

วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้านอกของเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ไพโรจน์ ทองประศรี^{1*} และ พิริยะ สาราเอก¹
pairrote@eng.src.ku.ac.th^{1*}, Top_Piriya@hotmail.com¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 31-Oct-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

บทคัดย่อ

พารามิเตอร์สำหรับควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลักแตนซ์ทำงานโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เอสอาร์จี) ประกอบด้วย แรงดันดีซีบัส ความเร็วรอบโรเตอร์ และมุมกระตุ้น เมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบโรเตอร์ คงที่ กำลังไฟฟ้านอกของเอสอาร์จีจะขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้น บทความนี้นำเสนอวิธีการกำหนดมุมกระตุ้นที่เหมาะสมของเอสอาร์จี โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าตามที่กำหนด เมื่อเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับร่วมกับวิธีการฝึกสอน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท อินพุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบโรเตอร์และกำลังไฟฟ้า เอาต์พุตที่ต้องการคือมุมกระตุ้น ชุดข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการทดลอง เพื่อเก็บผลกำลังไฟฟ้านอกและมุมกระตุ้นที่ความเร็วรอบคงที่ระหว่าง 1,000-2,000 รอบต่อนาที เอสอาร์จีที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 48 โวลต์ 2.2 กิโลวัตต์ 6,000 รอบต่อนาที วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ใช้ขั้วเอสอาร์จี ประมวลผลด้วย dSPACE DS1202 โปรแกรมควบคุมถูกออกแบบผ่าน MATLAB/Simulink ร่วมกับโปรแกรม ControlDesk เพื่อควบคุมและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ความเร็วรอบโรเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่ต้องการถูกกำหนดค่าลงไปโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้ทำนายมุมกระตุ้น ผลจากการทดลองกำลังไฟฟ้าที่เอสอาร์จีกำเนิดได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.76% เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ผลการทดลองนี้ยืนยันความถูกต้องของมุมกระตุ้นที่ได้จากการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

คำสำคัญ: เอสอาร์จี มุมกระตุ้น โครงข่ายประสาทเทียม ความเร็วรอบต่ำ กำลังไฟฟ้านอก

Method to Control the Output Power of SRG at Low Speed with Appropriate Excitation Angles using Artificial Neural Network

Pairote Thongprasri^{1*} and Piriya Saraake¹
pairote@eng.src.ku.ac.th^{1*}, Top_Piriya@hotmail.com¹

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 31-Oct-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

Abstract

Parameters of a switched reluctance generator (SRG) consist of DC bus voltage, rotor speed and excitation angles. When the DC bus voltage and rotor speed are constantly controlled, the output power of an SRG depends on the excitation angles. This paper presents a method for determining the appropriate excitation angles of an SRG using artificial neural network to generate the required output power, when the SRG operates at low speed. The artificial neural network used as a back-propagation type in combination with a Levenberg-Marquardt algorithm. The inputs used in the artificial neural network have two variables; rotor speed and output power. The desired output is the excitation angles. The data set for teaching artificial neural network was obtained from an experiment to collect the results of the output power and excitation angles at a constant speed between 1,000-2,000 rpm. Half bridge converter circuit is used to drive the SRG, which is processed by a dSPACE DS1202. The control program is designed through MATLAB/Simulink together with the ControlDesk program to control and display via the computer screen. The rotor speed and required output power were determined into the artificial neural network to predict the excitation angle. The experiment results, the output power generated by the SRG has an average error of 1.76% compared with the required output power. This result confirms the accuracy of the excitation angles processed by artificial neural network.

Keywords: SRG, excitation angles, artificial neural network, low speed and output power

1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลัคแตนซ์ (switched reluctance machine) สามารถควบคุมให้ทำงานได้ 2 โหมด คือโหมดมอเตอร์หรือเอสอาร์เอ็ม (Switched Reluctance Motor : SRM) และโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเอสอาร์จี (Switched Reluctance Generator : SRG) ลักษณะที่เด่นเมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นได้แก่ บริเวณโรเตอร์ไม่มีขดลวดหรือแม่เหล็กถาวร [1] ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถทำงานได้ที่ความเร็วสูงและในที่มีอุณหภูมิสูงได้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลาย เช่น ระบบไฟฟ้าสำรองโดยใช้ฟลายวีลเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน [2] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้กังหันแก๊ส [3] แหล่งพลังงานในรถยนต์ไฟฟ้า [4] ข้อดีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลัคแตนซ์ คือความสัมพันธ์ระหว่างฟลักแม่เหล็กและกระแส ณ ตำแหน่งมุมโรเตอร์ต่างๆ มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และค่าความเหนี่ยวนำไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ [5] ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถใช้วงจรสมมูลวิเคราะห์ทางไฟฟ้าได้ เช่นเดียวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น กำลังไฟฟ้านำออกของเอสอาร์จีขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ซึ่งประกอบด้วย 1) ตำแหน่งของมุมกระตุ้น ประกอบด้วยตำแหน่งของมุมนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 2) ค่าความเร็วรอบโรเตอร์ (ω) และ 3) แรงดันดีซีลิงค์หรือดีซีบัส (V_{dc}) ถ้าควบคุมให้แรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบโรเตอร์คงที่ ค่าของกำลังไฟฟ้านำออกของเอสอาร์จีจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของมุมกระตุ้น การควบคุมลักษณะนี้ได้ถูกนำไปใช้กับระบบกังหันแก๊ส [3] แต่ถ้านำเอสอาร์จีไปประยุกต์ใช้กับกังหันลมแรงดันดีซีบัสคงที่ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้น และความเร็วรอบโรเตอร์ [6] การนำเอสอาร์จีมาประยุกต์ใช้งานที่มีค่าความเร็วรอบเป็นตัวแปร ถ้าความเร็วรอบโรเตอร์ต่ำจะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟสหรือกระแสเฟสของเอสอาร์จีมีค่าสูง ซึ่งจะส่งผลให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหาย จำเป็นต้องมีการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดเฟสไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไป วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 สวิตซ์ต่อเฟสนิยมใช้ควบคุมเอสอาร์จี ข้อดีของวงจรแบบนี้คือสามารถสร้างแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเฟสหรือแรงดันเฟสได้ทั้งค่าบวก ค่าลบ และค่าศูนย์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมรูปร่างของกระแส

