บทที่ 6
วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกับปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟ

วิธีกลุ่มอนุภาคได้รับการแปรผันหรือปรับปรุงในลักษณะต่างๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการค้นหาผลเฉลยให้เหมาะกับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดรูปแบบต่างๆ สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงการปรับปรุงวิธีกลุ่มอนุภาคจากขั้นตอนวิธีพื้นฐานเป็นขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว (Adaptive Particle Swarm Optimization) เพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟ ทั้งปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุและปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ โดยเนื้อหาในตอนต้นจะกล่าวถึงแนวคิดและขั้นตอนการหาผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว จากนั้น จึงแสดงตัวอย่างการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการแก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ

6.1 ลักษณะเฉพาะของปริภูมิการค้นหาในปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟ

ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 การค้นหาผลเฉลยในขั้นตอนวิธีพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค (ต่อไปจะเรียกอย่างย่อว่า วิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐาน) แบ่งเป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นกระบวนการค้นหาเชิงสำรวจ ซึ่งอนุภาคจะกระจายตัวออกค้นหาผลเฉลยในหลายๆพื้นที่ของปริภูมิการค้นหา เพื่อให้ได้บริเวณที่เหมาะสมซึ่งคาดว่าเป็นตำแหน่งของผลเฉลยเหมาะที่สุด จากนั้น จึงเป็นกระบวนการค้นหาเชิงเสาะแสวงซึ่งอนุภาคจะค้นหาผลเฉลยในบริเวณที่เหมาะสมอย่างละเอียดเพื่อให้ได้ผลเฉลยเหมาะที่สุด

จากการนำวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานไปใช้แก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุและปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ ได้พบข้อสังเกตว่า เมื่อปรับตำแหน่งของอนุภาคตามขั้นตอนวิธีพื้นฐาน (ปรับตำแหน่งโดยนำความเร็วของอนุภาคมาบวกกับตำแหน่งเดิม) ในแต่ละรอบการคำนวณ ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงติดต่อกันในหลายๆรอบการคำนวณ การที่ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หมายความว่า **Gbest** ซึ่งเป็นผลเฉลยดีที่สุดเมื่อสิ้นสุดการคำนวณแต่ละรอบ ยังคงมีค่าเท่าเดิม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากกระบวนการค้นหาได้ลู่เข้าสู่ผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้าง หรืออาจเกิดจากกระบวนการค้นหาไม่สามารถหลุดจากผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่จุดใดจุดหนึ่ง

สำหรับปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟ โอกาสที่จะเกิดจากสาเหตุที่สอง คือ กระบวนการค้นหาไม่สามารถหลุดจากผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่จุดใดจุดหนึ่ง มีความเป็นไปได้ค่อนข้างมาก

เนื่องจากปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัดซึ่งมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจ (Gallego, Monticelli and Romero, 2001) คือ 1) ขนาดของปริภูมิการค้นหาและจำนวนผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ จะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียล (Exponentially) ตามขนาด (จำนวนบัส) ของระบบที่พิจารณา 2) ผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่จำนวนมากจะกระจัดกระจายอยู่ในหลายๆ พื้นที่ของปริภูมิการค้นหา และ 3) ในบางกรณี ผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้างและผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่จะให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ลักษณะเฉพาะดังกล่าวข้างต้นทำให้กระบวนการค้นหาผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานอาจไม่สามารถหลุดพ้นจากผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่จุดใดจุดหนึ่ง เพื่อไปค้นหาผลเฉลยในบริเวณอื่นๆ ของปริภูมิการค้นหา ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว

6.2 หลักการของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวสำหรับแก้ปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐาน ที่กระบวนการค้นหาไปติดอยู่ ณ ผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่จุดใดจุดหนึ่ง แนวคิดหลักของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว คือ ต้องทำให้กลุ่มอนุภาคหลุดจากผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ แล้วออกไปค้นหาผลเฉลยที่บริเวณอื่นๆ ในปริภูมิการค้นหา

การทำให้กลุ่มอนุภาคหลุดจากผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ จำเป็นต้องยกเลิกการปรับตำแหน่งของอนุภาคโดยใช้ความเร็ว จากนั้นให้สุ่มสร้างตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดขึ้นใหม่ในลักษณะเดียวกับการสร้างตำแหน่งของกลุ่มอนุภาคเริ่มต้น เพื่อให้กลุ่มอนุภาคออกไปค้นหาผลเฉลยในบริเวณอื่นๆ ของปริภูมิการค้นหา วิทยานิพนธ์นี้เรียกการดำเนินการที่ทำให้กลุ่มอนุภาคหลุดพ้นจากผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ แล้วออกไปค้นหาผลเฉลย ณ บริเวณอื่นๆ ว่า การ “กระตุ้น” กลุ่มอนุภาค

ประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาในการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว คือ การกำหนดรอบการคำนวณสำหรับการกระตุ้นกลุ่มอนุภาค ซึ่งสามารถกำหนดได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1: กระตุ้นกลุ่มอนุภาคเมื่อจำนวนรอบการคำนวณครบตามที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น ให้กระตุ้นกลุ่มอนุภาคทุก 100 รอบการคำนวณ สมมุติฐานในการกำหนดรอบการคำนวณเพื่อกระตุ้นกลุ่มอนุภาคด้วยวิธีนี้ คือ เมื่อรอบการคำนวณผ่านไปจำนวนหนึ่งแล้ว กระบวนการค้นหาผลเฉลยจะลู่เข้าสู่ผลเฉลยค่าหนึ่งซึ่งอาจเป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้างหรือผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องกระตุ้นกลุ่มอนุภาค ถ้าผลเฉลยที่ได้ก่อนการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้าง กระบวนการค้นหาผลเฉลยก็จะลู่เข้าสู่ผลเฉลยนี้อีกครั้ง แต่ถ้าผลเฉลยก่อนการ

กระตุ้นกลุ่มอนุภาคเป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ กระบวนการค้นหาผลเฉลยก็จะพยายามค้นหาผลเฉลยในบริเวณอื่นๆ ของปริภูมิการค้นหา เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ดียิ่งขึ้น ข้อดีของวิธีนี้ คือ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคจะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการค้นหาผลเฉลยไปติดอยู่ที่ผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ ส่วนข้อด้อย คือ กระบวนการค้นหาอาจติดอยู่ผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่เป็นเวลาหลายรอบการคำนวณก่อนที่จะเกิดการกระตุ้นกลุ่มอนุภาค

วิธีที่ 2: กำหนดจากจำนวนรอบการคำนวณซึ่งค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 50 รอบการคำนวน ก็ให้กระตุ้นกลุ่มอนุภาคได้ทันที สมมุติฐานในการกำหนดรอบการคำนวณเพื่อกระตุ้นกลุ่มอนุภาคด้วยวิธีนี้ คือ การที่ฟังก์ชันจุดประสงค์ยังคงมีค่าเท่าเดิมในหลายๆรอบการคำนวณ ก็แสดงว่า กระบวนการค้นหาผลเฉลยได้ลู่เข้าสู่ผลเฉลยค่าหนึ่งซึ่งอาจเป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้างหรือผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องกระตุ้นกลุ่มอนุภาคให้ไปค้นหาผลเฉลยในบริเวณอื่น ถ้าผลเฉลยที่ได้ก่อนการกระตุ้น เป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้าง กระบวนการค้นหาผลเฉลยก็จะลู่เข้าสู่ผลเฉลยนี้อีกครั้ง แต่ถ้าผลเฉลยก่อนการกระตุ้นเป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ กระบวนการค้นหาผลเฉลยก็จะพยายามค้นหาผลเฉลยที่ดีขึ้นในบริเวณอื่นๆ ของปริภูมิการค้นหา ข้อดีของวิธีนี้ คือ มีดัชนีชี้วัดสำหรับกำหนดรอบการคำนวณที่จะกระตุ้นกลุ่มอนุภาค จึงสามารถกระตุ้นกลุ่มอนุภาคได้ในจังหวะที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดจำนวนรอบสำหรับตรวจสอบการที่ฟังก์ชันจุดประสงค์ยังคงมีค่าเท่าเดิมได้ไม่ดีพอ ก็จะเป็นการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคบ่อยครั้งเกินไป จนรบกวนกระบวนการค้นหาซึ่งกำลังค้นหาผลเฉลยอย่างละเอียดในบริเวณที่เหมาะสมของปริภูมิการค้นหา

ไม่ว่าจะเลือกใช้วิธีใดเพื่อกำหนดรอบการคำนวณสำหรับกระตุ้นกลุ่มอนุภาค รอบการคำนวณที่เหมาะสมหรือจำนวนครั้งที่เหมาะสมในการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคก็ไม่สามารถกำหนดได้ล่วงหน้า เนื่องจากขึ้นกับปัจจัยหลายประการ อาทิ ขนาดหรือจำนวนบัสของระบบจำหน่ายที่พิจารณา และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด ดังนั้น เมื่อต้องการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกับปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟใดๆ จึงจำเป็นต้องทดลองกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเพื่อให้พอทราบรอบการคำนวณที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้น ก่อนที่จะนำมาใช้งานจริงในการแก้ปัญหา

