Magnetizing inductance

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและวงจร Magnetic ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้

$$N_s \phi_{ag} = L_m i_m \quad (2.3)$$

จากกฎของฟาราเดย์ จะได้ว่า

$$e_{ag} = N_s \frac{d\phi_{ag}}{dt} \quad (2.4)$$

เมื่อแทน ฟลักซ์ที่เกิดที่ขดลวดสเตเตอร์ $\phi_{ag}(t) = \phi_{ag} \sin \omega t$ ในสมการ (2.4) จะได้

$$e_{ag} = N_s \omega \phi_{ag} \cos \omega t \quad (2.5)$$

เมื่อคิดเป็นค่า rms จะได้

$$E_{ag} = k_3 f \phi_{ag} \quad (2.6)$$

โดยที่ k_3 คือค่าคงที่

แรงบิด (Torque) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดจากการดูดและผลักกันระหว่างสนาม แม่เหล็ก ในช่องอากาศกับสนามแม่เหล็กย้อนกลับที่เกิดจากกระแสโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์ หมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสจะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่าง ϕ_{ag} กับโรเตอร์เป็นผลให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนที่โรเตอร์และกระแสจะไม่ไหลในวงจรโรเตอร์จึงไม่มีแรงบิดที่เกิดจากการดูดและผลักทางสนามแม่เหล็กทำให้ตัวโรเตอร์ไม่มีแรงบิด แต่ที่ความเร็วอื่นการหมุนของโรเตอร์ (Rotor speed; ω_r) จะเกิดขึ้นและมีทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็ก ความเร็วที่

แตกต่างกันของความเร็วซิงโครนัส ω_s กับความเร็วโรเตอร์ ω_r จะเรียกว่าความเร็วสลลิป (slip speed ; ω_{sl})

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (2.7)$$

ความเร็วสลลิปถ้าทำการนอร์มอลไลซ์ด้วยความเร็วซิงโครนัสจะเรียกว่า “ สลิป” s โดยมีนิยามดังนี้

$$\text{slip } s = \frac{\text{slip speed}}{\text{synchronous speed}} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.8)$$

ถ้า $s = 0$ หมายถึงไม่มีสลลิป ความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ($\omega_s = \omega_r$) จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำ หมุนตัวเปล่าไม่มีโหลด แต่ถ้า $s = 1$ ความเร็วโรเตอร์เท่ากับศูนย์ ($\omega_r = 0$) มอเตอร์หยุดนิ่งไม่หมุน ดังนั้น ความเร็วของฟลักในช่องอากาศของมอเตอร์คำนวณได้จาก

$$\text{slip speed } \omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = s\omega_s \quad (2.9)$$

จากกฎของฟาราเดย์ แรงดันเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่สลลิป (slip frequency ; f_{sl}) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเร็วสลลิป

$$f_{sl} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} f = sf \quad (2.10)$$

ขนาดแรงดัน E_r ของความถี่สลลิปจะเหนี่ยวนำที่ตัวนำในโรเตอร์ซึ่งจะเหมือนกับการเหนี่ยวนำแรงดันที่สเตเตอร์การแพร่กระจายของฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศจะหมุนที่ความเร็ว สลิป ω_{sl} ดังนั้นการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ที่ตัวนำบนโรเตอร์สามารถหาได้โดยแทนค่าความถี่ f ในสมการที่ (2.6) ด้วยความถี่ f_{sl}

$$E_r = k_3 f_{sl} \phi_{ag} \quad (2.11)$$

ด้วยเหตุที่ขดลวดโรเตอร์กรงกระรอกถูกลัดวงจรด้วยวงแหวน การเหนี่ยวนำแรงดันที่ความถี่สลลิปจะก่อผลให้เกิดกระแสโรเตอร์ I_r ที่ความถี่สลลิป f_{sl}

$$E_r = R_r I_r + j2\pi f_{sl} L_b I_r \quad (2.12)$$

เมื่อ R_r คือ Resistance ของโรเตอร์

L_b คือ Leakage inductance ของโรเตอร์

กระแสที่เกิดขึ้นจะผลิตสนามแม่เหล็กที่หมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วสลิป ผลของ Φ_{ag} และสนามที่เกิดจากกระแสโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงหมุนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การสูญเสียที่เกิดขึ้นในความต้านทานขดลวดโรเตอร์คือ

$$P_r = 3R_r I_r^2 \quad (2.13)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.12) ด้วย f/f_{sl} และใช้สมการที่ (2.6) และ (2.11) จะได้

$$E_{ag} = \frac{f}{f_{sl}} E_r = f \frac{R_r}{f_{sl}} I_r + j2\pi f L_b I_r \quad (2.14)$$

จากรูปที่ 2.2a $f(R_r/f_{sl})$ จะแทนค่าผลบวกของ R_r และ $R_r [(f-f_{sl})/f_{sl}]$ ในสมการที่ (2.14) จากนั้นคูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.14) ด้วย I_r^* และจะได้ส่วนของจำนวนจริง *real* ($E_r I_r^*$), พลังงานที่ช่องว่างอากาศเรียกว่า air gap power P_{ag} หาได้จาก

$$P_{ag} = 3 \frac{f}{f_{sl}} R_r I_r^2 \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) และ (2.13)

$$P_{ag} = 3 \left(\frac{f}{f_{sl}} \right) \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad \text{และ} \quad P_r = 3 R_r \cdot I_r^2$$

Electromechanical Power, P_{em} สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{em} &= P_{ag} - P_r \\ &= 3 \frac{f}{f_{sl}} R_r \cdot I_r^2 - 3 R_r \cdot I_r^2 \\ &= 3 R_r \cdot \left(\frac{f}{f_{sl}} - 1 \right) \cdot I_r^2 \\ &= 3 R_r \cdot \left(\frac{f - f_{sl}}{f_{sl}} \right) \cdot I_r^2 \end{aligned} \quad (2.16a)$$

และ

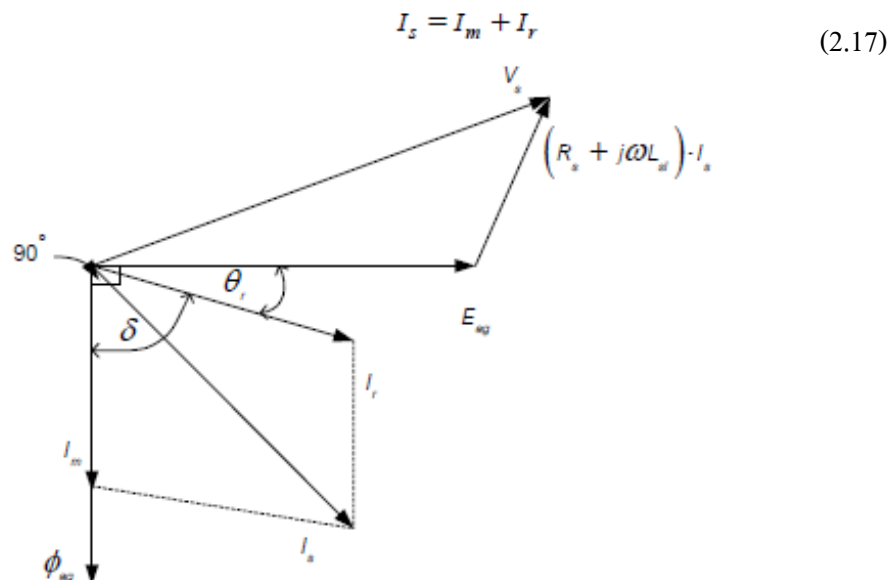
$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3R_r \cdot \left(\frac{f-f_{sl}}{f_{sl}}\right) \cdot I_r^2}{\omega_r} \quad (2-16b)$$

จากสมการที่ (2.7), (2.15), (2.16a) และ (2.16b) จะได้

$$T_{em} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3\left(\frac{f}{f_{sl}}\right) \cdot R_r \cdot I_r^2}{\omega_s} \quad (2.16c)$$

T_{em} คือ Electromagnetic Torque

จากวงจร Equivalent รูปที่ 2.2a พบว่าการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของ Rotor และ electromechanical power per phase ที่แสดงด้วยอัตราของความต้านทาน $f(R_r/f_{sl})$ ในสมการที่(2.14) จะถูกแสดงเป็น R_r และ $R_r (f-f_{sl})/f_{sl}$ กระแสรวม I_s ที่เกิดขึ้นที่ Stator คือ ผลรวมของ Magnetizing current, I_m และ กระแสที่ Rotor, I_r (ในที่นี้ I_r คือส่วน ประกอบของ I_s ที่ไม่รวม ampere-turn ที่เกิดจากกระแส rotor จริง



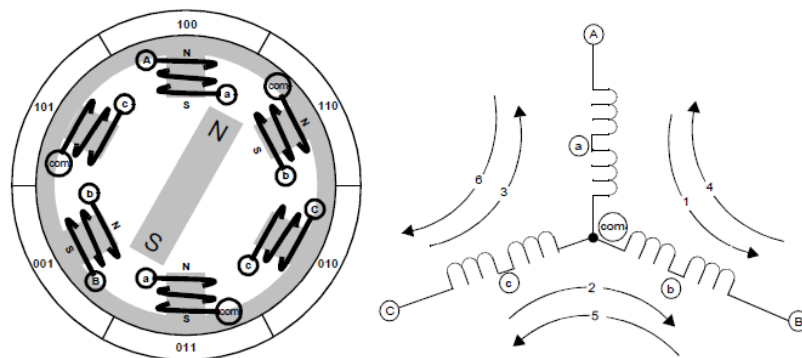
รูปที่ 2.3 Phasor diagram ของแรงดันและกระแสของ Stator

Phasor diagram ของ แรงดันและ กระแสของ Stator ที่แสดงในรูปที่ 2.3, magnetizing current (I_m) ซึ่งทำให้เกิด Φ_{ag} ที่ล้าหลังแรงดันของ air gap (E_{ag}) เป็นมุม 90° ส่วนกระแสของ Rotor (I_r) ทำให้เกิด Electromagnetic torque จะล้าหลังแรงดันของ air gap (E_{ag}) เป็นมุม power factor θ_r ของวงจร Rotor

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{2\pi f_{sl} L_{lr}}{R_r} = \tan^{-1} \frac{2\pi f L_{lr}}{R_r f / f_{sl}} \quad (2.18)$$

2.3 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC motor)

มอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC motor) หมายถึง ซิงโครนัสมอเตอร์ซึ่งกระแสอาร์มาเจอร์ในสเตเตอร์ถูกควบคุมโดยวงจรโซลิดสเตตในลักษณะที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วที่กำหนด ในมอเตอร์กระแสตรงมาตรฐานใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ทำให้แกนแม่เหล็กของฟลักซ์สนามและของฟลักซ์อาร์มาเจอร์ทำมุม 90° องศาไฟฟ้าในสเปซ ทำให้ ฟลักซ์มีค่าคงที่จึงทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วกำหนด

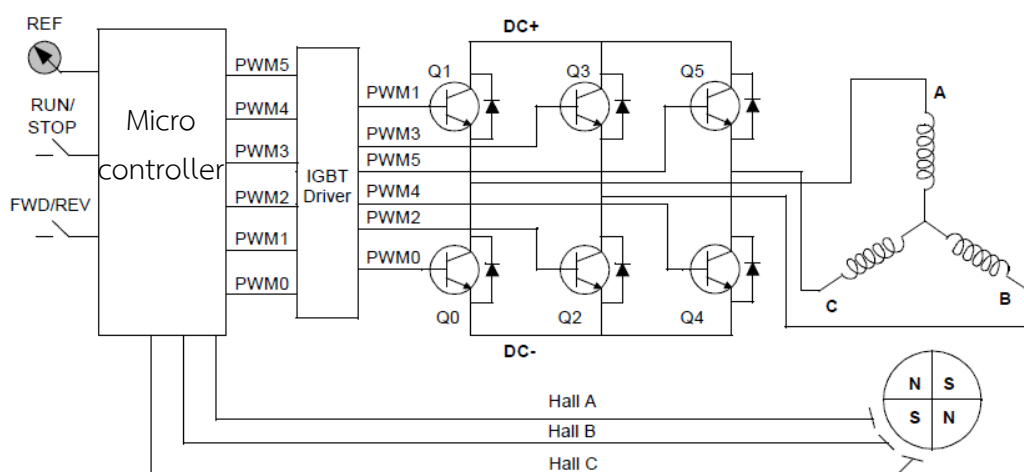


รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่าน

โดยทฤษฎีแล้วในเครื่องจักรกลกระแสตรง ตำแหน่งของขดลวดสนามและของขดลวดอาร์มาเจอร์อาจจะกลับกันได้ กล่าวคือ ขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์ และขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์ก็ได้ อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านจะใช้ตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ (rotor

position sensor) และอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมกระแสในขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ และสวิตช์โซลิดสเตตกำลังในอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เหมือนกับแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ทางกลของมอเตอร์กระแสตรง

มาตรฐานความเร็วของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์จะเท่ากับความเร็วของโรเตอร์ตลอดเวลา (synchronism) เนื่องจากความถี่ของการตัด-ต่อของสวิตช์โซลิดสเตตกำลังถูกควบคุมให้เท่ากับความเร็วของโรเตอร์โดยอัตโนมัติ เพราะได้รับสัญญาณจากตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ในรูป 2 แสดงไดอะแกรมพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านขดลวดสเตเตอร์สามเฟสต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงปรับค่าได้ (variable voltage dc source) โดยผ่านความเหนี่ยวนำและอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (current source inverter) ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์โซลิดสเตต 6 ตัว (Q1-Q6) ไดโอดต่อขนานทำหน้าที่ป้องกันแรงดันกลับ (reverse voltage) ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์เมื่อมีการสับเปลี่ยนกระแส (commutation) ในขดลวด ตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ใช้ Hall effect sensor 3 ตัว (Hall_A, Hall_B, Hall_C) จะส่งสัญญาณไปยังตัวถอดรหัสและตัวขับเกต (sensor decoder and gate drivers) สวิตช์โซลิดสเตตจึงทำการตัด-ต่อวงจรตามลำดับ โดยมีความถี่เท่ากับความเร็วของโรเตอร์ตลอดเวลา สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และของโรเตอร์จึงมีความเร็วเท่ากันตลอดเวลาที่ทุกความเร็วของโรเตอร์ ระยะเวลาการกระแสของสวิตช์โซลิดสเตตจะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงบิดของมอเตอร์



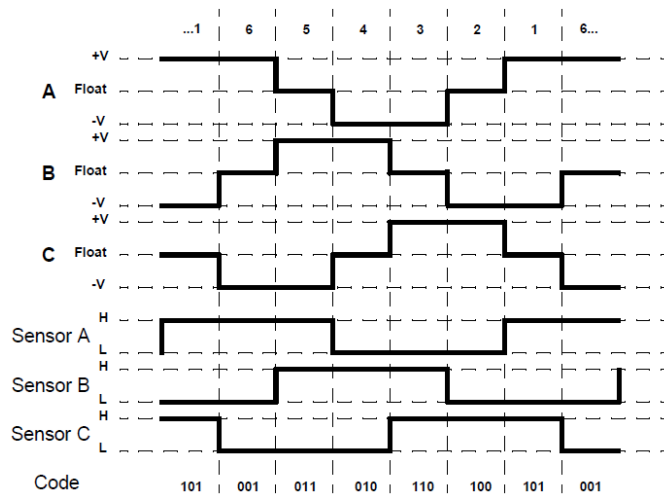
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่าน

ตารางที่ 2.1 ลำดับการควบคุมให้หมุนตามเข็มนาฬิกา

Sequence #	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-

ตารางที่ 2.2 ลำดับการควบคุมให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา

Sequence #	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	1	1	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
2	1	1	1	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-
5	0	0	0	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+



รูปที่ 2.6 ไคอะแกรมเวลาของเซนเซอร์เมื่อเทียบกับวงจรขับ

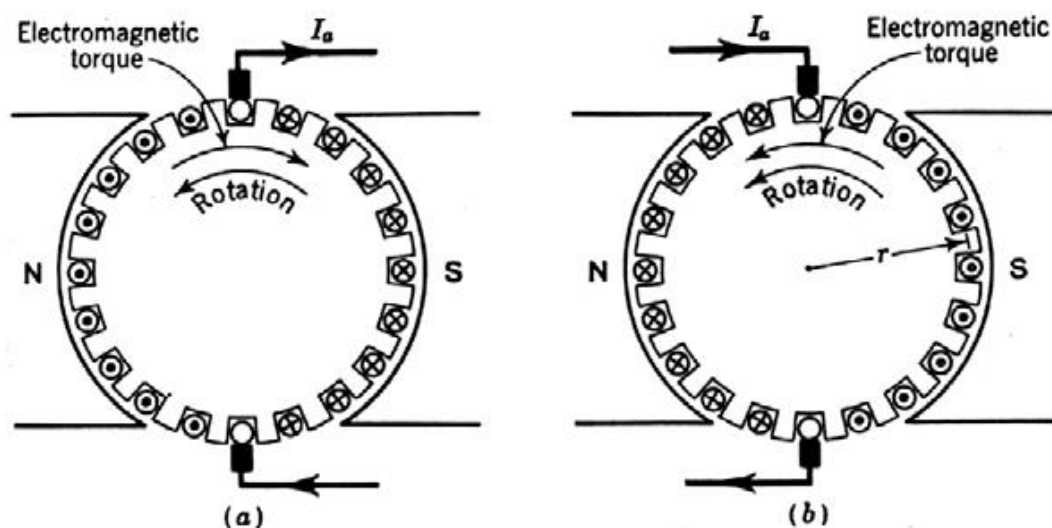
มอเตอร์กระแสตรงจะมีโครงสร้างเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มีชนิดและการป้อนกระแสสนามเหมือนกัน ถ้าหากเครื่องจักรกลถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้

เป็นพลังงานกลจะเรียกว่ามอเตอร์ แต่ถ้าหากเครื่องจักรกลตัวเดียวกันนี้ถูกใช้ในการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ก็จะถูกเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นในการใช้งานหลายประเภท เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจะทำงานกลับไปมาระหว่างมอเตอร์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) จะต้องมีแหล่งจ่ายแรงดันให้มอเตอร์ ในการศึกษาการทำงานของมอเตอร์ การเกิดแรงบิด การไหลของมอเตอร์ จะต้องเกิดแรงบิดในมอเตอร์ก่อนซึ่งแรงบิดนี้จะทำให้มอเตอร์หมุนได้ และสามารถนำไปจับอย่างอื่นต่อไปได้ เป็นการแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เช่น นำมอเตอร์ไปจับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า รถไฟฟ้า รถราง เป็นต้น

2.4 Electromagnetic Torque ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

ถ้ามีกระแสไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2.7 (a) และ (b) วางอยู่ท่ามกลางสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรง (Force) บนตัวนำนั้นซึ่งจะพยายามหมุนเครื่องจักรไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แรงออกมาจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) ความยาวของตัวนำ (L) และกระแส (I) ที่ไหลในตัวนำนั้น เราได้สมการพื้นฐาน คือ

$$F = Bli \text{ newton} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.7 (a) Electromagnetic torque ที่มีทิศทางตรงข้ามกับการหมุนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(b) Electromagnetic torque ที่มีทิศทางเดียวกับการหมุนในมอเตอร์

ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง Z คือ จำนวนตัวนำของอาร์มาเจอร์ทั้งหมด / คือ ความยาวของตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับความกว้างของขั้วแม่เหล็ก และถ้า B เป็น ค่าเฉลี่ยของ Flux density ที่ค่าเฉลี่ยของรัศมีการหมุน r (radius) เราจะได้แรงบิดแรงบิด

$$\begin{aligned} T &= \text{แรง} \times \text{ระยะทาง} \\ &= F \times r \times Z \\ &= B l r Z \quad N\cdot m \end{aligned}$$

ในการคำนวณเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เราจะใช้ค่า I_a ซึ่งเป็นกระแสของอาร์มาเจอร์ มากกว่าค่ากระแสต่อ 1 ตัวนำ (i) และใช้คำว่าฟลักซ์ทั้งหมดต่อขั้วแม่เหล็ก Φ มากกว่าค่าเฉลี่ยของ Flux density, B ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เราจะได้กระแสในตัวนำ

$$i = I_a / \text{path} \quad \text{และ} \quad B = \Phi / A$$

โดย $A =$ พื้นที่ของ flux path ที่รัศมี r

$$= 2\pi r l / \text{poles}$$

แทนค่า I_a และ B ในสมการ Torque จะได้แรงบิด

$$\begin{aligned} T &= (Z \Phi I_a r \times \text{poles}) / (2\pi l \times \text{paths}) \\ &= (Z \Phi I_a \times \text{poles}) / (2\pi \times \text{paths}) \quad N\cdot m \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$T = K_t \Phi I_a \quad N\cdot m \quad (2.20)$$

โดยที่

$$K_t = (Z \times \text{poles}) / (2\pi \times \text{paths}) \quad (2.21)$$

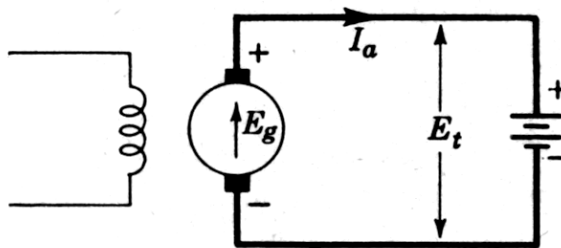
สมการดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ได้กับเครื่องจักรกลกระแสตรงทั้งที่เป็นมอเตอร์และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 2.7 แสดงถึงเครื่องจักรกลสองตัวที่เหมือนกัน หมุนในทิศทางเดียวกันแต่ตัวหนึ่งทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่อีกตัวหนึ่งทำงานเป็นมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 2.7 (a) ถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มันกำเนิด emf และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าจากขดลวดอาร์มาเจอร์ให้กับวงจรภายนอกได้ และเนื่องจากขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งมีกระแสไหลและอยู่ในสนามแม่เหล็ก มันจึงถูกกระทำด้วยแรงซึ่งพยายามทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาซึ่งสวนทางกับการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปริมาณของแรงบิดที่หน่วงการหมุนของเครื่องจะเป็นไปตามสมการที่ 2.19 ในการที่จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงหมุนอยู่ได้ เครื่องยนต์จะต้องใหญ่พอที่จะเอาชนะแรงบิดสวนทางที่เกิดขึ้น รวมทั้งแรงเสียดทานที่ถูกรีด brushes แรงต้านลม (Windage forces) แรงต้านแม่เหล็ก (Magnetic drag) ที่เกิดจาก hysteresis และ eddy current ในแกนเหล็กของอาร์มาเจอร์ ซึ่งทั้งหมดนี้ต้านการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องจักรกลตัวเดียวกันนี้ ถ้าทำงานเป็นมอเตอร์ดังรูปที่ 2.7 (b) จะต้องมีความดันจากแหล่งจ่ายภายนอกเช่นแบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายไฟให้กับขั้วของมอเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางตามรูป และเนื่องจากขดลวดมีกระแสไหลและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก มันจึงถูกแรงกระทำซึ่งทำให้อาร์มาเจอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ปริมาณของแรงบิดที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการที่ 2.19 ในขณะที่อาร์มาเจอร์หมุน ขดลวดจะตัดเส้นฟลักซ์ทำให้เกิด emf ขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.7 (a) เนื่องจากเครื่องจักรกลทั้งสองมีขั้วเหมือนกันและหมุนในทิศทางเดียวกัน emf ที่เกิดขึ้นนี้ต่อต้านกระแสในขดลวดในรูปที่ 2.7 (b) และต่อต้าน emf ที่จ่ายให้มันด้วย ด้วยเหตุนี้ emf ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จึงเรียกว่า *back emf* หรือ *counter emf*

2.5 การทำงานกลับไปมาระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลและถูกใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังชาร์จแบตเตอรี่

สมมุติว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบกระตุ้นแยก และขับเคลื่อนด้วยแรงขับ ความเร็วคงที่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จ่ายกระแส 50 A ที่ 120 Volt และ R_a เป็นค่าความต้านทานขดลวด armature และ brush เราจะได้ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นในตัวเครื่องดังสมการ

$$E_g = E_t + I_a R_a \quad (2.22)$$

กำหนดให้ $E_t = 120$ V และ $I_a = 50$ A $R_a = 0.1 \Omega$

จะได้

$$E_g = 120 + (50 \times 0.1) = 125 \text{ V}$$

ต่อมาเครื่องยนต์ดีเซลลดความเร็วลง 4% แรงดัน E_g จะขึ้นกับความเร็วรอบ (จากสมการที่ 2.26 Φ/pole คงที่) เราจะได้

$$E_g = 125 \times 0.96 = 120 \text{ V}$$

ค่า $E_g = E_t$ ดังนั้น $I_a = 0$ (พิจารณาจาก 2.4) ถ้าลดความเร็วของเครื่องกำเนิดลงอีก 4% ของความเร็วเดิมค่า E_g จะเป็น

$$E_g = 125 \times 0.92 = 115 \text{ V}$$

กระแสจะจ่ายจากแบตเตอรี่ เข้าไปในเครื่องกำเนิดในทิศทางตรงกันข้ามและมีค่า 50 A เช่นกัน

$$115 = 120 - (I_a \times 0.1)$$

$$I_a = (120 - 115) / 0.1 = 50 \text{ A}$$

Electromagnetic Torque จะกลับทางกับ generator เนื่องจากกระแสไหลกลับ ดังรูปที่ 2.7 (b) ซึ่งเครื่องกลไฟฟ้านี้ทำงานเป็นมอเตอร์และขับเคลื่อนเครื่องยนต์ดีเซล ดังนั้นเมื่อขับเคลื่อนเครื่องยนต์ดีเซล เครื่องจักรกลไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เราจะสรุปสมการของแรงดันได้ดังนี้

$$E_g = E_t - I_a R_a \text{ (motor)}$$

หรือ

$$I_a = (E_t - E_g) / R_g \quad (2.23)$$

E_g ของมอเตอร์ในต่อไปนี้จะเรียกว่า Counter emf หรือ back emf

ขณะที่มอเตอร์หมุน ขดลวดของมอเตอร์จะตัดผ่านสนามแม่เหล็กและจะเกิด induced emf (E_g) หรือ back emf (E_b) ในทิศทางตรงกันข้ามกับ E_t สมการของ E_b จะเป็นไปตาม สมการของแรงดันดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 คือ

$$E_b = K\phi N \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.23 แทน E_g ด้วย E_b ในกรณีที่ เป็นมอเตอร์ เราจะได้

$$E_t = E_b + I_a R_a$$

$$E_t = K\phi N + I_a R_a$$

เราจึงได้สมการความเร็วรอบของมอเตอร์เป็น

$$K\phi N = E_t - I_a R_a$$

ดังนั้น

$$N = (E_t - I_a R_a) / K\phi \quad \text{rpm} \quad (2.25)$$

โดย

$$K = (Z_a \times \text{poles}) / (\text{paths} \times 60) ; \quad \phi = \text{flux/pole weber}$$

* N = ความเร็วรอบ มีหน่วย rpm (revolution/minute)

และแรงบิด

$$T = K \Phi I_a \quad \text{N-m (นิวตัน-เมตร)} \quad (2.26)$$

โดย

$$K_t = (Z \times \text{poles}) / (\text{paths} \times 2\pi)$$

สมการที่ 2.7 และ 2.8 เป็นสมการที่สำคัญมากของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากสมการข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ K_t ได้ดังนี้

$$(K/K_t) = 2\pi/60 \quad (2.27)$$

สังเกตว่า ถ้าความเร็วในสมการที่ ถูกวัดเป็น radian/sec แทนที่จะเป็น rpm, K จะเท่ากับ K_t

2.6 Power-flow Diagram

จากสมการ $E_g = E_t - I_a R_a$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น $E_t = E_g + I_a R_a \quad (2.28)$

สมการที่ 2.28 นี้ $I_a R_a$ มีค่าไม่เกิน 5% ของ E_t และจะมีค่าน้อยกว่านี้ที่โหลดต่ำๆ ถ้าเรา คูณสมการนี้ด้วย I_a ทั้งสองข้าง จะได้

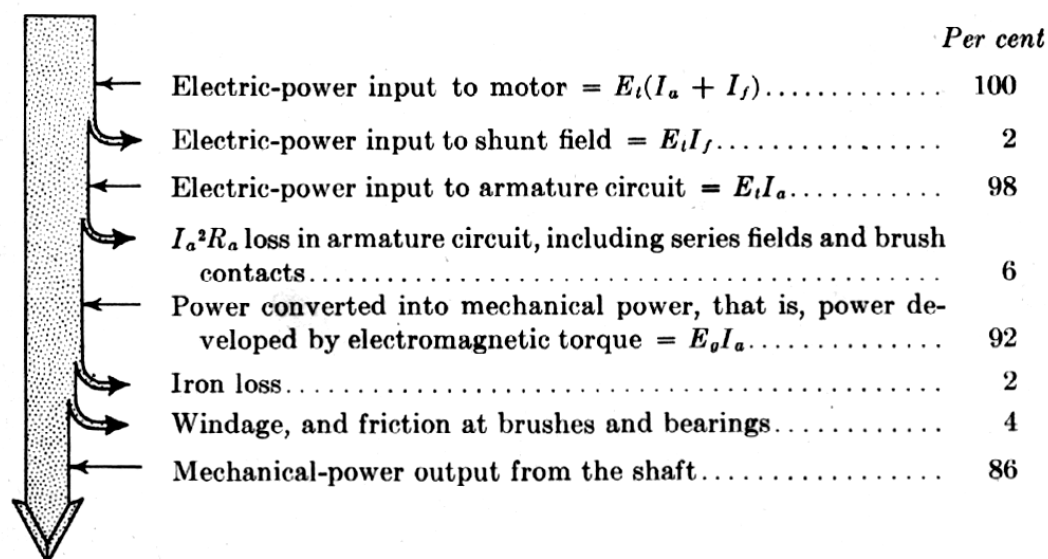
$$E_t I_a = E_g I_a + I_a^2 R_a \quad (2.29)$$

