

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ข้อดีและข้อเสียจากวิธีการต่างๆ จึงนำไปสู่การพัฒนาวิธีการที่นำเสนอในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า รายละเอียดของการศึกษาค้นคว้าแนวความคิดของงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้า ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ความรู้พื้นฐานและพฤติกรรมของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม

2.1 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างเช่น ประเทศไทย ปริมาณของผู้ใช้ไฟฟ้ารวมถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ต้องมีการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ เพื่อที่จะสามารถรองรับการขยายตัวของระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตด้วยการลงทุนที่คุ้มค่าที่สุดและมีความมั่นคงของระบบมากที่สุด

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งได้สองแบบ คือ แบบขั้นตอนเดียว (Single stage or Static model) และแบบหลายขั้นตอน (Multi stage or Dynamic model) สำหรับวิธีการวางแผนแบบขั้นตอนเดียว [2-18] คือ การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าตามระยะเวลาที่ผู้วางแผนกำหนดไว้และจะใช้เทคนิคต่างๆ ในการแก้ปัญหา เพื่อสามารถที่จะตอบคำถามต่างๆ เหล่านี้ คือ เส้นทางของการเพิ่มสายส่งเส้นใหม่ที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในตำแหน่งใด (Where to build ?) และจำนวนวงจรที่ต้องการก่อสร้างขึ้นใหม่จะต้องใช้งบประมาณเท่าไร (How much to investment ?) จึงจะเหมาะสมตามที่ผู้วางแผนกำหนดไว้ ส่วนการวางแผนแบบหลายขั้นตอน [15, 19-21] คือ การเอาคำตอบของขั้นตอนแรกมาเป็นฐานเพื่อที่จะหาคำตอบถัดไปและกระทำจนกว่าจะครบช่วงเวลาของผู้วางแผนกำหนดไว้ ซึ่งนอกจากจะตอบคำถามเบื้องต้นที่กล่าวมาแล้วจะยังสามารถตอบคำถามให้ได้ว่าสายส่งเส้นใหม่ที่จะก่อสร้างควรดำเนินการเมื่อใด (When to build the next lines ?) จึงจะเหมาะสมกับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเน้นเฉพาะการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียวเท่านั้น

การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยพื้นฐานแล้วจะเกี่ยวข้องกับการเลือกเส้นทาง จำนวนวงจรและขนาดที่เหมาะสมที่สุดและตอบคำถามต่างๆ ที่ได้กล่าวมา ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังที่ออกแบบมานั้นจะต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ มีความมั่นคงและเชื่อถือได้สูงสุดและต้นทุนในการลงทุนต่ำที่สุด โดยต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ ยกตัวอย่างเช่น กำลังไฟฟ้าสมดุล พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและพิกัดจำนวนวงจรสายส่งเส้นใหม่ เป็นต้น ดังนั้น เพื่อให้การแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงมีผู้วิจัยมากมายทั้งในและต่างประเทศได้สนใจทำการศึกษาและค้นคว้าหาวิธีการใหม่ๆ เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ดังนั้น ในปี ค.ศ. 2003 G. Latorre และคณะ [22] ได้สรุปวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Optimization Methods) อาทิเช่น เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) [2,3,23] เทคนิคการโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Programming: NLP) [17,24] และเทคนิคการผสมโปรแกรมจำนวนเต็ม (Mix-Integer Programming: MIP) [4,5,11,14] เป็นต้น ส่วนวิธีการที่ 2 คือ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติก (Heuristic Optimization Methods) อาทิเช่น วิธีจำลองการเย็นตัวของโลหะ (Simulated Annealing: SA) [6,7] วิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithms: GA) [8,9,13,19] และวิธีการค้นหาแบบตราบ (Tabu Search: TS) [10,12] เป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดสำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียว (Single Stage) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกบทความบทความ เฉพาะบทความที่เกี่ยวข้องกับวิธีการที่ใช้แก้ปัญหา ซึ่งมีผู้นำเสนอมาแล้วหลายวิธีสามารถเขียนสรุปได้ดังนี้

เริ่มตั้งแต่ในปี ค.ศ. 1970 L.L. Garver [2] นำเสนอเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า สำหรับบทความนี้จะใช้การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อหาค่าพิกัดของสายส่งเส้นใหม่ที่เหมาะสมในการกำหนดตำแหน่งของสายส่งเส้นใหม่ให้มีความเหมาะสมกับผู้ใช้ไฟฟ้าในอนาคต บทความนี้ได้ทดสอบกับระบบไฟฟ้า 6 บัส ซึ่งในเวลาต่อมาระบบนี้เป็นที่นิยมนำไปทดสอบของนักวิจัยอย่างแพร่หลายและปี ค.ศ. 1985 R. Villasana และคณะ [3] นำเสนอเทคนิคการวางแผนขยายระบบส่งกำลัง ซึ่งได้พัฒนาจากวิธีการของ Garver [2] โดยนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ชื่อว่า

Mathematical Programming System Extended (MPSX/370) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น จากการทดสอบโปรแกรมที่นำเสนอมีสมรรถนะดีกว่าวิธีการของ Garver โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เหมือนกันคือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุด ต่อมาในปี ค.ศ. 1988 M. A. Farrag และคณะ [4] ได้นำเสนอเทคนิคการผสมโปรแกรมจำนวนเต็ม (Mixed Integer Programming: MIP) ซึ่งเป็นผู้ริเริ่มใช้สำหรับการประยุกต์แก้ไขปัญหาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า สำหรับบทความนี้ได้พิจารณาต้นทุนที่เกิดจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและพิจารณาเงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าระหว่างบัสต้นทางไปยังบัสปลายทาง ผลจากการทดสอบกับระบบ 6 บัสของ Garver พบว่าวิธีการที่นำเสนอได้คำตอบอย่างน่าพอใจ ภายใต้เงื่อนไขทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 S. Haffner และคณะ [11] นำเสนอเทคนิคการผสมโปรแกรมจำนวนเต็มเชิงเส้น (Mixed Integer Linear Programming MILP) ที่เรียกว่า เทคนิคขั้นตอนการแตกกิ่งและขอบเขต (Branch and Bound Algorithm: B&B) สำหรับ ค้นหาตำแหน่งและจำนวนวงจรของสายส่งเส้นใหม่ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุด ผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนการแตกกิ่งและขอบเขตได้ผลเฉลยดีกว่าวิธีการทางคณิตศาสตร์แบบเดิม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขเดียวกัน

สำหรับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคทางด้านสโตคาสติก (Stochastic Approach) นั้นสามารถเขียนอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ปี ค.ศ. 1996 R. Romero และคณะ [6] นำเสนอวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic Method) ในการแก้ปัญหาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เรียกว่า วิธีจำลองการเย็นตัวของโลหะ ที่ใช้แนวความคิดจากกระบวนการอบเหนียว ซึ่งเป็นการลดอุณหภูมิระหว่างการหลอมโลหะ โดยจะให้ความร้อนและมีการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งโลหะอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ได้โลหะที่เหนียวไม่เปราะโดยอะตอมจะมีพลังงานสูงเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่สูงและจะมีอิสระในการจัดเรียงตัวมากแต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิจึงพลังงานก็จะลดลงตามไปด้วยโครงสร้างของโลหะจะจัดอะตอมเข้าอย่างเป็นระเบียบเมื่อระบบมีพลังงานต่ำที่สุด ในทางกลับกัน ถ้ามีการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วหรือทำให้เย็นเร็วเกินไปก็จะทำให้โครงสร้างของโลหะไม่สม่ำเสมอและเกิดรอยร้าวขึ้นได้ ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงเป็นเป้าหมายของการแก้ปัญหา แต่เนื่องจากปัญหาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้นเป็นปัญหาแบบการจัดเรียง (Combinatorial Optimization Problem) ตัวแปรบางตัวไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Variable) ระบบจึงมีความซับซ้อน ทำให้ต้องใช้เวลาในการแก้ปัญหานาน โดยวิธีการที่นำเสนอได้ทดสอบ