จากการทดลอง 300 ครั้งกับปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายขนาดต่างๆ ได้แก่ ระบบขนาด 10 บัส ขนาด 15 บัส ขนาด 23 บัส ขนาด 34 บัส ขนาด 69 บัส และขนาด 85 บัส โดยเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกับผลเฉลยที่ได้จากการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐาน พบว่า ถ้าสามารถกำหนดรอบการคำนวณในการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคได้อย่างเหมาะสม ในกรณีของระบบจำหน่ายขนาด 10 บัส และ 15 บัส ทั้งวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวและวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานสามารถให้ผลเฉลยเหมาะที่สุดซึ่งมีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ใกล้เคียงกัน ส่วน

กรณีของระบบจำหน่ายขนาดอื่นๆ ผลเฉลยจากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวมีโอกาสที่จะให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ซึ่งดีกว่า อย่างไรก็ตาม ยังมีผลการทดลองในบางครั้งที่ผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวให้ผลเฉลยที่แย่ลง จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า ความน่าจะเป็นที่วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวจะให้ผลเฉลยที่ดีขึ้นมีค่าประมาณ 0.7 ดังนั้น เพื่อให้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวสามารถให้ผลเฉลยดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ในขั้นตอนการคำนวณจึงต้องเก็บค่าผลเฉลยก่อนการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเอาไว้ และนำมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยสุดท้าย จากนั้น จึงเลือกผลเฉลยซึ่งให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีกว่าเป็นผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเป็นความพยายามในการหาผลเฉลยดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถรับประกันได้ว่าผลเฉลยที่ได้จากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวจะเป็นผลเฉลยเหมาะที่สุดวงกว้าง

6.3 ขั้นตอนการหาผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

การใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุและปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ มีรายละเอียดตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมข้อมูลเกี่ยวกับการคำนวณ อาทิ

1. ข้อมูลของระบบจำหน่ายที่พิจารณา เช่น ค่าฐานของกำลังไฟฟ้า ค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า ข้อมูลโหลด และข้อมูลสายป้อน

2. ข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ในการคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์ เช่น ราคาต่อหน่วยของค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย และราคาต่อหน่วยของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

3. ค่าขอบบนและค่าขอบล่างของเงื่อนไขบังคับทั้งหมด

4. พารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาค เช่น จำนวนอนุภาคในกลุ่ม จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย และค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง

5. ค่าของพจน์ลงโทษ กรณีผลเฉลยไม่สอดคล้องกับตามเงื่อนไขบังคับ

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดให้ $t=0$ เมื่อ t คือ ตัวนับจำนวนรอบการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 3: สุ่มสร้างตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่มและกำหนดความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคทั้งหมดให้เท่ากับศูนย์

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของอนุภาคทุกตัว (วิธีการคำนวณค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาว่าเป็นปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุหรือปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ)

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณพจน์ลงโทษของอนุภาคทุกตัวในกลุ่ม พจน์ลงโทษของอนุภาคใดๆ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อผลเฉลยของอนุภาคนั้นสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ถ้าผลเฉลยของอนุภาคใดไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ พจน์ลงโทษของอนุภาคนั้นก็จะมีค่าตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 6: คำนวณค่าความเหมาะสมของอนุภาคแต่ละตัวจากผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์และพจน์ลงโทษของอนุภาคนั้น

ขั้นตอนที่ 7: กำหนดค่า $\mathbf{pbest}_i^t$ และค่า $\mathbf{Gbest}^t$ จากค่าความเหมาะสมของอนุภาคในกลุ่ม

ขั้นตอนที่ 8: ตรวจสอบว่า $t=t_a$ (รอบการคำนวณสำหรับกระตุ้นกลุ่มอนุภาค) หรือไม่ ถ้าใช่ให้สุ่มสร้างตำแหน่งของกลุ่มอนุภาค แต่ถ้าไม่ใช่ ให้คำนวณความเร็วของแต่ละอนุภาคและปรับตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่มตามวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐาน

ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบว่า $t=nt$ (จำนวนรอบสูงสุดของการคำนวณ) หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำขั้นตอนที่ 10 ต่อไป แต่ถ้าไม่ใช่ ให้กำหนด $t \rightarrow t+1$ และย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 10: นำค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ได้จาก **Gbest** ของรอบการคำนวณก่อนกระตุ้นกลุ่มอนุภาคมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ได้จาก **Gbest** ของการคำนวณรอบสุดท้าย โดยผลเฉลยเหมาะที่สุด คือ **Gbest** จากรอบการคำนวณซึ่งให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่มีค่าดีกว่า

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการหาผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวไม่ได้มีขั้นตอนใดๆ เพิ่มขึ้นจากวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐาน ทั้งนี้ การสุ่มสร้างตำแหน่งของกลุ่มอนุภาคในรอบการคำนวณที่ต้องการกระตุ้นกลุ่มอนุภาค ก็ไม่ได้ใช้เวลามากกว่าการปรับตำแหน่งอนุภาคด้วยความเร็วของอนุภาค ดังนั้น วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวและวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานจึงใช้เวลาที่ไม่แตกต่างกันในการค้นหาผลเฉลย (ภายใต้เงื่อนไขที่ทั้งสองวิธีมีจำนวนอนุภาคในกลุ่มเท่ากัน และกำหนดจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดไว้เท่ากัน)

6.4 ตัวอย่างการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเพื่อแก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ

เพื่อแสดงถึงความสามารถของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลยที่ดียิ่งขึ้น หัวข้อนี้จึงนำวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานและวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวมาทดลองใช้แก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายขนาด 85 บัส รวมทั้งเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากทั้งสองวิธี

6.4.1 ฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

กำหนดเป้าหมายของการติดตั้งตัวเก็บประจุ คือ ทำให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายสามส่วนต่อไปนี้มีค่าน้อยที่สุด ได้แก่ มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลดในรอบหนึ่งปี ค่าใช้จ่ายของการผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับกำลังสูญเสียในช่วงโหลดสูงสุด และเงินลงทุนการติดตั้งตัวเก็บประจุ

(โดยตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ และชนิดปรับค่าได้จะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่แตกต่างกัน) สมการคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันจุดประสงค์จึงเขียนได้ดังนี้

$$Min\ F = \sum_{j=1}^{S}(k_e^j T^j P_L^j) + k_P P_L^P + \sum_{k\in \mathbf{NCf}} k_{cf} Qcf_k + \sum_{k\in \mathbf{NCs}} k_{cs} Qcs_k \tag{6-1}$$

เงื่อนไขบังคับประกอบด้วยสมการสมดุลกำลังไฟฟ้า การควบคุมขนาดแรงดันบัส การจำกัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และการจำกัดปริมาณกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งที่แต่ละบัส ตามรายละเอียดต่อไปนี้

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n\neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \tag{6-2}$$

$$Q_i^j = -\sum_{\substack{n=1 \\ n\neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \tag{6-3}$$

$$V^{\min} \le \left| V_i^j \right| \le V^{\max} \tag{6-4}$$

$$THD_{V,i}^j \le THD_V^{\max} \tag{6-5}$$

$$Qc_k^j \le Qc^{\max} \quad \text{where } k \in \mathbf{NC} \tag{6-6}$$

เมื่อพิจารณาให้มีโหลดไม่เชิงเส้นต่ออยู่ในระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสียและขนาดแรงดันบัสที่ระดับโหลดต่างๆ จึงต้องรวมผลกระทบของฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เชิงเส้น ค่าทั้งสองสามารถคำนวณได้จาก

$$P_L^j = \sum_{h=1}^{nh} P_L^{h,j} \tag{6-7}$$

$$V_i^j = \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} \left| V_i^{h,j} \right|^2} \tag{6-8}$$

6.4.2 ข้อมูลการคำนวณ

ระบบจำหน่ายในการทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายขนาด 85 บัส (Das, Kothari and Kalam, 1995) การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลสายป้อนเดิมของระบบ และแก้ไขข้อมูลโหลด 2 ประการ ประการแรก คือ การแบ่งโหลดเป็น 3 ระดับตามตารางที่ 6-1 ซึ่งประกอบด้วยระดับต่ำ (Light Load) ระดับปานกลาง (Medium Load) และระดับสูง (Peak Load) โดยปริมาณโหลด 1.0 pu ในตารางหมายถึง ค่าความต้องการโหลดซึ่งปรากฏในข้อมูลโหลด การแก้ไขประการที่สอง คือ สมมุติให้โหลดที่แต่ละบัสมีความไม่เป็นเชิงเส้นร้อยละ 60

ค่าแรงดันฐานและค่ากำลังไฟฟ้าฐานในการคำนวณ คือ 11 kV และ 100 MVA ขนาดแรงดันที่บัสอ้างอิงเท่ากับ 1.0 pu ส่วนอันดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา ได้แก่ อันดับ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 และ 25

ในการคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์ กำหนดให้ k_e^j และ k_P มีค่า 0.05 \$/kWh และ 120 \$/kW ตามลำดับ (Masoum et al., 2004) กำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุในแต่ละขั้นสำหรับการติดตั้ง คือ 150 kVAr โดย k_{cf} ของการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่มีรายละเอียดตามข้อมูลใน Baghzouz and Ertem (1990) ส่วน k_{cs} สำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้มีค่าเท่ากับ 0.35 \$/kVAr (Masoum et al., 2004) ในส่วนของเงื่อนไขบังคับ ค่าของ $V^{\min}$ และ $V^{\max}$ คือ 0.9 pu และ 1.1 pu ในขณะที่ $THD_V^{\max}$ และ $Qc^{\max}$ เท่ากับ 5% และ 900 kVAr

ตารางที่ 6-1 ข้อมูลระดับโหลดของระบบจำหน่ายขนาด 85 บัส

ระดับโหลด	ปริมาณโหลด (pu)	ระยะเวลาใน 1 ปี (ชั่วโมง)
ต่ำ	0.8	2,628
ปานกลาง	1.0	4,818
สูง	1.3	1,314

6.4.3 พารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาค

กำหนดให้อนุภาคในกลุ่มมีจำนวน 100 อนุภาค จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 300 รอบ และใช้ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย (w) ในการคำนวณความเร็วของอนุภาคตามสมการที่ (6-9) โดย w มีค่าลดลงอย่างเชิงเส้น (Linearly Decrease) จาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 2.0

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^{t} + c_1 r_{1d}^{t}(pbest_{id}^{t} - x_{id}^{t}) + c_2 r_{2d}^{t}(gbest_{d}^{t} - x_{id}^{t}) \qquad (6\text{-}9)$$

6.4.4 กรณีศึกษาที่พิจารณา

กรณีศึกษาที่พิจารณาประกอบด้วย

กรณีศึกษาที่ 1: ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานในการหาผลเฉลย

กรณีศึกษาที่ 2: ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย โดยกำหนดให้กระตุ้นกลุ่มอนุภาคในรอบการคำนวณที่ 150

กรณีศึกษาที่ 3: ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย แต่กำหนดให้กระตุ้นกลุ่มอนุภาค ถ้าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่เปลี่ยนแปลงภายใน 30 รอบการคำนวน

การกำหนดกรณีศึกษาทั้งสามทำเพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานและวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว รวมทั้งเปรียบเทียบวิธีกำหนดรอบการคำนวณเพื่อกระตุ้นกลุ่มอนุภาคในวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

6.4.5 ผลที่ได้จากกรณีศึกษา

ผลการคำนวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลเฉลยของกรณีศึกษาทั้งสาม รวมทั้งกรณีไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุมีรายละเอียดดังตารางที่ 6-2 เมื่อพิจารณาผลของกรณีไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่าขนาดแรงดันบัสและค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันไม่เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนด เนื่องจากทั้งสามระดับโหลด ค่าต่ำสุดของขนาดแรงดันบัสมีค่าน้อยกว่า 0.90 pu รวมทั้งค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันมีค่าสูงกว่าร้อยละ 5 และเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุ ข้อมูลในตารางที่ 6-2 แสดงให้เห็นว่า ขนาดแรงดันบัสและค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันได้ถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ โดยปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งในแต่ละบัสก็เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนดด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ การติดตั้งตัวเก็บประจุยังทำให้ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลดและกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับโหลดสูงสุดมีค่าลดลง สิ่งที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายซึ่งช่วยปรับปรุงสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบ

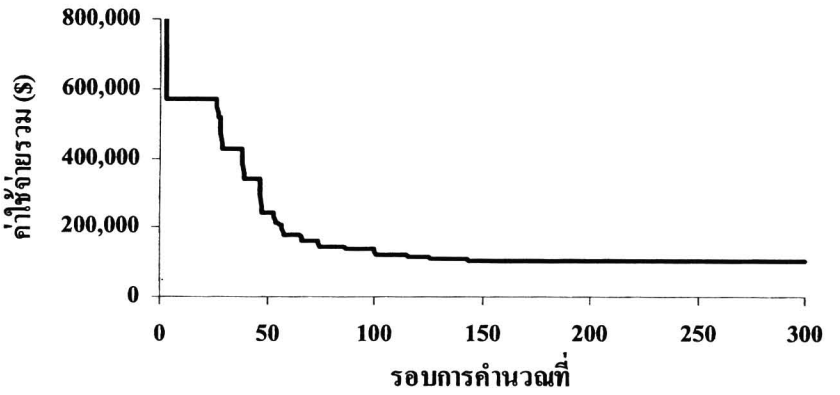
ความสามารถของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการค้นหาผลเฉลยสามารถพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและผลรวมของค่าใช้จ่ายทั้งหมด (หรือค่าฟังก์ชันจุดประสงค์) จากรายละเอียดในตารางที่ 6-2 ผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานในกรณีศึกษาที่ 1 ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงจากกรณีไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเท่ากับ 1,451,120 kWh (ร้อยละ 50.66) ในขณะที่ผลเฉลยจากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้เท่ากับ 1,555,100 kWh (ร้อยละ 54.18) และ 1,584,900 kWh (ร้อยละ 55.33) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลรวมของค่าใช้จ่ายทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งตัวเก็บ

ประจุ ผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดลดลง 110,141 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 51.28) ส่วนผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดลดลงได้ 116,444 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 54.22) และ 118,511 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 55.18) ตามลำดับ

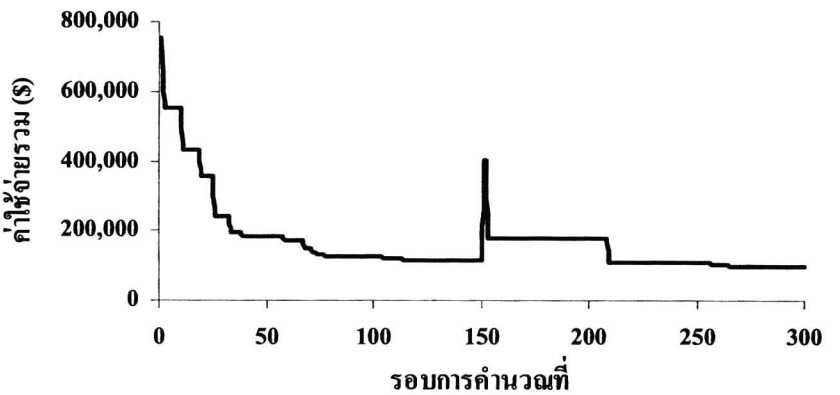
ตารางที่ 6-2 ผลที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่าย 85 บัส

รายละเอียด	ไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุ	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3
1. ค่าต่ำสุดของแรงดันบัสจากทั้งสามระดับโหลด (pu)	0.8362	0.9044	0.9022	0.9014
2. ค่าสูงสุดของแรงดันบัสจากทั้งสามระดับโหลด (pu)	1.0000	1.0008	1.0008	1.0008
3. ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจากทั้งสามระดับโหลด (%)	16.61	4.00	4.37	4.47
4. ค่าสูงสุดของกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้ง ณ บัสใดๆ (kVAr)	-	300	300	300
5. กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ (kVAr)	-	150	300	150
6. กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ (kVAr)	-	7,200	5,850	5,550
7. กำลังรีแอกทีฟทั้งหมดจากตัวเก็บประจุ (kVAr)	-	7,350	6,150	5,700
8. ผลรวมพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลด (kWh)	2,864,480	1,413,360	1,312,380	1,279,580
9. กำลังสูญเสียที่ระดับโหลดสูงสุด (kW)	596.27	261.43	254.21	252.23
10. มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลด ($)	143,224	70,668	65,619	63,979
11. ค่าใช้จ่ายของการผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับกำลังสูญเสียในช่วงโหลดสูงสุด ($)	71,552	31,372	30,505	30,268
12. ค่าใช้จ่ายของการติดตั้งตัวเก็บประจุ ($)	-	2,595	2,198	2,018
13. ค่าใช้จ่ายรวมของระบบ ($) (10+11+12)	214,776	104,635	98,322	96,265
14. ร้อยละที่ลดลงของค่าใช้จ่ายรวมของระบบ (%)	-	51.28	54.22	55.18

