

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ

Optimal PID Controller design for Automatic Voltage Regulator Systems

รพีพงศ์ รัตนวรหิรัญกุล¹, จิตสรายุ สีกู่กา², ศราวุฒิ สุพรรณราช³ และเพิ่มพล กุดจอมศรี⁴

^{1,3,4}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

Emails: Rapeepong_EE@yahoo.com¹, g5414550301@ku.ac.th², Apor_ku@hotmail.com³,
engsakon@hotmail.com⁴

ABSTRACT -- This paper presents optimal PID controller design for Automatic Voltage Regulator systems. This research uses Simulink in MATLAB to compare the experimental result, and finding PID Gain by particle swarm optimization (PSO) are compared to hybrid particle swarm optimization (HPSO). The result of tracking control for AVR systems by selecting the PID gain by using hybrid particle swarm optimization (HPSO) apply to PID algorithm has a better result than other algorithms.

KEY WORDS -- Automatic Voltage Regulator, PID Controller, Particle Swarm Optimization, Hybrid Particle Swarm Optimization

บทคัดย่อ -- บทความนี้เสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator, AVR) โดยใช้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB ในการเปรียบเทียบผลการทดลอง การหาอัตราขยายพีไอดีในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสม จากการทดสอบผลการควบคุมเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ พบว่าการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสมร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติได้ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธีอื่น

คำสำคัญ -- เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ, ตัวควบคุมพีไอดี, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสม

1. บทนำ

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่เป็นที่นิยมและใช้งานง่าย มีหลายงานวิจัยพยายามปรับปรุงวิธีการควบคุมนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [1] แต่ปัญหาของการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีคือการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมระบบนั้นๆ เพราะค่าที่ถูกเลือกและนำมาใช้งานอาจใช้งานได้แต่อาจไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด หรือสามารถออกแบบ

ตัวควบคุมได้ในกรณีที่ระบบเป็นระบบอันดับไม่สูงมาก แต่สำหรับเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติซึ่งเป็นระบบที่มีอันดับสูงจึงทำให้การออกแบบตัวควบคุมมีความความซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบลักษณะนี้จึงมีความลำบาก ในปี 1995 Kennedy และ Eberhart ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์โดยเลียนแบบพฤติกรรมของการหาอาหารของสัตว์ที่อยู่เป็นกลุ่มเรียกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

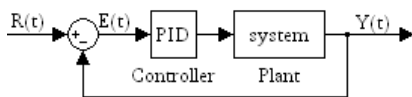
ด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) [2] แต่การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีนี้มีการปรับค่าพารามิเตอร์สองอย่างคือความเร็วและตำแหน่งซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้เข้าสู่ตำแหน่ง Local minima ซึ่งไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดตามที่ต้องการ[3] จะเห็นได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามต้องการและมีเสถียรภาพ

จากเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) [1]

โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวควบคุมพีไอดีแบบวงปิดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. แสดงตัวควบคุมพีไอดีแบบวงปิด

จากการควบคุมแบบวงปิดโดยตัวควบคุมพีไอดีตามรูปที่ 1 จะได้สมการตัวควบคุมและค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

เมื่อ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม, $r(t)$ คือสัญญาณอินพุต, $y(t)$ คือสัญญาณเอาต์พุต, K_p คือ proportional coefficient, T_i คือ integration time constant, T_d คือ differentiating time constant, T คือ sampling period เมื่อ Discretize สมการ(1) จะได้

$$u(n) = K_p\{e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{k=0}^n e(k) + \frac{T_d}{T}[e(n) - e(n-1)]\} \quad (3)$$

$$\Delta u(n) = K_p\{[e(n) - e(n-1)] + \frac{T}{T_i}e(n) + \frac{T_d}{T}[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)]\} \quad (4)$$

$$\text{กำหนดให้ } K'_p = K_p(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}) \quad (5)$$

$$K_I = K_p(1 + \frac{2T_d}{T}) \quad (6)$$

$$K_D = K_p \frac{T_d}{T} \quad (7)$$

แทนค่า (5), (6), (7) ใน (4) จะได้

$$\Delta u(n) = K'_p e(n) - K_I e(n-1) + K_D e(n-2) \quad (8)$$

เมื่อทำการ Discretize สมการ (2) และกำหนด $r(t)$ เป็นค่าคงที่ โดยให้ $r(t) = e_0$ จะได้

$$e(n) = e_0 - y(n) \quad (9)$$

$$e(n-1) = e_0 - y(n-1) \quad (10)$$

$$e(n-2) = e_0 - y(n-2) \quad (11)$$

โดยสมการ (8), (9), (10), (11) เป็นสมการที่ใช้ปรับค่าเพื่อควบคุมระบบ

2.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) [2-4] เป็นวิธีการแก้ปัญหาทางคอมพิวเตอร์ โดยมีสมการดังนี้

$$V_i(t+1) = w * V_i(t) + c_1 * rand1() * (p_{best_i} - X_i(t)) + c_2 * rand2() * (g_{best} - X_i(t)) \quad (12)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (13)$$

