

การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี

ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

The Controller Design of LEDs Intensity

Using Adaptive TABU Search Method

หทัยรัตน์ ทศน์วรรณ¹ กองพัน อารีรักษ์^{1*} ธิติพร มะชีโกวา² สุภาลัย อารีรักษ์³

¹กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

Hathairat Tasworn¹ Kongpan Areerak^{1*} Thitiorn Machikowa² Subhalai Areerak³

¹Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical

Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²School of Crop Production Technology, Institute of Agricultural Technology,

Suranaree University of Technology

³Department of Biology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th

(Received: October 17, 2020; Accepted: February 17, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถควบคุมความเข้มแสงที่ให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ผลจากงานวิจัยพบว่าผลตอบสนองความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี มีผลที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบจากวิธีการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการทดสอบจริง นำมาใช้ยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัย

คำสำคัญ: การออกแบบตัวควบคุม ความเข้มแสง แอลอีดี การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

ABSTRACT

This research presents the controller design of LEDs intensity using the adaptive TABU search. The aim of the research is the control the LEDs intensity within the response as fast as possible. The mathematical model of the proposed system derived from the generalized state – space averaging technique was used as the objective function for the adaptive TABU search algorithm. The results show that the LEDs intensity response is better than the response using the controller designed by

the conventional method. Moreover, the simulation and experimental results were used to validate the efficiency of the proposed controller design algorithm.

Keyword: Controller Design, Intensity, LEDs, Tabu Search.

1. บทนำ

ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting diodes , LEDs) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากหลอดแอลอีดี มีขนาดเล็ก อายุการใช้งานยาวนาน ปล่อยความร้อนน้อย และสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้หลากหลายกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดโซเดียมความดันไอสูง และ หลอดอินแคนดิสเซนส์ เป็นต้น ดังนั้นในปัจจุบันหลอดแอลอีดี จึงถูกประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมในการเพาะปลูกพืชชนิดต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามพืชแต่ละชนิดมีความต้องการแสงที่แตกต่างกัน ดังนั้นต้องเลือกใช้แสงเทียมที่มีความยาวคลื่น และความเข้มแสงที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด เพื่อให้พืชสามารถสังเคราะห์แสง และเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับตามธรรมชาติ [1] เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:ฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง $350 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง/วัน กับสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเลี้ยงในแสงฟลูออเรสเซนต์ [2] การใช้แสงแอลอีดี สีแดง (6500K) : สีฟ้า (3000 K) (1:1) ที่ความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ส่งผลให้ต้นพืชมะเขือเทศพันธุ์ Purple มีอัตราการสังเคราะห์แสง และการเจริญเติบโตดีกว่าต้นที่ปลูกด้วยแสงชนิดเดียวกันที่ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ [3] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้แสง LED ในอัตราส่วนต่างๆเพื่อกระตุ้นให้พืชผลิตสารที่ต้องการเพิ่มขึ้น เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:สีฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง $215 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ กับต้นโหระพา ส่งผลให้ต้นโหระพามีสีที่สดใสมากขึ้น และการเจริญเติบโต รวมถึงการสังเคราะห์ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatiles) ได้ดีกว่าการใช้แสงสีแดง:สีฟ้า ที่อัตราส่วน 1:2 1:1 2:1 และ 4:1 [4] การปลูก