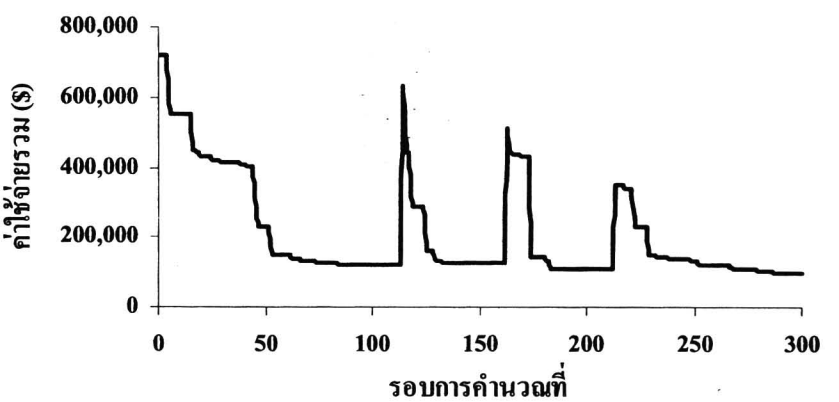
วิธีกลุ่มอนุภาคพื้นฐานในกรณีศึกษาที่ 1 รวมทั้งวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 ได้ดำเนินการค้นหาผลเฉลยตามกราฟแสดงลักษณะเฉพาะการลู่เข้าสู่ผลเฉลย (Convergence Characteristic) ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 6-1 ถึงภาพที่ 6-3



ภาพที่ 6-1 การลู่เข้าสู่ผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 6-2 การลู่เข้าสู่ผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ 2



ภาพที่ 6-3 การลู่เข้าสู่ผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ 3

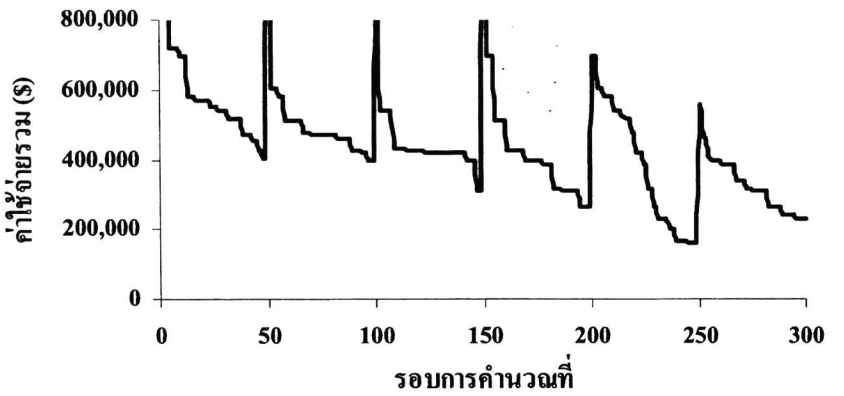
การลู่เข้าสู่ผลเฉลยในกรณีศึกษาที่ 1 เกิดขึ้นในรอบการคำนวณที่ 160 และมีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 104,635 เหรียญสหรัฐอเมริกา จากนั้นค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการติดอยู่ ณ ผลเฉลยเหมาะที่สุดเฉพาะที่ ส่วนในกรณีศึกษาที่ 2 การลู่เข้าสู่ผลเฉลยเกิดขึ้นครั้งแรกในรอบการคำนวณที่ 110 และเมื่อกระตุ้นกลุ่มอนุภาคในรอบการคำนวณที่ 150 วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวได้ค้นหาผลเฉลยในบริเวณอื่นๆของปริภูมิการค้นหา ซึ่งทำให้ได้ผลเฉลยสุดท้ายที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 98,322 เหรียญสหรัฐอเมริกา สำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งกำหนดให้กระตุ้นกลุ่มอนุภาคเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใน 30 รอบการคำนวณ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคได้เกิดขึ้นในรอบการคำนวณที่ 113, 162 และ 212 โดยได้ผลเฉลยสุดท้ายซึ่งให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 96,265 เหรียญสหรัฐอเมริกา เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะสามกรณีศึกษานี้ พบว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 จะต่ำกว่าค่าในกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณร้อยละ 6 และร้อยละ 8 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดรอบการคำนวณสำหรับการกระตุ้นอนุภาคได้ไม่เหมาะสม วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวก็ไม่อาจสามารถให้ผลเฉลยที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้โดยกำหนดกรณีศึกษาเพิ่มเติมอีก 2 กรณี ดังนี้

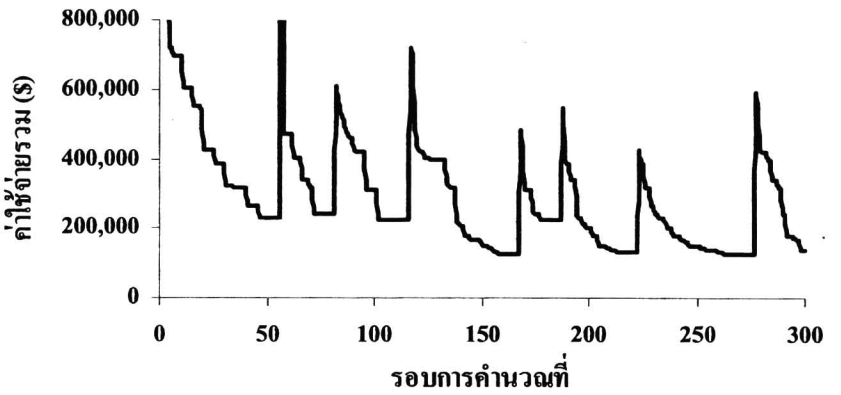
กรณีศึกษาที่ 4: ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย โดยกระตุ้นกลุ่มอนุภาคทุก 50 รอบการคำนวณ

กรณีศึกษาที่ 5: ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย โดยกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่เปลี่ยนแปลงภายใน 10 รอบการคำนวน

ลักษณะการลู่เข้าสู่ผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ 4 และกรณีศึกษาที่ 5 มีลักษณะตามภาพที่ 6-4 และภาพที่ 6-5



ภาพที่ 6-4 การลู่เข้าสู่ผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ 4



ภาพที่ 6-5 การลู่เข้าสู่ผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ 5

จากลักษณะการลู่เข้าสู่ผลเฉลยในภาพที่ 6-4 จะเห็นได้ว่า กระบวนการค้นหาผลเฉลยได้ให้ผลเฉลยซึ่งมีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ลดลงเรื่อยๆ แต่การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคในรอบการคำนวณที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 ทำให้กระบวนการค้นหาผลเฉลยต้องเริ่มดำเนินการใหม่ โดยเฉพาะตั้งแต่รอบการคำนวณที่ 200 ถึงรอบการคำนวณที่ 249 ซึ่งกระบวนการค้นหาผลเฉลยกำลังค้นหาผลเฉลยในบริเวณที่ทำให้ผลเฉลยมีแนวโน้มดีขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อถูกกำหนดให้กระตุ้นกลุ่มอนุภาคในรอบการคำนวณที่ 250 ก็ต้องยุติการค้นหาในบริเวณนั้น และเมื่อเริ่มการค้นหาใหม่อีกครั้ง ก็ไม่สามารถให้ผลเฉลยที่ดีได้ดังเดิม เนื่องจากจำนวนรอบการคำนวณที่เหลือมีจำนวนไม่เพียงพอที่จะทำให้กระบวนการค้นหาย้อนกลับมาค้นหาผลเฉลยในบริเวณดังกล่าว ผลเฉลยดีที่สุดของกรณีศึกษาที่ 4 อยู่ที่รอบการคำนวณที่ 245 ถึงรอบการคำนวณที่ 249 และให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ 158,677 เหรียญสหรัฐอเมริกา ซึ่งมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 3

เมื่อพิจารณาลักษณะการลู่เข้าสู่ผลเฉลยในภาพที่ 6-5 จะเห็นได้ว่า การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่เปลี่ยนแปลงภายใน 10 รอบการคำนวน ทำให้กระบวนการค้นหาไม่สามารถค้นหาผลเฉลยในบริเวณต่างๆ ได้อย่างละเอียด และส่งผลให้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในกรณีศึกษาที่ 5 ไม่สามารถให้ผลเฉลยที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่บางส่วนของปริภูมิการค้นหามีผลเฉลยจำนวนมากซึ่งให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ใกล้เคียงกัน กระบวนการค้นหาจึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการค้นหาผลเฉลยที่ดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ในบริเวณนั้น สำหรับกรณีศึกษานี้ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้น 7 ครั้ง ในรอบการคำนวณที่ 57, 82, 117, 168, 188, 223 และ 278 โดยผลเฉลยดีที่สุดอยู่ที่รอบการคำนวณที่ 268 ถึงรอบการคำนวณที่ 277 โดยให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 125,976 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ซึ่งมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 3

เช่นกัน) ถ้าไม่มีการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคในรอบการคำนวณที่ 278 วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวจะยังค้นหาผลเฉลยในบริเวณนั้นอย่างละเอียด และอาจให้ผลเฉลยที่ดีขึ้น

ผลที่ได้จากกรณีศึกษาทั้งหมดแสดงถึงความสามารถในการค้นหาผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว รวมทั้งความสำคัญของการกำหนดรอบการคำนวณที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นกลุ่มอนุภาค วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวสามารถให้ผลเฉลยที่ดีขึ้น ก็ต่อเมื่อกำหนดจำนวนครั้งหรือรอบการคำนวณในการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคบ่อยเกินไป จะรบกวนกระบวนการค้นหาผลเฉลย ซึ่งส่งผลให้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวไม่อาจให้ผลเฉลยที่ดีได้