ระบบ 6 บัสของ Garver และระบบไฟฟ้ากำลัง 46 บัสทางตอนใต้ของประเทศบราซิล ผลการทดสอบปรากฏว่า ลดต้นทุนในการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ได้ถึง 7% และสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณได้ 24% เมื่อเทียบวิธีการทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวกันและเงื่อนไขเดียวกัน จากบทความที่กล่าวมานี้ยังใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบนาน จึงทำให้ในปี ค.ศ. 1997 R. A. Gallego และคณะ [7] เสนอแนวทางการนำระบบคอมพิวเตอร์แบบคู่ขนาน (Parallel Computer) มาประยุกต์ใช้ในการค้นหาคำตอบแบบการจำลองการเย็นตัวของโลหะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณค้นหาคำตอบให้ดีขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการหาคำตอบให้ดีกว่าวิธีการของ R. Romero ซึ่งวิธีการที่นำเสนอได้ทดสอบกับระบบ 6 บัส ของ Garver และระบบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบรวดเร็วกว่าวิธีการเดิมที่นำเสนอภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขเดียวกัน และในปีถัดมาคือ ค.ศ. 1998 R. A. Gallego และคณะ [8] ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยวิธีนี้เป็นวิธีการแบบฮิวริสติก ภายใต้การตั้งสมมติฐานที่ว่าสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งคุณลักษณะที่ดีและไม่ดีแตกต่างกันออกไป ซึ่งคุณลักษณะที่ดีก็ย่อมมีโอกาสอยู่รอดและจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดพันธุกรรมไปยังรุ่นลูกและรุ่นหลานได้มากกว่า เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตใหม่มีคุณลักษณะที่ดีขึ้น สำหรับวิธีการเชิงพันธุกรรมเมื่อนำมาใช้กับการแก้ปัญหาก็จะอาศัยหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรมเพื่อให้ได้คำตอบในรอบ (Generation) ต่อไป ซึ่งบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดเวลาในการหาคำตอบ ได้ทดสอบกับระบบไฟฟ้า 6 บัสของ Garver และระบบจริงทางตอนเหนือและใต้ของประเทศบราซิล จากการทดสอบพบว่าลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 8.8% รวมทั้งลดเวลาในการค้นหาตอบและการรู้เข้าหาคำตอบดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีจำลองการเย็นตัวของโลหะ ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 R. A. Gallego และคณะ [10] ยังได้นำเสนอแนวทางการนำระบบคอมพิวเตอร์แบบคู่ขนาน โดยประยุกต์ใช้กับวิธีการค้นหาแบบตาบู่ สำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบู่เป็นวิธีการที่สามารถหลีกเลี่ยงคำตอบเฉพาะถิ่น (Local Search) ได้และสามารถดำเนินการค้นหาต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบเหมาะสมที่สุดทั่วบริเวณ (Global optimum) ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยบทความนี้ได้เปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรมและวิธีการเย็นตัวของโลหะ จากการทดสอบพบว่าระยะเวลาในการคำนวณค้นหาคำตอบและการรู้เข้าหาคำตอบดีกว่าทั้งสองวิธี

จากการศึกษาและทบทวนรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization methods) ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้ามาแล้วหลายวิธี โดยเฉพาะวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI)

อาทิเช่น วิธีจำลองการเย็นตัวของโลหะ วิธีพันธุกรรมและวิธีการค้นหาแบบตาปู เป็นต้น แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป อย่างเช่น วิธีจำลองการเย็นตัวของโลหะและวิธีการค้นหาแบบตาปู เป็นวิธีการค้นหาแบบตัวเดียว (Single Search) ดังนั้น ถ้าคำตอบเริ่มต้นไม่ดี การค้นหาคำตอบในรอบถัดไป ก็จะใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบนาน อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับค่าคงที่ ถ้าปรับแต่งไม่ดีโอกาสที่จะได้คำตอบเฉพาะถิ่นมีค่อนข้างสูงและทั้งสองวิธีไม่เหมาะสมสำหรับการค้นหาคำตอบที่มีตัวแปรเป็นจำนวนเต็ม ส่วนวิธีพันธุกรรมเป็นวิธีการค้นหาแบบประชากร (Population Searches) และเหมาะสำหรับปัญหาที่คำตอบเป็นตัวแปรจำนวนเต็ม แต่ในการค้นหาคำตอบเริ่มต้นมิได้พิจารณาค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ดังนั้นในการค้นหาคำตอบอาจจะต้องใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบนาน และมีกระบวนการขั้นตอนในการคำนวณหาคำตอบค่อนข้างซับซ้อน เป็นต้น

สำหรับวิธีการที่ผู้วิจัยนำเสนอเป็นวิธีการแบบเมตา-ฮิวริสติก (Meta-Heuristic) และเป็นวิธีการค้นหาคำตอบแบบประชากร (Population Searches) ที่เพิ่งถูกนำมาใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาอันก็คือ วิธีฝูงมด สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ปี ค.ศ. 1992 Marco Dorigo และคณะ [25,26] นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมด ซึ่งวิธีการนี้ได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมของมดจริงที่สามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากรังมด (Nest) ไปยังแหล่งอาหาร (Food source) โดยอาศัยสารเคมีชีวภาพที่เรียกว่า สารฟีโรโมน (Pheromone) เพื่อเป็นร่องรอยในการเดินทางและสื่อสารกับมดตัวอื่นๆ โดยทั่วไปวิธีฝูงมดมีลักษณะการค้นหาคล้ายกับวิธีการค้นหาวิธีอื่นๆ ตรงที่ในการค้นหาแต่ละครั้งเริ่มจากการกำหนดหรือสุ่มคำตอบเริ่มต้นจากคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) และพยายามค้นหาคำตอบที่ดีกว่าไปเรื่อยๆ โดยใช้หลักการของการค้นหาคำตอบจากบริเวณใกล้เคียงของคำตอบเดิม (Neighborhood Search: NS) ส่วนข้อแตกต่างของวิธีฝูงมดนั้นมีคุณลักษณะเด่นที่สำคัญคือ การกำหนดหรือสุ่มคำตอบหลายๆ คำตอบโดยอาศัยหลักความน่าจะเป็นและใช้ข้อมูลฮิวริสติกในการตัดสินใจเลือกคำตอบ พร้อมทั้งทำการค้นหาคำตอบแบบขนาน (Distributed Computation) การดำเนินการในลักษณะนี้ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่น (Local Search) ได้ เนื่องจากมีหน่วยความจำ (Memory) ในการจดจำข้อมูลในการค้นหาที่ผ่านมา อีกทั้งวิธีฝูงมดยังเหมาะสำหรับแก้ปัญหารูปแบบทางคณิตศาสตร์แบบเทคนิคการผสมโปรแกรมจำนวนเต็ม ซึ่งวิธีฝูงมดยังได้นำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาลากหลายรูปแบบยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem: TSP) [26] ปัญหาการมอบหมายงาน

(Quadratic Assignment Problem: QAP) [27] และปัญหาการวางแผนการขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) [28] เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเช่น การวางแผนขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้า [29,30] การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [31] การออกแบบโครงข่ายโทรคมนาคม [32] เป็นต้น สำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งยังไม่มีผู้วิจัยนำวิธีฝูงมดมาประยุกต์ใช้ ซึ่งวิธีฝูงมดมีลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาลักษณะนี้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีข้อได้เปรียบในด้านของความเร็วและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปใช้งานและเหมาะสำหรับการแก้ไขปัญหแบบตัวแปรจำนวนเต็ม (Integer Variable) ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอ การประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดสำหรับแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ผลจากการทดสอบของวิธีการที่นำเสนอนำไปเปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมและใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี (Dc power flow)

