



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

แบบจำลองพลวัตระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก Dynamic Model of Heat Control Systems for Small Fuel Ethanol Production Plants

สุชาติ จินสุทธิ์¹ กองพัน อารีรักษ์*¹ กองพล อารีรักษ์¹ อภิชาติ บุญทาวน²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Suchawadi Chinsut¹ Kongpan Areerak*¹ Kongpol Areerak¹ Apichat Boontawan²

¹ School of Electrical Engineering Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

² School of Biotechnology Agricultural Technology Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

วันที่รับบทความ 4 มิถุนายน 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 9 กันยายน 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 2 17 กันยายน 2562; วันที่ตอบรับบทความ 18 ตุลาคม 2562

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยในระบบของเครื่องจะมีขดลวดทำความร้อน ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำหมักในกระบวนการกลั่น จนกระทั่งได้เป็นเอทานอล ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเอทานอล ในบทความนี้จึงนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมพีไอ กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยอาศัยการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB

คำสำคัญ

วงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พีไอ ระบบควบคุมความร้อน

Abstract

This paper presents the mathematical model of heat control systems for small fuel ethanol production plants. The system consists of heating coils to heat the fermented water in the distillation process until achieving an ethanol. This prototype was developed and applied in the production of ethanol. In this paper the mathematical model of heat control systems using AC-DC-AC power conversion circuit with a PI control supplied by one-phase power system is presented. The proposed model is derived by using a generalized state-space averaging approach. The model is validated by the simulation via the SimPowerSystem™ of MATLAB program.

Keywords

AC-DC-AC power conversion circuit with controller; GSSA method; PI; heat control

1. บทนำ

ปัจจุบันสถานะของราคาน้ำมันปิโตรเลียมมีความผันผวนอย่างมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการสำรวจแหล่งน้ำมันดิบยังพบว่าปริมาณที่ลดลงและมีแนวโน้มที่จะหมดไป สำหรับน้ำมันดิบในประเทศไทยนั้น มีแหล่งต่างๆ กระจายอยู่ทั่วประเทศ แต่ในปัจจุบันประเทศไทยยังต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นอัตราส่วนที่สูง เนื่องจากกำลังผลิตในประเทศยังต่ำกว่าปริมาณการใช้อยู่มาก อีกทั้งการขุดเจาะและผลิตน้ำมันปิโตรเลียม ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและใช้เงินทุนสูง ในอนาคตทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันดิบเป็นสิ่งที่ต้องใช้เวลานานในการเกิด อีกทั้งความต้องการในการบริโภคน้ำมันของโลกยังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงได้รับความนิยมและเป็นที่สนใจอย่างมาก ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวทำให้มีแนวคิดที่จะผลิตเชื้อเพลิงที่สามารถใช้น้ำมันผสมเอทานอลได้ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เช่นน้ำมัน E10 E20 และ E85 เป็นต้น ขึ้นมาทดแทนหรือแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากสิ่งที่มีอยู่แปรรูปเป็นเชื้อเพลิงจากงานวิจัย [1,2] พบว่าเอทานอลสามารถผลิตจากวัตถุดิบทางเกษตรได้หลากหลายชนิด เช่นกากน้ำตาลอ้อยและมันสำปะหลัง และจากการทดสอบเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องยนต์ แต่ปัญหาของการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลคือการที่ไม่สามารถผลิตได้ในระดับชุมชนหรือโรงงานขนาดเล็กและขนาดกลางได้ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตด้านเครื่องจักรสูง ในบทความนี้ได้ศึกษาระบบของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบที่ถูกผลิตและพัฒนาขึ้น เพื่อทำการศึกษาและค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเอทานอล พบว่ามีระบบทำความร้อนที่ให้ความร้อนแก่น้ำหมัก ที่เกิดจากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเอทานอลประมาณร้อยละ 10 – 12 โดยน้ำหนัก