เมื่อ X_i , V_i คือตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคที่ i , p_{best_i} คือตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคที่ i , g_{best} คือตำแหน่งที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่ม, c_1 , c_2 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่, w คือ ค่า Weight

Factor, $rand1()$, $rand2()$ คือค่าที่สุ่มในช่วง $[0,1]$ กำหนดให้ ps เป็นขนาดของสมาชิกทั้งหมด NE เป็นจำนวนรอบในการคำนวณ และ MAX_{NE} เป็นจำนวนรอบในการคำนวณสูงสุดที่ถูกกำหนด โดยอัลกอริธึมของ PSO มีดังนี้

The Standard PSO algorithm

Begin

while $NE < MAX_{NE}$ **do**

for each particle i **do**

Update the velocity according equation (12);

Update position according to equation (13);

Calculate the fitness value;

$NE++$;

end for

Update the p_{best} and g_{best} in the population;

end while

End

2.3 การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสม

จากการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) ข้างต้นพบว่าเป็นการแก้ปัญหาในลักษณะสองสมการ คือความเร็วและตำแหน่ง ซึ่งอาจทำให้อนุภาคทั้งหมดลู่เข้าสู่ตำแหน่ง Local minima เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นนี้จึงทำการออกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและดัดสลับกันของ PSO ซึ่งถูกเรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสม (Hybrid Particle Swarm Optimization, HPSO) [3] โดยสร้างสมการเพิ่มดังนี้

$$X = X_{i1} + r_1 * (X_{i2} - X_{i3}) + r_2 * (X_{i4} - X_{i5}) \quad (14)$$

เมื่อ X_{i1} , X_{i2} , X_{i3} , X_{i4} , X_{i5} เป็นอนุภาค 5 จำนวนซึ่งต่างกันที่อยู่ภายในกลุ่ม $i1$, $i2$, $i3$, $i4$, $i5$ เป็นจำนวนเต็ม 5

จำนวนที่ถูกสุ่มในช่วง $[1, ps]$ และค่า r_1 , r_2 เป็นจำนวนที่ถูกสุ่มในช่วง $[0, 1]$ โดย $r_1 + r_2 = 1$

การดัดสลับของ PSO จะได้อนุภาคใหม่ในแต่ละรอบ จากนั้นทำการเปรียบเทียบอนุภาคใหม่ที่ได้กับอนุภาคที่แย่ที่สุดในปัจจุบัน ถ้าอนุภาคใหม่ดีกว่าอนุภาคที่แย่ที่สุดในปัจจุบันให้ทำการเปลี่ยนค่าอนุภาคที่แย่ที่สุดในปัจจุบันเป็นอนุภาคที่ดีกว่าแทน โดยอัลกอริธึม HPSO มีดังนี้

HPSO algorithm

Begin

while $NE < MAX_{NE}$ **do**

for each particle i **do**

Update the velocity according equation (12);

Update position according to equation (13);

Calculate the fitness value;

$NE++$;

end for

Generate a new particle according to equation (14);

Replace the worst particle with the new one, if needed;

Update the p_{best} and g_{best} in the population;

end while

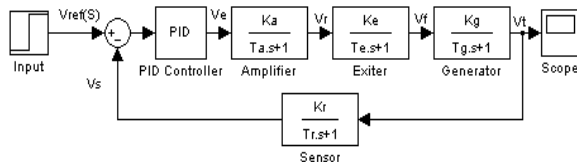
End

2.4 เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ

เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator, AVR) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงทำการปรับคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น ซึ่งช่วยป้องกันการรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น แรงดันไฟฟ้าไม่คงที่, ไฟฟ้าตก, ไฟฟ้าเกิน, ไฟฟ้ากระชาก และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า เครื่องปรับ

แรงดันไฟฟ้า หรือ AVR แตกต่างจาก UPS ตรงที่ไม่สามารถสำรองไฟฟ้าได้ และราคาต่ำกว่า UPS มาก รวมถึงใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด [5]

แบบจำลองของเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติโดยทั่วไป [6] แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. แสดงแบบจำลองเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ

จากรูปที่ 2 สามารถหาแบบจำลองในแต่ละส่วนได้ดังนี้

แบบจำลองภาคขยาย (Amplifier model) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$\frac{Vr(s)}{Ve(s)} = \frac{Ka}{1 + TaS} \quad (15)$$

โดยทั่วไปค่าอัตราขยาย Ka จะอยู่ในช่วง 10 ถึง 400 และค่าคงที่ Ta จะอยู่ในช่วงเล็ก ๆ คือ 0.02 ถึง 0.1 วินาที

แบบจำลอง Exciter (Exciter model) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$\frac{Vf(s)}{Vr(s)} = \frac{Ke}{1 + TeS} \quad (16)$$

โดยทั่วไปค่าอัตราขยาย Ke จะอยู่ในช่วง 10 ถึง 400 และค่าคงที่ Te จะอยู่ในช่วงเล็ก ๆ คือ 0.5 ถึง 1.0 วินาที

แบบจำลอง Exciter (Exciter model) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$\frac{Vt(s)}{Vf(s)} = \frac{Kg}{1 + TgS} \quad (17)$$

โดยทั่วไปค่าพารามิเตอร์สองค่านี้จะขึ้นอยู่กับโหลด โดยอัตราขยาย Kg จะปรับค่าได้ในช่วง 0.7 ถึง 1.0 และค่า Tg จะอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 2.0 วินาที จากโหลดเต็มที่ (full load) ถึงช่วงที่ไม่มีโหลด (no load)

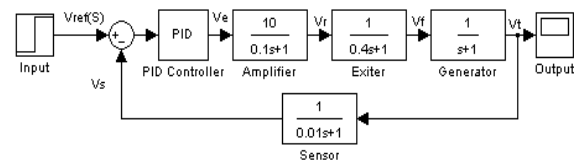
แบบจำลองเซ็นเซอร์ (Sensor model) เป็นระบบอันดับหนึ่ง (first-order) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$\frac{Vs(s)}{Vt(s)} = \frac{Kr}{1 + TrS} \quad (18)$$

ซึ่งค่า Tr มีค่าน้อยมากอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.06 วินาที

3. ขั้นตอนและผลการทดลอง

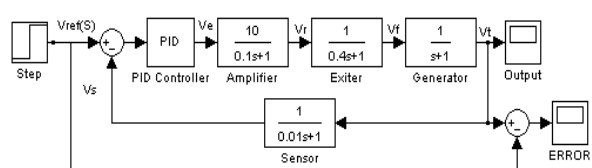
ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการจำลองการควบคุมระดับแรงดันเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติตามแบบจำลองของ Zwe-Lee Gaing [6] ซึ่งมีแผนภาพระบบการทำงานตามรูปที่ 3



รูปที่ 3. แสดงแบบจำลองเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในการทดลอง

3.1 การหาค่าอัตราขยายพีไอดี

การหาค่าอัตราขยายพีไอดีสำหรับงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสม ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4. แสดงการหาค่าอัตราขยายพีไอดีโดย HPSO

ในการหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธี PSO และ HPSO ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า Fitness function แบบค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error, MSE) ตามสมการ (19) โดยเลือกค่า $c_1 = c_2 = 1.49618$, $w = 0.72984$, Sampling time = 10 ms. [4]

$$MSE = \frac{\sum_{k=1}^N [P_a(t(k)) - P_s(t(k))]^2}{N} \quad (19)$$

เมื่อค่า $P_a(t(k))$ คือค่าแรงดันที่ต้องการในเวลา k , ค่า $P_s(t(k))$ คือค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจริงในเวลา k , และค่า N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ จากการหาค่าอัตราขยายโดยวิธี PSO และ HPSO สามารถหาค่าอัตราขยายสำหรับตัวควบคุมแบบต่างๆได้ตามตาราง 1 และ 2

ตารางที่ 1. แสดงผลการหาค่าอัตราขยายสำหรับตัวควบคุมแบบต่างๆ โดย PSO

Controller	K_p	K_i	K_d
P	0.93074	0	0
PI	0.29851	0.15343	0
PD	4.4327	0	0.91659
PID	3.9581	0.26643	0.55037

ตารางที่ 2. แสดงผลการหาค่าอัตราขยายสำหรับตัวควบคุมแบบต่างๆ โดย HPSO

Controller	K_p	K_i	K_d
P	0.91079	0	0
PI	0.27851	0.17243	0
PD	5.4807	0	0.98949
PID	3.3958	0.47647	0.65096

3.2 การเปรียบเทียบผลการควบคุม

ในการเปรียบเทียบผลการควบคุมเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ สำหรับงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบสองอย่างคือ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error, MSE) ในสมการ (19) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) ตามสมการ (20)

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |P_a(t(k)) - P_s(t(k))|}{N} \quad (20)$$

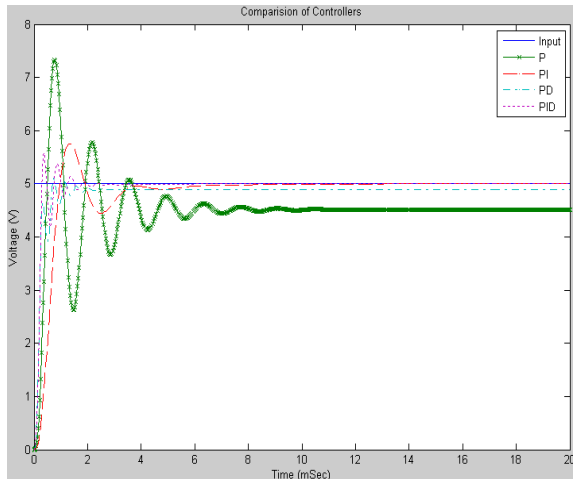
การเปรียบเทียบผลการควบคุมในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบโดยป้อนค่าสัญญาณ Input 5 โวลต์ โดยผลการควบคุมด้วยวิธีต่างๆ ตามการหาค่าอัตราขยายด้วย PSO และ HPSO แสดงในรูปแบบที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3. แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของตัวควบคุมโดย MSE

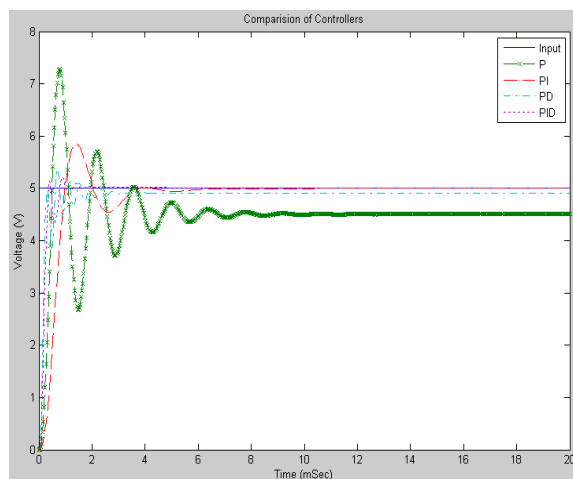
Controller \ Algorithm	P	PI	PD	PID
PSO	1.2187	0.9874	0.5622	0.5511
HPSO	1.1261	0.9684	0.5504	0.4728

ตารางที่ 4. แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของตัวควบคุมโดย MAE

Controller \ Algorithm	P	PI	PD	PID
PSO	0.7994	0.2772	0.2382	0.1428
HPSO	0.7046	0.2746	0.2186	0.1408



รูปที่ 5. แสดงผลการควบคุมโดยเลือกอัตราขยายตาม PSO



รูปที่ 6. แสดงผลการควบคุมโดยเลือกอัตราขยายตาม HPSO

และสามารถสรุปผลความคลาดเคลื่อนได้ตามตารางที่ 3 และ 4

4. บทสรุป

จากผลการควบคุมแรงดันตามตาราง 3 และ 4 พบว่าการหาค่าอัตราขยายพีไอดีโดยวิธี HPSO สามารถสามารถควบคุมเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติได้ดีกว่าการใช้อัตราขยายพีไอดีที่ได้จากวิธี PSO เนื่องจากวิธี HPSO มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและตัดสลับกันของ PSO ซึ่งสามารถรับประกันได้ว่าผลการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อระบุเอกลักษณ์จากวิธีการนี้จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง Global minima ในขณะที่

วิธี PSO ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและตัดสลับกันในแต่ละตำแหน่งจึงทำให้ค่าพารามิเตอร์บางค่าเข้าสู่ตำแหน่ง Local minima ทำให้การควบคุมเกิดความผิดพลาดมากกว่า

จากผลการวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยการหาค่าอัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคแบบผสมสามารถเลือกค่าอัตราขยายพีไอดีได้เหมาะสม และผลจากงานวิจัยนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้วิธี HPSO ในการควบคุมระบบอื่นๆที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Du Jingqing, Gao Shiqiao, Yao fenglin, and Luo Chuang, Liu Haipeng, "An Improved Control Method Based on PID Algorithm," International Conference on Advanced Computer Control, 2010.
- [2] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia.1995.
- [3] Xiaoling Wu, and Min Zhong. "A Hybrid Particle Swarm Optimizer," Second Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications,2009.
- [4] Thitiwat Therdbanker, Peerayot Sanposh, Nattapon Chayopitak, and Hideki Fujita. "Parameter identification of a linear permanent magnet motor using particle swarm optimization," ECTI-CON. 2010.
- [5] Automatic Voltage Regulator, Available from: http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/avr_knowledge.php
- [6] Zwe-Lee Gaing, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System," IEEE transactions on Energy Conversion, Vol.19, No.2, June 2004.