

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน พลังงานทดแทนได้มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะพลังงานที่มาจากลม และแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้มาจากธรรมชาติ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จึงทำให้เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ประโยชน์ โดยพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถที่จะนำไปผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันขนาดเล็ก (Micro-turbine generator) ในรูปแบบของระบบไมโครกริด [1] เพื่อช่วยในการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด เช่น ชุมชนที่อยู่ห่างไกลที่ไม่ได้รับการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำไปผลิตไฟฟ้าให้กับระบบการผลิตไฮโดรเจน [2] โดยอาศัยหลักการทำงานของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) ที่สามารถรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตเป็นไฮโดรเจนได้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้กับ เซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตเป็นกำลังไฟฟ้า [3] หรือเป็นเชื้อเพลิงให้กับยานพาหนะ [4] เป็นต้น ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาด้วยการนำเอากระบวนการผลิตไฮโดรเจน เข้ามาติดตั้งในระบบไมโครกริด [5] โดยใช้ตัว AE รับกำลังไฟฟ้าเข้ามาผลิตเป็นไฮโดรเจนแล้วนำไฮโดรเจนที่ได้ไปสะสมไว้ในถังเก็บ เพื่อจ่ายเป็นเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิงผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าไปให้ระบบไมโครกริด

การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของพลังงานลม หรือพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ไม่คงที่ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบนั้นเกิดการแกว่งขึ้น และอาจจะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้ หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้ อุปกรณ์สะสมพลังงานมาติดตั้งในระบบ เช่น แบตเตอรี่ [6] หรือ SMES [7] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เหล่านี้มีการลงทุนสูงทั้งในการติดตั้ง และการดูแลรักษา อีกทั้งในด้านของ แบตเตอรี่ยังมีอายุการใช้งานน้อย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของตัว AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจาก AE มีสมรรถนะในการรับกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วในการผลิตไฮโดรเจน

ในอดีตที่ผ่านมาตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนใหญ่จะเป็นแบบ ตัวควบคุมพีไอ (Proportional integral: PI) [8] และตัวควบคุมพีไอดี (Proportional integral derivative: PID) [9] เนื่องจากออกแบบง่าย ราคาถูก อย่างไรก็ตามตัวควบคุมเหล่านี้ไม่เหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High-order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time-delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High-nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนมากๆ

เมื่อไม่นานมานี้ ตัวควบคุมแบบฟuzzy logic-PID (Fuzzy logic-PID: FLPID) [10] มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบการควบคุมต่างๆ เช่น ระบบควบคุมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิต (Static var compensator) [11] ระบบควบคุมความถี่โหลด (Load frequency control) [12] ระบบการควบคุมแรงดันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Voltage control for a synchronous generator) [13] ระบบการใช้เหตุผลความเร็วสำหรับเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (Accelerated reasoning for d.c. servo motors) [14] และ ระบบการควบคุมกึ่งหั่นลม [15] เป็นต้น แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FLPID มีอยู่จำนวนมาก และมีความซับซ้อนทำให้ยากต่อการออกแบบ ทั้งในส่วนของ แฟคเตอร์สัดส่วน (Scale factor) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) และกฎควบคุม (Control rule) ทำให้การออกแบบโดยทั่วไปแล้วจะอาศัยการลองผิดลองถูก (Trial and error) หรืออาศัยความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ทำให้การควบคุมเหล่านั้นมีสมรรถนะไม่ดีเท่าที่ควร

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมของ AE ด้วย FLPID ที่ทำให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง [16] ที่เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของผึ้งตามธรรมชาติ โดยในการออกแบบนั้นจะทำการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ทั้งหมดพร้อมกันภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งที่นำเสนอ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่า การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยตัวควบคุมฟuzzy logic-PID ที่ออกแบบให้เหมาะสมดังที่นำเสนอ นั้น ไม่เพียงแต่สามารถที่จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบไมโครกริดเท่านั้น แต่ยังสามารถที่จะผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกันอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อกริดกำลังไฟฟ้าในไมโครกริดอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายพลังงานลมและแสงอาทิตย์
- 2) เพื่อประยุกต์ใช้โหลดที่สามารถควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้อิเล็กโตรไลเซอร์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลมและแสงอาทิตย์
- 3) เพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy logic-PID อย่างเหมาะสมของอิเล็กโตรไลเซอร์โดยใช้วิธีฝูงผึ้ง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ระบบไมโครกริดที่พิจารณาประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ได้คือพลังงานลม แสงอาทิตย์ และโหลดที่ควบคุมได้คือ อิเล็กโตรไลเซอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบไมโครกริดในบทความวิจัยที่ผ่านมาศึกษา

- 2) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่างๆ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา และสร้างขึ้นมาโดยใช้ซอฟต์แวร์เป็นหลัก
- 3) การออกแบบระบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอ โดยในที่นี้จะทำการออกแบบและทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

#### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) พิจารณาเลือกระบบไมโครกริดที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ได้ ได้แก่ พลังงานลมแสงอาทิตย์ และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมได้ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ด้วยการศึกษาค้นคว้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา
- 2) ศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไมโครกริด แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดต่างๆ
- 3) วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพระบบที่แสดงออกมาในสถานะชั่วคราวและพลวัตเมื่อเกิดการรบกวนระบบในรูปแบบต่างๆ เช่น การเกิดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากพลังงานลม แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน การเกิดสถานะฉุกเฉินต่างๆ เป็นต้น ด้วยการจำลองระบบในโดเมนเวลาด้วยคอมพิวเตอร์
- 4) ศึกษาวิธีการการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy
- 5) ทำการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่เหมาะสมให้กับอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีฟuzzy โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 6) ทดสอบผลการลดการแกว่งของตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบโดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบทั่วไป
- 7) ทดสอบความคงทนของตัวควบคุมที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังพร้อมกับความไม่แน่นอนในระบบในสถานะต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันอยู่
- 8) สรุปผลการศึกษาวิจัยเพื่อเขียนบทความส่งวารสารระดับนานาชาติ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ความเข้าใจในพฤติกรรมในสถานะพลวัตและชั่วคราวของระบบไมโครกริดที่แสดงออกมาในลักษณะต่างๆ ได้แก่การเปลี่ยนแปลงความถี่ กำลังไฟฟ้า เมื่อได้รับผลกระทบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่นพลังงานลมและแสงอาทิตย์ ตลอดจนเมื่อเกิดสถานะฉุกเฉินต่างๆ
- 2) สามารถประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด และสามารถออกแบบตัวควบคุมพีชชีที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฟuzzy

- 3) ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนในระบบ และ ยังมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง

## บทที่ 2

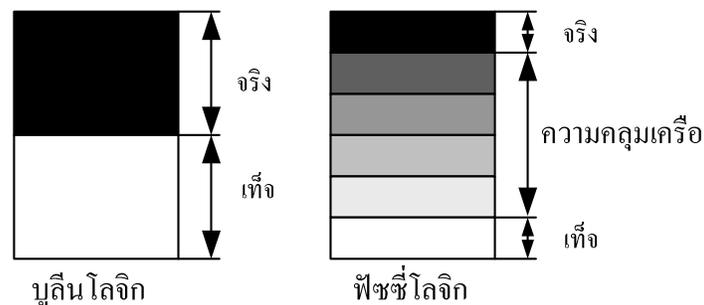
### ตัวควบคุมฟuzzy-ฟuzzy และการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy

ในบทนี้ อธิบายโครงสร้าง และการทำงานของตัวควบคุมฟuzzy-ฟuzzy และการออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzy-ฟuzzy จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วน คือ แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ส่วนประกอบเหล่านี้มีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบจะอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือการลองผิดลองถูก ทำให้ผลที่ได้ ออกมายังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีค่าที่เหมาะสม วิธีฟuzzy จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ เพื่อออกแบบในงานวิจัยนี้

#### 2.1 ฟuzzy-ฟuzzy

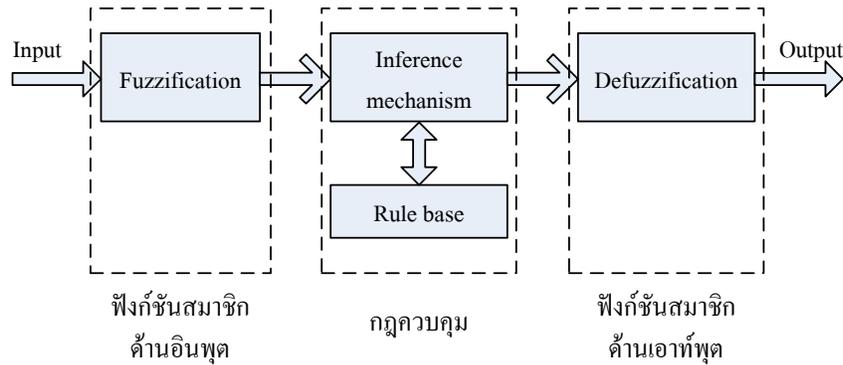
ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือฟuzzy-ฟuzzy (Fuzzy logic) พัฒนาจากฟuzzy เซต (Fuzzy set) โดยเป็น การใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก/ผิด ใช่/ไม่ใช่ ของ ตรรกศาสตร์แบบฉบับ (Classical logic) ฟuzzy-ฟuzzy นั้นถือเป็นการประยุกต์ใช้งาน เพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อน ค่าระดับความจริงในตรรกศาสตร์คลุมเครือ นั้นมักจะสับสนกับค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือ นั้นใช้ในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซต (Set membership) แต่ค่าความน่าจะเป็น นั้นระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจจะเกิดขึ้น

ฟuzzy-ฟuzzy สามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตด้วยค่าระหว่างศูนย์ ถึงหนึ่ง ที่พิเศษกว่า ตรรกะแบบเท็จจริง (Boolean logic) ตรงที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false)



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟuzzy

ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริง (1) กับเท็จ (0) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองระดับด้วยคำพูดที่ว่า "เล็กน้อย" "ค่อนข้าง" หรือ "มาก" โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วน ฟัซซีโลจิกมีความสัมพันธ์กับ ฟัซซีเซต และทฤษฎีความเป็นไปได้ ซึ่งคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดย L.A. Zadeh



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นการทำหน้าที่แปลงข้อมูลอินพุตให้อยู่ในรูปตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี ด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต

ขั้นตอนที่ 2 กลไกอนุมาน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริง และกฎ เพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 ฐานความรู้ เป็นส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซีที่ได้มาจากกลไกอนุมานให้เป็นเอาต์พุตจริงสำหรับกระบวนการของระบบด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุต

## 2.2 ตัวควบคุมฟัซซีโลจิก-พีไอดี

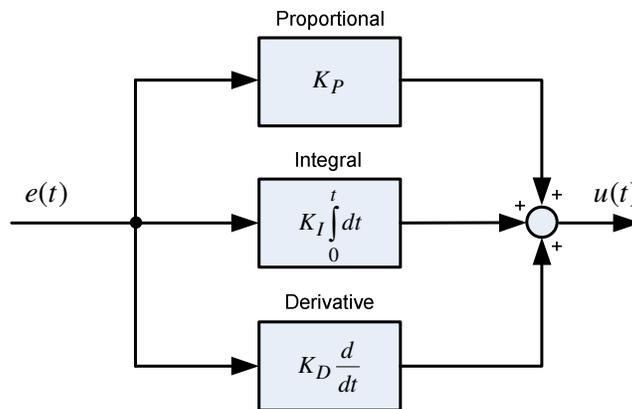
โดยทั่วไปแล้ว ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional-integral-derivative: PID) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก ออกแบบได้ง่าย ราคาถูก และมีประสิทธิภาพ

สำหรับระบบที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linear system) หรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นไม่มากนัก โดยสามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปของโดเมนทางเวลาได้ดังนี้

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ

- $e(t)$  คือ อินพุตของตัวควบคุม
- $K_P$  คือ อัตราขยายสัดส่วน (Proportional gain)
- $K_I$  คือ อัตราขยายปริพันธ์ (Integral gain)
- $K_D$  คือ อัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative gain)
- $u(t)$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุม

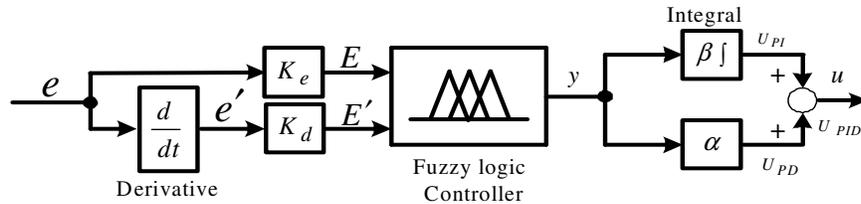


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี

อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมพีไอดีนั้นไม่ค่อยเหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High-order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time-delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High-nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนสูงๆ [17, 18] จนกระทั่งฟัซซี่โลจิก (Fuzzy logic) ได้มีการนำเสนอโดย Zadeh และหลังจากที่ Mamdani [19] ได้ทำการประยุกต์ใช้การควบคุมฟัซซี่โลจิกเป็นครั้งแรก ทำให้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิกนั้นเป็นที่สนใจอย่างมากทั้งในด้านการศึกษาวิจัย และในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากฟัซซี่โลจิกสามารถที่จะจัดการกับระบบที่ซับซ้อน และระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ ได้ [20]

เพื่อที่จะให้ตัวควบคุมนั้นยังคงมีคุณลักษณะการทำงานแบบตัวควบคุมพีไอดี และสามารถทำงานกับระบบที่มีความซับซ้อนได้แบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาตัวควบคุม

พีไอดี และตัวควบคุมฟuzzy logic มาทำงานร่วมกัน โดยมีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น ฟuzzy แบบพีไอดี (PID type fuzzy) ฟuzzy-พีไอดี (Fuzzy-PID) หรือ ฟuzzy logic-พีไอดี (Fuzzy logic-PID: FLPID) โดยในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 ฟuzzy logic-พีไอดีที่นำเสนอนี้มาจากโครงสร้างของฟuzzy logic-พีไอ และฟuzzy logic-พีดี สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ แพลกเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม โดยในส่วนของ ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมจะเป็นกระบวนการทำงานของตัวควบคุมฟuzzy logic



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี

เมื่อ

- $e$  คือ ค่าอินพุตของตัวควบคุม
- $e'$  คือ ค่าอนุพันธ์ของอินพุตของตัวควบคุม
- $K_e, K_d, \beta$  และ  $\alpha$  คือ แพลกเตอร์สัดส่วน
- $y$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy logic
- $U_{PI}$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอ
- $U_{PD}$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy logic-พีดี
- $u$  หรือ  $U_{PID}$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี

โดยสัญญาณควบคุม  $u$  สามารถหาได้จาก

$$u = \alpha y + \beta \int y dt \quad (2.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และเอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy logic ประเภท Product-sum สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$y = A + BE + DE' \quad (2.3)$$

โดยที่  $E = K_e e$  และ  $E' = K_d e'$

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถหาเอาท์พุทของตัวควบคุมได้ดังนี้

$$u = \alpha(A + BK_e e + DK_d e') + \beta \int (A + BK_e e + DK_d e') dt$$

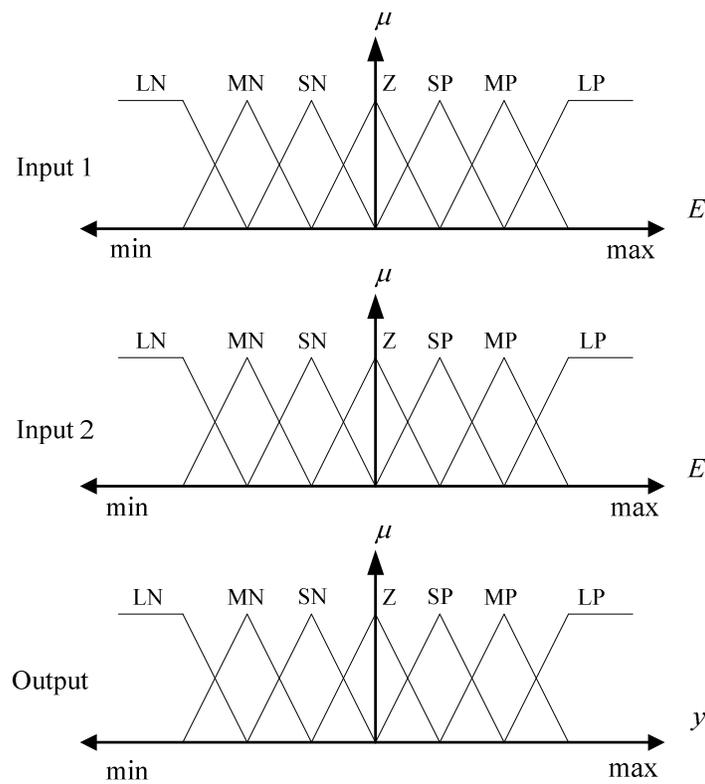
$$u = \alpha A + \beta A t + \alpha K_e B e + \beta K_d D e + \beta K_e B \int e dt + \alpha K_d D e' \quad (2.4)$$