2.1.1 คำถามวิจัย (Research Question)

จากบทความที่ได้ทำการทบทวนสามารถตั้งคำถามงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 เมื่อระบบผลิตต้องผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่เดิมสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้หรือไม่

2.1.2 ถ้าต้องการจะขยายระบบส่งควรใช้งบประมาณในการลงทุนเท่าไร ในการปักเสาพาดสายส่งเส้นใหม่ ภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดไว้

2.1.3 ถ้าต้องการจะขยายระบบส่ง สายส่งเส้นใหม่จะอยู่ในตำแหน่งใดจึงจะเหมาะสมที่สุด เพื่อให้ต้นทุนในการลงทุนต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขทางเทคนิคของระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1.4 มีวิธีใดที่ใช้ในการแก้ปัญหา ที่จะสามารถระยะเวลาในการค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการดั้งเดิม

2.1.5 มีวิธีใดที่ทำให้การลู่เข้าหาคำตอบและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการดั้งเดิม

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้า (Power Flow Studies)

การศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้า [33,34] เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อช่วยตัดสินใจในการวางแผนและการดำเนินการต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจุดประสงค์หลักของการศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้าคือ การคำนวณหาขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งหรือในอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ และขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆ ในระบบ เพื่อศึกษาสภาพของระบบว่าสามารถรองรับกับความต้องการใช้ไฟฟ้าได้หรือไม่ ขนาดของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่บัสอยู่ในเกณฑ์ที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้หรือไม่ ถ้ากระแสในสายสูงเกินไปก็จะต้องมีการพิจารณาปรับเปลี่ยนแก้ไขระบบ อย่างเช่น การก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่หรือการย้ายหรือการตัดโหลดออกจากระบบ เป็นต้น เพื่อให้สายส่งสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าได้หรือระดับแรงดันที่บัสอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและยอมรับได้ ดังนั้นประโยชน์หลักที่ได้รับจากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าคือ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันและระบบในอนาคต เมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในอนาคต นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้ายังนำไปใช้ในการศึกษาในเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากำลัง ยกตัวอย่างเช่น การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Expansion Planning: TEP) การวางแผนขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution Expansion Planning: DEP) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch: ED) การจัดสรรต้นทุนระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Cost Allocation) การศึกษาปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow: OPF) เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าในการศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้านั้นมีบทบาทที่สำคัญมากในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการแก้ปัญหาการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในทางปฏิบัตินั้นจำเป็นต้องใช้การประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย เพื่อช่วยประหยัดเวลาในการหาคำตอบ ซึ่งวิธีการที่นำมาใช้แก้ปัญหาที่เป็นที่รู้จักคือ วิธีเกาส์เซidel (Gauss Seidel) และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) โดยวิธีเกาส์เซidelเป็นวิธีที่เข้าใจง่ายเหมาะกับระบบที่มีขนาดเล็ก เพราะว่าวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณนาน นอกจากนั้นการหาคำตอบของวิธีเกาส์เซidelขึ้นอยู่กับจำนวนบัสในระบบ กล่าวคือ ถ้าจำนวนบัสมากขึ้น เวลาในการคำนวณจะมากขึ้นตามไปด้วย จึงไม่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีจำนวนบัสมากๆ ดังนั้นวิธีการที่ใช้ในทางปฏิบัติที่เหมาะสมที่สุดคือ วิธีนิวตัน-ราฟสัน เพราะวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบได้รวดเร็วและไม่แปรผันตามจำนวนบัสในระบบ อีกทั้ง เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ระบบที่มีขนาดใหญ่และระบบที่มีความซับซ้อนสูง

ดังนั้นวิธีนิวตัน-ราฟสันจึงนิยมนำมาใช้เป็นอัลกอริทึมในการเขียนโปรแกรมให้เครื่องคอมพิวเตอร์ คำนวณหาค่าต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) ตามสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (ΔP) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (ΔQ) สามารถหาได้จาก

$$\Delta P_i^{(r)} = P_i^{sche} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.3)$$

หรือ

$$\Delta P_i^{(r)} = P_i^{sche} - P_i^{cal(r)} \quad (2.4)$$

และ

$$\Delta Q_i^{(r)} = Q_i^{sche} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

หรือ

$$\Delta Q_i^{(r)} = Q_i^{sche} - Q_i^{cal(r)} \quad (2.6)$$

หากค่า ΔP และ ΔQ ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.6) มีค่ามากกว่า ค่าความผิดพลาดยอมรับได้ (Error) ที่ตั้งไว้จะต้องนำไปหาค่า $\Delta \theta$ และ ΔV เพื่อนำไป คำนวณหาค่า P และ Q ใหม่ โดยสามารถหาได้จากสมการจาโคเบียนเมทริกซ์ แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^{(r)} \\ \Delta Q_i^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^{(r)} & J_{12}^{(r)} \\ J_{21}^{(r)} & J_{22}^{(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^{(r)} \\ \Delta V_i^{(r)} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.7) สามารถขยายได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(r)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(r)} \\ \Delta Q_2^{(r)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(r)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(r)}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(r)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(r)}}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(r)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(r)}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(r)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(r)}}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(r)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(r)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(r)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(r)}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(r)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(r)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(r)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(r)}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(r)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(r)} \\ \Delta V_2^{(r)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(r)} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.7) สามารถหา $\Delta \theta$ และ ΔV ได้โดยการอินเวอร์สจาโคเบียนเมทริกซ์ตามสมการที่ (2.9)

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_i^{(r)} \\ \Delta V_i^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^{(r)} & J_{12}^{(r)} \\ J_{21}^{(r)} & J_{22}^{(r)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i^{(r)} \\ \Delta Q_i^{(r)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

จากนั้นนำค่า $\Delta \theta$ และ ΔV ที่ได้จากสมการ (2.9) ไปปรับปรุงค่ามุมเฟสและแรงดันที่ปัดดังสมการที่ (2.10)

$$\theta_i^{(r+1)} = \theta_i^{(r)} + \Delta \theta_i^{(r)} \quad (2.10)$$

$$V_i^{(r+1)} = V_i^{(r)} + \Delta V_i^{(r)} \quad (2.11)$$

เมื่อได้ค่ามุมเฟสและแรงดันใหม่ที่ได้รับการปรับปรุงค่าแล้วตามสมการที่ (2.10) และ (2.11) จากนั้นนำกลับไปคำนวณในกระบวนการซ้ำตั้งแต่สมการที่ (2.3) และ (2.5) อีกครั้งจนกว่า ΔP และ ΔQ ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือมีค่าเท่ากับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Error)

2.2.2 การศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี (DC Power Flow)

สำหรับการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าในระยะยาวนั้น ผู้วิจัยจะสมมติให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของสายส่งในแต่ละเส้นมีค่าเท่ากับศูนย์ [33,35] สาเหตุที่ใช้วิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี. เนื่องจากง่ายต่อคำนวณ การรู้เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วเหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์ระบบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ดังนั้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี. จึงมีข้อกำหนด ดังนี้ [35]

1. ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสมีขนาดเท่ากับทุกบัสคือ มีค่าเท่า 1.0 pu. และ 0.0° ตามลำดับ

2. ในการคำนวณการหาค่ากำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี. จะไม่พิจารณาค่าความนำไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้น ($G_{ij} = 0$) หรือพิจารณาเพียงค่าซัสเซปแทนซ์ (Susceptance: B_{ij}) ในสายส่งแต่ละเส้นเท่านั้น

3. จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) สามารถประมาณค่ามุมของค่าความนำไฟฟ้าได้ ดังนี้คือ $\sin(\theta_i - \theta_j) \approx \theta_i - \theta_j$ และค่าของซัสเซปแทนซ์มีค่าเท่ากับ $\cos(\theta_i - \theta_j) \approx 1$