โดย $E_t I_a$ เป็น power input ให้กับอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์

$I_a^2 R_a$ เป็น power lost ในรูปของความร้อนในวงจรของอาร์มาเจอร์

$E_g I_a$ เป็น power ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็น mechanical power โดยมอเตอร์

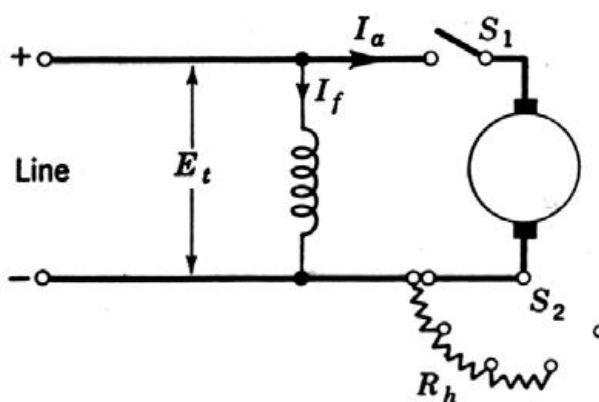
Power-flow diagram แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Power-flow diagram สำหรับมอเตอร์แบบ shunt หรือ compound ขนาด 10 hp 220V

2.7 Self-governing Property ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและ Motor Starter

กำลังงานที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายจะเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติเพื่อให้เหมาะกับโหลดทางกล จากรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงถึงมอเตอร์แบบขนาน (Shunt motor) สมมติให้สวิตช์ S_1 อยู่ในตำแหน่งปิดวงจร และมอเตอร์กำลังหมุนด้วยความเร็วคงที่ขณะขับโหลดทางกลอย่างเช่น เครื่องกลึงในโรงงาน แรงดัน E_t ที่จ่ายให้มอเตอร์จะถูกรักษาให้คงที่โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ ดังนั้นกระแสสนาม I_f จะคงที่รวมถึงฟลักซ์แม่เหล็กที่มันกำเนิดขึ้นมาก็คงที่ด้วย



รูปที่ 2.10 วงจรมอเตอร์แบบขนานที่มี Starter อยู่ในวงจร

ถ้าโหลดทางกลของมอเตอร์เพิ่มขึ้น แรงบิดที่ขับโหลดที่เกิดจากกระแสอาร์มาเจอร์จะไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดจากโหลดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง ขณะที่ความเร็วลดลงจะทำให้ Back emf, E_b ลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้กระแสจำนวนมากไหลเข้าขดลวดอาร์มาเจอร์ยังผลให้แรงบิดในการขับโหลดเพิ่มมากขึ้นตามสมการ $T = K\phi I_a$ ดังนั้นแรงบิดขับโหลดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่มอเตอร์หมุนช้าลง และในที่สุดมอเตอร์จะหยุดหมุนช้าลงในทันทีที่แรงบิดขับโหลดไปมีค่าเท่ากับแรงบิดของโหลดรวมกับแรงเสียดทานและ iron loss ของมอเตอร์ถ้าโหลดทางกลของมอเตอร์ลดลง แรงบิดขับโหลดที่เกิดจากกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่ามากเกินไปเพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดของโหลด ทำให้มอเตอร์เกิดความเร่ง หมุนเร็วขึ้น ขณะที่ความเร็วเพิ่มมากขึ้น Back emf, E_b เพิ่มมากขึ้นด้วย และทำให้กระแสอาร์มาเจอร์ I_a ลดลง ยังผลให้มอเตอร์หยุดเพิ่มความเร็วและจะหมุนด้วยความเร็วคงที่รวมทั้งมีกระแสอาร์มาเจอร์คงที่เมื่อแรงบิดขับโหลดตกลงเท่ากับค่าของแรงบิดของโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายจึงเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติเพื่อให้พอดีกับโหลดของมอเตอร์ ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ Back emf ของมอเตอร์สามารถปรับกระแสได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อจะเริ่มเดินเครื่องจำเป็นต้องมี Starter (เป็นความต้านทานที่เปลี่ยนค่าไว้) Starter จะทำหน้าที่จำกัดกระแสตอน Starter ไม่ให้ไหลเข้ามอเตอร์มากเกินไป และจำกัด Starting torque ไม่ให้สูงเกินไป ให้อยู่ในสภาวะที่พอเหมาะไม่ทำให้เกิดการกระชากซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายกับระบบเกียร์ หรือสายพานได้ทั้งนี้เราจะพิจารณา

$$E_t = E_b + I_a R_a$$

และ

$$I_a = (E_t - E_b) / R_a \quad (2.28)$$

ในสมการที่ 2.28 ค่า R_a ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะน้อยมาก เช่น 0.12 หรือ 0.5 Ω ในเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ปานกลางขณะที่เริ่มเดินเครื่อง มอเตอร์ยังไม่หมุน $E_b = 0$ ($N = 0$) จากสมการ 2.12 จะได้

$$I_a = E_t / R_a$$

ในกรณีนี้ I_a จะมีค่ามาก เช่นถ้า $E_t = 220$ V และ $R_a = 0.1 \Omega$

จะได้ I_a ตอน Start = $220/0.1 = 2,200$ A

ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก ค่า Starting torque ที่สูงมากจะทำให้เกิดการกระชาก และทำให้อุปกรณ์ป้องกันเช่น ฟิวส์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรได้ ถ้าหากไม่มีการแก้ไขจะทำให้โหลดที่ต่ออยู่รวมทั้งคอมมิวเตเตอร์ของมอเตอร์เกิดความเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องหาความต้านทาน R_h มาต่ออนุกรมกับวงจร armature ดังรูปที่ 2.10 เป็นผลทำให้วงจร armature มีค่าความต้านทานสูงขึ้น และจำกัดกระแสขณะสตาร์ททำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 3.0 เท่าของกระแสที่ full load ความต้านทานที่นำมาตอนนี้เรียกว่า Starter ซึ่งจะสามารถปลดค่าทิ้งได้เป็นลำดับจนกระทั่งค่า R_h เป็นศูนย์ มอเตอร์จึงเริ่มทำงานตามปกติได้ ซึ่งจะทำให้ได้กระแสสตาร์ทเป็น

$$I_{start} = E_t / (R_a + R_h)$$

โดย R_h คือ Starting resistance ดังรูปที่ 2.10

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงม้าเอาต์พุต แรงบิด (Torque) และ ความเร็ว

จากสมการของมอเตอร์พิจารณา Shunt motor, E_b จะเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์ถ้าให้ T_e เป็น Electromagnetic Torque (Torque ที่เกิดจากกระแสในตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก) และกระแส I_a ที่ไหลเข้าจะให้กำลังงาน

$$\text{Power} = E_b I_a \quad \text{watt}$$

ที่ความเร็ว N rpm ถ้า $T_e = \text{Newton} \cdot \text{meter}$

$$\omega = N \times 2\pi / 60 = \text{radius speed/sec} \quad (2.29)$$

เราจะได้

$$T_e \times \omega = E_b I_a$$

$E_b I_a = \text{Power}$ เป็นการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล

2.9 การพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์

จากการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาการใช้งานที่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบหลายๆ ด้าน เช่นผลกระทบจากต้นทุนของค่าเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น และผลกระทบจากสถานะโลกร้อนได้สร้างแรงกดดันให้ทุกประเทศในโลกต้องมีมาตรการลดการใช้พลังงานฟอสซิลนอกจากนี้ความจำเป็นที่ต้องสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นแรงกดดันให้ประเทศต่างๆ ลดการใช้น้ำมันลงโดยการ

- (1) จัดหาพลังงานอื่นๆ เพื่อทดแทนน้ำมันในการขนส่ง
- (2) พัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานรูปแบบอื่นๆ ในการขนส่ง

รถไฮบริด (Hybrid Vehicles) และรถยนต์ไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา พัฒนาการของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ทำให้แบตเตอรี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น มีส่วนช่วยเร่งพัฒนาการของรถไฮบริดและรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นใหม่ ซึ่งมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว จากแนวโน้มของพัฒนาการทางเทคโนโลยีและยอดขายรถไฮบริดและรถยนต์ไฟฟ้ามีศักยภาพที่จะมีบทบาทสำคัญนอกจากจะแก้ปัญหาสถานะโลกร้อนแล้ว ยังจะทำให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้นเพราะลดการปล่อยไอเสียออกสู่บรรยากาศอย่างมาก

2.10 แหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนน้ำมันได้ในการขนส่ง

แหล่งพลังงานที่สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเบนซินและดีเซลในการขนส่งทางถนนมีหลายประเภทดังต่อไปนี้

- (1) ก๊าซธรรมชาติ (CNG) ก๊าซธรรมชาติถือว่าเป็นเชื้อเพลิงสะอาด เพราะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงประมาณ 50% แต่ต้องใช้ถังบรรจุก๊าซที่ใหญ่และหนักขึ้น
- (2) เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuels) เชื้อเพลิงชีวภาพที่สำคัญคือ เอทานอล และไบโอดีเซล สำหรับเอทานอลนั้นหากมีการใช้ในสัดส่วนที่สูง จะต้องมีการปรับเครื่องยนต์ที่จะใช้ด้วย
- (3) พลังงานไฟฟ้า (Electrical) พลังงานไฟฟ้าสามารถใช้ทดแทนน้ำมันได้ใน 2 แนวทางคือ แนวทางแรก คือใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำมันในรถลูกผสมหรือรถไฮบริด โดยรถไฮบริดต้องใช้ทั้ง เครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า