ดังนั้นตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี จากสมการที่ (2.4) สามารถหองค์ประกอบของอัตราขยายทั้ง 3 ของตัวควบคุมพีไอดีดังแสดงในสมการที่ (2.1) ได้จาก

$$\text{อัตราขยายสัดส่วน (} K_P \text{)} = \alpha K_e B + \beta K_d D$$

$$\text{อัตราขยายปริพันธ์ (} K_I \text{)} = \beta K_e B$$

$$\text{อัตราขยายอนุพันธ์ (} K_D \text{)} = \alpha K_d D$$



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีโลจิก

ตัวควบคุมพีชชีโลจิกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วย 3 ฟังก์ชันสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แยกเป็น 2 อินพุต และ 1 เอาท์พุต แต่ละสมาชิกประกอบไปด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ตัว และสามเหลี่ยม 5 ตัว และกฎควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยกฎควบคุมเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต

ทั้งสอง และผลที่ได้เป็นเอาท์พุต โดยกฎควบคุมนี้ได้สร้างจากข้อกำหนดที่ว่า “If input 1 and input 2 then output” ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ เช่น อินพุต1 แถวที่ 3 คือ SN และ อินพุต2 คอลัมน์ที่ 4 คือ Z จะได้เอาท์พุต เป็น SP เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 กฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy โลกจิก

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	LP	LP	LP	MP	MP	SP	Z
	MN	LP	MP	MP	MP	SP	Z	SN
	SN	LP	MP	SP	SP	Z	SN	MN
	Z	MP	MP	SP	Z	SN	MN	MN
	SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	LN
	MP	SP	Z	SN	MN	MN	MN	LN
	LP	Z	SN	MN	MN	LN	LN	LN

โดยที่

- LN คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านลบ (Large negative)
- MN คือ สัญญาณขนาดกลางด้านลบ (Medium negative)
- SN คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านลบ (Small negative)
- Z คือ สัญญาณเป็นศูนย์ (Zero)
- SP คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านบวก (Small positive)
- MP คือ สัญญาณขนาดกลางด้านบวก (Medium positive)
- LP คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านบวก (Large positive)

### 2.3 วิธีฝูงผึ้ง

วิธีฝูงผึ้ง (Bee colony optimization: BCO) [16] ได้คิดค้นมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ โดยผึ้งตามธรรมชาตินั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ด้วยกัน คือ ผึ้งสำรวจ หรือผึ้งสอดแนม (Scout bee) และผึ้งงาน (Employed bee) สำหรับผึ้งสำรวจแต่ละตัว จะทำหน้าที่ออกสำรวจหาแหล่งอาหาร เช่น น้ำหวานจากผลไม้ หรือน้ำหวานจากเกสรดอกไม้ เป็นต้น เมื่อพบแหล่งของอาหารเหล่านั้นแล้ว ผึ้งสำรวจจะทำการประเมินคุณภาพของอาหาร เช่น ปริมาณความหวาน

แล้วไปที่เวทีสำหรับเต้นรำ (Dance floor) จากนั้นทำการแสดงที่เรียกกันว่า การเดินแบบสายไป-มา (Waggle dance) พฤติกรรมการเดินนี้ เปรียบเสมือนเป็นภาษาของผึ้ง และเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของการติดต่อสื่อสารในฝูงเพื่อที่จะช่วยให้ผึ้งได้พบแหล่งอาหารที่เหมาะสม และสามารถส่งผึ้งงานออกไปเก็บน้ำหวาน ตรงที่ผึ้งสำรวจหาเอาไว้ได้อย่างถูกต้อง ส่วนหน้าที่ของผึ้งงานก็จะออกไปเก็บอาหารในบริเวณที่ผึ้งสำรวจหาเอาไว้แล้วนำกลับมาที่รัง โดยจะออกไปเก็บอาหารเฉพาะในส่วนที่มีคุณภาพของอาหารที่ดีเท่านั้น ซึ่งทำการพิจารณาโดยผึ้งสำรวจ และบริเวณแหล่งอาหารที่มีคุณภาพของอาหารสูงจะส่งผึ้งงานนั้นไปมากกว่าบริเวณแหล่งอาหารที่มีคุณภาพน้อยเพื่อที่จะได้อาหารที่ดีนั่นเอง

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า วิธีฝูงผึ้งนั้นเป็นวิธีการที่เลียนแบบการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีองค์ประกอบในวิธีฝูงผึ้งคล้ายกับผึ้งตามธรรมชาติ และองค์ประกอบเหล่านี้จำเป็นที่จะต้องกำหนดให้กับวิธีฝูงผึ้ง โดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

จำนวนผึ้งสำรวจ แทนด้วย  $n$

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย  $m$

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก  $m$  แทนด้วย  $e$

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ  $e$  แทนด้วย  $ne$

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ  $m-e$  แทนด้วย  $ns$

ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ  $m$  แทนด้วย  $ngh$

จำนวนรอบของการค้นหา (Iteration) แทนด้วย  $NC$

โดยขั้นตอนของกระบวนการทำงานของวิธีฝูงผึ้งดังที่ได้แสดงไว้รูปที่ 2.6 สามารถอธิบายรายละเอียดเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1:** ให้ผึ้งสำรวจจำนวน  $n$  ตัว สุ่มหาค่าเริ่มต้น โดยจะต้องอยู่ในขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด ที่กำหนดให้ และให้คำตอบเหล่านี้เป็นประชากรเริ่มต้นในการค้นหา จากนั้นทำการกำหนดค่าจำนวนรอบของการค้นหาให้มีค่าเป็นศูนย์ หรือให้  $NC = 0$

**ขั้นตอนที่ 2:** นำผลลัพธ์ของผึ้งสำรวจแต่ละตัว มาหาค่าความเหมาะสม เพื่อที่จะพิจารณาว่าประชากรตัวไหนมีความเหมาะสมมากที่สุด แล้วทำการจัดเรียงลำดับความเหมาะสมที่ได้มา โดยทำการเรียงจากมากไปหาน้อย

**ขั้นตอนที่ 3:** ทำการเลือกเอาผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดจำนวน  $m$  ค่า หรือเรียกได้ว่า เอามา  $m$  ค่าแรก จากคำตอบที่ได้เรียงเอาไว้แล้ว เพื่อมาทำการกำหนดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบ และทำการแยกค่าผลลัพธ์  $m$  นั้นออกเป็น 2 กลุ่ม โดยจะให้กลุ่มแรกคือค่าที่ดีที่สุดของ  $m$  จำนวน

$e$  ค่า และส่วนผลลัพธ์ที่เหลือจำนวน  $m-e$  ค่าจะให้เป็นกลุ่มที่ 2 สำหรับจุดประสงค์ในการแบ่งแยกผลลัพธ์นี้ก็เพื่อที่จะได้กำหนดจำนวนของฟังก์ชันนั้นให้มีความเหมาะสมในการออกหาคำตอบ

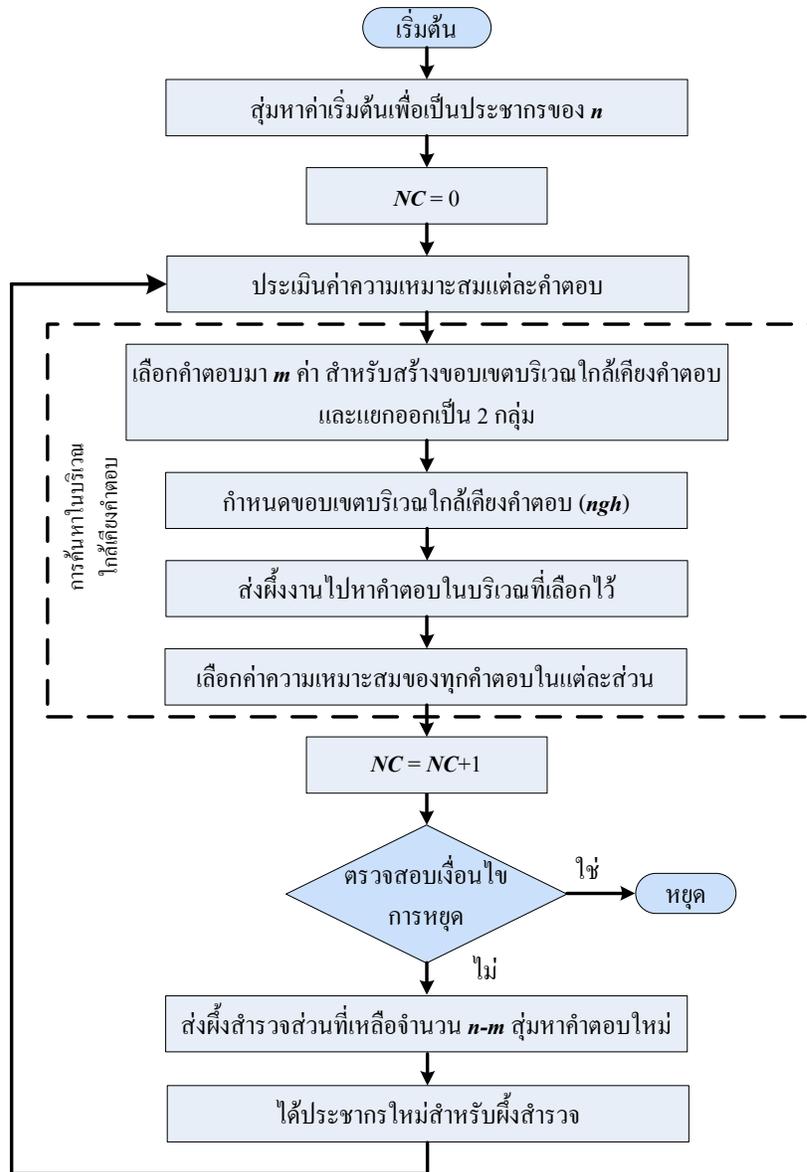
ขั้นตอนที่ 4: ทำการกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าบริเวณใกล้เคียง ( $ngh$ ) ของค่า  $m$  แต่ละค่าเพื่อให้ฟังก์ชันได้ออกหาคำตอบ โดยขอบเขตที่สร้างขึ้นมานั้น ต้องอยู่ภายในขอบเขตต่ำสุด-สูงสุดที่ได้กำหนดไว้ดังที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 5: ส่งฟังก์ชันสุ่มหาคำตอบ โดยคำตอบจะอยู่ในขอบเขตการค้นหาค่าบริเวณใกล้เคียงที่สร้างขึ้นตามขั้นตอนที่ 4 สำหรับการส่งฟังก์ชันไปนั้นจะให้จำนวนฟังก์ชันของ  $ne$  ไปจำนวนมากสำหรับค้นหาในบริเวณใกล้เคียงคำตอบของ  $e$  และจะให้จำนวนฟังก์ชันของ  $ns$  จำนวนน้อย ในการค้นหาบริเวณคำตอบของ  $m-e$  เนื่องจากว่า บริเวณคำตอบของ  $e$  นั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรที่ได้มา ทำให้มีความน่าจะเป็นในการได้คำตอบที่เหมาะสมมากกว่าบริเวณใกล้เคียงคำตอบของ  $m-e$

ขั้นตอนที่ 6: ทำการประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันแต่ละตัว แล้วทำการคัดเลือกคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดของแต่ละกลุ่มออกมา เพื่อที่จะให้เป็นคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป จากนั้นทำการคัดเลือกหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่สุ่มมา 1 ค่า แล้วแทนด้วย  $B_{Best}$  และกำหนดจำนวนรอบการค้นหามีค่าเป็น  $NC = NC+1$

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงานว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นจำนวนรอบในการค้นหา หรือก็คือ  $NC$  นั่นเอง ถ้าจำนวนรอบการค้นหาค่าที่กำหนดไว้ให้หยุดการค้นหา ก็จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือค่า  $B_{Best}$  แต่ถ้าหากจำนวนรอบยังไม่ถึงค่าที่กำหนด ก็ให้ทำขั้นตอนต่อไป

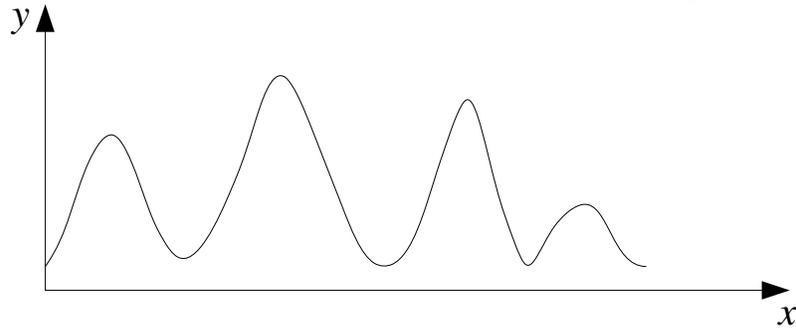
ขั้นตอนที่ 8: ให้ฟังก์ชันสำรวจส่วนที่เหลือจำนวน  $n-m$  ตัว (ฟังก์ชันในส่วนที่ไม่ได้รับการคัดเลือกจากขั้นตอนที่ 3) สุ่มหาค่าคำตอบใหม่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดเหมือนกับขั้นตอนที่ 1 ดังนั้นแล้ว เราจะได้ผลลัพธ์ที่เป็นประชากรใหม่จำนวน  $n$  ตัว ซึ่งได้มาจากขั้นตอนที่ 7 จำนวน  $m$  ตัว และขั้นตอนที่ 9 นี้ก็อีกจำนวน  $n-m$  ตัว ก็จะมีคำตอบเท่ากับขั้นตอนที่ 1 จากนั้นกลับไปทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกว่าเงื่อนไขการหยุดจะเป็นจริงตามขั้นตอนที่ 7



รูปที่ 2.6 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงผึ้ง

ตัวอย่างการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

สมมติว่าเรามีฟังก์ชันที่สามารถแสดงกราฟของฟังก์ชันดังรูปที่ 2.7 ให้หาค่าของ  $x$  ที่ทำให้  $y$  มีค่าสูงสุด เมื่อ  $y = f(x)$  โดยใช้วิธีฝูงผึ้งในการค้นหาคำตอบ

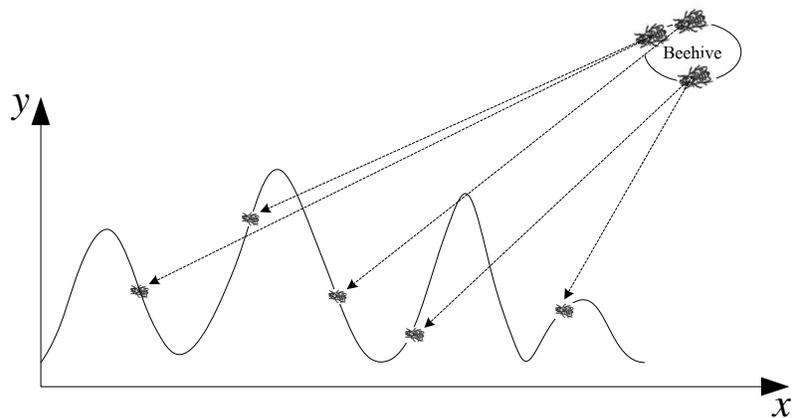


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันที่ใช้ในการหาคำตอบ

เริ่มต้น ทำการกำหนดพารามิเตอร์ในการหาคำตอบของวิธีฝูงผึ้ง

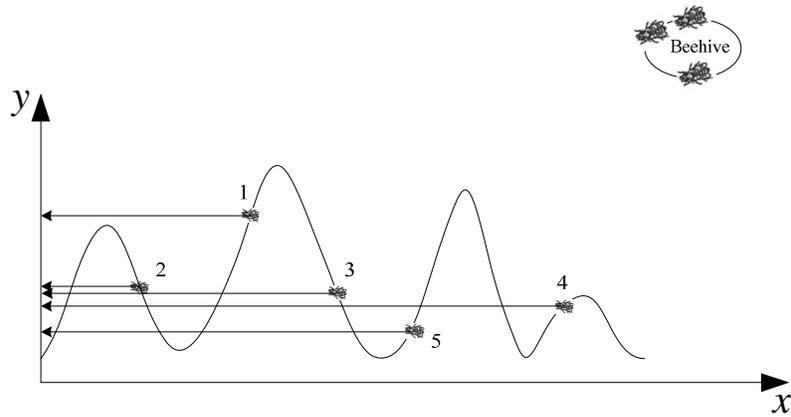
$NC$	=	20	รอบ
$n$	=	5	ตัว
$m$	=	3	คำตอบ
$e$	=	1	คำตอบ
$ngh$	=	10	เปอร์เซ็นต์
$ne$	=	2	ตัว
$ns$	=	1	ตัว

ขั้นตอนที่ 1 ส่งผึ้งสำรวจจำนวน 5 ตัวหุ้มหาคำตอบเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 แล้วทำการกำหนดจำนวนรอบเป็นให้มีค่าเป็นศูนย์ ( $NC = 0$ )



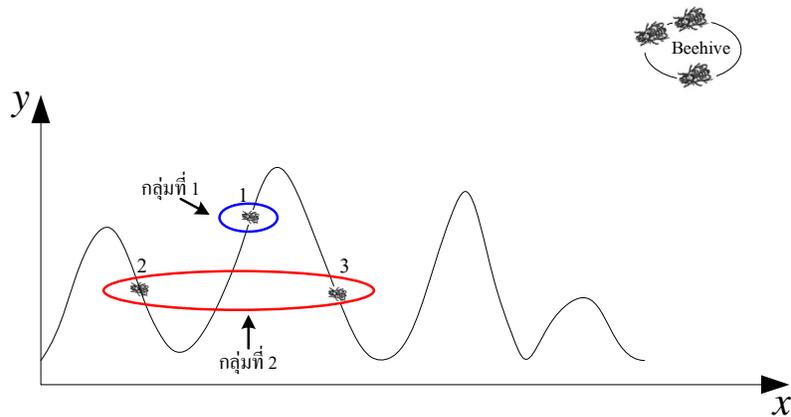
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 1 ของวิธีฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาค่าความเหมาะสมจากผึ้งสำรวจแต่ละตัวดังแสดงในรูปที่ 2.9 แล้วทำการเรียงลำดับความเหมาะสมจากมากไปหาน้อย

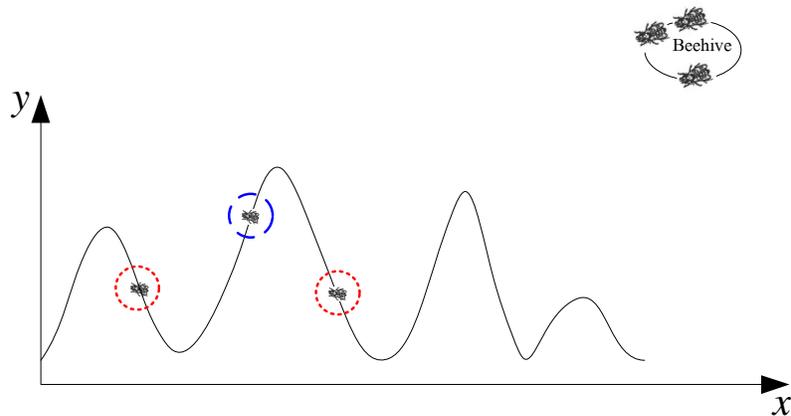


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 2 ของวิธีฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 3 เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดมา 3 ค่าแรก ( $m = 3$ ) แล้วแยกคำตอบที่เลือกมาออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นค่าที่ดีที่สุด 1 ค่าแรก ( $e = 1$ ) ส่วนคำตอบที่เหลือให้อยู่ในกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



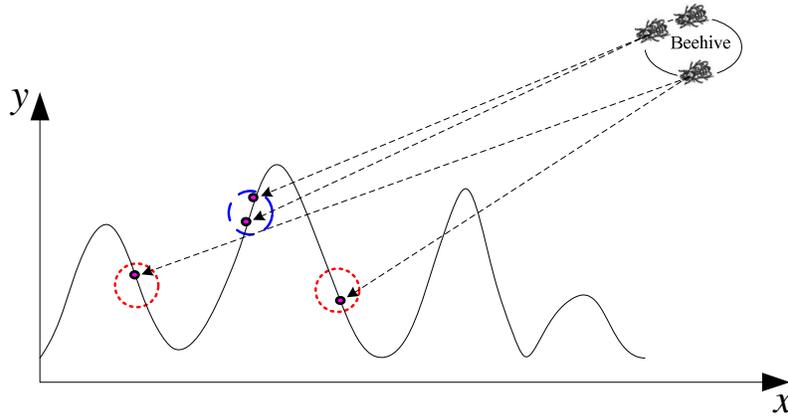
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 3 ของวิธีฝูงผึ้ง



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 4 ของวิธีฝูงผึ้ง

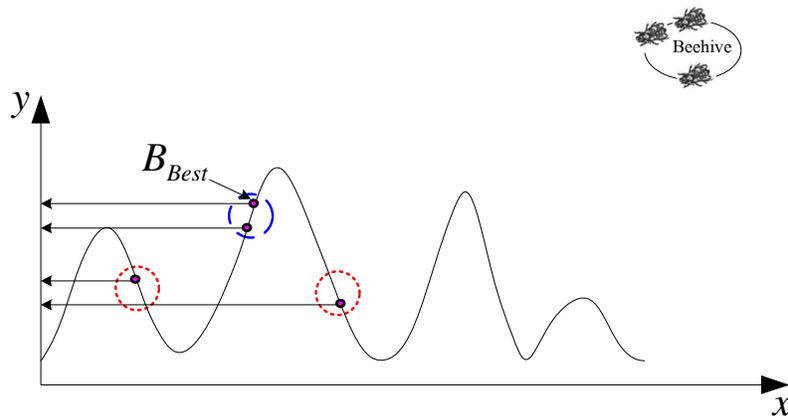
ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขอบเขตการค้นหาค่าตอบในบริเวณใกล้เคียงค่าตอบที่เลือกไว้โดยอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$  ( $ngh = 10$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ขั้นตอนที่ 5 ส่งผึ้งงานสุ่มหาค่าตอบในบริเวณขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยในกลุ่มแรกจะส่งผึ้งงานไปจำนวน 2 ตัว ( $ne = 2$ ) และกลุ่มที่ 2 จำนวน 1 ตัว ( $ns = 1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 5 ของวิธีผึ้งผึ้ง

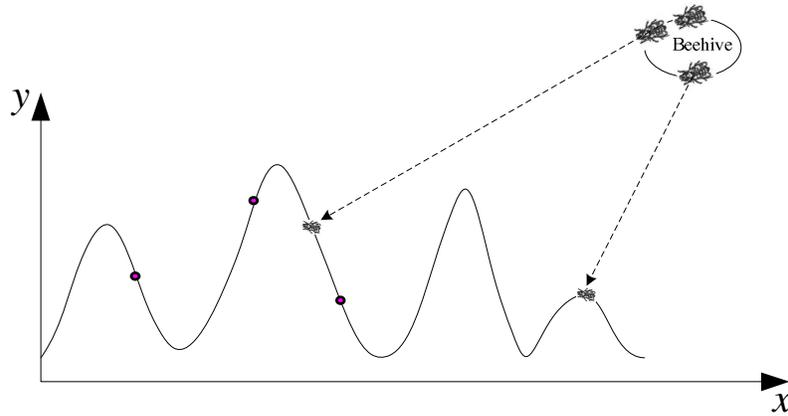
ขั้นตอนที่ 6 หาค่าความเหมาะสมของผึ้งงานแต่ละตัว แล้วเลือกค่าที่ดีที่สุดของแต่ละกลุ่ม จากนั้นเลือกค่าที่ดีที่สุดของจากทั้งหมดแทนด้วย  $B_{Best}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แล้วกำหนดจำนวนรอบเพิ่มอีกหนึ่งรอบ ( $NC = NC+1$ )



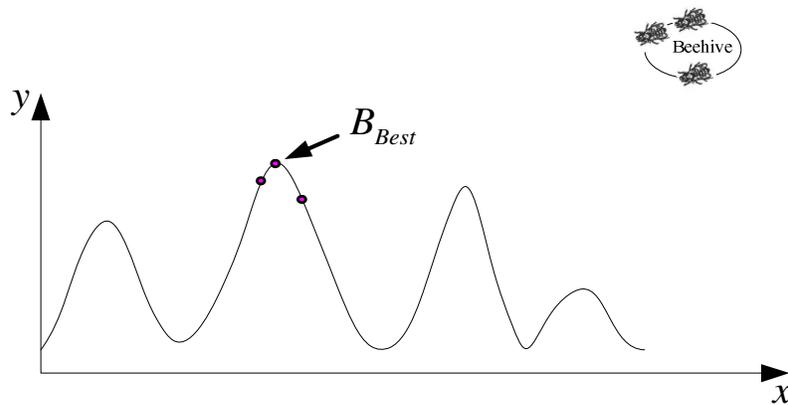
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 6 ของวิธีผึ้งผึ้ง

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงานว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยในตัวอย่างนี้ทำการกำหนดไว้ 20 รอบ แต่รอบปัจจุบันคือ รอบแรก ดังนั้นให้ทำตามขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 ส่งผึ้งงานจำนวน 2 ตัว ( $n-m = 5-3 = 2$ ) คู่หาคำตอบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นจะได้จำนวนคำตอบเท่ากับจำนวนผึ้งสำรวจในรอบแรก แล้วกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2 จนกว่าเงื่อนไขการทำงานจะเป็นจริง และจะได้คำตอบที่ดีที่สุดคือ  $B_{Best}$  ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 8 ของวิธีฝูงผึ้ง

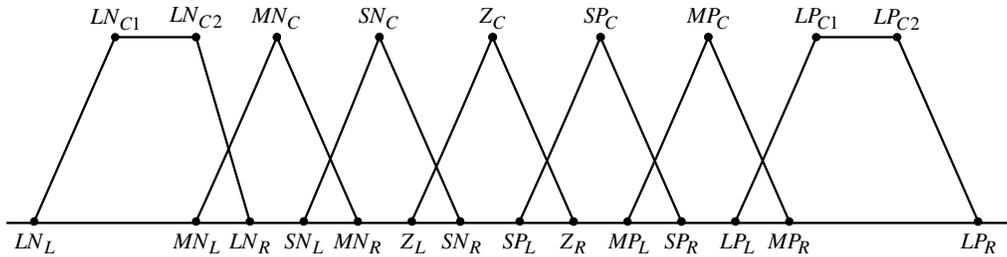


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการหาคำตอบเมื่อสิ้นสุดการค้นหาคำตอบของวิธีฝูงผึ้ง

#### 2.4 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดี ด้วยวิธีฝูงผึ้ง

ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดี ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดคือ จะทำอย่างไรในการที่จะออกแบบทั้งในส่วนของ แฟกเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมให้มีความเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการออกแบบ แฟกเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม จะได้มาจากการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้ชำนาญการ ทำให้ประสิทธิภาพของตัวควบคุมนั้นยังไม่ได้ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ที่เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ ดังที่กล่าวมานั้น เข้ามาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม

จากรูปที่ 2.5 แฟคเตอร์สัดส่วนจะมีตัวแปร 4 ตัว คือ  $K_e, K_d, \beta$  และ  $\alpha$  ส่วนฟังก์ชันสมาชิกแต่ละอินพุต หรือแต่ละเอาต์พุตที่ใช้ จะมีสมาชิก 7 ตัว เป็นแบบสามเหลี่ยม 5 ตัว และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ตัว โดยรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก

โดยที่

แบบสามเหลี่ยม จะมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 3 ตัว คือ

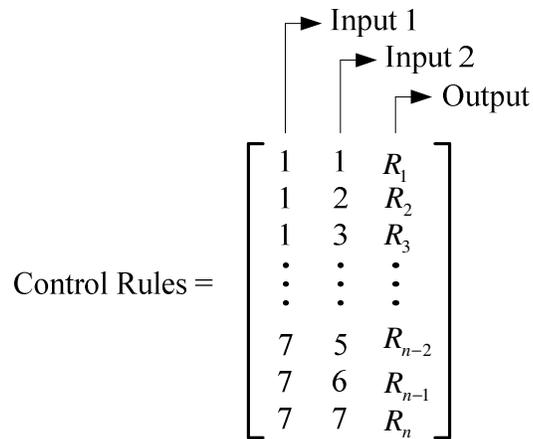
ตำแหน่งทางด้านฐานซ้าย	Left base ( $L$ )
ตำแหน่งศูนย์กลาง	Center ( $C$ )
ตำแหน่งทางด้านฐานขวา	Right base ( $R$ )

และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู จะมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 4 ตัว คือ

ตำแหน่งทางด้านฐานซ้าย	Left base ( $L$ )
ตำแหน่งศูนย์กลาง 1	Center 1 ( $C_1$ )
ตำแหน่งศูนย์กลาง 2	Center 2 ( $C_2$ )
ตำแหน่งทางด้านฐานขวา	Right base ( $R$ )

ดังนั้นจำนวนตัวแปรที่ปรับค่ามี 23 ตัว คือ  $(4+3+3+3+3+3+4 = 23)$  ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกมีอินพุต 2 ตัว และเอาต์พุต 1 ตัว ดังนั้นตัวแปรทั้งหมดที่จะปรับค่ามี 69 ตัว  $(3 \times 23 = 69)$

สำหรับกฎควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกที่มี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต ได้แสดงอยู่ในจำนวน  $n$  แถว 3 คอลัมน์ ตามที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.17 ในคอลัมน์ที่ 3 เอาต์พุตของหน่วยควบคุมจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี่ โดยทั่วไปแล้ว อินพุต 1 อินพุต 2 และเอาต์พุตจะแสดงโดยตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี่ แทนตัวเลขที่มีสมาชิกอยู่ภายในทั้งหมด 7 ตัว ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างกฎควบคุมของตัวควบคุมพีชชีโลจิก-ฟิวอี้ดี

หมายเลข 1 คือ LN

หมายเลข 2 คือ MN

หมายเลข 3 คือ SN

หมายเลข 4 คือ Z

หมายเลข 5 คือ SP

หมายเลข 6 คือ MP

หมายเลข 7 คือ LP

ดังนั้น จะมีตัวแปรอยู่ 49 ตัว (สำหรับฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 7 ตัว  $n = 7^2 = 49$ ) ที่ใช้ในการปรับเพื่อหาค่า ดังนั้นตัวควบคุมพีชชีโลจิก-ฟิวอี้ดี 1 ตัว เมื่อทำการรวมตัวแปรทั้งหมด 2 อินพุต และ 1 เอาท์พุต จะได้ตัวแปรที่ต้องทำการปรับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่จะใช้ในตัวควบคุมพีชชีโลจิก-ฟิวอี้ดี จำนวน 122 ค่า ( $4+49+69 = 122$ )

## 2.5 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีชชีโลจิก-ฟิวอี้ดีให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะที่คล้ายกับตัวควบคุมฟิวอี้ดี และสามารถที่จะจัดการกับระบบที่มีความซับซ้อนได้แบบตัวควบคุมพีชชีโลจิก จึงได้มีการนำเอาตัวควบคุมพีชชีโลจิกมาทำงานร่วมกับตัวควบคุมฟิวอี้ดี ที่เรียกว่าตัวควบคุมพีชชีโลจิก-ฟิวอี้ดี ส่วนประกอบของตัวควบคุมประกอบไปด้วยแฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ส่วนต่างๆเหล่านี้มีความซับซ้อน และยากต่อการออกแบบโดยทั่วไปแล้วอัตราขยายของแฟลคเตอร์สัดส่วน ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก และเงื่อนไขของกฎควบคุม

จะทำการออกแบบด้วยการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบ ทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้นั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ จึงได้นำเอาวิธีฝูงผึ้งมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยปรับค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ควบคุมเหล่านั้นพร้อมกันทั้งหมด

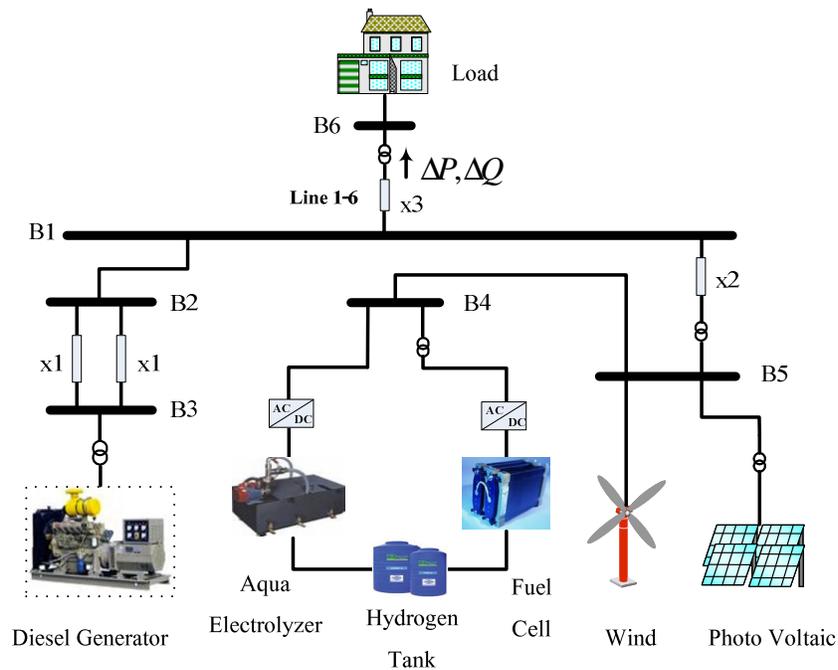
### บทที่ 3

## การออกแบบตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีสำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์โดยวิธี ฝูงผึ้งเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไมโครกริด

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีโดยใช้วิธีฝูงผึ้งในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมให้มีความเหมาะสม เพื่อควบคุมการทำงานของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไมโครกริด ที่มีส่วนประกอบของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วย เนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดไม่คงที่ จึงได้มีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้รับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความด้วยตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีมีประสิทธิภาพ และมีความคงทนต่อการเกิดสิ่งรบกวนในระบบได้สูงกว่าตัววิธีที่นำมาเปรียบเทียบกับ สถานการณ์ที่แตกต่างกัน