ถูกกลั่นลำดับส่วนโดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดประมาณร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก และนำไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ ทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบทำความร้อนเป็นส่วนสำคัญในการกลั่นเอทานอล ถ้าหากมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ หรือมีข้อผิดพลาดของระบบควบคุม อาจส่งผลกระทบต่อกรกลั่นเอทานอลคือ ทำให้กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลดำเนินการได้ช้าลง และส่งผลให้อุณหภูมิการกลายเป็นไอของเอทานอลเมื่อนำไปควบแน่นที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นเอทานอลในประมาณร้อยละที่ต่ำลง [1] ดังนั้นกระบวนการกลั่นเอทานอลโดยให้ความร้อนมีความสำคัญมากที่ทำให้ระบบทำความร้อนมีประสิทธิภาพ ต้องมีตัวควบคุมที่ดีและเหมาะสม

ในบทความนี้จึงนำเสนอการหาแบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก จากบทความ [3] ได้กล่าวเกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีการควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วว่าได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นจะนำวงจรดังกล่าวมาเป็นพื้นฐานสำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมกระแสและแรงดัน [4] โดยแบบจำลองที่กล่าวในบทความนี้จะถูกนำไปเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิพร้อมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและอุณหภูมิต่อไปในอนาคต เช่นเดียวกันในบทความนี้การหาแบบจำลองของระบบดังกล่าวจะทำให้แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดความซับซ้อน จึงนำเสนอแบบจำลองเฉลี่ย (averaging model) ที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ย

ปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging approach, GSSA) [5] ซึ่งเป็นวิธีที่กำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ในระบบ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา (time-invariant model) ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะทำให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ระบบ เพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม ด้วยการใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง จะยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ผ่านโปรแกรม MATLAB

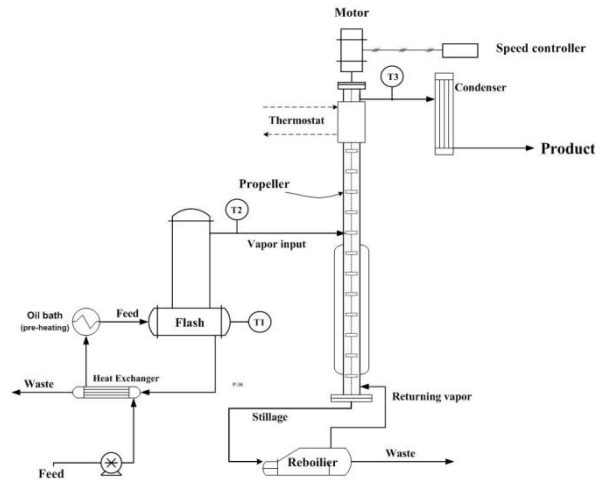
2. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการแปรรูปวัตถุดิบทางการเกษตรให้เป็นเชื้อเพลิงเอทานอล โดยมีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และเหมาะสมที่สุด ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

โดยมีกระบวนการของระบบการกลั่นเอทานอลดังรูปที่ 1 ในบทความนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กให้ระบบการกลั่นเอทานอลมีส่วนทำความร้อน 2 ส่วน นั่นก็คือ Flash 3 kw และ Reboiler 2 kw โดยที่ Flash ติดตั้งไว้สำหรับการสร้างไอน้ำก่อนเข้าสู่คอลัมน์ ภายในคอลัมน์จะมีแกนหลักเป็นใบพัดทำหน้าที่กวนไอน้ำและของเหลว ขณะที่ชุดล่างของใบพัดมีหน้าที่ในการกรองเอทานอลออกจากของเหลว ถ้าหากมีส่วนเกินของของเหลวจะถูกป้อนลงด้านล่างเข้าสู่ Reboiler แล้วทำการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและกลับเข้าสู่คอลัมน์อีกครั้ง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม

การวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม แสดงดังรูปที่ 2 โดยในบทความได้ประยุกต์ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการสร้าง



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการของระบบการกลั่นเอทานอล [2]

แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา เป็นวิธีที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ในส่วนแรกจะพิจารณาเพียงวงจรแปลงผัน AC-DC-AC โดยหลักการของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายจากสัญญาณใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (1)$$