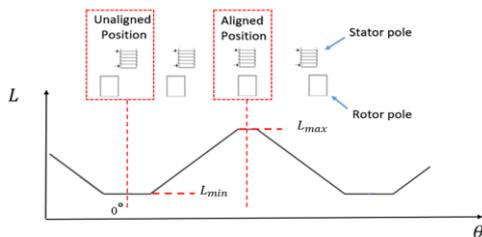
เฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดเฟสสามารถควบคุมได้โดยใช้วิธีควบคุมแรงดันแบบชอปปีง (Voltage Chopping Control : VCC) และวิธีควบคุมกระแสแบบชอปปีง (Current Chopping Control : CCC) วิธีควบคุมกระแสแบบชอปปีง [7] ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอสอาร์จีในช่วงความเร็วต่ำโดยตัวแปรหลักที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการไหลของกระแสคือ มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส ถ้าความเร็วรอบโรเตอร์มีค่าสูงวิธีการควบคุมจะเป็นแบบกระแสพัลส์ ถ้าควบคุมให้รูปร่างของกระแสเฟสแบบ flat-top [8] จะส่งผลให้เอสอาร์จีเกิดประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการปรับมุมกระตุ้นโดยใช้วิธีการทดลองซ้ำๆ เพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้เอสอาร์จีเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในโหมดการควบคุมแบบกระแสพัลส์นำเสนอใน [9]-[10] การนำฟลักซ์ลอจิกมาใช้ในการควบคุมมุมกระตุ้นสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีบรรยายใน [11] วิธีการควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่ แต่ปรับมุมหยุดนำกระแสเพื่อให้ได้รูปร่างกระแสเฟสตามต้องการนำเสนอใน [12] วิธีการหาค่ากำลังไฟฟ้านำออกของเอสอาร์จีโดยใช้แบบจำลองการทำงาน ผลมีความน่าเชื่อถือแต่วิธีการค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อน โดยจำเป็นต้องทราบรูปร่างของกระแสเฟส เพื่อวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด [13] วิธีการควบคุมในสถานะที่เหมาะสมของมุมกระตุ้นซึ่งถูกประมวลผลด้วยตัวควบคุมแบบดิจิทัล เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดการกระเพื่อมของแรงบิดบรรยายใน [14] การประมาณหาค่าตำแหน่งโรเตอร์สำหรับใช้ควบคุมความเร็วรอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับฟลักซ์ลอจิก [15] เพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเอสอาร์จี โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปใช้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ผลที่ได้ระบบควบคุมที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบควบคุมแบบฟลักซ์ลอจิก [16]

เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเอสอาร์จีมีค่าสูง จึงทำให้การวิเคราะห์หามุมกระตุ้นโดยใช้สมการคณิตศาสตร์นั้นทำได้ยาก ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการกำหนดมุมกระตุ้นของเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม สำหรับกำเนิดกำลังไฟฟ้านำออกตามที่กำหนด ชุดข้อมูลที่ใช้สอน โครงข่าย

ประสาทเทียม ประกอบด้วยความเร็วรอบโรเตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก มุมกระตุ้น ซึ่งได้มาจากการทดลอง วิธีการทดลองจะทำการปรับมุมกระตุ้นที่ความเร็วรอบคงที่ระหว่าง 1,000-2,000 รอบต่อนาที แล้วเก็บข้อมูลของค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก สำหรับโครงสร้างของเอสอาร์จีที่ใช้เป็นแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 48 V, 2.2 kW, 6,000 รอบต่อนาที วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ชนิดฮาล์ฟบริดจ์เป็นแบบ 2 สวิตช์ต่อเฟส โดยใช้ตัวประมวลผล dSPACE DS1202 ร่วมกับโปรแกรม ControlDesk สำหรับควบคุมและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

2. วิเคราะห์การทำงานของเอสอาร์จี

ความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของเอสอาร์จีขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อกำหนดค่ากระแสคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 สามารถหาได้จากสมการที่ (1)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำและตำแหน่งโรเตอร์

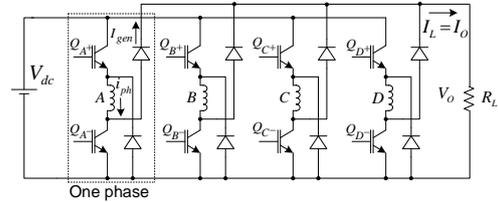
$$L(\theta, i) = \frac{\lambda(\theta, i)}{i} \quad (1)$$

โดยที่ L คือความเหนี่ยวนำ (H)
 θ คือตำแหน่งโรเตอร์ ($^{\circ}$)
 i คือกระแส (A)

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ กำหนดให้ตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น 0° ที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้ว (unaligned position) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำมีค่าต่ำที่สุด เมื่อโรเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ซ้อนทับขั้วสเตเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งตรงขั้ว (aligned position) ที่ตำแหน่งนี้ขั้วโรเตอร์และขั้วสเตเตอร์ตรงกันพอดี และเมื่อขั้วโรเตอร์เริ่มเคลื่อนที่แยกจากขั้วสเตเตอร์จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

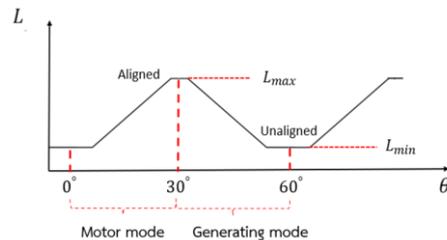
วงจรถูกแปลงที่ใช้งานวิจัยนี้เป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ (half-bridge) การควบคุมแต่ละเฟสจะ

ประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2 ทุกการทำงานงานของเอสอาร์จีประกอบด้วยโหมดกระตุ้นโดยการจ่ายพลังงานภายนอก (V_{dc}) เข้าไปในขดลวดเฟส A, B, C และ D เรียงตามลำดับ และโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