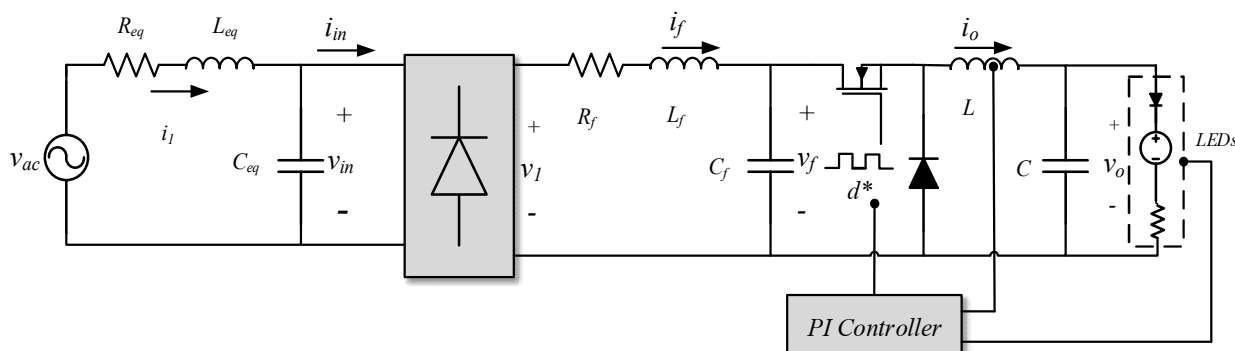
ผักกาดหอมแบตเตอรี่ไฮโดรเจนและเรดโอ๊คจากหลอดไฟแอลอีดี ที่ความเข้มแสง $298.98 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้การเจริญเติบโตดีกว่าของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ [5] เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดี ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ด้วยวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัพคัม ที่มีโหลดหลอดแอลอีดี ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัพคัม เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร เมื่อนำมาออกแบบตัวควบคุมหรือวิเคราะห์เสถียรภาพ จะเกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จึงต้องทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป [6] เป็นวิธีที่ง่ายต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง ดังนั้นงานวิจัยจึงนำเสนอการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัพคัม ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี [7-10] ซึ่งจะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเซิร์ชปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS [11-12] นั้น จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี การ

ตรวจวัดแสงทำได้โดยการใช้เครื่องมือตรวจวัดแสงมาตรฐานคือ เครื่องวัดแสง (Lux meter) มีหลายรุ่นและหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นที่สามารถวัดความเข้มของการส่องสว่างได้ ตั้งแต่ 0-20,000 Lux และคุณลักษณะของเครื่องวัดแสงต้องเป็นไปตามมาตรฐาน CIE 1931 ของคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยความส่องสว่าง (International Commission on Illumination) หรือ ISO/CIE 10527 หรือเทียบเท่า จากข้อกำหนดดังกล่าวทำให้เครื่องมือวัดแสงส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือวัดความส่องสว่างโดยใช้เทคนิคตรวจวัดความส่องสว่างของแสงโดยใช้โมดูล GY-302 (Ambient Light Sensor Module) เป็นตัวเซนเซอร์รับแสงภายในหัววัดเพื่อนำไปประมวลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ในการวัดและเปรียบเทียบความส่องสว่างหรือตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแสง โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดความส่องสว่างจากแหล่งกำเนิดแสง โดยให้แสดงผลการวัดบนหน้าจอ LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร และสำหรับการประมวลผลจะทำการเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA2560 [13-14] ข้อดีของเครื่องมือที่ประดิษฐ์นั้นคือ ใช้งานง่าย สะดวกปลอดภัย ง่ายต่อการบำรุงรักษา รวมถึงเป็นการนำเทคโนโลยีที่มีอยู่มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการลดการนำเข้าของสินค้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง

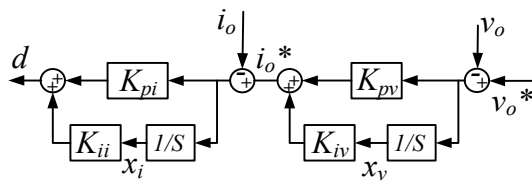
การวัดความหนาแน่นของแสงในขณะที่มีพืชมีการสังเคราะห์แสงช่วงระยะเรียก Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) มีหน่วยเป็น $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ จึงทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างในหน่วย Lux ทางไฟฟ้า และในหน่วย $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ทางพืช พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมความเข้มแสงบนคอมพิวเตอร์ และผลการตอบสนองจากชุดทดสอบด้วย

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

วงจรที่ใช้ควบคุมความเข้มแสงของหลอดไฟแอลอีดีแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (v_{ac}) 220 V_{rms} สายส่งกำลังฝั่งเอซี (R_{eq} , L_{eq} , C_{eq}) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี (R_f , L_f , C_f) ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ (L , C) ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี และควบคุมความเข้มแสง (I_o) ที่ขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต และกระแสเอาต์พุต (i_o) ด้วยตัวควบคุมพีไอสองตัวเรียงกันแบบคาสเคดแสดงดังรูปที่ 2 โดยจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว



รูปที่ 1 วงจรควบคุมความเข้มแสงที่พิจารณา



รูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอสองตัวเรียงกันแบบคาสเคด

นำสัญญาณควบคุม d (Control signal) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพัลส์เบิดยูเอม (PWM) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง d^* และ d เป็นไปตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$d^* = \frac{d}{A_r} \quad (1)$$

เมื่อ d สัญญาณการควบคุม

d^* ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์

A_r ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปของ d^* แสดงดังสมการที่ (2) และกำหนดให้ x_v และ x_i เป็นตัวแปรสถานะของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$d = -K_{pi}i_o - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}x_v + K_{ii}x_i + K_{pv}K_{pi}v_o^* \quad (2)$$

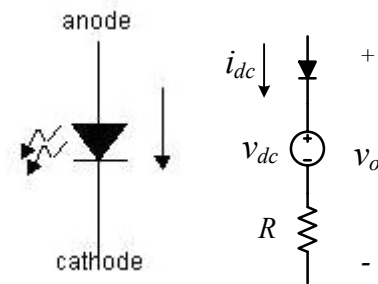
$$\dot{x}_v = -v_o + v_o^* \quad (3)$$

$$\dot{x}_i = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pi}v_o^* \quad (4)$$

เมื่อ K_{pv}, K_{pi} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ
 K_{iv}, K_{ii} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอ
 x_v, x_i อัตราการเปลี่ยนแปลงวงรอบกระแสและแรงดันของวงจรแปรผันแบบบัพคัก
 v_o แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัพคัก
 v_o^* แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยหลอดแอลอีดีมีสัญลักษณ์และแบบจำลองเชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัญลักษณ์และแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี

จากแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (5)

$$v_o = v_{dc} + i_{dc}R \quad (5)$$

เมื่อ v_{dc} แรงดันไฟฟ้าของหลอดแอลอีดี

i_{dc} กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดแอลอีดี

R ตัวต้านทานของหลอดแอลอีดี

จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป switched model มีตัวแปรสถานะ 8 ตัว คือ $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o, v_o, x_v$ และ x_i พิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระแสเชื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำงานในโหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง (CCM) ดังนั้นการกำหนดตัวแปรสเตทของแบบจำลองจึงเหลือเพียง 10 ตัว ดังนี้

$$\text{เมื่อ } k = 1 \quad \begin{aligned} i_1 &= x_1 + jx_2 \\ v_{in} &= x_3 + jx_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } k = 0 \quad i_f &= x_5 \\ v_f &= x_6 \\ i_o &= x_7 \\ v_o &= x_8 \\ x_v &= x_9 \\ x_i &= x_{10} \end{aligned}$$

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$ คือ ตัวแปรสถานะของแบบจำลอง GSSA สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะแสดงดังสมการที่ (6)

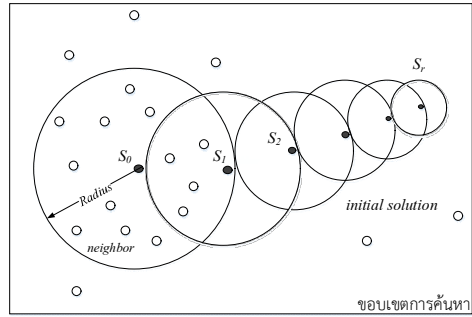
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_1 + \omega x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_3 \\ \dot{x}_2 &= -\omega x_1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_4 - \frac{1}{2L_{eq}}v_m \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{C_{eq}}x_1 + \omega x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{C_{eq}}x_2 - \omega x_3 + \frac{2}{\pi C_{eq}}x_5 \\ \dot{x}_5 &= -\frac{4}{\pi L_{eq}}x_4 - \frac{R_f}{L_f}x_5 - \frac{1}{L_f}x_6 \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{C_f}x_5 + \frac{K_{pi}}{A_r C_f}x_7x_7 + \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7x_8 - \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7x_9 \\ &\quad - \frac{K_{ii}}{A_r C_f}x_7x_{10} - \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r C_f}x_7 \\ \dot{x}_7 &= -\frac{K_{pi}}{A_r L}x_6x_7 - \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r L}x_6x_8 + \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r L}x_6x_9 \\ &\quad + \frac{K_{ii}}{A_r L}x_6x_{10} + \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r L} - \frac{1}{L}x_8 \\ \dot{x}_8 &= \frac{1}{C}x_7 - \frac{1}{RC}x_8 + \frac{1}{RC}v_{dc} \\ \dot{x}_9 &= -x_8 + v_o^* \\ \dot{x}_{10} &= -x_7 - K_{pv}x_8 + K_{iv}x_9 + K_{pi}v_o^* \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ v_m ค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่าย
 ω ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว (ATS)