$\langle x \rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (2)$$

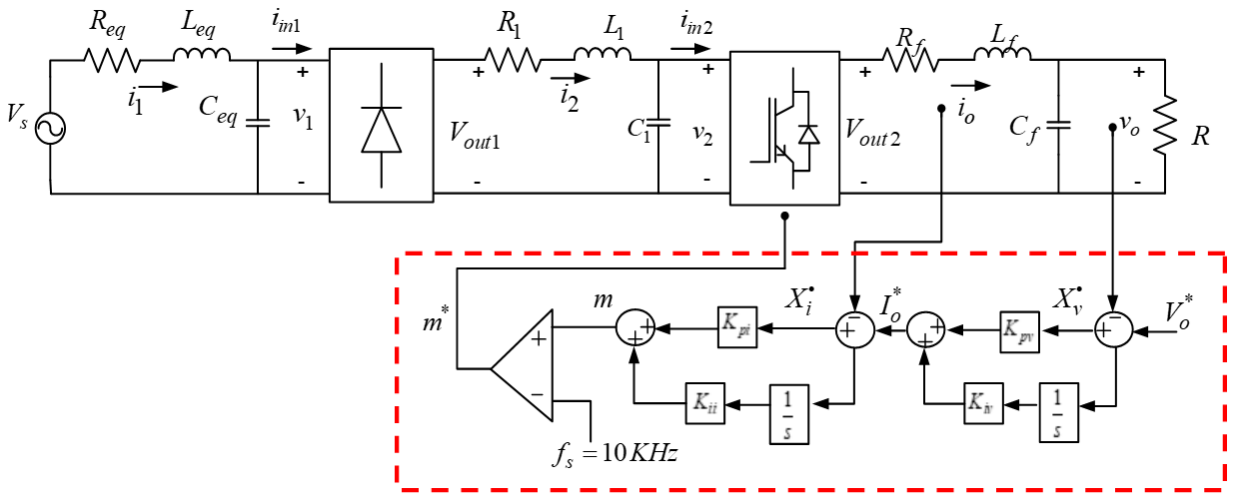
พิจารณาสัญญาณรายคาบของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC และ DC-AC มีลักษณะการทำงานเหมือนกันแสดงดังสมการที่ (3)

$$u_d(t) = u_s(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < \frac{T_s}{2} \\ -1 & \frac{T_s}{2} < t < T_s \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ $u_d(t)$ คือ ฟังก์ชันการทำงานของไดโอด

$u_s(t)$ คือ ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์

T_s คือ คาบฟังก์ชันการสวิตช์



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม

ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC สามารถพิจารณาพร้อมกับแรงดันและกระแส แสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$\text{AC-DC} \quad \begin{cases} V_{out1} = u_d(t) v_1 \\ i_{in1} = u_d(t) i_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{DC-AC} \quad \begin{cases} V_{out2} = \frac{u_s(t) v_2 * m}{\sqrt{2}} \\ i_{in2} = \frac{u_s(t) i_o * m}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_1 + \frac{1}{L_{eq}} V_s \\ \dot{v}_1 = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} (u_d(t) * i_2) \\ \dot{i}_2 = -\frac{R_1}{L_1} i_2 - \frac{1}{L_1} v_2 + \frac{1}{L_1} (u_d(t) * v_1) \\ \dot{v}_2 = \frac{1}{C_1} i_2 - \frac{m}{\sqrt{2} C_1} (u_s(t) * i_o) \\ \dot{i}_o = -\frac{R_f}{L_f} i_o - \frac{1}{L_f} v_o + \frac{m}{\sqrt{2} L_f} (u_s(t) * v_2) \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C_f} i_o - \frac{1}{RC_f} v_o \end{cases} \quad (6)$$

$$k=0, k=1 \quad \begin{cases} \langle i_2 \rangle = x_1 \\ \langle v_2 \rangle = x_2 \\ \langle i_1 \rangle = x_3 + jx_4 \\ \langle v_1 \rangle = x_5 + jx_6 \\ \langle i_o \rangle = x_7 + jx_8 \\ \langle v_o \rangle = x_9 + jx_{10} \end{cases} \quad (7)$$