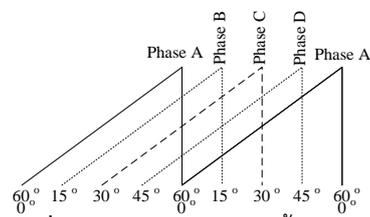


รูปที่ 2 วงจรถูกแปลงชนิดฮาล์ฟบริดจ์

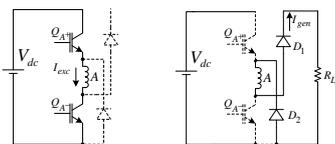
ระยะห่างของตำแหน่งไม่ตรงขั้วที่ติดกันหาได้จาก $360 / N_r$ โดยที่ N_r คือจำนวนขั้วโรเตอร์ ส่วนระยะห่างระหว่างเฟสหาได้จาก $360 / (N_{ph} \times N_r)$ เมื่อ N_{ph} คือจำนวนเฟส ในงานวิจัยนี้โครงสร้างเอสอาร์จีเป็นแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ และ 6 ขั้วโรเตอร์ การควบคุมสวิตช์ของวงจรถูกแปลงจะอยู่ในช่วงความเหนี่ยวนำมีค่าลดลงหรือ $(dL / d\theta) < 0$ โดยมีค่าช่วงมุมโดยประมาณ 30° - 60° ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับขดลวดเฟส A, B, C และ D มีระยะห่างระหว่างเฟส 15° ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ช่วงการทำงานทั้ง 2 โหมด



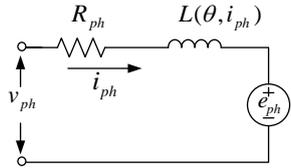
รูปที่ 4 ระยะห่างระหว่างเฟสทั้ง 4 เฟส



(ก) โหมดกระตุ้น (ข) โหมดกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 5 โหมดการทำงานของวงจรถูกแปลง

ตัวอย่างที่ขดลวดเฟส A โหมดกระตุ้นต้องควบคุมให้สวิตช์ A+ และ A- นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ถ้าควบคุมให้สวิตช์ A+ และ A- หยุดนำกระแสพลังงานที่สะสมในขดลวดเฟสจะถูกจ่ายผ่านไดโอด D1 และ D2 ไปยังโหลด โหมดการทำงานนี้เรียกว่าโหมดกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5(ข)



รูปที่ 6 วงจรสมมูลเอสอาร์จี 1 เฟส

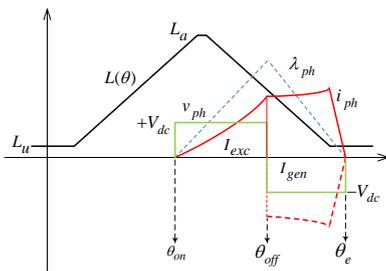
วงจรถสมมูลของเอสอาร์จี 1 เฟส ดังรูปที่ 6 สามารถหาค่าแรงดันเฟสได้จากสมการที่ (2) ประกอบด้วยแรงดันความต้านทานเฟส แรงดันความเหนี่ยวนำเฟส และแรงดันต้านกลับเฟส

$$v_{ph} = R_{ph}i_{ph} + \frac{L(\theta, i_{ph})di_{ph}}{dt} + \frac{dL(\theta, i_{ph})}{d\theta} \cdot i_{ph} \cdot \omega \quad (2)$$

โดยที่ R_{ph} คือความต้านทานเฟส (Ω)
 i_{ph} คือกระแสเฟส (A)
 ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/s)

$e_{ph} = \frac{dL(\theta, i_{ph})}{d\theta} \cdot i_{ph} \cdot \omega$ คือแรงดันต้านกลับเฟส (V)

รูปร่างสัญญาณเฟสของเอสอาร์จีประกอบด้วยกระแส แรงดัน และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ดังแสดงในรูปที่ 7 สามารถหาค่ากระแสในโหมดกระตุ้น โหมดเครื่องกำเนิด เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องอย่างง่าย (เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานขดลวดเฟส เนื่องจากมีค่าน้อยมาก) และกระแส ได้จากสมการที่ (3) ถึง (6) ตามลำดับ [17]



รูปที่ 7 วงจรสมมูลเอสอาร์จี 1 เฟส

$$I_{exc} = \frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_{ph} d\theta \quad (3)$$

$$I_{gen} = \frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{off}}^{\theta_e} i_{ph} d\theta \quad (4)$$

$$\lambda_{ph} = \int_0^t V_{dc} dt = \frac{V_{dc}}{\omega} \begin{cases} \theta - \theta_{on}, & \theta_{on} < \theta \leq \theta_{off} \\ \theta_e - \theta, & \theta_{off} < \theta \leq \theta_e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

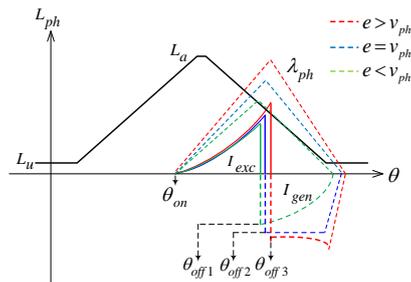
$$i_{ph} = \frac{V_{dc}}{\omega \cdot L(\theta, i)} \begin{cases} \theta - \theta_{on}, & \theta_{on} < \theta \leq \theta_{off} \\ \theta_e - \theta, & \theta_{off} < \theta \leq \theta_e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

โดยที่ V_{dc} คือแรงดันดีซีลิงค์ (V)
 θ_{on} คือมุมนำกระแส ($^\circ$)
 θ_{off} คือมุมหยุดนำกระแส ($^\circ$)
 $\theta_e = 2\theta_{off} - \theta_{on}$ คือมุมที่กระแสเฟสลดลงมีค่าเป็นศูนย์ ($^\circ$)

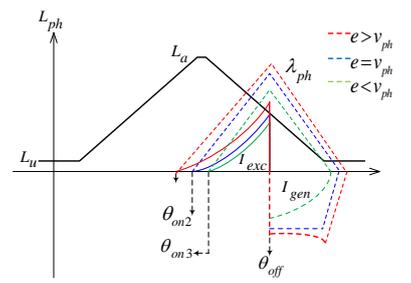
กำลังไฟฟ้าต้านออกของเอสอาร์จีสามารถหาได้จากสมการที่ (7)

$$P_{out} = N_{ph} \cdot I_{gen} \cdot V_o \quad (7)$$

รูปร่างคลื่นกระแสเฟสเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านไฟฟ้าออก สามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณี คือ $e < v_{ph}$, $e = v_{ph}$ และ $e > v_{ph}$ ดังแสดงในรูปที่ 8



(ก) ควบคุมมุมนำกระแสคงที่แต่ปรับมุมหยุดกระแส

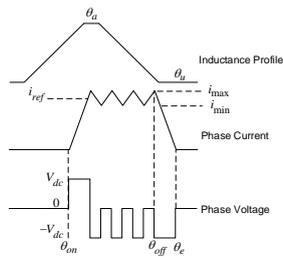


(ข) ปรับมุมนำกระแสแต่ควบคุมมุมหยุดนำกระแสคงที่

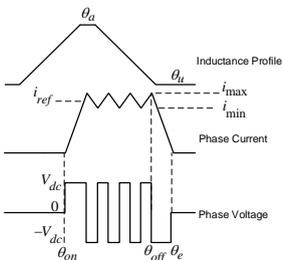
รูปที่ 8 รูปร่างคลื่นกระแสเฟส 3 กรณี

เมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสคงที่ และความเร็วโรเตอร์ให้มีรอบสูงคงที่ การควบคุมวงจรถอนเวอร์เตอร์จะควบคุมแบบกระแสพัลส์ รูปร่างกระแสพัลส์ทั้ง 3 กรณี จะขึ้นอยู่กับมุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส โดยสามารถควบคุมได้ 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่แต่ทำการปรับเปลี่ยนมุมหยุดกระแส และ 2) แบบปรับเปลี่ยนมุมนำกระแสแต่ควบคุมมุมหยุดนำกระแสให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 8(ก) และ 8(ข) ตามลำดับ

พิจารณาจากสมการที่ (6) ถ้าควบคุมแรงดันดีซีบัสคงที่แต่ความเร็วโรเตอร์มีรอบต่ำคงที่ ส่งผลให้กระแสเฟสมีค่าสูง จำเป็นต้องควบคุมกระแสเพื่อไม่ให้วงจรถอนเวอร์เตอร์เสียหาย การป้องกันจะควบคุมแบบ chopping มี 2 แบบคือ soft chopping และ hard chopping ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) ควบคุมแบบ soft chopping



(ข) ควบคุมแบบ hard chopping

รูปที่ 9 รูปคลื่นกระแสแบบ chopping

ตารางที่ 1 วิธีการควบคุมแรงดันเฟสของเอสอาร์จี

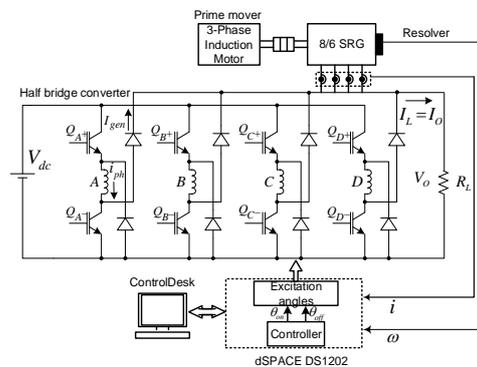
แรงดันเฟส	สถานะการทำงาน			
	Q_A^+	Q_A^-	D_1	D_2
V_{dc}	On	On	Off	Off
0	On	Off	On	Off
0	Off	On	Off	On
$-V_{dc}$	Off	Off	On	On

การควบคุมแบบ chopping กระแสเฟสจะถูกควบคุมที่ค่าอ้างอิง (i_{ref}) อยู่ระหว่างค่าต่ำสุด (i_{min}) และ

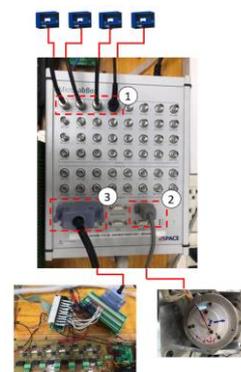
ค่าสูงสุด (i_{max}) ตามการควบคุมแรงดันเฟส ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่ความถี่ในการสวิตช์เดียวกัน ผลการควบคุมแบบ hard chopping กระแสจะมีการกระเพื่อมสูงกว่าและมีเสียงรบกวนสูงกว่าการควบคุมกระแสแบบ soft chopping โดยในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมกระแสแบบ soft chopping

3. ออกแบบระบบควบคุมด้วย dSPACE DS1202

ระบบควบคุมดังรูปที่ 10 ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถปรับความเร็วรอบได้จากอินเวอร์เตอร์ ถูกใช้เป็นตัวต้นขับกำลังให้เอสอาร์จี รีโซลเวอร์ถูกติดตั้งร่วมกับเอสอาร์จีสำหรับหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ ค่ากระแสเฟสทราบจากตัวตรวจวัดกระแส ตัวประมวลผลของระบบใช้ตัวควบคุม dSPACE DS1202 การออกแบบโปรแกรมควบคุมใช้ MATLAB/Simulink หน้าจอควบคุมและแสดงผลสร้างจากโปรแกรม ControlDesk สัญญาณลอจิกที่ประมวลผลจะถูกส่งไปควบคุมสวิตช์ของวงจรถอนเวอร์เตอร์ชนิดฮัลฟบริดจ์



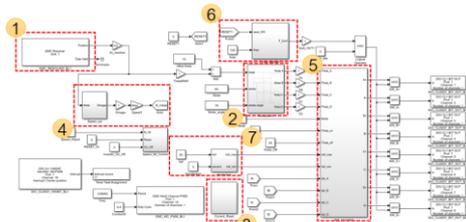
รูปที่ 10 ระบบควบคุม



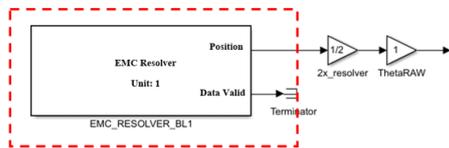
รูปที่ 11 การเชื่อมต่อ dSPACE DS1202

รูปที่ 11 แสดงการต่ออุปกรณ์ร่วมกับ dSPACE DS1202 มีทั้งหมด 3 ส่วน หมายเลข 1 เป็นส่วนที่ใช้ในการแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) ทำหน้าที่แปลงค่ากระแสเฟสที่รับมาจากตัวตรวจวัดกระแสให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำค่ากระแสที่ได้ไปใช้ในการควบคุมและป้องกัน หมายเลข 2 เป็นส่วนเชื่อมต่อกับรีโซลเวอร์ โดยจะรับค่าสัญญาณ sine และ cosine เพื่อแปลงเป็นค่าตำแหน่งโรเตอร์ และหมายเลข 3 เป็นส่วนเอาต์พุตเชื่อมต่อกับสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์

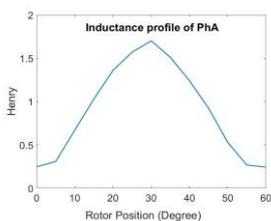
การออกแบบโปรแกรมควบคุมดังแสดงในรูปที่ 12 ออกแบบผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ประกอบไปด้วย หมายเลข 1 ส่วนที่ใช้แสดงการอ่านค่าตำแหน่งโรเตอร์ หมายเลข 2 คือส่วนที่ใช้ในการจำลองเฟสของเอสอาร์จี หมายเลข 3 เป็นส่วนที่ใช้เปลี่ยนค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของตัวตรวจวัดกระแส หมายเลข 4 คือส่วนที่ใช้แสดงความเร็วของเอสอาร์จี หมายเลข 5 แสดงส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ หมายเลข 6 คือส่วนป้องกันกระแสเพื่อไม่ให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหาย และหมายเลข 7 เป็นส่วนที่ใช้ตั้งค่ากระแสอ้างอิงและปรับค่าต่ำสุดและสูงสุด (hysteresis)



รูปที่ 12 โปรแกรมควบคุมด้วย MATLAB/Simulink



(ก) เครื่องมือรับคาร์ดิโซลเวอร์โปรแกรม MATLAB/Simulink

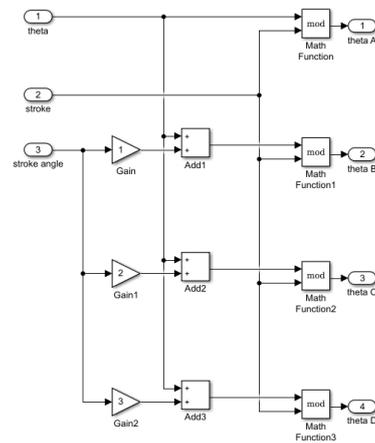


(ข) รูปร่างความเหนี่ยวนำเฟสจากการทดลอง

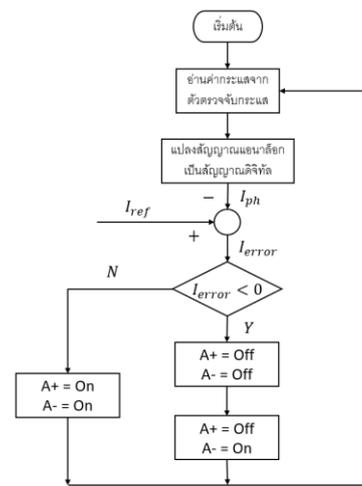
รูปที่ 13 วิธีการอ่านค่าตำแหน่งโรเตอร์

รูปที่ 13 (ก) แสดงเครื่องมือรับคาร์ดิโซลเวอร์ของ MATLAB/Simulink งานวิจัยใช้รีโซลเวอร์แบบ 2X สำหรับการหมุน 1 รอบ หรือ 360 องศาทางกล จะมีค่าเท่ากับ 180 องศาทางไฟฟ้า และในรูปที่ 13 (ข) แสดงรูปร่างเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัด ณ ตำแหน่งโรเตอร์ 0-60° โดยที่ตำแหน่ง 0° จะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุด สำหรับตำแหน่ง 30° จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด

รูปที่ 14 (ก) แสดงวิธีการสร้างตำแหน่งมุมอ้างอิงให้เฟส A, B, C และ D โดยแต่ละเฟสจะมีมุมต่างกัน 15° องศา โดยอินพุต theta รับค่าตำแหน่งของโรเตอร์ได้มาจากรีโซลเวอร์ สำหรับ stroke และ stroke angle กำหนดค่าคงที่ 60 และ 15 ตามลำดับ



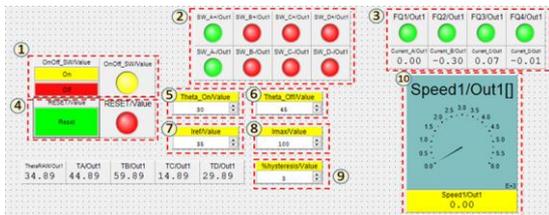
รูปที่ 14 วิธีการสร้างตำแหน่งมุมอ้างอิงทั้ง 4 เฟส



รูปที่ 15 วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์

การสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ มีหลักการทำงานดังแสดงในโฟลวชาร์ตรูปที่ 15 ลำดับแรกจะอ่านค่ากระแสเฟสจากตัวตรวจวัดกระแส ค่าของกระแสจะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล จากนั้นค่าของกระแสเฟสที่อ่านมาได้นั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิง ถ้ากระแสเฟสมีค่ามากกว่ากระแสอ้างอิง จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ dSPACE DS1202 จะสร้างสัญญาณควบคุมให้สวิตช์ A+ และสวิตช์ A- ไม่ทำงาน จากนั้นจะสร้างสัญญาณควบคุมให้สวิตช์ A+ ไม่ทำงานส่วนสวิตช์ A- ทำงาน ในทางตรงข้ามถ้ากระแสเฟสมีค่าน้อยกว่ากระแสอ้างอิง ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่าศูนย์ตัวควบคุม dSPACE DS1202 จะสร้างสัญญาณควบคุมให้สวิตช์ A+ และ A- ทำงานพร้อมกัน

สำหรับการป้องกันกระแสเกิน มีหลักการการทำงานคือกระแสเฟสที่อ่านได้นั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าของกระแสสูงสุดของระบบ หากกระแสเฟสมีค่ามากกว่ากระแสสูงสุดของระบบ ตัวควบคุม dSPACE DS1202 จะสั่งให้สวิตช์ทุกตัวของวงจรคอนเวอร์เตอร์หยุดการทำงานเพื่อป้องกันไม่ให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหาย



รูปที่ 16 หน้าจอควบคุมและแสดงผล

การออกแบบหน้าจอสำหรับควบคุมและแสดงผลใช้โปรแกรม ControlDesk ดังรูปที่ 16 ประกอบด้วย หมายเลข 1 คือส่วนควบคุมปิด-เปิดระบบ หมายเลข 2 คือส่วนที่ใช้แสดงสถานะการทำงานของสวิตช์แต่ละเฟสของวงจรคอนเวอร์เตอร์ หมายเลข 3 แสดงค่ากระแสแต่ละเฟส ถ้ากระแสเฟสมีค่ามากกว่ากระแสสูงสุดของระบบไฟแสดงสถานะจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง ระบบหยุดทำงานและสามารถรีเซ็ตได้ที่หมายเลข 4 สำหรับหมายเลข 5 และ 6 คือช่องสำหรับกำหนดค่ามุนนำกระแสและมุนหยุดนำกระแสตามลำดับ หมายเลข 7 คือช่องสำหรับกำหนดค่ากระแสอ้างอิง หมายเลข 8 จะเป็นช่องสำหรับกำหนดค่ากระแสสูงสุดที่วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงาน

ได้ปลอดภัย หมายเลข 9 จะเป็นช่องสำหรับกำหนดค่าของ hysteresis และหมายเลข 10 แสดงความเร็วของเอสอาร์จี

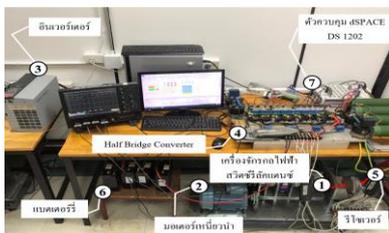
โครงข่ายประสาทเทียมเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งในปัญญาประดิษฐ์ ลักษณะการทำงานจะลอกเลียนแบบเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ โครงข่ายประสาทเทียมแบ่งได้ 5 ประเภท ได้แก่ การคาดเดา การจัดลำดับหมู่ การเชื่อมโยงข้อมูล กระบวนการสร้างความคิด และกลั่นกรองข้อมูล สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งได้ 3 ชนิด คือ 1) ชนิดชั้นเดียว จะมีอินพุตเชื่อมต่อกับเอาต์พุตโดยมีค่าน้ำหนักเป็นตัวปรับระดับสัญญาณอินพุตเพียงชั้นเดียว ใช้กับการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อน 2) ชนิดหลายชั้น จะมีชั้นซ่อน (hidden layer) คั่นอยู่ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต สามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าแบบชั้นเดียว และ 3) ชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ มีขั้นตอนที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น โดยสามารถปรับค่าน้ำหนักชั้นซ่อน โดยใช้วิธีการแพร่ค่าความผิดพลาดจากชั้นเอาต์พุตกลับมายังชั้นซ่อน มี 3 ขั้นตอนคือการป้อนไปข้างหน้า (feedforward) ของรูปแบบอินพุต การคำนวณและส่งค่าผิดพลาดกลับคืน (backpropagation of error) และการปรับค่าน้ำหนักให้เหมาะสม การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งเป็นแบบมีผู้สอนและแบบไม่มีผู้สอน

งานวิจัยนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับร่วมกับวิธีการฝึกสอน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (levenberg marquardt) เพื่อทำการปรับค่าน้ำหนักและค่าไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียม และปรับผลลัพธ์ให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดการสอน ได้แก่ ค่า gradient factor และ learning factor โดยค่าการฝึกสอนจะสิ้นสุดเมื่อค่า gradient factor มีค่าน้อยกว่าศูนย์ สำหรับค่า learning factor เป็นค่าคงที่ใช้เร่งการปรับน้ำหนักค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสให้เข้าหาค่าตอบ การสอนจะสิ้นสุดเมื่อมีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ สำหรับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) อินพุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบ และกำลังไฟฟ้า สำหรับเอาต์พุตที่ต้องการคือ มุมกระตุ่น ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการทดลอง วิธีการทดลองปรับความเร็วรอบให้คงที่

1,000, 1300, 1500, 1,800 และ 2000 รอบต่อนาที แต่ละความเร็วรอบทำการปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยมุมนำกระแสสามารถปรับให้ต่ำกว่า 30° ได้ แต่การปรับตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะต้องมีค่าไม่เกิน $2\theta_{off} - \theta_{on} \leq 60^\circ$ แต่ละการปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้นจะทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้านำออกมาไว้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ถูกนำมาสร้างโครงข่ายประสาทเทียม การทดสอบหาความเที่ยงตรงของโครงข่ายประสาทเทียม ทดสอบโดยกำหนดค่าความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการลงในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ทำนายมุมกระตุ้น หลังจากได้มุมกระตุ้นนำไปทดลองเพื่อดูผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง

4. ผลการทดลอง

ชุดทดลองเอสอาร์จีในรูปที่ 17 ประกอบไปด้วยหมายเลข 1 คือเอสอาร์จี 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 2.2 kW, 48 V, 6,000 รอบต่อนาที หมายเลข 2 อุปกรณ์ต้นขับกำลังที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 2.2 kW โดยความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถปรับความเร็วได้จากอินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 3) หมายเลข 4 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ สวิตช์ที่ใช้คือ IGBT เบอร์ MG100Q2YS42 ขับนำเกตด้วยไอซีเบอร์ ISO5851 และใช้ไดโอดเบอร์ RURG 8060 โหลดเป็นความต้านทานขนาด 1Ω หมายเลข 5 รีโซเวอร์ 2X เป็นอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ หมายเลข 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกที่ใช้เป็นแบตเตอรี่รีชาร์จขนาด 12 โวลต์ต่ออนุกรมกัน 4 ลูก และหมายเลข 7 ตัวควบคุม dSPACE DS1202 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ

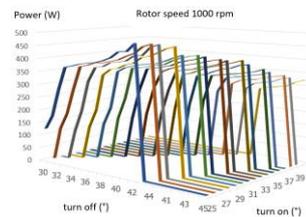


รูปที่ 17 ชุดทดลองเอสอาร์จี

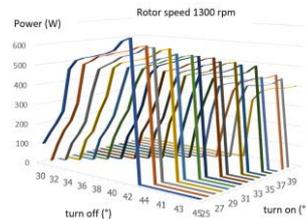
ชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วยความเร็วรอบ ค่ากำลังไฟฟ้านำออกมา มุมกระตุ้น เงื่อนไขสำคัญในเก็บข้อมูลแรงดันเฟสจะต้องมีลักษณะเป็นแบบ soft chopping ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการ

อ้างอิง และความเร็วรอบ ผลจากการทดลองหาค่ากระแสอ้างอิงสูงสุดอยู่ที่ 60 A ความเร็วรอบโรเตอร์อยู่ในช่วง 1,000-2,000 รอบต่อนาที สำหรับการปรับตำแหน่งมุมนำกระแสสามารถปรับให้ต่ำกว่า 30° ได้ แต่การปรับตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะต้องมีค่าไม่เกิน $2\theta_{off} - \theta_{on} \leq 60^\circ$

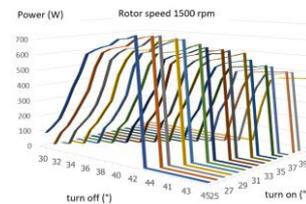
ทดลองการเก็บค่ากำลังไฟฟ้านำออกมา เมื่อปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้น โดยตำแหน่งมุมนำกระแสต่ำสุดและสูงสุดที่อยู่ 25° และ 40° ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่ำสุดและสูงสุดอยู่ 42° และ 50° ตามลำดับ เมื่อควบคุมความเร็วให้คงที่ 1,000, 1300, 1500, 1,800 และ 2000 รอบต่อนาที ผลที่ได้ดังรูปที่ 18-22 ตามลำดับ



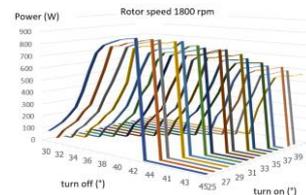
รูปที่ 18 กำลังไฟฟ้านำออกมาเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,000 rpm



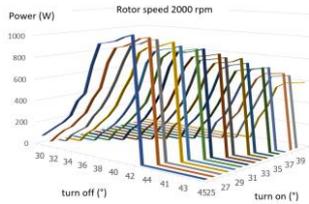
รูปที่ 19 กำลังไฟฟ้านำออกมาเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,300 rpm



รูปที่ 20 กำลังไฟฟ้านำออกมาเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,500 rpm

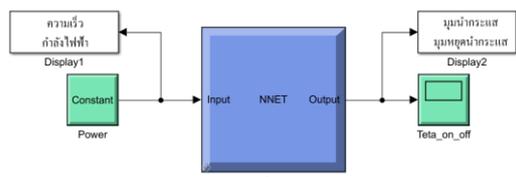


รูปที่ 21 กำลังไฟฟ้านำออกมาเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,800 rpm

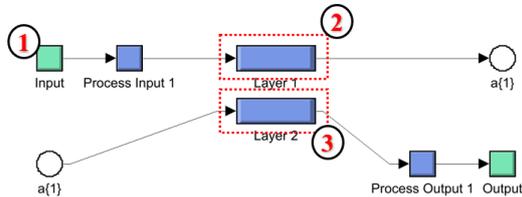


รูปที่ 22 กำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 2,000 rpm

ชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำไปสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network : ANN) โดยใช้ฟังก์ชัน nftool ของ MATLAB/Simulink ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 23 โดยอินพุตมี 2 ตัวแปรคือ ความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้า ส่วนเอาต์พุตคือมุมกระตุ้น



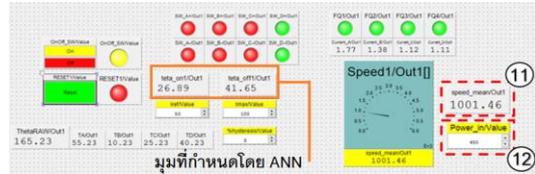
รูปที่ 23 โครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 24 องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นจะประกอบไปด้วย 3 ชั้น คือ 1) ชั้นอินพุต 2) ชั้นซ่อนโดยมีจำนวนนิวรอน 10 ตัว และ 3) ชั้นเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 24 ในส่วนของชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตจะประกอบไปด้วย ค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส โดยฟังก์ชันที่ใช้ในชั้นซ่อนคือไฮเปอร์โบลิก แทนเจน ส่วนชั้นเอาต์พุตจะใช้ฟังก์ชันลิเนียร์

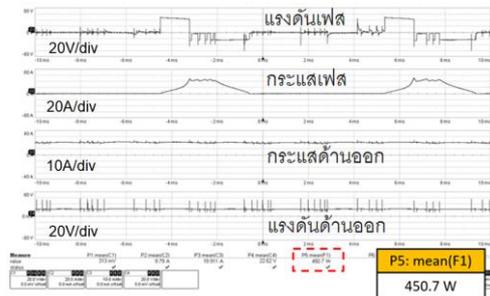
เพื่อป้องกันการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นอินพุตเกินกว่าที่เอสอาร์จีกำหนดได้จริง ในแต่ละความเร็วจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไข โดยถ้ามีการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเกินกว่าที่กำหนดได้จริง ผลมุมกระตุ้นจากโครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 25 กำหนดค่าอินพุตผ่านหน้าจอควบคุม

ทดลองปรับความเร็วรอบให้ได้ 1,000 รอบต่อ นาที กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเป็น 450 W ผ่านหน้าจอควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 25 หมายเลข 11 และ 12 ตามลำดับ ผลที่เกิดขึ้นโครงข่ายประสาทเทียมประมวลผลเอาต์พุตที่ได้คือ มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสอยู่ที่ตำแหน่ง 26.89° และ 41.65° ตามลำดับ

ผลการใช้เครื่องมือวัดดังแสดงในรูปที่ 26 กำลังไฟฟ้าที่เอสอาร์จีกำหนดได้ 450.7 W ใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าอินพุต (450 W) เมื่อพิจารณารูปร่างของแรงดันมีลักษณะ soft chopping ถูกต้อง



รูปที่ 26 รูปคลื่นของเอสอาร์จี

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดลองเอสอาร์จีกำหนดกำลังไฟฟ้าโดยใช้มุมกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งประมวลผลจากโครงข่ายประสาทเทียม เมื่ออินพุตคือกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบโรเตอร์ต่างๆ โดยค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกที่เอสอาร์จีกำหนดได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.76% เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุตที่ต้องการ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการประมวลผลของ ANN

