



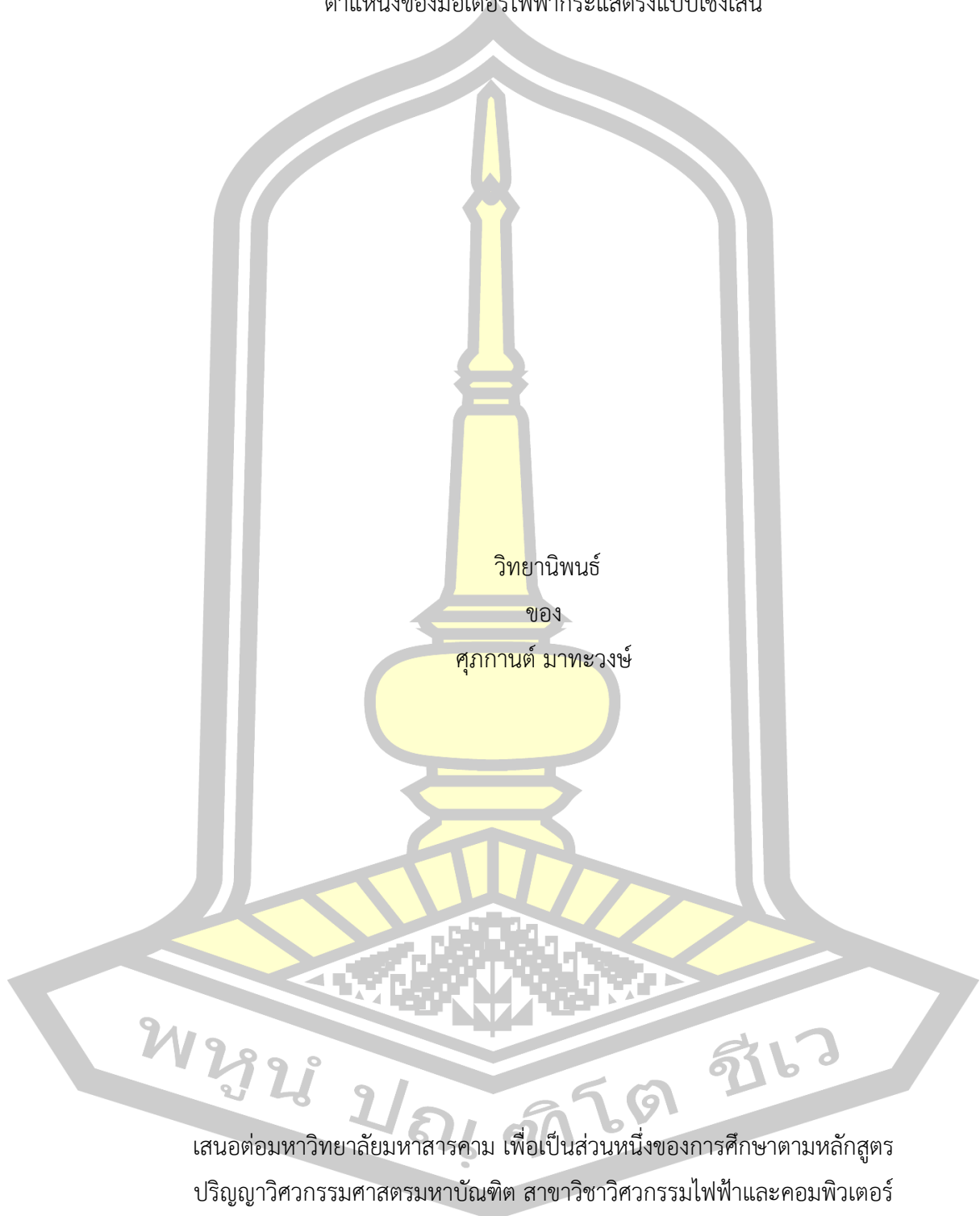
การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรของตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งโหมดโดยใช้วิธีหามากรุกเพื่อควบคุม  
ตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ศุภกานต์ มาทะวงษ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
กุมภาพันธ์ 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรของตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งใหม่โดยใช้วิธีหามากรุกเพื่อควบคุม  
ตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

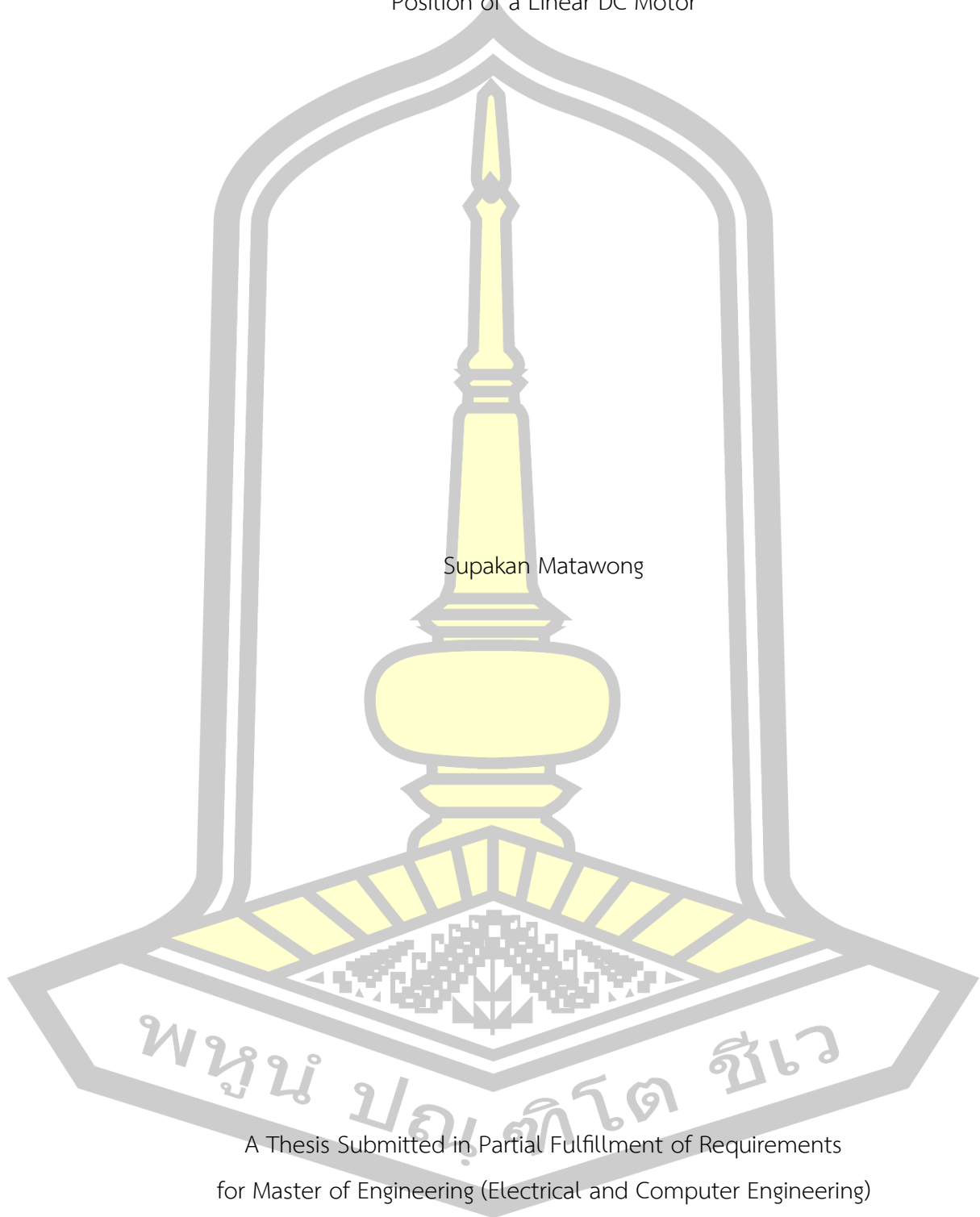


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กุมภาพันธ์ 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Optimization of Sliding Mode Parameters Using Chess Algorithms to Control the  
Position of a Linear DC Motor



Supakan Matawong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

February 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายศุภกานต์ มาทะวงษ์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. จักรพันธ์ ออบมา )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนชะ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นวรัตน์ พิลาแดง )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....  
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวิช )

.....  
(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้รักษาการคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรของตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งโหมดโดยใช้วิธีหมากรุกเพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น		
<b>ผู้วิจัย</b>	ศุภกานต์ มาทะวงษ์		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณนิภา วัฒนนะ		
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
<b>มหาวิทยาลัย</b>	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	<b>ปีที่พิมพ์</b>	2568

#### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอ การหาค่าที่เหมาะสมในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งด้วยวิธีการหมากรุก ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น ซึ่งได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการปรับแต่งค่าของตัวควบคุมทั้งหมด 2 ฟังก์ชันได้แก่ ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) และปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE) โดยทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อระบบ นั่นคือ ค่าโอเวอร์ชูต ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล ค่ารุ่งเวลา และค่าความผิดพลาดคงตัว ซึ่งได้จำลองระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิง และเปรียบเทียบการปรับแต่งค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งด้วยวิธีอื่นๆคือวิธีฟลูงอนุภาค ผลการจำลองระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น ซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีหมากรุกโดยพารามิเตอร์ที่ปรับได้มีดังนี้สำหรับฟังก์ชันปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์  $c$  เท่ากับ 3.0362,  $\epsilon$  เท่ากับ 6.7109 และ  $\delta$  เท่ากับ 0.4039 ซึ่งให้ผลการตอบสนองดังนี้ค่ารุ่งเวลา 1.1245 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต  $7.0404 \times 10^{-5}\%$ , ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.2471 วินาที และ ค่าความผิดพลาดคงตัว  $2.4748 \times 10^{-7}$  สำหรับฟังก์ชันปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง  $c$  เท่ากับ 3.0425,  $\epsilon$  เท่ากับ 9.0522 และ  $\delta$  เท่ากับ 0.1994 ซึ่งให้ผลการตอบสนองดังนี้ค่ารุ่งเวลา 1.4843 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต  $8.7887 \times 10^{-5}\%$ , ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.6484 วินาที และ ค่าความผิดพลาดคงตัว  $3.06 \times 10^{-10}$  พบว่าวิธีหมากรุกสามารถปรับค่าที่เหมาะสมได้ดีกว่าวิธีฟลูงอนุภาค ซึ่งจากผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางเวลาที่ทำให้ระบบมีค่ารุ่งเวลา และค่าโอเวอร์ชูตที่ดีกว่า แต่มีข้อด้อยด้านค่าเวลาเข้าสู่สมดุลที่ช้ากว่า นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดปัญหาการเกิดปรากฏการณ์การสั่น อันเป็นปัญหาในการออกแบบตัวควบคุม ทำให้ระบบมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น, วิธีหมากรุก, วิธีฟลูงอนุภาค, เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, ตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้ง

<b>TITLE</b>	Optimization of Sliding Mode Parameters Using Chess Algorithms to Control the Position of a Linear DC Motor		
<b>AUTHOR</b>	Supakan Matawong		
<b>ADVISORS</b>	Associate Professor Supannika Wattana , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Engineering	<b>MAJOR</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2025

### ABSTRACT

This thesis introduces the optimization of tuning parameters for a sliding mode controller using the chess algorithm to control the position of a linear DC motor. The tuning process used two objective functions: the Integral Absolute Error (IAE) and the Integral Squared Error (ISE). The system's response was evaluated by considering overshoot, settling time, rise time, and steady-state error. The position control system of the linear DC motor was simulated, and the tuning results of the sliding mode controller were compared with other methods, such as Particle Swarm Optimization (PSO). The simulation results of the position control system for a linear DC motor, utilizing a sliding mode controller with parameter optimization using the Chess Optimization Algorithm were as follows: for the Integral Absolute Error function  $c$  is 3.0362,  $\epsilon$  is 6.7109, and  $\delta$  is 0.4039, which gave the following responses: rise time 1.1245 seconds, overshoot  $7.0404 \times 10^{-5}\%$ , settling time 2.2471 seconds and steady-state error  $2.4748 \times 10^{-7}$  for the Integral Squared Error function  $c$  is 3.0425,  $\epsilon$  is 9.0522 and  $\delta$  is 0.1994, which gives the following response: rise time 1.4843 seconds, overshoot  $8.7887 \times 10^{-5}\%$ , settling time 2.6484 seconds and steady-state error  $3.06 \times 10^{-10}$ . The time response analysis showed that the Chess Optimization Algorithm provided better rise time and overshoot values but had the disadvantage of slower settling time. Additionally, it is capable of eliminating the chattering phenomenon, a common challenge in controller design, resulting in a more stable and efficient system.

Keyword : sliding mode controller, linear DC motor, optimization technique, chess optimization algorithm, particle swarm optimization

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณนิกา วัฒนนะ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และถ่ายทอดความรู้ที่ทรงคุณค่าแก่ข้าพเจ้า ตลอดเวลาขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาในหลักสูตรที่นี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณคณะกรรมการผู้ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรพันธ์ ออบมา ผู้รับผิดชอบในฐานะประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นวรัตน์ พิลาแดง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยงค์ เสริมผล ผู้รับผิดชอบในฐานะกรรมการ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้มีส่วนร่วมในการถ่ายทอดความรู้และให้ความอนุเคราะห์ทั้งในด้านการสอนและในการให้เอกสารที่เกี่ยวข้อง

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่าน และพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความช่วยเหลือในงานด้านเอกสาร คำแนะนำ และกำลังใจที่ให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องทุกๆ ท่าน ที่ให้การสนับสนุน และช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าในทุกด้านตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งต่อการทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี สำหรับคุณค่า และประโยชน์อันใด ที่ได้มาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

ศุภกานต์ มาทะวงษ์

พูน ปณ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

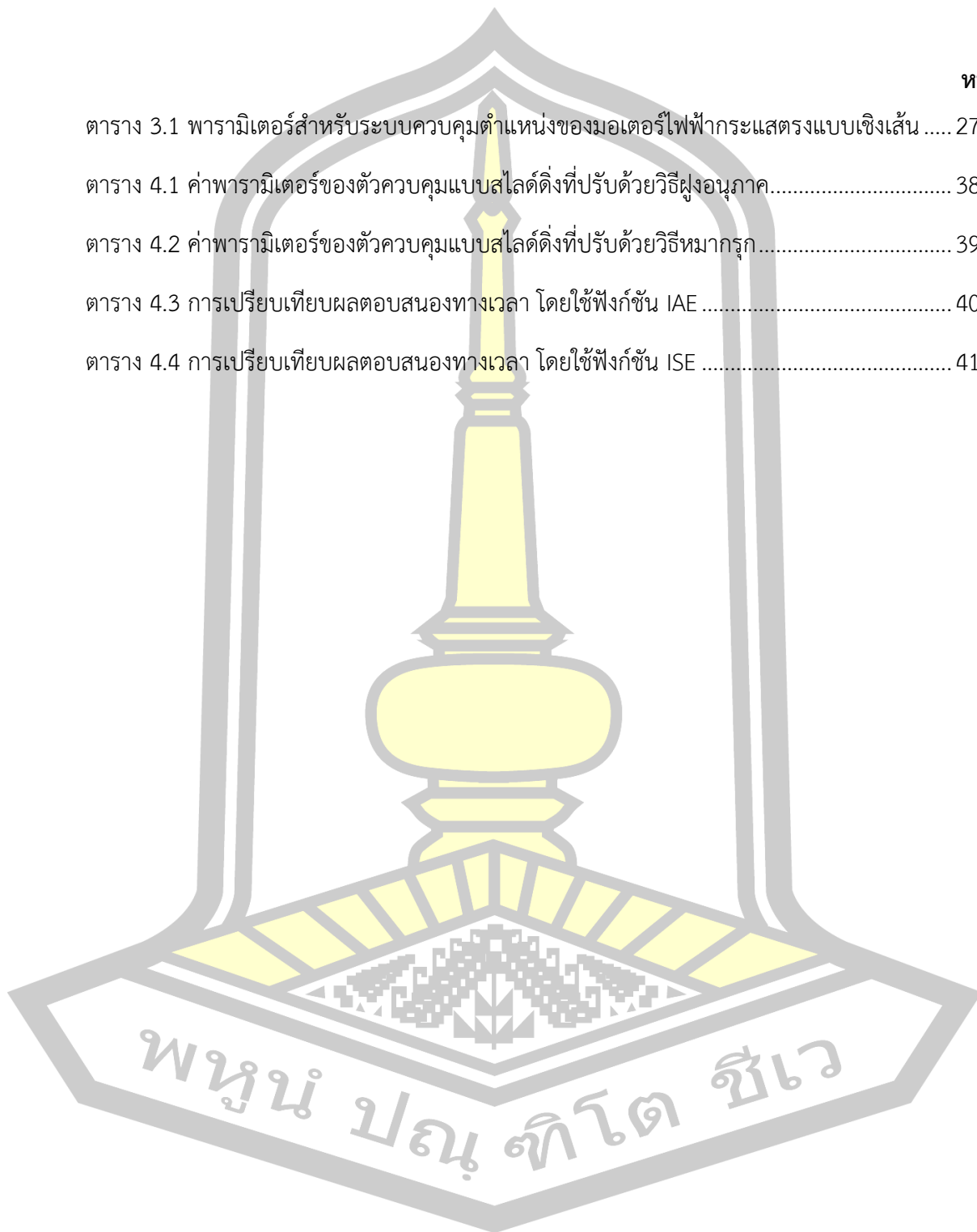
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพประกอบ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัย.....	4
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.1.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรง.....	5
2.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น.....	5
2.1.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	7
2.2 ตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้ง.....	11
2.2.1 หลักการออกแบบ.....	11
2.2.2 ปรากฏการณ์การสั่น.....	14
2.2.3 กฎการควบคุม.....	16
2.3 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม.....	17