โดยที่ m คือ ค่าดัชนีมอดูเลตสวิตช์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 พิจารณาหาความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผัน AC-DC-AC โดยพบว่า มีตัวแปรสถานะ (state variables) ของวงจรทั้งหมด 6 ตัว สามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ แสดงดังสมการที่ (6)

การสร้างตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะอาศัยสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน โดยพิจารณาการประมาณอันดับหนึ่ง และอันดับศูนย์ เมื่อไม่พิจารณาปริมาณ DC ทางด้านวงจรไฟฟ้า กระแสสลับและไม่พิจารณาสัญญาณกระแสเพื่อมทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสตรง จะได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมดแสดงดังสมการที่ (7)

จากสมการที่ (6) อาศัยคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน ทำให้ได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมด 10 ตัวแปร โดยการกำจัดผลกระทบของอุปกรณ์สวิตช์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แสดงดังสมการที่ (8)

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ x_1 \\ \cdot \\ x_2 \\ \cdot \\ x_3 \\ \cdot \\ x_4 \\ \cdot \\ x_5 \\ \cdot \\ x_6 \\ \cdot \\ x_7 \\ \cdot \\ x_8 \\ \cdot \\ x_9 \\ \cdot \\ x_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{\pi L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4m}{\sqrt{2\pi}C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{2m}{\sqrt{2\pi}L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{RC_f} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2L_{eq}}Vm \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

จากความสัมพันธ์ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถแทนค่าตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (9)

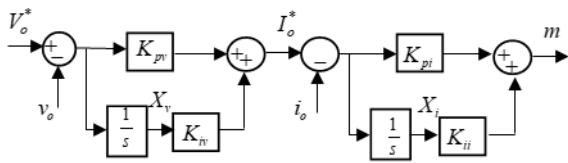
$$\begin{cases} i_2 = x_1 \\ v_2 = x_2 \\ i_1 = 2x_3 \cos \omega t + 2x_4 \sin \omega t \\ v_1 = 2x_5 \cos \omega t + 2x_6 \sin \omega t \\ i_o = 2x_7 \cos \omega t + 2x_8 \sin \omega t \\ v_o = 2x_9 \cos \omega t + 2x_{10} \sin \omega t \end{cases} \quad (9)$$

จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผัน กรณีไม่พิจารณาตัวควบคุม พบว่าการปรับแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้สองทางคือ ทำการปรับค่าแรงดันอินพุตของระบบ (V_s) และทำการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (m^*) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการควบคุมได้ ในบทความนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอเนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนน้อยและ

เหมาะกับการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังที่สำคัญในการปรับปรุงผลการตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม จะทำการเพิ่มชุดตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 2 ในส่วนการควบคุม จะพบว่ามีอินพุตคือ V_o^* ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง และมีเอาต์พุตคือ m^* ซึ่งเป็นค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวควบคุม กำหนดให้ m เป็นสัญญาณควบคุม และจะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (sawtooth compare signal) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพีดีบีเลียม (PWM) โดยที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง m^* และ m แสดงดังสมการที่ (10)

$$m^* = \frac{m}{A_r} \quad (10)$$

โดย A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม พิจารณาหาความสัมพันธ์ในส่วนการควบคุม แสดงในรูปที่ 3 สามารถ



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมพีไอ

วิเคราะห์หาค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่เกิดจากกระบวนการของตัวควบคุม ได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$m = -K_{pi}i_o - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_o^* \quad (11)$$

$$m^* = \frac{1}{A_r} (-K_{pi}i_o - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_o^*) \quad (12)$$

ในส่วนตัวควบคุมพีไอจะประกอบด้วยเป็นพจน์ที่เป็นปริพันธ์ (integral) อยู่ในตัวควบคุม ทั้งตัวควบคุมลูประดันและตัวควบคุมลูประแส ส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม มีตัวแปรสถานะของระบบเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะของลูประดันเป็น X_v และตัวแปรสถานะของลูประแสเป็น X_i แสดงได้ดังความสัมพันธ์สมการที่ (13)

$$\begin{cases} \dot{X}_v = V_o^* - v_o \\ \dot{X}_i = -i_o - K_{pv}v_o + K_{iv}X_v + K_{pi}V_o^* \end{cases} \quad (13)$$

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (12) และ (13) จะสังเกตเห็นว่า มีตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC อยู่ 2 ตัวคือ i_o และ v_o ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณไฟฟ้ากระแส สลับ และพบว่าตัวแปรสถานะอยู่ในรูปเชิงซ้อนเมื่อนำมาพิจารณาหาแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุม ส่งผลให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยค่าเฉลี่ยของ i_o และ v_o จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปสัญญาณเฉลี่ยทั่วไปและรูปคลื่นจริงพบว่าขนาดของสัญญาณมีความสัมพันธ์ แสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$\begin{cases} i_o = 2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} \\ v_o = 2\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} \end{cases} \quad (14)$$

กระบวนการควบคุมเกิดจากการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งแต่เดิมในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีตัวควบคุมเกิดจากการกำหนดค่า m โดยผู้ใช้งาน ดังนั้นจากแบบจำลองของระบบที่ไม่มีตัวควบคุม สามารถเปลี่ยนเป็นแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมโดยแทนค่า m^* ลงในค่า m ของสมการที่ (8) และทำการเพิ่มตัวแปรสถานะ X_v และ X_i จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม แสดงดังสมการที่ (15)

จากสมการที่ (15) จะได้แบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุมกระแสและแรงดัน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา มีตัวควบคุม K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} และ K_{ii} ปรากฏอยู่ในแบบจำลอง

4. การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมด้วยการใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง โดยแบ่งตัวควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต ซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีกระบวนการทำงานร่วมกันแสดงดังรูปที่ 3

4.1 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

เมื่อพิจารณาสมการที่ (6) ในส่วนของสมการแรงดันเอาต์พุตของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ซึ่งแสดงดังสมการที่ (16) ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (16) และจัดรูป จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (17)

$$\dot{v}_o(t) = \frac{1}{C_f} i_o(t) - \frac{1}{RC_f} v_o(t) \quad (16)$$

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_o(s)} = \frac{R}{sRC_f + 1} \quad (17)$$

จากรูปที่ 4 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด และทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารกับพหุนามตัวหารของระบบอันดับสอง จะได้ความสัมพันธ์ของตัวควบคุม ได้ดังสมการที่ (18)

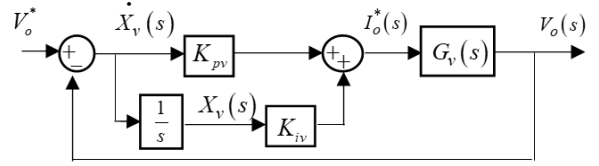
$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{2\zeta_v \omega_{n,v} RC_f - 1}{R} \\ K_{iv} = \omega_{n,v}^2 C_f \end{cases} \quad (18)$$

4.2 การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

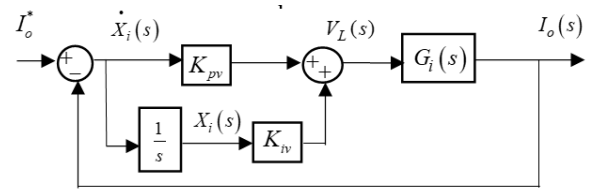
เมื่อพิจารณาสมการที่ (6) ในส่วนของสมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต แสดงดังสมการที่ (19) ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (19) และจัดรูป จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (20)

$$\dot{i}_o(t) = \frac{1}{L_f} V_L(t) - \frac{R_f}{L_f} i_o(t) \quad (19)$$

$$G_i(s) = \frac{I_o(s)}{V_L(s)} = \frac{1}{(sL_f + R_f)} \quad (20)$$



รูปที่ 4 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 5 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในรูปที่ 5 และทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหาร จะได้ความสัมพันธ์ของตัวควบคุมดังสมการที่ (21)

$$\begin{cases} K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{n,i} L_f - R_f \\ K_{ii} = \omega_{n,i}^2 L_f \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R_1}{L_1} x_1 - \frac{1}{L_1} x_2 - \frac{4}{\pi L_1} x_6, & \dot{x}_2 = \frac{1}{C_1} x_1 - \frac{8K_{pi}\sqrt{x_7^2 + x_8^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r} x_8 - \frac{8K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r} x_8 + \frac{4K_{iv}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r} X_v x_8 \\ & + \frac{4K_{ii}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r} X_i x_8 + \frac{4K_{pv}K_{pi}V_o^*}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r} x_8 \\ \dot{x}_3 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} x_3 + \omega x_4 - \frac{1}{L_{eq}} x_5, & \dot{x}_4 = -\omega x_3 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} x_4 - \frac{1}{L_{eq}} x_7 + \frac{1}{2L_{eq}} V_m \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{C_{eq}} x_3 - \omega x_6, & \dot{x}_6 = \frac{2}{\pi C_{eq}} x_1 + \frac{1}{C_{eq}} x_4 - \omega x_5 \\ \dot{x}_7 = -\frac{R_f}{L_f} x_7 + \omega x_8 - \frac{1}{L_f} x_9, & \dot{x}_8 = \frac{4K_{pi}\sqrt{x_7^2 + x_8^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r} x_2 + \frac{4K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r} x_2 - \frac{2K_{iv}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r} X_v x_2 \\ & - \frac{2K_{ii}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r} X_i x_2 - \frac{2K_{pv}K_{pi}V_o^*}{\sqrt{2}\pi L_f A_r} x_2 - \omega x_7 - \frac{R_f}{L_f} x_8 - \frac{1}{L_f} x_{10} \\ \dot{x}_9 = \frac{1}{C_f} x_7 - \frac{1}{RC_f} x_9 + \omega x_{10}, & \dot{x}_{10} = \frac{1}{C_f} x_8 - \omega x_9 - \frac{1}{RC_f} x_{10} \\ \dot{x}_v = V_o^* - 2\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2}, & \dot{x}_i = -2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} - 2K_{pv}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} + K_{iv}X_v + K_{pv}V_o^* \end{cases} \quad (15)$$

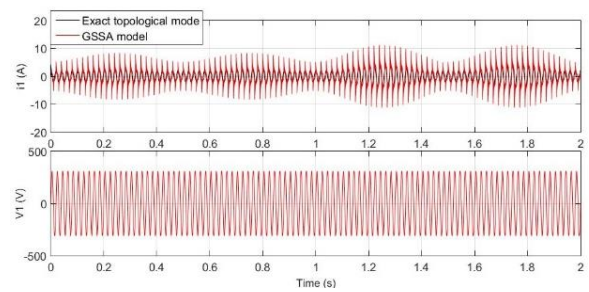
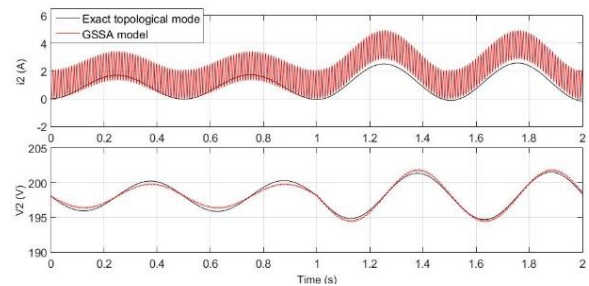
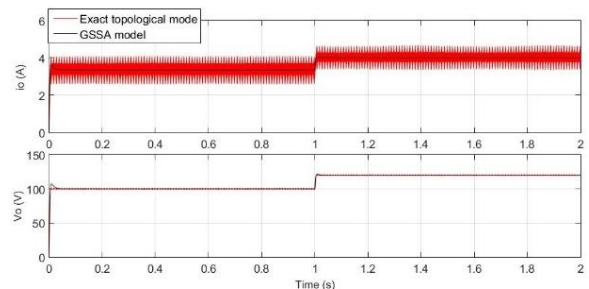
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
V_s	$220 V_{rms}$	L_f	$5 mH$
ω_n	$2\pi \times 50 \text{ rad/s}$	C_f	$10 \mu F$
R_{eq}	$1 m\Omega$	R	30Ω
L_{eq}	$1 \mu\Omega$	f_s	10 kHz
C_{eq}	$22 \mu F$	A_r	10
R_1	$1 m\Omega$	K_{pv}	0.0067
L_1	$200 mH$	K_{iv}	62.5
C_1	$32 mF$	K_{pi}	0.6
R_f	$1 m\Omega$	K_{ii}	50

สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ได้จากสมการที่ (18) และ (21) ตามลำดับ ซึ่งค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุมคือ อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio: ζ) และความกว้างแถบ (bandwidth: ω_n) ของตัวควบคุม กำหนดให้ $\zeta_v = 0.8$ $\omega_{n,v} = 2500 \text{ rad/s}$ $\zeta_i = 0.6$ และ $\omega_{n,i} = 100 \text{ rad/s}$

5. ผลการจำลองสถานการณ์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเขียนโปรแกรมจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางฝั่ง AC_{input} ให้มีค่าน้อย เพื่อไม่ให้ v_1 ลดลง ทางฝั่ง DC จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรเรียงกระแสจำเป็นต้องใช้ $L_1 \geq 47.4 \text{ mH}$ และ $C_1 \geq 147 \mu F$ เพื่อให้นำกระแสได้ต่อเนื่องและกรองแรงดัน v_2 ให้เรียบ และทางฝั่ง AC_{output} ค่าพารามิเตอร์ควรมีค่าน้อย เพื่อป้องกันแรงดันเอาต์พุตตก ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 และจะได้ผลการตอบสนองของแบบจำลองที่มีตัวควบคุม แสดงดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 ตามลำดับ

รูปที่ 6 ผลการตอบสนอง i_1 และ v_1 รูปที่ 7 ผลการตอบสนอง i_2 และ v_2 รูปที่ 8 ผลการตอบสนอง i_o และ v_o

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องโดยจะมีการเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิง กำหนดให้ V_o^* มีการเปลี่ยนแปลงจาก $100 V_{rms}$ เป็น $120 V_{rms}$ ในวินาทีที่ 1.0 เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงพบว่าผลการตอบสนองที่ได้จากการพิสูจน์หาแบบจำลองมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่นั้นยังมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังจะปรากฏการกระเพื่อมของสัญญาณ

เนื่องจากการเป็นการจำลองสถานการณ์ของระบบจริง แต่ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองจะไม่มีผลกระทบเพิ่มเติมของสัญญาณ เนื่องจากระบบจำลองนั้นไม่ได้พิจารณาผลของอุปกรณ์สวิตช์ ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองเฉลี่ย ถึงแม้ไม่ได้อธิบายถึงการกระพือของสัญญาณ แต่พลวัตที่สำคัญของระบบยังคงอยู่และเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิต่อไปในอนาคต

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ให้ผลการตอบสนองที่มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ เวลาในการตอบสนองพบว่าชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังนั้นใช้เวลา 234 วินาที และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลา 75.5 วินาที ซึ่งใช้เวลาเร็วกว่า 3.1 เท่า แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการพิสูจน์นั้นมีความถูกต้อง แม่นยำและใช้เวลาในการหาผลตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] อภิชาติ บุญทาวน. การสร้างโรงงานต้นแบบขนาดเล็กเพื่อการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ. งานวิจัยสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2557: 24-59.

[2] อาทิตย์ กองแก้ว. การพัฒนาและจำลองกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลและการประยุกต์ใช้ในระบบเอสเตอร์ฟิเคชันของกรดซัคซินิกควบคู่กับการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2559: 98-115.

[3] สุชาติ จินสุทธิ์, กองพันธ์, อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์, อภิชาติ บุญทาวน. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก. ใน: *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41*. 2559.

[4] กองพันธ์ อารีรักษ์. การสร้างวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์ที่มีตัวควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด. กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2558.

[5] Mahdavi J, Emaadi A, Bellar MD, Ehsani M. Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1997; 44(8): 767-770.