ดังนั้น สมการการไหลกำลังไฟฟ้าตามสมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่ให้เป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี. ได้ดังนี้

$$f_i = \sum_{j=1}^N B_{ij} (\theta_i - \theta_j) \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.12)$$

2.2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique)

การดำเนินธุรกิจในปัจจุบันที่มีการแข่งขันกันค่อนข้างสูง ทำให้นักธุรกิจหรือนักบริหารเล็งเห็นความสำคัญของการนำทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดหรือเรียกว่า เป็นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับการบริหารจัดการทรัพยากรเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ทรัพยากรดังกล่าวประกอบด้วย คน เครื่องจักร วัตถุดิบ เวลา เงินทุนและสิ่งอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการผลิตหรือการให้บริการ ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเข้ามาแก้ไขปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีความเหมาะสมที่สุด

2.2.3.1 การจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เงื่อนไขบังคับ (Constraints) และตัวแปรตัดสินใจ (Variable Decision) หากผู้ตัดสินใจต้องการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องใช้รูปแบบหรือสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงลักษณะของปัญหาได้ดังนี้

1. **ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)** การตัดสินใจหาปริมาณการผลิตสินค้าที่ดีที่สุด เพื่อให้ผลกำไรสูงสุดหรือการตัดสินใจหาปริมาณสินค้าที่ต้องขนส่งเพื่อให้ต้นทุนต่ำสุด โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการแก้ไขปัญหา วัตถุประสงค์ของปัญหาจะมีทั้งค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ซึ่งจะเกิดจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรการตัดสินใจ ที่นำมาบวก ลบ คูณ หาร เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ “ฟังก์ชันวัตถุประสงค์” ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\text{Max or Min } z = f(x)$$

ฟังก์ชันของวัตถุประสงค์จะแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการตัดสินใจที่ผู้ทำการตัดสินใจนั้นต้องการ ไม่ว่าจะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ยกตัวอย่าง เช่น มีการนำฟังก์ชันมาอธิบายผลกำไรรวมอันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์หลายๆ ประเภทรวมกัน อธิบายผลรวมระยะทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่หรือจำนวนเงินรวมที่ใช้ในการลงทุน เป็นต้น

2. **เงื่อนไขบังคับ (Constraints)** การตัดสินใจในปัญหาการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จะมีปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้เกิดทางเลือกในการตัดสินใจ ปัจจัยดังกล่าว คือ “ข้อจำกัด” ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับให้ผู้ตัดสินใจจะต้องเลือกทางเลือกให้อยู่ภายในขอบเขตของข้อจำกัดในแต่ละด้าน เช่น ข้อจำกัดในด้านแรงงาน กำลังการผลิต จำนวนชั่วโมงในการผลิตที่ว่างอยู่ เป็นต้น เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ไขปัญหาจะต้องแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันให้อยู่ภายใต้ข้อจำกัด โดยมีรูปแบบทั่วไป 3 ลักษณะ คือ

- น้อยกว่าหรือเท่ากับข้อจำกัด: $f(x) \leq b$
- มากกว่าหรือเท่ากับข้อจำกัด: $f(x) \geq b$
- เท่ากับข้อจำกัด: $f(x) = b$

3. **ตัวแปรตัดสินใจ (Variable Decision)** ปัญหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานทางธุรกิจจะต้องมีการตัดสินใจเลือกปัญหาที่จะต้องแก้ไข เช่น การตัดสินใจหาปริมาณสินค้าที่ต้องขนส่ง การตัดสินใจสั่งซื้อเครื่องจักรในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้จะต้องใช้สัญลักษณ์พยานะภาษาอังกฤษใดๆ แสดงแทนการตัดสินใจในปัญหาที่เลือก สัญลักษณ์ดังกล่าวเรียกว่า “ตัวแปรการตัดสินใจ” (decision variable) เช่น ใช้สัญลักษณ์ $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ เป็นตัวแปรแทนการตัดสินใจปริมาณสินค้าที่ต้องการผลิต เป็นต้น

สมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสามารถอธิบายในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\text{Max or Min } z = f(x, u)$$

ภายใต้ข้อจำกัด:

$$g(x, u) = 0$$

$$h^{\min} \leq h(x, u) \leq h^{\max}$$

รูปแบบเหล่านี้แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำให้เกิดค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุดรวมไปถึงข้อจำกัดต่างๆ ของปัญหาในแต่ละสมการจะอธิบายวัตถุประสงค์และข้อจำกัดได้แตกต่างกัน โดยที่เป้าหมายในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ การหาค่าตัวแปรการตัดสินใจที่มีค่ามากที่สุดหรือน้อยสุดภายใต้ข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

2.2.4 การจำลองปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Problem Formulation to Transmission Expansion Planning)

2.2.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } C_T = \sum_{i,j \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (2.13)$$

2.2.4.2 เงื่อนไขหรือข้อจำกัด (Constraints)

สำหรับเงื่อนไข (Constraints) จะพิจารณาอยู่ในรูปของหลักการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ เงื่อนไขของสมการเท่ากับ (Equality Constraints) และเงื่อนไขของอสมการ (Inequality Constraints) เพื่อให้ได้มาเพื่อเพิ่มความมั่นคงและความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถเขียนอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขของสมการเท่ากับ (Equality Constraints)

สำหรับเงื่อนไขในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นไปตามกฎกระแสและแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

(ก) สมการสมดุลไฟฟ้าหรือกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Power Balance or Kirchoff's Current Laws: KCL)

$$\mathbf{Sf} + \mathbf{g} - \mathbf{d} = 0 \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี ที่บัส i ได้จากสมการที่ (2.12) และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของระบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\theta \quad (2.15)$$

(ข) สมการการไหลกำลังไฟฟ้าของวงจรสมมูลแบบ ดี.ซี (DC Load Flow Equation) หรือเรียกว่ากฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Laws: KVL)

$$f_{ij} - B_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.16)$$

การคำนวณหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงแต่ละเส้นทางในสมการที่ (2.16) เป็นไปตาม (2.17)

$$f_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) \quad (2.17)$$

2) เงื่อนไขของอสมการ (Inequality Constraints)

สำหรับเงื่อนไขของอสมการในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นไปตามเงื่อนไขทางระบบไฟฟ้าและทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถเขียนได้ดังนี้

(ก) พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าต้องไม่เกินพิกัดของระบบส่ง (Transmission Capacity Limit)

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \quad (2.18)$$

(ข) พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใดๆ ต้องไม่เกินกำลังการผลิตสูงสุด (Generation Limits)

$$\mathbf{g}^{\min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}^{\max} \quad (2.19)$$

(ค) พิกัดของจำนวนวงจรสายส่งเส้นใหม่ต้องไม่เกินจำนวนวงจรสูงสุด (Right of way limits) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max} \quad (2.20)$$

และ n_{ij} เป็นตัวแปรจำนวนเต็ม (Integer Variable), f_{ij} และ θ_j ไม่มีเขตจำกัด (unbounded)

2.2.5 วิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

John Holland [36] ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีพันธุกรรมในปี ค.ศ 1975 ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งคุณลักษณะที่ดีและไม่ดี ซึ่งคุณลักษณะที่ดีก็ย่อมมีโอกาสอยู่รอดและจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดพันธุกรรมไปยังรุ่นลูกหลานได้มากกว่า เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตใหม่มีคุณลักษณะที่ดีขึ้น สำหรับวิธีพันธุกรรม เมื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดก็อาศัยหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรม เพื่อให้ได้คำตอบในรุ่น (Generation) ต่อไป โดยเป็นไปตามค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ที่ดีขึ้น

2.2.5.1 หลักการพื้นฐานของวิธีพันธุกรรม

วิธีพันธุกรรม [36-38] จะนำเสนอข้อมูลหรือคำตอบอยู่ในรูปของโครโมโซม (Chromosome) ในแต่ละโครโมโซมก็จะประกอบด้วยบิต (Bit) เรียกว่า ยีน (Gene) โดยจะทำการคัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมจากกลุ่มของโครโมโซมทั้งหมดและนำโครโมโซมเหล่านั้นไปผ่านกระบวนการคัดเลือกที่เลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม เพื่อหาโครโมโซมที่มีความเหมาะสมในการอยู่รอด โดยใช้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์

2.2.5.2 องค์ประกอบของวิธีพันธุกรรม

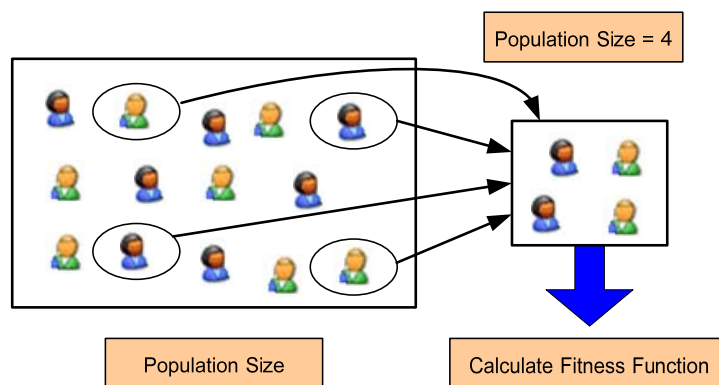
องค์ประกอบที่สำคัญของวิธีพันธุกรรม มีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วนคือ

1. **รูปแบบโครโมโซม (Chromosome Encoding)** คือการถอดรหัสหรือการได้มาซึ่งโครโมโซม ปัญหาแรกที่จะเริ่มแก้ปัญหาโดยใช้วิธีพันธุกรรมคือในการถอดรหัส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหา ดังนั้นรูปแบบของโครโมโซมมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้นๆ ซึ่งอยู่ในรูปของเลขฐานสอง (Binary Code) โดยทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะมีค่าเป็นบิตมีค่าเป็น 0 หรือ 1 ตัวอย่างเช่น

โครโมโซม A : 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0

โครโมโซม B : 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1

2. **ประชากรต้นกำเนิด (Initial Population)** เป็นการกระทำอันดับแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการของวิธีพันธุกรรมคือ ประชากรที่เกิดจากการสุ่ม ในการสุ่มจะต้องสุ่มให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดของรุ่นที่ได้กำหนดไว้พร้อมทั้งคำนวณ ค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 4 โครโมโซม

3. ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) โครโมโซมทุกตัวจะต้องมีค่าซึ่งบ่งบอกถึงความเหมาะสมที่จะพิจารณาว่าสมควรนำไปสืบสายพันธุ์ต่อหรือไม่ ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณค่าความเหมาะสมกับแต่ละโครโมโซม เพื่อนำค่าความเหมาะสมไปพิจารณา โดยใช้สมการหาค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่สอดคล้องกับปัญหา สรุปได้ว่าค่าฟังก์ชันความเหมาะสม คือ ตัวที่ใช้ประเมินว่าแต่ละโครโมโซมนั้นมีความเหมาะสมหรือสามารถใช้เป็นคำตอบของปัญหาได้ดีเพียงใดตัวอย่างของฟังก์ชันหาค่าความเหมาะสม เช่น

ค่าความเหมาะสม = จำนวนของบิตที่เป็น 1 ทั้งหมดในโครโมโซม

โครโมโซม A : 1 0 0 0 1 1 1 0 0 ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของโครโมโซม A คือ 4

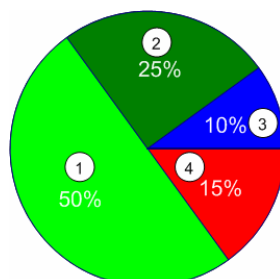
โครโมโซม B : 1 1 0 1 1 1 0 0 1 ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของโครโมโซม B คือ 6

4. การดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator) การดำเนินการทางพันธุกรรมเป็นหัวใจสำคัญของวิธีพันธุกรรม ซึ่งมีกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญมี 3 ส่วน ดังนี้

1. การคัดเลือก (Selection) ในการคัดเลือกโครโมโซม เพื่อที่จะนำมาเป็นพ่อแม่ (Parent) ในการสืบสายพันธุ์ครั้งต่อไป เพื่อที่จะเกิดการออกรอดของสิ่งมีชีวิตที่ดีที่สุดจึงทำให้นักวิจัยคิดค้นรูปแบบการเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจที่สุดเพื่อนำไปสืบสายพันธุ์ต่อไปเช่น การคัดเลือกแบบวงล้อรูเลต (Roulette Wheel) การคัดเลือกแบบจัดลำดับ (Ranking) และการคัดเลือกแบบอิลิทิส (Elitist) การคัดเลือกแต่ละวิธี มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. การคัดเลือกแบบวงล้อรูเลต(Roulette Wheel) โครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีกว่ามีโอกาสถูกเลือกมากกว่าอธิบายได้จากภาพที่ 2.2 เมื่อแสดงถึงวงล้อเสี่ยงโชคที่โครโมโซมทั้งหมด 4 โครโมโซมอาศัยอยู่ขนาดพื้นที่ของวงล้อเสี่ยงโชคคือสัดส่วนของ

ค่าความเหมาะสมที่เหมาะสมที่สุดของทุกโครโมโซมที่มีโอกาสถูกเลือกมากที่สุด ดังนั้นส่วนที่มีเปอร์เซ็นต์มากที่สุดตามภาพที่ 2.2 เมื่อมีการหมุนวงล้อโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสถูกเลือกได้บ่อยที่สุด

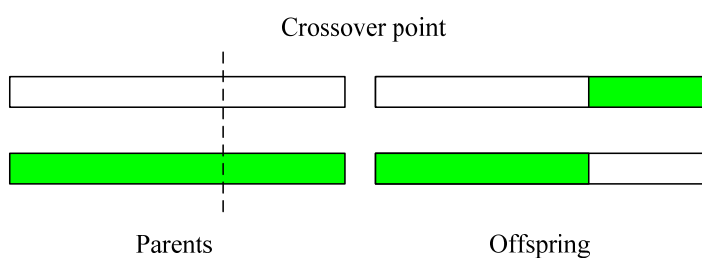


ภาพที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมในรูปวงล้อสุ่ม

ข) **การคัดเลือกแบบจัดลำดับ (Ranking)** ทำโดยเลือกประชากรเรียงลำดับตามค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุด โดยที่ไม่สนใจประชากรตัวอื่นเลย

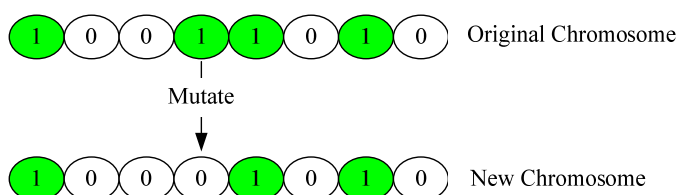
ค) **การคัดเลือกแบบอิลิทิส (Elitist)** ทำโดยการคัดลอกโครโมโซมที่ดีที่สุดไว้ก่อนส่วนประชากรที่เหลือจะต้องคัดเลือกตามกำหนด โดยใช้วิธีการเลือกแบบที่กล่าวมาข้างต้น

2. **การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)** เป็นกระบวนการที่สำคัญของวิวัฒนาการ เมื่อเกิดการข้ามสายพันธุ์ขึ้นในทางพันธุศาสตร์แล้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายขึ้น การข้ามสายพันธุ์จะต้องอาศัยกระบวนการวิวัฒนาการที่ใช้เวลานาน ขั้นตอนในการข้ามสายพันธุ์ทำได้โดยนำ 2 โครโมโซมของพ่อและแม่ มาผสมกันเพื่อให้ได้โครโมโซมใหม่ขึ้นมาวิธีการที่ง่ายที่สุดคือ สุ่มตำแหน่งของการข้ามสายพันธุ์และทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งของพ่อและคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งของแม่รวมกันจะได้ลูกตัวที่ 1 ออกมา จากนั้นทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งของแม่และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งของพ่อรวมกันจะได้ลูกตัวที่ 2 ออกมา ดังแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การข้ามสายพันธุ์

3. การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากการข้ามสายพันธุ์เสร็จสิ้นนั้นหมายความว่าเราได้รุ่นลูกที่เกิดจากการผสมจากรุ่นพ่อแม่ จากนั้นนำรุ่นลูกมาดำเนินการกลายพันธุ์ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดลักษณะใหม่ๆ เกิดขึ้นและทำให้เกิดวิวัฒนาการใหม่ขึ้น ขั้นตอนในการกลายพันธุ์คือ เมื่อได้ตำแหน่งการกลายพันธุ์แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่า ณ ตำแหน่งที่สุ่ม ถ้าโครโมโซมอยู่ในรูปแบบเลขฐานสองจะมีการเปลี่ยนที่เป็นไปได้จาก 1 เป็น 0 หรือ จาก 0 เป็น 1 ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การกลายพันธุ์

2.2.5.3 ระเบียบวิธีการพันธุกรรม

วิธีพันธุกรรมจะมีคำตอบในรูปแบบของโครโมโซม แต่ละโครโมโซมจะประกอบด้วยบิต (Bit) เรียกว่า ยีน (Gene) โดยจะทำการคัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมจากกลุ่มของโครโมโซมทั้งหมดและนำโครโมโซมเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการคัดเลือกที่เลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม เพื่อหาโครโมโซมที่มีความเหมาะสมในการอยู่รอด โดยการคำนวณค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ระเบียบวิธีการของวิธีพันธุกรรมแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้น กำหนดให้ $t = 0$ และสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population) โดยการสุ่มเลือกจากประชากรต้นแบบ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ของแต่ละโครโมโซมพร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าใช่ หยุดการทำงาน ถ้าไม่ ให้กระทำในขั้นตอนที่ 3

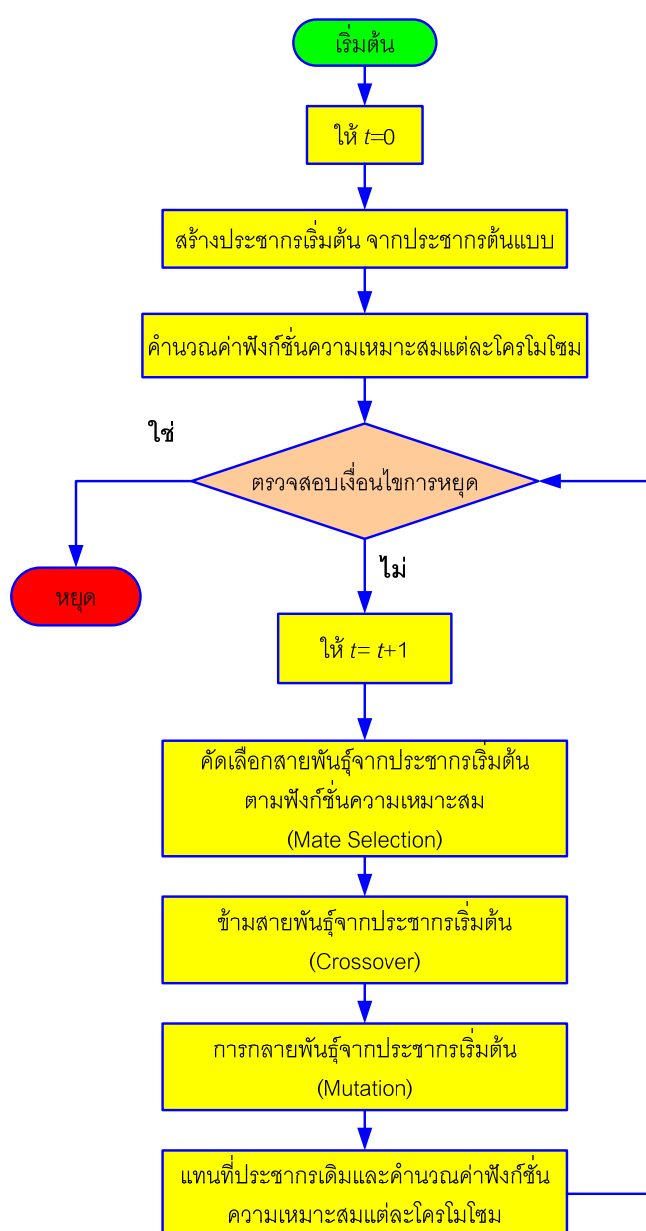
ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $t = t + 1$ และเริ่มการคัดเลือก (Selection) คือ อ้างอิงจากประชากรเริ่มต้น ถ้าโครโมโซมใดมีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดจะมีน้ำหนักความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกแต่ละครั้งสูง

ขั้นตอนที่ 4 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) คือ ทำได้โดยการกำหนดค่าสุ่มให้แก่โครโมโซมที่ถูกเลือกมาทั้งหมด ถ้าโครโมโซมใดที่มีค่าสุ่มน้อยกว่าความน่าจะเป็นในการข้าม

สายพันธุ์ จะถูกนำไปจับคู่เป็นโครโมโซมพ่อแม่แล้วมีการแลกเปลี่ยนบางส่วนของโครโมโซมทั้งสอง เพื่อสร้างโครโมโซมรุ่นลูก

ขั้นตอนที่ 5 การกลายพันธุ์ (Mutation) คือ ทำการเปลี่ยนค่าของโครโมโซมบางตำแหน่งเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ตามอัตราความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 6 แทนที่ประชากรเดิม (Replacement) จากนั้นคำนวณค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมพร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าใช่ หยุดการทำงาน ถ้าไม่ ให้กระทำในขั้นตอนที่ 3



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีพันธุกรรม

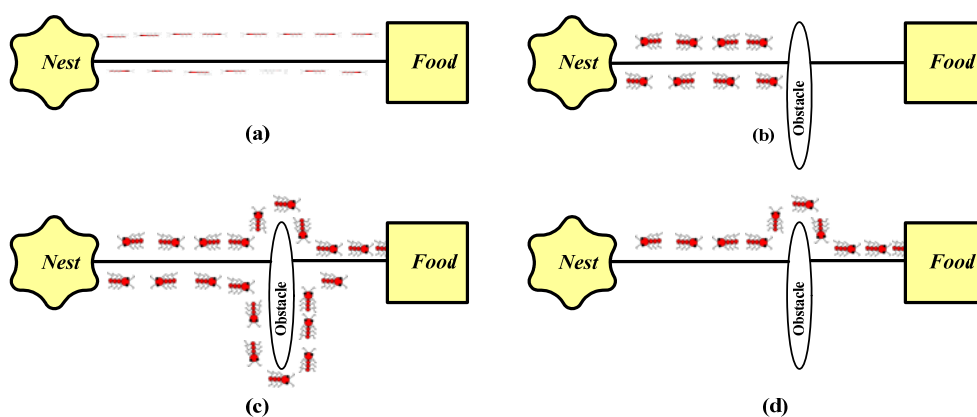
2.2.6 วิธีพฤติกรรมฝูงมด (Ant Colony Optimization: ACO)