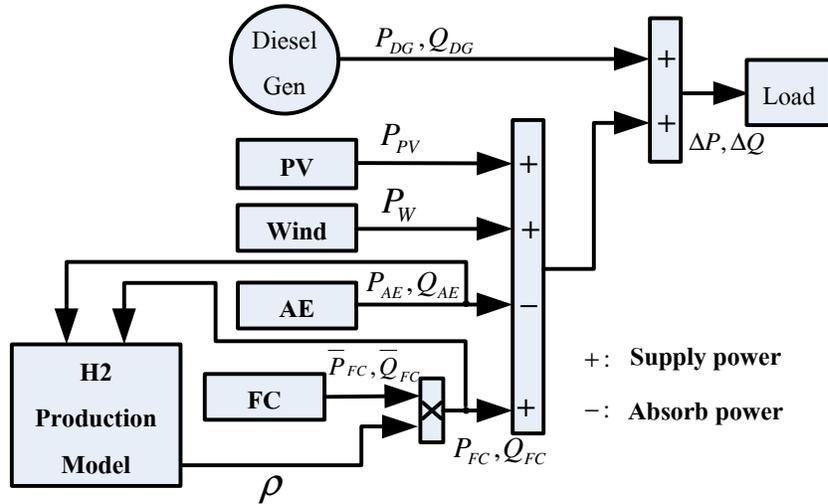
#### 3.1 แบบจำลองของระบบ

##### 3.1.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด



รูปที่ 3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 [21] ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator: DG) ขนาด 20 MVA เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (Wind power generator: WG) ขนาด 4 MW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photo voltaic: PV) ขนาด 800 kW และ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell: FC) ขนาด 2 MW เชื่อมต่อกันเพื่อร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด ขนาด  $10 + j2$  MVA และระบบการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen production) คือ AE ขนาด 3 MW โดยสามารถแสดงเป็นแบบจำลองของระบบได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบไมโครกริด

เมื่อ

$P_{DG}, Q_{DG}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลที่จ่ายเข้าระบบ

$P_{PV}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายเข้าระบบ

$P_W$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่จ่ายเข้าระบบ

$P_{AE}, Q_{AE}$  คือ การรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE จากระบบ

$\rho$  คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถังเก็บ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ FC

$\bar{P}_{FC}, \bar{Q}_{FC}$  คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจ่ายออกมาของ FC

$P_{FC}, Q_{FC}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ FC ที่จ่ายเข้าระบบ

$\Delta P, \Delta Q$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายที่จ่ายไปยังโหลด

จากรูปที่ 3.2 แบบจำลองของระบบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

### 3.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่สาม ที่ประกอบไปด้วย  $[E'_q, \omega, \delta]$  โดยสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

สมการสวิง (Swing equation)

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (3.1)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D(\omega - \omega_s)) / M \quad (3.2)$$

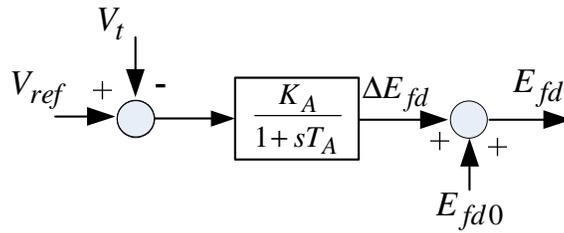
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราว (Transient internal electro-magnetic field) ในแนวแกนขวาง (Quadrature axis)

$$\dot{E}'_q = (E_{fd} - E'_q + I_d(X_d - X'_d)) / T'_{d0} \quad (3.3)$$

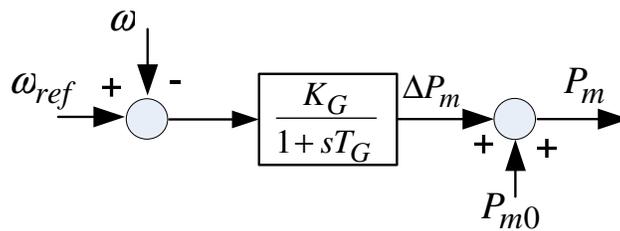
โดยที่

- $\delta$  คือ มุมโรเตอร์ (Rotor angle)
- $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity)
- $\omega_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)
- $P_m$  คือ กำลังทางกล (Mechanical power)
- $P_e$  คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)
- $D$  คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping coefficient)
- $M$  คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
- $E'_q$  คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราวในแนวแกนขวาง
- $E_{fd}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขดฟิลด์ (Field voltage)
- $X_d$  คือ รีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง (Direct axis)
- $X'_d$  คือ รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient reactance) ในแนวแกนตรง
- $I_d$  คือ กระแส (Current) ในแนวแกนตรง
- $T'_{d0}$  คือ ค่าคงที่เวลาชั่วคราว (Transient time constant) ในแนวแกนตรง

โดยเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจะประกอบไปด้วยแบบจำลองอย่างง่ายของตัวกระตุ้น (Exciter) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และแบบจำลองอย่างง่ายของตัวบังคับ (Governor) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 [22]



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น



รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบตัวบังคับ

เครื่องกำเนิดดีเซลมีพิกัด 20 MVA พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดมีดังต่อไปนี้

ความถี่ ( $f$ )	=	60 Hz
ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature resistance) ( $R_a$ )	=	0.0036 pu.
รีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง ( $X_d$ )	=	1.56 pu.
รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสในแนวแกนขวาง ( $X_q$ )	=	1.06 pu.
รีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง ( $X'_d$ )	=	0.296 pu.
ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวของการเปิดวงจรในแนวแกนตรง ( $T'_{d0}$ )	=	1.01s
ค่าสัมประสิทธิ์ของความเฉื่อย ( $H$ )	=	0.8s
ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง ( $D$ )	=	1

พารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละสายมีค่าอิมพีแดนซ์ คือ

รีแอกแตนซ์ของสาย ( $x1$ )	=	0.4 pu.
รีแอกแตนซ์ของสาย ( $x2$ )	=	0.2 pu.
รีแอกแตนซ์ของสาย ( $x3$ )	=	0.001 pu.

พารามิเตอร์ของตัวกระตุ้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายของตัวกระตุ้น} (K_A) &= 10 \\ \text{ค่าคงตัวของตัวกระตุ้น} (T_A) &= 0.1 \text{ s} \end{aligned}$$

พารามิเตอร์ของตัวบังคับ

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายของตัวบังคับ} (K_G) &= 10 \\ \text{ค่าคงตัวของตัวบังคับ} (T_G) &= 4 \text{ s} \end{aligned}$$

ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากในระบบนี้ไม่ได้พิจารณาการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้แทนการจำลองด้วยสัญญาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่เข้าไปยังระบบ

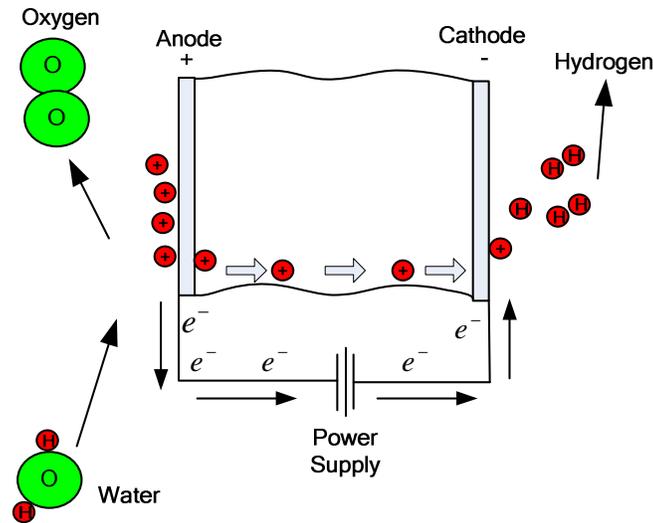
### 3.1.3 หลักการทำงาน และแบบจำลองของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

#### ก. อิเล็กโทรไลเซอร์

อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) [23-25] เป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไฮโดรเจน และออกซิเจนที่บริสุทธิ์ โดยสามารถที่จะแจกจ่ายไปยังความต้องการที่แตกต่างกันเช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ของแต่ละบุคคล ระบบพลังงานทดแทน สถานีเติมเชื้อเพลิง และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม อิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane (PEM) electrolyzer) เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้พื้นที่น้อย หรืออัดแน่นมากที่สุด และง่ายต่อการสร้าง นอกจากนี้ ยังสามารถที่จะผลิตไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง และควมมีประสิทธิภาพที่ระดับความหนาแน่นกระแสสูงอีกด้วย ในอิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน พันธะระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจนของน้ำ ( $H_2O$ ) ได้แยกออกจากกันด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) และตัวเร่งปฏิกิริยาของแพลตินัม (Platinum) ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายออกไป ที่แอโนด เยื่อเซลล์จะทำการแยกไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ออกจากโมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) โปรตอนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) จะเคลื่อนย้ายผ่านเยื่อเซลล์ และกลับมารวมกันที่แคโทดร่วมกับอิเล็กตรอนที่ไหลกลับ ( $e^-$ ) แล้วอยู่ในรูปแบบของไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การประยุกต์ในด้านอื่นๆ ของระบบอิเล็กโทรไลต์ คือ สามารถที่จะใช้เป็นเสมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อที่จะผลิตไฟฟ้าจากไฮโดรเจน และออกซิเจนด้วยการแปลงรูปเพียงเล็กน้อย

ส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลเซอร์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ปั้มน้ำ เครื่องแยกน้ำ-ก๊าซ ถึงแม้ว่า อิเล็กโทรไลเซอร์จะสามารถผลิตได้ทั้ง  $H_2$  และ  $O_2$  ด้วยการแยกไฟฟ้าเคมีของน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วอิเล็กโทรไลเซอร์จะได้รับการพิจารณาเสมือนเครื่องผลิตไฮโดรเจน และได้จำแนกตามระบบการป้อนที่แอโนด หรือระบบการป้อนที่แคโทดโดยจะขึ้นอยู่กับว่าทางเข้าของน้ำอยู่ที่ไหน เมื่ออิเล็กโทรไลเซอร์ใช้สำหรับเป็นเครื่องผลิตไฮโดรเจน ระบบการป้อนที่แคโทดจึงเป็น

ตัวเลือกที่ดี เนื่องจากตัวแยกซึ่งแยกน้ำ และออกซิเจนได้รับการจัดออกที่แอโนด พร้อมกับออกซิเจนได้รับการระบายอากาศร่วมกับน้ำ แต่ข้อเสียในกรณีนี้คือจะมีข้อจำกัดในการโอนถ่ายปริมาณมาก และความหนาแน่นของกระแสต่ำ ในการศึกษาค้างนี้แบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์แบบการป้อนที่แอโนดได้ประยุกต์ใช้ในการศึกษา เนื่องจากส่วนใหญ่อิเล็กโทรไลเซอร์ในด้านธุรกิจ และในหน่วยทางการทหารเป็นอิเล็กโทรไลเซอร์แบบการป้อนที่แอโนด



รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์

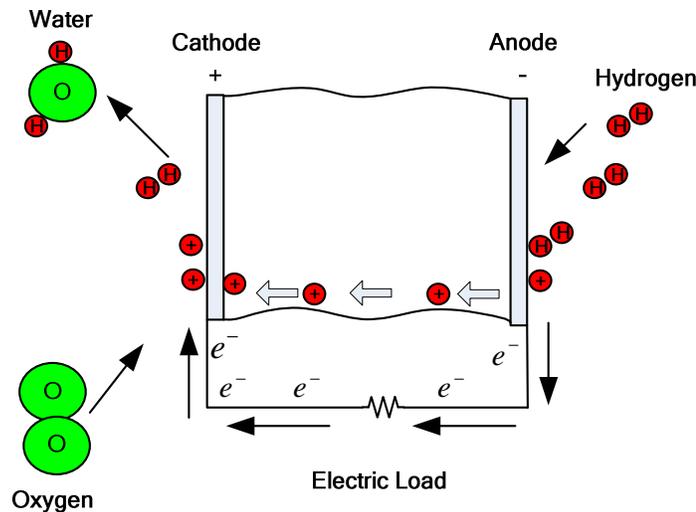
การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ประกอบไปด้วย การใช้ผลิต  $O_2$  สำหรับเครื่องช่วยหายใจของคนป่วย การใช้ผลิต  $H_2$  เพื่อเป็นเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ผลิต  $H_2$  เพื่อเป็นระบบพลังงานสำรอง การผลิต  $H_2$  สำหรับควบคุมการกักตร้อนของสารเคมี ตัวตรวจจับโครมาโทกราฟี (Chromatograph) ของแก๊ส การขึ้นรูปเหล็ก และการเชื่อม อิเล็กโทรไลเซอร์ที่ศึกษาในปัจจุบัน งานวิจัยหลายๆ งานวิจัยจะมาจากภาคอุตสาหกรรม ที่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ และระบบพลังงานทดแทน อย่างเช่น Onda [26] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ เพื่อที่จะวิเคราะห์อิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน Ullberg [27] ได้แสดงแบบจำลองสำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์แอลคาไลน์บนพื้นฐานของทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และการโอนถ่ายความร้อน (Heat transfer) เมื่อไม่นานมานี้ ระบบพลังงานทดแทนโดย Kelouwani et al. [28] ได้พิสูจน์ระบบพลังงานทดแทนที่ทำงานตามลำพังร่วมกับการสะสมของไฮโดรเจน และ Khan et al. [29] ได้นำเสนอแบบจำลองของระบบพลังงานที่มีการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเซลล์เชื้อเพลิง

## ข. เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) [30-36] เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบตลอดเวลา นั่นคือการเติมไฮโดรเจน และออกซิเจนตลอดเวลาซึ่งช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป นอกจากนี้ที่ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเข้าทำปฏิกิริยาเมื่ออัดประจุ หรือคายประจุ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และค่อนข้างเสถียร สารตั้งต้นที่ใช้โดยทั่วไปในเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนที่ด้านแอโนด และก๊าซออกซิเจนที่ด้านแคโทด (เซลล์ไฮโดรเจน) โดยปกติแล้วเมื่อมีสารตั้งต้นไหลเข้าสู่ระบบ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็จะไหลออกจากระบบไปด้วย ดังนั้นการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดำเนินต่อไปได้เรื่อยๆ หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงได้ค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิส Christian Friedrich Schönbein ในปี ค.ศ. 1838 และตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาใน "Philosophical Magazine" จากบทความชิ้นนี้ เซลล์เชื้อเพลิงได้สร้างขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาว Welsh Sir William Grove โดยต้นแบบได้ตีพิมพ์ในปี 1843 จนกระทั่งในปี 1959 F.T. Bacon วิศวกรชาวอังกฤษ ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 kW ได้สำเร็จ ในปีเดียวกันนี้เองกลุ่มที่นำโดย Harry Ibrag ได้ผลิตแทรกเตอร์ขนาด 15 kW ให้กับ Allis-Chalmers ซึ่งได้นำไปแสดงทั่วสหรัฐอเมริกา ระบบนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ไฮโดรเจนอัด และก๊าซออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น ในปีเดียวกันนี้เองที่ Bacon และทีมงานได้สร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาด 5 kW ที่ใช้งานได้จริงสำหรับเครื่องเชื่อม ซึ่งนำไปสู่การจดสิทธิบัตรของ Bacon ในช่วงยุค 1960 หลักการเดียวกันนี้ก็ได้นำไปใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐด้วยเพื่อผลิตน้ำดื่ม และพลังงาน ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต้นนี้ยังสูงอยู่มากเพราะค่าวัสดุที่แพง นอกจากนี้ยังทำงานในอุณหภูมิที่สูงมากจนเป็นปัญหาในการนำไปประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงยังคงเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากเชื้อเพลิงนั้นสามารถหาได้ง่าย (ไฮโดรเจน และออกซิเจน) และการใช้งานที่สะอาด

การพัฒนาต่อมาในช่วงยุค 1980 และ 1990 โดย G. Ballard เจ้าของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงในแคนาดาที่โด่งดัง Ballard Power Systems Inc. ได้ใช้เนฟฟิออน(Nafion) ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกลงและทนทานเป็นอิเล็กโทรไลต์ และการลดการใช้แพลทินัม ทำให้อายุการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภค เช่นในรถยนต์มีความเป็นไปได้มากขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงมักจะได้รับการมองว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง และปราศจากมลพิษ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น ก๊าซมีเทน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันที่เกิดจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำ อย่างไรก็ตามยังมีความกังวลอยู่ในขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งใช้พลังงานมาก การผลิตไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่มีไฮโดรเจน เช่น น้ำ หรือ เชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากนั้นยังต้องใช้

ไฟฟ้าซึ่งก็ผลิตมาจากแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิม ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน หรือแม้แต่พลังงานนิวเคลียร์ ในขณะที่พลังงานทางเลือกอื่น เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ก็อาจสามารถใช้ได้ แต่ราคาก็ยังสูงมากในปัจจุบัน ดังนั้นจึงไม่สามารถกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอิสระจากเชื้อเพลิงแบบทั่วไป จนกว่าจะสามารถหาวิธีการผลิตไฮโดรเจนปริมาณมากด้วยพลังงานทดแทน หรือพลังงานนิวเคลียร์



