

ข้อเสนอโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

วงจรแปลงผันสำหรับแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้า
ซิงโครนัส

A Power Converter for Energy-Harvesting Floor using Synchronous
Machine Drive System

นายคณัสนันท์ จันทร์ภักดี เลขประจำตัว 6030062521

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

สารบัญ

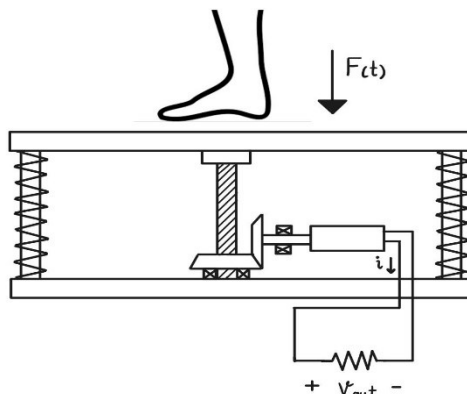
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	3
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ข้อมูลรายละเอียดเบื้องต้นและการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ของแผ่นพื้น เก็บพลังงาน Genpath	3
2.2 การสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink	5
2.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) สำหรับวงจรการกักเก็บพลังงาน	8
2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (Pulse Width Modulation) และวงจรแปลงผันสามเฟส	10
3. ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น	12
3.1 ผลการสร้างแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	12
3.2 ผลการทดลองใช้งานอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดร่วมกับแบบจำลองของระบบรวม	14
3.3 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแรงดันด้วยวงจรแปลงผันสามเฟสจากเทคนิคการปรับความกว้าง พัลส์	16
3.3.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันสามเฟสด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์	17
3.3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันสามเฟสด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ ร่วมกับอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดและแบบจำลองส่วนอื่น ๆ ของระบบ	18
4. สรุปรายละเอียดโครงงาน	20
4.1 ขอบเขตของโครงงาน	20
4.2 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน	20
4.3 แผนการดำเนินการ	20
4.4 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข	21
5. เอกสารอ้างอิง	21
6. ภาคผนวก	22
6.1 ภาคผนวก ก	22

1. บทนำ

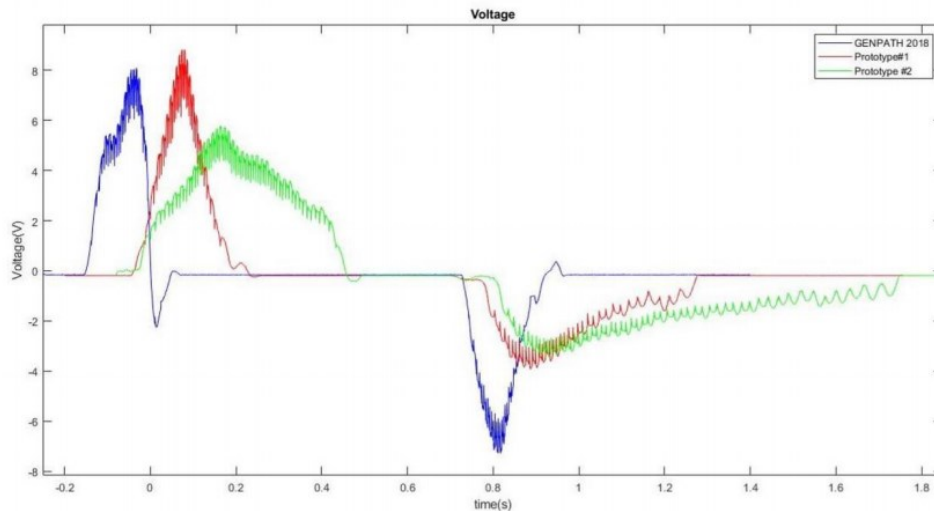
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากนวัตกรรมโดยส่วนใหญ่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน จึงส่งผลให้ในปัจจุบันความต้องการใช้ไฟฟ้าจึงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงค่าใช้จ่ายของผู้ใช้งานที่มากขึ้นเช่นกัน จึงมีแนวคิดในการแปรรูปพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานรูปแบบอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นอย่างเป็นประจำและไม่มีค่าใช้จ่าย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม เป็นต้น จึงส่งผลให้เกิดการพัฒนาโครงงานแผ่นพื้นเก็บพลังงาน Genpath ขึ้น ซึ่งเป็นการอาศัยพลังงานในรูปแบบของพลังงานกลจากแรงเหยียบของมนุษย์ นำมาแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงและมีกลไกการทำงานเบื้องต้นดังรูปที่ 1 แม้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณไม่มาก (ประมาณ 350 มิลลิจูล [1]) แต่เพียงพอสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก รวมถึงเป็นการใช้พลังงานจากแรงกระทำของมนุษย์ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

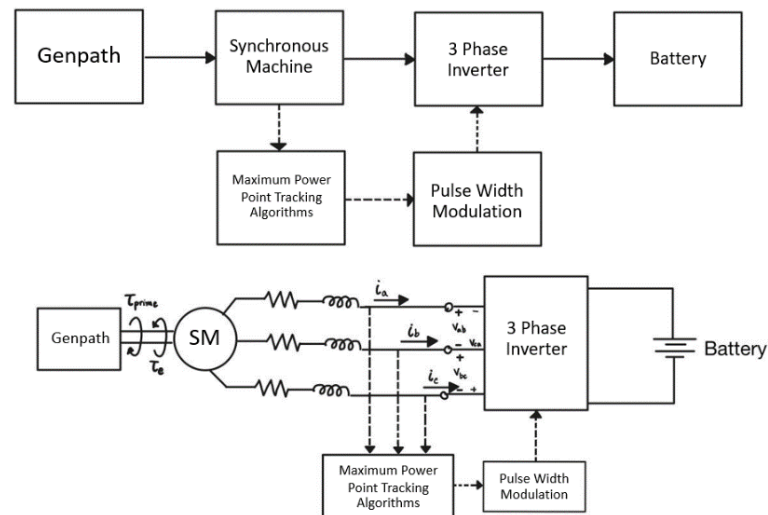
เนื่องจากแรงกดที่ได้จากการเหยียบของมนุษย์มีค่าค่อนข้างน้อย (ประมาณ 500 – 1000 นิวตัน [1]) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก Genpath จึงมีค่าไม่สูงนักดังที่กล่าวไปข้างต้น ส่งผลให้โครงงานในปีการศึกษา 2562 มีการพัฒนาการออกแบบทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของ Genpath ให้สูงขึ้น เช่น การออกแบบวงจรแปลงผันโดยใช้มอสเฟต (MOSFET) แทนสวิตช์กำลังเพื่อลดแรงดันสูญเสียของระบบ [1] แต่อย่างไรก็ตามในโครงงานปีการศึกษา 2562 ไม่ได้มีการพัฒนาในส่วนของการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) ซึ่งจะเข้ามาช่วยลดกำลังสูญเสียซึ่งมีผลมาจากความเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้า อันเนื่องมาจากแรงในการเหยียบที่ไม่คงที่ส่งผลให้แรงดันขาออกมีลักษณะเป็นสัญญาณกระแสสลับดังรูปที่ 2 ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น [1] โครงงานฉบับนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาอัลกอริทึม MPPT เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันในการสร้างแรงดันเพื่อชดเชยผลของขดลวดเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้า รวมถึงในโครงงานฉบับนี้ได้พัฒนานำเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนสมาใช้แทนเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนสมีความเร็วรอบที่ต่ำกว่าเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งส่งผลให้พลังงานสูญเสียทางกลของระบบมีค่าลดลง



รูปที่ 1 กลไกการทำงานโดยรวมของ Genpath [1]



รูปที่ 2 แรงดันขาออกจาก Genpath ซึ่งมีลักษณะคล้ายสัญญาณกระแสสลับ [1]