2.2.6.1 หลักการพื้นฐานของพฤติกรรมฝูงมด

Marco Dorigo และคณะ [25,26,39,40] ได้สรุปแนวคิดและขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพฤติกรรมของฝูงมด ซึ่งวิธีการนี้อาศัยพื้นฐานการเลียนแบบของมดจริง โดยพฤติกรรมของมดจริงสามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ทั้งๆ ที่มดไม่เห็นเส้นทาง โดยธรรมชาติแล้วเมื่อมดจริงเดินทางออกจากรังมด (Nest) เพื่อไปหาอาหารตามแหล่งอาหาร (Food Source) ซึ่งพบว่ามีตัวกลางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารข้อมูลของมดในแต่ละเส้นทางและถูกใช้เป็นตัวชี้แนะว่าจะไปที่ไหนประกอบด้วยสารที่เรียกว่า สารฟีโรโมน (Pheromone) โดยที่มดตัวที่กำลังเดินอยู่นั้นจะปล่อยสารฟีโรโมนออกมาในปริมาณที่แตกต่างกันตามเส้นทางที่เดินผ่านมา ซึ่งถือเป็นการทำสัญลักษณ์ไว้บนเส้นทางนั้นด้วยสารเคมีชีวภาพขณะที่มดฝูงแรกที่เดินทางออกจากรังและมดที่เดินแยกออกจากฝูงหรือหลงทาง มดเหล่านี้จะเดินแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีสารฟีโรโมนตามเส้นทางที่จะเดิน ซึ่งต่างกับมดฝูงต่อมาหรือมดที่เดินอยู่ในฝูงจะสามารถหาเส้นทางได้และตัดสินใจว่าจะเดินไปในเส้นทางใด ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะเดินตามเส้นทางนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารฟีโรโมนของเส้นทางนั้น พฤติกรรมแบบสะสมของฝูงมดที่เกิดขึ้นนี้เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและยิ่งมดเดินตามเส้นทางเดิมมากเท่าไรจะพบว่ามีสารฟีโรโมนเป็นสิ่งดึงดูดให้มดเดินทางตามเส้นทางเดิมมากขึ้นโดยถือว่าเส้นทางนั้นเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด เมื่อนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะกระจายการค้นหาคำตอบผ่านตัวกระทำที่เรียกว่า “มด (ants)” หรือ “ตัวแทน (agent)” ที่มีความสามารถพิเศษในการเดินทางของมดฝูงแรกที่เริ่มออกจากรังจะเดินแบบสุ่ม ส่วนมดฝูงต่อมาจะเดินทางตามเส้นทางโดยพิจารณาเส้นทางที่จะเดินจากข้อมูลความหนาแน่นของสารฟีโรโมนที่มดฝูงก่อนหน้านี้ปล่อยเอาไว้ โดยในปัจจุบันวิธีฝูงมดเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่งและได้ทำการพิสูจน์แล้วในการแก้ปัญหาต่างๆ เช่น ปัญหาการเดินทางของนักขาย (Traveling Salesman Problem: TSP) ปัญหาการมอบหมายงาน (Quadratic Assignment Problem: QAP) และ ปัญหาการวางแผนการขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นต้น

พิจารณาตัวอย่างการทำงานที่แสดงดังภาพที่ 2.6 จากรูปแสดงเส้นทางการเดินทางของมด (จากตัวอย่างเป็นการเดินทางไป-กลับระหว่างรังมดกับแหล่งอาหาร) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (a) ทันใดนั้นเมื่อมีสิ่งกีดขวาง (Obstacle) มาปิดกั้นเส้นทางเดิม ดังนั้นมดที่กำลังเดินทางจากรังจะไปแหล่งอาหาร (หรือมดที่กำลังเดินทางจากแหล่งอาหารจะไปรัง) ต้องตัดสินใจว่าจะเดินไปทางด้านซ้ายหรือขวาดังภาพที่ 2.6 (b) เส้นทางที่มดตัดสินใจเลือกเดินทางนั้นจะมีอิทธิพลมาจากความหนาแน่นของจำนวนสารฟีโรโมนที่มดตัวก่อนหน้านั้นปล่อยเอาไว้เป็นตัวชี้แนะ เนื่องจากไม่มี

สารฟีโรโมนถูกวางไว้ก่อนหน้านี้ทั้งสองทิศทางมดจึงตัดสินใจเดินไปทั้งสองทางดังภาพที่ 2.6 (c) จากภาพจะเห็นว่าเส้นทางด้านบนจะสั้นกว่าเส้นทางด้านล่างมดตัวแรกที่เดินทางตามเส้นทางด้านบนจะเดินทางข้ามสิ่งกีดขวางและเดินกลับถึงรังหรือถึงแหล่งอาหารได้ก่อนมดตัวแรกที่เดินทางตามเส้นทางด้านล่างทำให้มดตัวต่อมาจะหาเส้นทางตามเส้นทางที่มีความหนาแน่นของสารฟีโรโมนบนเส้นทางด้านบนเป็นเหตุให้มดส่วนใหญ่ตัดสินใจเลือกเดินตามเส้นทางด้านบน เนื่องจากมีความหนาแน่นของปริมาณสารฟีโรโมนมากกว่าและเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าด้วย ทำให้มดมีแนวโน้มที่จะเลือกเดินตามเส้นทางที่มีระยะทางสั้นกว่าอย่างรวดเร็วดังภาพที่ 2.6 (d)



ภาพที่ 2.6 การหาระยะทางที่สั้นที่สุดของฝูงมดจริง

2.2.6.2 องค์ประกอบของวิธีฝูงมด

1. ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (State Transition Probability)

สำหรับวิธีฝูงมดหรือระบบมดเทียมนั้นจะสร้างคำตอบโดยเริ่มแรกจะทำการสุ่มเลือกบัสเริ่มต้น จากนั้นในการเดินต่อไปในแต่ละครั้งจะใช้สมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.22)

$$p_{ij}^a(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{n=1}^m [\tau_{in}(t)]^\alpha [\eta_{in}(t)]^\beta} \quad (2.21)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{c_{ij}} \quad (2.22)$$

ค่า α และ β เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ให้กับปริมาณสารฟีโรโมน (τ) และค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลฮิวริสติก (Heuristic information: η) โดยทั่วไปแล้วกฎของการสุ่มโดยใช้

ความน่าจะเป็นในการเลือกบัสถัดไปนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของปริมาณสารฟีโรโมน (τ) และค่าถ่วงน้ำหนักของการสุ่มอย่างมีเหตุผล β ถ้าค่า $\alpha = 0$ แล้วบัสที่มีความเป็นไปได้ที่อยู่ใกล้ที่สุดจะมีโอกาสในการถูกเลือกมากกว่า แต่ถ้าค่า $\alpha > 1$ จะทำให้ได้คำตอบแบบทั่วไป (Local search) ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ในขณะที่ถ้าค่า $\beta = 0$ มดก็จะใช้ค่าของร่องรอยสารฟีโรโมน (τ_{ij}) เท่านั้นที่นำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางก็จะทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดีเท่าที่ควร

2) กฎการปรับปรุงทั่วไป (Global Updating Rule)

ขบวนการค้นหาของวิธีฝูงมดไม่สามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้จะเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่จึงได้มีการปรับปรุงค่าสารฟีโรโมน (τ) คือถ้าคำตอบที่ได้ในรอบถัดไปเป็นคำตอบที่ดีขึ้นจะให้ค่าสารฟีโรโมนในบนเส้นทางนั้นมาก แต่ถ้าคำตอบที่ได้ในรอบถัดไปเป็นคำตอบที่ไม่ดีขึ้นจะมีค่าสารฟีโรโมนในบนเส้นทางนั้นน้อย ซึ่งถ้าได้คำตอบในรอบถัดไปไม่ดีขึ้นก็มีเงื่อนไขในการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถปรับปรุงความหนาแน่นสารฟีโรโมนได้จากสมการที่ (2.23)

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \times (\tau_{ij}(t-1)) + \Delta\tau_{ij} \quad (2.23)$$

และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau_{ij}$) หาได้จากสมการที่ (2.24) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมนของมดแต่ละตัว ($\Delta\tau_{ij}^a$) หาได้จากสมการที่ (2.25)

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{a=1}^k \Delta\tau_{ij}^a \quad (2.24)$$

$$\Delta\tau_{ij}^a = \begin{cases} 1 & \text{if } a^{\text{th}} \text{ ant chooses path} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.25)$$

กำหนดให้อัตราการระเหยของสารฟีโรโมนมีค่าเท่ากับ $(0 < \rho < 1)$ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าค่า ρ มีค่าเท่ากับ 0.1 นั้นก็หมายความว่าใน 1 รอบของการค้นหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมนแต่ละเส้นทางจะมีระเหยของสารฟีโรโมนไป 10% ดังนั้นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau_{ij}$) ก็คือ ปริมาณสารฟีโรโมนที่เกิดขึ้นในเส้นทางที่มดเดินในรอบนั้นจะมีค่าเท่ากับ 90 %

2.2.6.3 ขั้นตอนของวิธีฝูงมด

ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยวิธีการฝูงมดมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาอัลกอริทึมที่ถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ ระเบียบขั้นตอนของวิธีพฤติกรรมฝูงมด แสดงในภาพที่ 2.7 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้น กำหนดให้มดฝูงแรกในการค้นหา ($t = 0$) และกำหนดจำนวนมด (a) พร้อมทั้งกำหนดสารฟีโรโมนเริ่มต้น $\tau(0) = \tau_0$ และกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau = 0$)

ขั้นตอนที่ 2 ให้มดทุกตัวหาคำตอบที่เป็นไปได้จากการสุ่มคำตอบ แทนด้วย

$$\Theta = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{a-1} \ s_a]^T \quad (2.26)$$

พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบ แทนด้วย

$$F = [f(s_1) \ f(s_2) \ \dots \ f(s_{a-1}) \ f(s_a)]^T \quad (2.27)$$

และเลือกคำตอบที่มีค่าตรงตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สุดมาเป็นคำตอบตั้งต้น (s_{a_best})

ขั้นตอนที่ 3 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau$) ของแต่ละเส้นทาง พร้อมทั้งปรับปรุงสารฟีโรโมน (τ) ของแต่ละเส้นทาง โดยใช้สมการที่ (2.23-2.25)

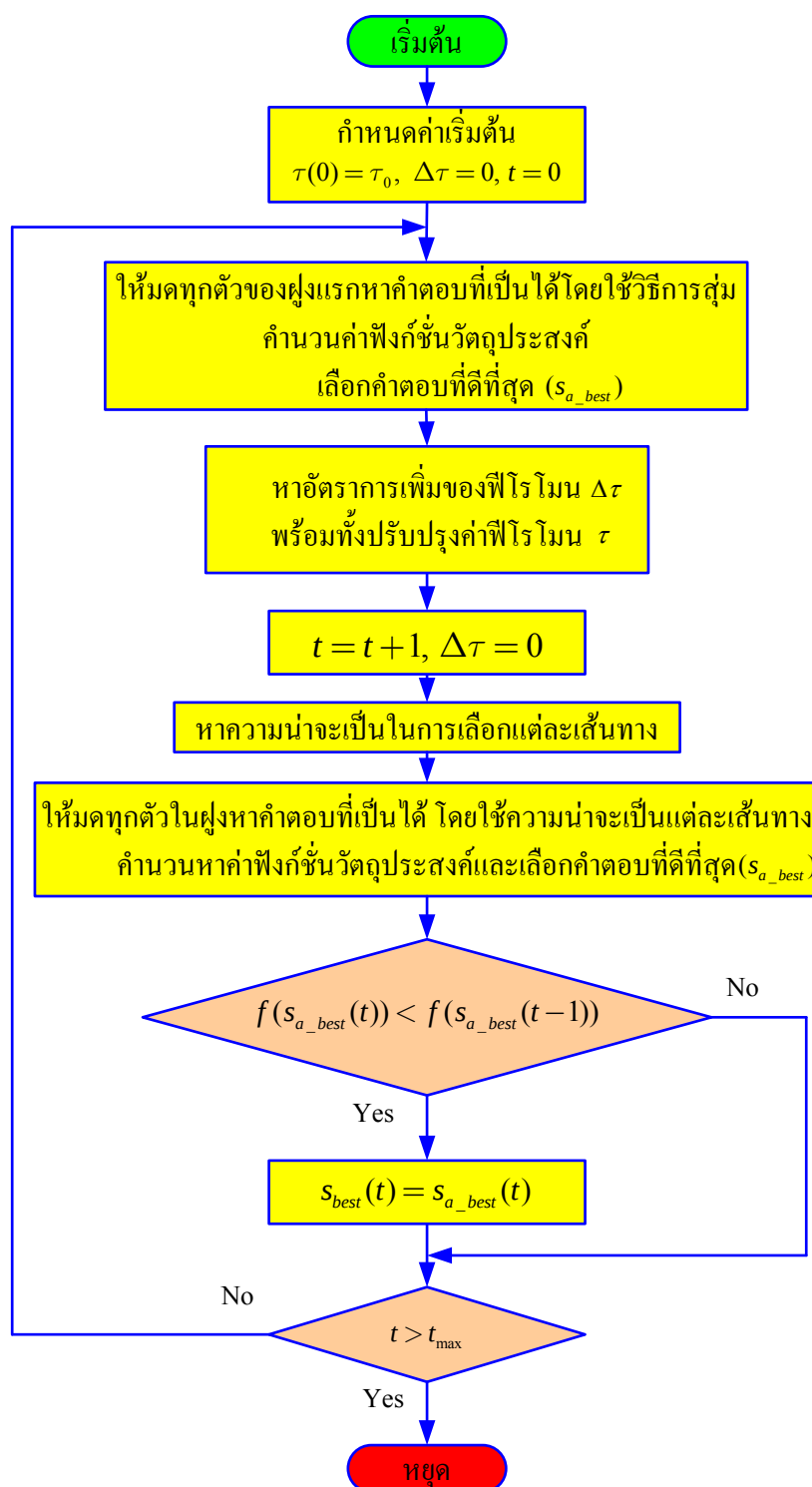
ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้มดฝูงต่อมาในการค้นหา ($t = t + 1$) และกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau = 0$)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะแต่ละเส้นทาง โดยใช้สมการที่ (2.21)

ขั้นตอนที่ 6 ให้มดทุกตัวของฝูงหาคำตอบที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.21) พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละคำตอบและเลือกคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมดีที่สุด เป็นคำตอบที่ดีที่สุด $s_{a_best}(t)$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบคำตอบที่ได้จากการค้นหาในรอบปัจจุบันดีกว่าคำตอบในรอบที่ผ่านมาหรือไม่ ($f(s_{a_best}(t)) < f(s_{a_best}(t-1))$) ถ้าใช่ แทนคำตอบเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ($s_{best}(t) = s_{a_best}(t)$) ถ้าไม่ คงคำตอบเดิม ($s_{best}(t) = s_{a_best}(t-1)$) จากนั้นค้นหาคำตอบใหม่ในฝูง (รอบ) ถัดไป ($t + 1$)

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าไม่ ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4



ภาพที่ 2.7 ระเบียบขั้นตอนของวิธีพฤติกรรมฝูงมด

2.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทบทวนบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ขั้นตอนในการวางแผน ข้อดี ข้อเสียจากวิธีการต่างๆ และนำไปสู่คำถามวิจัยในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้ทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียว ได้แก่ การศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้า (Power Flow Studies) โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน และข้อกำหนดต่างๆ ของการศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี (DC Power Flow) อีกทั้งยังได้กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด การสร้างแบบจำลองปัญหาของการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าประกอบไปด้วย การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมและวิธีฝูงมด ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหาของการวางแผนและหลักการเบื้องต้นของเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหา ส่วนวิธีการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป