



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสังเคินเครื่องโรงไฟฟ้าค้ำนึ่งถึงเงื่อนไขความมั่นคงโดยวิธีมิกซ์อินทิเจอร์โปรแกรม  
ร่วมกับวิธีเบนเดอส์คอดีคอมโพสิชัน

Security-Constrained Unit Commitment using Mixed-Integer Programming with Benders  
Decomposition

นามผู้วิจัย นายณัฐสน์ เหล่าธรรมยิ่งยง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต ดำรงกุลกำจร, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์มิ่งกล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงโดยวิธี  
มิกซ์อินทิเจอร์โปรแกรมร่วมกับวิธีเบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน

Security-Constrained Unit Commitment using Mixed-Integer  
Programming with Benders Decomposition

โดย

นายฉัตรชัย เหล่าธรรมยิ่งยง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2553

ณัฐสน์ เหล่าธรรมยิ่งยง 2553: การส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าค้ำเนินถึงเงื่อนไขความมั่นคง โดยวิธีมีกซ์อินทิเจอร์โปรแกรมร่วมกับวิธีเบนเดอรัสต์คอมโพสิชัน ปรินญาวิศวรรร ศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต คำรงกุลกำจร, Ph.D.  
72 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เพื่อแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเพื่อให้การผลิตกำลังไฟฟ้ารวม 24 ชั่วโมงมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดรวมถึงเงื่อนไขของการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งในสภาวะปกติและสภาวะการทำงานที่เกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบซึ่งก็คือการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าค้ำเนินถึงเงื่อนไขความมั่นคง ในการวิจัยนี้จะใช้หลักการของเบนเดอรัสต์คอมโพสิชันแบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน คือ ปัญหาหลักและปัญหาย่อยโดยปัญหาหลัก คือ ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยที่จะกำหนดสถานะเปิด/ปิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแตกกิ่งและตัดระนาบ ในการวิจัยนี้พิจารณาปัญหาย่อยออกเป็นสองส่วน คือ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและข้อจำกัดของระบบปฏิบัติงาน การทดสอบปัญหาย่อยที่ 1 เพื่อให้มั่นใจว่าการจ่ายโหลดร่วมกันสามารถจ่ายโหลดได้ทั้งระบบผ่านการเชื่อมต่อของสายส่ง การทดสอบปัญหาย่อยที่ 2 เพื่อนำไปตรวจสอบพิศัดการส่งกำลังไฟฟ้าและพิศัดแรงดันที่บัสของทุกบัสและทุกสายส่งที่อยู่ในระบบ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้ของปัญหาย่อยยังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะประยุกต์ใช้ เบนเดอรัสต์ท สร้างสมการเงื่อนไขเพิ่มเติมเข้าไปในปัญหาหลักเพื่อปรับปรุงผลลัพธ์ในปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไข การวิจัยนี้ใช้ระบบ IEEE 57 บัส ทดสอบ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน 7 เครื่อง โดยกำหนดข้อมูลของความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าทั้ง 24 ชั่วโมงและเพิ่มเติมข้อมูลที่จำเป็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ผลลัพธ์ของการวิจัยการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า คือ การส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าค้ำเนินถึงเงื่อนไขความมั่นคงภายใต้สภาวะปกติและสภาวะการทำงานที่เกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ ราคาต้นทุนรวมของการผลิตที่สภาวะการทำงานที่เกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบมีราคาต้นทุนการผลิตที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ใดๆ ก็ตามการจ่ายโหลดรวมกันของการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าค้ำเนินถึงเงื่อนไขความมั่นคงนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบยังคงทำงานต่อไปได้ในขณะที่เกิดความขัดข้องขึ้นในระบบ

---

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Nalan Laothumyingyong 2010: Security-Constrained Unit Commitment using Mixed-Integer Programming with Benders Decomposition. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Parnjit Damrongkulkamjorn, Ph.D. 72 pages.

The objective of this thesis is to determine the 24-hour unit commitment with minimum total generation cost subjecting to power flow constraints in both normal operating state and contingency state, which is considered the security-constrained unit commitment (SCUC). In this research, the Benders' Decomposition technique has been applied by decomposing the problem into two parts: the master problem; and the subproblems. The master problem which is the unit commitment problem contains integer variables as the on-off status of the generating units, and therefore could be solved as Mixed-Integer Programming problem. The branch-and-cut method has been chosen to solve the master mixed-integer problem. There are two subproblems using considered in this research: the power flow mismatch equations; and the operating limits of power systems. The first subproblem ensures that the committing units are able to serve loads locating all over the network through the connected transmission lines. The second subproblem takes into account the line flow and voltage limits of every line and every bus in the system. If the conditions in any subproblems are violated, the Benders Cuts corresponding to the violated constraints are added to the master problem in order to resolve the mixed-integer unit commitment problem. The proposed algorithm is tested on the IEEE 57-bus system with 7 thermal generating units. The 24-hour load data is made available along with the additional data for generating units. The results of typical unit commitment, security-constrained unit commitment under normal operating state and SCUC with contingency state are shown. The total generating costs of SCUC with contingency are higher than the others'. However the committed units of that SCUC ensure that the system could still serve load when contingency occurs.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานจิต คำรงกุลกำจร ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าในงานวิจัย อีกทั้งให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจน  
การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบ  
ความรู้อันมีคุณค่าเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์และการทำงานสืบไป

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และญาติที่ได้สั่งสอนอบรมและเป็นกำลังใจให้เสมอมา  
และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

ณัฐสน์ เหล่าธรรมยิ่งยง  
พฤศจิกายน 2552

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	56
ภาคผนวก	58
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	72

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตารางราคาต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง	29
2	ตารางแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด	31
3	ตารางแสดงข้อมูลสายส่งของระบบ 6 บัส	35
4	ตารางแสดงข้อมูลบัสของระบบ 6 บัส	35
5	ตารางราคาต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเชื้อเพลิงก๊าซ	41
6	ตารางเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	41
7	ตารางความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ	42
8	ผลลัพธ์สถานะของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (0/1) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบ	45
9	ผลลัพธ์กำลังไฟฟ้า (MW) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาต้นทุนการผลิต (B) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (UC)	46
10	ผลลัพธ์สถานะของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (0/1) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม	48
11	ผลลัพธ์กำลังไฟฟ้า (MW) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาต้นทุนการผลิต (B) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม	50
12	ผลลัพธ์สถานะของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (0/1) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)	52
13	ผลลัพธ์กำลังไฟฟ้า (MW) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาต้นทุนการผลิต (B) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)	53

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 57-bus ที่ใช้ในกรณีศึกษาของงานวิจัย	60
2	ข้อมูลสายส่งของระบบ IEEE 57-bus ที่ใช้ในกรณีศึกษาของงานวิจัย	62
3	ข้อมูลความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละบัสในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 12	65
4	ข้อมูลความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละบัสในช่วงเวลาที่ 13 ถึง 24	68

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นสมการเชิงเส้น	7
2	ขั้นตอนการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า	16
3	ขั้นตอนการแก้ปัญหาห้อย	18
4	ขั้นตอนการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการตัด ระนาบ	20
5	ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรจำนวนเต็มร่วมด้วยโดยใช้วิธีการแก้ปัญหา โดยการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch-and-Bound)	21
6	ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยโดยใช้วิธีการ แก้ปัญหาโดยการแตกกิ่งและการตัดระนาบ (Branch-and-cut)	22
7	ขั้นตอนการคำนวณปัญหาหลัก	28
8	การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยวิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบ	31
9	ขั้นตอนการแก้ปัญหาห้อยอื่นที่ 1 ตรวจสอบการลู่เข้าหาคำตอบของการไหล ของกำลังไฟฟ้า	34
10	ขั้นตอนการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของ กำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม	38
11	ขั้นตอนการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคง ของระบบที่สภาวะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ	39
12	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ	43
<b>ภาพผนวกที่</b>		
1	ระบบ IEEE 57-bus	59

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- $b$  คือ ดัชนีบ่งบอกบัส
- $C_{ki}$  คือ ความชันช่วงเวลา  $k$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$
- $dP_0, dQ_0$  คือ ค่าต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเฉพาะเจาะจงกับค่าที่คำนวณได้
- $d_l, e_b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของราคาที่เป็นบวกของสายส่ง ( $l$ ) และแรงดันที่บัส ( $b$ )
- $DR_i$  คือ อัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงลดลงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่  $i$
- $F_{ci}$  คือ ราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  ที่เวลา  $t$
- $i$  คือ ดัชนีบ่งบอกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- $I_{it}$  คือ สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  ที่เวลา  $t$
- $k$  คือ ดัชนีบ่งบอกช่วงเวลาของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$
- $NB$  คือ จำนวนของบัส
- $NG$  คือ จำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- $NK$  คือ จำนวนช่วงเวลาของการประมาณค่าด้วยวิธีส่วน
- $NT$  คือ จำนวนช่วงเวลาทั้งหมดที่พิจารณา
- $P_{D,t}$  คือ ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบที่เวลา  $t$
- $P_{L,t}$  คือ ความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าของระบบที่เวลา  $t$
- $P_{it}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  ที่เวลา  $t$
- $P_{i,\min}$  คือ พิกัดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$
- $P_{i,\max}$  คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$
- $PL_{l,\max}$  คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริงของสายส่ง  $l$
- $PL_l$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สายส่ง  $l$
- $\Delta PL_l$  คือ การเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าจริงที่สายส่ง  $l$
- $PL_{l0}$  คือ การเริ่มของกำลังไฟฟ้าจริงที่สายส่ง  $l$
- $R_{S,t}$  คือ ความต้องการไฟฟ้าสำรองของระบบที่เวลา  $t$
- $R_{S,it}$  คือ กำลังไฟฟ้าสำรองที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  จ่ายที่เวลา  $t$
- $SU_{it}$  คือ ราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  ที่เวลา  $t$
- $t$  คือ ดัชนีบ่งบอกช่วงเวลา มีหน่วยเป็นชั่วโมง

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $T_{ik}$  คือ พิกัดสูงสุดของความชันของช่วง  $k$  ของสมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้นที่  $i$
- $T_i^{off}$  คือ ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดของการปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$
- $T_i^{on}$  คือ ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดของการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$
- $UR_i$  คือ อัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่  $i$
- $V_{b,min}$  คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส  $b$  (Minimum voltage magnitude at bus  $b$ )
- $V_{b,max}$  คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส  $b$  (Maximum voltage magnitude at bus  $b$ )
- $V_b$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส  $b$  (Voltage magnitude at bus  $b$ )
- $X_{it}^{off}$  คือ เวลาน้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  หยุดเดินเครื่องติดต่อกันจนถึงเวลา  $t$  (Minimum down time)
- $X_{it}^{on}$  คือ เวลาน้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  เดินเครื่องติดต่อกันจนถึงเวลา  $t$  (Minimum up time)
- $\Delta P, \Delta Q$  คือ การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน
- $\Delta V$  คือ การเพิ่มขึ้นขนาดของแรงดัน
- $\Delta V_b$  คือ การเพิ่มขึ้นขนาดของแรงดันที่บัส  $b$
- $\Delta V_{b0}$  คือ การเริ่มขนาดของแรงดันที่บัส  $b$
- $Y_1$  คือ เมตริกซ์ที่บอกถึงบัสที่เปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีค่าเท่ากับเมตริกซ์ PV บัส
- $Y_2$  คือ เมตริกซ์ที่บอกถึงบัสที่เปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนซึ่งมีค่าเท่ากับเมตริกซ์ PQ บัส
- $\hat{w}$  คือ ค่าคำตอบของปัญหาย่อย
- $\delta_{kit}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $i$  ของแต่ละช่วง  $k$  ที่เวลา  $t$
- $\Delta \delta$  คือ การเพิ่มขึ้นมุมเฟสของแรงดัน
- $\alpha, \beta, \gamma$  คือ สัมประสิทธิ์ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- $H = \frac{\partial P}{\partial \delta}, N = \frac{\partial P}{\partial V}, M = \frac{\partial Q}{\partial \delta}, J = \frac{\partial Q}{\partial V}$  คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrices)
- $A = \frac{\partial PL}{\partial \delta}, B = \frac{\partial PL}{\partial V}$  คือ จาโคเบียนเมตริกซ์เพิ่มเติม (more Jacobian matrices)
- $\pi$  คือ ตัวคูณของซิมเพล็กซ์ (Simplex multiplier vector)

การตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงโดยวิธี  
มิกซ์อินทิเจอร์โปรแกรมร่วมกับวิธีเบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน

Security-Constrained Unit Commitment using Mixed-Integer  
Programming with Benders Decomposition

คำนำ

การตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (UC) และการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (ED) คือการคำนวณการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของโหลดที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาโดยที่ต้นทุนในการผลิตกำลังไฟฟ้ายรวมมีค่าต่ำและเหมาะสมกับแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่การตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้านั้นยังไม่พอเพียงที่จะทำให้ระบบมีความมั่นคงต่อมาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (SCUC) ถูกนำมาแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าในโครงสร้างการจ่ายของระบบไฟฟ้า เทคนิคการแก้ปัญหาเหล่านี้จะมีหลายวิธี แต่อย่างไรก็ตามวิธีลากรางจ์เล็กเซชัน (LR) และ วิธีแก้ปัญหาของปัญหาที่มีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย (MIP) ยังคงเป็นวิธีที่ใช้แก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่นิยมใช้มากที่สุด

การแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบใช้ประโยชน์ของหลักการเบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน (Benders Decomposition) ที่แบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน คือ ปัญหาหลัก (UC) และ ปัญหาความมั่นคงของระบบเป็นปัญหาย่อย Fu *et al.* (2005) ใช้วิธีลากรางจ์เล็กเซชันแก้ปัญหาหลักแล้วนำคำตอบที่ได้ไปตรวจสอบเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้า (AC Power Flow) เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สายส่งและเงื่อนไขพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (AC Network Security Constraints) ส่วน Fu and Shahidepour (2007) ใช้วิธีแก้ปัญหาของปัญหาที่มีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยแก้ปัญหาหลักแล้วนำคำตอบที่ได้ไปตรวจสอบเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบประมาณค่า (DC Power Flow), เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สายส่ง

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ประโยชน์ของหลักการเบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน (Benders Decomposition) ที่แบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน คือ ปัญหาหลัก (UC) ที่มีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย แก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแตกกิ่งและตัดระนาบ (Branch-and-Cut) และปัญหาย่อยเงื่อนไข

การไหลของกำลังไฟฟ้า (AC Power Flow) เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สายส่งและเงื่อนไขพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (AC Network Security Constraints) อย่างไรก็ตามถ้าคำตอบที่ได้มาจากปัญหาหลักยังคงไม่เป็นไปตามเงื่อนไขปัญหาย่อยจะทำการสร้างอสมการเงื่อนไขด้วยเทคนิคเบนด์เซอร์สคัท (Benders Cut) ลงในปัญหาหลักเพื่อทำการคำนวณใหม่ ในคำว่า “ความมั่นคง” ของวิทยานิพนธ์นี้หมายถึงระบบยังจ่ายโหลดได้โดยการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency) ในขณะที่ระบบมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด ในบทความนี้ทดสอบโดยใช้ระบบ IEEE 57-bus ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 7 เครื่อง



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (Security-Constrained Unit Commitment, SCUC) โดยที่ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย (Mixed-Integer Programming) โดยใช้วิธีการแตกกิ่งและตัดระนาบ (Branch-and-Cut) แก้ปัญหาร่วมกับเทคนิคเบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน (Benders Decomposition)
2. เพื่อเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ
3. เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (SCUC) กับผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (UC)
4. เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ ในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดกรณีความขัดข้องขึ้นกับสายส่ง (Contingency)

## การตรวจเอกสาร

### 1. ปัญหาโดยรวมของการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (UC PROBLEM OVERVIEW)

เริ่มแรกในการนำหลักการทางเศรษฐศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อที่จะทำให้เครื่องผลิตไฟฟ้ามีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด เรียกว่าวิธีการนี้ว่า การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) ต่อมา Chowdhury and Rahman (1990) ได้นำบทความตั้งแต่ปี 1977-1988 มารวบรวมไว้ดังนี้ ในปี 1920 ได้เริ่มมีการนำวิธีการทางเศรษฐศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยการจัดสรรปริมาณการผลิตให้เหมาะสมกับปริมาณความต้องการกระแสไฟฟ้า ต่อมาในปี 1930 ได้มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ เช่น base load method และ best point loading ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับมากในช่วงนั้น หลังจากนั้นได้รู้จักวิธีการเพิ่มขึ้นอย่างเท่ากัน (equal incremental method) ซึ่งเป็นที่นิยมมากในการใช้แก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างเหมาะสม และได้พัฒนาต่อไปเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข การคำนวณตัวประกอบความสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้าถูกพัฒนาในปี 1954 และในปี 1955 การเปิด/ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้พัฒนาลงไปใน การคำนวณการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Wood and Wollenberge, 1996)

เริ่มแรกการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (Guy, 1970) ทำเพื่อเปลี่ยนแปลงตารางการทำงานของเครื่องผลิตไฟฟ้าและปริมาณการผลิตไฟฟ้าเพื่อที่จะทำให้การแก้ปัญหาระบบเป็นไปได้ (primal feasible) สำหรับช่วงเวลาที่การผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยจะเพิ่มการผลิตแต่ไม่เพิ่มจนถึงค่าสูงสุด ถ้าจำเป็นจะเพิ่มเครื่องผลิตไฟฟ้าเข้าไปในระบบ อย่างไรก็ตามปัญหาโดยรวมของการแก้ปัญหาการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าบางครั้งก็อาจจะพบคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ เพราะว่าเงื่อนไขไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง (line flow) ที่จะไม่สอดคล้องกับเครื่องผลิตไฟฟ้าขณะที่ผลิตไฟฟ้าเต็มกำลังการผลิต หรือ ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramp rate constraints)

#### 1.1 แบบจำลองและเงื่อนไข (Models and Constraints)

1.1.1 แบบจำลอง (Model) ส่วนมากของเครื่องผลิตไฟฟ้าจะใช้เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบพลังงานความร้อน และ พลังงานน้ำ รวมถึงเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบทำงานร่วมกัน, pumped storage

units, ทั้งนี้ยังมีการพยากรณ์ความต้องการ, ราคาต่อความต้องการใช้พลังงาน และความสูญเสียในระบบ

### 1.1.2 เงื่อนไข (Constraints) แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) เงื่อนไขของเครื่องผลิตไฟฟ้า (unit constraints) รวมถึงตัวแปรควบคุมที่มาจากเครื่องผลิตไฟฟ้าต่างๆ เช่น ระบบกำลังไฟฟ้าสมดุล (System power balance), ระบบความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง (System spinning and operating reserve requirements), ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramping up/down limits), ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits), ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องผลิตไฟฟ้า (real and reactive power generation limits)

2) เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมไฟฟ้า (system constraints) รวมถึงตัวแปรควบคุมที่มาจากเครื่องผลิตไฟฟ้าหลายๆเครื่อง เช่น เงื่อนไขของเชื้อเพลิง (fuel constraints) และ เงื่อนไขการปล่อยมลภาวะ (emission limits)

3) เงื่อนไขของระบบเครือข่าย (network constraints) เช่น เงื่อนไขข้อจำกัดของการส่งไฟฟ้า และ แรงดันที่บัส (transmission flow and bus voltage constraints at steady-state and contingency cases) และ ข้อจำกัดของการเปลี่ยนอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า และการเปลี่ยนของหม้อแปลงไฟฟ้า (limits on tap changing and phase shifting transformer setting)

1.2 การแก้ปัญหาการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (Core Optimization approaches)  
การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าแบ่งออกตามลักษณะการคำนวณดังนี้ (Cohen and Yoshimura, 1983)

#### 1.2.1. Priority Ordering and Heuristic Methods

1.2.2 ไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic Programming) Pang and Chen (1976) ได้เสนอการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน และรวมถึงราคาของการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Snyder *et al.* (1987) ได้นำเอาเงื่อนไขข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits), ระบบความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง (System spinning and operating reserve), ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramping up/down limits) และเงื่อนไขของเชื้อเพลิง (fuel constraints)

1.2.3. ปัญหาแบบจำนวนเต็ม (Integer Programming) Cohen and Yoshimura (1983) ใช้โมเดลเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบความร้อน แก้สมการปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้วิธีวิธีการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch-and-Bound) และนำเงื่อนไขการเปิดและปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (startup and shutdown costs) และ ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits) Habibollahzadeh and Bubenko (1986) การแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยวิธีวิธีการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต และนำเอาเงื่อนไขเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (power generation constraints) เงื่อนไขของเชื้อเพลิง (energy and fuel constraints) ในเงื่อนไขของเชื้อเพลิงยังรวมถึงราคาของเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงตลอดการวางแผนการผลิต การซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักร, ระบบความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง (spinning reserve) และ ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิด/ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits) Naidoo (2007) เพิ่มเงื่อนไขการ hot warm และ cold start ส่วนเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator constraints) มี การเปิดและปิดเครื่องผลิตไฟฟ้า (start up/shut down status), ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริง (minimum and maximum real power limits), ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิด/ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits), ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramping up/down limits), ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง (reserve contribution) และ เงื่อนไขของพลังงาน (energy constraints) ส่วนเงื่อนไขของระบบ (system constraints) มีกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (supply-demand balance), ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ (reserve requirements) และ เงื่อนไขของสายส่ง (transmission constraints)

Carrión and Arroyo (2006) นำเสนอการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้วิธีแตกกิ่งและตัดระนาบ ใช้โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น