แนวทางที่สอง คือใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวยโดยผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งขับเคลื่อนโดยแบตเตอรี่ในรถยนต์ ไฟฟ้า ซึ่งได้มีการใช้มานานแล้ว แต่รถยนต์ไฟฟ้ารุ่นเก่ามีข้อจำกัดด้านระยะทางที่ขับเคลื่อนได้จากการชาร์จไฟฟ้าแต่ละครั้ง และใช้เวลาชาร์จนาน นอกจากนี้ยังบรรทุกน้ำหนักอื่นได้น้อย เพราะต้องบรรทุกแบตเตอรี่ที่หนักมาก รถยนต์ไฟฟ้ารุ่นใหม่มีแบตเตอรี่ที่ใช้เทคโนโลยีใหม่เก็บพลังงานได้มากขึ้นมาก และแก้ปัญหาของรถยนต์ไฟฟ้าแบบเก่าได้หมด

(4) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนมีจุดเด่นอยู่ที่เป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่เผาไหม้แล้วได้ไอน้ำ แต่ไฮโดรเจนไม่มีอยู่ด้วยตัวเองในธรรมชาติ แต่จะรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบ เช่น น้ำ (H_2O), ก๊าซธรรมชาติ, เมทานอล (CH_3OH) เป็นต้น ดังนั้นหากจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนจะต้องผลิตจากสารประกอบที่มีก๊าซไฮโดรเจนผสมอยู่ การที่จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล จะต้องใช้เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) (ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพลังงานใหม่) เป็นเครื่องต้นกำลัง และรถที่มีเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเครื่องต้นกำลังเรียกว่า รถเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Vehicles)

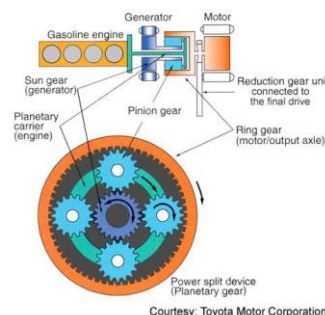
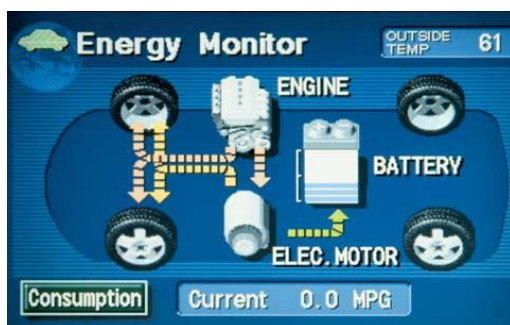
2.11 รถไฮบริด (Hybrid Cars)



รูปที่ 2.11 รถยนต์ไฮบริดและโครงสร้างหลัก

รถไฮบริดหรือรถลูกผสมจะใช้ทั้งเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้าในการทำงานของระบบ ทั้งนี้พลังงานที่ต้องสูญเสียของเครื่องยนต์ เช่น ขณะเบรกเพื่อชะลอความเร็ว จะถูกนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่ และถูกนำออกมาช่วยในการขับเคลื่อนรถยนต์เพื่อลดการใช้น้ำมันลง นอกจากนี้การลดการใช้น้ำมันเกิดขึ้นจากการเดินเครื่องยนต์ที่ระดับความเร็วรอบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเสมอ พลังงานจากเครื่องยนต์ที่เกินความต้องการจะถูกนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้า และในกรณีที่ความต้องการใช้พลังงานของรถมากกว่าที่เครื่องยนต์ผลิตได้ รถจะใช้พลังงานจาก

แบตเตอรี่เสริม รถไฮบริดมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า โดยหลักการทำงานของรถไฮบริดปรากฏดังรูป



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบหลักของรถยนต์ Hybrid ของรถ Toyota Prius รุ่นปี 2003

รถยนต์ไฮบริดต้องมีแบตเตอรี่ที่ใหญ่กว่าแบตเตอรี่รถยนต์ธรรมดาและใช้แบตเตอรี่แบบใหม่ที่เก็บพลังงานไฟฟ้า ได้มาก และมีระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน รถไฮบริดจะประหยัดพลังงานได้ระหว่าง 10-50% แล้วแต่ประเภทของไฮบริดและลักษณะของการขับว่าเป็นการขับในเมืองหรือระหว่างเมือง ซึ่งรถไฮบริดจะประหยัดน้ำมันได้มากเมื่อขับในเมือง รถไฮบริดได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยบริษัทโตโยต้า และเริ่มพัฒนาเมื่อกลางทศวรรษ 1980 ในขณะที่น้ำมันยังมีราคาถูกมาก และได้เริ่มจำหน่ายครั้งแรกในปี 1997

การพัฒนาารถไฮบริดของโตโยต้าทำให้บริษัทรถยนต์ยักษ์ใหญ่ของชาติตะวันตกแปลกใจมาก เนื่องจากเห็นว่าไม่มีความจำเป็น รถไฮบริดรุ่นแรกของโตโยต้าชื่อ 프리อุส (Prius) มีราคาแพงกว่ารถธรรมดาขนาดเท่ากันกว่า 200,000 บาท รถฟรีอุส ถือว่าเป็น Ecocar และได้รับความนิยมมากเกินความคาดหมายในอเมริกาเหนือ ญี่ปุ่น และยุโรปตะวันตก และได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกระแสของสถานะโลกร้อนและราคาน้ำมันที่สูงขึ้น รถฟรีอุสมียอดขายสะสมจนถึงปัจจุบันกว่า 1 ล้านคัน และปัจจุบันมียอดขายปีละกว่า 1 แสนคัน ยอดขายรถไฮบริดทั้งหมดของโตโยต้า (ฟรีอุส แคมรี่ เล็กซัส และไฮแลนเดอร์) สูงถึงประมาณ 1,600,000 คัน บริษัทฮอนด้าได้ให้ความสำคัญต่อรถไฮบริดโดยพัฒนารถไฮบริดรุ่นแรกชื่อ อินไซท์ (Insight) เมื่อปี 2001 และต้องเลิกผลิตใน 2-3 ปีต่อมาเนื่องจากความต้องการไม่สูงพอ แต่ปัจจุบันบริษัทฮอนด้าได้หันกลับมาผลิตรถไฮบริดแอคคอร์ด, ซีวิค และอินไซท์ และเริ่มได้รับความนิยมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว รถไฮบริดของฮอนด้าได้ประกาศว่ามีราคาสูงกว่ารถธรรมดาไม่เกินคันละ 65,000 บาท



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบหลักของรถยนต์ Hybrid ของรถ Honda Insight รุ่นปี 2006

Insight-รถยนต์ไฮบริดรุ่นแรกของ บริษัทฮอนด้า จากความนิยมรถไฮบริดที่มีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจากมาตรการส่งเสริมต่างๆ ที่เกิดจากแรงกดดันที่ต้องการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคขนส่ง เช่น การลดภาษี ทำให้บริษัทรถยนต์ขนาดใหญ่ทั่วโลกหลายแห่งได้หันมาพัฒนาและผลิตรถไฮบริด โดยมีเป้าหมายที่จะพัฒนารถไฮบริดที่ประหยัดน้ำมันได้มากขึ้นและราคาถูกลง

2.12 รถปลั๊กอินไฮบริด (Plug-In Hybrid Cars)

รถปลั๊กอินไฮบริด คือรถไฮบริดที่เก็บพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ได้มากขึ้น (ซึ่งต้องจุพลังงานได้มากขึ้นกว่าเดิม) ก่อนออก เดินทาง เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนโดยพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวเป็นระยะทางมากขึ้นถึง 20-80 กม. เพื่อให้การใช้น้ำมันลดลงเมื่อเทียบกับรถไฮบริดในภาพรวม รถปลั๊กอินไฮบริดสะสมพลังงานตอนกลางคืนขณะที่พลังงานไฟฟ้ามีราคาถูกโดยชาร์จไฟฟ้าบ้าน รถปลั๊กอินไฮบริดมีศักยภาพที่จะลดการใช้น้ำมันลงถึง 70% และคาดว่าจะออกสู่ตลาดภายใน 2 ปี พัฒนาการของรถปลั๊กอินไฮบริดขึ้นอยู่กับพัฒนาการของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่จะต้องสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้นและราคาถูกลง บริษัทโตโยต้าและ GM ประกาศว่าจะเริ่มขายรถปลั๊กอินไฮบริดในปี 2009 องค์การพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) จะมีส่วนแบ่งของตลาดรถยนต์กว่า 25% ในปี 2030 และประมาณ 60% ในปี 2050 ซึ่งคาดว่าจะมีตลาดใหม่ถึงปีละ 200 ล้านคัน

2.13 รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Cars)

การเกิดสภาวะโลกร้อนทำให้ต้องมีมาตรการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการขนส่ง จากพัฒนาการของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ทำให้รถยนต์ไฟฟ้ามีศักยภาพที่จะขับเคลื่อนได้มากขึ้นกว่าเดิม เมื่อเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้าในอดีต ซึ่งส่วนใหญ่ขับเคลื่อนได้ไม่เกิน 25 กม.ต่อการชาร์จ 1 ครั้ง จากพัฒนาการของเทคโนโลยีลิเทียมไอออนทำให้สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก โดยแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเท่ากัน ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะมีรถยนต์ไฟฟ้าที่มีระยะขับเคลื่อนถึง 500 กม.

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังมีราคาแพงมาก คือมีราคาถึง USD 1000 ต่อ กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) ดังนั้นรถยนต์ไฟฟ้าที่มีระยะขับเคลื่อนมากจะมีราคาแพงมาก แต่เป็นที่คาดกันว่าราคาของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่จะลดลงเหลือเพียง USD 300 ต่อ kWh ภายใน 15 ปี จากการวิจัยและพัฒนาและการผลิตจำนวนมาก ดังนั้นรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นแรกน่าจะมีระยะขับเคลื่อนระดับปานกลาง 100-150 กม. เพื่อรักษาระดับราคาไม่ให้สูง ในระยะนี้การเพิ่มระยะขับเคลื่อนอาจทำได้โดยการตั้งสถานีชาร์จแบตเตอรี่ขึ้นเพื่อให้บริการผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้า มีรายงานว่าประเทศอิสราเอลและเดนมาร์ก เริ่มวางแผนที่จะจัดตั้งสถานีชาร์จแบตเตอรี่จำนวนมาก เพื่อรองรับการใช้รถยนต์ไฟฟ้าทดแทนรถยนต์ที่ใช้น้ำมัน บริษัทรถยนต์หลายแห่งกำลังผลิตรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นใหม่ รถยนต์ไฟฟ้าของบริษัทมิตซูบิชิ ซึ่งใช้ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่และขับเคลื่อนได้ 130 กม.ต่อการชาร์จ 1 ครั้งจะออกสู่ตลาดในปี 2009 ด้วยราคา USD 25,000-USD 30,000 การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละครั้งให้เต็มต้องใช้เวลากว่า 10 ชม. แต่ขณะนี้บริษัทมิตซูบิชิได้พัฒนาเทคโนโลยีชาร์จแบตเตอรี่ที่ชาร์จได้เร็วขึ้นมาก โดยสามารถชาร์จไฟฟ้าได้ 80% ของความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ภายใน 30 นาที



(A) รถยนต์ไฟฟ้าของ VOLVO “C30 EV”



(B) รถยนต์ไฟฟ้าของ MITSUBISHI “Colt”

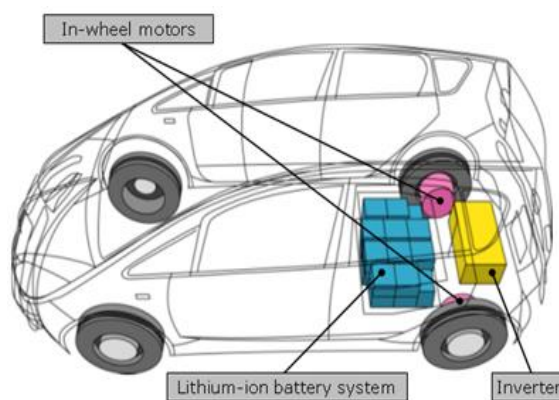


(C) รถยนต์ไฟฟ้าของ NISSAN “Leaf”



(D) รถยนต์ไฟฟ้าของ Chevy “Volt”

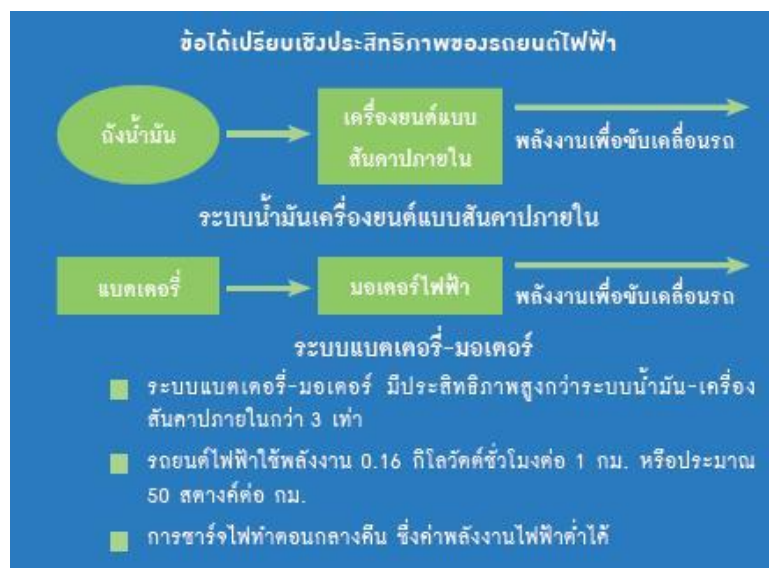
รูปที่ 2.14 รถยนต์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 รถยนต์ไฟฟ้าของมิตซูบิชิ (iMiEV) ซึ่งใช้ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

2.14 ข้อได้เปรียบในเชิงประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า

ข้อได้เปรียบของรถยนต์ไฟฟ้าก็คือ ระบบแบตเตอรี่-มอเตอร์ไฟฟ้า มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบน้ำมัน-เครื่องยนต์แบบสันดาปภายในถึงประมาณ 3 เท่า รถยนต์ไฟฟ้าขนาดมาตรฐานจะใช้พลังงานประมาณ 0.16 กิโลวัตต์-ชม. ต่อ 1 กม. หรือประมาณ 0.50 บาท/กม. ซึ่งต่ำกว่าการใช้น้ำมันมาก และหากชาร์จไฟฟ้าในเวลากลางคืน ราคาพลังงานไฟฟ้าจะต่ำกว่านี้



รูปที่ 2.16 ข้อได้เปรียบเชิงประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า

กรอบเวลาที่รถไฮบริดและรถยนต์ไฟฟ้าจะเข้าสู่ตลาด ซึ่งจะเห็นได้ว่าในระยะยาวรถยนต์ไฟฟ้าจะมีระยะขับเคลื่อนเท่ากับรถใช้น้ำมันในปัจจุบันเนื่องจากแบตเตอรี่จะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง แนวโน้มของรถยนต์ในอนาคต ผลกระทบจากสถานะโลกร้อน และราคาน้ำมันที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประเภทของรถยนต์ที่ใช้ในการขนส่ง รถยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้น้ำมันเบนซินและดีเซลน้อยลงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประเทศต่างๆ ในยุโรปได้เริ่มกำหนดมาตรฐานการปล่อยก๊าซ CO₂ ของรถยนต์ที่เข้มงวดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น EU ได้กำหนดค่าสูงสุดของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรถยนต์ใน EU ในปี 2012 ไว้ที่ 130 กรัม/กม. ในขณะที่ค่าเฉลี่ยในปัจจุบันคือ 158 กรัม/กม. ข้อกำหนดเช่นนี้มีส่วนผลักดันให้บริษัทรถยนต์ต้องพัฒนารถไฮบริดและรถยนต์ไฟฟ้าผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงานเชื่อว่ารถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์เบนซินและดีเซลแบบธรรมดาจะลดลงและหายไปภายใน 20 ปีข้างหน้า โดยถูกแทนที่ด้วย รถไฮบริด รถปลั๊กอินไฮบริด รถยนต์ไฟฟ้า(หรือรถเซลล์เชื้อเพลิง) รถยนต์ประสิทธิภาพสูง (ใช้เครื่องยนต์เบนซินและดีเซลขั้นสูง และส่วนประกอบอื่นๆ ที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงขึ้น) ผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงานเชื่อกันว่าในระยะยาวรถยนต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในเมืองใหญ่จะเป็นรถยนต์ไฟฟ้า

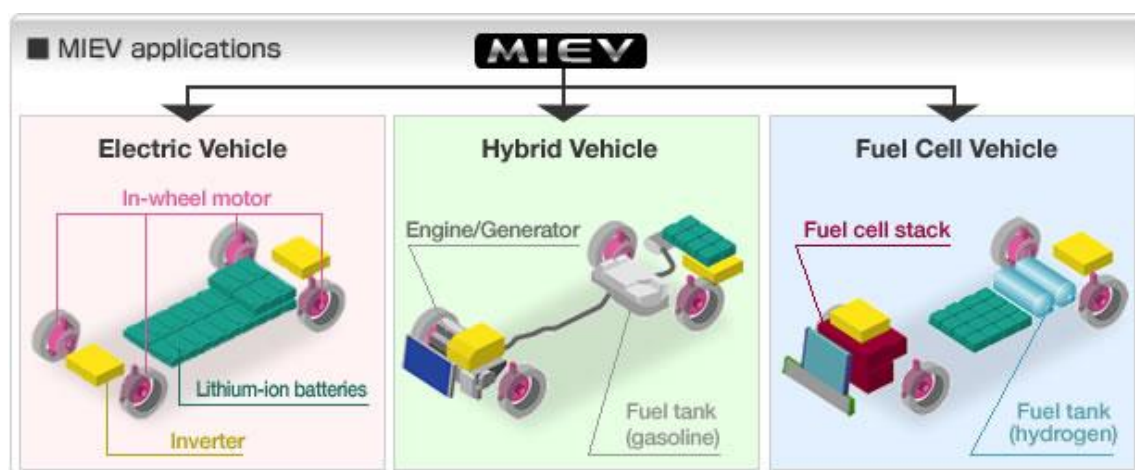
มิตซูบิชิมอเตอร์ส์ได้เลือกศูนย์การพัฒนาระบบเทคโนโลยียานยนต์ยุคถัดไปที่มอเตอร์ไฟฟ้าในล้อที่ลด drivetrain และต้องการพื้นที่ให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน กับพลังงานที่เหนือกว่าที่ระบุลักษณะของ ชื่อ มิตซูบิชิคูมมัลมอเตอร์ไฟฟ้า Vehicle (MIEV) แนวคิด บริษัท ฯ กำลังทำงาน

ในรถทดสอบที่ใช้เทคโนโลยีหลักเหล่านี้ แนวคิด MIEV เสนอรูปแบบการขับเคลื่อนอย่างมีประสิทธิภาพ ในศตวรรษที่ใช้พลังงานสะอาดต่อสภาพแวดล้อม และบริษัทยัง envisages ประยุกต์เพื่อลูกผสมไฟฟ้าและเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2.17 รถยนต์รุ่น Colt EV (In-wheel motor test vehicle) และมอเตอร์คู่มือใน Colt EV

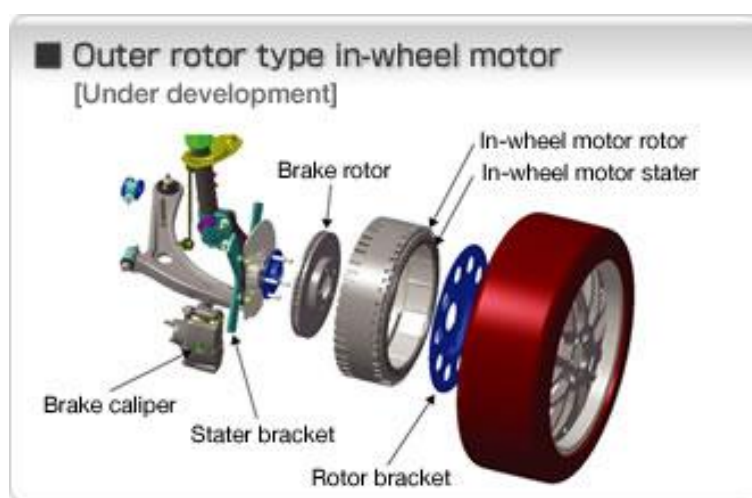
โดยมีวางระบบไฟฟ้าในล้อให้นักออกแบบมือ freeer มากในการพัฒนารูปแบบของรถ คุณสมบัติประหยัดพื้นที่ของในล้อระบบมอเตอร์จะอำนวยความสะดวกในการเปลี่ยนเครื่องยนต์ขับเคลื่อนยาน IC เป็นลูกผสมไฟฟ้าและยังช่วยให้ห้องสำหรับส่วนประกอบพื้นที่บริโภคเช่น กองเซลล์เชื้อเพลิงและถังไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง



1) MIEV เทคโนโลยีหลัก motor 2) ล้อในและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 3) แบบผสมและ EVs เซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 2.18 เทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนด้วยคู่มือมอเตอร์ไฟฟ้า

วิวัฒนาการของล้อเทคโนโลยีควบคุมทั้งหมด อุปกรณ์ยนต์ในล้อที่ล้อแต่ละผลิตระบบไฟฟ้าทุกล้อที่ต้องส่งไม่เพลาขับ, เกียร์แตกต่างหรืออื่น ๆ ส่วนประกอบเชิงกลที่ซับซ้อนนอกจากนี้ยนต์ในล้อทำให้สามารถควบคุมแรงบิดไฟฟ้าและเบรกแรงอิสระและมีความแม่นยำมากในแต่ละล้อ ดังนั้นมอเตอร์ที่ล้อถือสัญญาณมากในแง่ของวิวัฒนาการของเทคโนโลยีต่อการควบคุม Mitsubishi ทุกล้อที่ enjoys โห้ร้องสำคัญสูงในรูปแบบการผลิตเช่น Lancer Evolution และ Pajero บริษัท ฯ กำลังทำงาน 50kW ใหม่ยนต์ในล้อด้วยการออกแบบใบพัดด้านนอกจะใช้กำลังแต่ละล้อที่มีสมรรถนะสูง 4WD ทดสอบรถยนต์

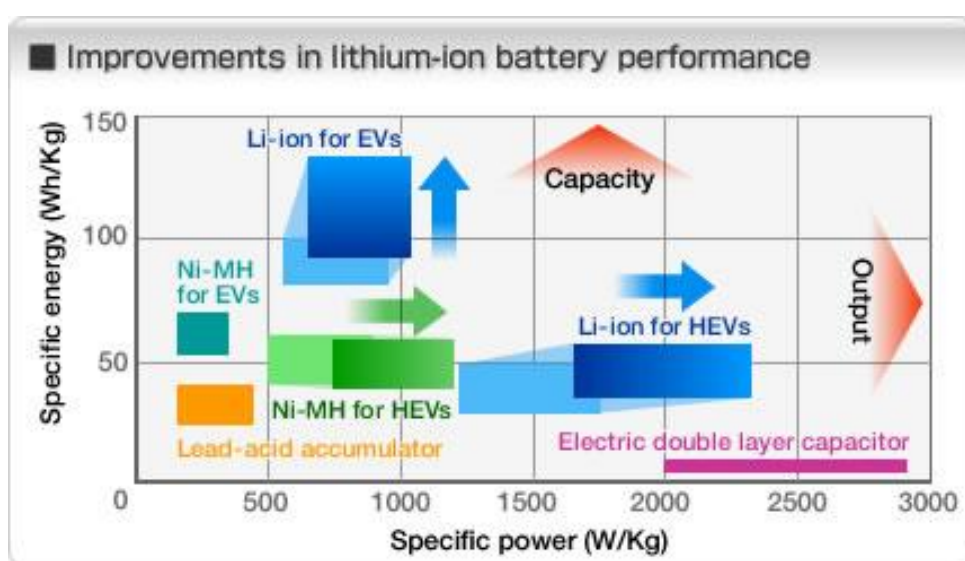


รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบหลักของโครงสร้างคูลล์มอเตอร์



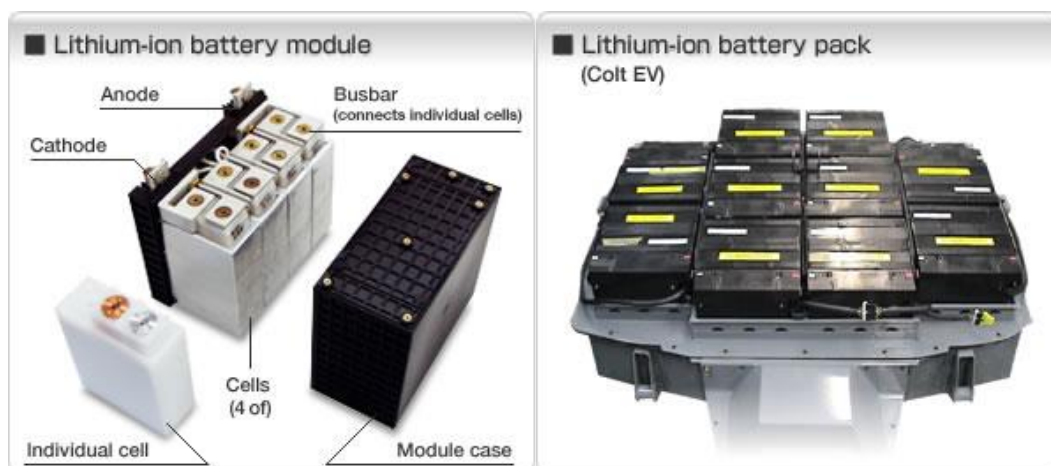
รูปที่ 2.20 คูลล์มอเตอร์ไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้ามิทซูบิชิ

เทคโนโลยีลิเทียมไอออนแบตเตอรี่มีผลประโยชน์สำคัญในด้านพลังงานและชีวิตที่เฉพาะเจาะจงกว่าประเภทอื่น ๆ แบตเตอรี่ชาร์จ มิตซูบิชิมอเตอร์ส์ได้สร้างแล้วยานพาหนะที่ใช้ทดสอบหลาย ion ระบบแบตเตอรี่ลิเทียมรวมทั้ง Mitsubishi HEV ในปี 1996 ที่ FTO - EV ในปี 1998 และในปี 2000 Eclipse EV FTO - EV ตั้งค่าหลายชั่วโมงระยะทางโลกระเบียบ - 24 บนพื้นพิศุจน์ในขณะที่ Eclipse EV ครอบคลุมกว่า 400 กม. บนถนนสาธารณะในแบตเตอรี่เพียงครั้งเดียวค่า เหล่านี้และโปรแกรมการทดสอบอื่น ๆ ได้เปิดใช้งาน บริษัท จะตรวจสอบการบังคับใช้จริงของแบตเตอรี่ประเภทนี้



รูปที่ 2.21 กราฟการเปรียบเทียบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ สำหรับรถไฟฟ้า

ไอออนเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมทำให้ก้าวหน้าที่สำคัญในการทำงานมากกว่าไม่กี่ปีที่ผ่านมาและถือสัญญาณมากในแง่ของความเร็วสูง extended cruising ช่วงลดน้ำหนักการไฟฟ้าไฮบริดและยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2.22 แบตเตอรี่ฟีกัด 14.8 V battery module comprising four 3.7V cells., 325 V battery pack made up of 22 modules arranged in series

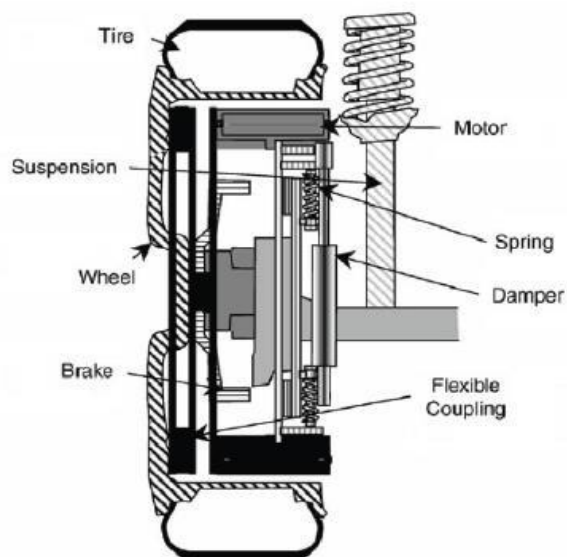
มิตซูบิชิมอเตอร์สโคลท์ EV ในล้อยานยนต์การวิจัยขึ้นอยู่กับการผลิตขนาดเล็กลง ที่ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า หลังจากถอดเครื่องมือ IC, ถังน้ำมันเชื้อเพลิงและการส่ง – มอเตอร์ล้อ ในที่ติดตั้งในล้อหลังและถูกขับเคลื่อนโดยแบตเตอรี่ลิเทียม มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับ EV ปัจจุบันครอบคลุมระยะการทดสอบที่พิสูจน์พื้นที่โรงงานบริษัท In-wheel motor on EV มีกำหนดจะเริ่มต้นโปรแกรมการทดสอบถนนในการระบุและแก้ไขปัญหาใดๆ ที่ไม่ซ้ำกันในวงล้อมอเตอร์รถระบบรวมและที่เสื่อมสภาพถนนในการถือครองชี้และความสะดวกสบายจากการเพิ่มขึ้น unsprung น้ำหนักรวมทั้งความน่าเชื่อถือ เรื่องความทนทานในล้อระบบมอเตอร์ในและส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่อพ่วง (suspension, ล้อ, ยาง)

2.15 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

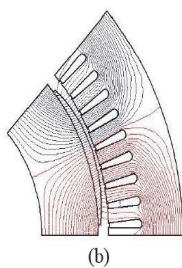
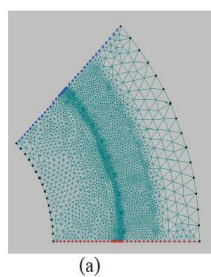
งานวิจัยทางด้านนี้ได้มีการนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ เช่น ที่ประชุม IEEE จัดงานประชุมในยุโรป อเมริกา ญี่ปุ่น ซึ่งได้พัฒนาทางด้านวัสดุที่ใช้ในการออกแบบและสร้างมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ทำงานแบบใช้วัสดุ Permanent Magnet In-Wheel Synchronous Motor สำหรับรถไฟฟ้า (EV)

- การพัฒนาชุดควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในที่ประชุม IEEE ปี 2008 ประเทศเกาหลี
- การพัฒนาชุดควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในที่ประชุม IEEE ปี 2008

ประเทศเกาหลี



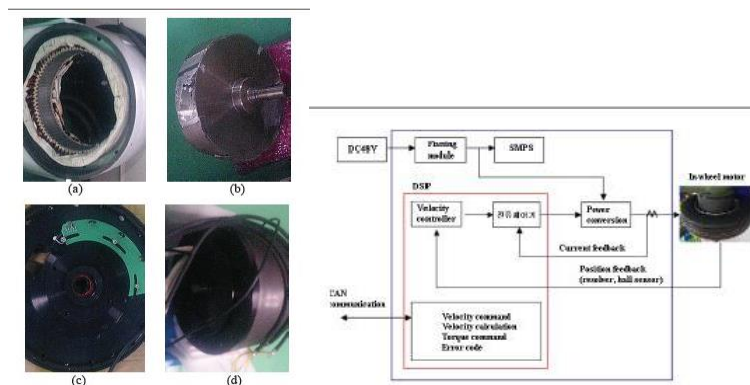
รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบของระบบคูล้อมอเตอร์ไฟฟ้า



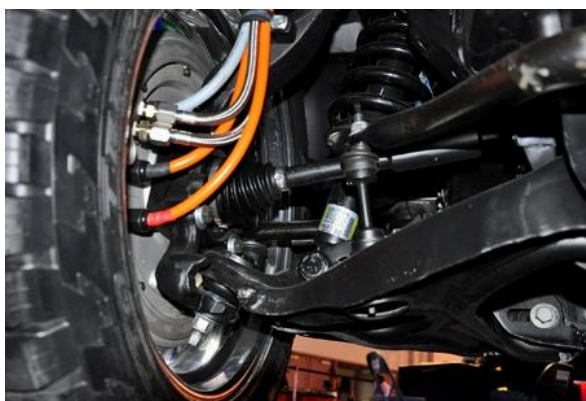
Parameter		Value	Unit
Motor specification	Input voltage	48	V
	Maximum current	300	A
	Rated current	130	A
	Velocity range	0-6000	rpm
Driver specification	Input	Reference velocity	
	output	Measured velocity	



รูปที่ 2.24 ภาพรวมของการออกแบบโครงสร้างคูล้อมอเตอร์ไฟฟ้าที่วิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ด้วยวิธีคำนวณแบบ Finite element

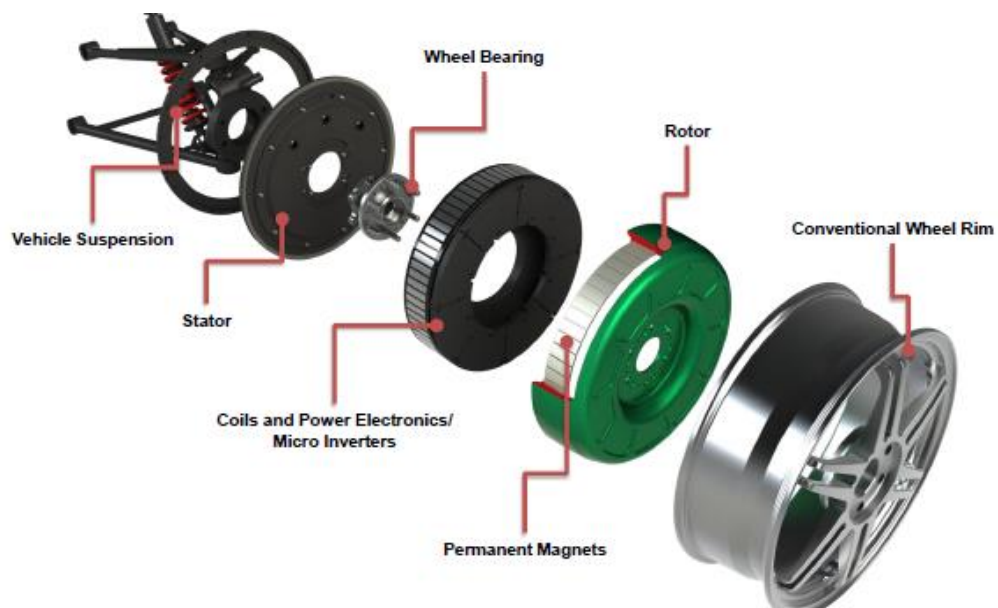


รูปที่ 2.25 ภาพรวมของโครงสร้างและชุดควบคุมด้วย DSP ของมอเตอร์ไฟฟ้า

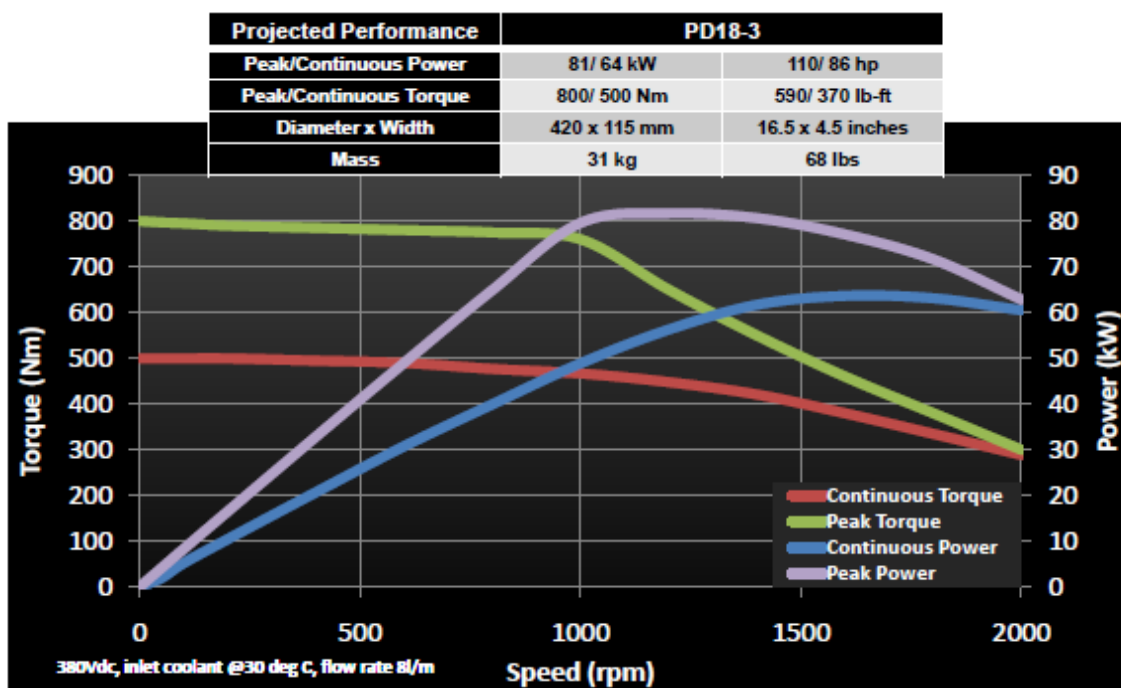


รูปที่ 2.26 ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าของบริษัท FORD

- งานวิจัยเรื่อง OPTIMAL DESIGN AND CONTROL OF AXIAL-FLUX BRUSHLESS DC WHEEL MOTOR FOR ELECTRICAL VEHICLES โดย Y.P. Yang และคณะ ได้ทำการศึกษาการออกแบบและการควบคุมที่เหมาะสมของฟลักส์แม่เหล็ก ในมอเตอร์ไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า ผลที่ได้นั้นแสดงการควบคุมรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดมอเตอร์ โดยทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.27 ภาพส่วนประกอบของคูลมล้อมอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของแรงบิดและกำลังของคูลมล้อมอเตอร์ไฟฟ้า

2.16 การคำนวณหาขนาดความจุของแบตเตอรี่

ในการออกแบบหาขนาดขอมอเตอร์ในการขับเคลื่อน โยพิจารณาจากเงื่อนไขในการออกแบบ โดยมีตัวแปรของความเร็วในการเคลื่อนที่ (v) รูปหน้าตัดของยานยนต์ (Af) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ (f_r) น้ำหนักของยานยนต์ (M) ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Cd) สัมประสิทธิ์ค่าน้ำหนักที่เกิดจากการหมุน (α) ความเร่ง (a) และประสิทธิภาพของการส่งกำลัง (η)

$$P = [v(f_r M + 0.5 \rho C_d A f v^2 + M \alpha a)] / \eta \quad (2.30)$$

จากผลการคำนวณที่ได้ขนาดของกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนแล้ว จะนำไปพิจารณาเลือกขนาดของแบตเตอรี่ต่อไป

งานวิจัย เรื่องการออกแบบและสร้างคูลมออเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้มีการตรวจสอบทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว โดยคาดว่าหัวข้อที่จะสามารถดำเนินการขอจดสิทธิบัตรได้อย่างแน่นอนในส่วนของการพัฒนาการออกแบบคูลมออเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถนำมาติดตั้งใช้งานกับรถยนต์ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ดังหัวข้อดังนี้

- 1) คูลมออเตอร์ไฟฟ้าเอนกประสงค์ที่สามารถติดตั้งใช้งานกับรถยนต์ที่ต้องการผสมผสานสองระบบคือ รถยนต์ที่มีระบบเชื้อเพลิงเดิม เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง หรือระบบก๊าซเชื้อเพลิง
- 2) คูลมอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถติดตั้งเพื่อสร้างพลังงานกลับคืนสู่ระบบแบตเตอรี่