2.3.1 วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO).....	17
2.3.2 วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm : BA).....	19
2.3.3 วิธีหมากรุก (Chess Algorithm : CA).....	20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น.....	24
3.2 ออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง.....	28
3.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหมากรุก.....	30
3.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ทดสอบ.....	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	37
4.1 ผลการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงด้วยฝูงอนุภาค.....	37
4.2 ผลการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงด้วยวิธีหมากรุก.....	38
4.3 วิเคราะห์ผลการตอบสนอง.....	39
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผล.....	43
5.2 อภิปรายผล.....	43
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	44
บรรณานุกรม.....	45
ประวัติผู้เขียน.....	48

พูน ปณ ทิโต ชีเว

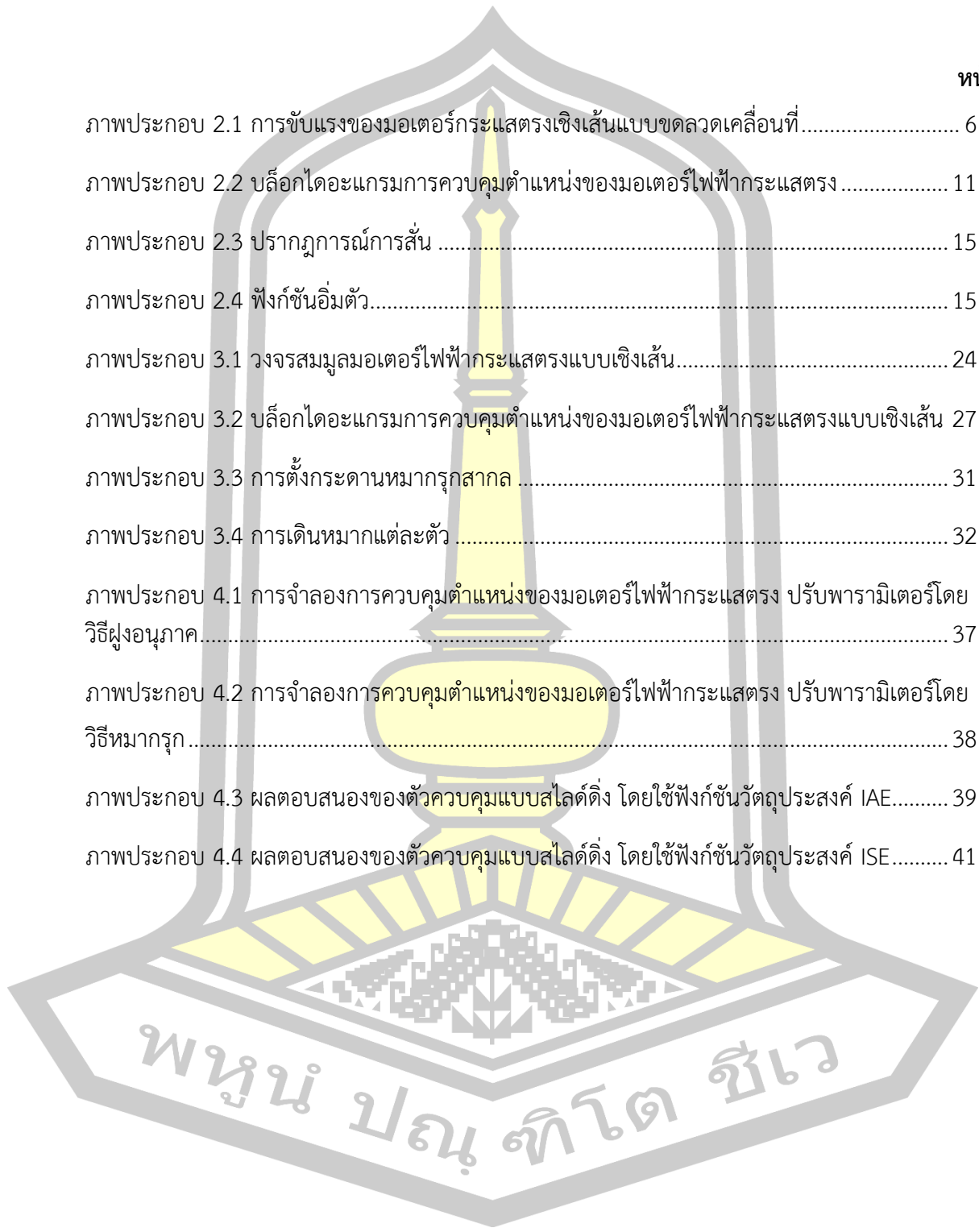
## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.1 พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น .....	27
ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับด้วยวิธีฝูงอนุภาค.....	38
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับด้วยวิธีหมากรุก.....	39
ตาราง 4.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลา โดยใช้ฟังก์ชัน IAE .....	40
ตาราง 4.4 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลา โดยใช้ฟังก์ชัน ISE .....	41



## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 การขีดแรงของมอเตอร์กระแสตรงเชิงเส้นแบบขดลวดเคลื่อนที่.....	6
ภาพประกอบ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	11
ภาพประกอบ 2.3 ปรัชญาการณการสั้น .....	15
ภาพประกอบ 2.4 ฟังก์ชันอิมิตัว.....	15
ภาพประกอบ 3.1 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น.....	24
ภาพประกอบ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น	27
ภาพประกอบ 3.3 การตั้งกระดานหมากรุกสากล .....	31
ภาพประกอบ 3.4 การเดินหมากแต่ละตัว .....	32
ภาพประกอบ 4.1 การจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ปรับพารามิเตอร์โดยวิธีฝูงอนุภาค.....	37
ภาพประกอบ 4.2 การจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ปรับพารามิเตอร์โดยวิธีหมากรุก.....	38
ภาพประกอบ 4.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค IAE.....	39
ภาพประกอบ 4.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค ISE.....	41



## 1.1 ที่มาและความสำคัญ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นองค์ประกอบหลักที่ถูกใช้งานอย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในการควบคุมแรงบิดและความเร็วได้อย่างแม่นยำ จึงถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมเครื่องจักรกล ระบบขนส่ง และระบบอัตโนมัติต่างๆ แม้ค่าบำรุงซ่อมแซมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าใช้จ่ายที่มากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [1] อย่างไรก็ตาม การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับความสนใจในการนำมาวิจัยและปรับปรุง เพื่อให้เกิดความแม่นยำที่สูงขึ้นและตอบสนองเร็วขึ้น ผ่านการใช้ตัวควบคุมและเทคนิคใหม่ๆ อย่างหลากหลาย [2]

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นหัวใจสำคัญของการใช้งานในระบบอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีหลากหลายประเภท การควบคุมอย่างแม่นยำของมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดการสิ้นเปลืองพลังงาน และยืดอายุการใช้งานของระบบ โดยตัวควบคุมมีหน้าที่สำคัญในการทำให้ระบบมอเตอร์ทำงานตามที่กำหนด ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วและตำแหน่งได้อย่างแม่นยำและเสถียร [3] หนึ่งในเหตุผลหลักที่ตัวควบคุมมีความสำคัญ คือความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของมอเตอร์ไฟฟ้าในเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือความไม่แน่นอน ตัวควบคุมสามารถปรับการทำงานของมอเตอร์ในสถานะที่มีการรบกวนจากภายนอก ทำให้ระบบมีความเสถียรและลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น เช่น การใช้งาน PID Controller ซึ่งสามารถใช้ควบคุมความเร็วและตำแหน่งได้โดยลดความผันผวนที่อาจเกิดขึ้น [4]

ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง (SMC) เป็นหนึ่งตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมอย่างมากในฐานะตัวควบคุมที่มีความสามารถในการจัดการกับความไม่แน่นอนของระบบและการรบกวนภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งใช้หลักการในการรักษาสถานะการทำงานของระบบให้อยู่ในสถานะการเลื่อน (Sliding Mode) บนพื้นผิวที่กำหนดไว้ ซึ่งจะช่วยให้ระบบมีความทนทานต่อความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ [5] แต่การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งที่มีประสิทธิภาพต้องพิจารณาการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันปัญหาการสั่นสะเทือน (Chattering) ที่อาจเกิดขึ้นได้ [6]

การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เป็นกระบวนการที่สำคัญในงานวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบควบคุมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ในยุคที่เทคโนโลยีก้าวหน้า การเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบเป็นเรื่องที่สำคัญมากขึ้น การหาค่าที่เหมาะสมเป็นการวิเคราะห์และหาชุดค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีที่สอดคล้องตามเกณฑ์ที่กำหนด ทั้งนี้ กระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การวางแผนเส้นทางในการเดินทาง หรือการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า การพัฒนาแนวคิดของการหาค่าที่เหมาะสมมีที่มาจากพัฒนาทางคณิตศาสตร์และการประมวลผลในช่วงศตวรรษที่ 20

แนวคิดพื้นฐานเช่นทฤษฎีของการหาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด (Maxima and Minima) ได้รับการศึกษา มาตั้งแต่ยุคของนักคณิตศาสตร์เช่น ลากรานจ์ และนิวตัน แนวทางนี้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่ ต้องการหาผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด [7]

ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพได้เริ่มต้นจากการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรม เช่น ปัญหาของการหาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด และการหาค่าแรงงานที่เหมาะสมเพื่อผลิตสินค้าปริมาณ สูงสุด ต่อมาในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 แนวคิดดังกล่าวได้รับการพัฒนามาใช้ในวิทยาการคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมไฟฟ้า และการควบคุมระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาอัลกอริทึมเชิงตัวเลข เช่น อัลกอริทึมเกรเดียนต์ (Gradient Descent) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการค้นหาค่าที่เหมาะสมได้ อย่างรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น [8]

การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงเป็นเรื่องที่ซับซ้อน ในปัจจุบัน มีการนำเทคนิคต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม หนึ่งในเทคนิคที่น่าสนใจคือ วิธีหมากรุก (Chess Algorithm) [9] ซึ่งเป็นวิธีที่มีแนวคิดในการนำเกมหมากรุกสากลมาประยุกต์ใช้ ในการลู่เข้าหาค่าตอบที่คงตัว ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพ ทั้งยังง่ายต่อการดำเนินการ และมี ประสิทธิภาพ เทคนิคนี้สามารถช่วยลดความซับซ้อนในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ SMC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยในครั้งนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีหมากรุกในการออกแบบตัวควบคุม SMC ของมอเตอร์กระแสตรงแบบเชิงเส้น เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น โดยมี เป้าหมายที่จะนำไปสู่การปรับปรุงระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำ การวิจัยนี้ คาดว่าจะสามารถสร้างแนวทางใหม่ในการออกแบบระบบควบคุมที่มีความเสถียรและประสิทธิภาพสูง กว่าเดิม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหมากรุกในการออกแบบตัวควบคุม แบบสไลด์ดิง

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหมากรุกในการออกแบบตัวควบคุมแบบ สไลด์ดิงสำหรับควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหมากรุก กับเทคนิคอื่นๆ ในการออกแบบ ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง สำหรับควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ระบบที่ศึกษาเป็นการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

1.3.2 ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหมากรุก ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับ ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง

1.3.3 เปรียบเทียบเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหามากรุก กับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟูงอนภาค

1.3.4 ดำเนินการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจการทำงานและออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง

1.4.2 ได้ศึกษาและประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหามากรุกในการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง สำหรับควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

1.4.3 เปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหามากรุก กับเทคนิคอื่น ๆ ในการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง สำหรับควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น



## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัย

บทนี้ นำเสนอการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีหามากรุกในการหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น มีเนื้อหาเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวควบคุมแบบสไลด์ตั้งเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหามากรุก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสเป็นพลังงานกล [10] โดยมีลักษณะทำให้เกิดการหมุน ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\vec{F}$  = แรงที่เกิดขึ้นกับประจุไฟฟ้า (N)

$q$  = ค่าประจุไฟฟ้า (C)

$\vec{v}$  = ความเร็วของประจุไฟฟ้า (m/s)

$\vec{B}$  = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

และในกรณีที่มีกระแสไหลในแท่งตัวนำ ซึ่งแท่งตัวนำนั้นอยู่ในอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดแรงต่อประจุไฟฟ้าแต่ละตัว ทำให้เกิดแรงลัพธ์กับแท่งตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยมีค่าดังสมการ

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

โดยที่  $\vec{F}$  = แรงที่เกิดขึ้นกับประจุไฟฟ้า (N)

$i$  = ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

$\vec{l}$  = ความยาวของแท่งตัวนำ (m)

$\vec{B}$  = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

### 2.1.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีส่วนประกอบหลักที่ทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อให้เกิดการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยองค์ประกอบสำคัญของมอเตอร์นี้ [11-14] ได้แก่

#### 2.1.1.1 Stator (ตัวสร้างสนามแม่เหล็ก)

Stator เป็นโครงสร้างหลักที่อยู่นิ่ง ทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการทำงานของมอเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะเกิดจากแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดที่ถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป ในบางรุ่นจะใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความแรงมากเพียงพอในการขับเคลื่อนอาร์มาเจอร์

#### 2.1.1.2 Rotor (ตัวหมุน)

Rotor เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ภายในมอเตอร์ โดยจะมีขดลวดที่เรียกว่าอาร์มาเจอร์ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กจาก Stator กับกระแสไฟฟ้าใน Rotor จะทำให้เกิดแรงที่ทำให้ Rotor หมุนและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ

#### 2.1.1.3 Commutator (ตัวสลับกระแสไฟฟ้า)

Commutator ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้มอเตอร์สามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงัก หากไม่มี Commutator กระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถถูกสลับทิศได้ และมอเตอร์จะหยุดหมุนในเวลาไม่นาน

#### 2.1.1.4 Brushes (แปรงถ่าน)

แปรงถ่านเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่คอมมิวเตเตอร์และขดลวดอาร์มาเจอร์ แปรงถ่านมีการสัมผัสโดยตรงกับคอมมิวเตเตอร์ จึงต้องมีความทนทานสูงต่อการสึกหรอ และมีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

#### 2.1.1.5 Field Winding (ขดลวดสนามแม่เหล็ก)

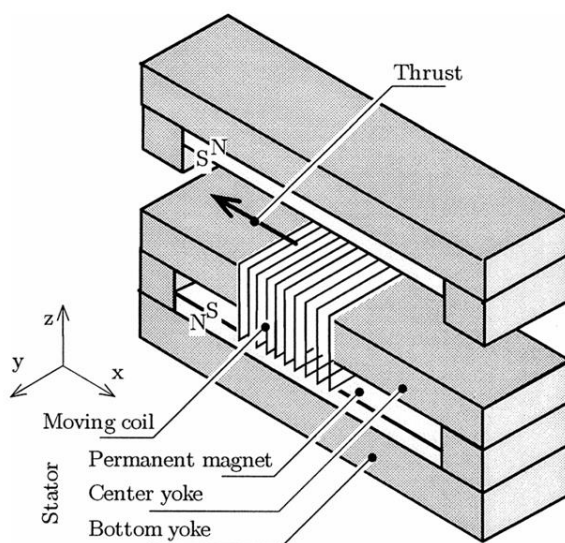
ในมอเตอร์ที่ใช้ขดลวดในการสร้างสนามแม่เหล็ก ขดลวดนี้จะพันอยู่รอบ "pole" ของ Stator และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ขนาดและความแรงของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวด ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของมอเตอร์ ในการทำงานที่ใช้กำลังน้อยเพื่อความง่ายในการสร้างและออกแบบจึงมีการใช้งานแม่เหล็กถาวรแทนการใช้ขดลวดสนามแม่เหล็ก

### 2.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น (Linear DC Motor) [15] เป็นหนึ่งในประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการทำงานคล้ายคลึงกับมอเตอร์กระแสตรงแบบหมุน แต่ต่างกันที่การเคลื่อนที่ของ Linear DC Motor จะเป็นการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นแทนการหมุนเป็นวงรอบ มอเตอร์ชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการในระบบที่ต้องการการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยไม่ต้องผ่านการแปลงแรงจากการหมุนเป็นการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเหมือนในมอเตอร์แบบหมุนทั่วไป

### 2.1.2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้นอิงตามกฎของแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ซึ่งเกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature) กับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กสนาม (Field Magnet) เมื่อตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงที่ทำให้ตัวนำเคลื่อนที่ ซึ่งในกรณีของมอเตอร์เชิงเส้น แรงนี้จะดึงหรือผลักให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตลอดแนวขดลวดที่จัดเรียงไว้



ภาพประกอบ 2.1 การขับเคลื่อนของมอเตอร์กระแสตรงเชิงเส้นแบบขดลวดเคลื่อนที่ [2]

ซึ่งแรงดึงและผลักของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้นสามารถประมาณขนาดของแรงที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ [2]

$$F = K_f i \quad (2.3)$$

โดยที่  $F$  = แรงขับของมอเตอร์ (N)  
 $K_f$  = ค่าคงที่ของแรงขับ (N/A)

ค่าคงที่ของแรงขับสามารถหาได้จากสมการ

$$K_f = NIB \quad (2.4)$$

โดยที่  $K_f$  = ค่าคงที่ของแรงขับ (N/A)

$N$  = รอบของขดลวด

$I$  = ความยาวของขดลวด (m)

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

### 2.1.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดอาร์มาเจอร์ที่อยู่ภายในสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด จะเกิดแรงที่ผลักดันให้มอเตอร์หมุน การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงจึงเป็นการปรับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์เพื่อตอบสนองการควบคุมความเร็ว แรงบิด หรือทิศทางการหมุนของมอเตอร์ การปรับค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและวิธีการควบคุมที่ใช้ [11]

#### 2.1.3.1 การควบคุมความเร็ว

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญมากในงานต่าง ๆ เช่น ระบบขนส่ง เครื่องจักรในโรงงาน หรือเครื่องมือไฟฟ้า การปรับความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยแรงดันที่มากขึ้นจะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น และในทางตรงกันข้าม เมื่อแรงดันลดลง มอเตอร์ก็จะหมุนช้าลง

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ การปรับแรงดันไฟฟ้าโดยตรงเป็นวิธีที่ง่ายและตรงไปตรงมาในการควบคุมความเร็ว อย่างไรก็ตาม วิธีนี้อาจไม่เหมาะสมในบางกรณี เนื่องจากการใช้พลังงานสูงและมีประสิทธิภาพไม่ดีในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วในการหมุนของมอเตอร์สามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$V = E + I_A R_A \quad (2.5)$$

โดยที่  $V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์

$E$  คือแรงดันที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ (Back EMF)

$I_A$  คือกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์

$R_A$  คือความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วในการหมุนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากแรงดันที่ใช้ในการเอาชนะแรงต้านในขดลวดอาร์มาเจอร์และสร้าง Back EMF มากขึ้น [12]

การควบคุมแบบ PWM (Pulse Width Modulation) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เพราะสามารถควบคุมความเร็วได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง PWM

ทำงานโดยการปรับอัตราการเปิด-ปิดของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ ยิ่งระยะเวลาที่เปิดสัญญาณนาน (Duty Cycle สูง) ความเร็วของมอเตอร์ก็จะสูงขึ้นตาม ทำให้ PWM เหมาะสำหรับการควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูงและการสูญเสียพลังงานน้อย [13]

### 2.1.3.1 การควบคุมตำแหน่ง

การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นหนึ่งในหัวข้อที่สำคัญในระบบควบคุมทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมอเตอร์ DC เป็นตัวขับเคลื่อนที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมตำแหน่งที่แม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานในหลายๆ ระบบ เช่น หุ่นยนต์แขนกล เครื่องมือแพทย์ หรือเครื่อง CNC ที่ต้องการความแม่นยำสูง การควบคุมตำแหน่งนั้นไม่เพียงแต่ต้องทำให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้เท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาถึงการตอบสนองที่รวดเร็วและการลดปัญหาการสั่นหรือ Overshoot ที่อาจเกิดขึ้น [12]

การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ DC ใช้หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control System) ซึ่งจะตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันของมอเตอร์เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ต้องการ ถ้าพบความแตกต่างหรือข้อผิดพลาด (Error) ระบบจะทำการส่งสัญญาณเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสที่จ่ายไปยังมอเตอร์ให้ทำการหมุนไปยังตำแหน่งที่กำหนดอย่างถูกต้อง ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมตำแหน่ง หนึ่งในเซ็นเซอร์ที่ใช้บ่อยคือ Encoder ซึ่งสามารถตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุมได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังมี Potentiometer ที่ให้สัญญาณแบบแอนะล็อกเพื่อนำไปปรับปรุงการควบคุมตำแหน่ง [11]

สมการทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการออกแบบระบบควบคุมที่แม่นยำ ต้องคำนึงถึงสมการทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นดังสมการที่ 2.6 สมการไฟฟ้า [16]

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + E_b(t) \quad (2.6)$$

โดยที่  $V(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์มาเจอร์

$R$  คือ ความต้านทานในขดลวดอาร์มาเจอร์

$i(t)$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์

$E_b(t)$  คือ แรงดันย้อนกลับ (Back EMF) ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุน

สมการทางกล

$$T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2.7)$$

โดยที่  $T(t)$  คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์

$J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

$B$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$\omega(t)$  คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

สมการทั้งสองนี้ทำหน้าที่เชื่อมโยงพฤติกรรมทางไฟฟ้ากับพฤติกรรมทางกลของมอเตอร์ โดยการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งที่ดีจะต้องคำนึงถึงไดนามิกของระบบทั้งทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อให้ระบบสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ และจากความสัมพันธ์ข้างต้นจะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) [17] ได้ดังนี้

จากสมการทางไฟฟ้าและทางกลข้างต้น เราสามารถสร้างสมการโดเมน Laplace ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

1. แปลงสมการไฟฟ้าจากโดเมนเวลาเป็นโดเมน Laplace

$$V(s) = (Ls+R)I(s)+K_b\Omega(s) \quad (2.8)$$

โดยที่  $V(s)$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ในโดเมน Laplace

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์มาเจอร์

$R$  คือ ความต้านทานในขดลวดอาร์มาเจอร์

$I(s)$  คือ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

$K_b$  คือ ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ (Back EMF) ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุน

$\Omega(s)$  คือ ความเร็วเชิงมุมในโดเมน Laplace

2. แปลงสมการทางกล

$$K_t I(s) = (Js+B)\Omega(s) \quad (2.9)$$

โดยที่  $I(s)$  คือ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

$K_t$  คือ ค่าคงที่ของทอร์ค

$J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

$B$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$\Omega(s)$  คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

จากนั้น เราสามารถหาค่าของ  $I(s)$  จากสมการที่ 2.8 และแทนในสมการที่ 2.9 เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันอินพุต  $V(s)$  และความเร็วเชิงมุม  $\Omega(s)$  ของมอเตอร์

$$\Omega(s) = \frac{K_t}{(Js+B)(Ls+R)+K_b K_t} V(s) \quad (2.10)$$

การควบคุมตำแหน่ง ในกรณีที่เราสนใจการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตแรงดันและตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ ( $\theta(s)$ ) จะได้จากการบูรณาการความเร็วเชิงมุม ( $\Omega(s)$ ) ซึ่งในโดเมน Laplace สามารถเขียนได้ว่า

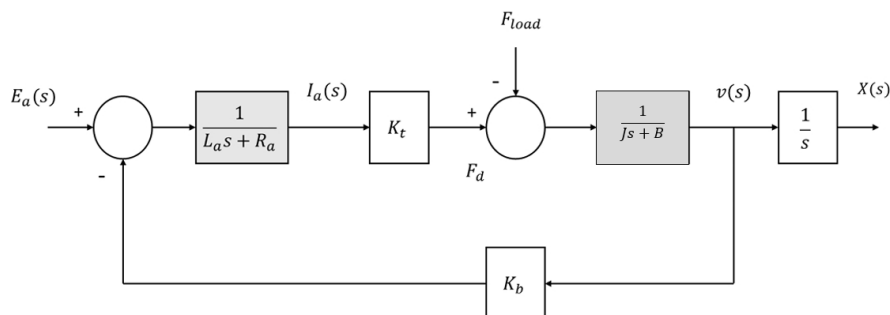
$$\theta(s) = \frac{1}{s} \Omega(s) \quad (2.11)$$

จะเป็น

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันอินพุต  $V(s)$  และตำแหน่งเชิงมุม  $\theta(s)$

$$\theta(s) = \frac{K_t}{s[(Js+B)(Ls+R)+K_b K_t]} V(s) \quad (2.12)$$

สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [18]

## 2.2 ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง

ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง (Sliding Mode Control) เป็นหนึ่งในตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งยังได้ประยุกต์ใช้กับการควบคุมหลากหลายระบบเช่น ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น, multi-input multi-output และระบบอื่นๆ [19] ด้วยจุดเด่นของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง นั่นคือ ความไวต่อตัวแปรที่ไม่คงที่และสัญญาณรบกวนจากภายนอก มีค่าน้อย [20] โดยมีหลักการทำงานคือ พยายามให้ระบบวิ่งเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อน (Sliding Surface) ซึ่งเป็นเส้นการทำงานที่ต้องการ และพยายามรักษาการทำงานให้เป็นไปตามพื้นผิวนั้นๆ

### 2.2.1 หลักการออกแบบ

การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ 1.การออกแบบพื้นผิวการเลื่อนเพื่อให้ระบบตอบสนองได้ตามที่ต้องการ และ 2.การควบคุมให้ระบบวิ่งเข้าและรักษาสถานะให้อยู่ในพื้นผิวการเลื่อน[21]

#### 2.2.1.1 การออกแบบพื้นผิวการเลื่อน

พื้นผิวการเลื่อนคือตัวแทนทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายพฤติกรรมที่เราต้องการให้ระบบคงอยู่ สมการพื้นผิวการเลื่อนทั่วไปสำหรับระบบเชิงเส้นหนึ่งลำดับสามารถเขียนได้ในรูปของข้อผิดพลาด  $e(t)$  ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างค่าที่ต้องการและค่าจริงของระบบ [22]

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad c > 0 \quad (2.13)$$

โดยที่  $e(t)$  คือ ค่า Error ของค่าที่ต้องการกับค่าจริง  
 $c$  คือ ค่าที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมในการควบคุม

### 2.2.1.2 การเลื่อนให้ระบบอยู่บนพื้นผิวการเลื่อน

หลังจากการออกแบบพื้นผิวการเลื่อนแล้ว ต่อมาคือการทำให้ระบบวิ่งเข้าหาพื้นผิวการ และรักษาการทำงานบนพื้นผิวการเลื่อนนั้นๆ โดยการทำให้ระบบวิ่งเข้าพื้นผิวการเลื่อนนั้นจะดำเนินผ่านเงื่อนไขเข้าถึง (Reachability Condition) ซึ่งเป็นไปตามสมการอย่างง่ายดังนี้ [23]

$$\dot{s}s < 0 \quad (2.14)$$

โดยที่  $s$  คือ พื้นผิวการเลื่อน  
 $\dot{s}$  คือ อนุพันธ์ของพื้นผิวการเลื่อน

การทำให้ระบบเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อนนั้น ดำเนินการผ่านกฎการเข้าถึง (reaching law) โดยมีกฎที่ได้รับการยอมรับและใช้งานทั้งหมด 4 กฎ [20] คือ

#### 1. กฎการเข้าถึงที่มีอัตราคงที่

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) ; \quad \varepsilon > 0 \quad (2.15)$$

โดยที่  $\varepsilon$  แทนอัตราคงที่

กฎนี้บังคับให้ตัวแปรการสลับเข้าถึงพื้นผิวการสลับ  $s$  ด้วยอัตราคงที่  $\varepsilon$  ข้อดีของกฎการเข้าถึงนี้คือความเรียบง่าย แต่ในภายหลัง หาก  $\varepsilon$  มีขนาดเล็กเกินไป เวลาในการเข้าถึงจะนานเกินไป ในทางกลับกัน หาก  $\varepsilon$  มีขนาดที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรง

#### 2. กฎการเข้าถึงแบบเอ็กโพเนนเชียล

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks ; \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (2.16)$$

โดยที่  $s$  อยู่ในเทอมของเอ็กโพเนนเชียล และ  $s = s(0)e^{-kt}$   
 $\varepsilon$  แทน อัตราคงที่  
 $k$  คือ ค่าคงที่

จะเห็นได้ว่า ด้วยการเพิ่มเทอมอัตราสัดส่วน  $-ks$  จะบังคับให้ระบบวิ่งเข้าสู่พื้นผิวการสลับอย่างรวดเร็วเมื่อ  $s$  มีขนาดใหญ่ขึ้น

ถ้าหากเราใช้กฎการเข้าถึงแบบเอ็กโพเนนเชียลในการออกแบบตัวควบคุม นิยามฟังก์ชันเลียปูนอฟ

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (2.17)$$

โดยที่  $V$  คือ ฟังก์ชันเลียปูนอฟ  
 $s$  คือ พื้นผิวการเลื่อน

จะได้ว่า

$$\dot{V} \leq -\varepsilon|s| - ks^2 = -\frac{k}{s}V - \varepsilon|s| \leq -\frac{k}{s}V \quad (2.18)$$

โดยที่  $\varepsilon$  แทน อัตราคงที่  
 $k$  คือ ค่าคงที่

ให้ ค่าคงที่บวก  $\alpha = k/2, f=0$  จะได้ว่า

$$V(t) \leq e^{\frac{k}{2}(t-t_0)} V(t_0) \quad (2.19)$$

ในกฎการเข้าถึงแบบเอ็กโพเนนเชียล เพื่อรับประกันความเร็วในการวิ่งเข้าถึงที่เร็วขึ้น โดยเฉพาะเมื่อ  $s$  ใกล้เคียงกับศูนย์ จะใช้เงื่อนไข  $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$  นอกจากนี้ เพื่อลดการสั่น เราควรออกแบบค่า  $k$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้ค่า  $\varepsilon$  ที่เล็กลง

### 3. กฎการเข้าถึงที่มีอัตรากำลัง

$$\dot{s} = -k|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s); \quad k > 0, 1 > \alpha > 0 \quad (2.20)$$

โดยที่  $\alpha$  แทน อัตราคงที่กำลัง  
 $k$  คือ ค่าคงที่

กฎการเข้าถึงนี้จะเพิ่มความเร็วในการเข้าถึงเมื่อสถานะอยู่ห่างจากที่พร้อมสวิตซ์ซิ่ง แต่จะลดลงเมื่อสถานะอยู่ใกล้ที่พร้อม ผลลัพธ์คือโหมดการเข้าถึงที่รวดเร็วและการสั่นสะเทือนต่ำ

### 4. กฎการเข้าถึงทั่วไป

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - f(s); \quad \varepsilon > 0 \quad (2.21)$$

โดยที่  $\varepsilon$  แทนอัตราคงที่

$f(s)$  คือ ฟังก์ชันของพื้นผิวการเลื่อน ซึ่ง  $f(0) = 0$  และ  $s \neq 0$ ,  $sf(s) > 0$

จากกฎทั้งหมด 4 แบบข้างต้นจะสามารถใช้เพื่อตอบสนองต่อเงื่อนไขการเข้าถึงได้

### 2.2.1.3 การรักษาให้ระบบอยู่บนพื้นผิวการเลื่อน

หลังจากที่ระบบวิ่งเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อนนั้นคือ  $\dot{s} = cx_1 + x_2 = 0$  และการเลื่อนปรับค่าต่างๆในฟังก์ชัน  $x_1(t)$  และ  $x_2(t)$  ยังอยู่บนพื้นผิวการเลื่อนนั้น จะได้ว่า  $s = \dot{s} = 0$  ดังนั้น [22]

$$\dot{s} = cx_2 + f(x_1, x_2, t) + u = 0 \quad , \quad s(t_r) = 0 \quad (2.22)$$

โดยที่  $c$  คือ ค่าที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมในการควบคุม

$x_1$  คือ ตัวแปรในพื้นผิวการเลื่อน ในที่นี้คือค่าความผิดพลาด

$x_2$  คือ ตัวแปรในพื้นผิวการเลื่อน ในที่นี้คืออนุพันธ์ค่าความผิดพลาด

$u$  คือ สัญญาณควบคุม

$t_r$  คือ เวลาหลังจากเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อน

จะได้ฟังก์ชันควบคุมอย่างง่ายหรือการควบคุมเชิงสมมูล (Equivalent Control) คือ

$$u_{eq} = -cx_2 - f(x_1, x_2, t) \quad (2.23)$$

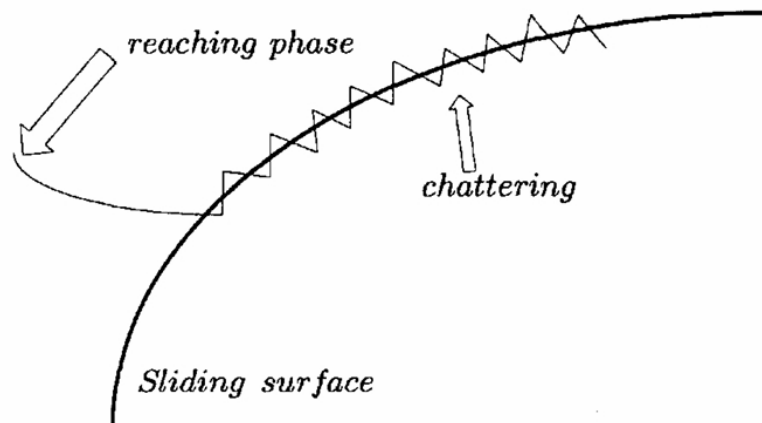
## 2.2.2 ปราบปรามการสั่น

สไลด์ดิงโหมดในทางปฏิบัติไม่สามารถทำงานแบบอุดมคติได้ เพราะจะต้องควบคุมการสลับด้วยความถี่ที่ไม่มีที่สิ้นสุด ในความเป็นจริงมักเกิดข้อบกพร่องในการสลับ เช่น ความล่าช้าในการสลับหรือค่าคงที่เวลาที่เล็กในตัวกระตุ้น ซึ่งจะทำให้เกิดพฤติกรรมเฉพาะในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นผิวการควบคุมที่เรียกว่า การสั่น (Chattering)

ปราบปรามการสั่นเป็นปัญหา เพราะแม้ว่ามันจะสามารถกรองจากเอาต์พุตของกระบวนการได้ แต่ก็อาจทำให้เกิดโหมดความถี่สูงที่ไม่ต้องการ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงและอาจทำให้เกิดความไม่เสถียร นอกจากนี้ การสั่นยังทำให้ชิ้นส่วนกลไกเสื่อมสภาพเร็วขึ้นและทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในวงจรไฟฟ้าอย่างมาก

ด้วยเหตุนี้ หลายวิธีถูกพัฒนาเพื่อกำจัดหรือลดการสั่น หนึ่งในวิธีการทั่วไปคือการควบคุมบริเวณใกล้เคียงพื้นผิวการสลับ โดยใช้ฟังก์ชันต่อเนื่องแทนฟังก์ชันซิกนัม (Signum Function) เช่น ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Function) หรือฟังก์ชันอิ่มตัว (Saturation Function) อย่างไรก็ตาม

แม้การสั่นจะลดลง ความสามารถในการทนต่อความแปรปรวนของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งก็อาจลดลงด้วย อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้คือการนำทฤษฎีโหมดการสั่นไกลชั้นสูงมาใช้ [23]