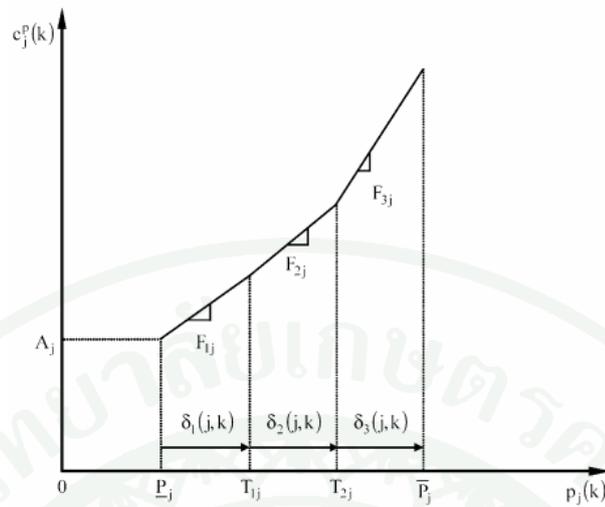
$$c_j^p(k) = a_j v_j(k) + b_j p_j(k) + c_j p_j^2(k) \quad (1)$$

จากสมการวัตถุประสงค์เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงใช้การประมาณค่าด้วยวิธีส่วน (piecewise approximation) เพื่อให้สมการวัตถุประสงค์เป็นสมการเชิงเส้นดังภาพที่ 1 เขียนสมการได้ว่า

$$c_j^p(k) = A_j v_j(k) + \sum_{l=1}^{NL_j} F_{lj} \delta_l(j, k) \quad (2)$$

$$p_j(k) = \sum_{l=1}^{NL_j} \delta_l(j, k) + \underline{P}_j v_j(k) \quad (3)$$

$$\delta_l(j, k) \leq T_{lj} - \underline{P}_j \quad (4)$$



ภาพที่ 1 สมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นสมการเชิงเส้น

$$\delta_l(j, k) \leq T_{lj} - T_{l-1j} \quad (5)$$

$$\delta_{NL_j}(j, k) \leq \bar{P}_j - T_{NL_j-1j} \quad (6)$$

$$\delta_l(j, k) \geq 0 \quad (7)$$

มีเงื่อนไข (Constraints) ดังนี้

$$\underline{P}_j v_j(k) \leq p_j(k) \leq \bar{p}_j(k) \quad (8)$$

$$0 \leq \bar{p}_j(k) \leq \bar{P}_j v_j(k) \quad (9)$$

โดยที่สมการเงื่อนไขที่ (8) และ (9) คือ พิกัดต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อ  $F_{lj}$  คือ ค่าของช่วงความชัน ที่  $l$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $j$

$\delta_l(j, k)$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแต่ละช่วง  $k$  ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $j$

$T_{jk}$  คือ พิกัดสูงสุดของความชันของช่วง  $k$  ของสมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้นที่  $j$

$k$  คือ ดัชนีบ่งบอกช่วงเวลาของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\underline{P}_j, \bar{P}_j$  คือ พิกัดต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$v_j$  คือ สถานะเปิด/ปิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$A_i = a_i + b_i \underline{P}_i + c_i \underline{P}_i^2$$

1.2.4. วิธีลากรางจ์รีแล็กซ์ชัน (Lagrangian Relaxation) Baldick (1995) รวบรวมการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีลากรางจ์รีแล็กซ์ชัน (LR) ในบทความของ Muckstadt and Koenig (1994) นำเสนอการแบ่งเงื่อนไขออกจากการผลิต เช่น เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (energy balance constraints) และเงื่อนไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง (reserve constraints) ในส่วนของปัญหาห่วยย่อย dynamic programming ประกอบด้วยเงื่อนไขข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits) และราคาการเปิดและปิดเครื่องผลิตไฟฟ้า (start-up and shut-down cost) ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นภายหลังของปัญหาวิธีลากรางจ์รีแล็กซ์ชัน (LR) และวิธีลากรางจ์ดีคอมโพสิชัน โดยจะพิจารณาเงื่อนไขมากมายลงไปปัญหาที่กำหนดไว้ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermal generator) จะผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับความต้องการ ตัวอย่างเช่น ใช้เครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำผลิตไฟฟ้าเพื่อที่จะจ่ายให้กับช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด เพราะว่าเครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำสามารถผลิตไฟฟ้าได้รวดเร็ว เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับใช้เครื่องผลิตไฟฟ้าทั้งสองรวมกัน Guan *et al.* (1993) และ Yan *et al.* (1993) ได้รวมเอาเงื่อนไขการใช้ประโยชน์จากพลังงานน้ำ และ เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramp rate constraints) แต่ยังไม่นำเงื่อนไขการส่งกำลังไฟฟ้า (line flow constraints) และ เงื่อนไขแรงดันที่บัสใดๆ (voltage constraints) ส่วน Shaw *et al.* ทำการแก้ไขปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้โมเดลเครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำแต่ไม่ได้นำเอาเงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramp rate constraints) แต่ยังไม่นำเงื่อนไขการส่งกำลังไฟฟ้า (line flow constraints) มาคำนวณยกเว้นเงื่อนไขแรงดันที่บัสใดๆ (voltage constraints) ต่อมา Merlin and Sandrin (1983) นำเอาเงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramp rate constraints) โดยแจกจ่ายละเอียดเป็นกำลังไฟฟ้าสำรอง (spinning reserve), การปรับเปลี่ยนความถี่ของโหลดที่ส่งผลต่อเครื่องผลิตไฟฟ้า (generator load-frequency adjustment) และ การประมาณค่าความสูญเสียของระบบ (approximate representation of loss) แต่ยังไม่นำเอาเงื่อนไขการส่งกำลังไฟฟ้า (line flow constraints) และเงื่อนไขแรงดันที่บัสใดๆ (voltage constraints) มาคิดคำนวณ

1.2.5 Mets-heuristics (Mori and Matsuzaki, 2001) Zhuang and Galiana (2000) ได้นำเสนอวิธี SA แก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการแบบลำต้น (stems) จากความคล้ายคลึงของผลึกและโลหะจากถังความร้อน (heat bath) โดยที่ SA มีตัวแปรเรียกว่า อุณหภูมิที่แทนลงในกระบวนการนี้หาวิธีการแก้ปัญหานั้นถูกความคมโดยการกำหนดทำให้เย็นลง กระบวนการนี้ยอมให้สถานะที่จะเคลื่อนย้ายสู่ที่อุณหภูมิสูงอย่างอิสระในทางกลับกันกระบวนการนี้จะกำหนดการเคลื่อนย้ายไปยังสถานะที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยกระบวนการนี้จะให้วิธีการแก้ปัญหานั้น

เข้าใกล้จุดเหมาะสมของคำตอบ แต่ค่อนข้างที่จะใช้เวลาในการแก้ปัญหาหาค่า Mori and Horiguchi (1993) ได้พัฒนาการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้วิธีเจเนติก (Genetic Algorithm) วิธีเจเนติก คือความคล้ายคลึงบางส่วนของพันธุกรรมตามธรรมชาติ โดยวิธีนี้จะจัดเตรียมชุดคำตอบที่คัดเลือกมาแล้ว เรียกว่า ประชากร (population) โดยกระบวนการค้นหาที่ราบรื่น การทำงานของวิธีเจเนติกใช้วิธี crossover และ mutation ลงในชุดของคำตอบที่เลือกมาแล้วเพื่อปรับปรุงคุณภาพ Mori and Usami (1996) เสนอวิธีทาบูเสิร์จ (Tabu Search) เพื่อแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยวิธีนี้จะใช้กระบวนการคิดแบบปีนเขา (hill-climbing method) โดยที่แต่ละรอบในการคำนวณคำตอบที่ได้มาจะถูกรับเข้าไปหาคำตอบที่ดีกว่าเพราะว่านำค่าที่เคยคำนวณได้แล้วมาปรับ คำตอบที่เคยคำนวณได้แล้วจากจุดเริ่มต้นของกระบวนการถูกพิจารณาไม่ว่าคำตอบที่ได้มาแล้วจะทำให้ฟังก์ชันของราคาดีขึ้นไปแล้วก็ตาม กระบวนการหาคำตอบนี้จะทำซ้ำไปจนกว่าฟังก์ชันของราคาไม่เปลี่ยนแปลง

## 2. ปัญหาโดยรวมของการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (THE OVERALL SCUC)

### 2.1. ปัญหาความมั่นคงของระบบ (The security subproblem) (Pinto *et al.*, 2006)

การวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบจะรวมถึงเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดทั้งเกิดเหตุการณ์ก่อนหน้าและเหตุการณ์กลับหลัง (pre- and post-contingency) วิธีแก้ปัญหาการส่งกำลังไฟฟ้า (power flow) ในกรณีปกติการส่งกำลังไฟฟ้าจะคำนึงถึงเงื่อนไขเพียงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากเครื่องผลิตไฟฟ้าในการแก้ปัญหาหลัก

แต่ละเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดที่เกิดหลังจะคำนึงถึงวิธีการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดโดยประกอบด้วยการรวมกันของอุปกรณ์และช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า หรือ ช่วงเวลาการเชื่อมต่ออีกครั้ง (load outages or reconnections) การตอบสนองของเครื่องผลิตไฟฟ้าจากการเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดจะทำให้ปัจจัยการมีส่วนร่วมของความสมดุลของกำลังไฟฟ้าจริง (MW) บางที่อาจจะนิยามในความหมายอื่นๆ

2.2. เงื่อนไขของความมั่นคง (Security constraints) (Pinto *et al.*, 2006) เงื่อนไขความมั่นคงของระบบขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้ คือ เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าจริง (MW-related) :

2.2.1. อันดับการส่งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของแต่ละบัส (Branch MW or MVA flow ratings)

2.2.2. ข้อจำกัดของการส่งกำลังไฟฟ้าจริงในแต่ละกลุ่มหรือพื้นที่ (Net MW interchange limits for zones or groups of zones)

2.2.3. ข้อจำกัดของการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในพื้นที่ซ้อนทับกันของระหว่างสองกลุ่ม (Interface (flow gate) MW flow limits)

2.2.4. ข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (MW control device limits (e.g. on phase shifts))

เกี่ยวข้องกับแรงดันหรือกำลังไฟฟ้าเสมือน (Voltage/MVAR-related) :

2.2.5. ข้อจำกัดของแรงดัน (Voltage limits)

2.2.6. ข้อจำกัดอุปกรณ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive control device limits (e.g. on generator MVARs, transformer taps))

2.3. วิธีแก้ปัญหการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (security constraints unit commitment, SCUC)

วิธีแก้ปัญหการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (security constraints unit commitment, SCUC) ส่วนใหญ่จะใช้วิธีลากรางจ์รีแลกซ์ชัน (Lagrangian relaxation) และ วิธีแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มรวมด้วย (Mixed-Integer programming)

วิธีลากรางจ์รีแลกซ์ชัน Zhang *et al.* (2006) โดยการจำลองกลุ่มตัวแปรเป็นสองเท่าในฟังก์ชันคู่ของลากรางจ์รีแลกซ์ชัน ที่แทนเงื่อนไขความมั่นคงโดยใช้เงื่อนไขสมมุติ (artificial constraint) ลงในฟังก์ชันคู่

Fu *et al.* (2005) ใช้แบบจำลองเครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal unit) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยคำนึงถึงเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generation Constraints) เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อม (System-wide constraints) และเงื่อนไขของระบบไฟฟ้ากำลัง (network security constraint) ซึ่งขั้นตอนโดยสรุปประกอบด้วยปัญหาหลัก (Master Problem) ที่ประยุกต์ใช้วิธีลากรางจ์รีแลกซ์ชัน (LR) และไดนามิกโปรแกรมมิง (DR) ในการแก้ปัญหความมั่นคงของระบบ ต่อมานำค่าที่ได้จากปัญหาหลักนำมาตรวจสอบเงื่อนไขของระบบไฟฟ้ากำลังในปัญหาย่อย

(Sub Problem) ที่ทำการตรวจสอบเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (AC Network Security Constraints) หากผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดจะประยุกต์ใช้หลักการของเบน-เดอส์ตีคอมโพสิชัน (Benders Decomposition) ในการที่จะทำให้ผลลัพธ์เป็นไปตามเงื่อนไข โดยใช้ฟังก์ชันเบนเดอส์คัท (Benders cut) เพิ่มเข้าไปในปัญหาหลักเพื่อคำนวณการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าในรอบการคำนวณต่อไปซึ่งการวนรอบนี้จะทำจนกระทั่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขทั้งในปัญหาหลักและปัญหาย่อย

วิธีเบนเดอส์ตีคอมโพสิชันสำหรับแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (Decomposition Strategy for SCUC)

หลักและวิธีการหาคำตอบของเทคนิคเบนเดอส์ตีคอมโพสิชัน คือ แยกปัญหาดั้งเดิม (Original Problem) ออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วย ปัญหาหลัก (Master Problem) และปัญหาย่อย (Subproblem) โดยอาศัยหลักการควบคู่ของโปรแกรมเชิงเส้น (Duality theorems linear programming) ซึ่งในรายงานนี้ปัญหาหลัก (Master Problem) จะเป็นปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยและเงื่อนไขสมการหรืออสมการ ส่วนปัญหาย่อย (Subproblem) จะประกอบด้วยโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งการหาคำตอบทั้งสองปัญหาดังกล่าวนี้จะใช้เทคนิคการเพิ่มลดอสมการข้อจำกัดด้วยวิธีเบนเดอส์คัท (Benders Cut) เป็นสมการเชื่อม

โดยกำหนดให้  $x$  แทนสถานะ ( $I$ ) และกำลังไฟฟ้าจริง ( $P$ ) ที่ได้จากปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า ส่วน  $y$  แทนค่าตัวแปรสถานะ (system state) และตัวแปรควบคุม (control variable)  $Q, \delta, V, T$  และ  $\gamma$  แทนสมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสมการเงื่อนไข เขียนสมการเบนเดอส์ตีคอมโพสิชันมาตรฐานได้ดังนี้

$$\text{Min } c^T x \quad (10)$$

$$\text{Subject to } Ax \geq b \quad (11)$$

$$Ex + Fy \geq h \quad (12)$$

จากหลักการของเบนเดอส์ตีคอมโพสิชันเขียนปัญหาหลักเริ่มต้นได้ดังนี้

$$\text{Min } c^T x$$

$$\text{Subject to } Ax \geq b \quad (13)$$

และปัญหาย่อย

$$\text{Min } w(\hat{x}) = 1^T s$$

$$\text{Subject to } Fy + s \geq h - Ex \quad \pi \quad (14)$$

เมื่อ 1 คือเวกเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 มีขนาดเท่ากับเมตริกซ์  $s$

$s$  คือตัวแปรส่วนขาด

$\pi$  คือตัวคูณของซิมเพล็กซ์ของเงื่อนไขสมการ

ถ้าระบบยังคงไม่สามารถหาค่าที่เป็นไปได้จึงประยุกต์ใช้ เบนเดอร์สคัท (Benders cut) ดังนี้

$$w(x) = w(\hat{x}) - \pi^T E(x - \hat{x}) \leq 0. \quad (15)$$

ในบทความนี้จะพิจารณาโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal unit) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งรวมการทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดและรวมถึงค่าใช้จ่ายในการเปิดและปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (startup and shutdown costs) ดังนี้

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} [F_{ci}(P_{it}) * I_{it} + SU_{it} + SD_{it}] \quad (16)$$

เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generation Constraints)

1.) กำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (System power balance)

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{it} * I_{it} = P_{D,t} + P_{L,t} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (17)$$

2.) ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ (System spinning and operating reserve requirements)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{NG} R_{S,it} * I_{it} &\geq R_{S,t} \\ \sum_{i=1}^{NG} R_{O,it} * I_{it} &\geq R_{O,t} \end{aligned} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (18)$$

3.) ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramping up/down limits)

$$\begin{aligned} P_{it} - P_{i(t-1)} &\leq [1 - I_{it}(1 - I_{i(t-1)})]UR_i + I_{it}(1 - I_{i(t-1)})P_{i,\min} \\ P_{i(t-1)} - P_{it} &\leq [1 - I_{i(t-1)}(1 - I_{it})]DR_i + I_{i(t-1)}(1 - I_{it})P_{i,\min} \end{aligned} \quad (t = 1, \dots, NG) \quad (19)$$

4.) ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิด/ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits)

$$\begin{aligned} [X_{i(t-1)}^{on} - T_i^{on}] * [I_{i(t-1)} - I_{it}] &\geq 0 \\ [X_{i(t-1)}^{off} - T_i^{off}] * [I_{it} - I_{i(t-1)}] &\geq 0 \end{aligned} \quad (t = 1, \dots, NG) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (20)$$

5.) ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (real and reactive power generation limits)

$$P_{i,\min} I_{it} \leq P_{it} \leq P_{i,\max} I_{it} \quad (t = 1, \dots, NG) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (21)$$

$$Q_{i,\min} I_{it} \leq Q_{it} \leq Q_{i,\max} I_{it} \quad (t = 1, \dots, NG) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (22)$$

เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อม (System-wide constraints)

6.) เงื่อนไขของเชื้อเพลิง (fuel constraints)

$$F_{FT}^{\min} \leq \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i \in FT} [F_{fi}(P_{it}) * I_{it} + SU_{f,it} + SD_{f,it}] \leq F_{FT}^{\max} \quad (23)$$

7.) ข้อจำกัดการปล่อยมลพิษ (emission limits)

$$\sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} [F_{ei}(P_{it}) * I_{it} + SU_{e,it} + SD_{e,it}] \leq E_S^{\max} \quad (24)$$

เงื่อนไขของระบบไฟฟ้ากำลัง (network security constraint )

8.) ข้อจำกัดสายส่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัส (transmission flow and bus voltage constraints)

$$-PL_{l,\max}^t \leq PL_l^t \leq PL_{l,\max}^t \quad (l = 1, \dots, NL) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (25)$$

$$V_{b,\min}^t \leq V_b^t \leq V_{b,\max}^t \quad (b = 1, \dots, NB) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (26)$$

9.) ข้อจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของอัตราการเปลี่ยนแปลงหม้อแปลงไฟฟ้าและข้อจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมหม้อแปลงไฟฟ้า (limits on tap changing and phase shifting transformer setting)

$$T_{\min} \leq T^t \leq T_{\max} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (27)$$

$$\gamma_{\min} \leq \gamma^t \leq \gamma_{\max} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (28)$$

เมื่อ	$b$	คือ ดัชนีบ่งบอกบัส (Index for bus)
	$DR_i$	คือ อัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงลดลงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ $i$ (Ramp-down rate limits of unit $i$ )
	$F_{ci}$	คือ ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ที่เวลา $t$ (Production cost function of unit $i$ at time $t$ )
	$i$	คือ ดัชนีบ่งบอกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Index for unit)
	$I_{it}$	คือ สถานการณ์ทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ที่เวลา $t$ (Commitment state of unit $i$ at time $t$ )
	$NG$	คือ จำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Number of units)
	$NT$	คือ จำนวนเวลาทั้งหมดที่พิจารณา (Number of periods under study)
	$P_{D,t}$	คือ ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบที่เวลา $t$ (System demand at time $t$ )
	$P_{L,t}$	คือ ความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าของระบบที่เวลา $t$ (System losses)

	at time $t$ )
$P_{it}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ที่เวลา $t$ (Generation of unit at time $t$ )
$P_{i,\min}$	คือ พิกัดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ (Lower limit of real power generation of unit $i$ )
$P_{i,\max}$	คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ (Upper limit of real power generation of unit $i$ )
$PL_{l,\max}$	คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริงของสายส่ง $l$ (Maximum capacity of line $l$ )
$PL_l$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สายส่ง $l$ (Real power of line $l$ )
$Q_{i,\min}$	คือ พิกัดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ (Lower limits of reactive power generation of unit $i$ )
$Q_{i,\max}$	คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ (Upper limits of reactive power generation of unit $i$ )
$R_{S,t}$	คือ ความต้องการไฟฟ้าสำรองของระบบที่เวลา $t$ (System spinning reserve requirement at time $t$ )
$R_{O,t}$	คือ System operating reserve requirement at time $t$ .
$R_{S,it}$	คือ ความต้องการไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ที่เวลา $t$ (Spinning reserve of unit $i$ at time $t$ )
$R_{O,it}$	คือ Operating reserve of unit $i$ at time $t$ .
$SD_{it}$	คือ ราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ที่เวลา $t$ (Shutdown cost of unit at time)
$SU_{it}$	คือ ราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ที่เวลา $t$ (Startup cost of unit at time)
$t$	คือ ดัชนีบ่งบอกช่วงเวลา มีหน่วยเป็น ชั่วโมง (Index of time)
$T_i^{off}$	คือ ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดของการปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ (Minimum down time of unit $i$ )
$T_i^{on}$	คือ ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดของการเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ (Minimum up time of unit $i$ )
$UR_i$	คือ อัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด

	ไฟฟ้าที่ $i$ (Ramp-up rate limit of unit $i$ )
$V_{b,\min}$	คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส $b$ (Minimum voltage magnitude at bus $b$ )
$V_{b,\max}$	คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส $b$ (Maximum voltage magnitude at bus $b$ )
$V_b$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $b$ (Voltage magnitude at bus $b$ )
$X_{it}^{off}$	คือ คือ เวลาค้นหาที่น้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ หยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อได้รับคำสั่งหยุดเดินเครื่องที่เวลา $t$ (OFF time of unit $i$ at time $t$ )
$X_{it}^{on}$	คือ เวลาค้นหาที่น้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $i$ ต้องทำงานเมื่อได้รับคำสั่งเดินเครื่องที่เวลา $t$ (ON time of unit $i$ at time $t$ )
$T_{\min}, T_{\max}$	คือ พิกัดต่ำสุดและสูงสุดของอัตราการเปลี่ยนแปลงหม้อแปลงไฟฟ้า (Lower and upper limit vector of transformer tap)
$\gamma_{\min}, \gamma_{\max}$	คือ พิกัดต่ำสุดและสูงสุดของอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมหม้อแปลงไฟฟ้า (Lower and upper limit vector of phase shifter tap)

นำเสนอการฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข 16 – 24 ยกเว้นสมการที่ 22 มาเขียนสมการลากรางจ์รีเล็กเซชันได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
L = & \sum_{t=1}^{NT} [F_{ci}(P_{it}) * I_{it} + SU_{it} + SD_{it}] - \sum_{t=1}^{NT} \hat{\lambda} * P_{it} * I_{it} - \sum_{t=1}^{NT} \hat{\mu}_{S,t} * R_{S,it} * I_{it} - \sum_{t=1}^{NT} \hat{\mu}_{O,t} * R_{O,it} * I_{it} \\
& + \hat{\eta}_{FT} \sum_{t=1}^{NT} [F_{fi}(P_{it}) * I_{it} + SU_{f,it} + SD_{f,it}] + \hat{\kappa} \sum_{t=1}^{NT} [F_{ei}(P_{it}) * I_{it} + SU_{e,it} + SD_{e,it}] \\
& + \sum_{t=1}^{NT} c * P_{it} * I_{it} * \left( P_{D,t} - \sum_{i=1}^{NG} P_{it}^k * I_{it}^k \right) + \sum_{t=1}^{NT} c * P_{D,t} * P_{it} * I_{it}^k - \sum_{t=1}^{NT} \frac{1}{2\mathcal{E}} * (P_{it} * I_{it} - P_{it}^k * I_{it}^k)^2 \\
& + \sum_n \sum_{t=1}^{NT} \hat{v}_t^n * \pi_t^n * P_{it} * I_{it}
\end{aligned} \tag{29}$$

ขั้นตอนการแก้ปัญหาค้นหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าง่ายที่ 2

ปัญหาย่อยที่ 1 ตรวจสอบการลู่เข้าของระบบกำลังไฟฟ้าที่ได้ผลลัพธ์มาจากการแก้ปัญหาค้นหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า คือ การตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบหรือไม่

$$\text{Min } w(\hat{I}, \hat{P}_g) = \sum_{b=1}^{NB} (MP_{b,1} + MP_{b,2}) + \sum_{b=1}^{NB} (MQ_{b,1} + MQ_{b,2}) \tag{30}$$

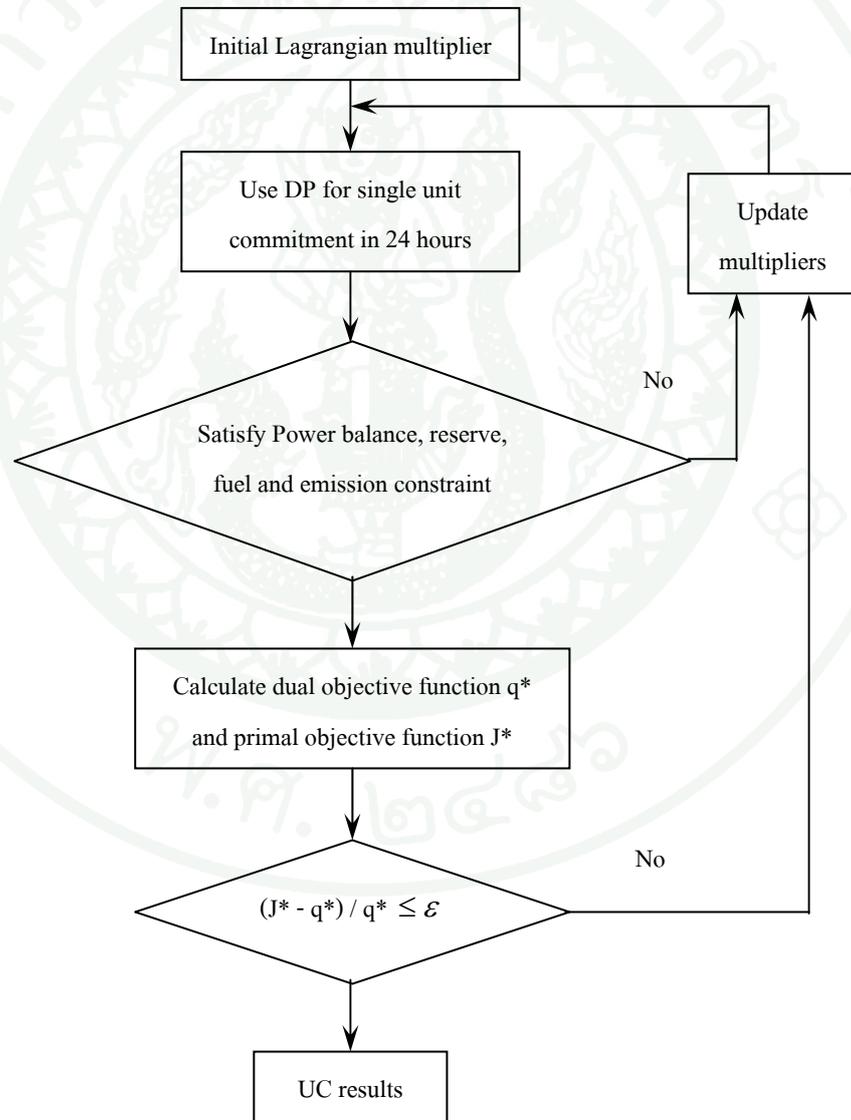
$$\begin{bmatrix} Y^* \Delta P \\ Y^* \Delta Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H & N & E & F \\ M & J & R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta T \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} MP_1 \\ MQ_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} MP_2 \\ MQ_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dP_0 \\ dQ_0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\Delta P = 0 \quad \pi \quad (32)$$

$$\Delta Q_{\min} \leq \Delta Q \leq \Delta Q_{\max} \quad \underline{\psi}, \bar{\psi} \quad (33)$$

$$T_{\min} - T_0 \leq \Delta T \leq T_{\max} - T_0 \quad (34)$$

$$\gamma_{\min} - \gamma_0 \leq \Delta \gamma \leq \gamma_{\max} - \gamma_0 \quad (35)$$



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (UC solution as master problem)

เมื่อทำการตรวจสอบเงื่อนไขจากหลายๆรอบของการไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วยังเกินกว่าค่าความเบี่ยงเบน ( $2\varepsilon$ ) ซึ่งทำให้รอบการคำนวณปัจจุบันไม่สามารถที่จะจ่ายโหลดรวมกันได้อย่างประหยัดได้ จึงประยุกต์ใช้ เบนเคอร์สคัท (Benders cut) ดังนี้

$$w(I, P_g) = \hat{w} + \sum_{i=1}^{NG} \pi_{it}^n (P_{it} I_{it} - \hat{P}_{it} \hat{I}_{it}) + \sum_{i=1}^{NG} \bar{\psi}_{it}^n Q_{i,\max} (I_{it} - \hat{I}_{it}) - \sum_{i=1}^{NG} \underline{\psi}_{it}^n Q_{i,\min} (I_{it} - \hat{I}_{it}) \leq 0 \quad (36)$$

ปัญหาย่อยที่ 2 เมื่อทำการตรวจสอบแล้วว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าถูห้เข้าหาคำตอบแล้ว ต่อมาตรวจสอบการส่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัสโดยเพิ่มตัวแปรส่วนขาดสำหรับสายส่งหรือแรงดันที่บัสที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข (violation)

$$\text{Min } w(\hat{I}, \hat{P}_g) = \sum_{l=1}^{NL} d_l (C_{l,1} + C_{l,2}) + \sum_{b=1}^{NB} e_b (C_{b,1} + C_{b,2}) \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} Y^* \Delta P \\ Y^* \Delta Q \\ \Delta PL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & E & F \\ M & J & R & S \\ A & B & C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta T \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$(\Delta PL_l - C_{l,1}) \leq PL_{l,\max} - PL_{l0} \quad (39)$$

$$-(\Delta PL_l - C_{l,2}) \leq PL_{l,\max} + PL_{l0} \quad (40)$$

$$-\infty \leq \Delta PL_l \leq +\infty \quad (41)$$

$$(\Delta V_b - C_{b,1}) \leq V_{b,\max} - V_{b0} \quad (42)$$

$$-(\Delta V_b - C_{b,2}) \leq -(V_{b,\min} - V_{b0}) \quad (43)$$

$$-\infty \leq \Delta V_b \leq +\infty \quad (44)$$

$$\Delta P = 0 \quad \pi \quad (45)$$

$$\Delta Q_{\min} \leq \Delta Q \leq \Delta Q_{\max} \quad \underline{\psi}, \bar{\psi} \quad (46)$$

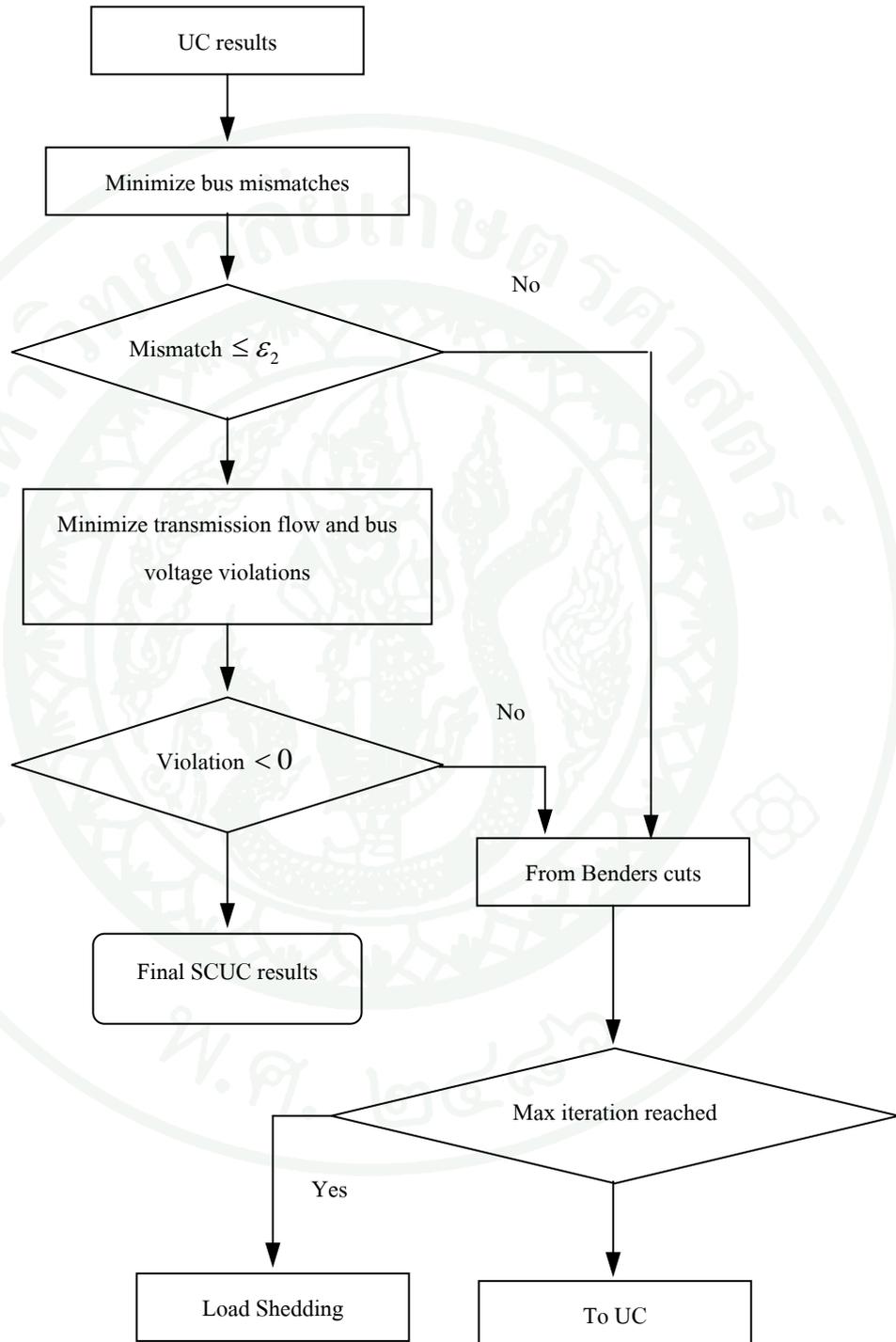
$$T_{\min} - T_0 \leq \Delta T \leq T_{\max} - T_0 \quad (47)$$

$$\gamma_{\min} - \gamma_0 \leq \Delta \gamma \leq \gamma_{\max} - \gamma_0 \quad (48)$$

เมื่อทำการตรวจสอบแล้วถ้าระบบยังคงไม่สามารถหาค่าที่เป็นไปได้ จึงประยุกต์ใช้ เบนเคอร์สคัท (Benders cut) ดังนี้

$$w(\hat{I}, \hat{P}_g) = \hat{w} + \sum_{i=1}^{NG} \pi_{it}^n (P_{it} I_{it} - \hat{P}_{it} \hat{I}_{it}) + \sum_{i=1}^{NG} \bar{\psi}_{it}^n Q_{i,\max} (I_{it} - \hat{I}_{it}) - \sum_{i=1}^{NG} \underline{\psi}_{it}^n Q_{i,\min} (I_{it} - \hat{I}_{it}) \leq 0 \quad (49)$$

โดยที่ค่า  $\hat{\pi}$  มาจากสมการที่ (37), ขั้นตอนการแก้ปัญหาทั้งสองดังภาพที่ 3



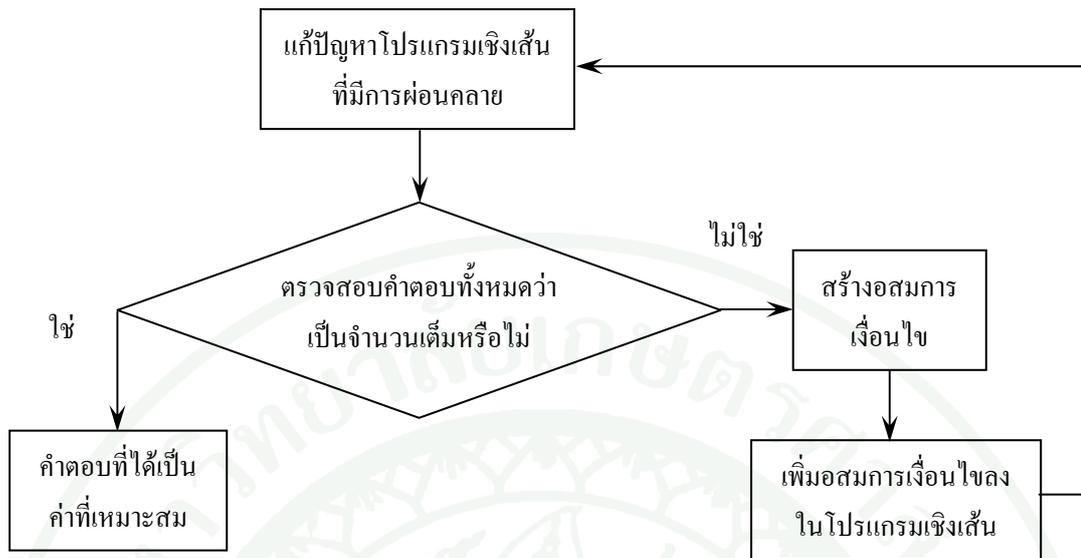
ภาพที่ 3 ขั้นตอนการแก้ปัญหาย่อย (AC network security check subproblem)

ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย (Mixed-Integer programming) Fu and Shahidehpour (2007) นำปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย (Mixed-Integer programming) แก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม คือ combustion turbines (CTs) และ steam turbine (ST) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และใช้หลักการของเบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน (Benders Decomposition) ตรวจสอบเงื่อนไขของระบบไฟฟ้ากำลังในปัญหาย่อย (Sub Problem) ที่ทำการตรวจสอบเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (DC Network Security Constraints) Hossein *et al.* (2008) โดยที่เปลี่ยนโมเดลเป็น เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบความร้อน และ เครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ ส่วนการตรวจสอบเงื่อนไขได้นำเงื่อนไขทั้งหมดมาคิดในปัญหาหลักโดยไม่แยกคิดในเงื่อนไขย่อย (sub problem)

วิธีการแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยในบทความนี้ใช้วิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบ (Branch and Cut) ร่วมกับ โปรแกรมเชิงเส้นที่มีการผ่อนคลาย (Linear programming relaxation) และแบ่งวิธีการเป็น 2 หลักใหญ่ คือ

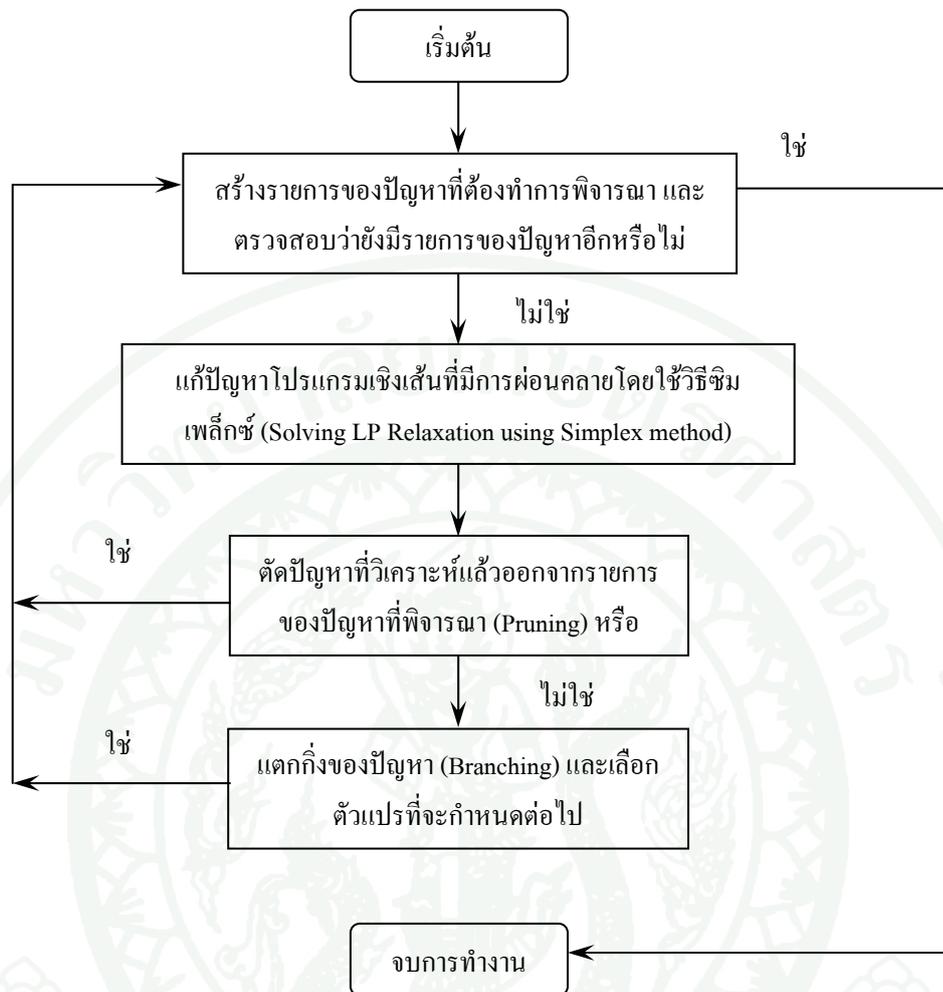
1.) ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยการตัดระนาบ (cutting plane algorithms) หลักการแก้ปัญหาคืออาศัยการแก้ปัญหาแบบโปรแกรมเชิงเส้นที่มีการผ่อนคลาย (Linear programming relaxation) เมื่อได้คำตอบออกมาแล้วตรวจสอบคำตอบที่ได้มาว่าเป็นคำตอบที่เป็นจำนวนเต็มทั้งหมดหรือไม่ ถ้ามีคำตอบที่ไม่เป็นจำนวนเต็มจะเพิ่มสมการเงื่อนไขลงในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่มีการผ่อนคลายในรอบ ปัจจุบันเพื่อบังคับให้คำตอบที่ได้ออกมาเป็นค่าที่เหมาะสม ขั้นตอนการแก้ปัญหาดังรูปภาพที่ 4

2.) วิธีการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch-and-Bound) เป็นอีกวิธีที่ใช้แก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย โดยหลักการของวิธีนี้จะแยกเซตคำตอบที่เป็นไปได้ออกเป็นกลุ่มย่อย (subset) เรียกว่าวิธีการแตกกิ่ง (branching) และนำเอาเซตคำตอบนั้นมาคำนวณกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เรียกการคำนวณแต่ละเซตคำตอบนี้ว่า จำกัดขอบเขต (bounding) จากนั้นพิจารณาคำตอบที่ได้จากโมเดลย่อยแล้วตัดคำตอบที่มีค่าน้อยกว่าเดิม (fathoming) หลังจากนั้นจะมีโมเดลย่อยเหลือเพียงหนึ่งในรอบต่อมาระยะใช้โมเดลย่อยนี้มาคำนวณต่อไป (relaxation) เมื่อทำการคำนวณต่อไปจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเดิม หรือ ให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปไม่ได้ (Sierksma, 2002) ขั้นตอนการแก้ปัญหาดังรูปภาพที่ 5



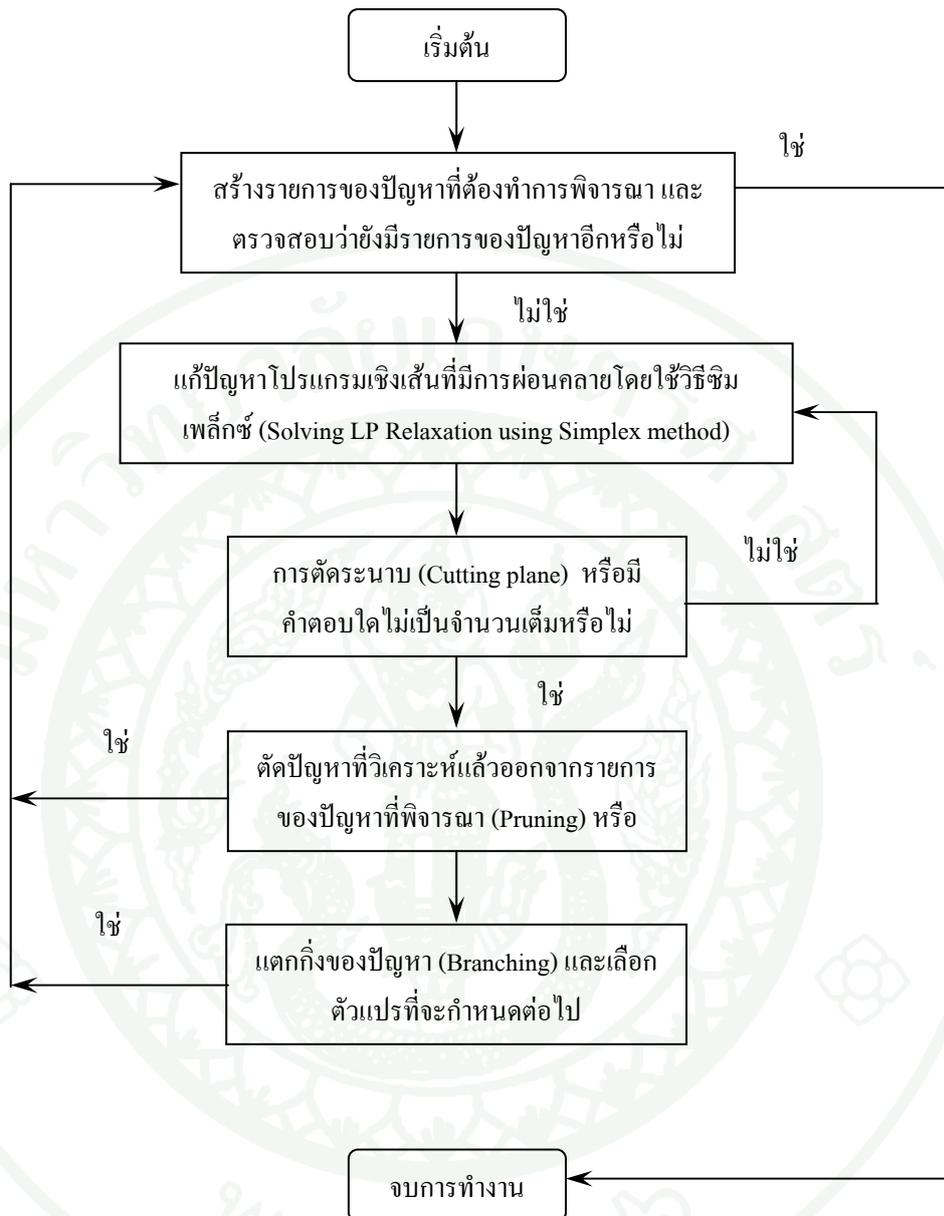
ภาพที่ 4 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการตัดระนาบ  
ที่มา : (Ceria, 2002)

3.) การแตกกิ่งและการตัดระนาบ (Branch-and-Cut) คือ การแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขตที่ภายในมีกระบวนการตัดระนาบตลอดทั้งกระบวนการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขตขั้นตอนการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการแตกกิ่งและการตัดระนาบแสดงให้เห็นในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch-and-Bound)

ที่มา : (Wlosey, 1998)



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการแตกกิ่งและการตัดระนาบ (Branch-and-cut)

ที่มา : (Wlosey, 1998)

Xin *et al.* (2006) ได้บรรยายถึงรายละเอียดและวิธีการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (security constraints coordinated economic dispatch, SCoED) โมเดลนี้จะใช้หลักการของ Stackelberg leader-follower problem โดยที่ขอบเขต

ด้านบนจะใช้หาตารางการผลิตในสภาวะปกติ ในขณะที่ขอบเขตด้านล่างใช้หาการจ่ายโหลดอย่าง  
ประหัยครวมถึงการเกิดเหตุการณ์ที่คาดไม่ถึง (N-1 contingency) ให้ระบบยังคงทำงานอยู่ได้ ในการ  
ทดสอบจะใช้ระบบ 6 บัสเพื่อเปรียบเทียบราคาระหว่าง SCED กับ SCoED



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับทำงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล 1 เครื่อง
2. ระบบปฏิบัติการ Window XP
3. โปรแกรม Microsoft Office
4. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ข้อมูลทางวิศวกรรม MATLAB 7.0
5. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ MATPOWER (Zimmerman *et al.*, 2007)

### วิธีการ

#### 1. สมการและเนื้อหาของปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

การแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ คือการคำนวณการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของโหลดที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาโดยที่ต้นทุนในการผลิตกำลังไฟฟ้ายรวมมีค่าต่ำและเหมาะสมกับแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการพิจารณาถึงการวางแผนสถานะ (เปิด/ปิด) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไข ระบบกำลังไฟฟ้าสมดุล (System power balance), ระบบความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง (System spinning and operating reserve requirements), ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramping up/down limits), ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิด/ปิด

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits) และ ข้อจำกัดของกำลังไฟฟ้าจริงของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (real power generation limits) ตลอดเวลาที่พิจารณา (ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง) ต่อมานำคำตอบที่ได้มาตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (AC Power Flow) เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สายส่งและเงื่อนไขพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (AC Network Security Constraints) อย่างไรก็ตามถ้าคำตอบที่ได้ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงตารางการผลิตเพื่อสอดคล้องกับให้เงื่อนไขและต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดและเหมาะสมที่สุดด้วย

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ประโยชน์ของหลักการเบนเดอร์สตีคอมโพสิชัน (Benders Decomposition) ที่แบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน คือ ปัญหาหลัก (UC) ที่มีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย แก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแตกกิ่งและตัดระนาบ (Branch-and-Cut) และปัญหาย่อยเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้า (AC Power Flow) เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สายส่งและเงื่อนไขพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (AC Network Security Constraints) อย่างไรก็ตามถ้าคำตอบที่ได้มาจากปัญหาหลักยังคงไม่เป็นไปตามเงื่อนไขปัญหาย่อยจะทำการสร้างสมการเงื่อนไขด้วยเทคนิคเบนเดอร์สคัท (Benders Cut) ลงในปัญหาหลักเพื่อทำการหาคำตอบของตารางการผลิตใหม่

## 2. สมการการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า คำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

การแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าในการจัดทำตารางการผลิตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาเพื่อหาค่าราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดและเหมาะสมกับระบบ ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal Unit) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) (Fu *et al.*, 2005)

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} [F_{ci}(P_{it}) + SU_{it}] * I_{it} \quad (50)$$

เมื่อ  $F_{ci}(P_{it}) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2$

เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generation Constraints)

- 1.) กำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (System power balance)

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{it} * I_{it} = P_{D,t} + P_{L,t} \quad (t=1, \dots, NT) \quad (51)$$

โดยที่ค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าของระบบเป็นค่าที่ประมาณขึ้นมาที่เวลา  $t$  ใดๆ

- 2.) ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ (System spinning and operating reserve

requirements)

$$\sum_{i=1}^{NG} R_{S,it} * I_{it} \geq R_{S,t} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (52)$$

3.) ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramping up/down limits)

$$\begin{aligned} P_{it} - P_{i(t-1)} &\leq [1 - I_{ii}(1 - I_{i(t-1)})]UR_i + [I_{ii}(1 - I_{i(t-1)})]UR_i \\ P_{i(t-1)} - P_{it} &\leq [1 - I_{ii}(1 - I_{ii})]DR_i \quad (i = 1, \dots, NG) \end{aligned} \quad (53)$$

4.) ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (minimum up/down time limits)

$$\begin{aligned} [X_{i(t-1)}^{on} - T_i^{on}] * [I_{i(t-1)} - I_{it}] &\geq 0 \\ [X_{i(t-1)}^{off} - T_i^{off}] * [I_{it} - I_{i(t-1)}] &\geq 0 \quad (i = 1, \dots, NG) \quad (t = 1, \dots, NT) \end{aligned} \quad (54)$$

5.) ข้อจำกัดของกำลังไฟฟ้าจริงของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (real power generation limits)

$$P_{i,\min} I_{it} \leq P_{it} \leq P_{i,\max} I_{it} \quad (i = 1, \dots, NG) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (55)$$

เงื่อนไขของระบบไฟฟ้ากำลัง (network security constraint )

6.) ข้อจำกัดของสายส่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัส (transmission flow and bus voltage constraints)

$$-PL_{l,\max}^t \leq PL_l^t \leq PL_{l,\max}^t \quad (l = 1, \dots, NL) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (56)$$

$$V_{b,\min}^t \leq V_b^t \leq V_{b,\max}^t \quad (b = 1, \dots, NB) \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (57)$$

อสมการเงื่อนไขของเบนเดอร์สคัท (Benders cut) เมื่อปัญหาย่อยไม่เป็นไปตามเงื่อนไข

เบนเดอร์สคัทของปัญหาย่อยที่ 1

$$w(I, P_g) = \hat{w} + \sum_{i=1}^{NG} \pi_{it}^n (P_{it} I_{it} - \hat{P}_{it} \hat{I}_{it}) \leq 0 \quad (58)$$

โดยที่ค่า  $\hat{w}$  มาจากสมการที่ (67)

เบนเดอร์สคัทของปัญหาย่อยที่ 2

$$w(\hat{I}, \hat{P}_g) = \hat{w} + \sum_{i=1}^{NG} \pi_{it}^n (P_{it} I_{it} - \hat{P}_{it} \hat{I}_{it}) \leq 0 \quad (59)$$

โดยที่ค่า  $\hat{w}$  มาจากสมการที่ (70)

### 3. การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

3.1. ปัญหาหลักของปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (Master Problem of SCUC)

ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (UC) โดยทั่วไปแล้วสมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นปัญหาที่มีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการเปลี่ยนแปลงสมการค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้น โดยทำการประมาณค่าด้วยวิธีส่วน (piecewise approximation) และแก้ปัญหาด้วยวิธีการแตกกิ่งและตัดระนาบ (Branch-and-Cut) เพื่อให้ค่าคำตอบมีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขต่างๆ ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังภาพที่ 7

สมการแปลงราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $F_{ci}$ ) ที่เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้นโดยใช้การประมาณค่าแบบวิธีส่วน (piecewise approximation) โดยมีสมการดังนี้ (Carrión and Arroyo, 2006)

$$C_{ik} = \frac{F_{cik} - F_{ci(k-1)}}{T_{ik} - T_{i(k-1)}} \quad (60)$$

จะได้สมการราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $F_{ci}$ ) โดยประมาณเป็นสมการที่เป็นเชิงเส้นดังนี้

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{NG} F_{ci}(P_{it}) = \sum_{i=1}^{NG} (A_i + \sum_{k=1}^{NK_i} C_{ki} \delta_{kit}) I_{it} \quad (61)$$

และมีสมการเงื่อนไขดังนี้

$$\text{subject to} \quad \sum_{i=1}^{NG} (\sum_{k=1}^{NK_i} \delta_{kit} * I_{it}) + P_{i,\min} * I_{it} = P_{D,t} \quad (62)$$

$$\delta_{1it} \leq T_{1i} - P_{i,\min} \quad (63)$$

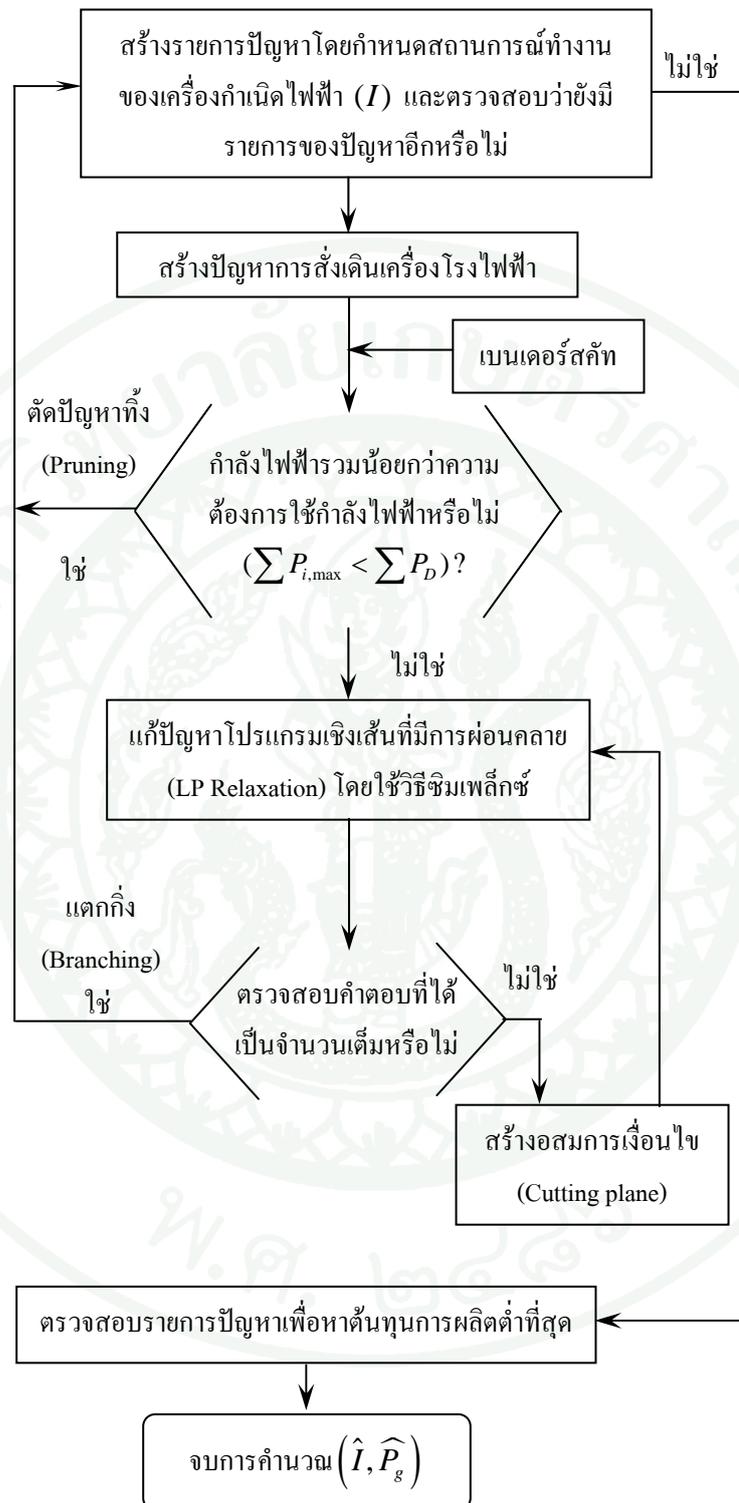
$$\delta_{kit} \leq T_{ki} - T_{k-1} \quad (64)$$

$$\delta_{NK_i} \leq P_{i,\max} - T_{NK_i-1} \quad (65)$$

$$\delta_{kit} \geq 0 \quad (66)$$

เมื่อ 
$$\sum_{i=1}^{NG} P_{it} = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{k=1}^{NK_i} \delta_{kit} + \sum_{i=1}^{NG} P_{i,\min} * I_{it}$$

$$A_i = \alpha_i + \beta_i P_{i,\min} + \gamma_i P_{i,\min}^2$$



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการคำนวณปัญหาหลัก

### 3.2 ตัวอย่างปัญหาหลักของการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

ปัญหาหลักของการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยสามารถอธิบายได้โดยใช้ตัวอย่างการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าอย่างง่ายเป็นตัวอย่างประกอบคำอธิบายซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าของระบบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่องโดยมีข้อมูลดังต่อไปนี้ (Carrión and Arroyo, 2006; Fu *et al.*, 2005)

ตารางที่ 1 ตารางราคาต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง

Unit	Unit Cost Coefficients			Pmax (MW)	Pmin (MW)	Min Up time	Min Down time	Start up cost (\$)
	a	b	c					
1	1000.00	16.19	0.0005	200	90	4	4	1500
2	680.00	16.50	0.0021	100	10	2	2	2000
3	1200.00	25.92	0.0041	100	10	2	2	3000

กำหนดให้ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบ มีค่าเท่ากับ 255 MW จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ทั้งหมดเขียนให้อยู่ในรูปของโปรแกรมเชิงเส้นเป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 F_{c1}(P_{1t}) &= 16.2831\delta_{11t} + 16.2966\delta_{21t} + 16.3100\delta_{31t} + 16.3234\delta_{41t} \\
 &+ 16.3369\delta_{51t} + 16.3503\delta_{61t} + 16.3638\delta_{71t} + 16.3772\delta_{81t} + 16.3926\delta_{91t} \\
 F_{c2}(P_{2t}) &= 16.5633\delta_{12t} + 16.6055\delta_{22t} + 16.6477\delta_{32t} + 16.6899\delta_{42t} \\
 &+ 16.7321\delta_{52t} + 16.7743\delta_{62t} + 16.8165\delta_{72t} + 16.8587\delta_{82t} + 16.9009\delta_{92t} \\
 F_{c3}(P_{3t}) &= 25.0439\delta_{13t} + 26.1265\delta_{23t} + 26.2091\delta_{33t} + 26.2917\delta_{43t} \\
 &+ 26.3743\delta_{53t} + 26.4569\delta_{63t} + 26.5395\delta_{73t} + 26.6221\delta_{83t} + 26.7047\delta_{93t}
 \end{aligned}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขของสมการการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า

$$\text{Min } z = F_{c1}(P_{1t}) + F_{c2}(P_{2t}) + F_{c2}(P_{2t})$$

$$\text{subject to } P_{1t} + P_{2t} + P_{3t} = 255$$

เขียนฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขของสมการการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าในรูปแบบของโปรแกรมเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
Min = & \{[(1000 + 16.19\underline{P}_1 + 0.00048\underline{P}_1^2) + (16.2831\delta_{11t} + 16.2966\delta_{21t} + 16.3100\delta_{31t} \\
& + 16.3234\delta_{41t} + 16.3369\delta_{51t} + 16.3503\delta_{61t} + 16.3638\delta_{71t} + 16.3772\delta_{81t} + 16.3926\delta_{91t})] * I_{1t} \\
& + [(680 + 16.50\underline{P}_2 + 0.00211\underline{P}_2^2) + (16.5633\delta_{12t} + 16.6055\delta_{22t} + 16.6477\delta_{32t} \\
& + 16.6899\delta_{42t} + 16.7321\delta_{52t} + 16.7743\delta_{62t} + 16.8165\delta_{72t} + 16.8587\delta_{82t} + 16.9009\delta_{92t})] * I_{2t} \\
& + [(1200 + 25.92\underline{P}_3 + 0.00413\underline{P}_3^2) + (25.0439\delta_{13t} + 26.1265\delta_{23t} + 26.2091\delta_{33t} \\
& + 26.2917\delta_{43t} + 26.3743\delta_{53t} + 26.4569\delta_{63t} + 26.5395\delta_{73t} + 26.6221\delta_{83t} + 26.7047\delta_{93t})] * I_{3t} \}
\end{aligned}$$

subject to

$$\begin{aligned}
& \{[\delta_{11t} + \delta_{21t} + \delta_{31t} + \delta_{41t} + \delta_{51t} + \delta_{61t} + \delta_{71t} + \delta_{81t} + \delta_{91t}] + \underline{P}_1\} * I_{1t} + \\
& \{[\delta_{12t} + \delta_{22t} + \delta_{32t} + \delta_{42t} + \delta_{52t} + \delta_{62t} + \delta_{72t} + \delta_{82t} + \delta_{92t}] + \underline{P}_2\} * I_{2t} + \\
& \{[\delta_{13t} + \delta_{23t} + \delta_{33t} + \delta_{43t} + \delta_{53t} + \delta_{63t} + \delta_{73t} + \delta_{83t} + \delta_{93t}] + \underline{P}_3\} * I_{3t} = 255 \\
& \delta_{11t} \leq 14, \delta_{21t} \leq 14, \delta_{31t} \leq 14, \delta_{41t} \leq 14, \delta_{51t} \leq 14, \delta_{61t} \leq 14, \delta_{71t} \leq 14, \delta_{81t} \leq 14, \delta_{91t} \leq 18 \\
& \delta_{12t} \leq 10, \delta_{22t} \leq 10, \delta_{32t} \leq 10, \delta_{42t} \leq 10, \delta_{52t} \leq 10, \delta_{62t} \leq 10, \delta_{72t} \leq 10, \delta_{82t} \leq 10, \delta_{92t} \leq 10 \\
& \delta_{13t} \leq 10, \delta_{23t} \leq 10, \delta_{33t} \leq 10, \delta_{43t} \leq 10, \delta_{53t} \leq 10, \delta_{63t} \leq 10, \delta_{73t} \leq 10, \delta_{83t} \leq 10, \delta_{93t} \leq 10 \\
& \delta_{11t}, \delta_{21t}, \delta_{31t}, \delta_{41t}, \delta_{51t}, \delta_{61t}, \delta_{71t}, \delta_{81t}, \delta_{91t} \geq 0 \\
& \delta_{12t}, \delta_{22t}, \delta_{32t}, \delta_{42t}, \delta_{52t}, \delta_{62t}, \delta_{72t}, \delta_{82t}, \delta_{92t} \geq 0 \\
& \delta_{13t}, \delta_{23t}, \delta_{33t}, \delta_{43t}, \delta_{53t}, \delta_{63t}, \delta_{73t}, \delta_{83t}, \delta_{93t} \geq 0
\end{aligned}$$

กำหนดให้สถานะเริ่มต้นเป็น  $[I_1, I_2, I_3] = [1, 1, 1]$  ต่อมาใช้วิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าจะได้ผลดังภาพที่ 8

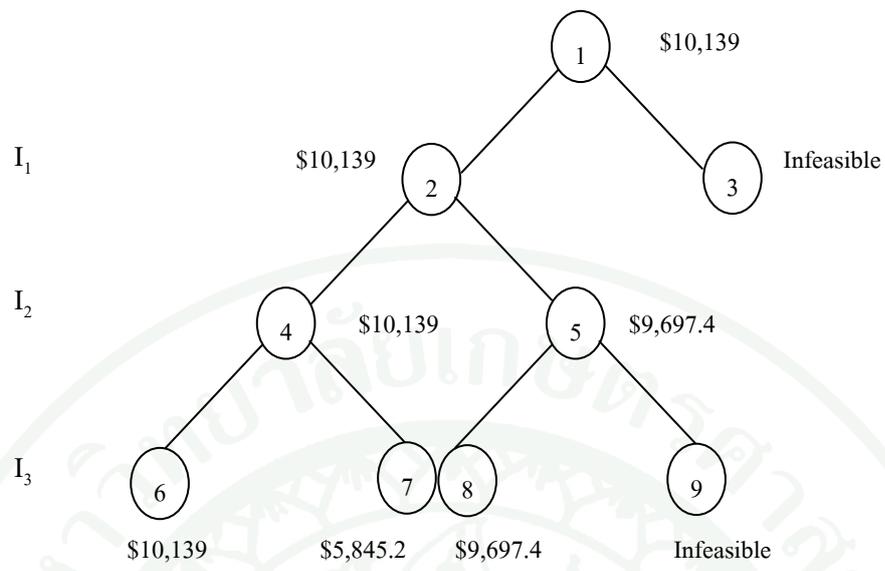
ในการคำนวณวิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าจะแสดงตัวอย่างการคำนวณ โหนดที่ 7 ดังนี้ ที่ โหนดที่ 7 สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ  $[1, 1, 0]$  จะได้สมการสมการการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า

การคำนวณ โหนดที่ 7 สามารถแสดงเป็นขั้นตอนได้ดังนี้  
ขั้นตอนที่ 1 สร้างสมการการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
Min = & [(1000 + 16.19\underline{P}_1 + 0.00048\underline{P}_1^2) + (16.2831\delta_{11t} + 16.2966\delta_{21t} + 16.3100\delta_{31t} \\
& + 16.3234\delta_{41t} + 16.3369\delta_{51t} + 16.3503\delta_{61t} + 16.3638\delta_{71t} + 16.3772\delta_{81t} + 16.3926\delta_{91t}) \\
& + (680 + 16.50\underline{P}_2 + 0.00211\underline{P}_2^2) + (16.5633\delta_{12t} + 16.6055\delta_{22t} + 16.6477\delta_{32t} \\
& + 16.6899\delta_{42t} + 16.7321\delta_{52t} + 16.7743\delta_{62t} + 16.8165\delta_{72t} + 16.8587\delta_{82t} + 16.9009\delta_{92t})
\end{aligned}$$

subject to

$$\begin{aligned}
& \{[\delta_{11t} + \delta_{21t} + \delta_{31t} + \delta_{41t} + \delta_{51t} + \delta_{61t} + \delta_{71t} + \delta_{81t} + \delta_{91t}] + \underline{P}_1\} + \\
& \{[\delta_{12t} + \delta_{22t} + \delta_{32t} + \delta_{42t} + \delta_{52t} + \delta_{62t} + \delta_{72t} + \delta_{82t} + \delta_{92t}] + \underline{P}_2\} = 255
\end{aligned}$$



ภาพที่ 8 การแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยวิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละโหนดของภาพที่ 8

ค่าที่ได้	โหนด (Node)							
	1	2	4	5	6	7	8	
P <sub>1</sub> (MW)	220	220	220	220	220	220	220	
P <sub>2</sub> (MW)	25	25	25	0	25	35	0	
P <sub>3</sub> (MW)	10	10	10	35	10	0	35	

$$\delta_{11t} \leq 14, \delta_{21t} \leq 14, \delta_{31t} \leq 14, \delta_{41t} \leq 14, \delta_{51t} \leq 14, \delta_{61t} \leq 14, \delta_{71t} \leq 14, \delta_{81t} \leq 14, \delta_{91t} \leq 18$$

$$\delta_{12t} \leq 10, \delta_{22t} \leq 10, \delta_{32t} \leq 10, \delta_{42t} \leq 10, \delta_{52t} \leq 10, \delta_{62t} \leq 10, \delta_{72t} \leq 10, \delta_{82t} \leq 10, \delta_{92t} \leq 10$$

$$\delta_{11t}, \delta_{21t}, \delta_{31t}, \delta_{41t}, \delta_{51t}, \delta_{61t}, \delta_{71t}, \delta_{81t}, \delta_{91t} \geq 0$$

$$\delta_{12t}, \delta_{22t}, \delta_{32t}, \delta_{42t}, \delta_{52t}, \delta_{62t}, \delta_{72t}, \delta_{82t}, \delta_{92t} \geq 0$$

ขั้นตอนที่ 2 แก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่มีการผ่อนคลายโดยใช้วิธีซิมเพล็กซ์

$$\delta_{11t}, \delta_{21t}, \delta_{31t}, \delta_{41t}, \delta_{51t}, \delta_{61t}, \delta_{71t}, \delta_{81t} = 14 \text{ และ } \delta_{91t} = 18$$

$$\delta_{12t}, \delta_{22t} = 10, \delta_{32t} = 5 \text{ และ } \delta_{42t}, \delta_{52t}, \delta_{62t}, \delta_{72t}, \delta_{82t}, \delta_{92t} = 0$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบคำตอบใดไม่เป็นจำนวนเต็มหรือไม่ ถ้ามีทำการสร้างเงื่อนไขของสมการการตัดระนาบ (Cutting plane) แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ 2 แต่คำตอบที่ได้เป็นจำนวนเต็มทั้งหมดแทนค่าคำตอบลงในสมการวัตถุประสงค์และเงื่อนไขจะได้ ราคาค่าต้นทุนของการผลิต = \$5,845.2 และ  $P_1 = 220$  MW,  $P_2 = 35$  MW

จากตารางสรุปได้ว่าการจ่ายกำลังไฟฟ้า 255 MW ให้กับระบบด้วยราคาค่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดทำได้โดยกำหนดสถานะเปิดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 3 มีสถานะปิด และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 220 MW และ 35 MW ตามลำดับ โดยมีต้นทุนการผลิตที่ \$5,845.2 ซึ่งในการผลิตนี้จะพิจารณาเฉพาะราคาค่าเชื้อเพลิงในการผลิต

3.3. ปัญหาย่อยของปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (Subproblem of SCUC)

หลังจากแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้านั้นจะได้ค่าสถานะและค่ากำลังไฟฟ้าจริงของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อมานำค่าที่ได้มาทดสอบดูว่ามีความมั่นคงในระบบหรือไม่ โดยจะแบ่งปัญหาย่อยออกเป็น 2 ปัญหาย่อย ปัญหาย่อยที่ 1 จะทดสอบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้ามีการลู่เข้าสู่คำตอบหรือไม่ และปัญหาย่อยที่ 2 ทดสอบว่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นมีค่าเท่าใด และแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าพิกัดหรือไม่

3.3.1. ปัญหาย่อยที่ 1 ตรวจสอบการลู่เข้าหาคำตอบของการไหลของกำลังไฟฟ้า

ก่อนที่จะทำการทดสอบเงื่อนไขความมั่นคง ต้องตรวจสอบก่อนว่าคำตอบที่ได้มาจากการแก้ปัญหาสมการหลักว่าการไหลของกำลังไฟฟ้ามีการลู่เข้าสู่คำตอบ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการของ นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ทดสอบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้ามีการลู่เข้าหาคำตอบ ต่อมกำหนดสมการวัตถุประสงค์ (67) ในสมการนี้ประกอบด้วยตัวแปรส่วนขาด (Slack variable) ที่เป็นบวกโดยตัวแปรส่วนขาด  $MP_{b,1}$  และ  $MP_{b,2}$  สำหรับค่าต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงเฉพาะเจาะจงกับค่าที่คำนวณได้ (real power mismatch) ที่บัสใดๆ และ ตัวแปรส่วนขาด  $MQ_{b,1}$  และ  $MQ_{b,2}$  สำหรับค่าต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนเฉพาะเจาะจงกับค่าที่คำนวณ

ได้ (reactive power mismatch) ที่บัสใด ๆ โดยค่าของตัวแปรส่วนขนาดจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เมื่อการไหลของกำลังไฟฟ้าไม่ลู่เข้าหาคำตอบ (Fu *et al.*,2005)

$$\text{Min } w(\hat{I}, \hat{P}_g) = \sum_{b=1}^{NB} (MP_{b,1} + MP_{b,2}) + \sum_{b=1}^{NB} (MQ_{b,1} + MQ_{b,2}) \quad (67)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 * \Delta P \\ Y_2 * \Delta Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H & N \\ M & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} MP_1 \\ MQ_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} MP_2 \\ MQ_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dP_0 \\ dQ_0 \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$\Delta P = 0 \quad \pi \quad (69)$$

เมื่อทำการตรวจสอบปัญหาย่อยที่ 1 คำตอบที่ได้จากปัญหาหลัก  $(\hat{I}, \hat{P}_g)$  ทำให้ระบบไม่ลู่เข้าหาคำตอบทำการสร้างสมการเงื่อนไขด้วยเทคนิคเบนเดอร์สคัท (Benders Cut) ดังสมการที่ (58) แล้วเพิ่มเป็นเงื่อนไขลงในปัญหาหลักเพื่อทำการหาคำตอบของตารางการผลิตใหม่ ขั้นตอนในการคำนวณปัญหาย่อยที่ 1 แสดงไว้ใน ภาพที่ 9

3.3.2. ปัญหาย่อยที่ 2 เมื่อทำการทำสอบแล้วว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าลู่เข้าหาคำตอบแล้วต่อมาตรวจสอบการส่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัสโดยเพิ่มตัวแปรส่วนขนาดสำหรับสายส่ง  $(C_{l,1}, C_{l,2})$  หรือแรงดันที่บัส  $(C_{b,1}, C_{b,2})$  ที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข (violation) (Fu *et al.*,2005)

$$\text{Min } w(\hat{I}, \hat{P}_g) = \sum_{l=1}^{NL} d_l (C_{l,1} + C_{l,2}) + \sum_{b=1}^{NB} e_b (C_{b,1} + C_{b,2}) \quad (70)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 * \Delta P \\ Y_2 * \Delta Q \\ \Delta PL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & J \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (71)$$

$$(\Delta PL_l - C_{l,1}) \leq PL_{l,\max} - PL_{l0} \quad (72)$$

$$-(\Delta PL_l - C_{l,2}) \leq PL_{l,\max} + PL_{l0} \quad (73)$$

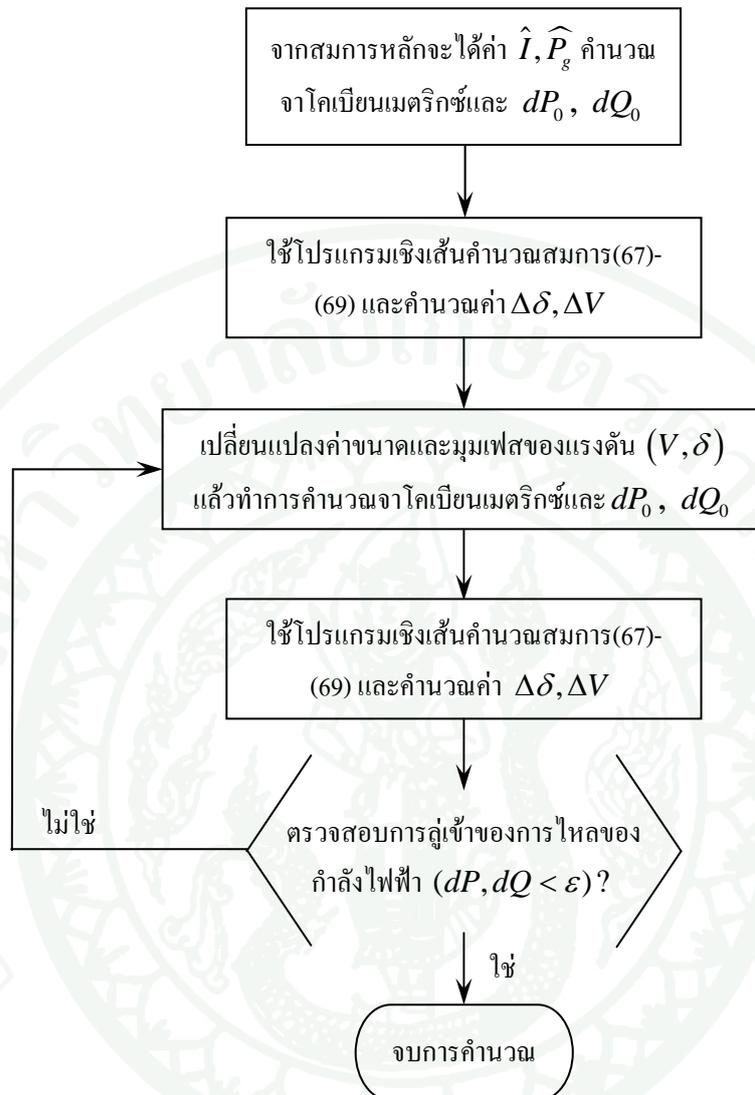
$$-\infty \leq \Delta PL_l \leq +\infty \quad (74)$$

$$(\Delta V_b - C_{b,1}) \leq V_{b,\max} - V_{b0} \quad (75)$$

$$-(\Delta V_b - C_{b,2}) \leq -(V_{b,\min} - V_{b0}) \quad (76)$$

$$-\infty \leq \Delta V_b \leq +\infty \quad (77)$$

$$\Delta P = 0 \quad \pi \quad (78)$$



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการแก้ปัญหาข้อที่ 1 ตรวจสอบการลู่เข้าหาคำตอบของการไหลของกำลังไฟฟ้า

ขั้นตอนการแก้ปัญหาใช้ขั้นตอนเดียวกันกับขั้นตอนการแก้ปัญหาข้อที่ 1 เมื่อได้คำตอบที่ได้ลู่เข้าหาคำตอบต่อมาทำการตรวจสอบแล้วระบบยังคงไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสายส่งและแรงดันที่บัส ทำการสร้างสมการเงื่อนไขด้วยเทคนิคเบนเดอร์สคัท (Benders Cut) ตั้งสมการที่ (59) แล้วเพิ่มเป็นเงื่อนไขลงในปัญหาหลักเพื่อทำการหาคำตอบของตารางการผลิตใหม่

3.4. ตัวอย่างปัญหาย่อยของปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (Fu *et al.*,2005)

ตารางที่ 3 ตารางแสดงข้อมูลสายส่งของระบบ 6 บัส

Branch No.	From bus	To bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Rating (MW)
1	1	2	0.0050	0.170	200
2	1	4	0.0030	0.258	100
3	2	4	0.0070	0.197	100
4	2	3	0.0370	-	150
5	4	5	0.0370	-	150
6	5	6	0.0020	0.140	100
7	6	6	0.0005	0.018	100

ตารางที่ 4 ตารางแสดงข้อมูลบัสของระบบ 6 บัส

Bus No.	Voltage-Max (p.u.)	Voltage-Min (p.u.)
1	1.05	0.95
2	1.15	0.85
3	1.15	0.85
4	1.05	0.90
5	1.15	0.85
6	1.15	0.85

จากตัวอย่างที่ 1 จะได้ค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้า 255 MW ให้กับระบบด้วยราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดทำได้โดยกำหนดสถานะเปิดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 3 มีสถานะปิด และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 220 MW และ 35 MW ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้ามาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะได้ว่าค่าที่ได้ผู้เข้าใน 4 รอบของการคำนวณแต่ระบบยังคงไม่เข้าไปตามเงื่อนไขของสายส่งโดยสายส่งที่ 2 คือสายส่งระหว่างบัส 1 กับ 4 มีกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหล

ในสาย 1,011 MW ซึ่งเกินค่าพิกัดของสายส่ง จากสมการที่ 3.8 ถึง 3.16 จะได้ตัวคูณ (multipliers) คือ  $\pi = [-0.9457 \quad -1.0380 \quad -1.5585 \quad -1.4530 \quad -1.0841 \quad 0.0081 \quad 0.1074 \quad 0.0881 \quad 0.0155]^T$  และค่า  $\hat{w} = 1.1024$  MW จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างอสมการเบนเคอร์สตัดและไปคำนวณปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า เขียนฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขของสมการการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าในรูปแบบของโปรแกรมเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Min} = & \{[(1000 + 16.19\underline{P}_1 + 0.00048\underline{P}_1^2) + (16.2831\delta_{11t} + 16.2966\delta_{21t} + 16.3100\delta_{31t} \\ & + 16.3234\delta_{41t} + 16.3369\delta_{51t} + 16.3503\delta_{61t} + 16.3638\delta_{71t} + 16.3772\delta_{81t} + 16.3926\delta_{91t})] * I_{1t} \\ & + [(680 + 16.50\underline{P}_2 + 0.00211\underline{P}_2^2) + (16.5633\delta_{12t} + 16.6055\delta_{22t} + 16.6477\delta_{32t} \\ & + 16.6899\delta_{42t} + 16.7321\delta_{52t} + 16.7743\delta_{62t} + 16.8165\delta_{72t} + 16.8587\delta_{82t} + 16.9009\delta_{92t})] * I_{2t} \\ & + [(1200 + 25.92\underline{P}_3 + 0.00413\underline{P}_3^2) + (25.0439\delta_{13t} + 26.1265\delta_{23t} + 26.2091\delta_{33t} \\ & + 26.2917\delta_{43t} + 26.3743\delta_{53t} + 26.4569\delta_{63t} + 26.5395\delta_{73t} + 26.6221\delta_{83t} + 26.7047\delta_{93t})] * I_{3t} \} \end{aligned}$$

subject to

$$\begin{aligned} & \{[\delta_{11t} + \delta_{21t} + \delta_{31t} + \delta_{41t} + \delta_{51t} + \delta_{61t} + \delta_{71t} + \delta_{81t} + \delta_{91t}] + \underline{P}_1\} * I_{1t} + \\ & \{[\delta_{12t} + \delta_{22t} + \delta_{32t} + \delta_{42t} + \delta_{52t} + \delta_{62t} + \delta_{72t} + \delta_{82t} + \delta_{92t}] + \underline{P}_2\} * I_{2t} + \\ & \{[\delta_{13t} + \delta_{23t} + \delta_{33t} + \delta_{43t} + \delta_{53t} + \delta_{63t} + \delta_{73t} + \delta_{83t} + \delta_{93t}] + \underline{P}_3\} * I_{3t} = 255 \end{aligned}$$

$$\delta_{11t} \leq 14, \delta_{21t} \leq 14, \delta_{31t} \leq 14, \delta_{41t} \leq 14, \delta_{51t} \leq 14, \delta_{61t} \leq 14, \delta_{71t} \leq 14, \delta_{81t} \leq 14, \delta_{91t} \leq 18$$

$$\delta_{12t} \leq 10, \delta_{22t} \leq 10, \delta_{32t} \leq 10, \delta_{42t} \leq 10, \delta_{52t} \leq 10, \delta_{62t} \leq 10, \delta_{72t} \leq 10, \delta_{82t} \leq 10, \delta_{92t} \leq 10$$

$$\delta_{13t} \leq 10, \delta_{23t} \leq 10, \delta_{33t} \leq 10, \delta_{43t} \leq 10, \delta_{53t} \leq 10, \delta_{63t} \leq 10, \delta_{73t} \leq 10, \delta_{83t} \leq 10, \delta_{93t} \leq 10$$

$$\delta_{11t}, \delta_{21t}, \delta_{31t}, \delta_{41t}, \delta_{51t}, \delta_{61t}, \delta_{71t}, \delta_{81t}, \delta_{91t} \geq 0$$

$$\delta_{12t}, \delta_{22t}, \delta_{32t}, \delta_{42t}, \delta_{52t}, \delta_{62t}, \delta_{72t}, \delta_{82t}, \delta_{92t} \geq 0$$

$$\delta_{13t}, \delta_{23t}, \delta_{33t}, \delta_{43t}, \delta_{53t}, \delta_{63t}, \delta_{73t}, \delta_{83t}, \delta_{93t} \geq 0$$

เขียนอสมการเบนเคอร์สตัดได้ดังนี้  $\pi^T E = [-0.9457 \quad -1.0841]^T$  (Marginal increment/decrement)

$$1.1024 + [-0.9457(P_2 - 35)I_{2t} + -1.0841(P_3 - 0)I_{3t}] \leq 0$$

$$1.1024 + [-0.9457(\delta_{12t} + \delta_{22t} + \delta_{32t} + \delta_{42t} + \delta_{52t} + \delta_{62t} + \delta_{72t} + \delta_{82t} + \delta_{92t} - 35)I_{2t} +$$

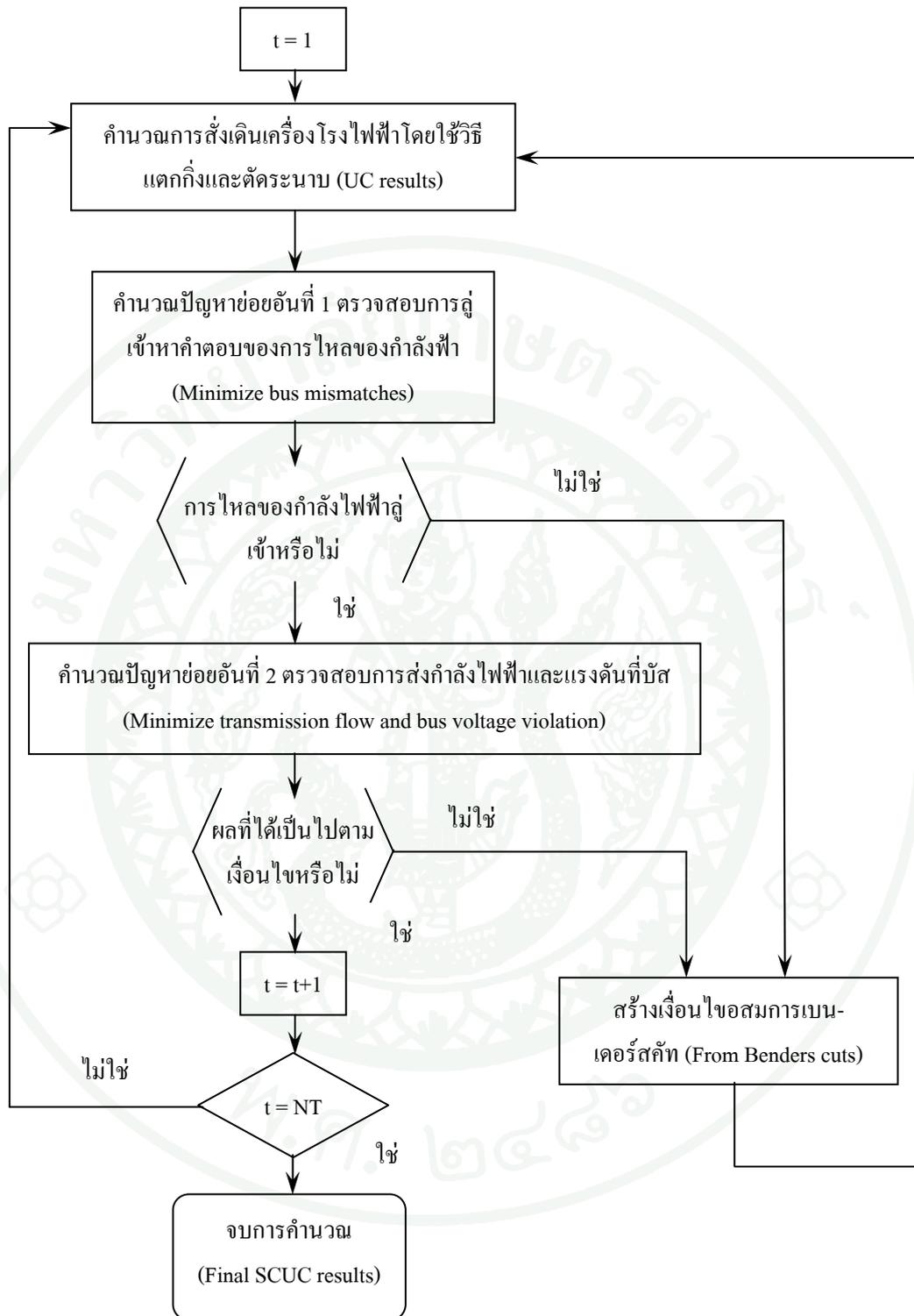
$$-1.0841(\delta_{13t} + \delta_{23t} + \delta_{33t} + \delta_{43t} + \delta_{53t} + \delta_{63t} + \delta_{73t} + \delta_{83t} + \delta_{93t} - 0)I_{3t}] \leq 0$$

จากการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าจะได้ว่าสถานะเปิดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 3 มีสถานะปิด และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 208 MW และ 47 MW ตามลำดับต่อมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

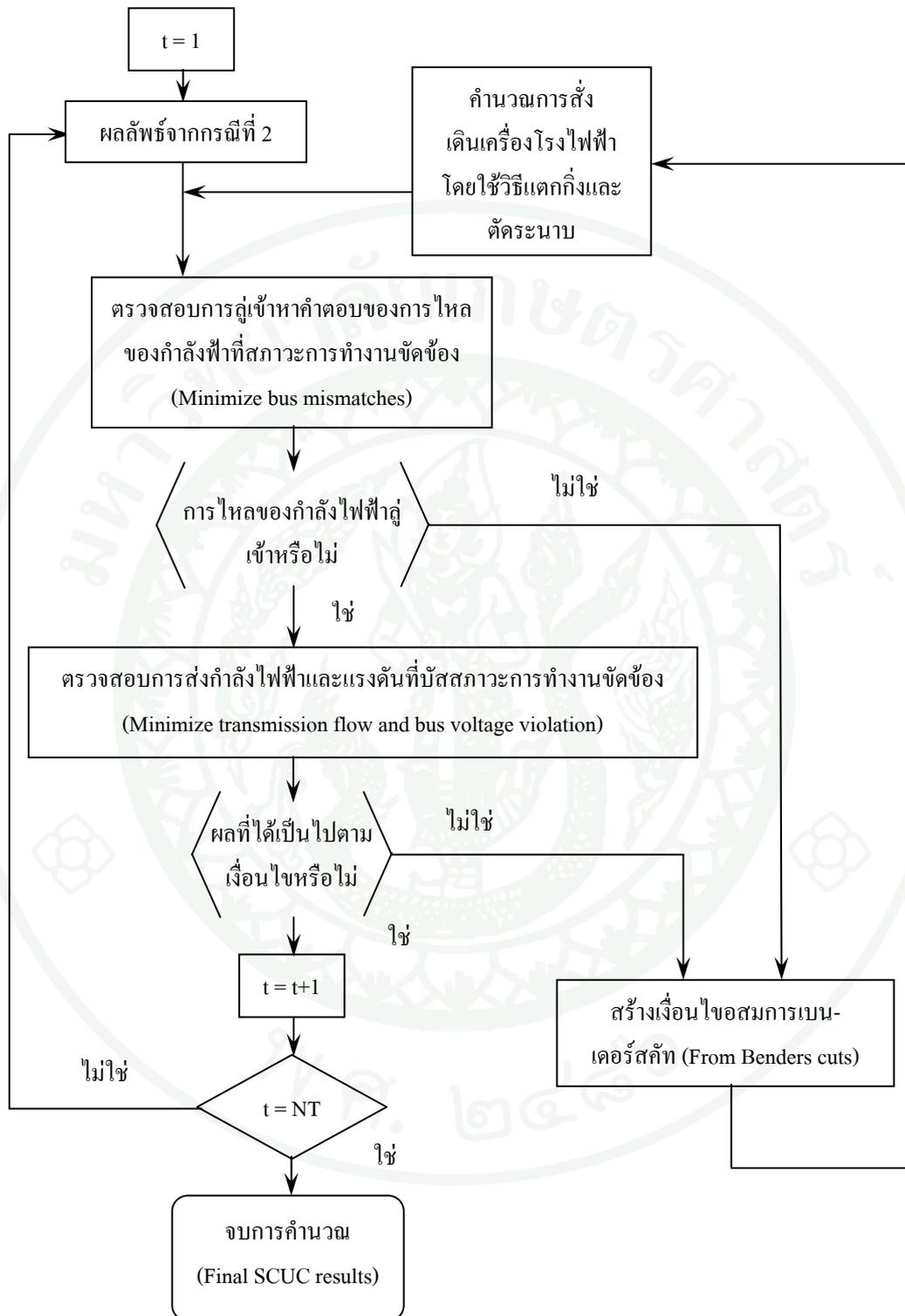
จะได้ว่าค่าที่ได้ใส่เข้าใน 4 รอบของการคำนวณและระบบยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขสายส่งหรือแรงดันที่บัส และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดที่ \$5,848.5

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งขั้นตอนกรณีศึกษาการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมดังภาพที่ 10 และขั้นตอนกรณีศึกษาการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบดังภาพที่ 11





ภาพที่ 10 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ

## 4. กรณีศึกษา

### 4.1. ระบบที่ใช้ในกรณีศึกษา

ระบบที่ใช้ในการศึกษาของงานวิจัยนี้คือระบบ IEEE 57-bus ที่มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลบ้างเพียงเล็กน้อยเพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาในกรณีศึกษา เช่น มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดที่แต่ละบัสเพื่อใช้สำหรับการคำนวณการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเป็นต้น ซึ่งระบบ 57 บัสในกรณีศึกษานี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit) ทั้งหมด 7 เครื่อง และสายส่งจำนวน 80 เส้น ขอบเขตเวลาของปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่ใช้คือ 24 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลและรายละเอียดของระบบที่ใช้มีดังต่อไปนี้

#### 4.1.1. ราคาต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเชื้อเพลิงก๊าซ

ราคาต้นทุนของปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบในกรณีศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยราคาค่าเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงก๊าซ (Fuel cost) ซึ่งอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ของสมการกำลังสอง และราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเริ่มผลิตไฟฟ้าที่มีสถานะปิดอยู่ก่อนหน้า โดยข้อมูลราคาต้นทุนที่ใช้ในกรณีศึกษาเป็นดังตารางที่ 5

#### 4.1.2 เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Limit Constraint) ข้อจำกัดช่วงเวลาของการเปิดหรือปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Minimum up time-down time Constraint) ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (Ramp rate Constraint) ซึ่งข้อมูลเงื่อนไข (Constraints) และสถานะเริ่มต้น (Initial State) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6

#### 4.1.3 ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบ

ในกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ จะทำการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเป็นรายชั่วโมงรวมทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับการวิจัยครั้งนี้ จะคิดเป็นความต้องการใช้ไฟฟารวมทั้งระบบในแต่ละชั่วโมง สำหรับความต้องการใช้ไฟฟ้าของแต่ละ

ละบัตและเงื่อนไขทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่ค่านึงเงื่อนไข

ตารางที่ 5 ตารางราคาต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเชื้อเพลิงก๊าซ

Unit	Bus	Heat Rate (Mbtu/Hr)			ราคาค่าเชื้อเพลิง (฿/Mbtu)	Start up cost (฿)
		$\alpha$	$\beta$	$\alpha$		
1	1	608	8.27	0.00004	1.48	7724
2	2	86	9.37	0.01900	2.74	1125
3	3	350	6.94	0.00160	2.74	2846
4	6	76	9.57	0.00036	2.74	981
5	8	671	7.16	0.00350	1.61	7724
6	9	146	5.00	0.00600	2.74	2014
7	12	671	7.16	0.00350	1.61	7724

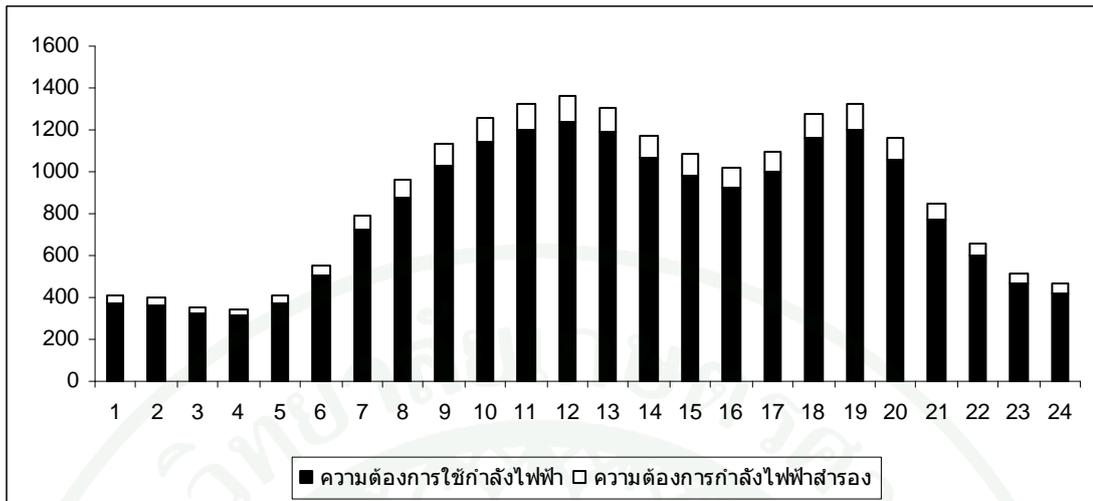
ตารางที่ 6 ตารางเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Unit	$P_{\max}$ (MW)	$P_{\min}$ (MW)	Ramp rate limit (MW/Hr)	Minimum up time (Hr)	Minimum down time (Hr)	Initial state (Hr)
1	550	100	275	5	4	5
2	110	20	55	3	2	3
3	220	50	110	3	2	3
4	130	50	65	1	1	1
5	400	50	200	4	1	4
6	140	25	70	1	1	1
7	350	50	175	4	3	4

ความมั่นคงของระบบ มีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก และความต้องการไฟฟ้าสำรองของระบบ (Spinning Reserve) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเป็นร้อยละสิบของความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ ( $SR_t = 0.1P_{D,t}$ ) โดยคิดจากตารางการผลิตกำลังไฟฟ้ารวมสูงสุดลบกับการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานในชั่วโมงนั้น ( $\sum_{i=1}^{NG} P_{i,max} - \sum_{i=1}^{NG} P_{it}$ ) ข้อมูลความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (Load) และความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรอง ของระบบในแต่ละชั่วโมง (Hour) สำหรับปัญหาการตั้งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ เป็นดังตารางที่ 7 และภาพที่ 12

ตารางที่ 7 ตารางความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ

ชั่วโมงที่	ความต้องการใช้ กำลังไฟฟ้า (MW)	ความต้องการ กำลังไฟฟ้าสำรอง (MW)	ชั่วโมงที่	ความต้องการใช้ กำลังไฟฟ้า (MW)	ความต้องการ กำลังไฟฟ้าสำรอง (MW)
1	372	37	13	1188	119
2	360	36	14	1068	107
3	324	32	15	984	98
4	312	31	16	924	92
5	372	37	17	996	100
6	504	50	18	1164	116
7	720	72	19	1200	120
8	876	88	20	1056	106
9	1032	103	21	768	77
10	1140	114	22	600	60
11	1200	120	23	468	47
12	1236	124	24	420	42



ภาพที่ 12 ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ

#### 4.2. รายละเอียดของกรณีศึกษา

กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 กรณีศึกษาดังต่อไปนี้

กรณีศึกษาที่ 1 : การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า(UC) ที่เป็นปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบ

กรณีศึกษาที่ 2 : การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (AC power flow)

กรณีศึกษาที่ 3: การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)

แต่ละกรณีศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.2.1. กรณีศึกษาที่ 1 : การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า(UC) โดยใช้วิธีการแตกกิ่งและการตัดระนาบกรณีนี้ไม่นำคำตอบที่ได้ไปทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าและไม่นำค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าในระบบ ( $P_{L,r}$ ) มาคิดคำนวณด้วย ทดสอบ โดยนาระบบ IEEE 57-bus ที่มีข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า และความ ต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5 ถึงตารางที่ 6 โดยในหัวข้อที่ผ่านมา กล่าวถึงสมการและ

ขั้นตอนการคำนวณไว้ แต่มีส่วนที่เพิ่มจากตัวอย่างที่ 1 คือเพิ่มเงื่อนไขที่กำหนดมากขึ้น ได้แก่ เงื่อนไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ (Spinning Reserve Constraint), ข้อจำกัด ช่วงเวลาการเปิดปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Minimum up time-down time Constraint) และ ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ramp rate Constraint)

4.2.2. กรณีศึกษาที่ 2 : การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของ กำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมกรณีศึกษานี้จะนำผลที่ได้จากกรณีศึกษาที่ 1 ในแต่ละชั่วโมงไปคำนวณ การไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบและปรับปรุงผลลัพธ์ของการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้ เป็นไปตามเงื่อนไขพิกัดของสายส่งและเงื่อนไขของขนาดแรงดันที่บัส ซึ่งกรณีศึกษานี้มีการ พิจารณาค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าในระบบด้วย โดยใช้โปรแกรม MATPOWER บางฟังก์ชัน ซึ่งนำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า หากผลที่ได้จากการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้านั้นไม่เป็นไป ตามเงื่อนไขของระบบ คือ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ไม่สามารถดูเข้าหาคำตอบหรือมี ขนาดกำลังไฟฟ้าเกินพิกัดที่สายส่งเส้นใด หรือขนาดของแรงดันที่บัสใดไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของ ระบบ จะทำการแก้ไขโดยการเพิ่มสมการเงื่อนไขตาม สมการที่ (58) หรือ (59) ลงไปในเงื่อนไข ของปัญหาหลักแล้วคำนวณใหม่เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมและสอดคล้องกับเงื่อนไขต่างๆ ซึ่ง ขั้นตอนการคำนวณของกรณีศึกษาที่ 2 ดังภาพที่ 10

4.2.3. กรณีศึกษาที่ 3: การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความ มั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency) ใน วิทยานิพนธ์นี้สมมุติสถานการณ์ว่ามีสายส่งที่มีโอกาสที่จะเกิดความขัดข้องสูงเนื่องจากสายหลุด ได้แก่สายส่งระหว่างบัสที่ 1-2, 4-5, 6-8 และ 1-16 ส่วนสายส่งเส้นอื่นนั้นสมมุติว่าโอกาสที่จะเกิด ความขัดข้องนั้นน้อยมากหรือเมื่อเกิดความขัดข้องแล้วจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบมากนัก กรณีศึกษานี้ได้จากการนำผลลัพธ์จากกรณีที่ 2 มาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบ และปรับปรุงผลลัพธ์ของการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขพิกัดของสายส่งและ เงื่อนไขของขนาดแรงดันที่บัส ซึ่งกรณีศึกษานี้มีการพิจารณาค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าใน ระบบด้วย ขั้นตอนการคำนวณของกรณีศึกษาที่ 3 ดังภาพที่ 11



ตารางที่ 9 ผลลัพธ์กำลังไฟฟ้า (MW) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาต้นทุนการผลิต (฿) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (UC)

ชั่วโมง ที่	กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW)							ความ สูญเสียของ กำลังไฟฟ้า ในระบบ (MW)	ความ ต้องการใช้ กำลังไฟ ฟ้า (MW)	กำลังไฟฟ้า สำรองที่ เหลือของ ระบบ (MW)	กำลังไฟฟ้า จริงรวมที่ เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าจ่าย (MW)
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>				
1	372.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	372.00	178.00	372.00
2	360.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	360.00	190.00	360.00
3	324.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	324.00	226.00	324.00
4	312.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	312.00	238.00	312.00
5	372.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	372.00	178.00	372.00
6	484.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	504.00	156.00	504.00
7	550.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	150.00	-	720.00	290.00	720.00
8	550.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	306.00	-	876.00	134.00	876.00
9	550.00	0.00	0.00	0.00	200.00	0.00	282.00	-	1032.00	268.00	1032.00
10	550.00	0.00	0.00	0.00	284.00	0.00	306.00	-	1140.00	160.00	1140.00
11	550.00	20.00	0.00	0.00	316.00	0.00	314.00	-	1200.00	210.00	1200.00
12	550.00	20.00	0.00	0.00	323.00	0.00	343.00	-	1236.00	174.00	1236.00
13	550.00	20.00	0.00	0.00	302.00	0.00	314.00	-	1186.00	224.00	1186.00
14	550.00	0.00	0.00	0.00	270.00	0.00	248.00	-	1068.00	232.00	1068.00
15	550.00	0.00	0.00	0.00	219.00	0.00	215.00	-	984.00	316.00	984.00
16	550.00	0.00	0.00	0.00	192.00	0.00	182.00	-	924.00	376.00	924.00
17	550.00	0.00	0.00	0.00	231.00	0.00	215.00	-	996.00	304.00	996.00
18	550.00	0.00	0.00	0.00	300.00	0.00	314.00	-	1164.00	136.00	1164.00
19	550.00	20.00	0.00	0.00	316.00	0.00	314.00	-	1200.00	210.00	1200.00
20	550.00	20.00	0.00	0.00	245.00	0.00	241.00	-	1056.00	354.00	1056.00
21	550.00	21.00	0.00	0.00	197.00	0.00	0.00	-	768.00	292.00	768.00
22	550.00	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	600.00	60.00	600.00
23	468.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	468.00	82.00	468.00
24	420.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	420.00	130.00	420.00
ราคาต้นทุนรวมของการผลิต (Total Cost) = ฿325,441.00											

จากผลของกรณีศึกษาที่ 1 จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 มีสถานะเปิดตลอด 24 ชั่วโมง เพราะมีต้นทุนในการผลิตถูกกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ในชั่วโมงที่ 6 ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ามียัง 504 MW และความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบมีค่า 50 MW ซึ่งค่าทั้งสองรวมกันมีค่า 554 MW ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องกับเงื่อนไขได้จึงต้องเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 ขึ้นมาเพราะว่าราคารวมค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่เหลือ ต่อมาในชั่วโมงที่ 7 และ 8 ความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงต้องเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 7 แต่ยังคงต้องคงสถานะเปิดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 เพราะว่าติดเงื่อนไขช่วงเวลาที่ย่อยที่สุดของการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยผลิตกำลังไฟฟ้าที่พิกัดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้า ในชั่วโมงที่ 9 ความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1,032 MW จากตารางสถานะในชั่วโมงที่ 8 ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขได้จึงปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 และพอดีว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ไม่ติดเงื่อนไขช่วงเวลาที่ย่อยที่สุดของการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 5 ขึ้นมา

## 2. กรณีศึกษาที่ 2 : การแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

กรณีศึกษานี้ได้จากการนำผลลัพธ์จากกรณีศึกษาที่ 1 มาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบและปรับปรุงผลลัพธ์ของการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขพิกัดของสายส่งและเงื่อนไขของขนาดแรงดันที่บัสซึ่งกรณีศึกษานี้มีการพิจารณาค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าในระบบด้วย ผลลัพธ์สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชั่วโมงแสดงในตารางที่ 10 ผลลัพธ์ของกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชั่วโมงแสดงในตารางที่ 11 ซึ่งต้นทุนรวมของการผลิต (Total Cost) ที่ได้จากกรณีศึกษา คือ ฿346,922.80 จะเห็นได้ว่าต้นทุนรวมของการผลิตเพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษาที่ 1 เนื่องจากคำตอบที่ได้นั้นมีการติดเงื่อนไขจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงสถานะการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีราคาต้นทุนการผลิตสูงขึ้นเพื่อที่จะทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขพิกัดของสายส่งและเงื่อนไขของขนาดแรงดันที่บัสเมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กรณีศึกษาที่ 1 กับกรณีศึกษาที่ 2 จะเห็นความแตกต่างในตารางที่ 10 ที่ผลลัพธ์สถานะที่มีเครื่องหมาย \*

เมื่อนำผลของกรณีศึกษาที่ 1 มาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วจะได้ผลเป็นกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งจะเห็นความเปลี่ยนแปลงโดยจะแบ่งตามเงื่อนไขได้ดังนี้

ตารางที่ 10 ผลลัพธ์สถานะของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (0/1) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