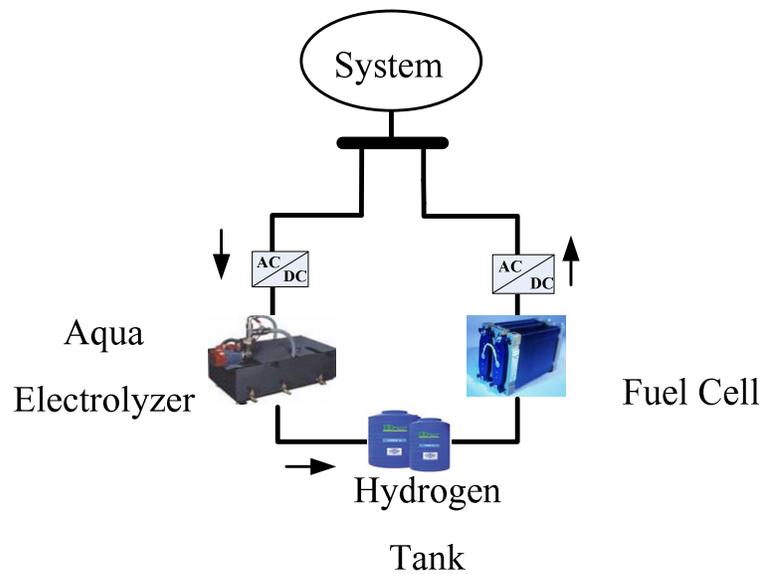
รูปที่ 3.6 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells) หรือ PEMFC ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พอลิเมอร์ที่ให้โปรตอนผ่านได้จะแยกฝั่งแอโนด และแคโทดออกจากกัน แต่ละด้านจะมีขั้วไฟฟ้าของตัวเอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแผ่นคาร์บอนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ในด้านของแอโนด ไฮโดรเจนจะแพร่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด ทำให้แตกตัวออกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน โปรตอนจะวิ่งผ่านเยื่อขึ้นไปที่แคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะได้รับการบังคับให้วิ่งเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก (ให้พลังงานออกมา) เพราะว่าเยื่อที่นั่นไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคโทด โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่มาจากแอโนด ผ่านวงจรภายนอก และมารวมกับออกซิเจนและโปรตอนที่ด้านนี้กลายเป็นน้ำ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้า หรือเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแก่ยานพาหนะ หรือตามสถานที่ต่าง ๆ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีจุดเด่นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ และความดันต่ำ อีกทั้งยังมีความพิเศษในส่วนของเยื่อพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ตามปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยที่ขั้วอิเล็กโทรด

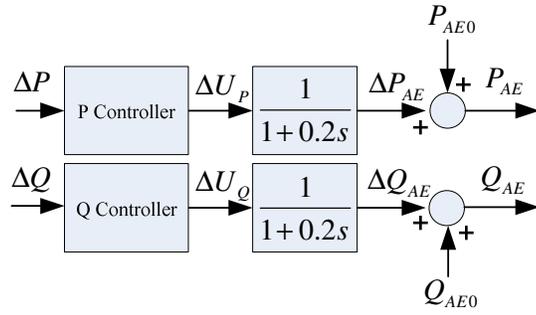
ของเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัมและขั้วอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้โพลีเมอร์แข็ง คือ แนนฟิออน เป็นเยื่อเคลื่อนผ่านประจุ สารตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ใช้ ก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน(หรืออากาศ) โดยก๊าซไฮโดรเจนจะแตกตัวบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ด้านแอโนด ให้ผลออกมาคือ โปรตอน และอิเล็กตรอน ตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แนฟิออนเป็นเยื่อผ่านนี้ อีออนที่มีประจุบวกเท่านั้นจึงจะผ่านได้ ดังนั้น โปรตอนจึงเคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านโหลด และเป็นที่ยูกันที่ว่าไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นก็จะได้แสงสว่างจากไฟฟ้าที่ผลิตได้หากโหลดชนิดนั้นคือหลอดไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดถือว่าครบวงจร จากนั้นอิเล็กตรอน โปรตอน และ ก๊าซออกซิเจน ตามปฏิกิริยารีดักชันก็จะรวมตัวกันกลายเป็นน้ำ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

### ค. แบบจำลองของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

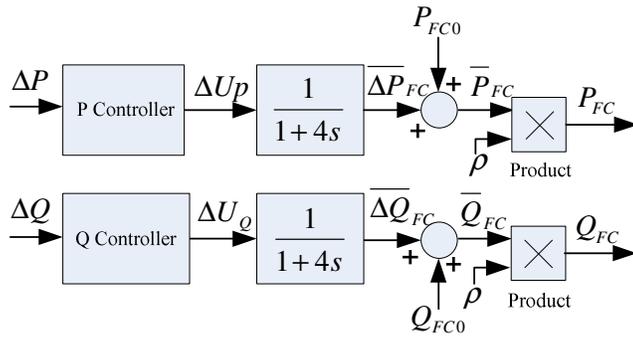


รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

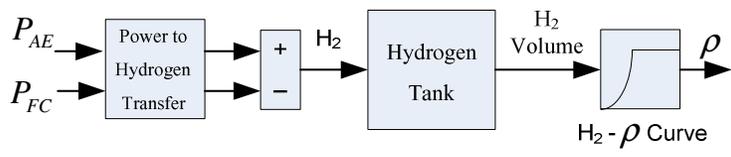
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง โดยสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 3.8 ในส่วนของระบบการผลิตไฮโดรเจน AE จะทำการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบมาผลิตเป็นไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.029 (l/kWh) แล้วนำเอาไฮโดรเจนที่ได้ไปเก็บสะสมไว้ในถังเก็บขนาด 500 ลิตร เพื่อให้ FC ทำการเปลี่ยนจากไฮโดรเจนเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าให้กับระบบด้วยอัตรา 0.061 (l/kWh)



ก.แบบจำลองของอิลีกโตรไลเซอร์



ข.แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง



ค.แบบจำลองการผลิต และการนำไปใช้ของไฮโดรเจน

รูปที่ 3.8 แบบจำลอง AE และ FC พร้อมด้วยตัวควบคุม P และ Q

เมื่อ

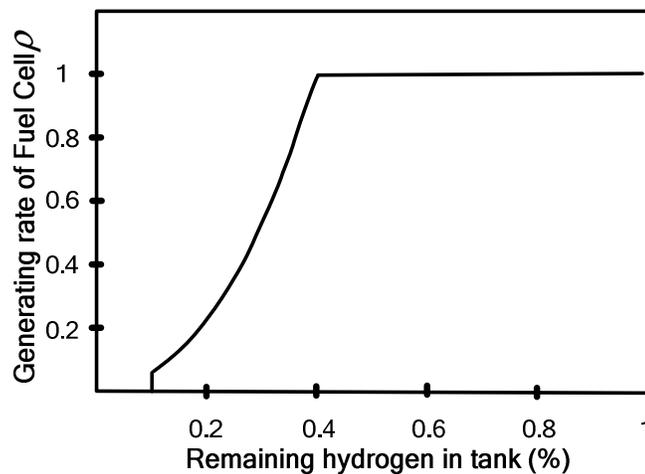
- $\Delta P_{AE}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของการรับกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบของ AE
- $\Delta Q_{AE}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของการรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบของ AE
- $P_{AE0}$  คือ การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เริ่มต้น (Initial) (กำหนดให้ = 0.05 pu)
- $Q_{AE0}$  คือ การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เริ่มต้น (Initial) (กำหนดให้ = 0 pu)
- $\overline{\Delta P}_{FC}$  คือ การเปลี่ยนแปลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ควรจะได้รับของ FC
- $\overline{\Delta Q}_{FC}$  คือ การเปลี่ยนแปลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC
- $\overline{P}_{FC0}$  คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC เริ่มต้น (0.05 pu.)

$\bar{Q}_{FC0}$  คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC เริ่มต้น (0 pu.)  
 การรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE สามารถหาได้จาก

$$P_{AE} = P_{AE0} + \Delta P_{AE} \quad (3.4)$$

$$Q_{AE} = Q_{AE0} + \Delta Q_{AE} \quad (3.5)$$

การทำงานของ FC ในการเริ่มเดินเครื่อง และการหยุดการทำงาน ส่งผลให้เกิดแรงดันตก [37] ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในการจ่ายให้กับระบบของ FC นั้นจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนในถังดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถัง และเอาต์พุตของ FC

เมื่อปริมาณไฮโดรเจนในถังมีน้อยกว่า 10 % การผลิตกำลังไฟฟ้าของ FC จะหยุดการทำงาน จนกระทั่งปริมาณไฮโดรเจนจะมีมากกว่า 50 % และอัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าของ FC ในขณะที่ไฮโดรเจนมีปริมาณตั้งแต่ 10-40 % จะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.9 [38] ดังนั้นสามารถหาลำดับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ FC ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{FC} = \rho * \bar{P}_{FC} \quad (3.6)$$

$$Q_{FC} = \rho * \bar{Q}_{FC} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$\bar{P}_{FC} = P_{FC0} + \Delta P_{FC} \quad (3.8)$$

$$\bar{Q}_{FC} = Q_{FC0} + \Delta Q_{FC} \quad (3.9)$$

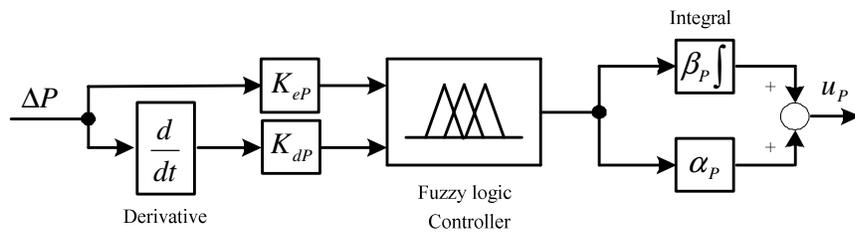
แต่เนื่องจากค่าคงตัวเวลาของ FC นั้นมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าคงตัวเวลาของ AE ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงไม่คิดการควบคุมของ FC ( $\Delta P_{FC} = \Delta Q_{FC} = 0$ ) จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) สามารถสรุปได้เป็น

$$\bar{P}_{FC} = P_{FC0} \quad (3.10)$$

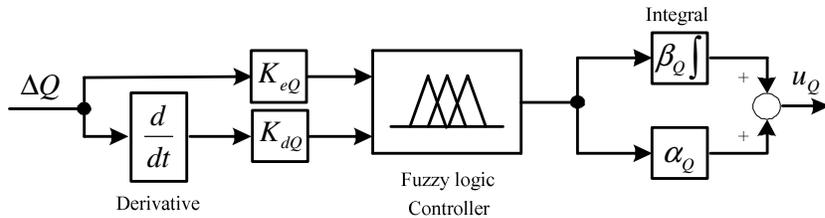
$$\bar{Q}_{FC} = Q_{FC0} \quad (3.11)$$

### 3.2 การออกแบบตัวควบคุม

จากรูปที่ 3.8 (ก) ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P Controller) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q Controller) ได้ทำการแทนด้วยตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE



รูปที่ 3.11 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

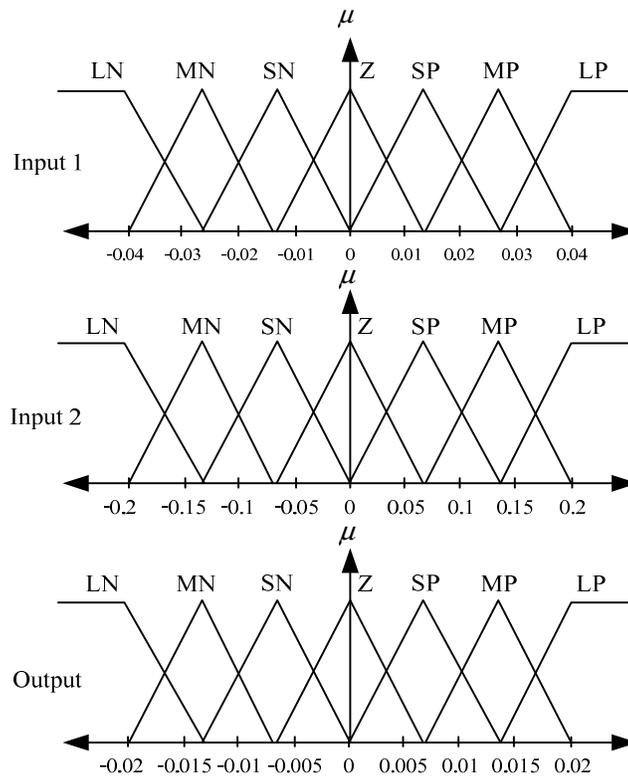
เมื่อ

$K_{eP}, K_{dP}, \beta_P$  และ  $\alpha_P$  คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

$K_{eQ}, K_{dQ}, \beta_Q$  และ  $\alpha_Q$  คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

$u_P$  และ  $u_Q$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีสำหรับควบคุม กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน

ในส่วนของฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy โลจิกที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12-3.13 และกฎควบคุมของตัวควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานะเริ่มต้นจะใช้แบบเดียวกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE



1. ตัวควบคุมฟuzzy logic-PID ใอดีสำหรับ AE แบบทั่วไป (Conventional fuzzy logic-PID AE controller: Conventional FLPID) โดยตัวควบคุมนี้จะใช้ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.12-3.13 และ ตารางที่ 3.1 ตามลำดับ ส่วนทางด้านแฟลคเตอร์สัดส่วนจะทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

2. ตัวควบคุมฟuzzy logic-PID ใอดีสำหรับ AE แบบเหมาะสม (Optimal fuzzy logic-PID AE controller: Optimal FLPID) ตัวควบคุมนี้ เป็นตัวควบคุมที่งานวิจัยนี้นำเสนอ โดยจะทำการออกแบบทั้งในส่วนของ แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งพร้อมกันทั้งหมด

สำหรับการออกแบบให้มีความเหมาะสม การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน ในสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ได้พิจารณาในการนำมาหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยใช้วิธี integral absolute error (IAE) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 3.12

$$\text{Minimize } IAE = \int_0^{\infty} (|\Delta P(t)| + |\Delta Q(t)|) dt \quad (3.12)$$

เมื่อ

$\Delta P$  คือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย1-6

$\Delta Q$  คือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย1-6

โดยพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบกำหนดค่าไว้ดังนี้

แฟลคเตอร์สัดส่วนทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -10 ถึง 10

ฟังก์ชันสมาชิกทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50% ถึง +50% จากตำแหน่งเดิม

กฎควบคุมทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 (LN-LP)

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธีฝูงผึ้งกำหนดดังนี้

จำนวนผึ้งสำรวจ แทนด้วย ( $n$ ) = 100 ตัว

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย ( $m$ ) = 10 ค่า

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก  $m$  ( $e$ ) = 4 ค่า

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ  $e$  ( $ne$ ) = 10 ตัว

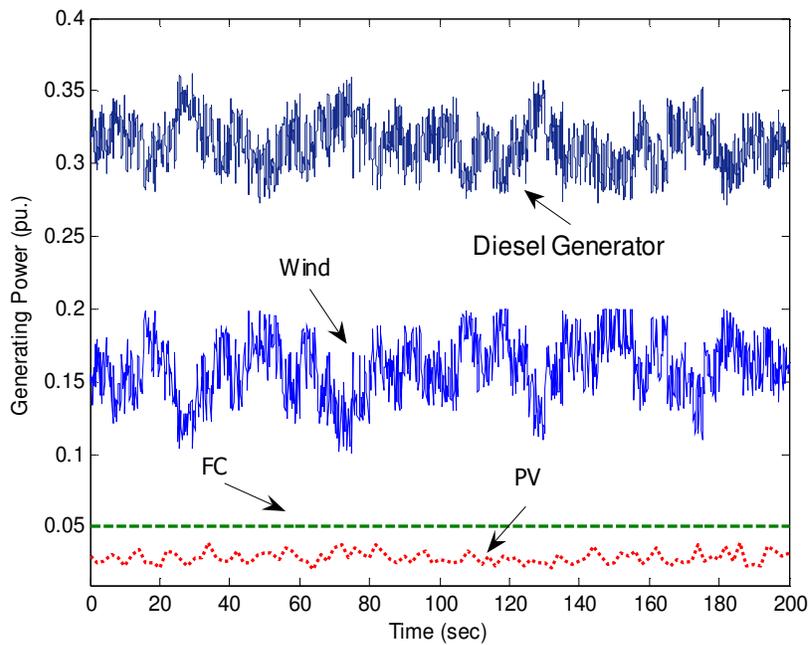
จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ  $m-e$  ( $ns$ ) = 5 ตัว

ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ  $m$  ( $ngh$ ) = 30%

จำนวนรอบของการค้นหา ( $NC$ ) = 100 รอบ

### 3.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ

เพื่อที่จะทดสอบถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบ การจำลองสถานการณ์การเกิดสิ่งรบกวนในสถานะต่างๆ ได้สมมติขึ้น เริ่มจากกรณีที่ 1 สมมติให้มีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจ่ายเข้าไปยังโหลดที่มีค่าคงที่  $10 + j2$  MVA ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในกรณีนี้ ได้ใช้เป็นกรณีในการออกแบบทั้งตัวควบคุม Conventional FLPID และ Optimal FLPID ด้วยการจำลองในโปรแกรม Dymola ร่วมกับ ObjecStab และ โปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ในการออกแบบปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม Conventional FLPID (แฟกเตอร์สัดส่วน) และ Optimal FLPID (แฟกเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และตาราง 3.3