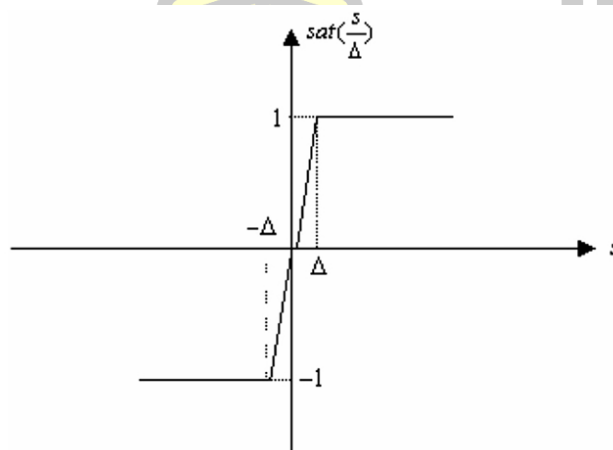


ภาพประกอบ 2.3 ปรากฏการณ์การสั่น [23]

#### 2.2.2.1 การกำจัดการสั่น: Quasi-Sliding Mode

จะเห็นได้ว่าการใช้ฟังก์ชันซิกนัม ทำให้เกิดการสั่นโดยเฉพาะกับสัญญาณรบกวนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบ หนึ่งในวิธีจัดการกับการสั่นที่เกิดขึ้นคือการใช้วิธี Quasi-Sliding Mode ซึ่งยังทำให้สถานะยังคงอยู่ในระยะของขอบเขตที่กำหนด  $\delta$  โดยที่  $\delta$  เรียกว่า ระดับขอบเขต (Boundary Layer) [24]

โดยปกติจะใช้อยู่ 2 วิธีสำหรับการออกแบบ Quasi-Sliding Mode ซึ่งเป็นการแทนที่ฟังก์ชันซิกนัม ด้วยฟังก์ชันอื่นๆในระบบที่มีความต่อเนื่อง [24]



ภาพประกอบ 2.4 ฟังก์ชันอิมิตัว

## 1. ฟังก์ชันอิ่มตัว (Saturation Function) [25]

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \delta \\ ks & |s| \leq \delta \\ -1 & s < -\delta \end{cases}; k = \frac{1}{\delta} \quad (2.24)$$

โดยที่  $\delta$  คือ ค่าระดับขอบเขต

เมื่อระบบยังคงอยู่ภายนอกขอบเขตที่กำหนดไว้ จะยังคงใช้การควบคุมในลักษณะสลับ หรือฟังก์ชันซิกนัม และเมื่อระบบอยู่ในระดับขอบเขต เราจึงจะใช้การควบคุมส่งกลับแบบเชิงเส้น ด้วยวิธีนี้จะสามารถกำจัด การสั่นได้

## 2. ฟังก์ชันรีเลย์ (Relay Function)

$$\theta(s) = \frac{s}{|s| + \gamma} \quad (2.25)$$

โดยที่  $\gamma$  = ค่าคงที่บวกที่มีขนาดเล็ก

## 2.2.3 กฎการควบคุม [26]

จากการออกแบบข้างต้นสามารถสร้างกฎการควบคุมได้ดังสมการ

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (2.26)$$

โดยที่  $u_{eq} = -cx_2 - f(x_1, x_2, t)$  และ  $u_{sw} = s = -\varepsilon \text{sgn}(s)$ ;  $\varepsilon > 0$  จะได้สมการที่สร้างขึ้นต่อระบบดังนี้

$$u = -cx_2 - f(x_1, x_2, t) + -\varepsilon \text{sgn}(s) \quad (2.27)$$

พบว่ามีความพารามิเตอร์สำคัญ 2 ตัวที่ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบควบคุม ได้แก่  $c$  และ  $\varepsilon$  โดยพารามิเตอร์  $c$  มีบทบาทในการกำหนดความชันของพื้นผิวการควบคุม ซึ่งส่งผลต่อความเร็วในการตอบสนองของระบบ ส่วนพารามิเตอร์  $\varepsilon$  ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วในการเข้าถึงพื้นผิวของตัว [27]

การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ  $c$  และ  $\varepsilon$  จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบ โดยค่าที่น้อยเกินไปของ  $c$  อาจทำให้ระบบตอบสนองช้า และค่าที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการสั่นในระบบ [6] ในขณะเดียวกัน หากค่าของ  $\varepsilon$  ไม่ถูกปรับให้เหมาะสม อาจทำให้การควบคุมสูญเสียความแม่นยำหรือทำให้ระบบไม่สามารถคงเสถียรภาพได้ [22]

ดังนั้น การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ทั้งสองจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการออกแบบตัวควบคุม การปรับค่าดังกล่าวสามารถช่วยให้ตัวควบคุมสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยคงความเสถียรและลดผลกระทบจากความไม่แน่นอนหรือการรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในระบบควบคุม [28],[29]

## 2.3 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม คือกระบวนการทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมที่มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาชุดของค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากระบบหรือกระบวนการที่กำลังศึกษา เทคนิคนี้สามารถใช้ได้ในหลายสาขา เช่น การวางแผนผลิต การออกแบบระบบทางวิศวกรรม การแก้ปัญหาทางการเงิน และการเรียนรู้ของเครื่อง [8]

โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมจะเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดพฤติกรรมของระบบ และเราต้องการหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันนั้นสูงสุดหรือต่ำสุด การเลือกใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะของฟังก์ชัน เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) หรือฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinear Function) ซึ่งมีวิธีการแก้ไขที่แตกต่างกัน [30]

การหาค่าที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการออกแบบและปรับปรุงระบบ เนื่องจากช่วยให้เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดต้นทุน หรือปรับปรุงคุณภาพของผลลัพธ์ให้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมสามารถลดความผิดพลาดในการควบคุมและเพิ่มความเสถียรของระบบได้ [31]

### 2.3.1 วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO)

วิธีฝูงอนุภาค เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการเคลื่อนที่ของฝูงสัตว์ในธรรมชาติ อัลกอริทึมนี้ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart ในปี 1995 โดยมีแนวคิดหลักคือการใช้พฤติกรรมทางธรรมชาติของฝูงนกหรือฝูงปลาที่ร่วมมือกันในการค้นหาอาหารหรือหลบหนีจากศัตรู [32] ระบบการค้นหาของฝูงสัตว์นี้ไม่มีผู้นำหรือศูนย์กลางควบคุม แต่ฝูงสัตว์สามารถสื่อสารกันได้ผ่านตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของเพื่อนร่วมฝูง วิธีฝูงอนุภาค ใช้หลักการนี้ในการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่ของคำตอบในปัญหาที่ซับซ้อน แนวทางการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค คือการนำแนวคิดการเคลื่อนที่และการสื่อสารของฝูงสัตว์มาใช้ในอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยให้แต่ละอนุภาค หรือหน่วยคำตอบ เคลื่อนที่ไปในพื้นที่ของคำตอบตามความเร็วและตำแหน่งที่ได้รับการอัปเดตจากข้อมูลของฝูงและตัวเอง ในแต่ละครั้งอนุภาคจะมีการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ดีที่สุดที่เคยพบเอง (pbest) และค่าที่ดีที่สุดที่ฝูงทั้งหมดค้นพบ (gbest) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเคลื่อนที่ ทำให้วิธีฝูงอนุภาคสามารถทำการค้นหาค่าตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป [33]

ระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีฝูงอนุภาค ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ [9]

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นด้วยการกำหนดขอบเขตล่าง ( $X_{lower}$ ) และขอบเขตบน ( $X_{upper}$ ) สำหรับพารามิเตอร์ทั้งหมด จากนั้นทำการสุ่มหาค่าเริ่มต้นของแต่ละอนุภาค ( $X'$ ) ในแต่ละมิติ รวมถึงการสุ่มหาค่าความเร็วเริ่มต้น ( $V'$ ) หลังจากนั้นตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้นที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค คำนพบ ( $pbest$ ) และกำหนดค่าอนุภาคที่มีค่าตอบที่ดีที่สุดจากทุกอนุภาค ( $gbest$ ) ค่าตอบเหล่านี้ต้องเป็นค่าที่อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขที่บังคับไว้

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอนุภาค

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินและเปรียบเทียบค่าของอนุภาคแต่ละตัวเพื่อกำหนดค่า  $p_{best}$  สำหรับอนุภาคนั้น ๆ แล้วเลือกค่าที่ดีที่สุดจากค่า  $p_{best}$  เพื่อกำหนดเป็น  $gbest$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของแต่ละอนุภาคใหม่โดยใช้สมการ (2.26)

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 โดยถ้าความเร็วของอนุภาค  $v_{id}^{t+1} > v_d^{max}$  ให้  $v_{id}^{t+1} = v_d^{max}$  และถ้า  $v_{id}^{t+1} < v_d^{min}$ , ให้  $v_{id}^{t+1} = v_d^{min}$

ขั้นตอนที่ 6 ปรับเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละอนุภาคโดยใช้สมการ (2.28) จากนั้นให้ตรวจสอบคือ ถ้า  $x_{id}^{t+1} > p_d^{max}$ , ให้  $x_{id}^{t+1} = p_d^{max}$  และถ้า  $x_{id}^{t+1} < p_d^{min}$ , ให้  $x_{id}^{t+1} = p_d^{min}$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบว่าตำแหน่งใหม่ของอนุภาคต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขที่บังคับไว้ หากไม่สอดคล้อง ให้อนุภาคนั้นคงตำแหน่งเดิม

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงาน หากถึงค่าสูงสุดที่กำหนดให้หยุดทำงาน แต่ถ้ายังไม่ถึง ให้ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2

การเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาค สามารถคำนวณได้โดยใช้ความเร็วปัจจุบันและระยะทางระหว่าง  $pbest_{id}$  ถึง  $gbest_{id}$  ดังสมการที่ 2.28 และ 2.29

$$v_{id}^{t+1} = \omega \cdot v_{id}^t + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 \cdot rand() \cdot (gbest_{id} - x_{id}^t) \quad (2.28)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2.29)$$

องค์ประกอบที่สำคัญของวิธีฝูงอนุภาคและการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของระเบียบวิธีอนุภาค คือ

$d$  คือ มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา

$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  แทน ตำแหน่งของอนุภาคที่  $i$

$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$  แทน อัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่  $i$

$pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id})$  แทน ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคที่  $i$

$gbest_{id}$  แทน อนุภาคที่ค้นหาค่าตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด

$m$  คือ จำนวนอนุภาค

$n$  คือ จำนวนอนุภาคในฝูง

$t$  คือ ครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)

$\omega$  คือ ตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial Weight Factor)

$c_1, c_2$  คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง

rand() คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง  $[1, 0]$

$v_d^t$  คือ ความเร็วของอนุภาคที่  $i$  ในรอบที่  $t$  โดยที่  $v_d^{\min} < v_d^t < v_d^{\max}$

ค่า  $v^{\max}$  มีบทบาทสำคัญในการกำหนดความละเอียดของผลลัพธ์ หากตั้งค่า  $v^{\max}$  สูงเกินไป อนุภาคอาจเคลื่อนที่ผ่านจุดที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ แต่หากตั้งค่าต่ำเกินไป อนุภาคอาจไม่สามารถค้นหาได้ทั่วถึง ทำให้ไม่พบคำตอบที่ดี ดังนั้น จากการทดลอง พบว่าควรกำหนดค่า  $v^{\max}$  ให้มีค่าประมาณ 10-20% ของช่วงการเปลี่ยนแปลงของแต่ละตัวแปร

ค่าคงที่  $c_1$  และ  $c_2$  เป็นตัวแทนของน้ำหนักที่ส่งผลต่อความเร็วของอนุภาค โดยใช้พิจารณาจากตำแหน่ง pbest และ gbest ถ้ามีค่าน้อยเกินไป อนุภาคที่อยู่ห่างจากเป้าหมายอาจไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงจุดที่ต้องการได้ แต่ถ้าค่าสูงเกินไป อาจทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านเป้าหมายไปได้เช่นกัน จากการทดสอบ ค่าที่เหมาะสมสำหรับ  $c_1$  และ  $c_2$  ควรอยู่ระหว่าง 1.4 ถึง 2.0 การเลือกค่า  $\omega$  ที่เหมาะสมดังสมการที่ 2.30

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (2.30)$$

ค่าที่เหมาะสม คือ  $\omega_{\max} = 0.9$  และ  $\omega_{\min} = 0.4$

### 2.3.2 วิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm : BA)

วิธีผึ้งผึ้ง เป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่พัฒนาขึ้นเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ แนวคิดหลักของอัลกอริทึมนี้เกิดจากการสังเกตว่าผึ้งจะมีการแบ่งบทบาทในการค้นหาแหล่งอาหาร โดยผึ้งงานจะบินสำรวจพื้นที่เพื่อค้นหาแหล่งอาหารใหม่ และเมื่อพบแหล่งอาหารที่มีศักยภาพ ผึ้งจะกลับมาที่รังและทำการ "เต้นรำ" หรือการสื่อสารตำแหน่งของแหล่งอาหาร เพื่อให้ผึ้งตัวอื่นเข้าร่วมสำรวจและรวบรวมทรัพยากรจากแหล่งอาหารนั้น พฤติกรรมนี้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานของการพัฒนาอัลกอริทึม Bee Algorithm [34]

วิธีผึ้งผึ้ง ทำงานโดยใช้ประชากรของผึ้ง (หรืออนุภาค) ในการสำรวจพื้นที่ของคำตอบ โดยผึ้งจะถูกแบ่งเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ ผึ้งสำรวจ (Scout bee) ที่ทำหน้าที่ค้นหาแหล่งอาหารใหม่ในพื้นที่ที่ยังไม่ถูกสำรวจ และ ผึ้งงาน (Employee bee) ที่จะสำรวจเพิ่มเติมในพื้นที่ที่ผึ้งสำรวจพบว่ามีแหล่งอาหารที่มีคุณภาพสูงขึ้น กระบวนการนี้ช่วยให้สามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดได้เร็วขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป [35]

วิธีผึ้งผึ้ง เริ่มต้นด้วยการสุ่มเลือกตำแหน่งในพื้นที่ของคำตอบ จากนั้นผึ้งสำรวจจะเริ่มค้นหาคำตอบในพื้นที่ใหม่และประเมินคุณภาพของคำตอบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ผึ้งที่พบคำตอบที่ดีที่สุดจะส่งข้อมูลกลับไปผึ้งงาน ซึ่งจะเริ่มสำรวจเพิ่มเติมในบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบที่ผึ้งสำรวจพบ การทำงานนี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าจะถึงเงื่อนไขหยุด เช่น จำนวนรอบการค้นหาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า หรือเมื่อพบคำตอบที่มีความเหมาะสมเพียงพอ [36]

ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้ง ขั้นตอนดังต่อไปนี้ [37]

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นโดยให้ผึ้งสำรวจจำนวน  $n$  ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้จะต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ตามข้อกำหนดที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ พร้อมทั้งกำหนดรอบการทำงานซ้ำเริ่มต้นที่  $NC = 0$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสำรวจ จากนั้นจัดลำดับคำตอบตั้งแต่คำตอบที่ดีที่สุดไปจนถึงคำตอบที่ด้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี  $m$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 คัดแยกคำตอบ  $m = 5$  คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกประกอบด้วยคำตอบที่ดีที่สุด  $e$  คำตอบ และกลุ่มที่สองจะเป็นคำตอบที่ตรงลงมาจำนวน  $m-e$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตการค้นหาเพิ่มเติมในบริเวณรอบๆ คำตอบ  $e$  และ  $m-e$

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน  $n_{ep}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ คำตอบ  $e$  และ ผึ้งงานจำนวน  $n_{sp}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ คำตอบ  $m-e$

ขั้นตอนที่ 7 ทำการประเมินผลคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง จากนั้นเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด หากตรงตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหา แต่ถ้ายังไม่ถึงเงื่อนไขการหยุดให้เพิ่มจำนวนรอบการทำงานซ้ำ

ขั้นตอนที่ 9 ให้ผึ้งสำรวจจำนวน  $n-m$  ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วดำเนินการซ้ำขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมหรือบรรลุเงื่อนไขที่กำหนด

### 2.3.3 วิธีหมากรุก (Chess Algorithm : CA) [9]

เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยอัลกอริทึมหมากรุก (Chess Algorithm) ได้รับแรงบันดาลใจจากหลักการและกลยุทธ์ในเกมหมากรุกสากล ซึ่งเลียนแบบการเคลื่อนไหวและกลยุทธ์การเล่นของตัวหมากรุกแต่ละตัว เมื่อแนวคิดนี้ถูกนำมาปรับใช้ในกระบวนการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุด จะช่วยให้เกิดอัลกอริทึมที่มีเอกลักษณ์เฉพาะในหลายด้าน

การทำงานของอัลกอริทึมที่ได้จากแนวคิดนี้เปรียบเสมือนการเดินทางของตัวหมากรุก ซึ่งแต่ละตัวมีกฎเกณฑ์เฉพาะสำหรับการเคลื่อนไหว เช่นเดียวกับยุทธวิธีการเล่นที่มุ่งเน้นไปที่การครอบครองพื้นที่บนกระดาน การวางแผนการโจมตีและการป้องกัน รวมถึงการวิเคราะห์สถานการณ์ล่วงหน้าเพื่อเตรียมแผนให้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่กำลังเผชิญ

เนื่องจากเกมหมากรุกมีความซับซ้อนทั้งในกฎและยุทธศาสตร์ การนำแนวคิดเหล่านี้มาปรับใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดจึงเป็นการเปิดโอกาสให้เกิดการพัฒนาอัลกอริทึมที่มีศักยภาพในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีและการนำไปใช้ในสาขาต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยวิธีหามากรูมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สุ่มคำตอบเริ่มต้นตัวเบี่ยจำนวน  $n_p = 8$  ตัว ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ในขอบเขตที่กำหนด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำเป็น Iteration = 1

ขั้นตอนที่ 2 ทำการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากการสุ่มของตัวเบี่ย โดยคำนวณค่าฟังก์ชันของแต่ละคำตอบที่ได้รับ หลังจากนั้นทำการเรียงลำดับผลลัพธ์จากคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันดีที่สุด ไปจนถึงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 แทนคำตอบที่จัดเรียงลำดับแล้ว ด้วยตัวหมากต่างๆ โดยเริ่มจาก (1) ราชา 1 ตัวเป็นอันดับสำคัญสุด ต่อด้วย (2) ราชนี 1 ตัว (3) เรือ 2 ตัว (4) อัศวิน 2 ตัว และ (5) บาทหลวง 2 ตัว เป็นการจัดอันดับความสำคัญจากสูงส่งลงมาหมากที่มีความสำคัญน้อยสุด