4.1 การค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบอด (Tabu Search: TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสรารุณ สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 (K-N. Areerak and S. Sujitjorn, 2002) โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบอดธรรมดา คือ การเดินย้อนรอย (Back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive radius) กลไกการเดินย้อนรอนั้นใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหา จะทำการปรับรัศมีการค้นหาในระหว่างการค้นหา จนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด อัลกอริทึมการค้นหาแบบ ATS ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 4 การค้นหาคำตอบด้วย ATS

จากรูปที่ 4 สามารถเขียนเป็นขั้นตอนของอัลกอริทึมการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 โปรแกรมจะทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) ซึ่งในกรณีนี้คือ K_{pv}, K_{iv}, K_{pi} และ K_{ii} ตามจำนวนที่กำหนดไว้ภายในขอบเขตค้นหา เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) โดยที่การประเมินคำตอบว่าดีหรือไม่นั้นพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (J) ซึ่งรายละเอียดของการประเมินค่า

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมนี้จะแสดงในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับกระบวนการค้นหาจะกำหนดให้ S_{best} คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาในรอบที่ผ่านมา ดังนั้นในรอบแรกนี้จึงกำหนดให้ S_{best} มีค่าเท่ากับ S_0

ขั้นตอนที่ 2 นำ S_0 มาใช้เป็นตำแหน่งศูนย์กลางเพื่อใช้สุ่มคำตอบในบริเวณใกล้เคียง (Neighbour) ตามจำนวนที่กำหนดไว้ โดยการสุ่มจะอยู่ภายในรัศมีการค้นหา (Radius) จากนั้นนำคำตอบที่ดีที่สุดของการสุ่มในบริเวณใกล้เคียง (S_1) มาเปรียบเทียบกับ S_{best} โดยประเมินจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามเงื่อนไขคือ ถ้า S_1 มีผลการประเมินที่ดีกว่า S_{best} ให้ $S_{best} = S_1$ มิเช่นนั้นแล้วให้ $S_{best} = S_{best}$ นอกจากนี้ยังมีการปรับลดรัศมีการค้นหา หากพบคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งการปรับลดรัศมีเป็นไปตามสมการที่ (7)

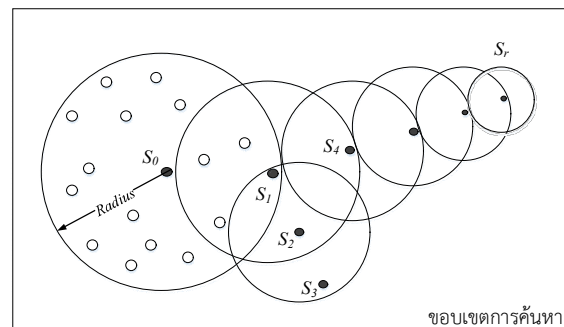
$$Radius(new) = \frac{Radius(old)}{DF} \quad (7)$$

เมื่อ DF คือ อัตราปรับลดรัศมี

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนจาก S_0 เป็น S_1 และดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 โดยเปลี่ยนจาก S_1 เป็น S_2

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการซ้ำ ตามขั้นตอนที่ 3 โดยมีการเปลี่ยนแปลงจาก S_k เป็น S_{k+1} และทำซ้ำไปจนครบจำนวนรอบการค้นหา (Round) ที่กำหนดไว้ ซึ่งคำตอบในรอบสุดท้ายกำหนดให้เป็น S_f และในกรณีที่การค้นหาไม่พบคำตอบที่ดีขึ้น กลไกการเดินย้อนรอยจะถูกนำมาใช้โดยมีกระบวนการ คือ หากการค้นหาคำตอบพบว่ามีผลการประเมินค่าที่ทำให้ $S_{best} = S_{best}$ ติดต่อกันครบตามจำนวน b ที่กำหนดไว้ ให้ S_k มีค่าเท่ากับ S_{k-b} ตัวอย่างการเดินย้อนรอยแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อกำหนดให้ b เท่ากับ 2 และพบว่าคำตอบ S_1 มีค่า W เท่ากับ 0.3 ซึ่งเป็นตำแหน่งของ S_{best} ในปัจจุบัน จากนั้นค้นหาคำตอบ S_2 ได้ค่า W

