

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

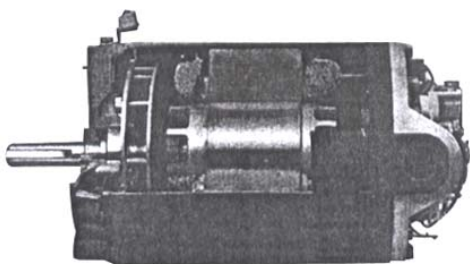
2.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัฒนาระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งานที่ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ตามวิธีการที่นำเสนอซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาต่าง ๆ คือ โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความรู้เบื้องต้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง หลักการออกแบบที่เหมาะสม หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม จีเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms) การระบายอากาศในอุโมงค์ ความรู้พื้นฐานการซ่อมบำรุง และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป

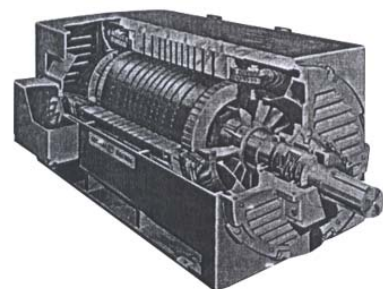
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.2.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีส่วนประกอบหลักๆคือ ส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์หรือด้านปฐมภูมิซึ่งเป็นโครงทรงกระบอกที่ทำมาจากวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแผ่นบางๆซ้อนกันเป็นชั้นๆ และมีขดลวดพันอยู่ภายในร่องของมัน ขดลวดแต่ละขดลวดนั้นจะพันแตกต่างกัน หากเป็นมอเตอร์ตัวเล็กก็จะพันแบบสุ่ม (random-wound stator coils) ถ้าเป็นมอเตอร์ตัวใหญ่ก็จะมีรูปแบบการพันที่แน่นอน (form-wound stator coils) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [1-4]



(ก)

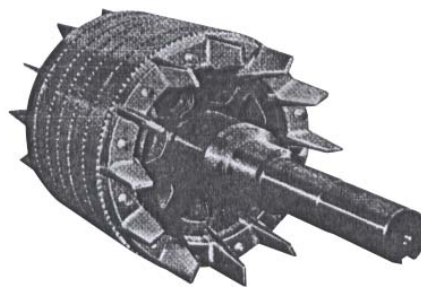


(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) มอเตอร์ขนาดเล็กพันขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม (ข) มอเตอร์ขนาดใหญ่รูปแบบการพันขดลวดสเตเตอร์แบบแน่นอน

ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์หรือด้านทุติยภูมินี้เป็นส่วนประกอบหลักอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งทำมาจากวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ รูปร่างทรงกระบอก ติดอยู่บนเพลลา ตามเส้นรอบวงด้านนอกทรงกระบอกของโรเตอร์จะมีการเจาะทะลุตามแนวยาวแกนเพลลาโดยรอบเพื่อรองรับการพันขดลวดโรเตอร์ ซึ่งมีการพันอยู่ 2 แบบคือแบบกรงกระรอก (squirrel cage) และแบบวาวด์โรเตอร์

การพันแบบกรงกระรอกสามารถขึ้นรูปโดยการหล่อโลหะหรือใช้เครื่องจักรพันขดลวดขดลวดที่อยู่ในสล๊อตของโรเตอร์และโลหะในส่วนปลายที่ใช้ลัดวงจรขดลวดที่อยู่ในโรเตอร์นี้อาจทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

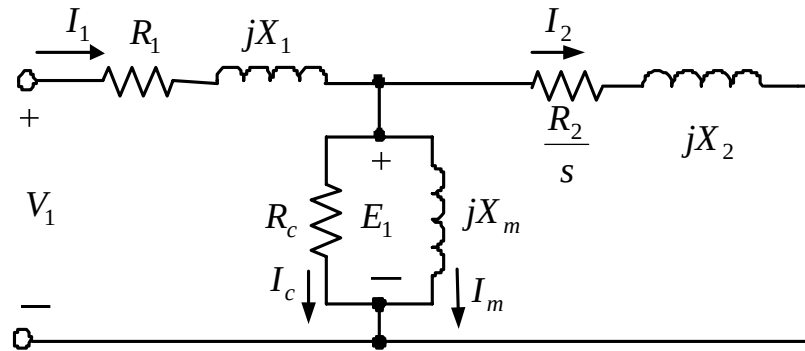
การพันขดลวดโรเตอร์แบบวาวด์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นคล้ายกับการพันที่สเตเตอร์ โดยทั่วไปขดลวดจะต่อแบบวายเข้ากับสล๊ปรึง และต่อออกไปยังความต้านทานปรับค่าได้แบบ 3 เฟส

2.2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลของมอเตอร์นั้นเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันจากแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์หรือขดลวดปฐมภูมินั้นจะสร้างฟลักซ์เชื่อมโยงไปยังขดลวดโรเตอร์หรือขดทุติยภูมิ ฟลักซ์ร่วม (mutual flux) ที่หมุนตัดขวางแกนเหล็กที่เป็นเฟโรแมกเนติกเหล่านี้ทำให้เกิดความสูญเสียจากกระแสไหลวนและฮิสเตอร์ซิส นอกจากนี้ยังมีฟลักซ์รั่วไหลเกิดขึ้นอีกด้วย กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ยังแสดงพฤติกรรมต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ที่สร้างจากขดลวดสเตเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดความสมดุลของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) จากผลลัพธ์นี้จึงเสมือนว่าสามารถนำวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้ามาเป็นโมเดลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ อย่างไรก็ตามมี 3 สิ่งที่ไม่เหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าคือฟลักซ์ร่วมนั้นจะต้องข้ามช่องว่างอากาศที่มีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสูง (high reluctance) เสมือนกับการที่ค่าความต้านทานในแกนเหล็ก (magnetizing reactance; X_m) ซึ่งจะส่งผลให้สนามแม่เหล็กรั่วไหล (leakage reactance; X_1, X_2) มากขึ้นด้วย ข้อ

ที่สองคือขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน สุดท้ายคือขดลวดทุติยภูมิมีการลัดวงจรที่ปลาย

จากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงสามารถนำมาเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โอนย้ายค่าต่างๆมาทางสเตเตอร์

โดยกำหนดให้

- R_1 หมายถึงความต้านทานขดลวดที่สเตเตอร์
- R_2 หมายถึงความต้านทานโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์
- jX_1 หมายถึงรีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์
- jX_2 หมายถึงรีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์
- R_c หมายถึงความต้านทานที่เป็นผลให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก
- jX_m หมายถึงรีแอกแตนซ์ที่เกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์
- s หมายถึงค่าสลิป

2.2.3 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากการที่โรเตอร์รับกำลังไฟฟ้าผ่านมาทางสเตเตอร์ข้ามผ่านช่องว่างอากาศในรูปสนามแม่เหล็กมาเปลี่ยนเป็นกำลังงานกลที่โรเตอร์ (P_g) กำลังเฉลี่ยที่ข้ามผ่านช่องว่างอากาศนั้นต้องเท่ากับผลรวมการสูญเสียของความต้านทานขดลวดโรเตอร์ที่แปรเปลี่ยนไปในรูปความร้อนและกำลังทางกล กำลังที่ข้ามผ่านช่องว่างอากาศแต่ละเฟสนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

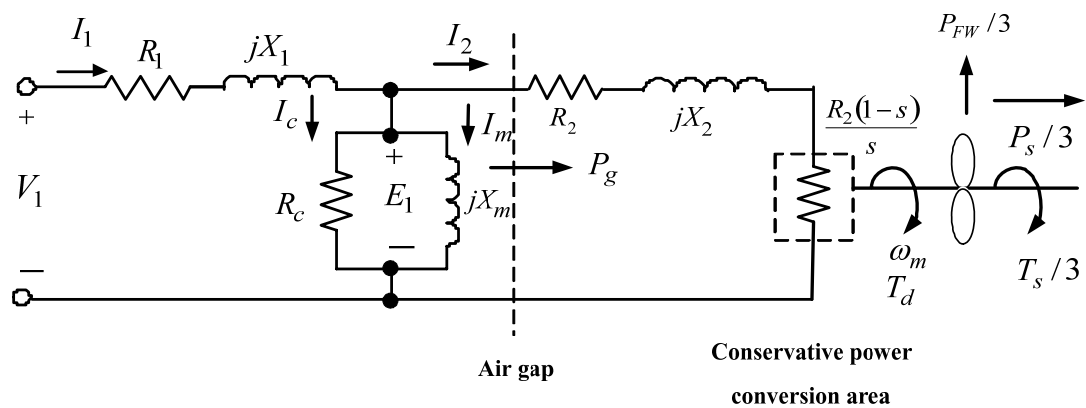
$$P_g = (I_2)^2 \frac{R_2}{s} = (I_2)^2 R_2 + (I_2)^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) R_2 \quad (2.1)$$

ในเทอมแรกทางด้านขวามือแสดงถึงค่าความสูญเสียของความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในเทอมต่อมาเป็นกำลังที่เปลี่ยนมาเป็นรูปทางกลหรือกำลังที่สร้างขึ้น (developed power; P_d) จากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าความสูญเสียของความต้านทานขดลวดต่อเฟส (P_{rcu}) และกำลังที่สร้างขึ้น (P_d) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

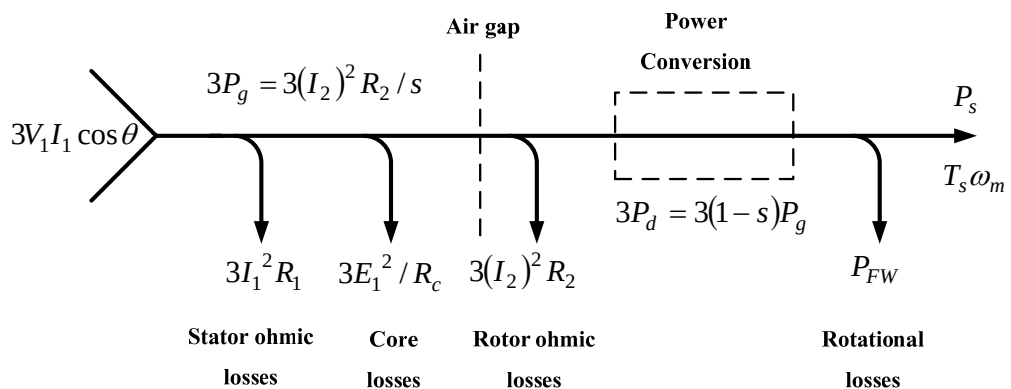
$$P_{rcu} = (I_2)^2 R_2 = sP_g \quad (2.2)$$

$$P_d = (I_2)^2 \frac{(1-s)}{s} R_2 = (1-s)P_g \quad (2.3)$$

ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 2.4 แสดงความสูญเสียจากความเสียดทานและแรงลมต่อเฟส ($P_{FW}/3$) ถ้าดับถัดไปคือกำลังทางกลที่เพลา ($P_s/3$) และแรงบิดทางกลที่เพลา ($T_s/3$) การแสดงค่าโดยหาร 3 เพื่อให้สอดคล้องกับวงจรสมมูลที่คำนวณต่อเฟส ในรูปที่ 2.5 แสดงแผนผังการไหลของกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสมบูรณ



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสที่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกำลังไฟฟ้ากล



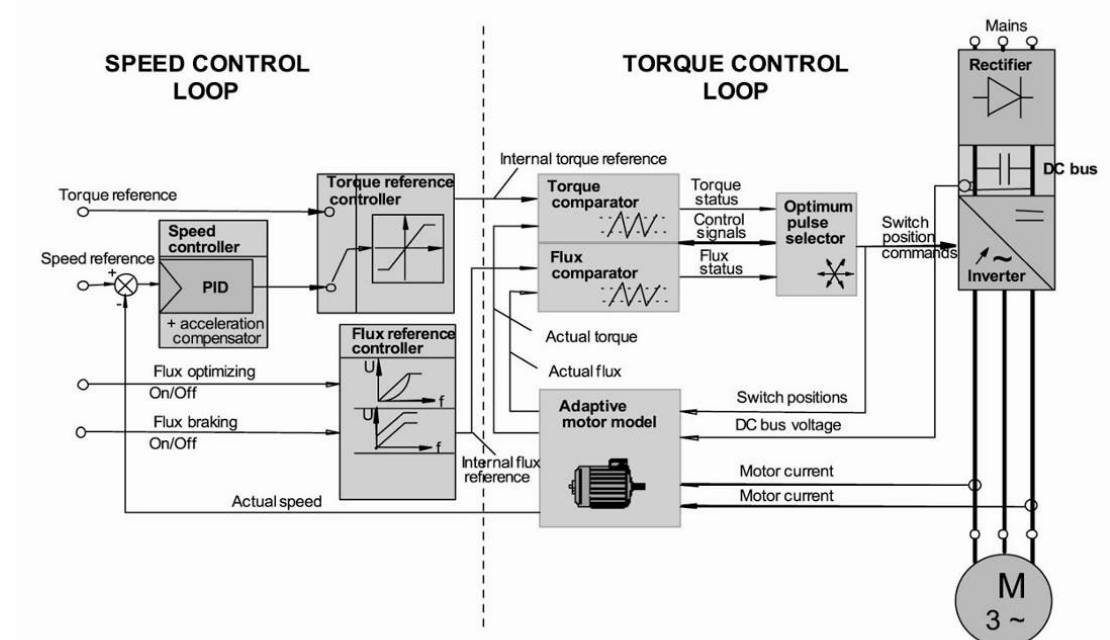
รูปที่ 2.5 แผนผังการไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.3 ความรู้เบื้องต้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

2.3.1 ความเป็นมาของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

การขับเคลื่อนมอเตอร์โดยควบคุมแรงบิดทางแม่เหล็ก (electromagnetic torque) ของมอเตอร์ทำให้เกิดการตอบสนองทางพลวัต (dynamic) ที่รวดเร็วขึ้น มีการใช้งานมานานกว่า 20 ปี ตั้งแต่การขับเคลื่อนโดยการควบคุมแบบเวกเตอร์ที่นำเสนอโดย Siemens จนกระทั่งต่อมาเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง (direct torque control; DTC) ที่นำเสนอโดย ABB [5-6] การควบคุมแรงบิดโดยตรงนี้เป็นแนวคิดในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แตกต่างไปจากการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยการควบคุมแรงบิดโดยตรงจะทำการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์โดยตรงไม่ผ่านการทำพัลส์วิธซ์มอดดูเลชั่น (PWM) เหมือนกับการควบคุมแบบอื่นๆ ในการควบคุมแบบนี้อินเวอร์เตอร์จะทำการคำนวณค่าฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์และค่าแรงบิดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ จากนั้นก็จะนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ (setting) ของฟลักซ์และแรงบิดผ่านตัวเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีชีส สถานะของสัญญาณขาออกของตัวเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีชีสจะทำให้เราทราบว่าต้องเพิ่มหรือลดฟลักซ์และแรงบิด ซึ่งข้อมูลนี้ก็จะถูกนำไปใช้ในการเลือกรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จากตาราง เพื่อให้ได้แรงดันสเตเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ฟลักซ์และแรงบิดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ต้องการได้

2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการควบคุม



รูปที่ 2.6 แผนผังส่วนควบคุมของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

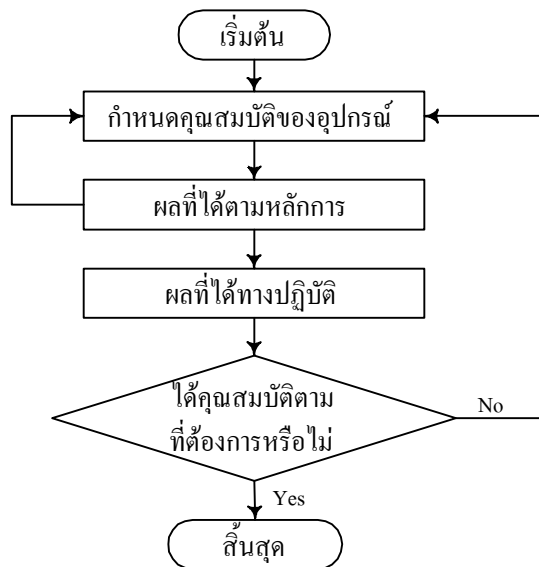
จากแผนผังในรูปที่ 2.6 แสดงถึงส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงบิด โดยตรงซึ่งมี 2 ส่วนคือ ลูปควบคุมแรงบิด (torque control loop) และลูปควบคุมความเร็ว (speed control loop) เริ่มต้นอธิบายการใช้งานคือมีการตรวจวัดกระแสของมอเตอร์ 2 เฟสและแรงดันดีซีบัลล์ พร้อมกับตำแหน่งของการสวิตชิงส่งไปยังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ (adaptive motor model) การหาแบบจำลองนี้ได้มาจากการรันมอเตอร์เพื่อหาคุณลักษณะ (identification run) ซึ่งเรียกว่าออโต้จูนนิ่ง (auto-tuning) ทำให้ได้ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ อินดักแตนซ์ร่วม และสัมประสิทธิ์อิ่มตัวต่างๆ (saturation coefficients) จากแรงเหนี่ยวนำในการรันทดสอบของมอเตอร์ การรันเพื่อหาคุณลักษณะ ทำได้โดยไม่จำเป็นต้องให้มอเตอร์หมุนซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำอินเวอร์เตอร์แบบนี้ไปใช้งานกับมอเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบใหม่ แต่การที่จะได้มอเตอร์โมเดลที่มีความแม่นยำมากที่สุดจะต้องทำการรันเพื่อหาคุณลักษณะโดยการขับเคลื่อนมอเตอร์ร่วมด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีความแม่นยำของความเร็วรอบสูงแต่หากต้องการความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ณ จุดทำงานคงที่น้อยกว่า 0.5 % จะต้องใช้เอ็นโคเดอร์หรือทาโคมิเตอร์

สัญญาณเอาพุทที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์คือ แรงบิด ฟลักซ์ของสเตเตอร์ และความเร็วรอบ ค่าแรงบิดและฟลักซ์ที่ได้มานี้จะถูกส่งไปยังตัวเปรียบเทียบแรงบิดและฟลักซ์ (torque and flux comparator) ที่มีการเปรียบเทียบค่าที่แท้จริงกับค่าที่ตั้งไว้ทุกๆ 25 ไมโครวินาที คำนวนโดยใช้วิธีเปรียบเทียบแบบฮิสเทรีซิส 2 ระดับ จากนั้นจะส่งค่าฟลักซ์และแรงบิดที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ต่อไปยัง optimum pulse selector ซึ่งมีการคำนวณรูปแบบการสวิตชิงทุก 25 ไมโครวินาทีเช่นเดียวกันส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ เพื่อทำการสวิตชิงที่ความถี่ 4 kHz ต่อไป จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบและคำนวณค่า 40,000 ครั้งต่อวินาทีดังนั้นจึงทำให้ได้การตอบสนองทางแรงบิดและและความเร็วรอบที่แม่นยำสูง

ในลูปควบคุมความเร็วเริ่มต้นการทำงานตั้งแต่ตัวควบคุมแรงบิดอ้างอิง (torque reference controller) ที่ถูกกำหนดโดยค่าลิมิตของแรงบิดและแรงดันดีซีบัลล์ ในส่วนของตัวควบคุมความเร็ว (speed controller) ประกอบด้วยตัวควบคุม PID และตัวชดเชยความเร่ง (acceleration compensator) สัญญาณความเร็วภายนอกอ้างอิงจะถูกเปรียบเทียบกับความเร็วแท้จริงที่ได้มาจากระบบจำลองของมอเตอร์ ผลต่างของทั้งสองสัญญาณนี้จะส่งไปยังตัวควบคุม PID และตัวชดเชยความเร่ง ผลลัพธ์ที่ออกมาจากตัวควบคุมความเร็วนี้คือผลรวมของทั้งสองส่วนนี้ ค่าสมบรูณ์ของฟลักซ์ที่สเตเตอร์จะได้มาจากระบบควบคุมฟลักซ์อ้างอิง (flux reference controller) ส่งต่อไปยังตัวเปรียบเทียบฟลักซ์ต่อไป

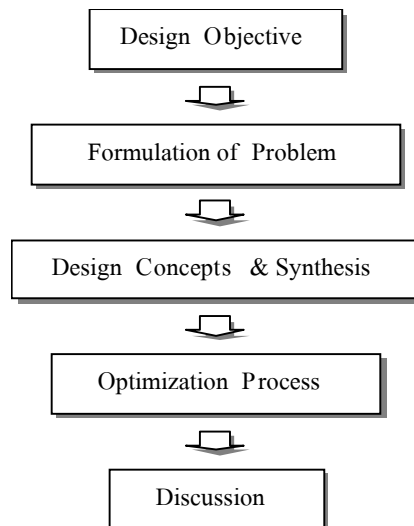
2.4 หลักการออกแบบที่เหมาะสม

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมจะมีการกำหนดเป้าหมายและเงื่อนไขขึ้นเพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งาน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยแผนผังดังรูปที่ 2.7 จะเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างสูง



รูปที่ 2.7 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

ผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำการลองผิดลองถูกใหม่ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากแผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมตามรูปที่ 2.8 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

2.4.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ

การกำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective) คือการกำหนดความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด

2.4.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา

กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem) เป็นการศึกษาวิธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมสมการที่ใช้ในการออกแบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะจะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่ต้อง

2.4.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์

หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จัดความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเพื่อให้แสดงถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการ รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและตัวแปรที่เลือกใช้

2.4.4 การหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process) เป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ดิเทอมินิสติก (deterministic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของเกรเดียน และสโตชาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

2.4.5 อภิปรายผลการออกแบบ

อภิปรายผลการออกแบบ (discussion) เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นหลังการออกแบบจะต้องมีการนำผลลัพธ์มาอภิปรายเสมอเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเสมอ

2.5 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด [7-8] ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 2.4 – 2.7 ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad F(\mathbf{x}) \quad \text{Objective Function} \quad (2.4)$$

$$\text{Subject to} \quad \text{constraints Function}$$

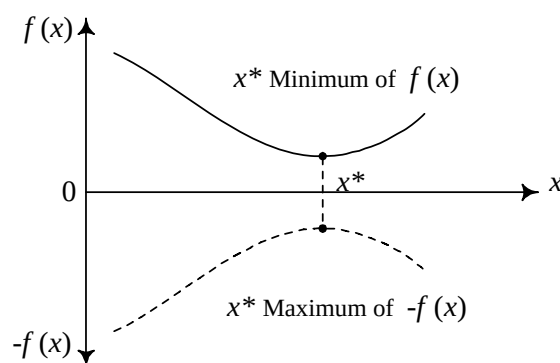
$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, l \quad \text{Inequality Constraint} \quad (2.5)$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad \text{Equality Constraint} \quad (2.6)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Side Constraint} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 2.4 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า x^* เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 2.9 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$

สมการที่ 2.5 แสดงฟังก์ชันเงื่อนไขที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (inequality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 2.6 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ (equality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 2.7 เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการได้คำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. ดิเทอร์มินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของเกรเดียน
2. สโตคาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

2.6 จีเนติกอัลกอริธึม (genetic algorithms)

จีเนติกอัลกอริธึม [9-12] คือ อัลกอริธึมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (optimization) และปรับปรุงคำตอบโดยเลียนแบบพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ โดยมีวิธีการขยายพันธุ์ทางธรรมชาติ (reproduction) การคัดเลือก โดยธรรมชาติ (natural selection) ตัวจีเนติกอัลกอริธึมจะดำเนินการในลักษณะของพันธุศาสตร์

การทำงานของของจีเนติก อัลกอริธึม นั้นจะมีตัวดำเนินการของจีเนติกอัลกอริธึม (operators of genetic algorithms) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ลอกเลียนมาจากธรรมชาติดังนี้

1. การคัดเลือก (reproduction)
2. การสร้างโครโมโซม (crossover)
3. การกลายพันธุ์ (mutation)

จีเนติกอัลกอริธึมเหมาะสำหรับการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำ (exact optimum) แต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้จีเนติกอัลกอริธึมช่วยในการหาค่าให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงใช้วิธีการอื่นเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ

จีเนติกอัลกอริธึมแตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization) อื่นๆ ดังนี้

1. เป็นกระบวนการที่อาศัยข้อมูลทางสถิติ
2. เป็นการค้นหาคำตอบที่หลายๆชุดพร้อมกัน ไม่ใช่เพียงชุดเดียว
3. เป็นการหาคำตอบจากการแทนค่าลงไปในสมการเพื่อหาคำตอบไม่ใช่การแก้สมการเพื่อหาคำตอบ
4. ไม่ต้องการเทคนิคทางคณิตศาสตร์อื่นๆเข้ามาช่วย ต้องการเพียงฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันความเหมาะสมในการหาคำตอบ

จีเนติกอัลกอริธึมมีการทำงานแบบเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัส โดยจะไม่รับกวนรูปแบบสมการฟังก์ชันและตัวแปรโดยตรง และยังมีการค้นหาคำตอบจากจำนวนโครโมโซมทั้งหมดโครโมโซมที่ผ่านการคัดเลือกแล้วเท่านั้นที่สามารถให้กำเนิดรุ่นต่อไปได้ โอกาสของการค้นหาคำตอบได้จะมีมากขึ้น เทคนิคการค้นหาคำตอบอื่นเช่น gradient techniques ต้องใช้ผลการคำนวณหรือผลจากการวิเคราะห์ที่ดัดแปลงแล้วเพื่อหาจุดอ้างอิงให้ช่วยค้นหาคำตอบต่อไปได้แต่จีเนติกอัลกอริธึมค้นหาคำตอบโดยการสุ่มตัวอย่างจากข้อมูลหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้มาโดยไม่มีการดัดแปลงซึ่งเป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบต่อไป และนอกจากนี้จีเนติกอัลกอริธึมยังใช้กระบวนการเฟ้นสุ่มทางสถิติใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบด้วยเช่นกัน

2.6.1 ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (objective function & fitness function)

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของจีเนติกอัลกอริธึมนั้นมีพื้นฐานอยู่บนผลลัพธ์จากการหาคำตอบที่ผ่านมา วิธีการของจีเนติกอัลกอริธึมจะไม่พิจารณาจากขั้นตอนของการแก้สมการ แต่จะพิจารณาโดยตัดสินว่าคำตอบที่ได้รับนั้นดีพอหรือไม่ ดีขึ้นหรือแย่ลง หรือเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function : F) เนื่องจากแต่ละปัญหาสามารถกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆของปัญหานั้นๆได้ โดยสมการที่มีเงื่อนไขของตัวแปรหรือข้อกำหนดที่กล่าวมานั้นเรียกว่า ฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function : f) ซึ่งค่าความเหมาะสมนี้เปรียบเสมือนค่าความสามารถในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซม กล่าวอีกนัยหนึ่ง ฟังก์ชันความเหมาะสมคือฟังก์ชันที่แสดงถึงความใกล้เคียงของผลลัพธ์ที่ต้องการของแต่ละโครโมโซม เป็นตัวบ่งบอกว่าค่าชุดตัวแปรที่อยู่ในโครโมโซมนั้นๆส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการได้ขนาดไหน โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้ฟังก์ชันเป้าหมายที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับการหาคำตอบของจีเนติก อัลกอริธึม เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม

ในปัญหาต่างๆทั่วไป ฟังก์ชันเป้าหมายอาจเป็นการหาค่าสูงสุด-ต่ำสุดหรือไม่ก็ได้ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมายนี้อาจมีค่าเป็นลบได้ในบางกรณี แต่ในแนวคิดของจีเนติก อัลกอริธึม ฟังก์ชันความเหมาะสมซึ่งเป็นตัววัดสถานะของโครโมโซม จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงฟังก์ชันเป้าหมายให้เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม

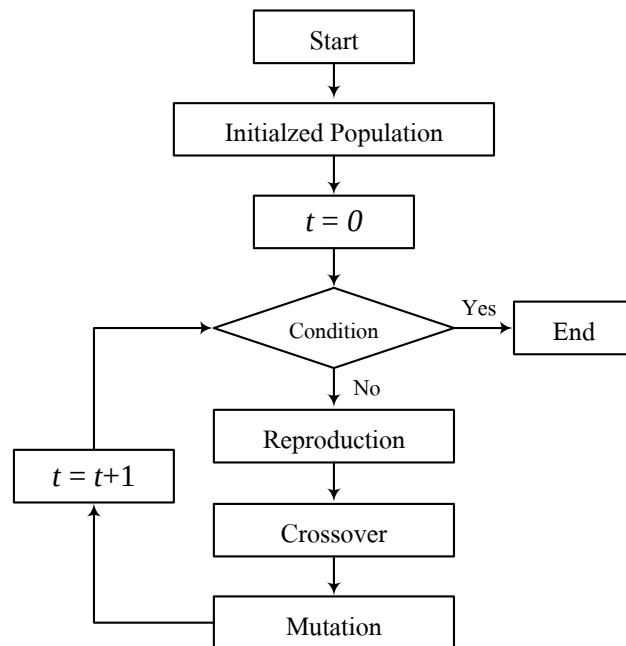
2.6.2 การทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมมีดังนี้คือ

- 1.การสร้างจำนวนโครโมโซมและจำนวนบิต (initialization)
- 2.การหาค่าฟังก์ชัน (cost function)
- 3.การคัดเลือก (reproduction or selection)

4.การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)

5.การกลายพันธุ์ (mutation)



รูปที่ 2.10 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตึก

การทำงานของจินตึกอัลกอริธึมเริ่มต้นจากโครโมโซมจำนวน k โครโมโซมซึ่งในแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยจำนวน n บิต โครโมโซมดังกล่าวเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\text{โครโมโซม } (k) = \{ \text{บิต1}, \text{บิต2}, \dots, \text{บิต } n \} \quad (2.8)$$

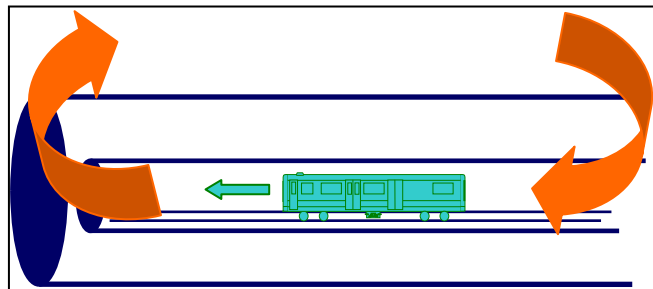
โดยที่ค่า k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนโครโมโซมที่ต้องการ

คำนวณค่าของแต่ละฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ซึ่งค่าฟังก์ชันที่ได้แต่ละโครโมโซมจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าของบิตในแต่ละ โครโมโซมมีค่าแบบสุ่ม (randomly) จากนั้นทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อเรียงลำดับโครโมโซมใหม่โดยการคัดเลือกโครโมโซมจะคัดเลือกค่าฟังก์ชันแต่ละโครโมโซม โดยเรียงลำดับจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าน้อยที่สุด แล้วทำการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด ณ รุ่น (generation) นั้นซึ่งเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าโครโมโซมพ่อ-แม่ (parent) จากโครโมโซมพ่อ-แม่ที่ได้สามารถสร้างโครโมโซมลูก (offspring) ได้โดยการ crossover การสร้างโครโมโซมลูกกระทำด้วยวิธีใดก็ได้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ หลังจากได้โครโมโซมลูกแล้ว ทำการกลายพันธุ์ หรือ mutation กับโครโมโซมลูกดังกล่าวแล้วหาฟังก์ชันใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่การน้อยสุดทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2, 3, 4 และ 5 จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ (ภาคผนวก ก)

2.7 การระบายอากาศในอุโมงค์

การระบายอากาศในอุโมงค์ [13] มีการทำงานที่สัมพันธ์กันอยู่ 3 ส่วนคือ ระบบระบายอากาศในอุโมงค์ (tunnel ventilation system: TVS), ระบบดูดอากาศใต้ชานชาลา (under platform exhaust system: UPE) และ ระบบสายตรวจจับความร้อน (linear heat detection system: LHD)

ระบบระบายอากาศในอุโมงค์มีไว้เพื่อ ระบายอากาศร้อนภายในอุโมงค์ ในสภาวะปกติสภาวะคับคั่งและสภาวะฉุกเฉิน, โดยปกติจะช่วยลดแรงดันที่มาจาก การอัดอากาศจากการวิ่งของรถไฟไฟฟ้า (train piston effect) ออกสู่ปล่องระบายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Train Piston Effect

ระบบระบายอากาศในอุโมงค์ประกอบด้วยอาคารระบายอากาศ(ventilation building) ทั้งสองฝั่งของสถานีรถไฟใต้ดิน หากสถานีมีระยะห่างกันมากกว่า 1 กิโลเมตรจะมีการก่อสร้างอาคารระบายอากาศระหว่างสถานี (intervention shaft: IVS) เพื่อใช้ระบายอากาศในอุโมงค์เพิ่มเติม ในระบบนี้มีพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ดังรูปที่ 2.12 ติดตั้งอยู่ 4 ตัวที่สถานีและ 2 ตัวสำหรับอาคารระบายอากาศระหว่างสถานี



รูปที่ 2.12 พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์

มอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์นี้มีพิกัดดังนี้

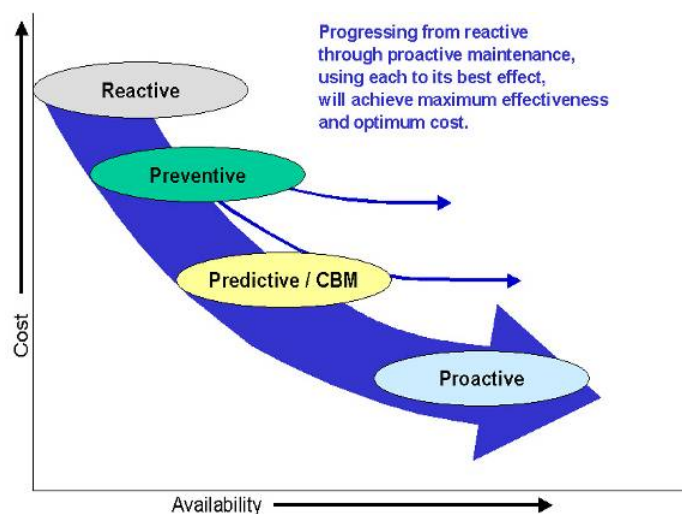
Rating 108 kW,	pf 0.85
380 V,	985 rpm,
50 Hz,	Insulation Class H,
205 A,	Axial Flow

การทำงานของพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์มี 2 ทิศทางคือการจ่ายลมเข้าอุโมงค์ (supply : S) และดูดลมออกจากอุโมงค์ (exhaust : E) ในที่นี้จะใช้อักษรย่อของชื่อพัดลมในสถานีต่างๆ ประกอบกับทิศทางการทำงานเป็นการแสดงการทำงานของพัดลมเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพเช่น สถานีหัวลำโพงมีพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ชื่อว่า F100 หากพัดลมทำงานแบบ supply จะใช้ชื่อย่อว่า F100S และหากทำงานแบบ exhaust จะใช้ชื่อย่อว่า F100E เป็นต้น

สำหรับส่วนประกอบของการระบายอากาศในอุโมงค์ที่เหลือคือระบบดูดอากาศใต้ฐานขาลา และระบบสายตรวจจับความร้อน จะไม่กล่าวถึงในที่นี้เนื่องจากมิได้เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์

2.8 ความรู้พื้นฐานการซ่อมบำรุง

วิวัฒนาการในการบำรุงรักษา (maintenance) [14-15] มีการพัฒนาการอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยเริ่มตั้งแต่การบำรุงรักษาเมื่อเครื่องจักรนั้นเกิดชำรุดขัดข้อง (reactive maintenance) มาเป็นระบบการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (preventive maintenance) และต่อมาเป็นแนวคิดแบบการบำรุงรักษาตามสภาพ (condition based maintenance) จนกระทั่งมาเป็นระบบการบำรุงรักษาเชิงรุก (proactive maintenance) จะเห็นได้ว่าการดำเนินการบำรุงรักษาแต่ละรูปแบบนั้นมีความแตกต่างกันอยู่มากพอควรโดยสามารถอธิบายความหมายของการบำรุงรักษาต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 วิวัฒนาการของระบบการบำรุงรักษา

1. การบำรุงรักษาแบบแก้ไข(reactive maintenance) บางครั้งเรียกว่า maintenanceless, run-to-failure, failure maintenance, panic maintenance เป็นวิธีที่ไม่มีการวางแผนล่วงหน้า และมักทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่สูง พร้อมทั้งเกิดความเสี่ยงสูงด้วย

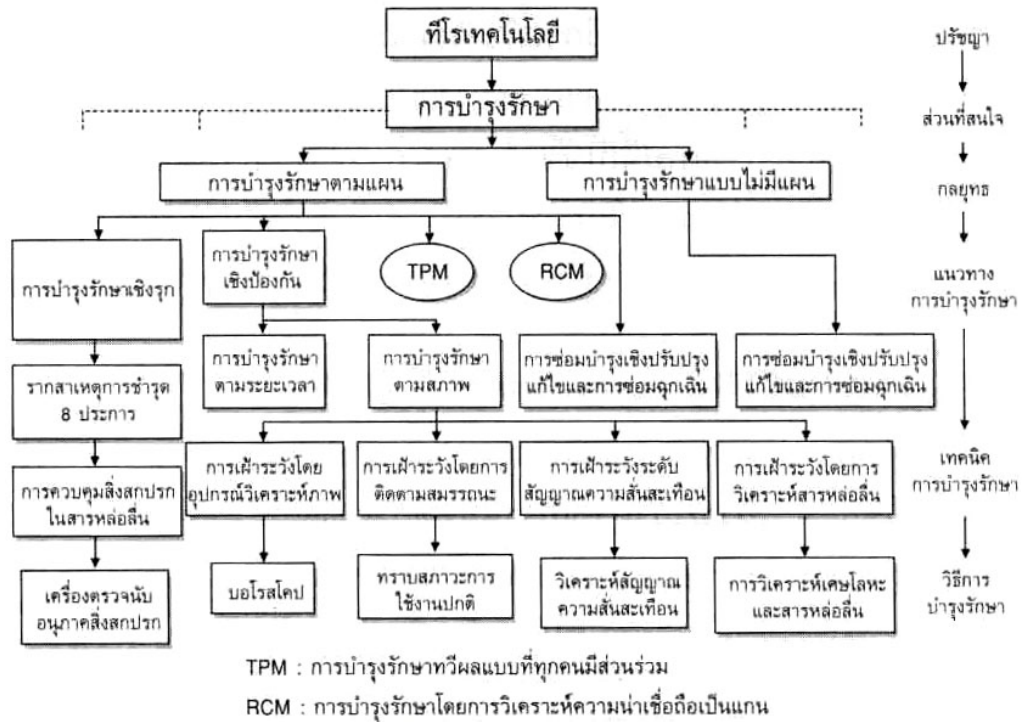
2. การบำรุงรักษาแบบป้องกัน(preventive maintenance) เป็นการบำรุงรักษาที่มีประโยชน์อย่างมากต่อเครื่องจักร โดยมีการบำรุงรักษาในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม การบำรุงรักษาแบบนี้ต้องมีการติดตามดูแล ตรวจสอบสภาพเครื่องจักรมากพอสมควร เพื่อให้มีหลักเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือว่าควรดำเนินการบำรุงรักษาที่จุดใดและเมื่อใดจึงจะเหมาะสมที่สุด มักเรียกการบำรุงรักษาแบบนี้ว่าการบำรุงรักษาตามระยะเวลา (time-based maintenance : TBM)

3. การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ หรือการบำรุงรักษาตามสภาพ(predictive/condition based maintenance) เป็นการคาดคะเน/ทำนาย/พยากรณ์อาการชำรุดในปัจจุบัน โดยการตรวจวัดสภาพเครื่องจักรขณะใช้งานจริง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากมีข้อมูลในการวินิจฉัยสภาพจริงทำให้สามารถลดการขัดข้องของเครื่องจักรได้มากยิ่งขึ้น และยังช่วยลดขั้นตอนการบำรุงรักษาแบบป้องกันได้อีกด้วย เป็นการลดค่าใช้จ่ายลงได้

4. การบำรุงรักษาเชิงรุก(proactive maintenance) เป็นการติดตามสถานะของปัจจัยที่มีผลทำให้เครื่องจักรเกิดการชำรุด การบำรุงรักษาแบบนี้ไม่ใช่การติดตามสัญญาณ/เหตุการณ์ที่เกิดอาการของการชำรุดไปแล้ว แต่เป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรก่อนความเสียหายจะเกิดขึ้น เพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเครื่องจักรและอุปกรณ์ตั้งแต่เริ่มติดตั้งหรือซื้อเครื่องจักร

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าการบำรุงรักษาเชิงรุกรุ่นจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการซ่อมบำรุงต่ำที่สุดและทำให้เครื่องจักรมีความพร้อมใช้งานมากที่สุดด้วย

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการบำรุงรักษาตามสภาพที่มีการตรวจติดตามสมรรถนะเครื่องจักรเพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมต่อไป จากรูปที่ 2.14 แสดงแผนภูมิของทฤษฎีการบำรุงรักษาแผนใหม่ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน จะเห็นได้ว่าการเฝ้าระวังโดยการติดตามสมรรถนะ เป็นเทคนิคการบำรุงรักษาของการบำรุงรักษาตามสภาพ



รูปที่ 2.14 แผนภูมิของทฤษฎีการบำรุงรักษาแผนใหม่

2.9 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการความแม่นยำถูกต้อง ความสะดวก และประหยัด ดังวิธีต่างๆต่อไปนี้

2.9.1 วิธีใช้ค่ากำลังไฟฟ้า (nameplate method)

วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความแม่นยำน้อยในการหาประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะใช้งานจริง เป็นการสมมติว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์คงที่และเท่ากับค่าที่ป้ายพิกัด (ประสิทธิภาพตอนภาระเต็มพิกัด (full load) สามารถใช้งานได้กับสภาพภาระ (load) ส่วนใหญ่) สาเหตุที่มีความคลาดเคลื่อนอาจเนื่องจาก

ก. มอเตอร์ถูกพันใหม่ ทำให้ข้อมูลบนป้ายพิกัดกับความเป็นจริงไม่ตรงกัน

ข. ข้อมูลจากป้ายพิกัดที่ได้มาจากสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน อุณหภูมิต่างกัน

การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด มีหลายมาตรฐานด้วยกัน ที่นิยมมี 3 แบบคือ

1. NEMA (national electrical manufacturers association) ซึ่งใช้ IEEE standard 112-1996 (ภาคผนวก ข) [16]
2. JEC (japanese electrotechnical committee)
3. IEC (international electrotechnical commission)

ตารางที่ 2.1 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 100 แรงม้า ที่หาได้จากมาตรฐานต่างๆ

IEEE 112 Method B	JEC37	IEC34-2
90.0%	93.1%	92.7%
Per H.Jordan and A.Gattozzi, 1979		

สภาพที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ ความเร็วต่ำ, พันมอเตอร์ใหม่, ไม่ลดทอนค่าประสิทธิภาพตามมาตรฐาน EASA, มอเตอร์ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 และทำงานที่แหล่งจ่ายที่ไม่เหมาะสม.

2.9.2 วิธีกรใช้ค่าความเร็ว (slip method ; SM)

เป็นวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยสันนิษฐานว่าค่าเปอร์ยูนิตของภาระทางกลนั้นใกล้เคียงกับเปอร์ยูนิตของอัตราส่วนของสลลิปที่วัดได้กับค่าสลลิปที่ภาระทางกลเต็มพิกัด โดยใช้สมการดังนี้

$$Load(p.u.) = \frac{N_{syn} - N_{r(Measured)}}{(N_{syn} - N_{fl(Nameplate)}) \left(\frac{V_{Nameplated}}{V_{Measured}} \right)^2} \quad (2.9)$$

$$Output \ Power \ P_{out} = P_{rated(Nameplate)} \times Load(p.u.) \quad (2.10)$$

$$Field \ Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in(Measured)}} \quad (2.11)$$

โดย	N_{syn}	หมายถึงความเร็วซิงโครนัส
	$N_{r(Measured)}$	หมายถึงความเร็วโรเตอร์
	$N_{fl(Nameplate)}$	หมายถึงความเร็วเต็มพิกัดแสดงที่ป้ายพิกัด
	$V_{Nameplate}$	หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่ป้ายพิกัด
	$V_{Measured}$	หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้
	P_{out}	หมายถึงกำลังทางกล
	$P_{rated(Nameplate)}$	หมายถึงกำลังทางกลพิกัดแสดงที่ป้ายพิกัด
	$P_{in(Measured)}$	หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่วัดได้

การหาค่ากำลังทางกลและประสิทธิภาพสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.10) และ (2.11) อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังไม่แม่นยำสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานจริงเพราะ

1. วิธีการนี้ไม่ได้ทำการวัดกระแสไฟฟ้าจริงในการพิจารณาค่าการสูญเสียที่ภาวะทดสอบแบบมีภาระ (load test) และไม่มีภาระ (no load test) และความเร็วของมอเตอร์กับภาระนั้นไม่เป็นเชิงเส้นกัน
2. จากการคำนวณโดยใช้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ภาระพิกัดจากข้อมูลของป้ายพิกัดพบว่าเป็นตัวเลขโดยเฉลี่ยจากการทดสอบมอเตอร์ของผู้ผลิต ซึ่งสามารถคลาดเคลื่อนได้ 5 รอบต่อนาที
3. ในการคำนวณวิธีนี้ ไม่ได้คำนึงถึงเรื่องอุณหภูมิและแรงดันที่เปลี่ยนแปลงขณะใช้งานซึ่งมีผลต่อความเร็วขณะภาระที่พิกัด

2.9.3 วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (current method ; CM)

วิธีการนี้เป็นขบวนการในการหาค่ากำลังทางกลของมอเตอร์โดยสันนิษฐานว่าค่าเปอร์ยูนิตของภาระทางกลนั้นใกล้เคียงกับเปอร์ยูนิตของอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับกระแสไฟฟ้าที่พิกัดโดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

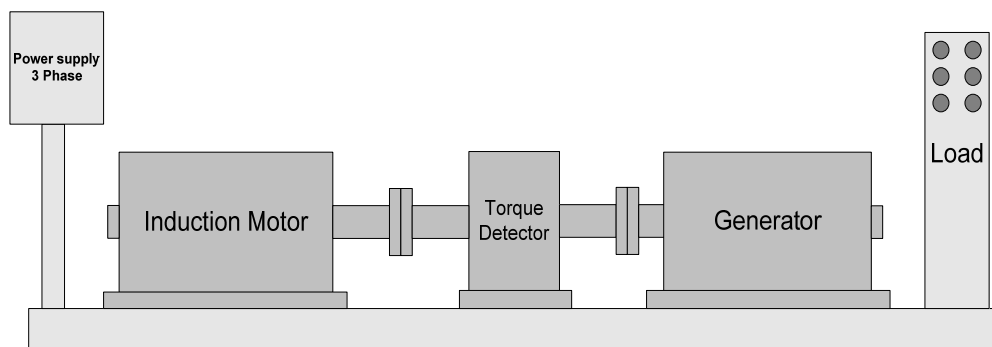
$$Load(p.u.) = \left(\frac{I_{Measured}}{I_{fl(Nameplate)}} \right) \left(\frac{V_{Measured}}{V_{Nameplate}} \right) \quad (2.12)$$

โดย $I_{Measured}$ หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่วัดได้
 $I_{fl(Nameplate)}$ หมายถึงกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดที่ป้ายพิกัด

จากนั้นสามารถหาค่ากำลังทางกลและประสิทธิภาพได้จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) เช่นเดียวกัน การหาประสิทธิภาพโดยวิธี SM และ CM นี้มักจะมีปัญหาในการนำไปใช้งานซึ่งเกิดจากประการแรกประสิทธิภาพที่แสดงที่ป้ายพิกัดของมอเตอร์แต่ละตัวได้มาจากการหาค่าด้วยมาตรฐานที่แตกต่างกัน ลำดับต่อมาป้ายพิกัดอาจถูกเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ปัญหาต่อมามีคือมอเตอร์อาจถูกพันใหม่ จากปัญหาที่พบทั้งหมดนี้มักทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงในการหาประสิทธิภาพด้วยวิธี CM และ SM

2.9.4 การทดสอบแบบมีภาระ (shaft torque method)

เป็นวิธีที่ง่ายและมีความแม่นยำมากที่สุด นั่นคือการวัดโดยตรงที่แกนเพลาสั่งที่เราไม่ต้องนำค่าต่างๆมาลบออกเพื่อที่จะหาค่าประสิทธิภาพ วิธีนี้นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหาประสิทธิภาพด้วยวิธีทดสอบแบบมีภาระ

2.9.5 การหาค่าประสิทธิภาพโดยทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std.112 [16]

2.9.5.1 Method B การแยกค่าการสูญเสียต่างๆออกจากกัน

มีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. วัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (DC resistance)
2. ทดสอบอุณหภูมิภายใต้สภาวะภาระที่พิกัด (rated load temperature test) บันทึกอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ทุกครึ่งชั่วโมง สิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 1 องศาเซลเซียสที่ภาระที่พิกัด ทำการวัดค่าความต้านทานสุดท้ายและอุณหภูมิโดยรอบ
3. ทดสอบภายใต้สภาวะมีภาระ (test under load) โดยใช้ dynamometer เป็นภาระทางกล อุณหภูมิสูงสุดต้องแตกต่างกันไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสจากข้อมูลที่พิกัดของมอเตอร์แบบเดียวกันตลอดการทดสอบ ทำการปรับภาระทางกลตั้งแต่ 25-150 %
4. ทดสอบแบบไม่มีภาระ (no-load test) ทำการเดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิทุกครึ่งชั่วโมง สิ้นสุดเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าแตกต่างกันไม่เกิน 3 % และอุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส
5. ทำการคำนวณโดยใช้แบบฟอร์มมาตรฐานของ IEEE Std.112 (ภาคผนวก ข)

2.9.5.2 Method F วงจรสมมูล

มีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบแบบไม่มีภาระ (no-load test) ทำการเดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิทุกครึ่งชั่วโมง สิ้นสุดเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าแตกต่างไม่เกิน 3 % และอุณหภูมิแตกต่างไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส

2. แบบยัดโรเตอร์ (blocked-rotor test) ถ้าเป็นแบบवालวอเตอร์ ต้องทำการลัดวงจรก่อนแล้วทำการยัดโรเตอร์ ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนได้กระแสพิสัย ยอมให้โรเตอร์หมุนช้ามากๆเพิ่มหาตำแหน่งที่เป็นค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุด และกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ยัดโรเตอร์หยุดอยู่ที่ตำแหน่งค่าเฉลี่ย ทำการพล็อตกราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า หาค่ารีแอคแตนซ์ทั้งหมด (total reactance) และ ความต้านทานโรเตอร์ (rotor resistance) จากกราฟ หาค่าความต้านทานโรเตอร์, รีแอคแตนซ์รวมทั้งหมด ($X_1 + X_2$)

3. ทำการคำนวณโดยใช้แบบฟอร์มมาตรฐานของ IEEE Std.112 (ภาคผนวก ข)