ขั้นตอนที่ 4 ให้ตัวหมากแต่ละตัว ค้นหาคำตอบบริเวณรอบๆ ตามลักษณะการเดินของ ตัวหมากแต่ละชนิด

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินผลคำตอบที่ได้จากการสำรวจรอบๆ โดยคำนวณค่าฟังก์ชันสำหรับแต่ละคำตอบ แล้วหาคำตอบที่ดีที่สุดภายในบริเวณที่ตัวหมากค้นหาได้

ขั้นตอนที่ 6 เคลื่อนตัวหมากไปยังตำแหน่งที่มีค่าฟังก์ชันดีที่สุดจากการสำรวจในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบผลการค้นหาจากหมากทุกตัว คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหา

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบว่าติดอยู่ในคำตอบเฉพาะถิ่น (Local Optima) หรือไม่ หากพบว่าตรงตามเงื่อนไข ให้เริ่มกระบวนการออกจากคำตอบเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดของการค้นหา หากเงื่อนไขการหยุดตรงตามที่กำหนด ให้หยุดการค้นหา แต่ถ้ายังไม่ตรง ให้เพิ่มจำนวนรอบการทำซ้ำโดยกำหนด Iteration = Iteration + 1

ขั้นตอนที่ 10 สุ่มคำตอบเริ่มต้นใหม่สำหรับตัวเบี่ยจำนวน  $n_p = 8$  ตัว พร้อมคำนวณค่าฟังก์ชันของคำตอบที่สุ่มได้

ขั้นตอนที่ 11 รวมคำตอบที่ดีที่สุดจากตัวหมากทุกตัว (ราชา 1 ตัว, ราชนี 1 ตัว, เรือ 2 ตัว, อัศวิน 2 ตัว, บาทหลวง 2 ตัว) และคำตอบใหม่จากตัวเบี่ยทั้ง 8 ตัว รวมทั้งหมด 16 คำตอบ แล้วจัดเรียงลำดับจากคำตอบที่ดีที่สุดไปจนถึงคำตอบที่มีค่าดีน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 12 คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุด 8 อันดับแรก จากนั้นกลับไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 และทำซ้ำกระบวนการเรื่อย ๆ จนกว่าจะตรงตามเงื่อนไขการหยุด

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Ch. Uma Maheswararao, Y.S. Kishore Babu และK. Amaresh [38] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ

กระตุ้นแยก โดยมีเป้าหมายในการลด ค่าโอเวอร์ชูต, ค่าความผิดพลาดคงตัว และค่าเวลาเข้าสู่สมดุล โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการจำลองผล โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI Controller) ซึ่งได้ผลว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวควบคุม สัดส่วน-ปริพันธ์ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งยังทนต่อความไม่แน่นอนต่อสัญญาณรบกวนและยังสามารถให้ความเร็วที่ต้องการได้อย่างไร้ที่ติ

2.4.2 Gabriela Mamani, Jonathan Becedas และ Vicente Feliu Batlle [39] ได้ประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่มีความต่อเนื่องในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้มีความทนต่อความไม่แน่นอนสูง โดยทนต่อความเสียดทานแรงบิดของคูลอมบ์ และตัวแปรของน้ำหนักภาระ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความเฉื่อยในการหมุนของเพลาด้วย การทดลองได้แสดงให้เห็นว่า การใช้งานของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงไม่จำเป็นในการรู้ขอบเขตค่าของน้ำหนักภาระ การทดลองนี้ได้ทดลองกับตัวมอเตอร์กับเซอร์โวในการขับ โดยส่งค่าเข้าคอมพิวเตอร์เก็บไว้ในโปรแกรม Real Time Workshop ทำให้สามารถสร้างและใช้งานโค้ดผ่านโปรแกรม SIMULINK และฝังโค้ดลงในโปรแกรม MATLAB ผลที่ได้คือระบบค่อนข้างทนทานต่อความไม่แน่นอนของการเปลี่ยนค่าน้ำหนักภาระ

2.4.3 Hisashi Yajima, Hiroyuki Wakiwaka, Keiichi Minegishi, Nobuhiro Fujiwara และ Kazuya Tamura [2] ได้ศึกษาการควบคุมตำแหน่งด้วยความเร็วสูงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น โดยได้ศึกษา 1. โครงสร้างและหลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น 2. ลักษณะเฉพาะที่จำเป็นต่อการควบคุมตำแหน่งด้วยความเร็วสูงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น 3. ออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้นโดยมีค่าคงที่ทางเวลาทางกลน้อยที่สุด และ 4. วัดค่าเฉพาะของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น โดยได้ผลการศึกษาคือ ในการลดระยะเวลาสำหรับการควบคุมตำแหน่งด้วยความเร็วสูงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น ทำได้โดยการลดค่าคงที่ทางเวลาทางกลให้น้อยที่สุด ซึ่งทำได้ด้วยการเพิ่มขอบเขตของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณช่องว่างและบริเวณที่ขดลวดเคลื่อนที่

2.4.4 Neenu Thomas และ Dr. P. Poongodi [1] ได้ออกแบบการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุม PID โดยเลือกค่าตัวแปรจากการใช้เทคนิคการหาค่าวิธีพันธุกรรมยีนต์ ผ่านการจำลอง และนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกค่าตัวแปรด้วยวิธีอื่นๆ เช่น วิธี Ziegler and Nichols ผลการจำลองที่ได้คือ ผลตอบสนองจากการหาค่าด้วยวิธีพันธุกรรมยีนต์มีประสิทธิภาพและความเร็วที่สูงกว่าวิธี Ziegler and Nichols

2.4.5 Monier Habila, Fatih Anayib, Yiqin Xuec และ Mokhtar Shourand [18] ได้นำเสนอการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมในการหาค่าตัวแปรสำหรับตัวควบคุมแบบเลื่อนสำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น เนื่องด้วยตัวแปรของตัวควบคุมแบบเลื่อนนั้นมีค่าซับซ้อนและต้องผ่านการจำลองในการได้ค่ามาซึ่งจุดที่เหมาะสม ดังนั้นจึงนำเทคนิคการหาค่ามาช่วยลดเวลาและได้ค่าที่มีผลตอบสนองที่มีประสิทธิภาพที่สุด โดยได้ศึกษาผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการหาค่าใช้ทั้งหมด 3 วิธีคือ 1. วิธีฝูงผึ้ง 2. วิธีฝูงอนุภาค และ 3. วิธีการสอนและเรียนรู้ ผลลัพธ์การจำลองที่ได้คือ เทคนิคการหาค่าที่สามารถทำให้ระบบได้

ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงมด ซึ่งได้ผลที่เร็วกว่า 2วิธีข้างต้น ซึ่ง เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาคมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า

2.4.6 L. J. Mpanza และ J. O. Pedro [40] ได้เสนอการปรับจูนค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง ท่าทาง และมุมหัวของโดรน โดยใช้ Ant Colony Optimization (ACO) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ SMC 8 ค่า และเปรียบเทียบกับ การปรับด้วยมือและการใช้ Genetic Algorithm (GA) ผลการจำลองแสดงว่า ACO-SMC มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ GA-SMC และดีกว่าการจูนด้วยมือ ปัญหาการค้นความถี่สูงได้รับการแก้ไขโดยใช้ฟังก์ชัน Saturation สรุปได้ว่า ACO และ GA ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมโดรนสี่ใบพัดได้อย่างชัดเจน.

2.4.7 Audomsi, Sitthisak และคณะ [41] นำเสนอการประยุกต์การใช้งานวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหมากรุกในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งใช้ในการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของการเชื่อมโยงโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในสองพื้นที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น จากการจำลองพบว่าหลักการวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหมากรุกสามารถหาค่าที่เหมาะสมได้ดีกว่าหลักการวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาคส่งผลให้สมรรถนะของตัวควบคุมโดยรวมดีขึ้น อีกทั้งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหมากรุกยังมีประสิทธิภาพซึ่งได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและไวกว่าหลักการวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบทดสอบ ซึ่งใช้เป็นระบบการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง แนวคิดวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหามารุก และการออกแบบโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

#### 3.1 ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

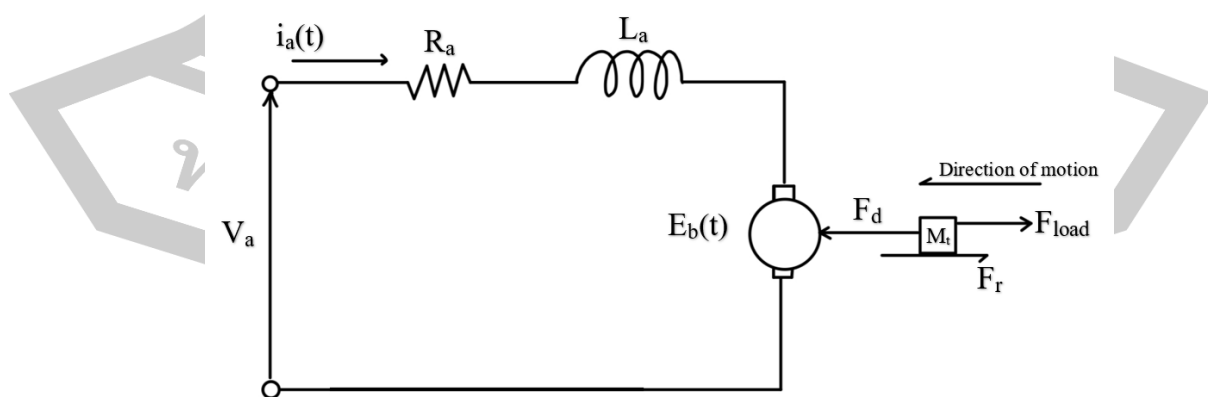
จากทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปที่มีลักษณะในการหมุน สามารถดัดแปลงมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น ที่มีลักษณะในการเคลื่อนที่โหลดแบบเชิงเส้นนั้นคือดิงและผลึก ดังนั้นจึงสามารถแทนที่แรงบิดด้วยแรงทั่วไปตามกฎของนิวตัน

$$\sum_{i=1}^n F = Ma$$

(3.1)

โดยที่  $F =$  แรง  
 $M =$  มวล  
 $a =$  ความเร่ง

จากลักษณะวงจรทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้สามารถประมาณ วงจรสมมูลที่เป็นไปได้ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น แสดงดังภาพประกอบที่ 3.1 โดยเปลี่ยนจากแรงบิดในการหมุน เป็นแรงที่ใช้แนวการเคลื่อนที่เชิงเส้น



ภาพประกอบ 3.1 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

จากกฎของนิวตัน และลักษณะเส้นจากภาพประกอบที่ 3.1 จะได้ว่า

$$M_t \frac{dv(t)}{dt} = F_d(t) - F_c - F_s - F_{load} \quad (3.2)$$

โดยที่  $v(t)$  = ความเร็วมอเตอร์  
 $M_t$  = มวลที่ใช้ในการเคลื่อนที่  
 $F_d$  = แรงขับของมอเตอร์  
 $F_c$  = แรงเสียดทานคูลอมบ์  
 $F_s$  = แรงเสียดทานสถิตเมื่อเริ่มเคลื่อนที่  
 $F_{load}$  = แรงต้านการเคลื่อนที่อื่นๆ

จากสมการข้างต้นทำให้สามารถประมาณแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$F_r = Fv(t) + F_c + F_s \quad (3.2)$$

โดยที่  $F_r$  = แรงเสียดทาน  
 $F$  = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานชนิด

เนื่องจากธรรมชาติของแรงเสียดทานความหนืดนั้นไม่เป็นเชิงเส้นจึงแสดงอยู่ในรูปของแปรทางเวลา เราสามารถรวม แรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานคูลอมบ์ ลงในตัวแปร  $F_{load}$  เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ ดังนั้นจะได้สมการอนุพันธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{K_i}{M_t} - \frac{Fv(t)}{M_t} - \frac{F_{load}}{M_t} \quad (3.3)$$

และสมการทางไฟฟ้า

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{R_a i_a(t)}{L} - \frac{Kv(t)}{L} - \frac{e_a(t)}{L} \quad (3.4)$$

โดยที่  $i_a(t)$  = กระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์  
 $v(t)$  = ความเร็วมอเตอร์  
 $R_a$  = ความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์  
 $K$  = ค่าคงที่แรงขับและ Back EMF  
 $L$  = ความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์มาเจอร์  
 $e_a(t)$  = แรงดันขาเข้าของขดลวดอาร์มาเจอร์

ทำการแปลงลาปลาซ โดยที่สมมติให้  $F_{load}$  มีค่าเท่ากับ 0 เพื่อความง่ายในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้ว่า

$$sV(s) = \frac{KI_a(s)}{M_t} - \frac{FV(s)}{M_t} \quad (3.5)$$

โดยที่  $V(s)$  คือ ความเร็วของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

$F$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$K$  คือ ค่าคงที่มอเตอร์

$I_a(s)$  คือ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

$M_t$  คือ มวลที่ใช้ในการเคลื่อนที่

$$I_a(s) = -\frac{R_a I_a(s)}{L} - \frac{KV(s)}{L} - \frac{E_a(s)}{L} \quad (3.6)$$

โดยที่  $I_a(s)$  คือ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

$R_a$  คือ ความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์

$K$  คือ ค่าคงที่แรงขับและ back emf

$V(s)$  คือ ความเร็วของมอเตอร์ในโดเมน Laplace

$L$  คือ ความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์มาเจอร์

$E_a(s)$  คือ แรงดันขาเข้าของขดลวดอาร์มาเจอร์ในโดเมน Laplace

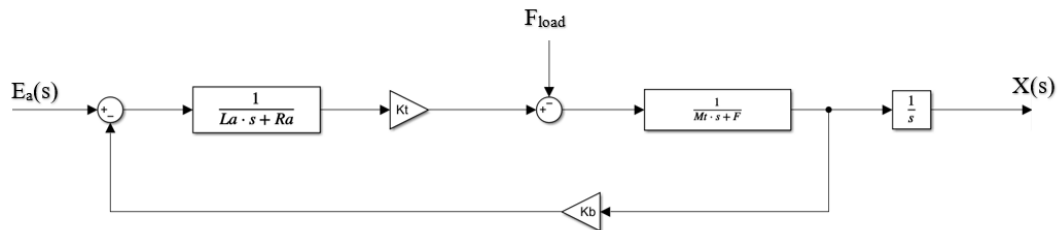
เราสามารถหาค่าของ  $I_a(s)$  จากสมการที่ 3.5 และแทนในสมการที่ 3.6 เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันฝั่งขาเข้า  $E_a(s)$  และความเร็ว  $V(s)$  ของมอเตอร์

$$\frac{V(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K}{LM_t}}{s^2 + \left(\frac{F}{M_t} + \frac{R_a}{L}\right)s + \left(\frac{FR_a + K^2}{LM_t}\right)} \quad (3.7)$$

การควบคุมตำแหน่ง ในกรณีที่เราสนใจการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตแรงดันและตำแหน่งของมอเตอร์ ( $X(s)$ ) จะได้หาปริพันธ์ของความเร็ว ( $V(s)$ ) ซึ่งในโดเมน Laplace สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{V(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K}{LM_t}}{s^3 + \left(\frac{F}{M_t} + \frac{R_a}{L}\right)s^2 + \left(\frac{FR_a + K^2}{LM_t}\right)s} \quad (3.8)$$

สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังนี้



ภาพประกอบ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

ตาราง 3.1 พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$R_a$	2.7 $\Omega$
$L_a$	0.414 H
$M_t$	0.30 kg
$K_b$	0.732 v/m/sec
$K_t$	0.732 N/A
F	0.712 N/m/sec

เราสามารถลดรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ได้จากค่าคงที่เวลาของมอเตอร์โดยที่ค่าคงที่เวลาของฝั่งไฟฟ้านั้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อนำไปเทียบกับค่าคงที่เวลาของฝั่งทางกล จะได้ว่า

$$\frac{X(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{M_t R_a s^2 + (F R_a + K^2) s} \quad (3.9)$$

ทำให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

$$\frac{X(s)}{E_a(s)} = \frac{K_s}{s(\tau_s s + 1)} \quad (3.10)$$

โดยที่

$$K_s = \frac{K}{F R_a + K^2} \quad (3.11)$$

$$\tau_s = \frac{M_t R_a}{FR_a + K^2} \quad (3.12)$$

### 3.2 ออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งตามทฤษฎี ซึ่งต้องเหมาะสมกับระบบที่ต้องควบคุมนั้นคือระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น ซึ่งจะประกอบไปด้วยการออกแบบพื้นผิวการเลื่อน และการควบคุมระบบให้อยู่บนพื้นผิวการเลื่อนนั้นๆ

การออกแบบพื้นผิวการเลื่อน จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น นั้นจะเห็นได้ว่าเป็นระบบลำดับสอง ซึ่งสามารถใช้สมการทั่วไปของพื้นผิวการเลื่อนได้ว่า

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad c > 0 \quad (3.13)$$

โดยที่  $e(t)$  คือ ค่า Error ของค่าที่ต้องการกับค่าจริง  
 $c$  คือ ค่าที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมในการควบคุม

และค่าerrorในที่นี้ คือตำแหน่งที่ต้องการ ( $x_r$ ) และตำแหน่งจริงของมอเตอร์ ( $x_m$ ) นั่นคือ

$$e(t) = x_r - x_m \quad (3.14)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{x}_r - v \quad (3.15)$$