เท่ากับ 0.4 ดังนั้นคำตอบ S_1 ยังคงมีผลการประเมินที่ดีกว่า S_2 จึงกำหนดให้ $S_{best} = S_{best}$ จากนั้นดำเนินการค้นหาคำตอบ S_3 ได้ค่า W เท่ากับ 0.35 ซึ่งยังคงเป็นคำตอบที่แย่กว่า S_1 จึงกำหนดให้ $S_{best} = S_{best}$ เป็นครั้งที่ 2 ติดต่อกัน ซึ่งครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ กลไกการเดินย้อนรอยจึงเริ่มทำงาน โดยปรับให้คำตอบ S_3 กลับไปอยู่ที่ตำแหน่งของ S_1 เพื่อหาคำตอบในทิศทางเดินใหม่



รูปที่ 5 การเดินย้อนรอยขณะการค้นหาคำตอบด้วย ATS

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อครบจำนวนรอบการค้นหา คำตอบที่ดีที่สุด หรือ S_{best} จะถูกส่งมาเป็นคำตอบของกระบวนการค้นหา ซึ่งถือว่าสิ้นสุดกระบวนการ

นอกจากนี้อัลกอริทึมของ ATS จะมีพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาที่เหมาะสมกับระบบแต่ละชนิด ถ้าเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบยิ่งขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

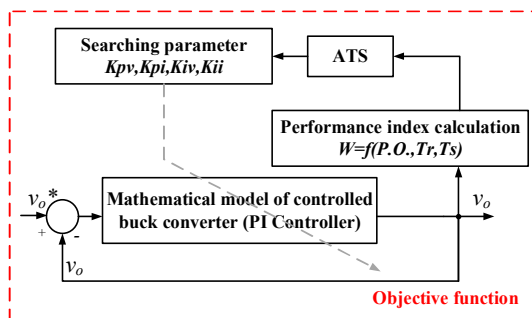
- Initial number neighbour คือ จำนวนการสุ่มคำตอบเริ่มต้นในการค้นหา โดยอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้
- Round คือ จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
- Number neighbour คือ จำนวนการสุ่มคำตอบในแต่ละรอบการค้นหา โดยการสุ่มจะอยู่ภายในรัศมีการค้นหา
- Radius คือ รัศมีการค้นหาคำตอบรอบจุดคำตอบเดิม โดยมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขตการค้นหา
- DF คือ อัตราปรับลดรัศมีเมื่อพบคำตอบตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่ $DF > 1$

4.2 วิธีการค้นหาแบบดั้งเดิม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของอุปกรณ์กระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ต่อเรียงกันแบบ คาสเคด (K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} , K_{ii}) ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เป็นวิธีที่ขั้นตอนการออกแบบง่ายไม่ซับซ้อนและมีการตอบสนองที่ดี ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบและค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุม คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio: ζ) และ ความถี่ธรรมชาติของ ω_n โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของกระแสไฟฟ้า และ ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ $\zeta = 0.8$, $\omega_{nv} = 175$ rad/s และ $\omega_{ni} = 3500$ rad/s ดังนั้นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ จะมีค่า $K_{pv} = 0.0116$, $K_{iv} = 6.738$, $K_{pi} = 4.21$ และ $K_{ii} = 9208.6$

4.3 วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยด้วยการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตมีสมรรถนะดีที่สุด จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไว้สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุม การค้นหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัวสามารถดำเนินการตามแผนภาพบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัว มีการออกแบบการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} , K_{ii}) จากขอบเขตที่กำหนด ซึ่งในการค้นหาพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้น ระบบจะตรวจสอบค่า W และจะทำการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} , K_{ii}) ที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า W มีค่าน้อยที่สุด

$$W(T_{Rp.u.}, T_{Sp.u.}, P.O., P.O.) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \quad (8)$$

และ σ, α, γ มีความสัมพันธ์คือ

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (9)$$

เมื่อ $P.O.$ คือ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot)

T_R คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)

T_S คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

σ, α และ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของ T_R , T_S และ $P.O.$ ตามลำดับ

งานวิจัยนี้กำหนดค่าของ σ, α และ γ ไว้ที่ 0.34, 0.33 และ 0.33 ตามลำดับ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะพยายามค้นหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ค่าวัตถุฟังก์ชัน W น้อยที่สุด

สำหรับขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์ ได้กำหนดจากค่าแบนด์วิธการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมกระแส ที่อยู่ระหว่างค่าแบนด์วิธจากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมดังนี้ $\omega_{nv} = 150 - 400$ rad/s และ $\omega_{ni} = 1500 - 4500$ rad/s ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ค่า ω_{ni} มีค่ามากกว่า ω_{nv} ประมาณ 10 เท่า จะได้ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม
[$\omega_n = 150\text{-}400 \text{ rad/s}$ และ $\omega_{ni} = 1500\text{-}4500 \text{ rad/s}$]

พารามิเตอร์	ขอบเขต	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
K_{pv}	0.0028	0.0908
K_{iv}	4.95	35.2
K_{pi}	1.8	5.143
K_{ii}	1691.73	14062.5

การค้นหาค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การกำหนดพารามิเตอร์มีดังนี้

จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ
รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

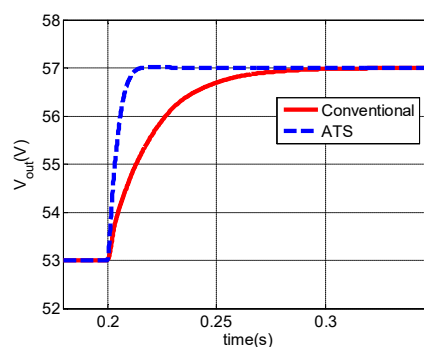
จากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการค้นหาค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวภายใต้ขั้นตอนการออกแบบข้างต้น นำไปออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีตามเชิงปรับตัว แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี ATS
K_{pv}	0.0116	0.0447
K_{iv}	6.738	28.1829
K_{pi}	4.21	4.4754
K_{ii}	9208.6	1908.1
W	0.0655	0.007391

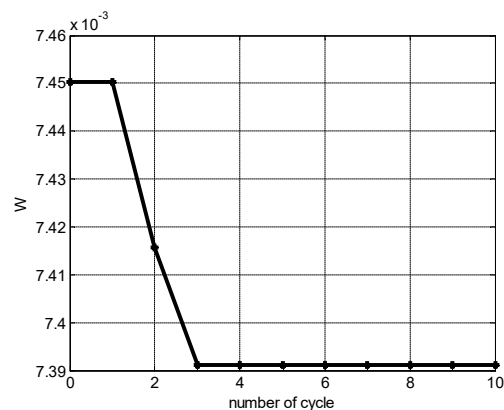
5. ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 2 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (v_o^*) จาก จาก 53 V ไปเป็น 57 V ที่เวลาเท่ากับ 0.2 วินาที ตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากรูปที่ 7 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ได้อย่างถูกต้อง เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมพีไอ พบว่าค่า W มีการลู่เข้าดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การลู่เข้าของค่า W ด้วยวิธี ATS

6. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และผลการทดสอบ

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Lux) กับค่า PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

การวัดค่าความเข้มแสงทางพืชในขณะที่พืชทำการสังเคราะห์แสงมีหน่วยเป็น $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ แต่เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบคือโมดูล GY-302 ที่มีหน่วยเป็น Lux จึงจำเป็นต้องมีการแปลงหน่วย ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงทางไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็น Lux กับหน่วย $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ทางพืช จะดำเนินการผ่านการทดสอบโดยอาศัยเครื่องมือวัดวัดค่าทั้งสอง ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Lux) กับค่า PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

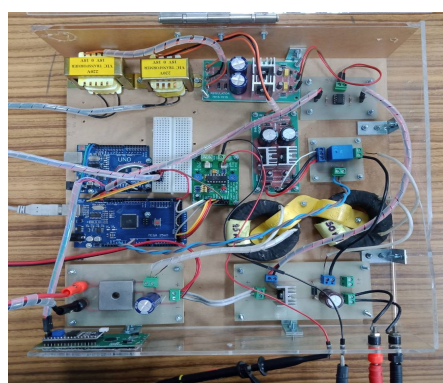
$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	Lux
80	4380
100	5500
120	6670
140	7640
160	8790

นำค่าที่ได้จากการทดสอบ (ตารางที่ 2) ไปหาสมการความสัมพันธ์ พบว่ามีค่าความสัมพันธ์คือ 1 Lux มีค่าเท่ากับ $0.018 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ หรือ $1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ มีค่าเท่ากับ 55.56 Lux

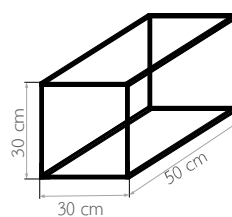
6.2 การสร้างชุดทดสอบ

การทดสอบการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุต ที่มีความสัมพันธ์กันกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของระบบดังรูปที่ 1 ซึ่งหลังจากการออกแบบรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบ จึงได้ชุดทดสอบจริงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยการทดสอบสำหรับควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุตของวงจร ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO รุ่น MEGA 2560 ในการประมวลผล และใช้โมดูล GY-302 เป็นเซนเซอร์วัดความเข้มแสงซึ่งมีหน่วยเป็น Lux ทำการ

แปลงให้เป็นหน่วยของ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ โดยคุณตัวปรับคูณเท่ากับ 0.018 โดยโครงสร้างของชุดควบคุมความเข้มแสงหลอดแอลอีดีนี้เป็นชั้นวางของกว้าง 50 ซม. x 30 ซม. สูง 30 ซม. สามารถประยุกต์วางต่อกันเป็นชั้นๆได้ ชุดไฟส่องสว่าง ใช้หลอดแอลอีดีแบบเส้น (LED STRIP) ขนาดกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ที่ต่อเรียงกันแบบขนาน 3 เส้น และอนุกรมกัน 5 ชุด ดังรูปที่ 10 จะได้ค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ $180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$



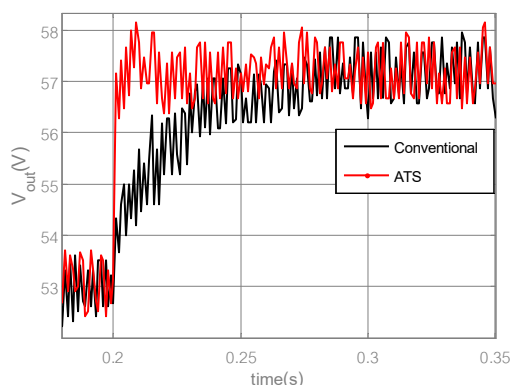
รูปที่ 9 ชุดทดสอบตัวควบคุมความเข้มแสง



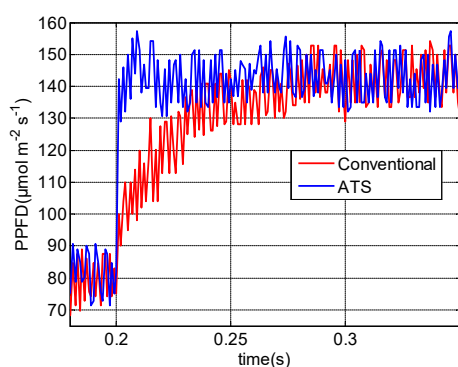
รูปที่ 10 แบบโครงสร้างกล่องและการออกแบบกล่องปลูก
ผักที่ใช้ในงานวิจัย

6.3 ผลการทดสอบจากชุดทดสอบ

ทำการทดสอบควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุตของหลอดแอลอีดี โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจาก $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ไปเป็น $140 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ที่เวลา 0.2 วินาที โดยเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธี ATS เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุม ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมแอลอีดี รวมถึงผลการตอบสนองของความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี



รูปที่ 11 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่
ตกคร่อมหลอดแอลอีดีของชุดทดสอบ



รูปที่ 12 ผลการตอบสนองความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี
ของชุดทดสอบ

ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบดังรูปที่ 11 และ 12 มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบที่อาศัยการออกแบบด้วย ATS ให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ทั้งแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมแอลอีดี และความเข้มแสงเอาต์พุต

7. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี โดยไฟเส้นแอลอีดีแบบ 12 V ที่มีความเข้มแสงสูงสุดของชุดทดสอบมีค่า $180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มแสงที่ทำให้ได้ผลตอบสนองทางพลวัตที่เร็วที่สุด ผ่านการออกแบบตัว

ควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุม ยืนยันผลการตอบสนองของความเข้มแสงด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลจากชุดทดสอบจริง ที่ควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO รุ่น MEGA 2560 เป็นตัวประมวลผลและใช้โมดูล GY-302 เป็นเซนเซอร์วัดความเข้มแสง แสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม งานวิจัยนี้สามารถใช้กับระบบได้จริง อีกทั้งยังควบคุมค่าความเข้มแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.D. Massa, H.-H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell, "Plant productivity in response to LED lighting." *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 43 (7), pp. 1951–1956, Dec. 2008.
- [2] S. Jaturongloumlart, J. Promya and J. Varith, "Modeling of Spirulina Growth Rate with LED Illumination and Applications," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 24 (1), pp. 142-151, Jan-Apr. 2017.
- [3] T. Jamaree, P. Kanjanapachot, S. Jaturongloumlart and S. Sakornvasee, "The effect of LED light on growth of Petunia hybrida Vilm 'Purple' under a semi-closed

- plant production system,” *The National Academic Conference*, Vol. 3, Mar. 2017, pp. 184-191.
- [4] G. Pennisi, S. Blasioli, A. Cellini, L. Maia, A. Crepaldi, I. Braschi, F. Spinelli, S. Nicola, J. A. Fernandez, C. Stanghellini, L.F.M. Marcelis, F. Orsini, and G. Gianquinto, “Unraveling the Role of Red:Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil.” *Front. Plant Sci.*, No. 10, Vol. 305, pp. 1-14, Mar. 2019.
- [5] P. Petchthai and T. Thongket, “Effect of Light Intensity and Light-Exposure Duration on Growth and Quality of Lettuce,” *Songklanakarin Journal of Plant Science*, Vol. 4, No. 3, Jul-Sep. 2017.
- [6] S. Udomsuk, K-N. Areerak and K-L. Areerak, “Mathematical Model of a Single-Phase Uncontrolled Rectifier Feeding a Buck Converter” *European Journal of Scientific Research*, vol. 50, no. 1, pp. 89-98, Feb. 2011.
- [7] G. Li, S. Yu and J. Shi, “Dynamic response analysis of buck driver for LED based on second-order model,” *IET Journal*, No. 24, Vol. 52, pp. 2005–2007, Nov. 2016.
- [8] R. Lin, “Modeling and Compensator Design of LED Driver Systems,” in *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-6, Nov. 2017.
- [9] M. Leng and G. Zhou, “Stability Analysis for Peak Current-Mode Controlled Buck LED Driver Based on Discrete-Time Modeling,” *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, Vol. 6, pp. 1567-1580, Sep. 2018.
- [10] M. Fernando Menke, Á. Raniere Seidelmand R. Varella Tambara, “LLC LED Driver Small-Signal Modeling and Digital Control Design for Active Ripple Compensation,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 66, pp. 387 – 396, Jan. 2019.
- [11] T. Sopapirm, K-N. Areerak, K-L. Areerak, and A. Srikaew, "The Application of Adaptive Tabu Search Algorithm and Averaging Model to the Optimal Controller Design of Buck Converters", *World Academy of Science Engineering and Technology*, issue 60, pp. 477-483, Dec. 2011.
- [12] S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, “The Optimal Cascade PI Controller Design of Buck Converters,” in *2012 IEEE 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2012, pp. 1-4.
- [13] N. Sirithong, S. Katathikarnkul and S. Khongpugdee, “Design and Development Lux Meter,” *Thaksin University Journal*, No. 17, vol. 3 (special), pp. 44-50, Dec. 2014.
- [14] A. Leelaratsamee and S. Detchjarat, “A Smart Lighting Control System Using DALI Protocol,” *Journal of Energy Research*, No. 8, Vol. 2, pp. 45-53, Feb. 2011.