Unit	สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในชั่วโมงที่ 1-24																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0*	0*	0*	0	0	0*	0*	0*	0	0	0	0	0	1	1	1	0*	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1*	1*	1*	1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1*	1*	1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1*	1*	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0*	0*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
6	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1*	1*
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*	1*	0	0

2.1. เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าที่บัสเมื่อนำผลของกรณีศึกษาที่ 1 มาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วทำให้แรงดันที่บัสต่ำกว่าค่าพิกัดจึงต้องเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นมาเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไข ตัวอย่างเช่น ชั่วโมงที่ 1 ในกรณีศึกษาที่ 1 นั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ผลิตกำลังไฟฟ้า 372 MW ทำให้ต้นทุนรวมในการผลิตต่ำที่สุดแต่เมื่อนำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วแรงดันที่บางบัสนั้นต่ำกว่าค่าที่กำหนดดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงสถานะการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 6 ขึ้นมาแต่เนื่องจากราคาการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 6 นั้นสูงจึงต้องผลิตที่พิกัดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหตุที่เลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 6 เพราะว่าคุณจากราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 และ 4 นั้นมีค่าถูกกว่าแต่ไม่สามารถทำให้ตารางการผลิตนั้นเป็นไปตามเงื่อนไข และยังมีเหตุการณ์ลักษณะเดียวกันที่เกิดขึ้นในชั่วโมงอื่นๆอีกเช่น ชั่วโมงที่ 3, 7, 21, 22, 23 และ 24

2.2. เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่สายส่งเกินกว่าค่าพิกัด ตัวอย่างเช่น ชั่วโมงที่ 9 จากการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้ามีกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 7 เครื่องเป็น [550,0,0,50,0,90, 348.22] หลังจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วกำลังไฟฟ้าที่สายส่งระหว่างบัส 1 กับ 15 มีค่าเกินพิกัด (2.1 MW) จึงต้องเปลี่ยนแปลงการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเป็น [548,0,0,50,0,92, 348.22] และยังมีเหตุการณ์ลักษณะเดียวกันที่เกิดขึ้นในชั่วโมงอื่นๆอีกเช่น ชั่วโมงที่ 10

2.3. เงื่อนไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ ตัวอย่างเช่น ชั่วโมงที่ 13 ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ามีค่า 1,188 MW และความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบมีค่า 119 MW ซึ่งค่าทั้งสองรวมกันมีค่า 1,307 MW ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1, 5 และ 7 สามารถจ่ายโหลดได้แต่ไม่เกินไปตามเงื่อนไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบจึงต้องให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ผลิตกำลังไฟฟ้าที่พิกัดต่ำสุดเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองรวม

2.4. เงื่อนไขข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ชั่วโมงที่ 11 ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 5 เพิ่งเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าจึงผลิตได้ที่ 200 MW จึงทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น

จากผลลัพธ์กำลังไฟฟ้าของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในชั่วโมงที่ 11 และ 19 มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากันที่ 1200 MW แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้านั้นไม่เหมือนกันเพราะ ในชั่วโมงที่ 11 นั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 คิดเงื่อนไขข้อจำกัดช่วงเวลาการเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 5 คิดเงื่อนไขข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 200 MW และในชั่วโมงที่ 19 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ไม่คิดเงื่อนไขข้อจำกัดช่วงเวลาการเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1, 5 และ 7 นั้นสามารถจ่ายโหลดได้แต่ยังคงคิดเงื่อนไขต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบจึงต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ขึ้นมาเหตุที่เลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 เพราะมีราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่หยุดเดินเครื่องโรงไฟฟ้า และยังมีเหตุการณ์ลักษณะเดียวกันที่เกิดขึ้นในชั่วโมงอื่นๆ อีกเมื่อเทียบกับความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน

**ตารางที่ 11** ผลลัพธ์กำลังไฟฟ้า (MW) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาต้นทุนการผลิต (฿) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

ชั่วโมง ที่	กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW)							ความสูญเสีย ของ กำลังไฟฟ้า ในระบบ (MW)	ความ ต้องการใช้ กำลังไฟ ฟ้า (MW)	กำลังไฟฟ้า สำรองที่ เหลือของ ระบบ (MW)	กำลังไฟฟ้าจริง รวมที่เครื่อง กำเนิดไฟฟ้า จ่าย (MW)
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>				
1	351.35	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	4.35	372.00	313.65	376.35
2	339.26	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	4.26	360.00	325.74	364.26
3	302.91	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	3.91	324.00	472.09	327.91
4	225.63	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0.00	3.63	312.00	484.37	315.63
5	351.36	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	4.36	372.00	423.64	376.36
6	485.01	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	6.01	504.00	179.99	510.01
7	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	151.12	6.12	720.00	313.88	726.12
8	543.00	0.00	0.00	50.00	0.00	25.00	263.43	5.43	876.00	288.57	881.43
9	548.00	0.00	0.00	50.00	0.00	92.00	348.22	6.22	1032.00	131.78	1038.22
10	539.00	0.00	69.00	50.00	0.00	140.00	348.38	6.38	1140.00	243.62	1146.38
11	550.00	0.00	109.00	0.00	200.00	0.00	347.92	6.92	1200.00	313.08	1206.92
12	550.00	0.00	50.00	0.00	323.00	0.00	319.77	6.77	1236.00	277.23	1242.77
13	550.00	0.00	50.00	0.00	284.00	0.00	308.45	6.45	1186.00	327.55	1192.45
14	550.00	0.00	0.00	0.00	278.00	0.00	246.13	6.13	1068.00	225.87	1074.13
15	550.00	0.00	0.00	0.00	226.00	0.00	213.74	5.74	984.00	310.26	989.74
16	550.00	0.00	0.00	0.00	199.00	0.00	180.42	5.42	924.00	370.58	929.42
17	550.00	0.00	0.00	0.00	238.00	0.00	213.76	5.76	996.00	298.24	1001.76
18	550.00	0.00	0.00	0.00	309.00	0.00	311.76	6.76	1164.00	129.24	1170.76
19	550.00	20.00	0.00	0.00	323.00	0.00	313.89	6.89	1200.00	203.11	1206.89
20	550.00	20.00	0.00	0.00	246.00	0.00	246.09	6.09	1056.00	347.91	1062.09
21	550.00	20.00	0.00	50.00	71.00	0.00	81.81	4.81	768.00	907.19	772.81
22	474.00	0.00	0.00	50.00	0.00	0.00	81.11	5.11	600.00	476.00	605.11
23	333.31	0.00	0.00	69.00	0.00	70.00	0.00	4.31	468.00	286.69	472.31
24	399.86	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	4.86	420.00	265.14	424.86

ราคาต้นทุนรวมของการผลิต (Total Cost) = ฿346,922.80

### 3. กรณีศึกษาที่ 3: การแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)

ในวิทยานิพนธ์นี้สมมุติสถานการณ์ว่ามีสายส่งที่มีโอกาสที่จะเกิดความขัดข้องสูง เนื่องจากสายหลุด ได้แก่สายส่งระหว่างบัสที่ 1-2, 4-5, 6-8 และ 1-16 ส่วนสายส่งเส้นอื่นนั้นสมมุติว่าโอกาสที่จะเกิดความขัดข้องนั้นน้อยหรือเมื่อเกิดความขัดข้องแล้วจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ กรณีศึกษานี้ได้จากการนำผลลัพธ์จากกรณีที่ 2 มาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบและปรับปรุงผลลัพธ์ของการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขพิกัดของสายส่งและเงื่อนไขของขนาดแรงดันที่บัส ซึ่งกรณีศึกษานี้มีการพิจารณาค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าในระบบด้วย ผลลัพธ์สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชั่วโมงแสดงในตารางที่ 12 ผลลัพธ์ของกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชั่วโมงแสดงในตารางที่ 13 ซึ่งต้นทุนรวมของการผลิต (Total Cost) ที่ได้จากกรณีศึกษา คือ ฿392,835.70 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กรณีศึกษาที่ 2 กับกรณีศึกษาที่ 3 จะเห็นความแตกต่างในตารางที่ 12 ที่ผลลัพธ์สถานะเป็นตัวเอียงและหนา

จากผลของกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบนั้นทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปในบางสายส่งอาจมีค่าเกินกว่าค่าพิกัด ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ลดกำลังการผลิตจากกรณีศึกษาที่ 2 แม้ว่าต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 มีค่าต่ำที่สุดก็ตาม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งอาจทำให้แรงดันที่บัสไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจึงต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่มีต้นทุนการผลิตที่แพงกว่า ตัวอย่างเช่น ชั่วโมงที่ 1 ต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 เพื่อให้แรงดันที่บัสที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขเป็นไปตามเงื่อนไข และจากผลลัพธ์จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 ต้องเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมงเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขเป็นไปตามเงื่อนไข

ในชั่วโมงที่ 6 ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 5 ติดเงื่อนไขข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า เพิ่งเริ่มเดินเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจึงผลิตได้ที่ 200 MW จึงทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 12 ผลลัพธ์สถานะของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (0/1) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สภาวะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)

Unit	สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในชั่วโมงที่ 1-24																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
3	0	0	0	0	0	0	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	<i>1</i>
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	<i>1</i>	<i>1</i>	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	1	1	1	1	1	1	1	<i>1</i>
6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	<i>1</i>	<i>1</i>	0	0	<i>1</i>	0	<i>1</i>
7	0	0	0	0	0	0	<i>1</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

**ตารางที่ 13** ผลลัพธ์กำลังไฟฟ้า (MW) ของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาต้นทุนการผลิต (฿) ที่ได้จากการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สภาวะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)

ชั่วโมง ที่	กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW)							ความสูญเสีย ของ กำลังไฟฟ้า ในระบบ (MW)	ความ ต้องการใช้ กำลังไฟ ฟ้า (MW)	กำลังไฟฟ้า สำรองที่ เหลือของ ระบบ (MW)	กำลังไฟฟ้าจริง รวมที่เครื่อง กำเนิดไฟฟ้า จ่าย (MW)
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>				
1	332.72	20.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	5.72	372.00	422.29	377.72
2	289.39	22.00	0.00	0.00	0.00	54.00	0.00	5.39	360.00	434.61	365.39
3	284.09	20.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	5.09	324.00	470.91	329.09
4	271.94	20.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	4.94	312.00	483.06	316.94
5	281.39	20.00	0.00	0.00	0.00	76.00	0.00	5.39	372.00	422.61	377.39
6	198.84	21.00	0.00	0.00	200.00	90.00	0.00	5.84	504.00	690.17	509.84
7	123.57	20.00	50.00	0.00	318.00	38.00	175.00	4.57	720.00	1045.43	724.57
8	292.05	20.00	110.00	0.00	200.00	0.00	259.00	5.05	876.00	748.95	881.05
9	377.96	20.00	90.00	0.00	200.00	0.00	350.00	5.96	1032.00	662.04	1037.96
10	357.39	20.00	169.00	50.00	200.00	0.00	350.00	6.39	1140.00	553.61	1146.39
11	391.62	20.00	0.00	50.00	395.00	0.00	350.00	6.62	1200.00	473.38	1206.62
12	310.77	47.00	0.00	65.00	400.00	70.00	350.00	6.77	1236.00	522.23	1242.77
13	359.82	20.00	0.00	0.00	399.00	64.00	350.00	6.82	1186.00	501.18	1192.82
14	293.96	30.00	0.00	0.00	400.00	0.00	350.00	5.96	1068.00	336.04	1073.96
15	297.45	20.00	0.00	0.00	323.00	0.00	349.00	5.45	984.00	420.55	989.45
16	276.30	20.00	0.00	0.00	284.00	38.00	311.00	5.30	924.00	648.70	929.30
17	298.50	20.00	0.00	0.00	333.00	0.00	350.00	5.50	996.00	408.50	1001.50
18	208.44	32.00	110.00	0.00	400.00	70.00	350.00	6.44	1164.00	599.56	1170.44
19	261.67	20.00	175.00	0.00	400.00	0.00	350.00	6.67	1200.00	563.33	1206.67
20	268.75	20.00	65.00	0.00	358.00	0.00	350.00	5.75	1056.00	708.26	1061.75
21	100.00	20.00	50.00	0.00	282.72	38.00	282.00	4.72	768.00	997.28	772.72
22	100.00	20.00	50.00	50.00	212.31	122.00	50.00	4.31	600.00	1295.69	604.31
23	100.00	39.00	0.00	65.00	199.80	70.00	0.00	5.80	468.00	856.20	473.80
24	100.00	20.00	0.00	0.00	305.90	0.00	0.00	5.90	420.00	634.10	425.90

ราคาต้นทุนรวมของการผลิต (Total Cost) = ฿392,835.70

## วิจารณ์

เมื่อนำผลลัพธ์จากกรณีศึกษาที่ 1 แต่ละชั่วโมงมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (PF) ในกรณีศึกษาที่ 2 นั้นราคาต้นทุนรวมของการผลิตที่ได้จะสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 1 เพราะอย่างน้อยก็เป็นผลที่เกิดจากความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบที่ไม่มีการพิจารณาในกรณีศึกษาที่ 1 อีกทั้งผลที่ได้จากกรณีศึกษาที่ 1 นั้นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและแรงดันที่บัส ในบางกรณีการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมานั้นอาจมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าบรรดาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสถานะปิดหรือบางกรณีต้องเปลี่ยนแปลงการผลิตให้มีค่าสูงขึ้นหรือลดการผลิตจากกรณีศึกษาที่ 1 เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขของระบบ อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากกรณีศึกษาที่ 2 นี้ก็เป็นผลลัพธ์ที่ใช้ได้จริงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของระบบ

เมื่อพิจารณากรณีศึกษาที่ 3 สมมุติสถานการณ์ว่ามีสายส่งที่มีโอกาสที่จะเกิดความขัดข้องสูงเนื่องจากสายหลุด ผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีต้นทุนในการผลิตสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 2 เพราะเมื่อเกิดความขัดข้องในระบบแล้วทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนไปและแรงดันที่บัสอาจไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจึงต้องปรับปรุงผลลัพธ์ของการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไข โดยเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมานั้นอาจมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าบรรดาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสถานะปิดหรือบางกรณีต้องเปลี่ยนแปลงการผลิตให้มีค่าสูงขึ้นหรือลดการผลิตจากกรณีศึกษาที่ 2 ผลลัพธ์สุดท้ายจากกรณีที่ 3 นี้จึงเป็นผลลัพธ์ของการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (SCUC) ที่สามารถทำให้มั่นใจได้ว่าระบบจะยังคงทำงานต่อไปได้แม้ในสถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency)

วิธีการแก้ปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่เหมาะสมที่สุด โดยซึ่งปัญหาหลักเป็นปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยและใช้วิธีร่วมกับเทคนิคเบนเดอร์สติคอมโพสิชันนั้น ไม่ต้องการความละเอียดในการคำนวณปัญหาการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้ามากนักแต่ค่าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับวิธีอื่นๆต่างกันที่จุดทศนิยมเท่านั้น

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

ผลของกรณีศึกษาที่ใช้โปรแกรมเมทแลป (Matlab) ช่วยในการวิจัยสรุปได้ว่าการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ อาศัยหลักการของเทคนิคเบน-เดอส์ตีคอมโพสิชัน ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบออกเป็นสองส่วน คือ การแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเป็นปัญหาแบบมีตัวแปรเป็นจำนวนเต็มร่วมด้วยโดยใช้วิธีการแตกกิ่งและตัดระนาบ ต่อมานำผลที่ได้ไปคำนวณในปัญหาหอยการไหลของกำลังไฟอย่างเหมาะสมเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขข้อจำกัดของสายส่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัส ถ้าผลที่ได้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะทำการปรับปรุงคำตอบของปัญหาหลักจนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไข ต่อมานำค่าที่ได้ไปตรวจสอบเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency) โดยสมมุติสถานการณ์ว่ามีสายส่งที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความขัดข้องสูงเนื่องจากสายหลุดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นผลลัพธ์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ โดยมีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด

จากการศึกษาพบว่าวิธีที่เสนอ เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้แก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่มีขนาดใหญ่ และจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแต่ละกรณีศึกษาพบว่า การคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สถานะเกิดสถานการณ์ที่คาดไม่ถึงที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Contingency) จะทำให้ต้นทุนของการผลิตสูงกว่ากรณีอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามส่วนต่างของต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นจะรับประกันได้ว่าระบบจะยังคงทำงานต่อไปได้แม้ในขณะเกิดความขัดข้องขึ้นกับระบบก็ตาม

### ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตปัญหาการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบนั้นอาจเพิ่มพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานจากลม พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานชีวมวล (biomass) เป็นต้น โดยเข้ามาคิดคำนวณในระบบ

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ปานจิต คำรงกุลกำจร. 2543. เอกสารประกอบการสอนวิชา **Computer Method in Power System Analysis**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วีรยา ภูมิ. 2551. การแก้ปัญหาหน่วยคอมมิทเมนต์ค่านึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ที่มีเงื่อนไขความมั่นคงของระบบโดยใช้วิธีลากรางจรีแล็กเซชันร่วมกับวิธีเจเนติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Geoffrion, A. M. 1972. **Generalized Benders Decomposition**. Journal of Optimization Theory and Applications. vol 10.
- Cohen, Arthur I. and Yoshimura, Miki. 1983. A BRANCH-AND-BOUND ALGORITHM FOR UNIT COMMITMENT. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**.
- Wood, A. J. and Wollenberg, Bruce F. 1996. **Power Generation, Operation, and Control**. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Wolsey, Laurence A. 1998. **Integer Programming**. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Hobbs, Benjamin F., Rothkopf, Michael H., O'Neill, Richard P. and Chao, Hung-po. **THE NEXT GENERATION OF ELECTRIC POWER UNIT COMMITMENT MODELS**. Kluwer Academic Publishers. , New York.
- Fu, Y., Shahidehpour, Mohammad. and Li, Zuyi. 2005. Security-Constrained Unit Commitment With AC Constraints. **IEEE Trans. On Power System** 20 (2): 1001-1013.

Momoh, James A. 2005. **Electric Power Applications of Optimization**. Marcel Dekker., New York.

Carrión, Miguel. and Arroyo, José M. 2006. A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem. **IEEE Trans. On Power System**. vol.21.

Pinto, H., Magnago, F., Brignone, S., Alsac, O., and Stott, B. 2006. Security Constrained Unit Commitment: Network Modeling and Solution Issues. **IEEE Transactions on Power Systems**.

Conejo, Antonio J., Roberto, Enrique Castillo, Mínguez and García-Bertrand, Raquel. 2006. **Decomposition Techniques in Mathematical Programming**. Springer., New York.

Zimmerman, Ray D. and Carlos E. **A Matlab Power Syetem Simulation Package**. Available Source: <http://www.pserc.comell.edu/matpower>, November 20, 2007.

Fu, Y. and Shahidehpour, Mohammad. 2007. Fast SCUC for Large-Scale Power System. **IEEE Trans. On Power System**. Vol. 22.

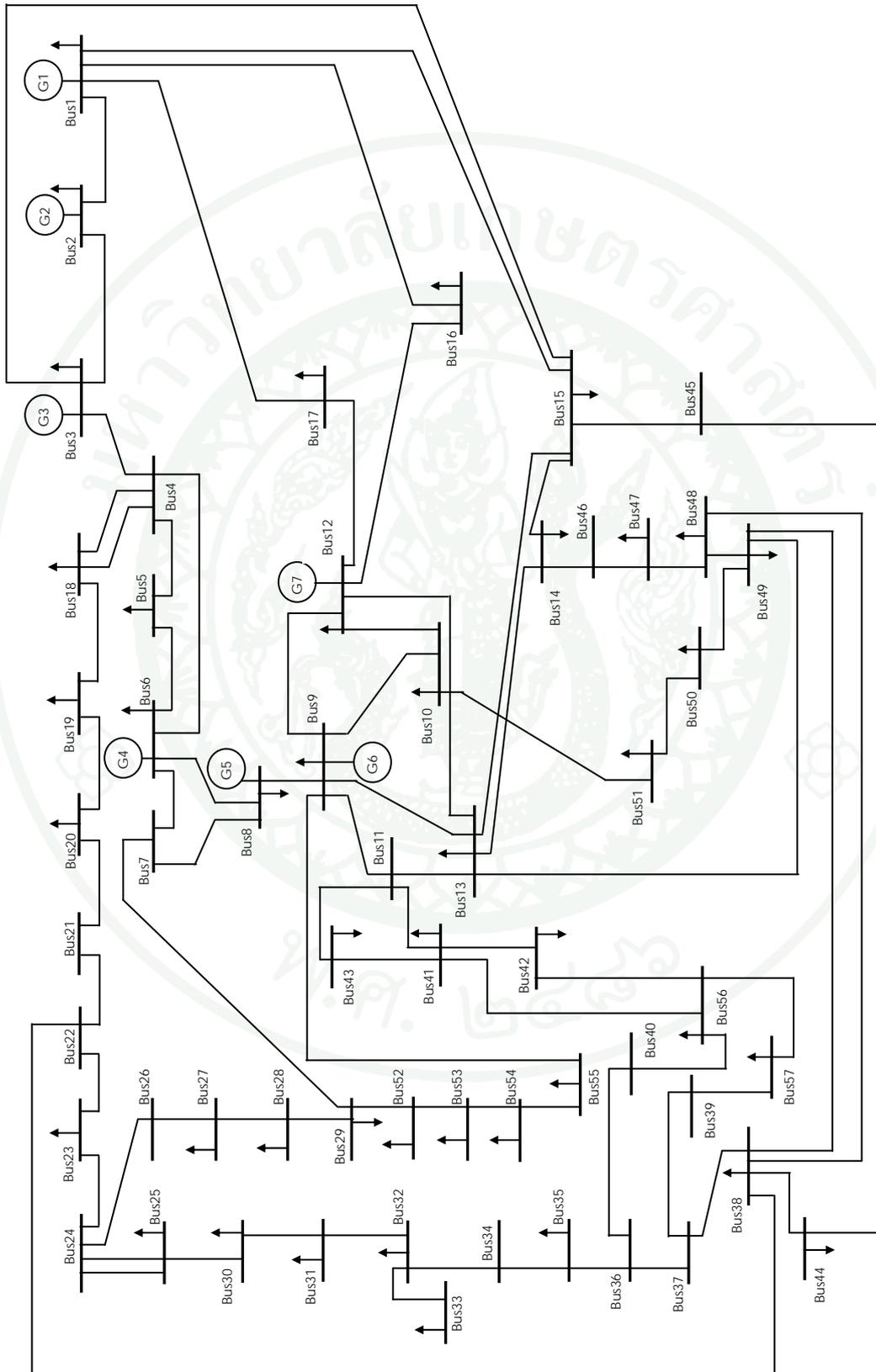
Li, Yuan. and McCalley, Jame D.. A General Benders Decomposition Structure for Power System Decision Problem. 2008. **IEEE Trans. On Power System**.

Griva, Igor., Nash, Stephen G. and Sofer, Ariela. 2009. **Linear and Nonlinear Optimization**. Society for Industrial and Applied and Applied Mathematics., New York.



ภาคผนวก

## ข้อมูลของระบบที่ใช้ในกรณีศึกษาของงานวิจัย



ภาพผนวกที่ 1 ระบบ IEEE 57-bus

ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 57-bus ที่ใช้ในกรณีศึกษาของงานวิจัย

Bus	Bus Type	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	Base kV	Zone	Max Vm	Min Vm
1	3	17	0	0	1	1.04	0	0	1	1.06	0.94
2	2	88	0	0	1	1.01	-1.18	0	1	1.06	0.94
3	2	21	0	0	1	0.985	-5.97	0	1	1.06	0.94
4	1	0	0	0	1	0.981	-7.32	0	1	1.06	0.94
5	1	4	0	0	1	0.976	-8.52	0	1	1.06	0.94
6	2	2	0	0	1	0.98	-8.65	0	1	1.06	0.94
7	1	0	0	0	1	0.984	-7.58	0	1	1.06	0.94
8	2	22	0	0	1	1.005	-4.45	0	1	1.06	0.94
9	2	26	0	0	1	0.98	-9.56	0	1	1.06	0.94
10	1	2	0	0	1	0.986	-11.4	0	1	1.06	0.94
11	1	0	0	0	1	0.974	-10.2	0	1	1.06	0.94
12	2	24	0	0	1	1.015	-10.5	0	1	1.06	0.94
13	1	2.3	0	0	1	0.979	-9.79	0	1	1.06	0.94
14	1	5.3	0	0	1	0.97	-9.33	0	1	1.06	0.94
15	1	5	0	0	1	0.988	-7.18	0	1	1.06	0.94
16	1	3	0	0	1	1.013	-8.85	0	1	1.06	0.94
17	1	8	0	0	1	1.017	-5.39	0	1	1.06	0.94
18	1	9.8	0	10	1	1.001	-11.7	0	1	1.06	0.94
19	1	0.6	0	0	1	0.97	-13.2	0	1	1.06	0.94
20	1	1	0	0	1	0.964	-13.4	0	1	1.06	0.94
21	1	0	0	0	1	1.008	-12.9	0	1	1.06	0.94
22	1	0	0	0	1	1.01	-12.8	0	1	1.06	0.94
23	1	2.1	0	0	1	1.008	-12.9	0	1	1.06	0.94
24	1	0	0	0	1	0.999	-13.3	0	1	1.06	0.94
25	1	3.2	0	5.9	1	0.982	-18.1	0	1	1.06	0.94

## ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Bus	Bus Type	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	Base kV	Zone	Max Vm	Min Vm
26	1	0	0	0	1	0.959	-13	0	1	1.06	0.94
27	1	0.5	0	0	1	0.982	-11.5	0	1	1.06	0.94
28	1	2.3	0	0	1	0.997	-10.5	0	1	1.06	0.94
29	1	2.6	0	0	1	1.01	-9.75	0	1	1.06	0.94
30	1	1.8	0	0	1	0.962	-18.7	0	1	1.06	0.94
31	1	2.9	0	0	1	0.936	-19.3	0	1	1.06	0.93
32	1	0.8	0	0	1	0.949	-18.5	0	1	1.06	0.94
33	1	1.9	0	0	1	0.947	-18.5	0	1	1.06	0.94
34	1	0	0	0	1	0.959	-14.1	0	1	1.06	0.94
35	1	3	0	0	1	0.966	-13.9	0	1	1.06	0.94
36	1	0	0	0	1	0.976	-13.6	0	1	1.06	0.94
37	1	0	0	0	1	0.985	-13.4	0	1	1.06	0.94
38	1	7	0	0	1	1.013	-12.7	0	1	1.06	0.94
39	1	0	0	0	1	0.983	-13.5	0	1	1.06	0.94
40	1	0	0	0	1	0.973	-13.6	0	1	1.06	0.94
41	1	3	0	0	1	0.996	-14.1	0	1	1.06	0.94
42	1	4.4	0	0	1	0.966	-15.5	0	1	1.06	0.94
43	1	1	0	0	1	1.01	-11.3	0	1	1.06	0.94
44	1	1.8	0	0	1	1.017	-11.9	0	1	1.06	0.94
45	1	0	0	0	1	1.036	-9.25	0	1	1.06	0.94
46	1	0	0	0	1	1.05	-11.9	0	1	1.07	0.94
47	1	11.6	0	0	1	1.033	-12.5	0	1	1.06	0.94
48	1	0	0	0	1	1.027	-12.6	0	1	1.06	0.94
49	1	8.5	0	0	1	1.036	-12.9	0	1	1.06	0.94
50	1	10.5	0	0	1	1.023	-13.4	0	1	1.06	0.94

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Bus	Bus Type	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	Base kV	Zone	Max Vm	Min Vm
51	1	5.3	0	0	1	1.052	-12.5	0	1	1.06	0.94
52	1	2.2	0	0	1	0.98	-11.5	0	1	1.06	0.94
53	1	10	0	6.3	1	0.971	-12.2	0	1	1.06	0.94
54	1	1.4	0	0	1	0.996	-11.7	0	1	1.06	0.94
55	1	3.4	0	0	1	1.031	-10.8	0	1	1.06	0.94
56	1	2.2	0	0	1	0.968	-16	0	1	1.06	0.94
57	1	2	0	0	1	0.965	-16.6	0	1	1.06	0.94

ตารางผนวกที่ 2 ข้อมูลสายส่งของระบบ IEEE 57-bus ที่ใช้ในกรณีศึกษาของงานวิจัย

From	To	r	x	b	Rate	Ratio	Angle
1	2	0.0083	0.028	0.129	300	0	0
2	3	0.0298	0.085	0.0818	300	0	0
3	4	0.0112	0.0366	0.038	200	0	0
4	5	0.0625	0.132	0.0258	100	0	0
4	6	0.043	0.148	0.0348	200	0	0
6	7	0.02	0.102	0.0276	200	0	0
6	8	0.0339	0.173	0.047	300	0	0
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	300	0	0
9	10	0.0369	0.1679	0.044	300	0	0
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	200	0	0
9	12	0.0648	0.295	0.0772	200	0	0
9	13	0.0481	0.158	0.0406	200	0	0
13	14	0.0132	0.0434	0.011	100	0	0
13	15	0.0269	0.0869	0.023	100	0	0

## ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

From	To	r	x	b	Rate	Ratio	Angle
1	15	0.0178	0.091	0.0988	200	0	0
1	16	0.0454	0.206	0.0546	200	0	0
1	17	0.0238	0.108	0.0286	200	0	0
3	15	0.0162	0.053	0.0544	200	0	0
4	18	0	0.555	0	100	0.97	0
4	18	0	0.43	0	100	0.978	0
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	200	0	0
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	300	0	0
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	300	0	0
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	100	0	0
12	13	0.0178	0.058	0.0604	300	0	0
12	16	0.018	0.0813	0.0216	300	0	0
12	17	0.0397	0.179	0.0476	300	0	0
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	200	0	0
18	19	0.461	0.685	0	100	0	0
19	20	0.283	0.434	0	100	0	0
21	20	0	0.7767	0	100	1.043	0
21	22	0.0736	0.117	0	100	0	0
22	23	0.0099	0.0152	0	100	0	0
23	24	0.166	0.256	0.0084	100	0	0
24	25	0	1.182	0	100	1	0
24	25	0	1.23	0	100	1	0
24	26	0	0.0473	0	100	1.043	0
26	27	0.165	0.254	0	100	0	0
27	28	0.0618	0.0954	0	100	0	0
28	29	0.0418	0.0587	0	100	0	0

## ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

From	To	r	x	b	Rate	Ratio	Angle
7	29	0	0.0648	0	100	0.967	0
25	30	0.135	0.202	0	100	0	0
30	31	0.326	0.497	0	100	0	0
31	32	0.507	0.755	0	100	0	0
32	33	0.0392	0.036	0	100	0	0
34	32	0	0.953	0	100	0.975	0
34	35	0.052	0.078	0.0032	100	0	0
35	36	0.043	0.0537	0.0016	100	0	0
36	37	0.029	0.0366	0	100	0	0
37	38	0.0651	0.1009	0.002	100	0	0
37	39	0.0239	0.0379	0	100	0	0
36	40	0.03	0.0466	0	100	0	0
22	38	0.0192	0.0295	0	100	0	0
11	41	0	0.749	0	100	0.955	0
41	42	0.207	0.352	0	100	0	0
41	43	0	0.412	0	100	0	0
38	44	0.0289	0.0585	0.002	100	0	0
15	45	0	0.1042	0	100	0.955	0
14	46	0	0.0735	0	100	0.9	0
46	47	0.023	0.068	0.0032	100	0	0
47	48	0.0182	0.0233	0	100	0	0
48	49	0.0834	0.129	0.0048	100	0	0
49	50	0.0801	0.128	0	100	0	0
50	51	0.1386	0.22	0	100	0	0
10	51	0	0.0712	0	100	0.93	0
13	49	0	0.191	0	100	0.895	0

## ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

From	To	r	x	b	Rate	Ratio	Angle
29	52	0.1442	0.187	0	100	0	0
52	53	0.0762	0.0984	0	100	0	0
53	54	0.1878	0.232	0	100	0	0
54	55	0.1732	0.2265	0	100	0	0
11	43	0	0.153	0	100	0.958	0
44	45	0.0624	0.1242	0.004	100	0	0
40	56	0	1.195	0	100	0.958	0
56	41	0.553	0.549	0	100	0	0
56	42	0.2125	0.354	0	100	0	0
39	57	0	1.355	0	100	0.98	0
57	56	0.174	0.26	0	100	0	0
38	49	0.115	0.177	0.003	100	0	0
38	48	0.0312	0.0482	0	100	0	0
9	55	0	0.1205	0	100	0.94	0

## ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละบัสในชั่วโมงที่ 1 ถึง 12

Bus	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (MW) ในชั่วโมงที่ 1-12											
1	17.0	15.0	14.0	14.0	16.0	22.0	32.0	38.5	45.2	50.0	52.8	54.3
2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.7	2.0	2.5	2.8	2.8	3.0
3	12.0	12.0	11.0	10.0	12.0	17.0	23.0	29.0	33.8	37.5	39.0	40.5
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	4.0	4.0	3.4	3.2	3.9	5.0	7.4	9.0	10.7	11.8	12.5	12.8
6	22.0	20.0	18.5	18.7	22.0	30.2	43.2	52.5	62.0	68.4	72.0	74.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	45.0	40.0	39.0	37.0	45.0	60.4	86.0	105.5	123.8	136.8	144.0	148.0

## ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Bus	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (MW) ในชั่วโมงที่ 1-12											
9	36.0	36.0	31.0	30.0	36.0	49.0	70.0	85.0	100.0	110.2	116.0	119.5
10	1.5	1.5	1.3	1.2	1.5	2.0	2.9	3.5	4.0	4.6	4.8	5.2
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	112.0	110.0	98.0	95.0	112.0	152.0	217.0	264.0	311.0	344.5	362.0	372.5
13	6.0	6.0	5.0	4.5	5.3	7.2	10.4	12.7	14.9	16.7	17.2	17.8
14	3.2	3.2	3.0	2.8	3.2	4.0	6.0	7.3	8.7	9.6	10.0	10.4
15	6.5	5.5	5.5	5.5	6.5	9.0	12.7	15.4	15.4	20.0	21.0	21.7
16	12.0	12.0	12.0	11.0	13.0	17.0	25.0	30.0	35.5	39.0	41.0	42.5
17	12.5	12.5	10.0	10.0	12.5	17.0	24.5	29.0	34.7	38.3	40.5	41.7
18	8.0	8.0	7.0	6.7	8.0	11.0	15.7	19.0	22.5	24.8	26.3	26.8
19	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.4	2.0	2.0	2.7	3.0	3.2	3.3
20	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.4	1.6	1.9	2.0	2.2	2.3
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	2.0	2.0	1.5	1.5	1.8	2.5	3.5	4.4	5.2	5.7	6.0	6.2
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	2.0	2.0	1.5	1.5	1.8	2.5	3.5	4.4	5.2	5.7	6.0	6.2
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	2.8	2.8	2.0	2.0	2.8	3.7	5.0	6.5	7.7	8.5	8.8	9.2
28	1.5	1.5	1.2	1.2	1.3	2.0	2.6	3.2	3.8	4.2	4.4	4.5
29	5.0	5.0	4.0	4.0	5.0	6.8	9.7	12.0	14.0	15.5	16.0	16.8
30	1.5	1.5	0.9	0.9	1.4	1.5	2.2	2.5	3.0	3.3	3.5	3.6
31	2.0	2.0	1.5	1.5	1.7	2.0	3.3	4.0	4.8	5.3	5.5	5.8
32	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7
33	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.5	2.2	2.6	3.0	3.4	3.5	3.9
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

## ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Bus	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (MW) ในชั่วโมงที่ 1-12											
35	2.0	2.0	1.5	1.5	1.9	2.4	3.4	4.3	5.0	5.5	5.8	6.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	4.0	4.0	3.6	3.5	4.0	5.6	8.0	9.8	11.6	12.7	13.4	13.8
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	2.0	2.0	1.6	1.6	1.9	2.5	3.7	4.4	5.2	5.7	6.0	6.2
42	2.5	2.5	1.8	1.8	2.0	2.8	4.0	5.0	6.0	6.5	6.8	7.0
43	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	1.2	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2
44	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5	4.8	7.0	8.4	9.9	11.0	12.0	11.8
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	9.0	9.0	7.7	7.4	8.9	12.0	17.0	20.8	24.5	27.0	28.5	29.4
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	5.0	5.0	5.0	5.0	5.4	7.2	10.3	12.7	14.8	16.0	17.3	17.7
50	6.0	6.0	5.4	5.2	6.2	8.4	12.0	14.7	17.3	19.2	20.2	20.7
51	5.0	5.0	5.0	4.5	5.0	7.2	10.3	12.6	14.4	16.0	17.3	17.7
52	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.8	3.4	4.0	4.5	4.7	4.8
53	6.0	6.0	6.0	5.0	6.2	8.0	11.5	14.0	16.5	18.2	19.2	19.7
54	1.4	1.4	1.4	1.0	1.2	2.0	2.4	2.8	3.4	3.7	4.0	4.0
55	2.0	2.0	2.0	1.7	2.0	2.4	4.0	4.8	5.6	6.2	6.5	6.7
56	1.5	1.5	1.5	1.4	2.3	3.0	4.3	5.3	6.3	7.0	7.3	7.5
57	1.2	1.2	1.2	1.2	2.0	3.0	4.0	4.7	5.5	6.0	6.5	6.6

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละบัสในช่วงเวลาที่ 13 ถึง 24

Bus	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (MW) ในช่วงเวลาที่ 13-24											
1	52.2	47.0	43.3	40.6	43.8	51.2	52.8	46.4	33.8	26.4	20.5	18.5
2	2.8	2.5	2.4	2.2	2.4	2.8	2.9	2.5	1.8	1.4	1.1	1.0
3	39.0	35.0	32.2	30.3	32.6	38.3	40.0	34.6	25.2	19.7	15.3	13.8
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	12.4	11.1	10.2	9.6	10.4	12.2	12.5	11.0	8.0	6.2	4.9	4.3
6	71.2	64.0	59.0	55.4	59.7	70.0	72.0	63.3	46.0	36.0	28.0	25.2
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	142.5	128.0	118.0	110.8	119.4	139.0	143.9	126.6	92.0	72.0	56.0	50.4
9	115.0	103.3	95.0	89.3	96.4	112.6	116.0	102.2	74.3	58.0	45.3	40.6
10	4.7	4.3	4.0	3.7	4.0	4.6	4.8	4.2	3.0	2.4	1.9	1.7
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	358.0	322.0	296.5	278.5	300.0	350.8	361.5	318.3	231.5	180.8	141.0	126.6
13	17.0	15.4	14.0	13.2	14.3	16.7	17.3	15.2	11.0	8.6	6.7	6.0
14	10.0	9.0	8.0	7.7	8.4	9.7	10.0	8.8	6.4	5.0	3.9	3.5
15	20.8	18.8	17.3	16.3	17.5	20.7	21.1	18.6	13.5	10.6	8.2	7.4
16	40.8	36.7	33.8	31.8	34.2	40.0	41.3	36.3	26.4	20.6	16.1	14.4
17	40.0	35.9	33.0	31.0	33.4	39.0	40.3	35.5	25.8	20.1	15.7	14.1
18	26.0	23.2	21.4	20.0	21.7	25.4	26.1	23.0	16.7	13.0	10.2	9.1
19	3.1	2.8	2.6	2.4	2.6	3.0	3.2	2.8	2.0	1.6	1.2	1.1
20	2.2	2.0	1.8	1.7	1.8	2.0	2.2	2.0	1.4	1.1	1.0	0.8
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	6.0	5.4	5.0	4.7	5.0	5.9	6.0	5.3	3.9	3.0	2.4	2.1
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	6.0	5.4	5.0	4.7	5.0	5.9	6.0	5.3	3.9	3.0	2.4	2.1
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Bus	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (MW) ในชั่วโมงที่ 13-24											
27	8.8	8.0	7.4	6.9	7.5	8.7	9.0	7.9	5.7	4.5	3.5	3.1
28	4.3	4.0	3.6	3.4	3.7	4.3	4.4	3.9	2.8	2.2	1.7	1.5
29	16.4	14.5	13.3	12.6	13.5	15.8	16.0	14.3	10.4	8.2	6.4	5.7
30	3.4	3.1	2.8	2.6	2.9	3.4	3.5	3.0	2.2	1.7	1.3	1.2
31	5.3	5.0	4.6	4.3	4.6	5.4	5.6	5.0	3.6	2.8	2.2	1.9
32	1.5	1.4	1.2	1.2	1.3	1.5	1.5	1.3	1.0	0.7	0.6	0.5
33	3.6	3.2	3.0	2.8	3.0	3.5	3.6	3.2	2.3	1.8	1.4	1.3
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	5.5	5.0	4.7	4.5	4.8	5.6	5.8	5.0	3.7	2.9	2.2	2.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	12.8	12.0	11.2	10.3	11.1	13.2	13.4	11.8	8.6	6.7	5.2	4.7
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	5.9	5.4	5.0	4.6	5.0	5.9	6.0	5.3	3.7	3.0	2.4	2.1
42	6.6	6.1	5.8	5.2	5.7	6.6	6.8	6.0	4.3	3.4	2.7	2.4
43	1.9	1.7	1.6	1.5	1.6	1.8	2.0	1.7	1.2	1.0	0.8	0.7
44	11.4	10.2	9.4	8.9	10.0	11.1	11.5	10.1	7.4	5.6	4.5	4.0
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	28.0	25.0	23.4	22.0	23.6	27.6	28.5	25.0	18.5	14.5	11.3	10.0
48	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	16.7	15.4	14.0	13.3	14.3	16.8	17.2	15.4	11.0	8.6	6.7	6.0
50	20.0	18.0	16.8	15.5	16.7	19.5	20.0	17.7	12.9	10.0	7.9	7.2
51	17.0	15.3	14.0	13.3	14.3	16.8	17.2	15.2	11.1	8.7	6.7	6.0
52	4.7	4.3	3.9	3.6	3.9	4.5	4.7	4.0	3.0	2.4	1.8	1.6

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Bus	ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (MW) ในช่วงเวลาที่ 13-24											
53	19.0	17.0	16.0	14.8	15.9	18.8	19.2	16.9	12.3	9.6	7.5	6.7
54	3.9	3.5	3.2	3.0	3.3	3.8	4.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.4
55	6.4	5.8	5.3	5.0	5.4	6.3	6.5	5.7	4.2	3.3	2.5	2.3
56	7.0	6.5	6.0	5.6	6.0	7.0	7.3	6.4	4.7	3.6	2.8	2.6
57	6.2	5.8	5.3	5.2	5.3	6.3	6.4	5.8	4.3	3.3	2.6	2.4

## หมายเหตุ

Base MVA = 100

Base : Bus Number (1 to 57)

Bus Type : PQ Bus = 1

PV Bus = 2

Reference Bus = 3

Isolated Bus = 4

Qd : Reactive Power Demand (MVAR)

Gs : Shunt Conductance (MW (Demanded) at V = 1.0 p.u.)

Bs : Shunt Susceptance (MW (Injected) at V = 1.0 p.u.)

Area : Area Number

Vm : Voltage Magnitude (p.u.)

Va : Voltage Angle (Degrees)

Base kV : Base Voltage (kV)

Zone : Loss Zone

Max Vm : Maximum Voltage Magnitude (p.u.)

Min Vm : Minimum Voltage Magnitude (p.u.)

From : From Bus Number

To : To Bus Number

r : Resistance (p.u.)

x : Reactance (p.u.)

b : Total Line Charging Susceptance (p.u.)

Rate : Line Limit (MVA)

Ratio : Transformer off nominal turns ratio (=0 for lines)

(taps at 'from' bus, impedance at 'to' bus, i.e. ratio =  $V_f / V_t$ )

Angle : transformer phase shift angle (degree), positive => delay

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นายณัฐสน์ เหล่าธรรมยิ่งยง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 26 กันยายน 2526
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