ต่อมาเป็นการเลื่อนให้ระบบอยู่บนพื้นผิวการเลื่อนและรักษาให้ระบบคงอยู่บนพื้นผิวการเลื่อน โดยจำเป็นต้องผ่านเงื่อนไขการเข้าถึง

$$ss < 0 \quad (3.16)$$

โดยที่  $s$  คือ พื้นผิวการเลื่อน  
 $\dot{s}$  คือ อนุพันธ์ของพื้นผิวการเลื่อน

เพื่อให้ตอบสนองต่อเงื่อนไขการเข้าถึงข้างต้น จึงจำเป็นต้องใช้กฎการเข้าถึงโดยเลือกใช้กฎการเข้าถึงที่มีอัตราคงที่

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) ; \quad \epsilon > 0 \quad (3.17)$$

โดยที่  $\varepsilon$  แทนอัตราคงที่

และเพื่อกำจัดการเกิดการสั่น จึงเปลี่ยนฟังก์ชันซิกนัมเป็นฟังก์ชันอ้อมตัว

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \delta \\ ks & |s| \leq \delta \\ -1 & s < -\delta \end{cases}; k = \frac{1}{\delta} \quad (3.18)$$

โดยที่  $\delta$  คือ ค่าระดับขอบเขต

ต่อมาเป็นการออกแบบสมการที่รักษาให้ระบบยังคงอยู่บนพื้นผิวการเคลื่อน นั้นคือการใช้ฟังก์ชันอย่างง่ายหรือการควบคุมเชิงสมดุล

$$u_{eq} = -cx_2 - f(x_1, x_2, t) \quad (3.19)$$

โดยที่  $c$  คือ ค่าที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมในการควบคุม

$x_1$  คือ ตัวแปรในพื้นผิวการเคลื่อน ในที่นี้คือค่าความผิดพลาด

$x_2$  คือ ตัวแปรในพื้นผิวการเคลื่อน ในที่นี้คืออนุพันธ์ค่าความผิดพลาด

จะได้ว่า

$$u_{eq} = \frac{M_t R_a}{K} (\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + \left( \frac{FR_a + K^2}{M_t R_a} - c \right) \dot{x}_m + \frac{1}{M_t}) \quad (3.20)$$

ดังนั้นจะได้กฎการควบคุมของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง ดังนี้

$$u = \frac{M_t R_a}{K} (\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + \left( \frac{FR_a + K^2}{M_t R_a} - c \right) \dot{x}_m + \frac{1}{M_t} + \varepsilon * \text{sat}(s)) \quad (3.21)$$

จากกฎจะเห็นได้ว่า ในการใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงนี้จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ด้วยกันคือ ค่าพารามิเตอร์  $c$  เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับผลตอบสนองของระบบ หลังจากเข้าสู่พื้นผิวแล้ว ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  พารามิเตอร์ที่ส่งผลกับอัตราเข้าสู่พื้นผิวการเคลื่อน และค่าพารามิเตอร์  $\delta$  เป็นค่าระดับขอบเขตซึ่งช่วยในการลดปรากฏการณ์การสั่น ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องผ่านการจำลองและทำซ้ำหลายๆครั้งเพื่อวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการหาเราจึงได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีต่างๆ

### 3.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหมากรุก

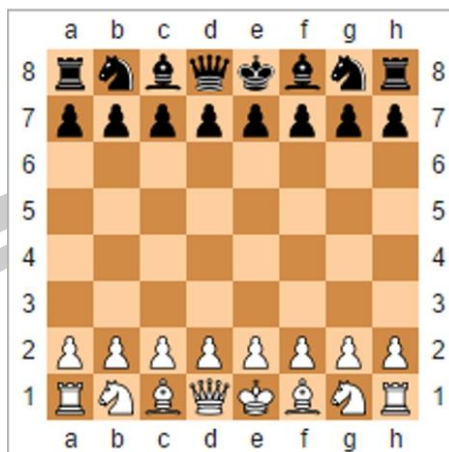
หมากรุกสากล (Chess) เป็นเกมกระดานแนววางแผนที่ผู้เล่นอยู่สองฝ่าย ซึ่งเล่นกันบนกระดานสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีช่องทั้งหมด 64 ช่อง โดยจะสลับสีกันและถูกเรียงแบบตาราง 8×8 ด้วยลักษณะนี้เองจึงเป็นที่นิยมที่ใช้ในการเล่น และยังเป็นเกมกระดานที่ยังคงได้รับความนิยมและสนใจอย่างมากในระดับโลก ทำให้มีผู้เล่นมากมายศึกษาและเข้าร่วมโดยสามารถเข้าร่วมเล่นกันได้หลากหลายพื้นที่ เช่น บ้าน พื้นที่สาธารณะ และออนไลน์ ด้วยเหตุนี้จึงมีการจัดแข่งขันเพื่อเพิ่มความเข้มข้นและดึงดูดผู้เล่นมากขึ้นหลายตา

ตัวหมากเริ่มต้นสำหรับผู้เล่นทั้งสองฝ่าย จะจัดวางทั้งหมด 16 ตัวประกอบไปด้วยราชา (King) 1 ตัว ราชนี (Queen) 1 ตัว เรือ (Rook) 2 ตัว อัศวิน (Knight) 2 ตัว บาทหลวง (Bishop) 2 ตัว และเบี้ย (Pawn) 8 ตัว หมากแต่ละประเภทจะมีลักษณะในการเดินหมากที่แตกต่างกัน โดยมีเป้าหมายในการเดินคือโจมตีและยึดตัวหมากของฝ่ายตรงข้าม เพื่อที่จะทำการรุกจน (Checkmate) หมากราชาของอีกฝ่าย นั่นคือผู้เล่นจึงต้องวางแผนการเดินเพื่อให้หมากราชาของฝ่ายตรงข้ามไม่สามารถรอดจากการถูกยึดได้ และเมื่อหมากราชาไม่สามารถเดินได้ต่อจะถือว่าแพ้เกมนั้นๆ ในกรณีที่เมื่อเดินหมากต่อไปแต่ไม่มีฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งสามารถยึดหมากราชาของอีกฝ่ายได้ จะถือว่าเกมนั้นเสมอ และยังมีการสมัครใจถอนตัวเมื่อผ่านการพิจารณาว่าการเดินหมากต่อไปนั้นไม่มีโอกาสชนะหรือเสมอเพื่อให้ฝ่ายตรงข้ามชนะ

กระดานของหมากรุกที่ใช้เล่นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีจัตุรัสแนวนอน เรียกว่า แรงค์ (Rank) แสดงด้วยหมายเลข 1-8 และจัตุรัสแนวตั้ง เรียกว่า ไฟล์ (File) แสดงด้วยอักษรในภาษาอังกฤษ a-h ซึ่งสีของจัตุรัสทั้งหมด 64 ช่องนี้จะมีลักษณะที่สลับกัน โดยมีจัตุรัสสีอ่อน (Light) และสีเข้ม (Dark) เริ่มต้นที่ปลายขวามือของแรงค์ที่ติดกับผู้เล่นจะเป็นจัตุรัสสีอ่อน ในขณะที่หมากจะตั้งตามภาพประกอบที่ 3.3 และหมากราชินีจะอยู่บนจัตุรัสที่มีสีคล้ายกับหมาก

ฝ่ายของผู้เล่นจะแบ่งด้วยสีของหมากโดยจะมีขาวและดำ ดังนั้นจึงแบ่งเป็น “ฝ่ายขาว” และ “ฝ่ายดำ” โดยทั่วไปฝ่ายสีขาวจะเป็นผู้เล่นที่ได้เดินหมากในตอนเริ่ม ช่วงเริ่มเกมนั้นผู้เล่นจะมีหมากทั้งหมด 16 ตัว นั่นคือราชาจำนวน 1 ตัว ราชนีจำนวน 1 ตัว เรือจำนวน 2 ตัว อัศวินจำนวน 2 ตัว บาทหลวงจำนวน 2 ตัว และเบี้ยจำนวน 8 ตัว

พจนัน ปณุกิตโต ชีวะ



ตำแหน่งเริ่มต้น

แถวแรก : เรือ อัศวิน บาทหลวง ราชนี ราชา อัศวิน และเรือ

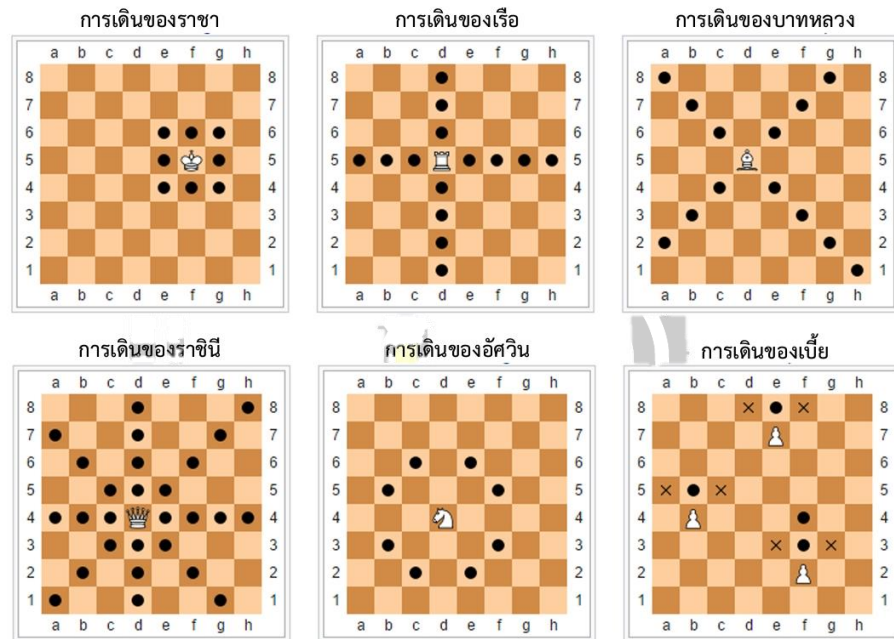
แถวที่สอง : เปี้ย

ภาพประกอบ 3.3 การตั้งกระดานหมากรุกสากล [9]

ในการเดินหมาก ผู้เล่นจะเดินหมากหนึ่งตัวสลับกัน เว้นแต่การเข้าป้อม (Castling) เนื่องจากการเดินหมากสองตัวพร้อมกัน ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ผู้เล่นฝ่ายสีขาวจะต้องเริ่มก่อนเสมอ ในการเคลื่อนที่หมากนั้นจัตุรัสที่หมากจะเคลื่อนไปนั้นจะต้องว่างหรือมีหมากของฝ่ายตรงข้ามอยู่ก่อน เมื่อเดินหมากไปยังจัตุรัสที่มีหมากของฝ่ายตรงข้ามอยู่ หมากนั้นจะถูกยึดและนำออกจากกระดาน ดังนั้นหมากทุกตัวจึงมีบทบาทสำคัญในการยึดหมากของฝ่ายตรงข้าม เว้นแต่การกินผ่าน (En-passant) เนื่องจากการยึดหมากฝ่ายตรงข้ามโดยที่ไม่ต้องเดินเข้าจัตุรัสนั้นๆ เมื่อผู้เล่นไม่สามารถเดินหมากได้ต่อ นั่นคือ ไม่ว่าจะเดินหมากอย่างไรหมากราชาก็จะถูกยึดอยู่ดี เป็นการรุกราน และแพ้ เกมนั้น ดังนั้น เมื่อหมากราชานั้นเสี่ยงต่อการถูกยึดผู้เล่นจะถูกบังคับให้ปกป้องหมากราชา

หมากแต่ละตัวมีลักษณะเฉพาะในการเดินซึ่งแตกต่างกัน ในภาพประกอบที่ 3.4 จะแสดงถึงการเดินของหมากแต่ละตัวตั้งแต่ตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งปลายทางที่เดินได้ โดยจะมีจุดเป็นสัญลักษณ์โดยที่ไม่มีหมากตัวอื่นมาขวางเส้นทางการเดิน

พูนุ ปณุกิตโต ชิว



ภาพประกอบ 3.4 การเดินหมากแต่ละตัว [9]

หมากราชามีความสามารถในการเดินไปได้หนึ่งช่องรอบตัว และมีการเดินพิเศษคือ การเข้าป้อม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการลักษณะของการเดินหมากเรือด้วย

หมากเรือมีความสามารถเดินในช่องที่มีแรงค์และไฟล์เดียวกัน โดยสามารถเดินกี่ช่องก็ได้ แต่ไม่สามารถข้ามหมากที่ขวางทางเดินได้ ทั้งยังมีส่วนเกี่ยวข้องในการเดินพิเศษ คือการเข้าป้อมของหมากราชา

หมากบาทหลวงมีความสามารถในการเดินในแนวทแยงโดยที่สามารถเดินไปกี่ช่องก็ได้ แต่ไม่สามารถข้ามหมากที่ขวางทางได้

หมากราชินีมีความสามารถที่เป็นกรนำหมากเรือและหมากบาทหลวงมารวมเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถเดินในแรงค์และไฟล์เดียวกัน ทั้งยังเดินในแนวทแยง โดยสามารถไปกี่ช่องก็ได้ แต่ไม่สามารถข้ามหมากที่ขวางทางได้

หมากอัศวินมีความสามารถในการที่มีลักษณะคล้ายตัวอักษร L นั่นคือการเดินสองช่องในแนวอนและหนึ่งช่องในตั้ง หรือ การเดินสองช่องในแนวตั้งและหนึ่งช่องในอน ทำให้หมากอัศวินเป็นหมากที่มีความสามารถในการข้ามหมากที่ขวางทางได้

หมากตัวเบี้ยมีความสามารถในการเดินหนึ่งช่องข้างหน้าในไฟล์เดียวกัน แต่ในตอนเริ่มต้นของเกมจะสามารถเดินได้สองช่อง แต่ไม่สามารถข้ามหมากที่ขวางทางได้ ("●" แสดงหมากที่ไม่มี การกินในแผนภาพ) ลักษณะในการยึดหมากของฝ่ายตรงข้ามจะยึดในแนวทแยง ("x" แสดงการกินหมากในแผนภาพ) หมากเบี้ยมีการเดินพิเศษสองแบบ คือ การกินผ่าน และการเลื่อนขั้น (Promotion) โดยจะเลื่อนขั้นเป็นหมากที่มีศักยภาพมากขึ้น

การเข้าป้อมเป็นการเดินหมากแบบพิเศษ โดยจะสามารถทำได้หนึ่งครั้งต่อเกม กระทำด้วยการเดินหมากราชาไปสองช่องเข้าหาเรือและต้องอยู่ในแรงค์ 1 เท่านั้น และเดินหมากเรือไว้ที่จัตุรัสสุดท้ายที่หมากราชาเดินผ่านมา การเข้าป้อมจะทำได้เมื่อเข้าเงื่อนไขต่อไปนี้

หมากราชาและหมากเรือยังไม่เคยเดินเลยในเกมนั้น

ไม่มีหมากขวางทางในการเข้าป้อม

การเข้าป้อมจะต้องไม่ทำให้หมากราชานั้นเสี่ยงต่อการถูกยึด หรือทำให้พ้นจากการถูกรุก หรือผ่านการรุก

En-passant หรือการกินผ่าน สามารถทำได้เมื่อหมากเบี้ยเดินหน้าสองช่องจากตำแหน่งเริ่มต้นและมีเบี้ยอีกฝ่ายในไฟล์เดียวกัน ฝ่ายตรงข้ามจะสามารถยึดเบี้ยนั้นได้โดยการเดินผ่านหมากนั้นในแนวทแยง ซึ่งจะสามารถทำได้ในตาถัดไปเท่านั้น

การเลื่อนขั้น (Promotion) คือเมื่อเบี้ยเดินไปถึงแรงค์ 8 สำหรับฝ่ายสีขาว หรือแรงค์ 1 สำหรับฝ่ายสีดำ จะสามารถเปลี่ยนหมากเบี้ยเป็นหมากอื่นๆได้ ยกเว้นหมากราชา เป็นการชิงความได้เปรียบของกระดาน

เมื่อหมากราชาถูกโจมตีโดยหมากของฝ่ายตรงข้าม ไม่ว่าจะจากหมากหนึ่งตัวหรือหลายตัว เราจะเรียกสถานการณ์นั้นว่า "ราชาถูกรุก" ผู้เล่นที่ถูกรุกจะต้องตอบสนองโดยการเดินหมากตามกฎที่ถูกต้อง (Legal Move) เพื่อให้ตำแหน่งของหมากราชาปลอดภัยจากการโจมตี กล่าวคือ ทำให้สถานการณ์ไม่อยู่ในภาวะถูกรุก ซึ่งวิธีการที่ใช้แก้สถานการณ์นี้มีหลายวิธี เช่น การยึดหมากของฝ่ายตรงข้ามที่กำลังโจมตี หรือการเดินหมากมาตั้งขวางระหว่างราชากับหมากที่กำลังรุก (ใช้ได้เฉพาะเมื่อหมากที่รุกเป็นตัวราชินี ตัวเรือ หรือตัวบาทหลวง และมีช่องว่างระหว่างหมากนั้นกับราชา) อีกวิธีหนึ่งคือการเดินตัวราชาหลบไปยังตำแหน่งที่ปลอดภัยจากการโจมตี อย่างไรก็ตาม การเข้าป้อมไม่สามารถใช้ได้ในขณะที่ราชาถูกรุก

หากฝ่ายรุกทำการโจมตีตัวราชาของฝ่ายตรงข้ามพร้อมกับเตรียมกินหมากตัวอื่นด้วย หลังจากราชาเดินหลบ จะเรียกสถานการณ์นี้ว่า "รุกฆาต" แต่เป้าหมายสูงสุดของเกมหมากรุกคือการทำให้ฝ่ายตรงข้าม "รุกจน" (Checkmate) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อตัวราชาถูกรุกและไม่สามารถเดินตามกฎใดๆ ที่จะทำให้พ้นจากการโจมตีได้

แม้ว่าการรุกจนจะเป็นเป้าหมายหลักในการเล่นหมากรุก แต่ก็ไม่จำเป็นว่าเกมทุกเกมจะจบด้วยการรุกจน ผู้เล่นสามารถเลือกยอมแพ้กกลางเกมได้ ทำให้ฝ่ายตรงข้ามเป็นผู้ชนะ อีกทางหนึ่ง หากเป็นเกมที่มีการจำกัดเวลา ผู้เล่นอาจแพ้เพราะเวลาหมด แม้ว่าในสถานการณ์นั้นจะอยู่ในตำแหน่งที่ได้เปรียบก็ตาม นอกจากนี้ เกมยังอาจจบลงด้วยผลเสมอ ซึ่งเกิดได้จากหลายกรณี เช่น การเสมอโดยการตกลงกัน การเสมอเพราะไม่สามารถเดินตามกฎได้ (Stalemate) การเดินซ้ำกันสามครั้ง (Threefold Repetition of a position) กฎการเดินห้าสิบครั้ง (Fifty-move Rule) หรือการเสมอเพราะไม่มีหมากเพียงพอที่จะทำการรุกจน

สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิธีหมากรุก ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สุ่มคำตอบเริ่มต้นตัวเบี้ยจำนวน  $n_p = 8$  ตัว ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำเป็น Iteration = 1

ขั้นตอนที่ 2 ทำการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากการสุ่มของตัวเบ้ โดยคำนวณค่าฟังก์ชันของแต่ละคำตอบที่ได้รับ หลังจากนั้นทำการเรียงลำดับผลลัพธ์จากคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันดีที่สุดที่สุด ไปจนถึงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 แทนคำตอบที่จัดเรียงลำดับแล้ว ด้วยตัวหมากต่างๆ โดยเริ่มจาก (1) ราชา 1 ตัวเป็นอันดับสำคัญสุด ต่อด้วย (2) ราชินี 1 ตัว (3) เรือ 2 ตัว (4) อัศวิน 2 ตัว และ (5) บาทหลวง 2 ตัว เป็นการจัดอันดับความสำคัญจากสูงสุดลงมาหมากที่มีความสำคัญน้อยสุด

ขั้นตอนที่ 4 ให้ตัวหมากแต่ละตัว ค้นหาคำตอบบริเวณรอบๆ ตามลักษณะการเดินของ ตัวหมากแต่ละชนิด

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินผลคำตอบที่ได้จากการสำรวจรอบๆ โดยคำนวณค่าฟังก์ชันสำหรับแต่ละคำตอบ แล้วหาคำตอบที่ดีที่สุดภายในบริเวณที่ตัวหมากค้นหาได้

ขั้นตอนที่ 6 เคลื่อนตัวหมากไปยังตำแหน่งที่มีค่าฟังก์ชันดีที่สุดจากการสำรวจในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบผลการค้นหาจากหมากทุกตัว คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหา

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบว่าติดอยู่ในคำตอบเฉพาะถิ่น (Local Optima) หรือไม่ หากพบว่าตรงตามเงื่อนไข ให้เริ่มกระบวนการออกจากคำตอบเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดของการค้นหา หากเงื่อนไขการหยุดตรงตามที่กำหนด ให้หยุดการค้นหา แต่ถ้ายังไม่ตรง ให้เพิ่มจำนวนรอบการทำงานโดยกำหนด  $\text{Iteration} = \text{Iteration} + 1$

ขั้นตอนที่ 10 สุ่มคำตอบเริ่มต้นใหม่สำหรับตัวเบ้จำนวน  $n_p = 8$  ตัว พร้อมคำนวณค่าฟังก์ชันของคำตอบที่สุ่มได้

ขั้นตอนที่ 11 รวมคำตอบที่ดีที่สุดจากตัวหมากทุกตัว (ราชา 1 ตัว, ราชินี 1 ตัว, เรือ 2 ตัว, อัศวิน 2 ตัว, บาทหลวง 2 ตัว) และคำตอบใหม่จากตัวเบ้ทั้ง 8 ตัว รวมทั้งหมด 16 คำตอบ แล้วจัดเรียงลำดับจากคำตอบที่ดีที่สุดไปจนถึงคำตอบที่มีค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 12 คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุด 8 อันดับแรก จากนั้นกลับไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 และทำซ้ำกระบวนการเรื่อย ๆ จนกว่าจะตรงตามเงื่อนไขการหยุด

### 3.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ทดสอบ

การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงสำหรับควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง มีเกณฑ์ดัชนีในการวัดประสิทธิภาพของระบบทั้งหมด 2 เกณฑ์

#### 1. บริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE)

IAE ใช้ในการวัดพื้นที่ใต้กราฟของข้อผิดพลาดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งจะช่วยให้เห็นการตอบสนองโดยรวมของระบบในช่วงเวลาทั้งหมด

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (3.22)$$

## 2. ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE)

ISE จะเป็นการวัดข้อผิดพลาดโดยใช้การยกกำลังสอง ซึ่งทำให้สามารถให้ความสำคัญกับข้อผิดพลาดที่สูงขึ้นได้

$$ISE = \int_0^T e(t)^2 dt \quad (3.23)$$

นอกจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เหล่านี้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงเกณฑ์สมรรถนะในโดเมนเวลา ได้แก่ ค่าโอเวอร์ชูต ค่ารุ่งเวลา ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล และค่าความผิดพลาดคงตัว

ค่าโอเวอร์ชูต คือ ปริมาณที่การตอบสนองของระบบเกินค่าสถานะคงที่สามารถหาได้จากสมการ(3.24)

$$OS(\%) = \frac{y_{peak} - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\% \quad (3.24)$$

โดยที่  $y_{ss}$  คือ ค่าที่สถานะคงที่

$y_{peak}$  คือ ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงการตอบสนอง

ค่ารุ่งเวลา คือ ระยะเวลาที่ระบบตอบสนองจากระดับ 10% ของค่าสถานะคงที่ไปจนถึงระดับ 90% ของสถานะคงที่สามารถหาได้จากสมการ(3.25)

$$t_r = t_{10\%} - t_{90\%} \quad (3.25)$$

โดยที่  $t_{10\%}$  คือ เวลาที่ระบบตอบสนองได้ 10% ของค่าสถานะคงที่

$t_{90\%}$  คือ เวลาที่ระบบตอบสนองได้ 90% ของค่าสถานะคงที่

ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล คือ ระยะเวลาที่ระบบตอบสนองเข้าสู่ขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ( $\pm 2\%$ ) และคงที่อยู่ภายในขอบเขตนั้น สามารถหาได้จากสมการ(3.26)

$$y_{ss}(1-0.02) \leq y(t) \leq y_{ss}(1+0.02) \quad (3.26)$$

โดยที่  $t$  ในขอบเขตจะเป็น ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล  
 $y_{ss}$  คือ ค่าที่สถานะคงที่

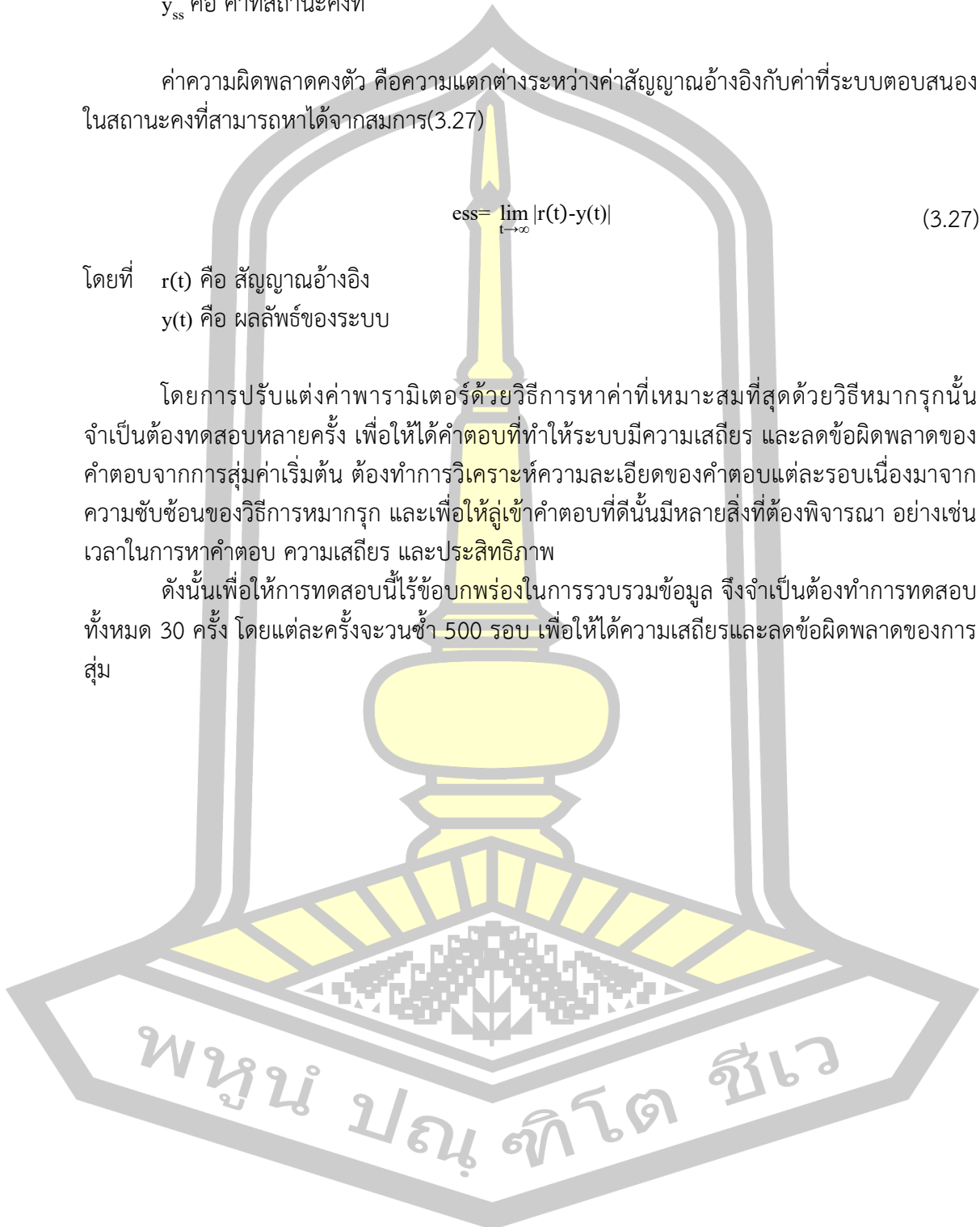
ค่าความผิดพลาดคงตัว คือความแตกต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับค่าที่ระบบตอบสนอง  
 ในสถานะคงที่สามารถหาได้จากสมการ(3.27)

$$ess = \lim_{t \rightarrow \infty} |r(t) - y(t)| \quad (3.27)$$

โดยที่  $r(t)$  คือ สัญญาณอ้างอิง  
 $y(t)$  คือ ผลลัพธ์ของระบบ

โดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีหามากรุกนั้น  
 จำเป็นต้องทดสอบหลายครั้ง เพื่อให้ได้คำตอบที่ทำให้ระบบมีความเสถียร และลดข้อผิดพลาดของ  
 คำตอบจากการสุ่มค่าเริ่มต้น ต้องทำการวิเคราะห์ความละเอียดของคำตอบแต่ละรอบเนื่องมาจาก  
 ความซับซ้อนของวิธีการหามากรุก และเพื่อให้รู้ค่าคำตอบที่ได้นั้นมีหลายสิ่งที่จะต้องพิจารณา อย่างเช่น  
 เวลาในการหาคำตอบ ความเสถียร และประสิทธิภาพ

ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบนี้ไร้ข้อบกพร่องในการรวบรวมข้อมูล จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบ  
 ทั้งหมด 30 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะวนซ้ำ 500 รอบ เพื่อให้ได้ความเสถียรและลดข้อผิดพลาดของการ  
 สุ่ม

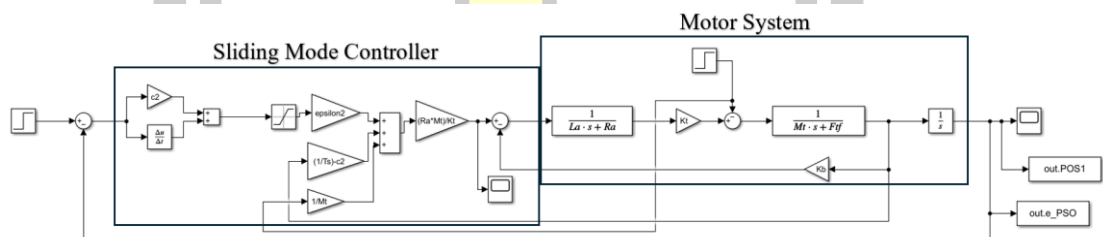


## บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของระบบทดสอบ ซึ่งเป็นระบบการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น โดยจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการจำลอง ผลการจำลองแสดงถึงผลการตอบสนอง ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงด้วยฝูงอนุภาค และการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงด้วยวิธีหมากรุก

### 4.1 ผลการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงด้วยฝูงอนุภาค

จากขั้นตอนการออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ดังภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 การจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ปรับพารามิเตอร์โดยวิธีฝูงอนุภาค

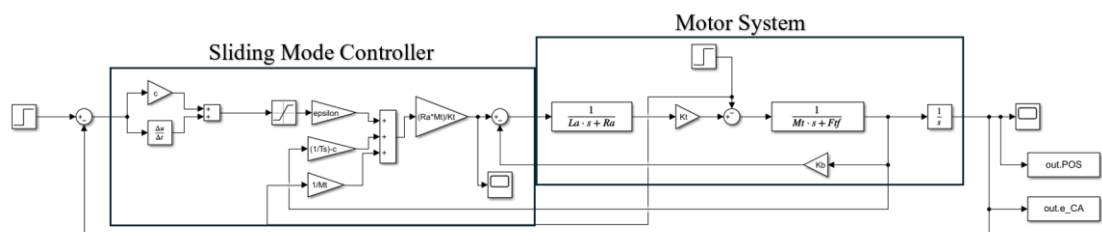
จากภาพประกอบ 4.1 แสดงให้เห็นถึงตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงซึ่งใช้ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงแบบเชิงเส้น มีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องปรับโดยใช้เทคนิคการหาที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาคมีทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์  $c$  เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับผลตอบสนองของระบบหลังจากเข้าสู่พื้นผิวแล้ว ค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  พารามิเตอร์ที่ส่งผลกับอัตราเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อน และค่าพารามิเตอร์  $\delta$  เป็นค่าระดับขอบเขตซึ่งช่วยในการลดปรากฏการณ์การสั่น โดยใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นเกณฑ์ในการประเมินสมรรถนะ ซึ่งใช้ 2 แบบคือ 1.ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) และ 2.ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE) โดยผลค่าที่ปรับจะแสดงดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งที่ปรับด้วยวิธีฝูงอนุภาค

Optimization Technique	Tuned parameters	IAE	ISE
Particle Swarm Optimization	c	5.4813	6.8363
	$\epsilon$	7.7871	8.8908
	$\delta$	0.3823	0.3632

#### 4.2 ผลการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งด้วยวิธีหามากรุก

จากขั้นตอนการออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ดังภาพประกอบ 4.2



ภาพประกอบ 4.2 การจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ปรับพารามิเตอร์โดยวิธีหามากรุก

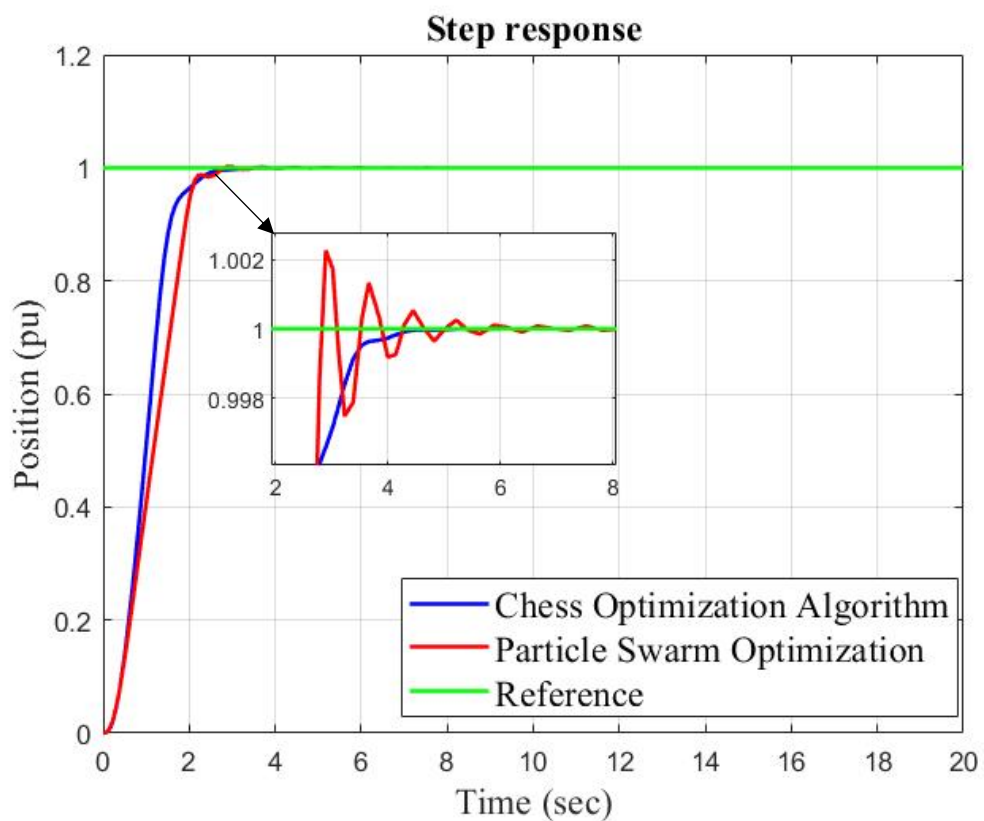
จากภาพประกอบ 4.2 แสดงให้เห็นถึงตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งซึ่งใช้ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงแบบเชิงเส้น มีตัวแปรที่ต้องปรับโดยใช้เทคนิคการหาที่เหมาะสมด้วยวิธีหามากรุกทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ c เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับผลตอบสนองของระบบหลังจากเข้าสู่พื้นผิวแล้ว ค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  พารามิเตอร์ที่ส่งผลกับอัตราเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อน และค่าพารามิเตอร์  $\delta$  เป็นค่าระดับขอบเขตซึ่งช่วยในการลดปรากฏการณ์การสั่น โดยใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นเกณฑ์ในการประเมินสมรรถนะ ซึ่งใช้ 2 แบบคือ 1.ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) และ 2.ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE) โดยผลค่าที่ปรับจะแสดงดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งที่ปรับด้วยวิธีหมากรุก