ค่าอินพุตที่กำหนด		ค่า ANN ประมวลผล		การทดลอง
Power (W)	Speed (rpm)	Turn on (°)	Turn off (°)	Power (W)
100	1000	25.03	29.57	96
100	1100	25.44	30.25	103
200	1100	30.62	36.45	202.5
200	1200	31.18	37.36	214.6
300	1200	32.87	39.05	292

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการประมวลผลของ ANN (ต่อ)

ค่าอินพุตที่กำหนด		ค่า ANN ประมวลผล		การทดลอง
Power (W)	Speed (rpm)	Turn on (°)	Turn off (°)	Power (W)
300	1300	31.53	37.85	307
400	1300	37.87	45.46	412
400	1400	36.27	43.5	395
500	1400	34.28	43.07	502
500	1500	37.95	46.5	497
500	1400	34.28	43.07	502
500	1500	37.95	46.5	497
700	1600	29.99	42.66	714
700	1700	32.91	43.53	694
800	1700	26.76	41.74	801
800	1800	28.9	42.43	806
900	1900	26.57	41.58	899
900	2000	28.83	42.1	910

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีควบคุมเอสอาร์จีให้กำเนิดกำลังไฟฟ้านอกตามที่กำหนด เมื่อเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมประมวลผลมุมกระตุ้นที่ถูกต้อง โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับร่วมกับวิธีการฝึกสอน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอธ อินพุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบ และกำลังไฟฟ้า สำหรับเอาต์พุตที่ต้องการคือมุมกระตุ้น ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการทดลอง โดยปรับความเร็วรอบให้คงที่ 1,000, 1300, 1500, 1,800 และ 2000 รอบต่อนาที แต่ละความเร็วรอบทำการปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ผลการทดลองทำให้ทราบความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดแต่ละความเร็วรอบ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ถูกนำมาสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

การทดลองหาความเที่ยงตรงของโครงข่ายประสาทเทียม กำหนดค่าความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการลงไปโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ทำนายมุมกระตุ้น หลังจากได้มุมกระตุ้นนำไปทดลองเพื่อดูผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง ผลจากการทดลองกำลังไฟฟ้าที่เอสอาร์จีกำเนิดได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.76% เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ จะพบว่าวิธีการที่นำเสนอมีความแม่นยำ แต่จำเป็นต้องมีการทดลองเก็บ

ข้อมูลจำนวนมาก เพื่อนำไปสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมระบบคือ dSPACE DS1202 โปรแกรมควบคุมถูกออกแบบผ่าน MATLAB/Simulink ร่วมกับโปรแกรม ControlDesk ทำให้สามารถประมวลผลแบบทันเวลา (real time) ได้ เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมรับอินพุตคือความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ โครงข่ายประสาทเทียมจะประมวลผลได้มุมกระตุ้นที่ถูกต้อง เพื่อส่งไปควบคุมสวิทช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทันที ทำให้เอสอาร์จีกำเนิดไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าอินพุตที่กำหนด

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Li G.J, Zhang K, Zhu Z.Q, Jewell G.W. Comparative studies of torque performance improvement for different doubly salient synchronous reluctance machines by current harmonic injection. IEEE Transactions on Energy Conversion. June 2019;34(2):1094-104.
- [2] Cardenas R, Pena R, Perez M, Clare J, Asher G, Wheeler P. Power smoothing using a flywheel driven by a switched reluctance machine. IEEE Transactions on Industrial Electronics. June 2006;53(4):1086-93.
- [3] Ferreira C.A, Jones S.R, Heglund W.S, Jones W.D. Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application. IEEE Transactions on Industry Applications. June 1995;31(3):553-61.

- [4] Schofield N, Long S. Generator operation of a switched reluctance starter/ generator at extended speeds. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Jan 2009;58(1): 49-56.
- [5] Chen H, Sun C, Wang Q. Analysis of flux-linkage characteristics of switched reluctance linear generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. June 2014;24(3):5000105- 5000105.
- [6] Choi D.A, Byun S.I, Cho Y.H. A study on the maximum power control method of switched reluctance generator for wind Turbine. *IEEE Transactions on Magnetics*. Jan 2014;50(1):4003004-4003004.
- [7] Sikder C, Husain I, Sozer Y. Switched reluctance generator control for optimal power generation with current regulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan 2014;50(1):590-3.
- [8] Yu S, Zhang F, Lee D.H, Ahn J.W. High efficiency operation of a switched reluctance generator over a wide speed range. *Journal of Power Electronics*. Jan 2015;15(1):123-30.
- [9] Zan X, Huo Y, Gu J. Optimization research of turn-on angle and turn-off angle based on switched reluctance starter/generator system. *IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. 2015:864-9.
- [10] Faiz J, Fazai R. Optimal excitation angles of a high speed switched reluctance generator by efficiency maximization. *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2006:287-91.
- [11] Viajante G.P, Chaves E.N, Miranda L.C, Freitas M.A.A.d, Queiroz C.A.d, Santos Josemar A.d, Gomes L.C, Fidelis R.T. Design and implementation of a fuzzy control system applied to a 6 × 4 SRG. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan 2021;57(1):528-36.
- [12] Asadi P, Ehsani M, Fahimi B. Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power. *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2006;1639-44.
- [13] Xiong L, Xu B, Gao H, Xu L. A novel algorithm of switched reluctance generator for maximum power point tracking in wind turbine application. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 2009:1-5.
- [14] Sozer Y, Torrey D.A. Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. March 2004;19(2):355-62.
- [15] Babitha S, Kulkarni V, Koujalagi J.P. Vector control based speed and flux estimation in switched reluctance motor using ANN controller. *4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology*. 2019:10-4.
- [16] Rahmanian E, Akbari H, Sheisi G.H. Maximum Power Point Tracking in Grid Connected Wind Plant by Using Intelligent Controller and Switched Reluctance Generator. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Jul 2017;8(3):1313-20.
- [17] Miller T.J.E. *Electronic Control of switched reluctance machines*. Newnes Publisher. 2001.