รูปที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในระบบไมโครกริด

ตารางที่ 3.2 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

ตัวควบคุม	$K_{eP}$	$K_{dP}$	$\beta_P$	$\alpha_P$	MF	CR
Conv.FLPID	0.749	0.297	-1.051	0.242	รูปที่ 3.12	ตารางที่ 3.1
Optimal FLPID	0.743	0.714	-0.880	0.0582	รูปที่ 3.15	ตารางที่ 3.4

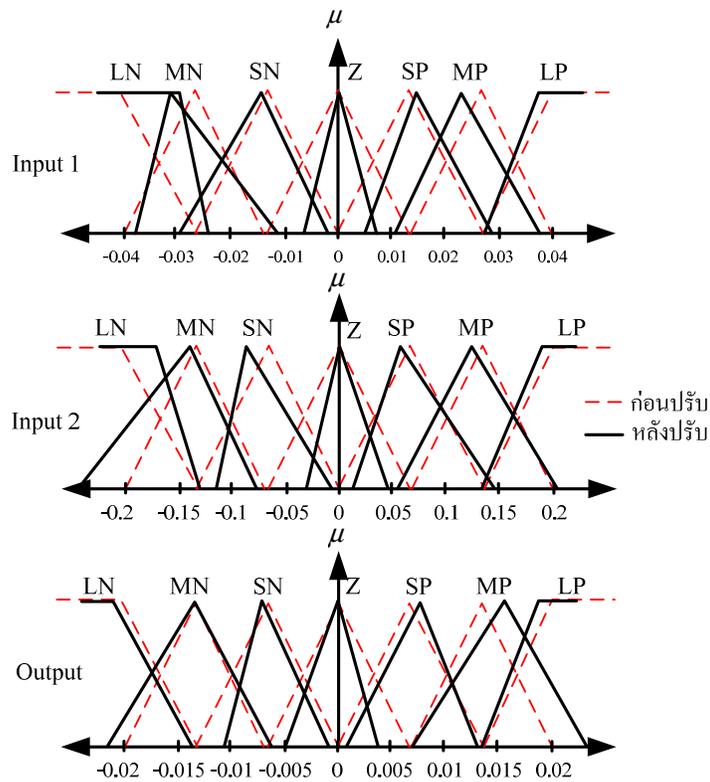
ตารางที่ 3.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

ตัวควบคุม	$K_{eQ}$	$K_{dQ}$	$\beta_Q$	$\alpha_Q$	MF	CR
Conv. FLPID	0.557	0.5855	1.027	-0.204	รูปที่ 3.13	ตารางที่ 3.1
Optimal FLPID	0.729	1.092	0.546	-0.199	รูปที่ 3.16	ตารางที่ 3.5

โดย

MF คือ ฟังก์ชันสมาชิก

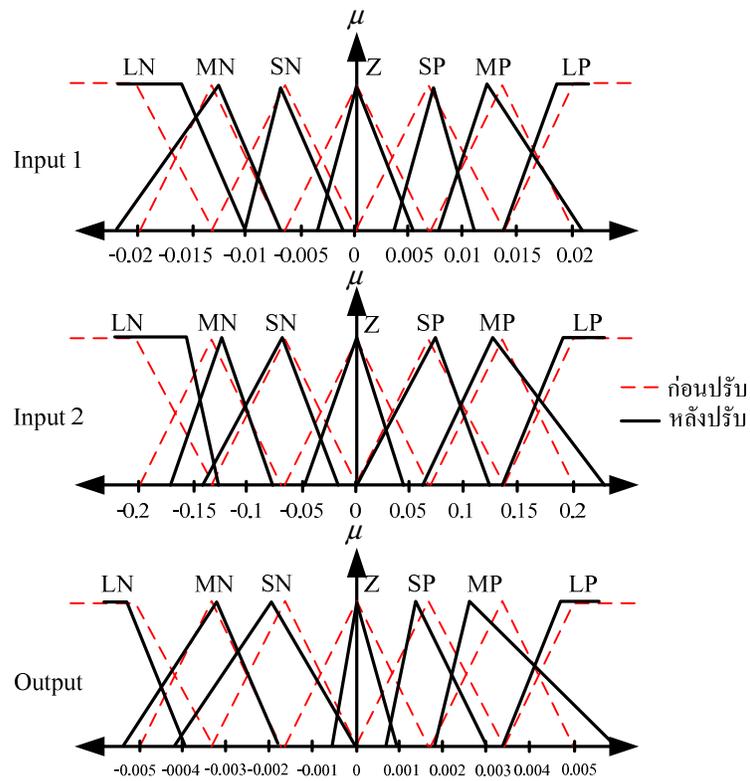
CR คือ กฎควบคุม



รูปที่ 3.15 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 3.4 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	LP	MP	MP	MP	SP	SP	Z
	MN	MP	MP	SP	SP	SP	SN	SN
	SN	MP	MP	Z	SP	SN	SN	LN
	Z	MP	SP	SP	Z	SN	MN	MN
	SP	MP	SP	SP	Z	Z	SN	MN
	MP	SP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
	LP	SP	Z	MN	MN	SN	MN	MN

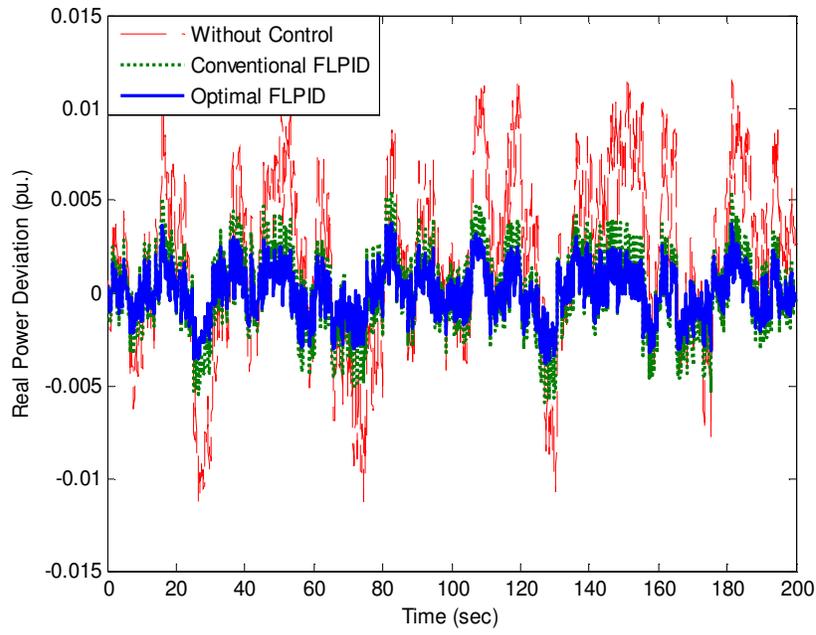


รูปที่ 3.16 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น

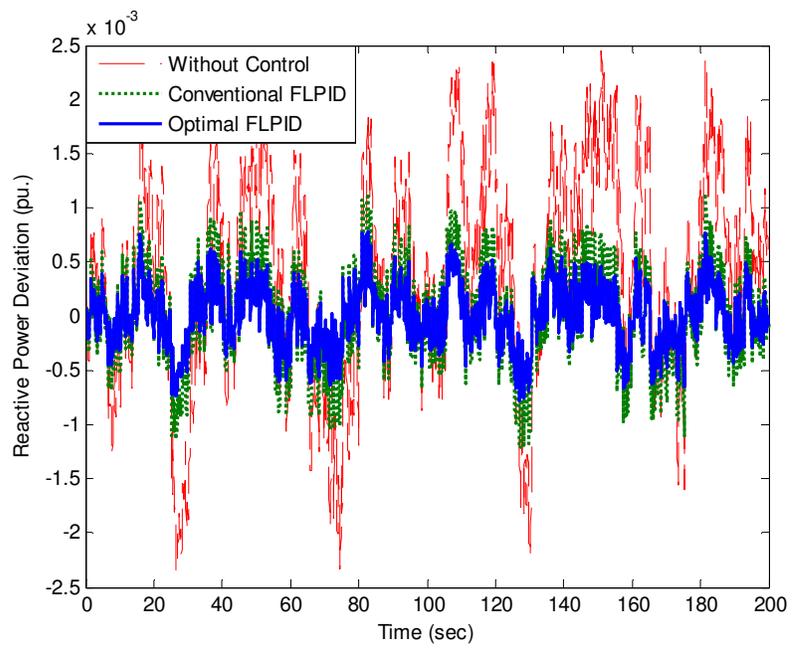
ตารางที่ 3.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

		<i>Input2</i>						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
<i>Input1</i>	LN	LP	LP	MP	MP	MP	SP	Z
	MN	LP	MP	MP	SP	Z	SN	MN
	SN	MP	SP	SP	Z	Z	SN	MN
	Z	MP	MP	SP	Z	MN	MN	MN
	SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
	MP	SP	SP	SP	SN	SN	MN	MN
	LP	SP	SN	MN	MN	LN	LN	MN

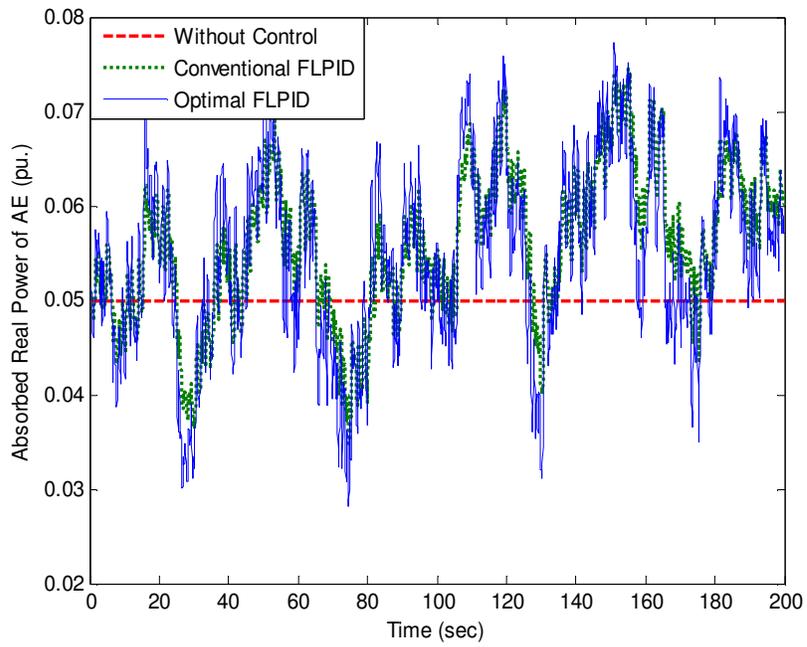
รูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงผลการปรับตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกแต่ละตัวซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม และแต่ละฟังก์ชันสมาชิกนั้นจะมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผลในการควบคุมระบบ ทางด้านผลการปรับกฎควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขของกฎนั้นได้เปลี่ยนไปบางตำแหน่ง เพื่อให้เปลี่ยนไปตามความต้องการของระบบ เช่น *Input 1* คือ LN และ *Input 2* คือ MN จะเห็นได้ว่า ในด้านของกฎตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE นั้นจะเปลี่ยนเป็น MP เนื่องจากว่าหากมีการชดเชยที่มากกว่านี้อาจจะทำให้เกินความต้องการของระบบ หรือถ้าหากชดเชยน้อยกว่านี้ ก็อาจจะทำให้ไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงเสถียรภาพ โดยในส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีผลแตกต่างกัน เนื่องจากการทำงานของตัวควบคุมทั้ง 2 ทำงานแยกอิสระกัน



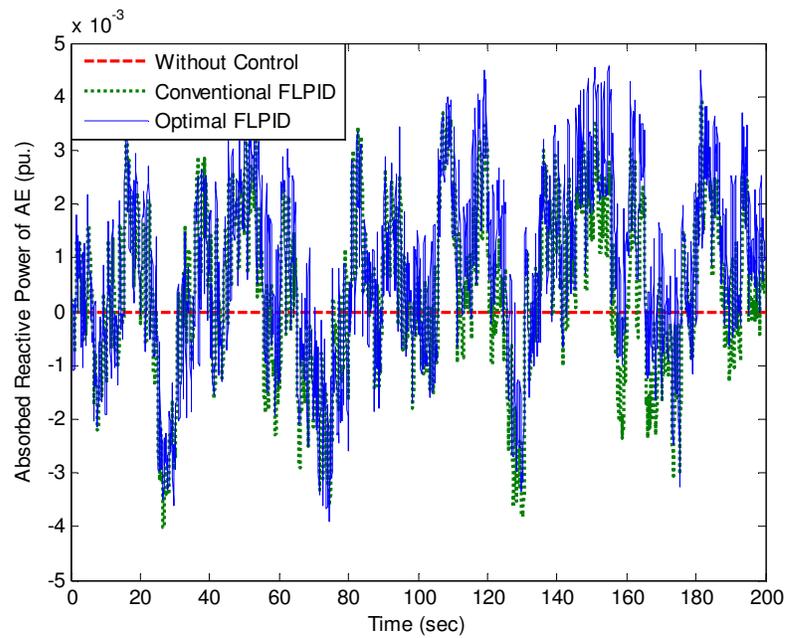
รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1



รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1



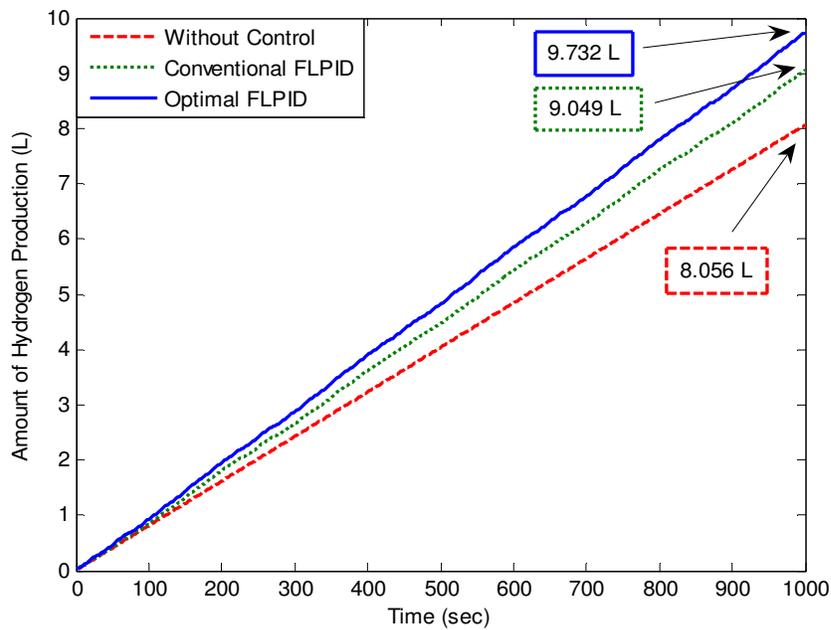
รูปที่ 3.19 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 1



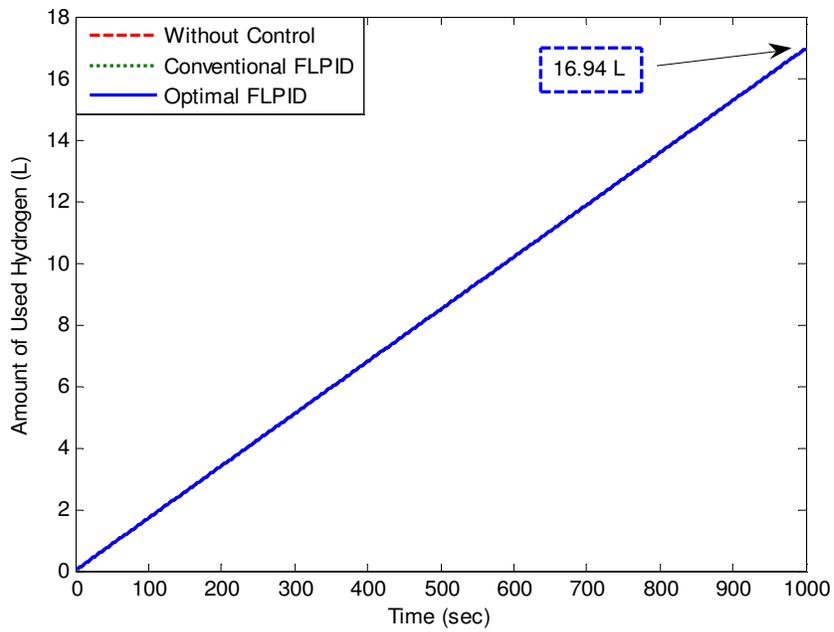
รูปที่ 3.20 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 1

การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 สมมติว่าในระบบมีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จ่ายเข้าไปยังระบบ ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในสาย 1-6 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.17 และ 3.18 ได้แสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของ AE เมื่อระบบมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่คงที่ ภายใต้ตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีที่ออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ดังที่นำเสนอ (Optimal FLPID) สามารถที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนให้น้อยลงกว่าวิธีออกแบบโดยทั่วไป (Conventional FLPID) และระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ให้ AE รับไฟฟ้าคงที่) ส่วนพฤติกรรมทางพลวัตในการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 และ 3.20 จะเห็นได้ว่า AE ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุม Optimal FLPID AE สามารถที่จะรับ และจ่ายได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

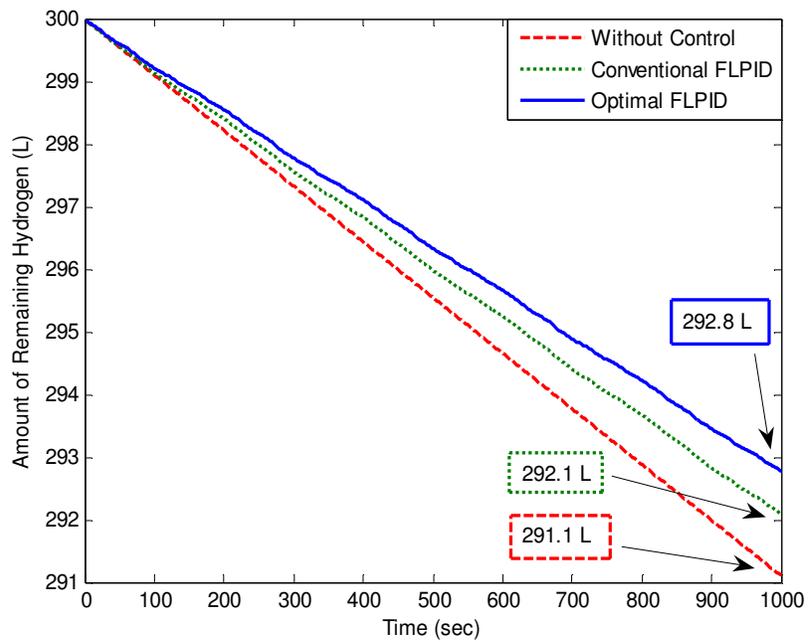
นอกจากนั้น รูปที่ 3.21 ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณการผลิตไฮโดรเจนของวิธีที่นำมาเสนอนั้นสามารถที่จะผลิตได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ รูปที่ 3.22 แสดงปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปผลิตเป็นกำลังไฟฟ้า แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่คิดผลการควบคุมของ FC ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้าแต่ละวิธีที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อวิธีที่นำมาเสนอนั้นสามารถที่จะผลิตได้มากกว่า แต่ใช้เท่ากันกับวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือภายในถึงนั้นมีมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.21 ปริมาณไฮโดรเจนที่ AE ผลิตได้ในกรณีที่ 1

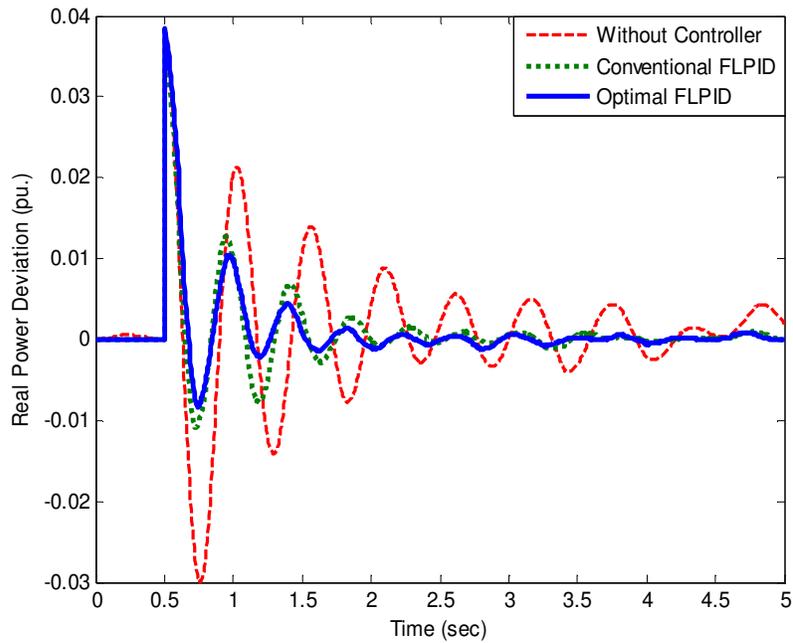


รูปที่ 3.22 ปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปใช้ในกรณีที่ 1

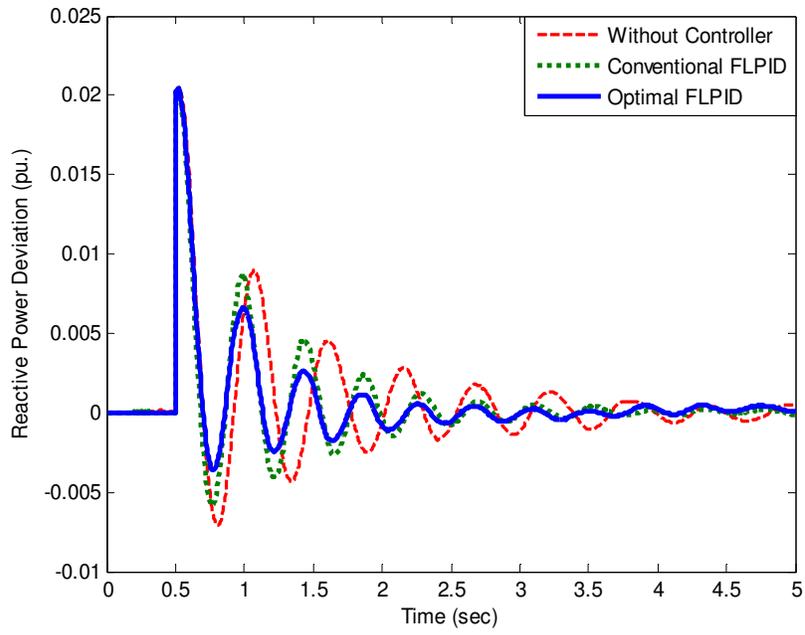


รูปที่ 3.23 ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือในถังในกรณีที่ 1

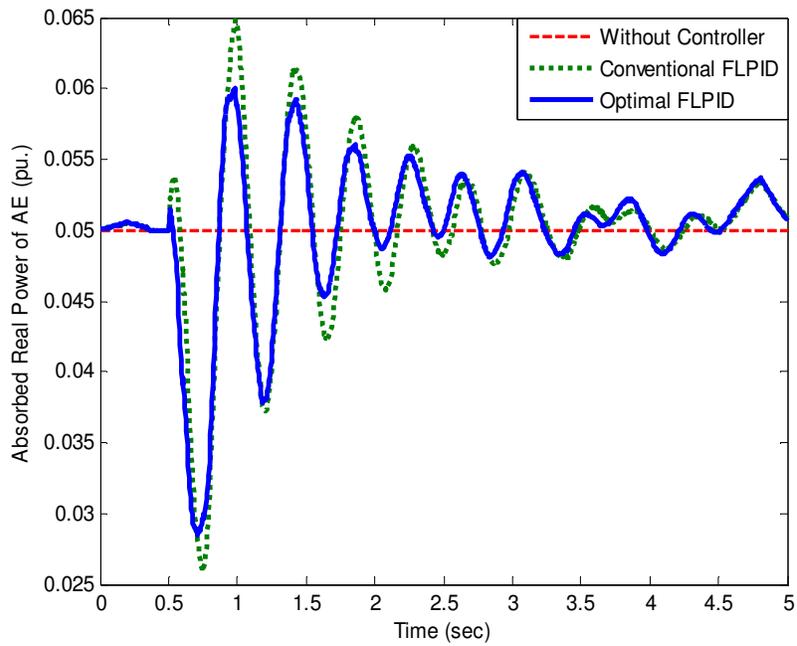
ในกรณีที่ 2 สมมติว่าจากในกรณีแรกนั้น เกิดความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจาก 0.5 เป็น 0.6 pu. เมื่อพิจารณาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และ 3.25 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนภายใต้การควบคุมของ AE ที่ใช้ตัวควบคุมพีชชี-โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีฝูงสิ่งคั้งที่นำเสนอ นั้น มีการแกว่งที่น้อยกว่า และสามารถที่จะกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าตัวควบคุม พีชชี-โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบโดยทั่วไป และระบบที่ไม่มีตัวควบคุม โดยผลการรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตไฮโดรเจนของ AE นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.26 และ 3.27



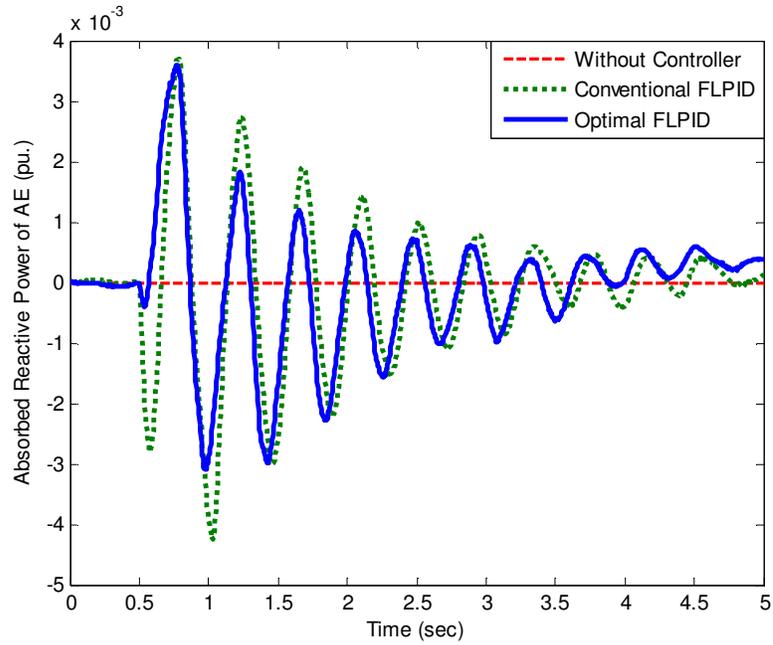
รูปที่ 3.24 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2



รูปที่ 3.25 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2

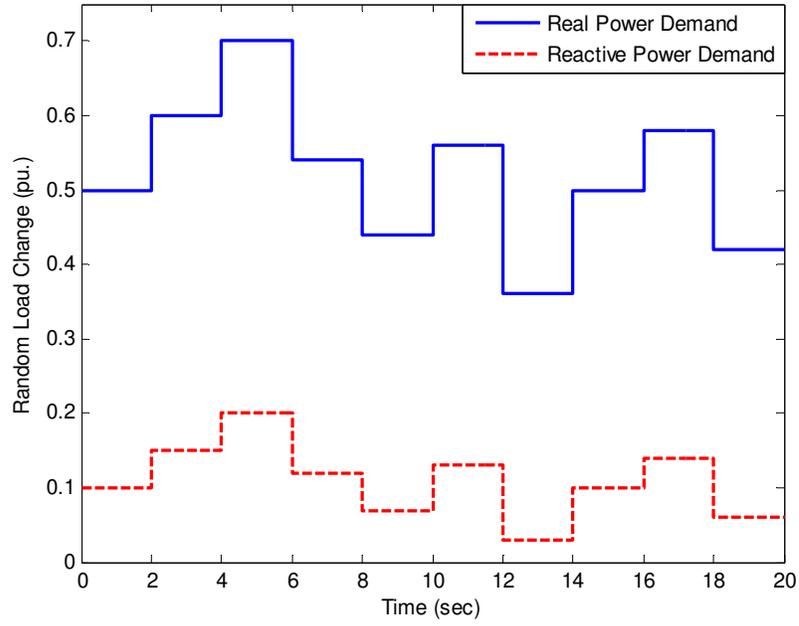


รูปที่ 3.26 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

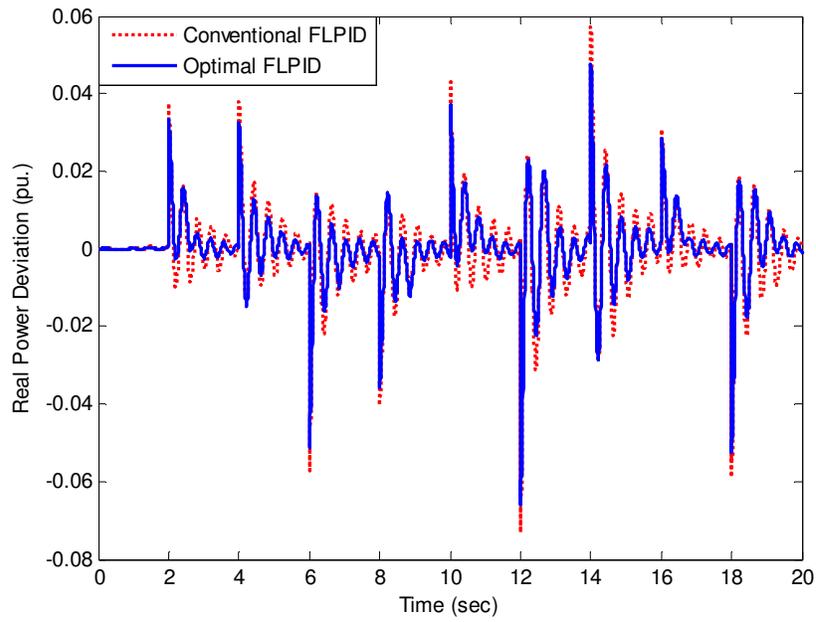


รูปที่ 3.27 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

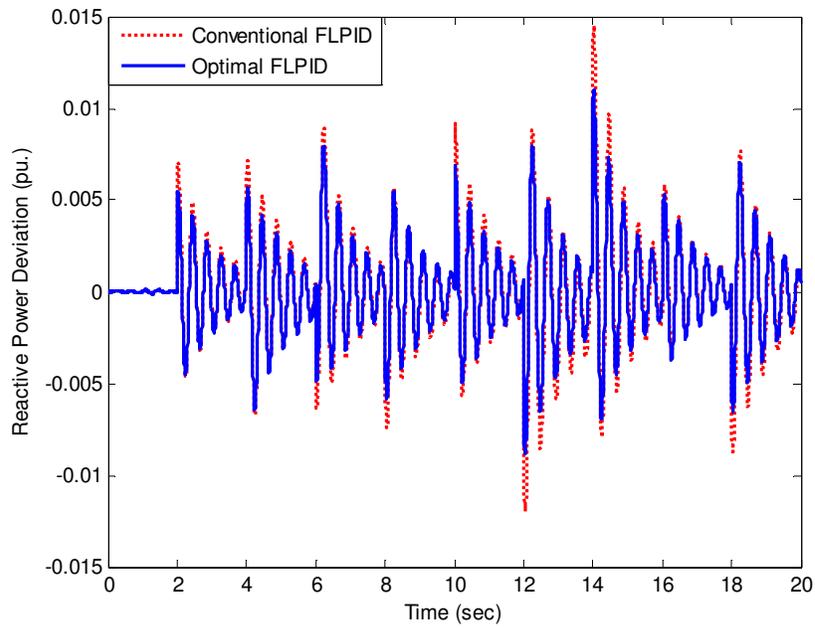
ในกรณีที่ 3 สมมติว่าในกรณีที่ 1 ระบบมีความต้องการของโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามรูปที่ 3.28 ผลตอบสนองของการแก้กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30 ได้แสดงให้เห็นว่า การทำงานของ AE ภายใต้การควบคุมของฟuzzy โลกิก-พีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบ และพฤติกรรมในการรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.31 และ 3.32



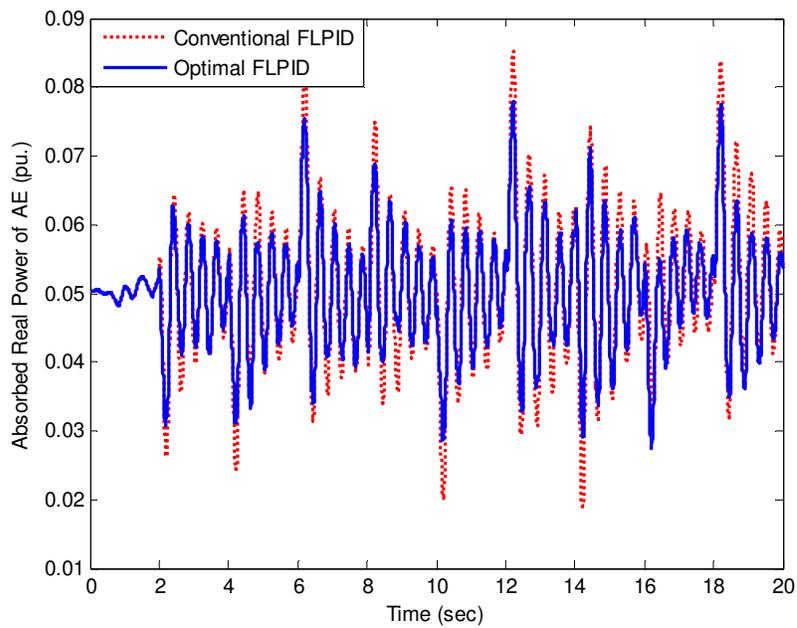
รูปที่ 3.28 ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของโหลด



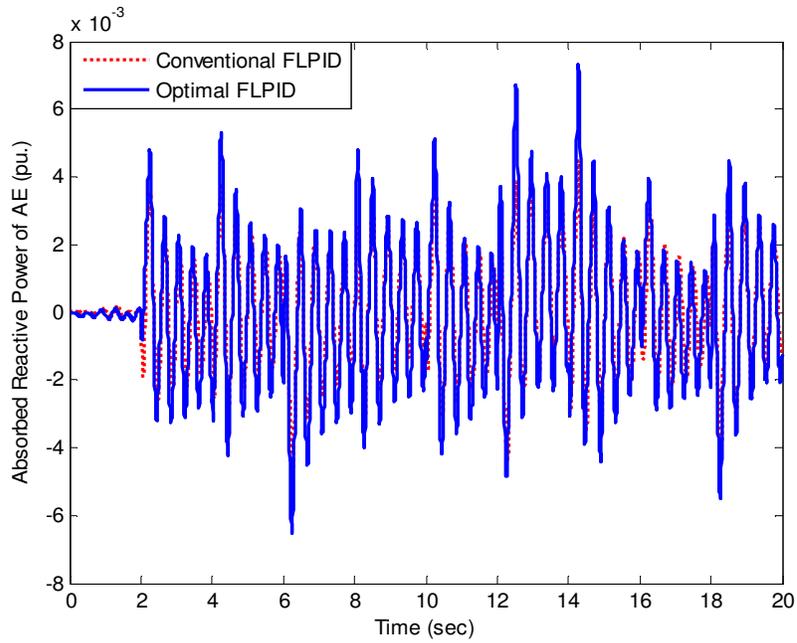
รูปที่ 3.29 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีนี้ที่ 3



รูปที่ 3.30 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.31 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.32 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 3

### 3.4 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชี-โลจิก-พีไอดีเพื่อควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE มาผลิตเป็นไฮโดรเจนสำหรับ FC เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีผลจากการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริด ในส่วนของแพ็คเกจร์ตัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมของพีชชี-โลจิก-พีไอดีนั้น สามารถออกแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือการลองผิดลองถูก ด้วยการใช้วิธีฝูงผึ้งในการค้นหาค่าที่เหมาะสมพร้อมกันทั้งหมดแบบอัตโนมัติ ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การประยุกต์ใช้ AE ที่ทำงานภายใต้การควบคุมของตัวควบคุม Optimal FLPID ดังที่นำเสนอ นั้น สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุม Conventional FLPID และระบบที่ไม่ได้ทำการควบคุม นอกจากนี้ พฤติกรรมทางพลวัตของการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ภายใต้การควบคุมของวิธีที่นำเสนอ นั้น สามารถตอบสนองได้ดีกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองการเกิดลิ่งรบกวนที่แตกต่างกัน

## บทที่ 4

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพที่คล้ายกับตัวควบคุมพีไอดี และมีคุณลักษณะการทำงานแบบพีชชีโลจิก จึงได้มีการนำเอาตัวควบคุมพีชชีโลจิกมาทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี ที่เรียกว่าตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี มีความยุ่งยาก และมีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทั่วไปนั้นยังมีสมรรถนะที่ไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้งเข้าในการปรับค่าที่เหมาะสมพร้อมกันทั้งหมด ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถที่จะออกแบบอัตราขยายของแฟลคเตอร์สัดส่วน ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก และเงื่อนไขของกฎควบคุมได้พร้อมกันทั้งหมดแบบอัตโนมัติ โดยปราศจากการลองผิดลองถูก หรือใช้ความชำนาญการของผู้ออกแบบ
- 2) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ออกแบบตัวควบคุมมากกว่า 1 ตัวให้ทำงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสม
- 3) ได้ประยุกต์วิธีที่นำเสนอไปออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดที่มีส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วยได้ ผลที่ได้คือ อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุมที่นำเสนอมานั้นมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพระบบได้ดีกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีชชีโลจิก-พีไอดี ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ดังที่งานวิจัยนี้นำเสนอ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่นๆ ได้ เช่น

- 1) สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ Flexible AC transmission system (FACTS) แบบอื่นได้
- 2) สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ชดเชยมากกว่า 1 ตัว ทั้งแบบชนิดเดียวกัน และต่างชนิดกันได้
- 3) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ได้

อย่างไรก็ตามวิธีที่นำเสนอขึ้นเป็นการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมพีซีซี โลจิก-พีไอดี โดยทำการออกแบบจากการทดสอบกรณีเดียวแต่ตัวควบคุมยังสามารถที่จะรองรับกับการทำงานกรณีอื่นๆได้ แต่สำหรับการออกแบบเพื่อใช้งานจริงควรที่จะทำการออกแบบโดยใช้หลายๆกรณีศึกษา เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้ขึ้นมีความเหมาะสมกับทุกสถานการณ์ ในการเกิดสิ่งรบกวนต่างๆ ขึ้นในระบบ

## บรรณานุกรม

- [1] N. Hatziargyriou, H. Asono, R. Iravani, C. Marnay, Microgrids, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, pp. 78-94, 2008.
- [2] T.Zhou and B.Francois, "Modeling and Control Design of Hydrogen Production Process for an Active Hydrogen/Wind Hybrid Power System," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 21-30, 2009.
- [3] B. Paul, J. Andrews "Optimal Coupling of PV Arrays to PEM Electrolysers in Sola-Hydrogen Systems for Remote Area Power Supply," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 490-498, 2008.
- [4] D. Mori, K. Hirose "Recent Challenges of Hydrogen Storage Technologies for Fuel Cell Vehicles," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 4569-4574, 2009.
- [5] S. Vachirasricirkul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai "Application of Electrolyzer System to Enhance Frequency Stabilization Effect of Microturbine in a Microgrid System," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 7131-7124, 2009.
- [6] W. Zhou, H. Yang, Z. Fang "Battery Behavior Prediction and Battery Working States Analysis of a Hybrid Solar-Wind Power Generation System," Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1413-1423, 2008.
- [7] A. Hirota, K. Seo, Y. Ohsawa, K. Arai. "Design of SMES Controller for Wind/Diesel Hybrid System Stabilization via Pole Assignment," T.IEE Japan Vol. 114-C, No.11, pp.1134-1139, 1994.
- [8] C.H. Liu, Y.Y. Hsu, "Design of a Self-Tuning PI Controller for a STATCOM Using Particle Swarm Optimization," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, 2010.
- [9] Z.L. Gaing, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, 2004.
- [10] M.E. El-Hawary, Electric Power Applications of Fuzzy Systems, Wiley-IEEE Press, 1998.
- [11] J. Wang, C. Fu, and Yao Zhang, "SVC Control System Based on Instantaneous Reactive Power Theory and Fuzzy PID," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, 2008.
- [12] E. Yesil, M. Guzelkaya, II. Eksin, "Self Tuning Fuzzy PID Type Load and Frequency Controller," Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 377-390, 2004.

- [13] C. Su, H. Hwung, G. Lii, "Fuzzy Logic based Voltage Control for a Synchronous Generator," Electric Power Systems Research, Vol. 41, pp.225-231, 1997.
- [14] S. K. Nam, W. S.Yoo, "Fuzzy PID Control with Accelerated Reasoning for D.C. Servo Motors," Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 7, pp. 559-569 1994.
- [15] C. Xiao, L.Zhang, J.Yan, "Fuzzy PID Controller for Wind Turbines," Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2009.
- [16] Pham, D.T., A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, and M. Zaidi. "The Bee Algorithm-A Novel Tool for Complex Optimisation Problems," Intelligent Production Machines and Systems, Oxford: Elsevier 2006.
- [17] B.M. Mohan and A. Sinha, "Analytical Structures for Fuzzy PID Controllers," IEEE Transactions on Fuzzy systems, Vol.16, No.1, pp.52-60, 2008.
- [18] B.M. Mohan and A. Sinha, "Analytical Structures and Stability Analysis of Fuzzy PID Controller," Applied Soft Computing, Vol.8, pp.749-758, 2008.
- [19] E. H. Mamdani, "Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant," in Proc. IEE, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588, 1974.
- [20] H. Li, "A Comparative Design and Tuning for Conventional Fuzzy Control," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B, Vol.27, No.5, pp.884-889, 1997.
- [21] T.Senju, et al, "Generating Power Leveling of Renewable Energy for Small Power System in Isolated Island," IEEJ Transactions on Power Energy, Vol.25, No.12, pp.1209–1215, 2005.
- [22] T.Senju, et al, "Stabilization Control for Remote Power System by Using  $H_{\infty}$  Decentralized Controllers," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [23] H.Gorgun, "Dynamic Modeling of a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer," International Journal of Hydrogen Energy, No.33, pp 29 – 38, 2006.
- [24] A. Marshall, et al. "Hydrogen Production by Advanced Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysers—Reduced Energy Consumption by Improved Electrocatalysis," International Journal of Energy, Vol.32, pp. 431-436, 2007.
- [25] F.Barbir. "PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources," International Journal of Solar Energy, Vol.78, pp.661-669, 2005.
- [26] Onda K, Murakami T, Hikosaka T, Kobayashi M, Notu R, Ito K. "Performance Analysis of Polymer–Electrolyte Water Electrolysis Cell at a Small-Unit Test Cell and Performance Prediction of Large Stacked Cell," J Electrochemical Soc, Vol. 149, pp. 1069–1078, 2002.

- [27] Ulleberg, "Modeling of Advanced Alkaline Electrolyzers: A System Simulation Approach," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 21-33, 2003.
- [28] Kelouwani S, Agbossou K, Chahine R. "Model for Energy Conversion in Renewable Energy System with Hydrogen Storage," International Journal of Power Sources, Vol.140, pp.392–399, 2005.
- [29] Khan MJ, Iqbal MT. "Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind–Fuel Cell Hybrid Energy System," Renewable Energy, Vol.30, pp. 421-439, 2005.
- [30] Bei Gou, Woon Ki Na and Bill Diong, "Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications," Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [31] J.J. Baschuk, Xianguo Li, "A General Formulation for a Mathematical PEM Fuel Cell Model," International Journal of Power Sources, Vol.142, pp. 134-153, 2004.
- [32] C. Marr á, X. Li. "An Engineering Model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance," An International Journal for Physical and Engineering Sciences, Vol. 50, pp.190-200, 1998.
- [33] J.Jia, et al, "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell," IEEE Transactions on Energy Conversation, Vol. 24, 2009.
- [34] S.Yerramalla, A. Davari, A. Feliachi, T. Biswas, "Modeling and Simulation of the Dynamic Behavior of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell," International Journal of Power Sources, Vol. 124, pp.104-113, 2003.
- [35] J.J. Baschuk, Xianguo Li. "Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding," International Journal of Power Sources, Vol. 86, pp.181-196, 2000.
- [36] J. Wee, K.Lee, S.Kim. "Sodium Borohydride as the Hydrogen Supplier for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems," Fuel Processing Technology, Vol. 87, pp.811-819, 2006.
- [37] K. Sasaki et al., "On the Voltage Drop of Phosphoric Acid Fuel Cell Due to Its on-off Operation," Transactions of the Institute of Electrical Engineering of Japan, vol. 118-B, no. 12, pp. 1450–1456, 1998.
- [38] Senjyu, T.; Nakaji, T.; Uezato, K.; Funabashi, T., "A Hybrid Power System using Alternative Energy Facilities in Isolated Island," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, No. 2, pp. 406- 414, 2005.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Theerawut Chaiyatham and Issarachai Ngamroo,

“A bee colony optimization based-fuzzy logic-PID control design of electrolyzer for microgrid stabilization”,

*International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol.8, No.9, September 2012, pp.6049-6066. (ISI Impact Factor 2010 = 1.664)

## ประวัตินักวิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล อิสระชัย งามหฐ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Electrical Engineering	Osaka University	2543
M.Eng	Electrical Engineering	Osaka University	2540
B.Eng	Electrical Engineering	KMITL	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

### รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2548	รางวัลทุนวิจัยมูลนิธิโทเรครั้งที่ ๑๒	มูลนิธิโทเร
2549	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2550	Best paper award, The 8 <sup>th</sup> International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore	The 8 <sup>th</sup> International Power Engineering Conference, Singapore
2552	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2553	Best paper award in electrical power systems, the 2010 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference, (ECTI-CON 2010, Chiangmai, Thailand.	ECTI Association
2554	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

## ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2537- 2543	ทุนรัฐบาลญี่ปุ่น	รัฐบาลญี่ปุ่น
2544- 2546	ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก เลขที่ PDF/71/2544	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2547- 2549	ทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย สกว.) เลขที่ RSA4780015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550- 2553	ทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.)	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550- 2552	ทุนวิจัยโครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม เลขที่ IUG5080015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul (2012). Coordinated control of optimized SFCL and SMES for improvement of power system transient stability. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5600805.
2. M. Saejia and I. Ngamroo (2012). Alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farm by SMES with optimal coil size. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5701504.
3. I. Ngamroo (2011). Simultaneous optimization of SMES coil size and control parameters for robust power system stabilization. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, Issue 3, Part 2, June 2011, pp. 1358-1361.
4. S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo (2011). Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart microgrid based on specified-structure mixed  $H_2/H_\infty$  control technique. *Applied Energy*, Vol. 88, Issue 11, November 2011, pp. 3860-3868
5. J. Pahasa and I. Ngamroo (2011). A heuristic training-based least squares support vector machines for power system stabilization by SMES. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, Issue 11, October 2011, pp. 13987-13993.
6. M. Saejia and I. Ngamroo (2011). A robust centralized SMES controller design based on WAMS considering system and communication delay uncertainties. *Electric Power Systems Research*, Vol.81, Issue.4, April 2011, pp. 846-852.

7. I. Ngamroo, A. N. Cuk Supriyadi, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe and Y. Mitani (2010). Wide area robust SMES controller design using synchronized PMUs for stabilization of interconnected power system with wind farms. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, Vol.5, No.4, July 2010, pp.428-438.
8. I. Ngamroo (2010). Robust SMES controller design based on inverse additive perturbation for stabilization of interconnected power systems with wind farms. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, Issue 3, March 2010, pp. 459-464.
9. I. Ngamroo (2010). Robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillation considering coil size and system uncertainties. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 470, Issue 22, December 2010, pp. 1986-1993.
10. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai (2009). Robust voltage stabilization in an isolated wind-diesel power system using PSO based-fixed structure  $H_{\infty}$  loop shaping control. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, Vol.129-B, No.6, June 2009, pp.756-764.

#### การเสนอผลงานวิชาการ

1. I. Ngamroo and C. Ratanapornchai (2012). Bidirectional power controller design of PHEV for robust frequency control. *Proceedings of The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, (AsiaPES 2012)*, 2-4 April 2012, Phuket, Thailand, no. 768-095.
2. J. Pahasa, K. Hongesombut and I. Ngamroo (2012). PSO-based learning of support vector machines for adaptive TCSC. *Proceedings of The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, (AsiaPES 2012)*, 2-4 April 2012, Phuket, Thailand, no. 768-092.
3. I. Ngamroo and A. Kunakorn (2011). Smart grid stabilization based on GPS synchronized wide area phasor measurement. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Regional Conference on ICT Application for Industries and Small Companies in ASEAN Countries (RCICT 2011)*, 10-11 March 2011, Vientiane, Lao PDR, No. IT B-05, pp. 98-103.
4. M. Saejia and I. Ngamroo (2010). Design of robust centralized PSS based on WAMS considering system and signal transmission delay uncertainties. *Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010)*, 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-159.
5. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai (2010). Design of robust control and monitoring system for stabilization of frequency fluctuation in a microgrid system. *Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010)*, 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-151.
6. I. Ngamroo, Cuk Supriyadi A.N., S. Dechanupaprittha and Y. Mitani (2009). Stabilization of tie-line power oscillations by robust SMES in interconnected power system with large wind farms. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090302-95.

7. T. Chaiyatham, I. Ngamroo, S. Vachirasricirikul and S. Pothiya (2009). Design of optimal fuzzy logic-PID controller using bee colony optimization for frequency control in an isolated wind-diesel system. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090331-212.
8. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and T. Chaiyatham (2009). Robust frequency stabilization in a microgrid system. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090228-74.
9. Cuk Supriyadi A.N., I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, A. Kunakorn, T. Hashiguchi and T. Goda (2008). Design of robust power system stabilizer using genetic algorithm-based fixed-structure  $H_\infty$  loop shaping control. *Proceedings of The 17<sup>th</sup> World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC2008)*, 6-11 July 2008, Seoul, Korea, Paper ThA1.55, pp.11086-11091.
10. Cuk Supriyadi A.N., I. Ngamroo, A. Kunakorn, S. Dechanupaprittha, M.Watanabe, Y. Mitani, T. Hashiguchi and T. Goda (2008). Inverse additive perturbation-based optimization of robust PSS in an interconnected power system with wind farms. *Proceedings of SICE Annual Conference 2008, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*, 20-22 August, Tokyo, Japan, pp.237-240.

#### ผลงานวิทยานิพนธ์/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในแขนอ่านฮาร์ดดิสก์ FEM KMITL ลิขสิทธิ์เลขที่ 253609 ได้รับการจดลิขสิทธิ์เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 โดยกรมทรัพย์สินทางปัญญา

#### อื่นๆ

หนังสือ พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Dynamics and Stability)  
 ISBN: 978-616-7367-46-0 วศ.สจล: 244 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 เมื่อ สิงหาคม พ.ศ. 2554, 459 หน้า