รูปที่ 3 แผนภาพรวมของโครงการ

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพรวมของโครงการซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ Genpath model, Synchronous machine dynamic model, Maximum Power Point Tracking Algorithm และ Power converter (Pulse Width Modulation และ Inverter control) โดยหลักการทำงานโดยคร่าวของระบบเป็นดังนี้ เริ่มต้นจาก Genpath ส่งผ่านแรงจากการเหยียบของมนุษย์มายังเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนส์เพื่อแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยในระหว่างการทำงานจะมีการตรวจจับกระแสและนำไปประมวลผลโดยใช้หลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด (MPPT) เพื่อนำไปพิจารณาหาค่าแรงดันขาออกที่ทำให้กำลังขาออกมีค่าสูงที่สุด และส่งสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันในการสร้างแรงดันดังกล่าวผ่านหลักการควบคุมโดยการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (Pulse Width Modulation ; PWM) และกักเก็บพลังงานไปยังแบตเตอรี่เป็นลำดับถัดไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จริง
2. เพื่อพัฒนาและสร้างอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเพื่อชดเชยผลของความเหนียวภายในของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้กำลังขาออกมีค่าสูงที่สุด
3. เพื่อออกแบบวิธีการสร้างแรงดันขาออกที่ต้องการด้วยการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันสามเฟสด้วยหลักการควบคุมโดยการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

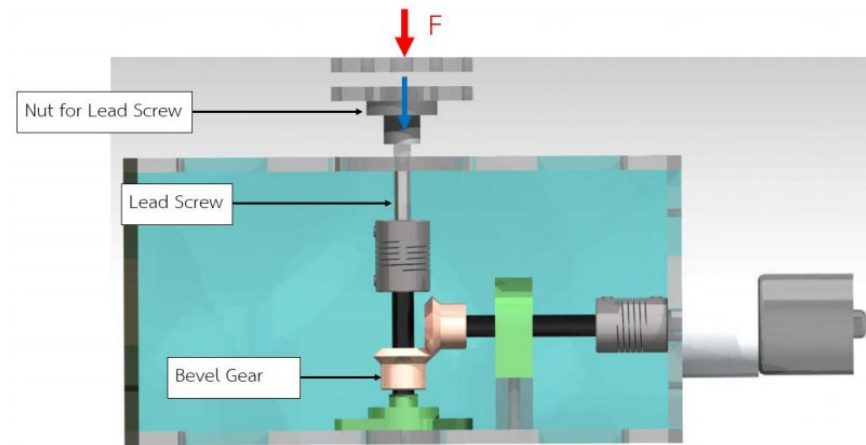
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการฉบับนี้โดยมี 4 หัวข้อ ดังนี้

1. ข้อมูลรายละเอียดเบื้องต้นและการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน Genpath
2. การสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรตารี่ชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
3. หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) สำหรับการกักเก็บพลังงาน
4. หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (Pulse Width Modulation) และวงจรแปลงผันสามเฟส

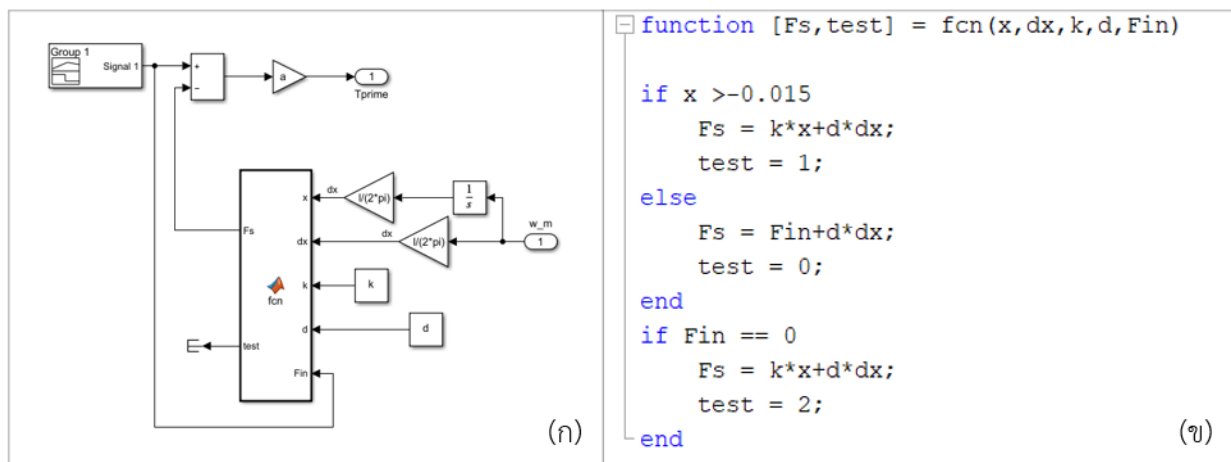
2.1 ข้อมูลรายละเอียดเบื้องต้นและการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน Genpath

หลักการทำงานของ Genpath เริ่มต้นจากรับแรงจากการเหยียบของมนุษย์และส่งผ่านไปยังเกลียวนำ (Lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่จากการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปเป็นการเคลื่อนที่เชิงหมุนในทิศทางของการหมุนรอบแนวแกนตั้ง และไปยังกลไกเพิ่มเติมซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนทิศทางการหมุนเป็นการหมุนรอบแนวแกนนอนเพื่อนำไปขับเครื่องจักรไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูปที่ 4 และภายหลังจากการเหยียบเสร็จสิ้นกลไกสปริงซึ่งอยู่ทั้งสี่มุมของ Genpath จะทำหน้าที่ในการสร้างแรงต้านเพื่อให้แผ่นเหยียบกลับคืนสภาพไปยังตำแหน่งเริ่มต้นก่อนเกิดการเหยียบ [1]

เนื่องจากขอบเขตของโครงการฉบับนี้จะเป็นการมุ่งเน้นไปที่การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นหลัก ดังนั้นในส่วนถัดไปจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของ Genpath โดยทางผู้จัดทำได้รับความกรุณาจากภาควิศวกรรมเครื่องกลในการส่งแบบจำลองของ Genpath มาให้ปรับใช้ ซึ่งมีแผนภาพไอโซแกรมแสดงไว้ในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) และมีค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 4 กลไกทางกลของ Genpath [1]



รูปที่ 5 (ก) รูปแบบจำลองของ Genpath โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) เงื่อนไขของฟังก์ชัน fcn ภายในแบบจำลองของ Genpath

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [1]

ตัวแปร	ปริมาณ
Thrust Bearing Diameter (Dthrust)	8 mm
Lead (l)	1 cm
Mass (m)	2.16 kg
Moment of inertia of bevel gear (1ea) (Jg)	$8.6756 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$
Moment of inertia of lead screw (Jl)	$2.5536 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$
Lead angle	45 degree
Spring Coefficient (k)	40,000 N/m
Damping Coefficient (d)	2,000 Ns/m
Friction Coefficient (μ)	0.21

2.2 การสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

เนื่องจากโครงงานฉบับนี้มุ่งเน้นไปในส่วนของการจำลองผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นหลัก ดังนั้นในส่วนถัดไปจะเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำภายในและฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ามุมของโรเตอร์ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการพิจารณาแบบจำลอง จึงใช้แกนอ้างอิงเป็นการอ้างอิงแบบหมุนซึ่งหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับความเร็วโรเตอร์เพื่อให้ค่าต่าง ๆ ไม่ขึ้นอยู่กับค่ามุมของโรเตอร์ โดยสามารถแปลงภาพระบบไปยังแกนอ้างอิงแบบหมุนได้โดยใช้วงจรสมมูลสองเฟสดีคิว (Two-phase (d-q) equivalent circuit) โดยเริ่มต้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจากสมการที่ 1 [2]

$$\begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_u \\ \Psi_v \\ \Psi_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ

v_{un}, v_{vn}, v_{wn} คือ แรงดันเฟสขาออกของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

i_u, i_v, i_w คือ กระแสของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

Ψ_u, Ψ_v, Ψ_w คือ ฟลักซ์คัลลิ่ง (Flux linkage) ของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

โดยฟลักซ์คัลลิ่งของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเกิดจากปัจจัย 2 ประการ ได้แก่ ฟลักซ์แม่เหล็กอันเนื่องมาจากมีกระแสไหลในขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งประกอบไปด้วยผลจากความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance) และความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual-inductance) และสามารถเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรของเครื่องจักรไฟฟ้าเองร่วมด้วย ดังนั้นจึงสามารถเขียนสเปซเวกเตอร์ของฟลักซ์คัลลิ่งได้ดังสมการที่ 2 [2]

$$\begin{bmatrix} \Psi_u \\ \Psi_v \\ \Psi_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l + L & -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & l + L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L & l + L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \lambda' \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos (\theta - 120^\circ) \\ \cos (\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ

l คือ ความเหนี่ยวนำตัวเอง

L คือ ความเหนี่ยวนำร่วม

λ' คือ ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

θ คือ มุมของโรเตอร์

โดยการแปลงภาพไปยังแกนอ้างอิงหมุนจะประกอบไปด้วยการแปลงภาพสองส่วน ได้แก่ การแปลงภาพจากระบบสามเฟสไปยังระบบสองเฟสด้วยการแปลงภาพของคลาก (Clark's Transformation) และการแปลงภาพจากแกนอ้างอิงนี้เป็นแกนอ้างอิงหมุนด้วยการแปลงภาพของปาร์ค (Park's Transformation)

เมื่อแทนสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 1 และนำไปผ่านการแปลงภาพจากระบบสามเฟสไปยังระบบสองเฟสด้วยการแปลงภาพคลากดังสมการที่ 3 [3] จะได้ผลดังสมการที่ 4 [2]

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + L_s \frac{d}{dt} \vec{i}_s + \omega_e \vec{\lambda} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อกำหนดให้ } \vec{v}_s &= \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \\ \vec{i}_s &= \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \\ \vec{\lambda} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} -\lambda' \sin \theta \\ \lambda' \cos \theta \end{bmatrix} \\ L_s &= \left(l + \frac{3}{2} L \right)\end{aligned}$$

จากนั้นนำสมการที่ 4 ไปผ่านการแปลงภาพจากแกนอ้างอิงนิ่งเป็นแกนอ้างอิงหมุนด้วยการแปลงภาพของปาร์คจะได้ผลดังสมการที่ 5 [2,4]

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e L_s \begin{bmatrix} i_d \\ -i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{PM} \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ $L_s = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}$ และสามารถพิจารณาแรงบิดแม่เหล็ก (Electromagnetic force ; T_e) ได้จากสมการที่ 6 [4]

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (6)$$

โดยที่

v_d และ v_q	คือ แรงดันเฟสที่ขั้วขาออกของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีและคิว
i_d และ i_q	คือ กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีและคิว
L_d และ L_q	คือ สเปซเวกเตอร์ของความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีและคิว
R_s	คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
ψ_{PM}	คือ สเปซเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร
ω_e	คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์
p	คือ จำนวนคู่ขั้วของมอเตอร์

และในส่วนของระบบเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 7 [1]

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{a J_{eq}} (\tau_{prime} - \tau_e) \quad (7)$$

เมื่อ

$\ddot{\theta}$	คือ อนุพันธ์อันดับสองของมุมโรเตอร์
a	คือ ค่าคงตัวเชิงกล (ค่าระบุในตารางที่ 1)
J_{eq}	คือ ค่าความเฉื่อยเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้า (ค่าระบุในตารางที่ 1)
τ_{prime}	คือ แรงบิดจากแผ่นพื้น Genpath
τ_e	คือ แรงบิดแม่เหล็กจากเครื่องจักรไฟฟ้า

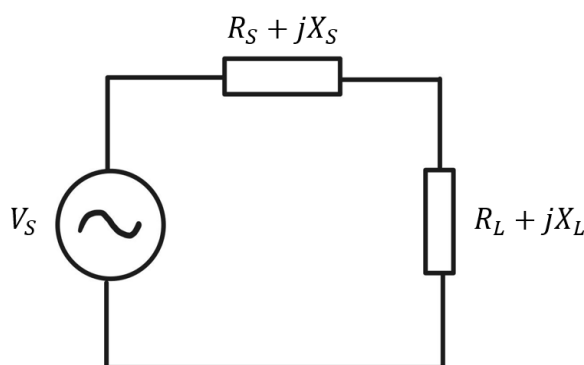
โดยแผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 โดยในการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กับระบบจะใช้ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแสดงดังตารางที่ 2 โดยสามารถอ่านรายละเอียดขั้นตอนและวิธีการตรวจวัดค่าตัวแปรได้ในภาคผนวกที่ ก

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ตัวแปร	ปริมาณ
ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (R_s)	32.23 Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ (L_s)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดี (L_d)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงคว (L_q)	16 mH
ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคู่ขั้ว	6 คู่

2.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) สำหรับวงจรการกักเก็บพลังงาน

วงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันและอิมพีแดนซ์ขาออก โดยจะประกอบไปด้วยค่าความต้านทานสมมูลขาออกและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลขาออก



รูปที่ 6 รูปวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงาน [5]

เมื่อพิจารณากำลังขาออก (P_{out}) โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer ; MPT) ของวงจรสมมูลดังกล่าวเมื่อโหลดเป็นอิมพีแดนซ์ใด ๆ จะได้ดังสมการที่ 8

$$S = \frac{|V_s|^2}{Z^*} \quad (8)$$

$$S = \frac{|V_S|^2}{(R_S + R_L) - j(X_S + X_L)}$$

$$P_{out} = \text{Re}(S) = \frac{|V_S|^2 R_L}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2} \quad (9)$$

เมื่อ S คือ กำลังปรากฏ

จากสมการที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่า P_{out} จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อพจน์ $(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2$ มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอกแตนสามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้จึงพิจารณาให้ $X_L = -X_S$ และพิจารณาสมการที่ 9 ร่วมกับเงื่อนไขข้างต้นจะได้สมการที่ 10

$$P_{out} = \frac{|V_S|^2 R_L}{(R_S + R_L)^2} \quad (10)$$

และจากสมการที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่า P_{out} จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ $\frac{R_L}{(R_S + R_L)^2}$ มีค่าสูงที่สุด ดังนั้นจึงพิจารณาหาค่า R_L ที่ส่งผลให้พจน์ดังกล่าวมีค่าสูงที่สุดด้วยสมการที่ 11

$$\frac{d}{dR_L} \left(\frac{R_L}{(R_S + R_L)^2} \right) = 0 \quad (11)$$

$$R_L = R_S \quad (12)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 12 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่า P_{out} จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ $R_L = R_S$ และ $X_L = -X_S$ หรือสามารถพิจารณาในรูปของแรงดันได้ว่าค่าความต่างศักย์ตกคร่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสังยุคของค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์สมมูลขาออกของวงจร

ในลำดับถัดมาจะเป็นการขยายขอบเขตจากทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดสู่การติดตามจุดทำงานสูงสุดโดยพิจารณาจุดทำงานจากค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรตอร์สถูกพิจารณาบนแกนอ้างอิงหมุน ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงพิจารณาอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดด้วยแกนอ้างอิงหมุนเช่นกัน และเนื่องจากหลักการจากทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดคือ การชดเชยผลของความเหนี่ยวนำภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งได้แก่ค่า L_d และ L_q ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5 จะได้ว่าแรงดันขาออกที่ทำให้เกิดการชดเชยผลของค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวตามหลักของทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดจะเป็นไปดังสมการที่ 13 และ 14

$$v_d = -R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \quad (13)$$

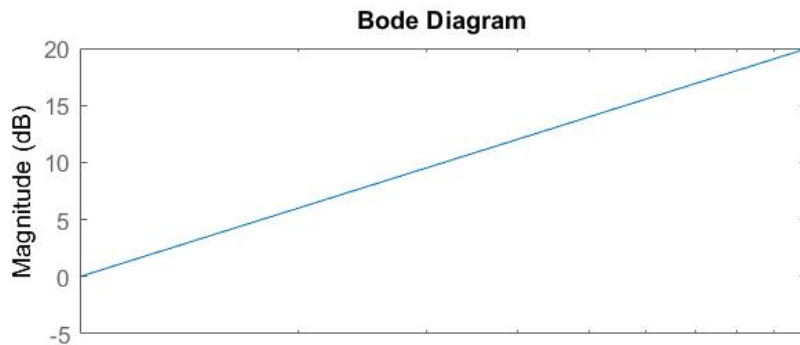
$$v_q = -R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e L_d i_d \quad (14)$$

นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ด้วย อันเนื่องมาจากตัวอนุพันธ์มีกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ดังรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอนุพันธ์จะมีพฤติกรรมเหมือนตัวขยายสัญญาณ ดังนั้นหากมีสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูง ตัวอนุพันธ์อาจทำให้สัญญาณรบกวนดังกล่าวมีขนาดเพิ่มมากขึ้น [5] และ

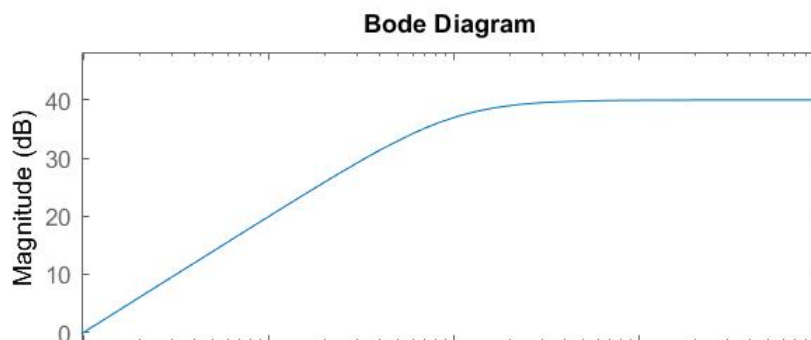
อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการจำกัดขอบเขตช่วงความถี่ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิยานุพันธ์ ซึ่งจะมีฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer function) ดังสมการที่ 15 และจะได้กราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่หนึ่งอัตราขยายจะไม่เพิ่มขึ้น

$$H(s) = \frac{s}{s + \omega_H} \quad (15)$$

โดยที่ ω_H คือ ความถี่ขอบบนที่ต้องการจำกัดอัตราขยายของตัวอนุพันธ์



รูปที่ 7 กราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์



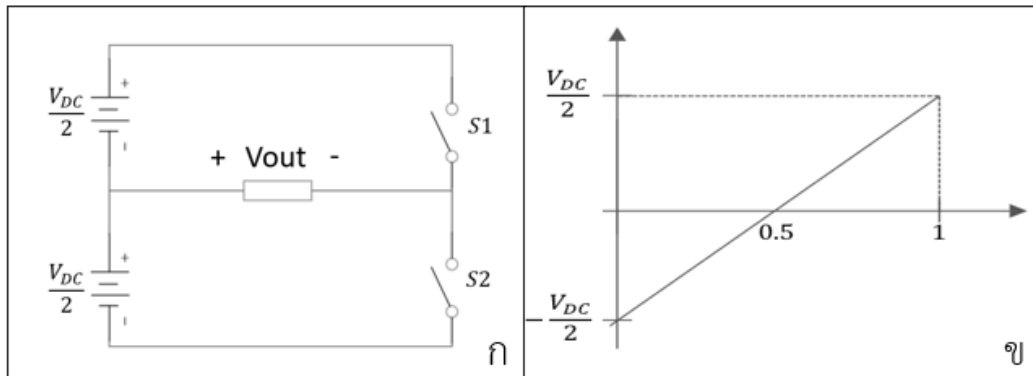
รูปที่ 8 กราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตความถี่โดยตัวปฏิยานุพันธ์

2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (Pulse Width Modulation) และวงจรแปลงผันสามเฟส

เมื่อทราบค่าแรงดันขาออกที่ทำให้ได้พลังงานขาออกสูงที่สุดจากอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดแล้ว ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างแรงดันดังกล่าวโดยควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันด้วยหลักการควบคุมโดยการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (PWM)

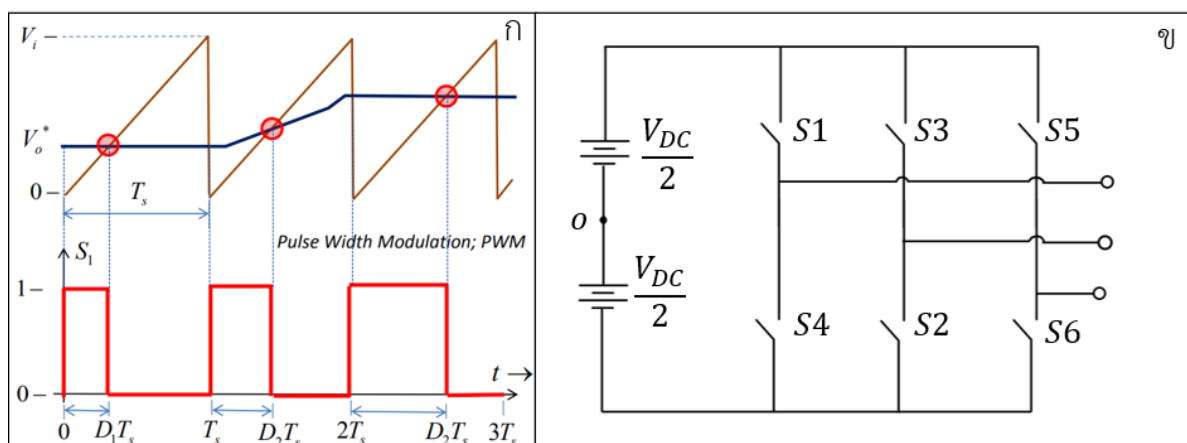
วงจรแปลงผัน (Inverter) คือวงจรที่ใช้สำหรับการสร้างแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันเฟสเดียวก็จะมีรูปดังรูปที่ 9 หลักการทำงานของวงจรมีดังนี้ สวิตช์ S1 และ S2 จะสลับกันทำงานสวิตช์ละครึ่งวัฏจักรงาน โดยเมื่อสวิตช์ S1 ปิดวงจรแรงดันขาออกจะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_{DC}}{2}$ และเมื่อสวิตช์ S2 ปิดวงจรแรงดันขาออกจะมีค่าเท่ากับ $-\frac{V_{DC}}{2}$ ดังรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

แรงดันขาออกที่ได้จากวงจรแปลงผันจะมีลักษณะรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์หรือ PWM เข้ามาทำงานร่วมด้วยเพื่อให้วงจรแปลงผันสามารถสร้างสัญญาณที่มีรูปคลื่นใด ๆ ได้



รูปที่ 9 ก) รูปวงจรแปลงผันเฟสเดียวกึ่งบริดจ์ [6] ข) รูปแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันเฟสเดียวกึ่งบริดจ์ [6]

เทคนิค PWM คือเทคนิคการสร้างสัญญาณที่ต้องการโดยการควบคุมช่วงเวลาในการเปิด-ปิดสวิตช์ของวงจรแปลงผัน โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ดังกล่าวเกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการและสัญญาณพาหะมีความถี่สูง [6] หากพิจารณาวงจรแปลงผันเฟสเดียวกึ่งบริดจ์ดังรูปที่ 9ก เมื่อสัญญาณพาหะมีค่าสูงกว่าสัญญาณอ้างอิง สวิตช์ S1 จะปิดวงจรและสวิตช์ S2 จะเปิดวงจร และเมื่อสัญญาณพาหะมีค่าต่ำกว่าสัญญาณอ้างอิง สวิตช์ S1 จะเปิดวงจรและสวิตช์ S2 จะปิดวงจร ดังนั้นหากสัญญาณอ้างอิงมีค่าไม่คงที่ สวิตช์ S1 และ S2 จะถูกเปิดและปิดในเวลาที่แตกต่างกันออกไปตามค่าของสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการดังรูปที่ 10ก โดยในโครงงานฉบับนี้ได้มีการนำเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าใช้แทนเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งต้องการแรงดันขาออกสามเฟส ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรแปลงผันสามเฟสในการสร้างสัญญาณที่แรงดันต้องการ โดยมีหลักการเช่นเดียวกันกับวงจรข้างต้น เพียงแต่มีสวิตช์ทั้งหมดสามคู่สำหรับสัญญาณอ้างอิงแต่ละเฟสดังรูปที่ 10ข



รูปที่ 10 ก) รูปการณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะ [6]

ข) รูปวงจรแปลงผันสามเฟส [6]

โดยก่อนทำการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะดังที่กล่าวไปข้างต้น จะต้องมีการทำควอนไทเซชัน (Quantization) ของสัญญาณอ้างอิงด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของสัญญาณพาหะ [6] เพื่อให้สัญญาณอ้างอิงมีค่าที่คงที่ในขณะที่ทำการเปรียบเทียบ โดยในส่วนของแผนภาพไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองของวงจรแปลงผันสามเฟสและอัลกอริทึมของเทคนิค PWM จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3

3. ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์จากการดำเนินงานซึ่งแบ่งเป็น 3 หัวข้อดังนี้

3.1 ผลการสร้างแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

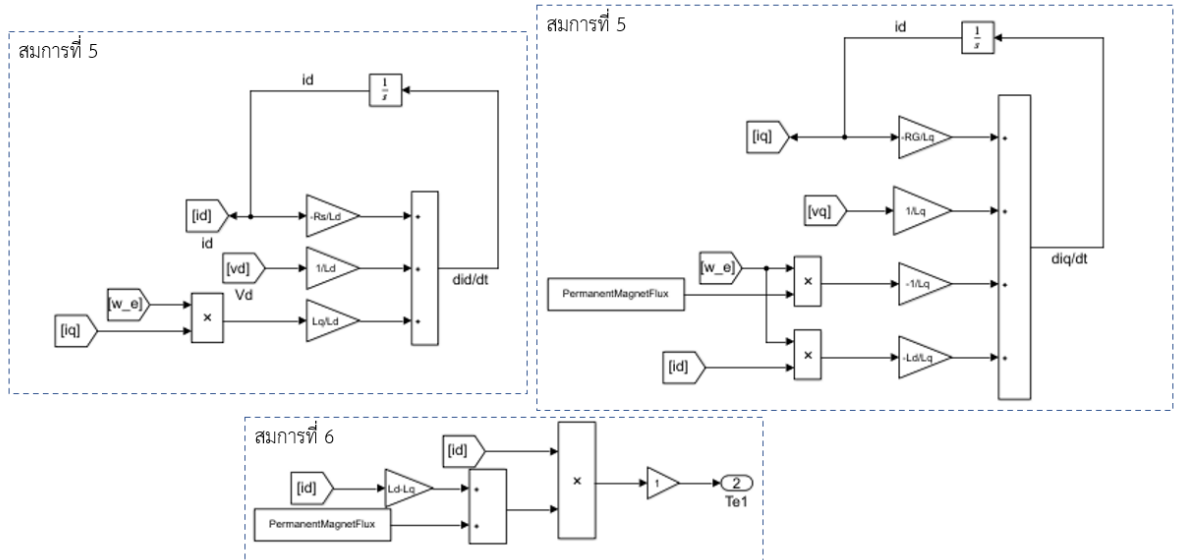
3.2 ผลการทดลองใช้งานอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดร่วมกับแบบจำลองของระบบอื่น ๆ

3.3 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแรงดันด้วยวงจรแปลงผันสามเฟสจากเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์

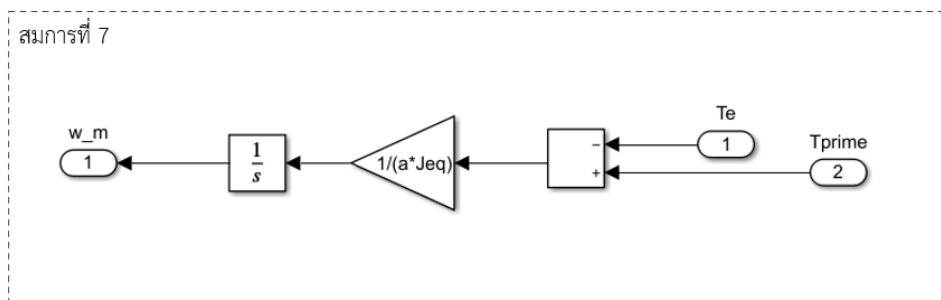
3.1 ผลการสร้างแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

พิจารณาสมการพลวัตของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจากสมการที่ 5 และสมการแรงบิดจากสมการที่ 6 เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองในส่วนของไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะได้แผนภาพไดอะแกรมดังรูปที่ 11 และจากสมการที่ 7 เมื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองในส่วนของเชิงกลจะได้แผนภาพไดอะแกรมดังรูปที่ 12

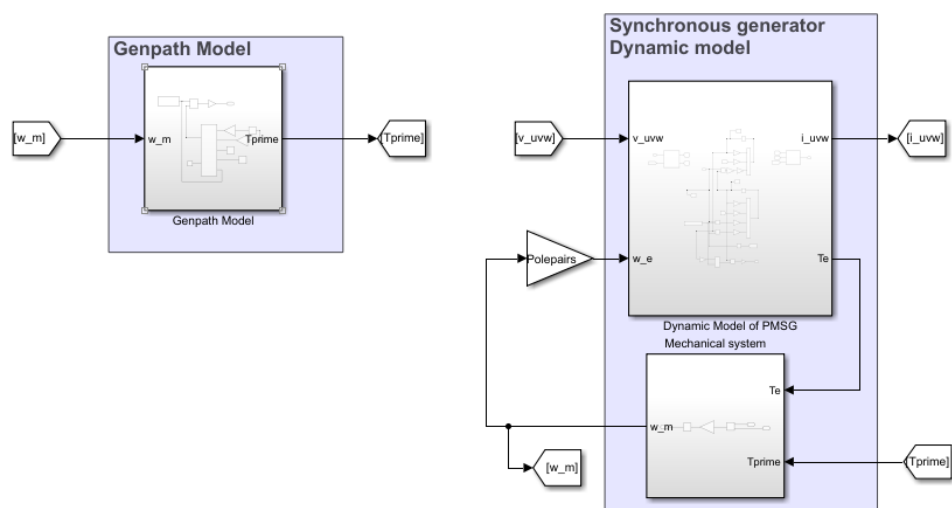
และขั้นตอนต่อมาเป็นการนำแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมาทำงานร่วมกับแบบจำลองทางกลของ Genpath จากหัวข้อ 2.1 ซึ่งมีหลักการดังนี้ เริ่มจาก Genpath จะรับสัญญาณแรงกด และส่งต่อให้กับแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสในรูปของแรงบิด (T_{prime}) จึงทำให้เกิดกระแสในแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) ในทิศทางสวนทางกับ T_{prime} รวมถึงมีการส่งกลับค่าอัตราเร็วเชิงมุมทางกล (ω_m) กลับไปสู่แบบจำลอง Genpath เช่นกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 11 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองพลวัตทางไฟฟ้า
ของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร



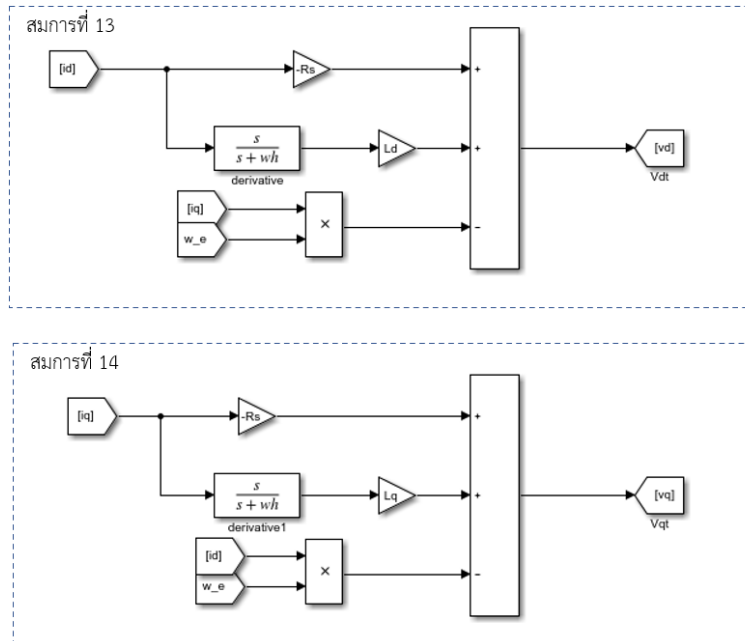
รูปที่ 12 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร



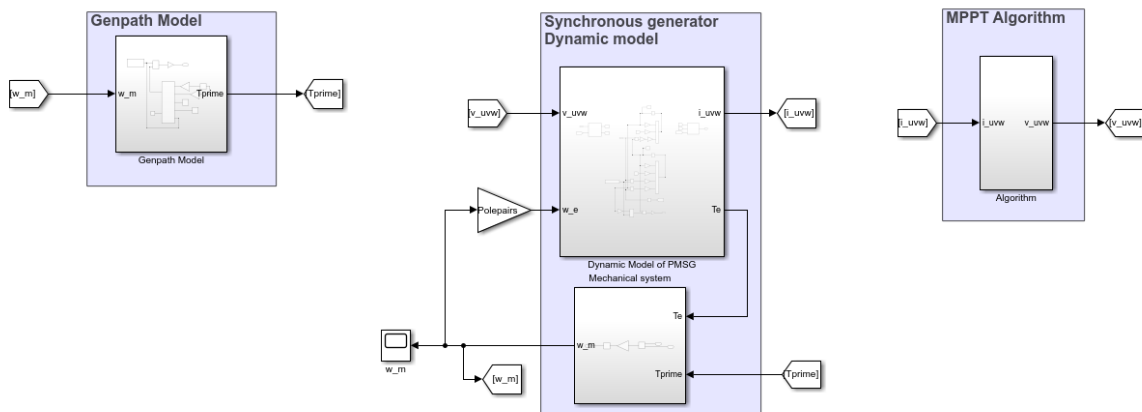
รูปที่ 13 แผนภาพโดยรวมการทำงานร่วมกันของแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส
ชนิดแม่เหล็กถาวรและแบบจำลอง Genpath

3.2 ผลการทดลองใช้งานอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดร่วมกับแบบจำลองของระบบรวม

จากสมการที่ 13 และ 14 จะสามารถนำมาสร้างเป็นอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดได้ดังรูปที่ 14 และเมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับส่วนอื่น ๆ ของระบบจะได้ลักษณะภาพรวมดังรูปที่ 15 โดยหลักการโดยคร่าวคือนำกระแสขาออกของแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสมาพิจารณาผ่านอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด เพื่อคำนวณสัญญาณแรงดันขาออกที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันให้แก่แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะทำให้ได้กำลังงานขาออกสูงที่สุด

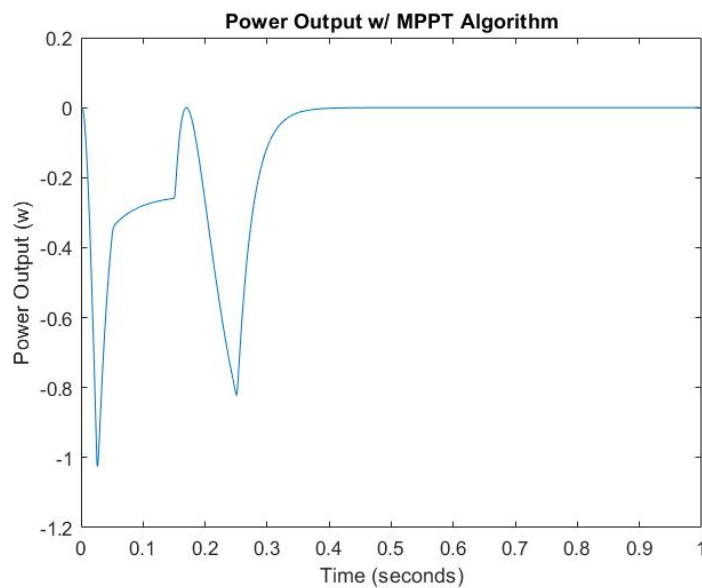


รูปที่ 14 แผนภาพไดอะแกรมของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดบนแกนอ้างอิงหมุน

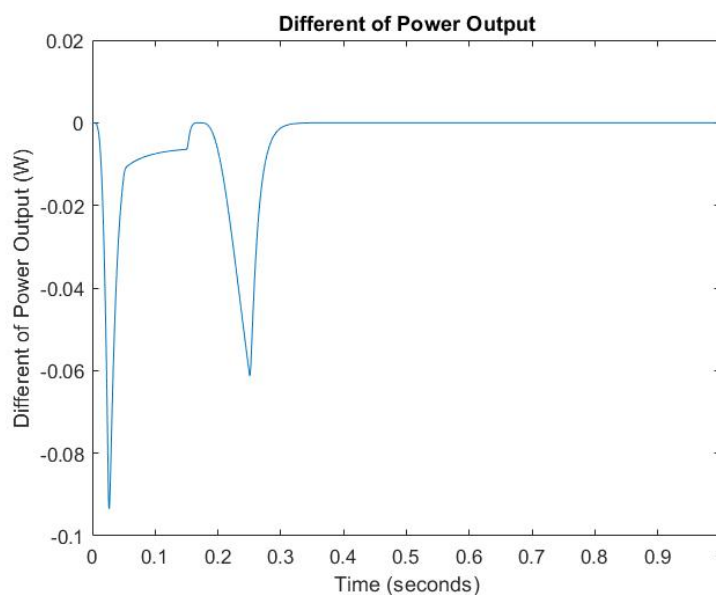


รูปที่ 15 แผนภาพไดอะแกรมการทำงานร่วมกันระหว่างอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดและระบบอื่น ๆ

เมื่อทดลองทำการทดสอบแบบจำลอง จะได้ว่ากำลังขาออกเมื่อมีการใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดมีลักษณะดังรูปที่ 16 (กำลังขาออกมีค่าเป็นลบเนื่องจากนิยามของทิศทางกระแสของแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครน์สมิททิศทางเปรียบเสมือนเครื่องจักรกำลังทำหน้าที่เป็นมอเตอร์) และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังขาออกเมื่อไม่มีการใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด จะได้ผลต่างของกำลังขาออกของทั้งสองกรณีดังรูปที่ 17 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่มีการใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดมีกำลังขาออกที่มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปว่าอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด สามารถทำให้กำลังขาออกมีค่าที่สูงขึ้นได้จริง



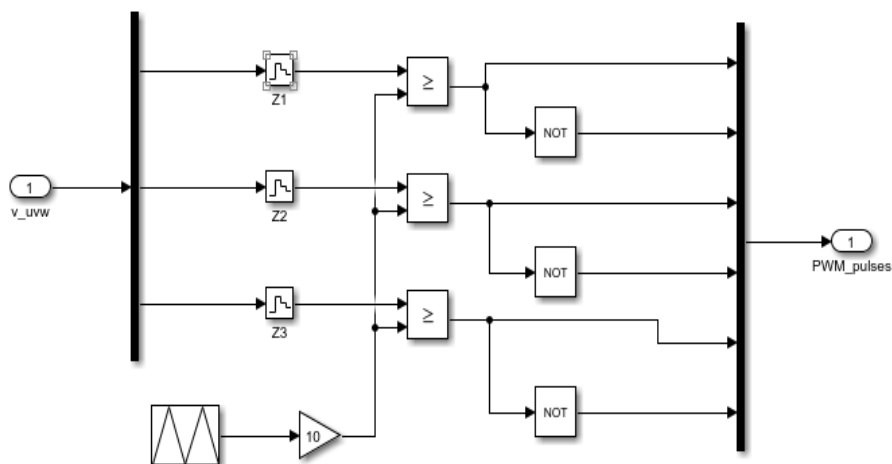
รูปที่ 16 กราฟแสดงกำลังขาออกเมื่อใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด



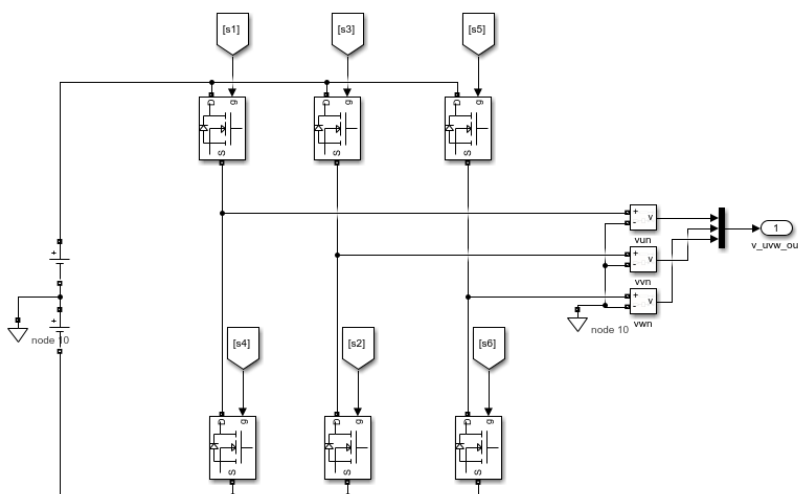
รูปที่ 17 กราฟแสดงผลต่างของกำลังขาออกระหว่างกรณีที่มีการใช้และไม่ใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด

3.3 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแรงดันด้วยวงจรแปลงผันสามเฟสจากเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์

เมื่อพิจารณาหลักการทำงานของวงจรแปลงผันสามเฟสร่วมกับเทคนิคการสร้างสัญญาณโดยการปรับความกว้างพัลส์จากหัวข้อที่ 2.4 จะสามารถนำมาสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ดังรูปที่ 18 และ 19 โดยสัญญาณ PWM_pulses จากรูปที่ 18 จะทำหน้าที่เป็นสัญญาณซึ่งใช้ในการควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันสามเฟสในรูปที่ 19 เพื่อนำมาสร้างสัญญาณแรงดันที่ต้องการ



รูปที่ 18 แผนภาพไดอะแกรมการทำงานของอัลกอริทึมเทคนิคการสร้างสัญญาณโดยการปรับความกว้างพัลส์



รูปที่ 19 แบบจำลองวงจรแปลงผันสามเฟสโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

3.3.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันสามเฟสด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์

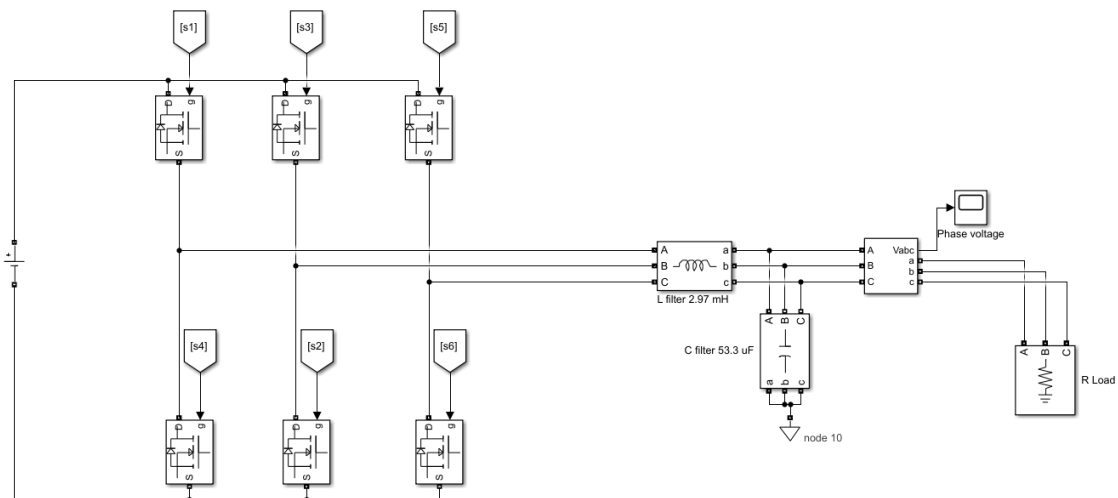
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานของแบบจำลองวงจรแปลงผันสามเฟสและเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ โดยให้ทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงดังสมการ 16, 17 และ 18 เมื่อความถี่ในการคอนโทรลและค่าของคลื่นพาหะและมีค่าเท่ากับ 4050 Hz

$$v_1 = 220\sqrt{2}\sin(2\pi 50t) \quad (16)$$

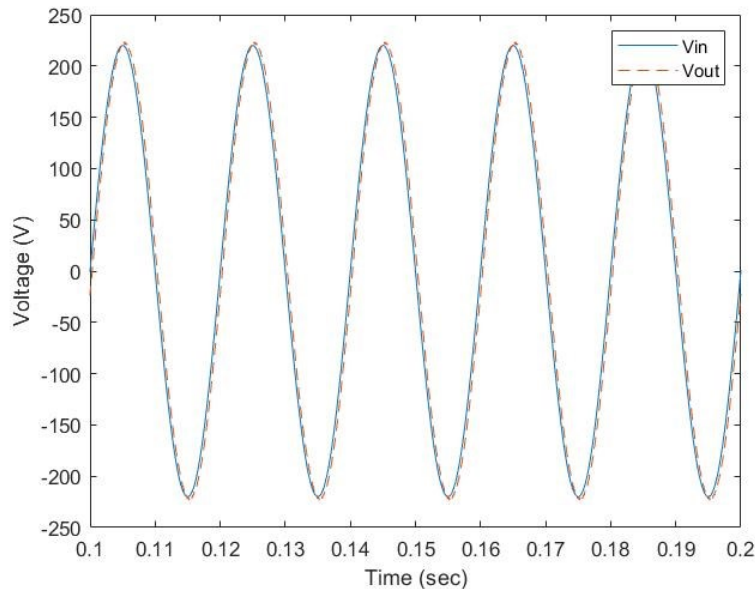
$$v_2 = 220\sqrt{2}\sin(2\pi 50t + \frac{2\pi}{3}) \quad (17)$$

$$v_3 = 220\sqrt{2}\sin(2\pi 50t + \frac{4\pi}{3}) \quad (18)$$

โดยวัดแรงดันเฟสขาออกผ่านวงจรกรองตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (LC filter) ดังรูปที่ 20 และนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ดังรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่าแรงดันขาออกของวงจรแปลงผัน (เส้นปะ) มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (เส้นทึบ) ทั้งในส่วนของขนาดและความถี่ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลองของวงจรแปลงผันสามเฟสและอัลกอริทึมการทำงานของเทคนิค PWM สามารถนำมาสร้างสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการได้



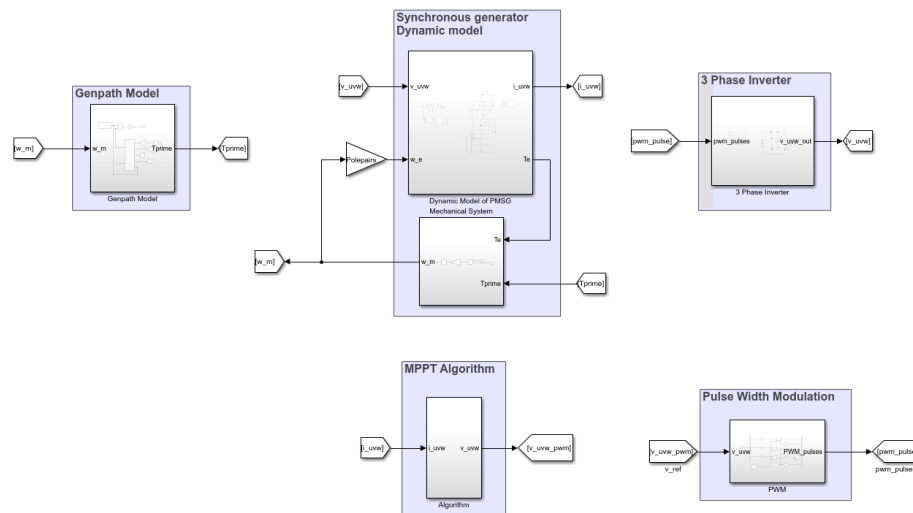
รูปที่ 20 รูปวงจรแปลงผันสามเฟสและวงจร LC filter (L = 2.96 mH, C = 53.3 uF)



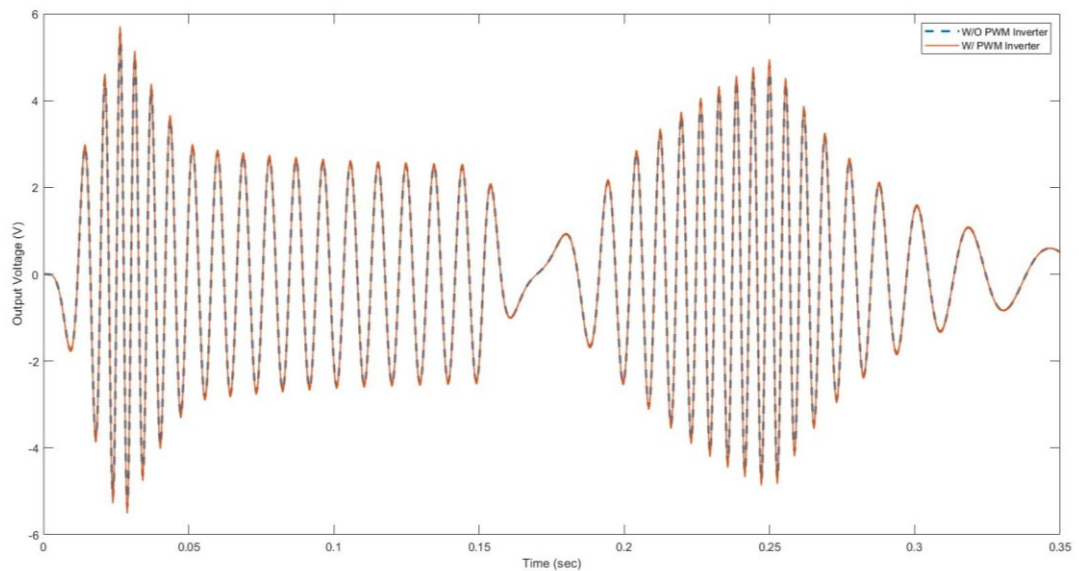
รูปที่ 21 รูปเปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิง (เส้นทึบ) และแรงดันเฟสขาออก (เส้นปะ) ของเฟส u ของวงจรแปลงผันสามเฟสเมื่อใช้เทคนิค PWM

3.3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันสามเฟสด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ร่วมกับอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดและแบบจำลองส่วนอื่น ๆ ของระบบ

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์และวงจรแปลงผันสามเฟสมาสร้างแรงดันทางด้านขั้วขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งได้จากการคำนวณด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด ซึ่งมีหลักการการทำงานดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 2.4 โดยเมื่อนำมาทำงานร่วมกันจะสามารถเขียนเป็นแผนภาพของระบบโดยรวมได้ดังรูปที่ 22 ซึ่งมีหลักการในการทำงานดังนี้ เริ่มจากส่วนอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดจะส่งค่าแรงดันขาออกที่ต้องการสร้างไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้แก่ส่วนอัลกอริทึม PWM ซึ่งจะทำการแปลผลเป็นข้อมูลประเภทยูนิตซึ่งสามารถมีได้ 2 ค่าคือ 0 (สวิตช์เปิดวงจร) และ 1 (สวิตช์ปิดวงจร) และส่งไปยังวงจรแปลงผันสามเฟสเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์และสร้างแรงสัญญาณแรงดันขาออกที่ต้องการกลับมาสู่แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัส



รูปที่ 22 แผนภาพไดอะแกรมภาพรวมของระบบ



รูปที่ 23 การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันขาออกที่ต้องการระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงซึ่งได้จากการคำนวณ (เส้นปะ) และค่าสัญญาณขาออกซึ่งได้จากการสร้างด้วยวงจรแปลงผันสามเฟสและเทคนิค PWM (เส้นทึบ)

จากผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณแรงดันขาออกที่ได้จากการคำนวณและได้จากการสร้างด้วยวงจรแปลงผันสามเฟสและเทคนิค PWM จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกันมากทั้งในส่วนของขนาดและความถี่ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแรงดันขาออกซึ่งได้จากอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดสามารถถูกสร้างได้โดยใช้วงจรแปลงผันสามเฟสร่วมกับเทคนิค PWM

4. สรุปรายละเอียดโครงการ

4.1 ขอบเขตของโครงการ

1. ในช่วงต้นของโครงการนี้จะพิจารณาระบบภายใต้แบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และพัฒนาต่อไปยังอุปกรณ์จริงในลำดับถัดไป
2. แรงเหวี่ยงที่กระทำต่อแผ่นพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 500 – 1000 นิวตัน
3. อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดถูกพิจารณาบนแกนอ้างอิงแบบหมุน

4.2 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

1. กำลังขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นภายใต้หลักการพิจารณาอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด
2. สามารถประยุกต์ใช้ผลจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับอุปกรณ์จริงได้
3. แผ่นพื้นเก็บพลังงานสามารถนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติได้จริง

4.3 แผนการดำเนินการ

ตารางที่ 3 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการ									
2. ศึกษา Genpath Mechanical Model (MATLAB Simulink)									
3. ศึกษา Synchronous machine dynamic model (MATLAB Simulink)									
4. ศึกษาและสร้าง Algorithms ในการจำลองแรงดันเพื่อชดเชยความเหนี่ยวนำภายในของ machine (MATLAB Simulink) และวิเคราะห์ผลการจำลอง									
5. ศึกษา PWM เพื่อควบคุมการทำงานของ inverter ในการสร้างแรงดันจากผลการศึกษาในขั้นตอนที่ 4									
6. ศึกษา Hardware ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาทดสอบใน Hardware ต่อไป									

7. ทดลองประสิทธิภาพของ Genpath และวิเคราะห์ผล									
8. วิเคราะห์และปรับปรุงส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น									
9. เขียนรายงาน									

หมายเหตุ สีเทา คือ ความก้าวหน้าที่วางแผนไว้
สีดำ คือ ความก้าวหน้าปัจจุบัน

4.4 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข

ในส่วนของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดยังถูกพิจารณาบนแกนอ้างอิงแบบหมุน ซึ่งเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติเนื่องจากการต้องมีการตรวจวัดค่ามุมโรเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการแปลงภาพกลับมายังแกนอ้างอิง แต่สามารถทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ดังนั้นจึงมีแนวทางในการแก้ปัญหาโดยการนำส่วนดังกล่าวไปศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต เพื่อให้สามารถพิจารณาอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดบนแกนอ้างอิงนิ่งได้ และไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งเครื่องตรวจวัดมุมโรเตอร์เพิ่มเติม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนุตม์ อยู่เวียงไชย, พัสกร กรีโศก และพิมพ์ศลิษา เชษฐชาติศรี, “แผ่นพื้นเก็บพลังงาน,” ปรินูญานิพนธ์ ปรินูญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [2] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D. "Chapter 4 Modeling and Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor," presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [3] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D. "Chapter 3 Space Vector Representation," presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [4] S. P. Koko, K. Kusakana, and H. J. Vermaak, "Permanent magnet synchronous generator model," in *Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification*. Central University of Technology, [online document], 2015. Available: ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com> [Accessed: Sep 21, 2020].

- [5] K. Tse and H. Chung, "MPPT for Electromagnetic Energy Harvesters Having Nonnegligible Output Reactance Operating Under Slow-Varying Conditions", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 7110-7122, 2020. [Accessed: Sep 25, 2020].
- [6] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D. "Chapter 3 DC-AC Converter (Inverter)," presented to 2102-446, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [7] V. Bobek, "PMSM Electrical Parameters Measurement", *Nxp.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4680.pdf>. [Accessed: Nov 16, 2020].

6. ภาคผนวก

6.1 ภาคผนวก ก.

ในส่วนนี้จะเป็ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของเครื่องจักรไฟฟ้า ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าและรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน, ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์, สเปซเวกเตอร์ของความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีคิวและค่าคงตัวของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

2.2.2.1 ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าและรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

สามารถระบุได้โดยตรวจจ้รูปคลื่นแรงดันขาออกระหว่างขั้วขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าในการหมุนตัวต้นกำลัง 1 รอบและนำมาวิเคราะห์ เนื่องจากบริเวณขั้วของแม่เหล็กถาวรจะเป็นบริเวณที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุด ซึ่งค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในจะมีค่าสูงสุดด้วยเช่นกัน จึงสามารถตรวจสอบขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าได้จากจำนวนยอดลูกคลื่นของรูปคลื่นแรงดันที่ตรวจวัดได้พร้อมกับสามารถระบุรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในได้เช่นกัน ผลการทดสอบได้ว่าแรงดันมีรูปคลื่นเป็นคลื่นรูปไซน์และมีจุดที่แรงดันมีค่าสูงสุดและต่ำที่สุดอยู่ 12 จุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องนี้มีจำนวนคู่ขั้ว 6 คู่และมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นคลื่นรูปไซน์

2.2.2.2 ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

สามารถทำได้โดยวัดค่าความต้านขดลวดสเตเตอร์ระหว่างขั้วขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้า และเนื่องจากเป็นความต้านทานที่วัดได้ระหว่างเฟส ดังนั้นค่าที่ได้จึงมีค่าเป็นสองเท่าของความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

2.2.2.3 สเปซเวกเตอร์ของความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีคิว

เนื่องจากค่า L_d และ L_q ประกอบไปด้วยผลของค่าความเหนี่ยวนำสองส่วนได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วม ดังนั้นเพื่อพิจารณาผลของค่าความเหนี่ยวนำร่วม จึงทำลัดวงจรระหว่างสองเฟสและทำการวัดใช้มิเตอร์วัดค่า (RLC meter) ทำการวัดระหว่างจุดที่ลัดวงจรดังกล่าวกับอีกหนึ่งเฟสที่เหลืออยู่

และเนื่องจากพิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นชนิดโรเตอร์ทรงกระบอก (Non-salient pole) ซึ่งจะมีค่า L_d และ L_q ที่เท่ากัน

2.2.2.4 ค่าคงตัวของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

ผู้จัดทำทำการหาค่าโดยประมาณของค่าคงตัวของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้า จากข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากผู้จัดจำหน่าย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$K = \frac{V_{out,max,peak}}{\sqrt{3}\omega_{e,max}} \quad (19)$$