Optimization Technique	Tuned parameters	IAE	ISE
Chess Optimization Algorithm	c	3.0362	3.0425
	$\varepsilon$	6.7109	9.0522
	$\delta$	0.4039	0.1994

#### 4.3 วิเคราะห์ผลการตอบสนอง

จากผลการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่งด้วยฟังก์ชันอนุภาค และด้วยวิธีหมากรุกสามารถตอบสนองได้ดังนี้



ภาพประกอบ 4.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE

จากภาพประกอบที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเทคนิคการหาค่าด้วยวิธีฝูงอนุภาคมีค่าโอเวอร์ชูตที่สูงกว่า วิธีหมากรุก และมีการสั่นในขณะเข้าสู่ช่วงคงที่ สามารถวิเคราะห์เพิ่มเติมได้จากตารางที่ 4

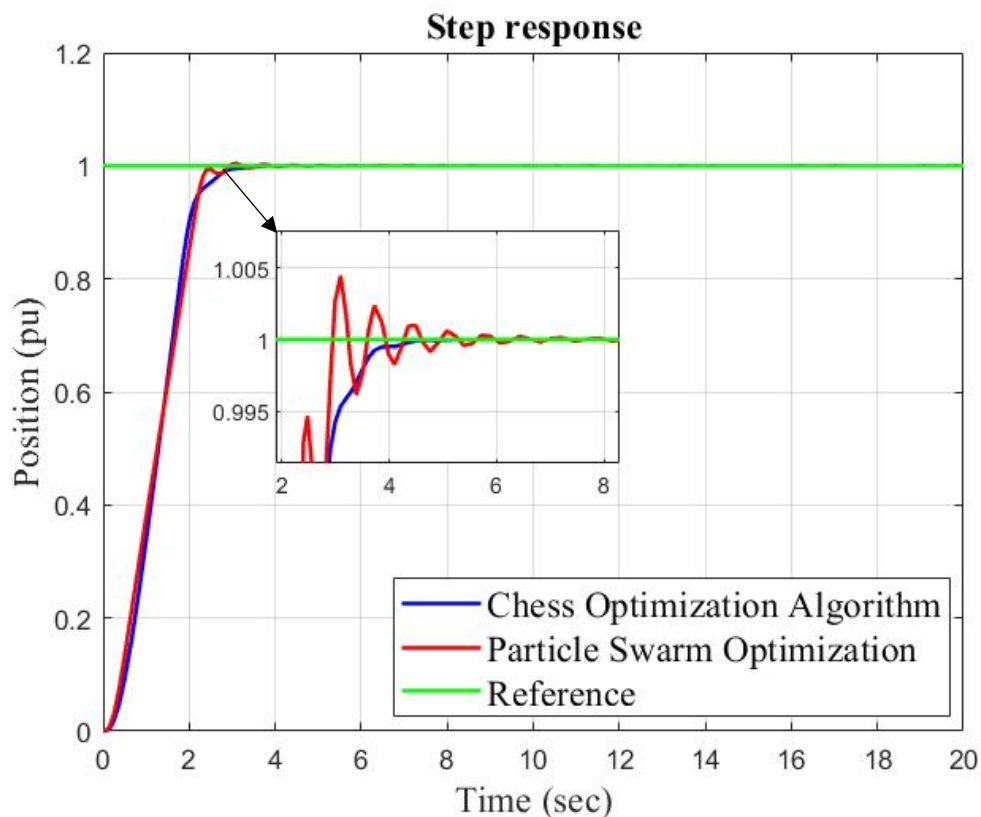
ตาราง 4.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลา โดยใช้ฟังก์ชัน IAE

Optimization Technique	Risetime (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error
Swarm Particle Optimization	1.4779	0.2005	2.1505	$2.3290 \times 10^{-5}$
Chess Optimization Algorithm	1.1245	$7.0404 \times 10^{-5}$	2.2471	$2.4748 \times 10^{-7}$

จากตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลา โดยใช้ฟังก์ชันปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ ค่าที่ใช้เปรียบเทียบได้แก่ ค่ารุ่งเวลา ค่าโอเวอร์ชูต ค่าตั้งเวลา และค่าความผิดพลาดคงตัว ได้ผลว่าผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าโดยใช้วิธีฝูงอนุภาคนั้น มีค่าดังต่อไปนี้ค่ารุ่งเวลา 1.4779 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต 0.2005%, ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.1505วินาที และค่าความผิดพลาดคงตัว  $2.3290 \times 10^{-5}$  และผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าโดยใช้วิธีหมากรุกนั้น มีค่าดังต่อไปนี้ค่ารุ่งเวลา 1.1245 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต  $7.0404 \times 10^{-5}$ %, ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.2471 วินาที และ ค่าความผิดพลาดคงตัว  $2.4748 \times 10^{-7}$

จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีหมากรุกนั้นให้ผลตอบสนองที่ดีในด้านค่ารุ่งเวลาที่ใช้เวลาน้อยกว่า ค่าโอเวอร์ชูตที่เกินจากค่าสถานะคงที่ที่น้อยกว่า และค่าความผิดพลาดคงตัวที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีฝูงอนุภาค อย่างไรก็ตาม ในด้านค่าเวลาเข้าสู่สมดุลตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีหมากรุก จะใช้เวลานานกว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีฝูงอนุภาค วิธีหมากรุกสามารถปรับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงมีการตอบสนองที่ไวและคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ทั้งยังสามารถกำจัดปรากฏการณ์การสั่นได้

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 4.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE

จากภาพประกอบที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเทคนิคการหาค่าด้วยวิธีฝูงอนุภาคมีค่าโอเวอร์ชูตที่สูงกว่า วิธีหมากรุก และมีการสั่นในขณะเข้าสู่ช่วงสมดุล ที่มีลักษณะเป็นความถี่อันเป็นผลของปรากฏการณ์การสั่น (Chattering) สามารถวิเคราะห์เพิ่มเติมได้จากตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลา โดยใช้ฟังก์ชัน ISE

Optimization Technique	Risetime (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error
Swarm Particle Optimization	1.6743	0.38046	2.3125	$9.8475 \times 10^{-7}$
Chess Optimization Algorithm	1.4843	$8.7887 \times 10^{-5}$	2.6484	$3.06 \times 10^{-10}$

จากตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลา โดยใช้ฟังก์ชันปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง ค่าที่ใช้เปรียบเทียบได้แก่ ค่ารุ่งเวลา ค่าโอเวอร์ชูต ค่าตั้งเวลา และค่าความผิดพลาดคงตัว ได้พบว่าผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าโดยใช้วิธีฝูงอนุภาคนั้น มีค่าดังต่อไปนี้ค่ารุ่งเวลา 1.6743 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต 0.38046%, ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.3125 วินาที และค่าความผิดพลาดคงตัว  $9.8475 \times 10^{-7}$  และผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าโดยใช้วิธีหมากรุกนั้น มีค่าดังต่อไปนี้ค่ารุ่งเวลา 1.4843 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต  $8.7887 \times 10^{-5}\%$ , ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.6484 วินาที และ ค่าความผิดพลาดคงตัว  $3.06 \times 10^{-10}$

จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีหมากรุกนั้นให้ผลตอบสนองที่ดีในด้านค่ารุ่งเวลาที่ใช้เวลาน้อยกว่า ค่าโอเวอร์ชูตที่เกินจากค่าสถานะคงที่ที่น้อยกว่า และค่าความผิดพลาดคงตัวที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีฝูงอนุภาค อย่างไรก็ตาม ในด้านค่าเวลาเข้าสู่สมดุลตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีหมากรุกจะใช้เวลานานกว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีฝูงอนุภาค วิธีหมากรุกสามารถปรับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงมีการตอบสนองที่ไวและคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ทั้งยังสามารถกำจัดปรากฏการณ์การสั่นได้ ขณะที่ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ปรับค่าด้วยวิธีฝูงอนุภาคแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การสั่นเล็กน้อย



## บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหามาตรฐานในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงเพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้นจากการจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น พบว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหามาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าได้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีฟูงอนูภาค ในด้านค่ารุ่งเวลา และค่าโอเวอร์ชูต ทั้งยังสามารถลดค่าความผิดพลาดคงตัวได้ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองทั้งสองวิธีการหาค่าที่เหมาะสม จะพบว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงด้วยวิธีหามาตรฐาน สามารถกำจัดปรากฏการณ์การสั่น (Chattering) เมื่อเทียบกับวิธีฟูงอนูภาคที่เกิดปรากฏการณ์สั่นเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหามาตรฐานเพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น สามารถทำให้ผลลัพธ์ที่ดีและมีประสิทธิภาพ

### 5.2 อภิปรายผล

ผลการจำลองข้างต้น การจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงปรับค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหามาตรฐานพบว่าพารามิเตอร์ที่ปรับได้มีดังนี้ สำหรับฟังก์ชันปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์  $c = 3.0362$ ,  $\epsilon = 6.7109$  และ  $\delta = 0.4039$  ซึ่งให้ผลการตอบสนองดังนี้ค่ารุ่งเวลา 1.1245 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต  $7.0404 \times 10^{-5}\%$ , ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.2471วินาที และ ค่าความผิดพลาดคงตัว  $2.4748 \times 10^{-5}$  สำหรับฟังก์ชันปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง  $c = 3.0425$ ,  $\epsilon = 9.0522$  และ  $\delta = 0.1994$  ซึ่งให้ผลการตอบสนองดังนี้ค่ารุ่งเวลา 1.4843 วินาที, ค่าโอเวอร์ชูต  $8.7887 \times 10^{-5}\%$ , ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล 2.6484 วินาที และ ค่าความผิดพลาดคงตัว  $3.06 \times 10^{-10}$

จากผลการวิเคราะห์ การออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโดยใช้วิธีหามาตรฐานนั้น มีประสิทธิภาพสามารถทำให้ระบบมีความเสถียรและลดข้อผิดพลาดได้ดี และสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เหมาะสม สามารถปรับค่าได้ดีกว่าวิธีฟูงอนูภาค ในด้านการตอบสนองทางเวลาที่สามารถลดค่ารุ่งเวลาและค่าโอเวอร์ชูตได้ นอกจากนี้ในด้านตัวควบคุมเองก็สามารถจัดการเกิดปรากฏการณ์การสั่นได้ แต่ยังเสียเปรียบในด้านค่าเวลาเข้าสู่สมดุลที่ใช้เวลานานกว่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีหามาตรฐานเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่มีศักยภาพ ในการ

ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง และระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเชิงเส้น ทำให้ระบบควบคุมมีความแม่นยำและตอบสนองเร็ว ซึ่งส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพและความเสถียร

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้เป็นการจำลองการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจะทำให้เห็นถึงผลกระทบของปรากฏการณ์การสั่นมากขึ้น

5.2.2 วิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีหามาตรฐาน ออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงแบบมาตรฐานเท่านั้น ในงานวิจัยในอนาคตควรลองประยุกต์กับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงแบบอื่นๆ ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น

5.2.3 ระบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ควรทดสอบกับระบบมอเตอร์อื่นๆ เช่นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น



## บรรณานุกรม

- [1] Thomas, N. and D.P. Poongodi. *Position control of DC motor using genetic algorithm based PID controller*. in *Proceedings of the world congress on engineering*. 2009. Citeseer.
- [2] Yajima, H., et al., *Design of linear DC motor for high-speed positioning*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000. **81**(1-3): p. 281-284.
- [3] Åström, K.J. and T. Hägglund, *Advanced PID control*. 2006: ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society.
- [4] GOLNARAGHI, F. and B.C. KUO, *Automatic Control Systems*. 9 ed. 2014, NJ: John Wiley & Sons.
- [5] Utkin, V.I., *Sliding modes in control and optimization*. 1 ed. Communications and Control Engineering. 1992: Springer Berlin, Heidelberg.
- [6] Edwards, C. and S. Spurgeon, *Sliding mode control: theory and applications*. 1998: Crc Press.
- [7] Bertsekas, D.P., *Nonlinear programming*. *Journal of the Operational Research Society*, 1997. **48**(3): p. 334-334.
- [8] Boyd, S. and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. 2004: Cambridge university press.
- [9] Pothiya, K. and W. Sa-ngiamvibool, *Chess Algorithm Optimization Technique*. 2019, Mahasarakham University.
- [10] สติรพร พรนิมิต, หลักการเครื่องจักรกลไฟฟ้า. 2558, ขอนแก่น,.
- [11] Hughes, A. and B. Drury, *Electric Motors and Drives*. 5 ed. 2019: Newnes.
- [12] Edition, F. and S.J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*. 2012.
- [13] Fitzgerald, A.E., C. Kingsley, and S.D. Umans, *Electric machinery*. 2003.
- [14] Nasar, S.A. and L.E. Unnewehr., *Electromechanics and Electric Machines*. 2 ed. 1983: John Wiley & Sons.
- [15] Nasar, S.A. and I. Boldea, *Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications*. 1987: Prentice-Hall.
- [16] Franklin, G.F., et al., *Feedback Control of Dynamic Systems*. 7 ed. 2015: Pearson.

- [17] Zaccarian, L., *DC motors: dynamic model and control techniques*. 2005.
- [18] Habil, M., et al. *Optimisation of sliding mode parameters using different algorithms to control the position of a linear DC motor*. in *AIP Conference Proceedings*. 2024. AIP Publishing.
- [19] Azeez, M.I., et al., *Optimized sliding mode controller for trajectory tracking of flexible joints three-link manipulator with noise in input and output*. *Scientific Reports*, 2023. **13**(1): p. 12518.
- [20] Liu, J., *Sliding mode control using MATLAB*. 2017: Academic Press.
- [21] Yu, L., et al., *Sliding-Mode Control for PMLSM Position Control—A Review*. *Actuators*, 2023. **12**(1): p. 31.
- [22] Shtessel, Y., et al., *Sliding mode control and observation*. Vol. 10. 2014: Springer.
- [23] Perruquetti, W. and J.P. Barbot, *Sliding mode control in engineering*. Vol. 11. 2002: Marcel Dekker New York.
- [24] Piltan, F., et al., *Design and Implementation of Sliding Mode Algorithm: Applied to Robot Manipulator-A Review*. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011. **2**: p. 265-282.
- [25] Wu, -L., et al., - *Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review*. - *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022. - **9**(- 3): p. - 392.
- [26] Costa-Castelló, R., et al., *Teaching, Analyzing, Designing and Interactively Simulating Sliding Mode Control*. *IEEE Access*, 2018. **6**: p. 16783-16794.
- [27] Hung, J.Y., W. Gao, and J.C. Hung, *Variable structure control: a survey*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993. **40**(1): p. 2-22.
- [28] Young, K.D., V.I. Utkin, and U. Ozguner, *A control engineer's guide to sliding mode control*. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999. **7**(3): p. 328-342.
- [29] Bartoszewicz, A., *Time-varying sliding modes for second-order systems*. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1996. **143**(5): p. 455-462.
- [30] Wright, S.J., *Numerical optimization*. 2006.
- [31] Mitchell, M., *An introduction to genetic algorithms*. 1998: MIT press.
- [32] Eberhart, R. and J. Kennedy. *A new optimizer using particle swarm theory*. in

- MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science.* 1995. IEEE.
- [33] Shi, Y. and R. Eberhart. *A modified particle swarm optimizer.* in *1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360).* 1998. IEEE.
- [34] Pham, D., et al., *Data clustering using the bees algorithm.* 2007.
- [35] Pham, D.T. and M. Castellani, *The bees algorithm: modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009. **223**(12): p. 2919-2938.
- [36] Teodorovic, D. and M. Dell'Orco, *Bee colony optimization—a cooperative learning approach to complex transportation problems.* *Advanced OR and AI methods in transportation*, 2005. **51**: p. 60.
- [37] Srisuwan, W. and W. Sa-ngiamvibool, *Fuzzy logic PID controller design by Bee Algorithm for Wind-Diesel power system.* 2019, Mahasarakham University.
- [38] Maheswararao, C.U., Y.K. Babu, and K. Amaresh. *Sliding mode speed control of a DC motor.* in *2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies.* 2011. IEEE.
- [39] Mamani, G., J. Becedas, and V.F. Battle. *Robust position control of a DC motor by sliding mode.* in *Emerging Trends in Technological Innovation: First IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS 2010, Costa de Caparica, Portugal, February 22-24, 2010. Proceedings 1.* 2010. Springer.
- [40] Mpanza, L.J. and J.O. Pedro. *Nature-Inspired Optimization Algorithms for Sliding Mode Control Parameters Tuning for Autonomous Quadrotor.* in *2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA).* 2019.
- [41] Audomsi, S., et al., *The Development of PID Controller by Chess Algorithm: doi: 10.14456/mijet.2024.6.* Engineering Access, 2024. **10**(1): p. 46-50.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายศุภกานต์ มาทะวงษ์
วันเกิด	22 มิถุนายน พ.ศ. 2544
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลโสธร จังหวัดยโสธร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	234 ถ.อุทัยรามฤทธิ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ยโสธร รหัสไปรษณีย์ 35000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2563 มัธยมตอนปลาย โรงเรียนยโสธรพิทยาคม พ.ศ. 2566 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2568 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว