

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

Analysis of Electric Power System Connected to Gas Supply System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

Analysis of Electric Power System Connected to Gas Supply System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Electric Power System Connected to Gas Supply System



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

Analysis of Electric Power System Connected to Gas Supply System



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วรวรรณ นาคะวิโร

ดร.วรุทม์ สุอำพัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

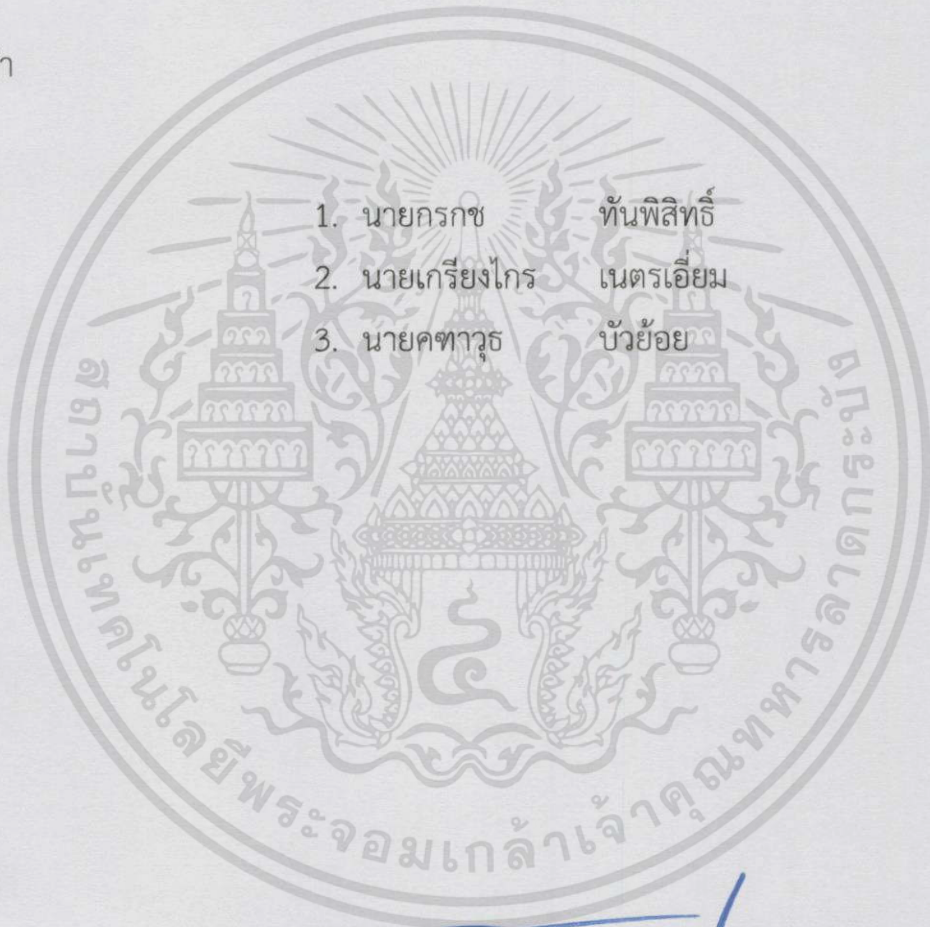
ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

ผู้จัดทำ



1. นายกรกช ทันพิสิทธิ์
2. นายเกรียงไกร เนตรเอี่ยม
3. นายคฑาวุธ บัว้อย

(ดร.วรวรรณ นาคะวิโร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วรุตม์ สุอำพัน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

นายกรกช ทันพิสิทธิ์
นายเกรียงไกร เนตรเอี่ยม
นายคฑาทูธ บัว้อย
ดร.วรวรรณ นาคะวิโร อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วรุตม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

จากการศึกษาแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย(PDP 2010) พบว่าประเภทของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เป็นโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากแก๊สธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

ปริศยานี้จึงนำเสนอการจำลองโปรแกรมสำหรับระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊สขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ผ่านกระบวนการ Interior Point Method โดยระบบตัวอย่างสำหรับกรณีศึกษาได้แก่ ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัสเชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline

จากโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาในโครงงานนี้ สามารถหาจุดดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับระบบทั้งสองที่เชื่อมต่อกันที่ส่งผลให้ต้นทุนเชื้อเพลิงการผลิตมีค่าต่ำที่สุดภายใต้ขอบเขตของการศึกษาที่ระบุไว้ อีกทั้งผลลัพธ์จากการจำลองระบบดังกล่าวสามารถนำมาวางแผนเพื่อพัฒนาการจัดการของระบบทั้งสองให้เป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

Analysis of Electric Power System Connected to Gas Supply System

Mr. Korakot Thanpisit

Mr. Kriangkrai Net-iam

Mr. Katawut Buayoi

Dr. Worawat Nakawiro Advisor

Dr. Warut Suampun Advisor

Year 2013

ABSTRACT

According to the Power Development Plan (PDP) 2010, more than 70 percent of the total electricity production in Thailand relies on natural gas as the main source of fuel. Therefore, it is necessary to have a computational tool that is able to analyze the interrelation between electrical power systems and gas supply systems.

This project presents a simulation program for analyzing the composite system of electrical power and gas supply by using Interior Point Method. The test systems used in this project consist of IEEE 14 bus for electrical power system and 20 node 24 pipeline for gas supply system.

The program developed in this project can compute the optimal operating points with the cheapest fuel cost while maintaining various constraints within their respective limits. The program can also be utilized to further improve the operation and security of both systems appropriately and effectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือสนับสนุนจาก ดร.วรวรรณ นาคะวิโร และ ดร.วรุตม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาบัตรจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอบกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ ขอบกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และผู้ที่มีพระคุณต่อคณะผู้จัดทำทุกท่าน ผู้ที่สนับสนุนในด้านการเงิน การให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
สัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วิธีจุดภายใน (INTERIOR POINT METHOD)	4
2.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าเบื้องต้น (POWER FLOW)	7
2.2.1 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Solution)	7
2.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (OPTIMAL POWER FLOW : OPF)	9
2.4 ระบบการส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ	10
2.5 การไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (OPTIMAL GAS FLOW : OGF)	13
บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบระบบจำลอง	14
3.1 บทนำ	14
3.2 การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม(OPTIMAL POWER FLOW : OPF)	14
3.3 การแก้ปัญหาการไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (OPTIMAL GAS FLOW : OGF)	15
3.4 การออกแบบระบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส	15
3.5 หลักการทำงานของโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	19
4.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (OPTIMAL POWER FLOW : OPF)	19
4.2 การไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (OPTIMAL GAS FLOW : OGF)	29
4.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส (OPTIMAL ELECTRIC POWER SYSTEM CONNECTED TO GAS SUPPLY SYSTEM)	31
4.3.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากบทความทางวิศวกรรมศาสตร์	31
4.3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองที่ได้จัดทำขึ้น	34
บทที่ 5 สรุป	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก ข้อมูลรับเข้าของระบบต่างๆ	43
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการ	50
ประวัติผู้เขียน	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทางเดินในการหาคำตอบระหว่างวิธีซิมเพล็กซ์กับวิธีจุดภายใน	4
2.2 ขั้นตอนการทำงานวิธีจุดภายในแบบพริ้มล-คูอัล	6
2.3 ตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไป	8
2.4 แบบจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ	10
2.5 ความสมดุลของระบบแก๊สที่โหนด i ใดๆ	12
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 26 บัส	14
3.2 ระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ 20 NODE 24 PIPELINE	15
3.3 ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส	16
3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการแก้ปัญหาในระบบตัวอย่าง	18
4.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดยวิธี ECONOMIC DISPATCH	19
4.2 ผลลัพธ์อัตราการไหลของกำลังไฟฟ้าและการสูญเสียในสายส่ง	23
4.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดยวิธี OPTIMAL POWER FLOW	24
4.4 ผลลัพธ์อัตราการไหลของกำลังไฟฟ้าและการสูญเสียในสายส่ง	28
4.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละโหนด	29
4.6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละท่อส่ง	30
4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม	31
4.8 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละโหนด	32
4.9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละท่อส่ง	33
4.10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม	34
4.11 ผลลัพธ์อัตราการไหลและการสูญเสียในสายส่ง	36
4.12 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละโหนด	37
4.13 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละท่อส่ง	38
ก.1 ข้อมูลพื้นฐานในแต่ละบัส	44
ก.2 ข้อมูลลักษณะการเชื่อมต่อในแต่ละบัส ค่าความต้านทาน และอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง	45
ก.3 ข้อมูลราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง	46
ก.4 ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า	46
ก.5 ข้อมูลพื้นฐานในแต่ละบัส	46
ก.6 ข้อมูลลักษณะการเชื่อมต่อในแต่ละบัส ค่าความต้านทาน และอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง	47
ก.7 ข้อมูลราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.8 ข้อมูลขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า	47
ก.9 ข้อมูลการบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบัสที่เชื่อมต่อกันของทั้งสองระบบ	47
ก.10 ข้อมูลขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส	47
ก.11 ข้อมูลบัสและโนดที่เชื่อมต่อกันของระบบทั้งสอง	47
ก.12 ข้อมูลพื้นฐานในแต่ละโนด	48
ก.13 ข้อมูลราคาเชื้อเพลิงที่แหล่งผลิตแก๊ส	48
ก.14 ข้อมูลลักษณะการเชื่อมต่อในแต่ละโนด	49



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำโครงการ

3



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
S_i	ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัส i
P_i	ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
Q_i	ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส i
V_i	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนด i
I_i	ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหนด i
Y_{bus}	แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์
n	จำนวนบัสทั้งหมดในระบบไฟฟ้า
θ_{ij}	มุมของแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ที่แถว i หลัก j
δ_i	มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
a_i, b_i, c_i	ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของราคาเชื้อเพลิงในการผลิตที่บัส i
$P_{G,i}$	ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
$P_{L,i}$	ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
$Q_{G,i}$	ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
$Q_{L,i}$	ค่าความต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส i
N_B	จำนวนของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
N_{Be}	จำนวนของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ ยกเว้น เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติ
N_N	จำนวนโหนดทั้งหมดในระบบแก๊ส
N_s	จำนวนโหนดที่เป็นแหล่งผลิตแก๊ส
p_i	ความดันที่โหนด i
s_i	พลังงานที่จัดหาได้ที่โหนด i
g_i	ราคาต้นทุนการผลิตแก๊สต่อลูกบาศก์เมตรที่โหนด i
f_{ij}	อัตราการไหลของแก๊สจากโหนด i ไปยังโหนด j
C_{ij}	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อส่ง

A_p	จำนวนท่อส่งแก๊สที่มีลักษณะการส่งจ่ายแก๊สแบบ passive
A_a	จำนวนท่อส่งแก๊สที่มีลักษณะการส่งจ่ายแก๊สแบบ active
e_i	ความสัมพันธ์ของการบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโนด i
\emptyset	เซตของลักษณะการเชื่อมต่อท่อส่งมีมิติ $N_N \times N_N$
$K_{2,i}, K_{1,i}, K_{0,i}$	ค่าสัมประสิทธิ์ของแก๊สโนด i



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยได้มีอัตราการการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี อันเป็นผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องสร้างโรงงานไฟฟ้าสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน แต่ถึงกระนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับนำมาผลิตกระแสไฟฟ้ามีจำนวนจำกัด อีกทั้งเพื่อรองรับนโยบายเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานไฟฟ้าของกระทรวงพลังงาน จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนสำหรับการก่อสร้างโรงงานไฟฟ้าล่วงหน้า เพื่อเป็นการจัดหาพลังงานไฟฟ้าระยะยาวให้เพียงพอต่อการพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจและสังคม เนื่องจากในการสร้างโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าดังกล่าวต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3-5 ปี ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบันประเทศไทยอยู่ในมาตรการแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP2010) ซึ่งเป็นแผนการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในอนาคต 15-20 ปี [1] โดยแผนการดังกล่าวจะมีการทบทวนและปรับปรุงอยู่เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการและสถานะเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลง

จากการศึกษาแผน PDP 2010 นั้นพบว่าประเภทของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เป็นโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากแก๊สธรรมชาติ จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าประเทศไทยมีการพึ่งพาแก๊สธรรมชาติในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นอย่างมาก อีกทั้งแก๊สธรรมชาติบางส่วนได้มีการนำเข้ามาจากประเทศเพื่อนบ้าน [2] จึงสามารถสรุปได้ว่า สำหรับประเทศไทยการจ่ายโหลดชนิดโหลดพื้นฐานจะใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแก๊สธรรมชาติมาเป็นตัวจ่ายกำลัง ดังนั้นจึงควรมีโปรแกรมจำลองสำหรับการศึกษาระบบกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบการจ่ายแก๊ส เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบมาทำการวิเคราะห์เพื่อให้การจัดการของระบบไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและช่วยให้สามารถวางแผนพัฒนาการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถนำโปรแกรมจำลองดังกล่าวมาช่วยในการคำนวณเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้ากับการจ่ายแก๊สธรรมชาติ โดยนำหลักเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อให้ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงรวมของทั้งระบบที่ได้มีค่าต่ำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาระบบกำลังไฟฟ้ากับระบบการส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าและการส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ
3. เพื่อเป็นแบบจำลองสำหรับการวางแผนพัฒนาการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาาระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบการส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติของระบบตัวอย่าง IEEE 14 บัสที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline
2. ศึกษาแบบจำลองของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB
3. ศึกษาหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้ากับการจ่ายแก๊สธรรมชาติโดยกระบวนการ Interior Point Method
4. สำหรับการออกแบบระบบจำลองของการจ่ายแก๊สธรรมชาติ จะไม่นำนำสมการของคอมเพรสเซอร์และลักษณะการวางท่อขนส่งแก๊สมาพิจารณา

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

ศึกษาทฤษฎีและเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้กระบวนการ Interior Point Method ในการแก้ปัญหา

1. ระบบไฟฟ้า
2. ระบบแก๊ส
3. ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบแก๊ส

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2556							พ.ศ. 2557	
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า									
2.ศึกษาการหาจุดที่เหมาะสมด้วยการ Optimization โดยกระบวนการ Interior Point Method									
3.ศึกษาและเขียนโปรแกรมการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า									
4.ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับระบบการส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ									
5.ศึกษาและเขียนโปรแกรมการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการส่งจ่ายของระบบแก๊สธรรมชาติ									
5.ศึกษาและเขียนโปรแกรมการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมต่อกันของทั้ง 2 ระบบเพื่อนำมาวิเคราะห์									
6.จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ทำให้เข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการเขียนโปรแกรมสำหรับหาจุดที่เหมาะสมร่วมของทั้งสองระบบ
2. สามารถนำผลที่ได้จากการจำลองระบบมาทำการวิเคราะห์เพื่อให้การจัดการของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถนำมาร่วมพิจารณาเพื่อวางแผนพัฒนาและการสร้างโรงงานไฟฟ้าล่งหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปวิจัยความสัมพันธ์ของระบบทั้งสองแก่นักวิจัยรุ่นต่อไป

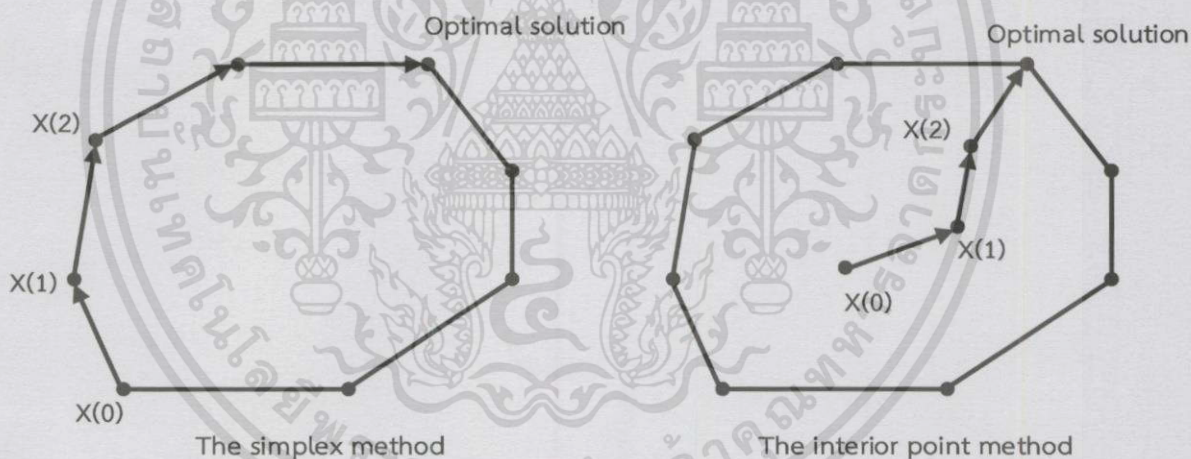
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีจุดภายใน (Interior Point Method)

วิธีจุดภายใน [3] เป็นการแก้ปัญหาเชิงเส้นวิธีการหนึ่ง ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย N.K.Karmarkar ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีการคำนวณที่ซับซ้อนสำหรับสัดส่วนขนาดใหญ่ของการแก้ปัญหา กำหนดการเชิงเส้น โดยเริ่มต้นที่จุดเริ่มต้นในบริเวณที่เป็นไปได้ จากนั้นในแต่ละรอบการหมุน จะหาทิศทางที่ปรับปรุงค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และพิสูจน์เงื่อนไขของเส้นตรง จนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีขีดความสามารถดีกว่าการแก้ปัญหาเชิงเส้นแบบเดิมที่เรียกว่า วิธีซิมเพลกซ์ (Simplex method) การทำซ้ำของวิธีจุดภายในเร็วกว่าวิธีซิมเพลกซ์ถึง 50 เท่า รูปแบบทางเดินการทำซ้ำในการหาคำตอบของวิธีจุดภายในจะเดินอยู่ภายในโดเมนคำตอบรูปหลายเหลี่ยมที่เป็นไปได้จากพฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายมาเป็นที่มาของชื่อวิธีนี้เองซึ่งแตกต่างจากวิธีซิมเพลกซ์ที่จะเดินบนขอบของโดเมนคำตอบรูปหลายเหลี่ยมที่เป็นไปได้ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ทางเดินในการหาคำตอบระหว่างวิธีซิมเพลกซ์กับวิธีจุดภายใน

วิธีจุดภายในแบบปริมาตร-คูอัล อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างวิธีจุดภายในสเกล สอดคล้อง (Affine scaling interior point method) กับทฤษฎีคูอัล (Dual theory) ดังรูปแบบสมการต่อไปนี้

ปัญหาปริมาตร

$$\text{Minimize } c^T x \quad (2.1)$$

$$\text{s.t. } Ax = b, x \geq 0 \quad (2.2)$$

ปัญหาควอล

$$\text{Maximize } b^T w \quad (2.3)$$

$$\text{s.t. } A^T w + s = c, s \geq 0, w \quad (2.4)$$

ในการแก้ปัญหาแบบปริมาตร-ควอลเพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมนั้น จะได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าที่ซึ่งอยู่บนขอบ และเพื่อแก้ปัญหานี้ เราจะทำการเพิ่มฟังก์ชันขวางกั้น (Barrier problem) เข้าไปในฟังก์ชันจุดประสงค์เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นอยู่บนขอบ

วิธีจุดภายในแบบปริมาตร-ควอลมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกกำหนดจุดเริ่มต้นของตัวแปรปริมาตรและตัวแปรควอลให้สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.3) ตามลำดับ โดยสมการที่ใช้คำนวณหาจุดเริ่มต้นของตัวแปรได้จาก [4] จากนั้นคำนวณหาทิศทางในการเคลื่อนที่ โดยการประยุกต์ใช้ตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange multiplier) ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เราจะเรียกเงื่อนไขนี้ว่า Karush Kuhn-Tucker (KKT) โดยพิจารณาฟังก์ชันลากรางจ์ สำหรับปัญหาดังสมการต่อไปนี้

$$L(x, w, s) = b^T w + \mu \sum_j \ln(s_j) - x^T (A^T w + s - c) \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.5) จะได้ตั้งสมการสมการที่ (2.6) และวิธี Newton ตั้งสมการที่ (2.7) - (2.9)

$$x^T s = \mu \quad (2.6)$$

$$A(x + \Delta x) = b \quad (2.7)$$

$$A^T (w + \Delta w) + (s + \Delta s) = c \quad (2.8)$$

$$(x_j + \Delta x_j) + (s_j + \Delta s) = \mu \quad (2.9)$$

จัดรูปสมการที่ (2.7) - (2.9) ใหม่ได้ตั้งสมการที่ (2.10) - (2.11) จากนั้นแก้สมการหาค่า $\Delta w, \Delta s, \Delta x$

$$A \Delta x = b - Ax \equiv r_p \quad (2.10)$$

$$A^T \Delta w + \Delta s = c - A^T w - s \equiv r_D \quad (2.11)$$

$$S \Delta x + X \Delta s = \mu e - X S e \equiv v(\mu) \quad (2.12)$$

เมื่อ S, X, e, D เป็นเมตริกซ์เส้นทแยงมุมของเวกเตอร์ตัวแปรปริมาตรกับตัวแปรควอล เวกเตอร์ที่มีสมาชิกทุกตัวมีค่าเท่ากับ 1 และ $D = S^{-1} X$ ตามลำดับ

$$\Delta w = -(ADA^T)^{-1} [AS^{-1}v(\mu) - AD r_D - r_p] \quad (2.13)$$

$$\Delta s = -A^T \Delta w + r_D \quad (2.14)$$

$$\Delta x = S^{-1}v(\mu) - D \Delta s \quad (2.15)$$

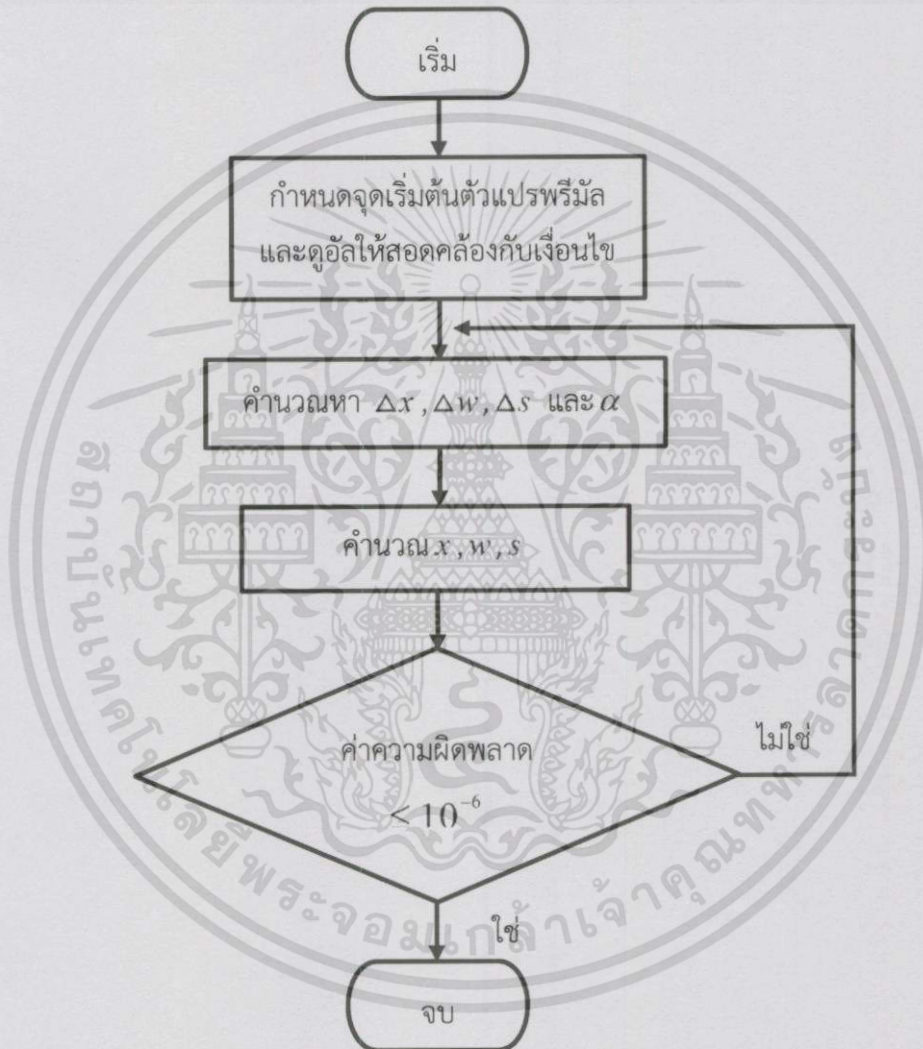
$$x^{k+1} = x^k + \alpha \Delta x \quad (2.16)$$

$$w^{k+1} = w^k + \alpha \Delta w \quad (2.17)$$

$$s^{k+1} = s^k + \alpha \Delta s \quad (2.18)$$

ขณะที่ตัวแปร r_p, r_D เป็นค่าเหลือ(Residual value) จากการคำนวณสมการเงื่อนไขของปัญหา ปริมาณและดูล ส่วนค่าเวกเตอร์ $\Delta w, \Delta s, \Delta x$ เป็นทิศทางในการเคลื่อนที่ เราจะอาศัยค่าเวกเตอร์ เดิมของตัวแปรปริมาตรกับดูลรวมกับเวกเตอร์ทิศทาง $\Delta w, \Delta s, \Delta x$ เพื่อหาค่าใหม่ของ $w^{k+1}, s^{k+1}, x^{k+1}$ ดังสมการที่ (2.16) - (2.18)

จากลำดับขั้นตอนที่ได้อธิบายมาข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นแผนผังการทำงาน ของวิธีจุดภายในแบบปริมาตร-ดูล ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการทำงานวิธีจุดภายในแบบปริมาตร-ดูล

โดยค่าตัวแปร α ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการลู่เข้าสู่คำตอบ หาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.19) - (2.22)

$$\alpha_p = \min(-x_j / \Delta x_j) \mid \Delta x_j < 0 \quad (2.19)$$

$$\alpha_D = \min(-s_j / \Delta s_j) \mid \Delta s_j < 0 \quad (2.20)$$

$$\alpha_{\max} = \min(\alpha_p, \alpha_D) \quad (2.21)$$

$$\alpha = 0.99999\alpha_{\max} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าเบื้องต้น (Power Flow)

ระบบไฟฟ้ากำลัง [5] ประกอบด้วย ระบบกำเนิดไฟฟ้าส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านระบบสายส่งเมื่อระบบได้มีการกำหนดขนาดของโหลดที่จุดต่างๆในระบบมาให้ ก่อนจะศึกษาเกี่ยวกับการไหลของกำลังไฟฟ้าควรผ่านการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายแรงดันจากกระบวนการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) เพื่อหาว่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรมีค่าเท่าใดเพื่อให้ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงรวมทั้งระบบให้มีค่าที่ต่ำที่สุด

เมื่อได้ขนาดกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องที่ประหยัดที่สุดแล้วก็นำมาคำนวณว่าค่าความสูญเสียจากระบบสายส่งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเพียงใดและระบบไฟฟ้าดังกล่าวต้องมีการกำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าของบัสที่ต่อเครื่องกำเนิดอยู่ เพื่อพิจารณาว่ามีค่าเกินกว่าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายให้ได้หรือไม่อีกทั้งยังทำให้ทราบถึงค่าตัวแปรต่างๆของระบบที่พิจารณา

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าประโยชน์ของการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ข้อใหญ่ คือ ทำให้ทราบตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยขนาดและมุมเฟสของแรงดันทุกบัสในระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การหาตัวแปรระบบอื่นๆได้ เช่น กำลังที่ไหลในสายส่ง กำลังสูญเสีย เป็นต้น นอกจากนี้การศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้ายังเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวางแผนการขยายระบบไฟฟ้าในอนาคต เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

2.2.1 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Solution)

พิจารณาที่บัสของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 2.1 โดยสายส่งแสดงอยู่ในรูปแบบวงจรสมมูลแบบ π และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดอยู่ในรูปของตัวผกผันหรือแอดมิตแตนซ์โดยมีหน่วยเป็นเปอร์ยูนิต ซึ่งอยู่ภายใต้ฐานกำลังไฟฟ้าเดียวกัน จะได้สมการกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) ดังนี้

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.23)$$

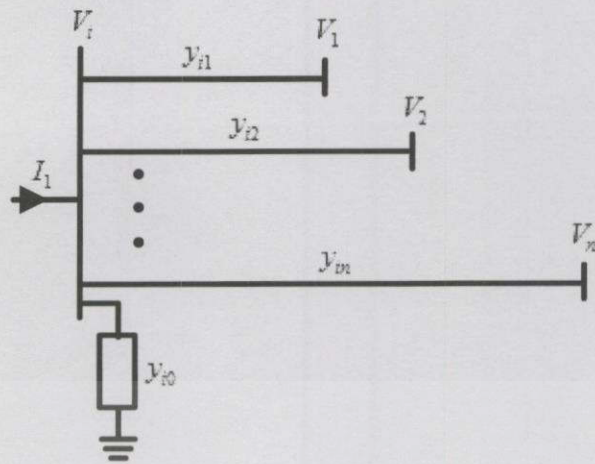
$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.24)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.25)$$

จากสมการเมทริกซ์ $[I_{bus}] = [Y_{bus}][V_{bus}]$ สามารถนำมาเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่บัส i ใดๆ คือ I_i ได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่มี n บัส

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ii}V_i + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไป

จากรูปที่ 2.3 จะได้สมการกระแสที่บัส i ใดๆ จากสมการที่ (2.26) สามารถนำมาเขียนในรูปของสมการเชิงขั้วได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.27)$$

เมื่อ θ_{ij} คือ มุมของเวกเตอร์ Y_{bus} ที่แถว i คอลัมน์ที่ j หน่วยเป็นเรเดียน

δ_j คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j ใดๆ

จากสมการที่ (2.24)

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i$$

จะได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปเชิงขั้วดังนี้

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.28)$$

เมื่อแยกพิจารณาในส่วนของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ จะได้ว่า

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.29)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad (2.30)$$

2.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow : OPF)

เมื่อมาพิจารณาการแก้ปัญหาการกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Power Flow Solution จะพบว่าวิธีข้างต้น เป็นเพียงการหาค่าสถานะของตัวแปรต่างๆในระบบ ให้มีค่าสอดคล้องกับค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าและค่ากำลังการผลิตในแต่ละบัสที่กำหนดให้ โดยมีได้พิจารณาถึงราคาต้นทุนในการผลิต เพราะฉะนั้นจึงมีกระบวนการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch : ED) [6] เข้ามาช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรสถานะที่เหมาะสมของทั้งระบบ ที่ส่งผลให้ค่าราคาต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำที่สุด แต่กระบวนการดังกล่าวไม่ได้มีการพิจารณาถึงข้อจำกัดของตัวแปรควบคุมในระบบ ดังนั้นจึงมีกระบวนการ OPF เข้ามารองรับข้อบกพร่องดังกล่าว โดยเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ ED และ OPF มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าค่ากำลังสูญเสียและต้นทุนการผลิตที่ได้จากวิธีที่สองจะมีค่าที่ต่ำกว่า ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงดังบทที่ 4

จากข้อความข้างต้นจะพบว่าการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (OPF) [7] นั้นมุ่งเน้นไปเพื่อต้องการให้ค่าต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจะนิยามฟังก์ชันที่ต้องการทำให้มีค่าต่ำที่สุดว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ อีกทั้งการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวผลลัพธ์ของการคำนวณจะถูกควบคุมโดยสมการขอบเขตของตัวแปรควบคุมและสมการข้อจำกัดต่างๆ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ออกมามีความสอดคล้องกันในระบบและมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ดังนั้นสมการที่ใช้ทั้งหมดในการแก้ปัญหาดังกล่าวจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

ก. สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$\sum_{i \in N_B} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (2.31)$$

เมื่อ a_i , b_i และ c_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของราคาเชื้อเพลิงในการผลิตที่บัส i

ใดๆ

ข. สมการขอบเขตของตัวแปรควบคุม

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (2.32)$$

$$\delta_{i,\min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,\max} \quad (2.33)$$

$$P_{G_{i,\min}} \leq P_{G_i} \leq P_{G_{i,\max}} \quad (2.34)$$

$$Q_{G_{i,\min}} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_{i,\max}} \quad (2.35)$$

ค. สมการข้อจำกัดของปัญหา

นำเสนอด้วยสมการที่ (2.29) และ (2.30) ซึ่งเป็นสมการที่ส่งผลให้ตัวแปรต่างๆในระบบมีความสอดคล้องกัน

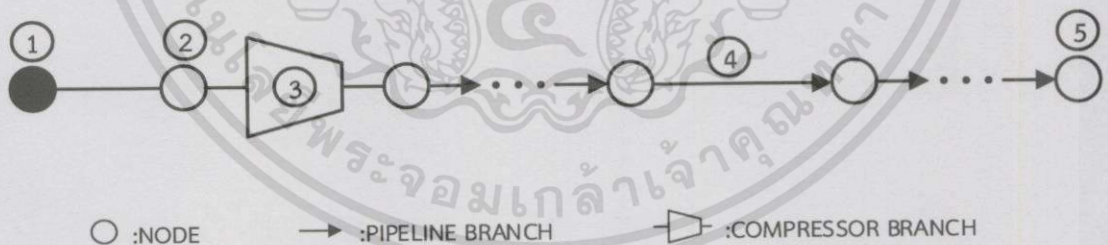
จากสมการที่ (2.29) และ (2.30) จะเป็นสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณสำหรับกระบวนการ Optimization เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ในระบบให้เหมาะสมที่สุดที่ทำให้สมการวัตถุประสงค์หรือสมการที่ (2.31) นั้นมีค่าต่ำสุด ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของสมการ (2.32), (2.33), (2.34) และ (2.35)

2.4 ระบบการส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติจะถูกส่งมาจากผู้ผลิตแก๊สให้กับลูกค้าในสถานที่ต่างๆระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติโดยทั่วไปประกอบด้วยผู้ผลิตแก๊ส ลูกค้า สถานีคอมเพรสเซอร์ และท่อส่ง

ระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติโดยทั่วไป การส่งจ่ายไปยังผู้บริโภคจะสอดคล้องกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละวัน ในการส่งจ่ายจะต้องมีการเพิ่มความดันภายในท่อ เพราะในขณะที่มีการไหลภายในท่อส่งจะเกิดสูญเสียความดันแก๊สอันเนื่องมาจากการเกิดแรงเสียดทานระหว่างแก๊สและผนังภายในท่อส่ง นอกจากนี้พลังงานจะสูญเสียไปจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สและสภาพแวดล้อม เพื่อชดเชยการสูญเสียของพลังงานและเพื่อรักษาอัตราการไหลของแก๊สธรรมชาติ จึงได้มีการติดตั้งสถานีคอมเพรสเซอร์เข้าไปในระบบ

วัตถุประสงค์ คือการสร้างแบบจำลองพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ [8] ดังรูปที่ 2.4 โดยจะพิจารณาสมการการไหลของแก๊ส ส่วนสถานีคอมเพรสเซอร์จะเป็นตัวที่ใช้กำหนดทิศทางการไหลของแก๊สธรรมชาติ ซึ่งจะไม่ขึ้นกับความดันระหว่างโนด แต่ปริยณานิพนธ์นี้จะศึกษาแบบจำลองอย่างง่าย โดยไม่พิจารณาลักษณะการวางท่อส่งแก๊สและสมการคอมเพรสเซอร์



รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ

สิ่งที่นำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ นั้นจะประกอบไปด้วย

หมายเลข 1 แสดงแหล่งผลิตแก๊สธรรมชาติ

หมายเลข 2 แสดงผู้ผลิต หรือผู้ส่งจ่ายแก๊ส

หมายเลข 3 แสดงท่อส่งแก๊สที่มีการติดตั้งสถานีคอมเพรสเซอร์เข้าไปเพื่อใช้ในการกำหนดทิศทางการไหลของแก๊ส ซึ่งจะไม่ขึ้นกับความดันระหว่างโนด โดยการไหลของแก๊สจะมีทิศทางที่แน่นอนเรียกว่า การส่งจ่ายแก๊สแบบ active

หมายเลข 4 แสดงท่อส่งแก๊สที่ไม่มีการติดตั้งสถานีคอมเพรสเซอร์เข้าไป โดยทิศทางการไหลของแก๊สขึ้นอยู่กับความดันระหว่างโนดเรียกว่า การส่งจ่ายแก๊สแบบ passive

หมายเลข 5 แสดงผู้บริโภคน้ำมัน

สำหรับอัตราการไหลของแก๊ส f_{ij} ที่ไหลผ่านในแต่ละท่อส่ง [9] ค่าอัตราการไหลของแก๊สจะขึ้นอยู่กับความดันแก๊สระหว่างโนด 2 โหนดซึ่งมีเงื่อนไขว่า การส่งจ่ายแก๊สจากผู้ผลิตไม่สามารถที่จะส่งจ่ายแก๊สที่มีแรงดันสูงเกินกว่าที่ต้นผลิตได้ ในทางกลับกันการส่งจ่ายแก๊สไปยังลูกค้าก็ต้องควบคุมความดันแก๊สไม่ให้มีค่าต่ำกว่าปลายทางไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถส่งจ่ายไปยังปลายทางแบบปกติได้ ดังนั้นค่าความดันแก๊สที่เลือกใช้ควรมีค่าสอดคล้องกับผู้รับและผู้จ่ายดังนี้

$$p_{i,\min} \leq p_i \leq p_{i,\max}; \forall i \in N_N \quad (2.36)$$

ซึ่งลักษณะการส่งจ่ายแก๊สผ่านท่อส่งจ่ายจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะดังที่ได้กล่าวไว้คือ แบบ passive และแบบ active โดยแบบ passive จะเปรียบเสมือนกับท่อส่งจ่ายแก๊สธรรมดาทั่วไปซึ่งไม่สามารถบังคับทิศทางการไหลของแก๊สได้ โดยจะขึ้นอยู่กับความดันระหว่างโนด ส่วนแบบ active ลักษณะการส่งจ่ายแก๊สจะเสมือนมีสถานีคอมเพรสเซอร์ติดตั้งอยู่ที่ท่อส่งจ่ายทำให้การไหลมีทิศทางที่แน่นอน ซึ่งคอมเพรสเซอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเพิ่มความดันแก๊ส

ในกรณีที่ลักษณะการไหลของแก๊สผ่านท่อส่งเป็นแบบ passive ค่าของอัตราการไหลจากโนด i ไปยังโนด j ใดๆ f_{ij} จะอยู่ในรูปของสมการกำลัง 2 ของความดันแก๊สที่โนดนั้นๆ

$$f_{ij}^2 = C_{ij}^2(p_i^2 - p_j^2); \forall (i, j) \in A_p \quad (2.37)$$

เมื่อ C_{ij} คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อส่ง (ความยาวท่อ, เส้นผ่านศูนย์กลาง) และขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของแก๊ส สำหรับลักษณะการไหลของแก๊สแบบ passive จะไม่สนใจเครื่องหมาย ถ้า $f_{ij} \geq 0$ แก๊สจะไหลจากโนด i ไปยังโนด j แต่ถ้า $f_{ij} \leq 0$ แก๊สจะไหลจากโนด j ไปยังโนด i

ถ้าลักษณะการไหลของแก๊สผ่านท่อส่งเป็นแบบ active สมการความสัมพันธ์ของอัตราการไหลยังเป็นสมการกำลัง 2 ของความดันเช่นเดียวกับ แบบ passive แต่กรณีนี้ความดันที่เข้าสู่โนด i (or j) จะต่ำกว่าความดันที่ออกจากโนด j ($p_i < p_j$) และแก๊สที่ไหลจากโนด i ไปยังโนด j ($f_{ij} \geq 0$) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_{ij}^2 \geq C_{ij}^2(p_i^2 - p_j^2); \forall (i, j) \in A_a \quad (2.38)$$

เมื่อค่าคงที่ C_{ij} ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ(ความยาวท่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง) และขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของแก๊สกับคุณลักษณะของคอมเพรสเซอร์ที่ต่อเข้ากับท่อส่งจ่ายสำหรับการทิศทางไหลจะมีทิศทางที่แน่นอน

$$f_{ij} \geq 0; \forall (i, j) \in A_a \quad (2.39)$$

สำหรับความสมดุลของระบบแก๊สที่โนด i ใดๆ นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสมดุลของระบบแก๊สที่โนด i ใดๆ

จากรูปที่ 2.5 สามารถเขียนสมการการไหลของแก๊สได้ดังนี้

$$s_i + \sum_{j(j,i) \in \emptyset} f_{ji} = d_i + e_i(P_{G,k}) + \sum_{j(j,i) \in \emptyset} f_{ij}; \forall (i, j) \in N_N \quad (2.40)$$

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า ความต้องการพลังงานที่โนด i กับผลรวมอัตราการไหลของแก๊สจากโนด j ไปยังโนด i ใดๆ มีค่าเท่ากับความต้องการพลังงานที่โนด i การบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโนด i และผลรวมอัตราการไหลของแก๊สจากโนด i ไปยังโนด j ใดๆ โดยค่าความสัมพันธ์ของการบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (e_i) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$e_i(P_{G,i}) = K_{2,i}P_{G,i}^2 + K_{1,i}P_{G,i} + K_{0,i}; \forall i \in N_N \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (Optimal Gas Flow : OGF)

การไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (Optimal Gas Flow) [10] นั้นได้แนวคิดมาจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (OPF) และได้นำมาประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายแก๊ส เพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างโหนดต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดในการส่งจ่ายแก๊สจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยวิเคราะห์ทิศทางการไหลของแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส ความดัน และพลังงานที่จัดหาได้ในแหล่งผลิต โดยอาศัยแนวคิดเบื้องต้นคือ การหาวิธีการส่งจ่ายแก๊สที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้ราคาต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตต่างๆ ของระบบส่งจ่ายแก๊ส

ดังนั้นสมการที่ใช้ทั้งหมดในการแก้ปัญหาดังกล่าวจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

ก. สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$\sum_{i \in N_s} g_i s_i \quad (2.42)$$

ข. สมการขอบเขตของตัวแปรควบคุม

$$s_{i,min} \leq s_i \leq s_{i,max} ; \forall i \in N_s \quad (2.43)$$

กับสมการที่ (2.36) และ (2.39)

ค. สมการข้อจำกัดของปัญหา

นำเสนอด้วยสมการที่ (2.40) เป็นสมการที่ส่งผลให้ตัวแปรต่างๆ ในระบบมีความสอดคล้องกัน และสมการที่ (2.37), (2.38) และ (2.41) จะใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ในระบบส่งจ่ายแก๊ส

บทที่ 3

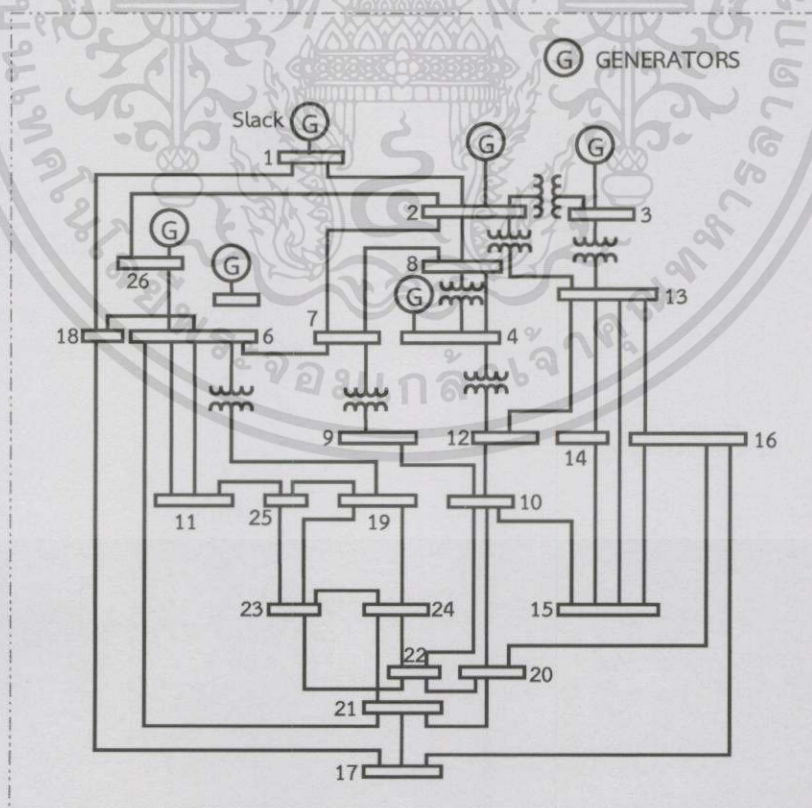
หลักการงานและการออกแบบระบบจำลอง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบระบบจำลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายแก๊ส โดยวิธี Interior Point Method ซึ่งกระบวนการดังกล่าว เป็นการสุ่มค่าเริ่มต้นในแต่ละรอบของการคำนวณเพื่อหาค่าที่ทำให้สมการวัตถุประสงค์ที่ได้มีค่าต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ โดยระบบตัวอย่างที่ใช้ ได้แก่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า IEEE 26 บัส [6] ระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline [9] และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า IEEE 14 บัส [11] เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline

3.2 การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow : OPF)

รูปที่ 3.1 แสดงระบบไฟฟ้าตัวอย่าง IEEE 26 บัส ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา โดยระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 6 บัส ได้แก่ บัสที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 26

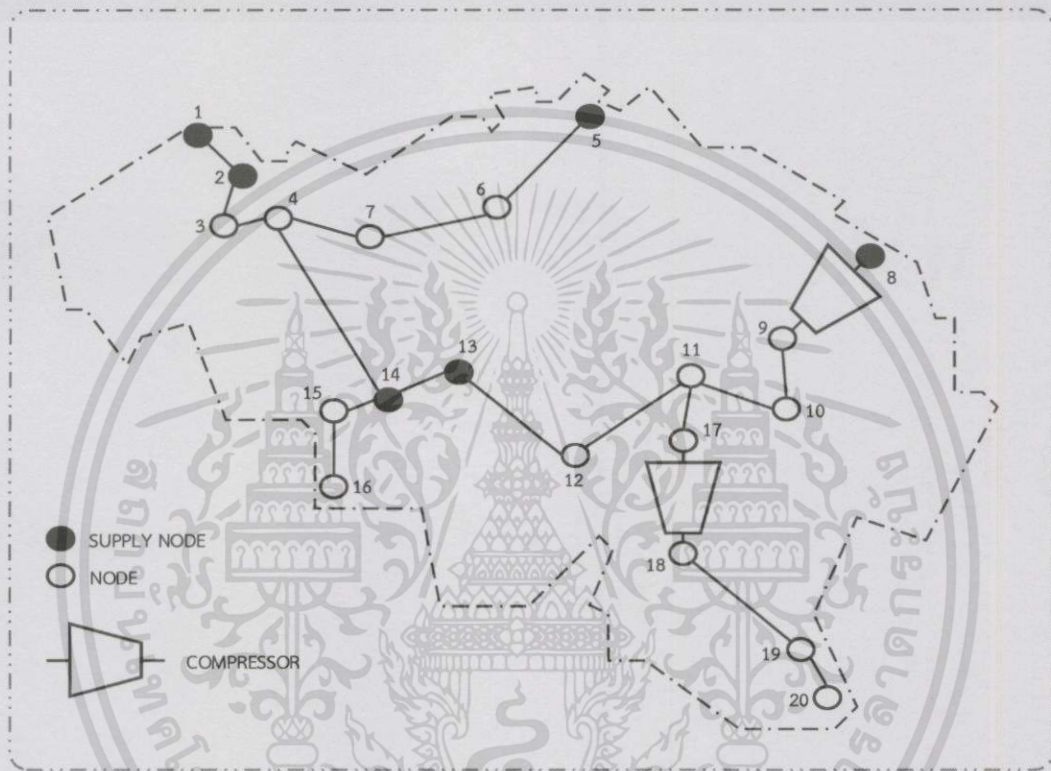


รูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 26 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การแก้ปัญหาการไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (Optimal Gas Flow : OGF)

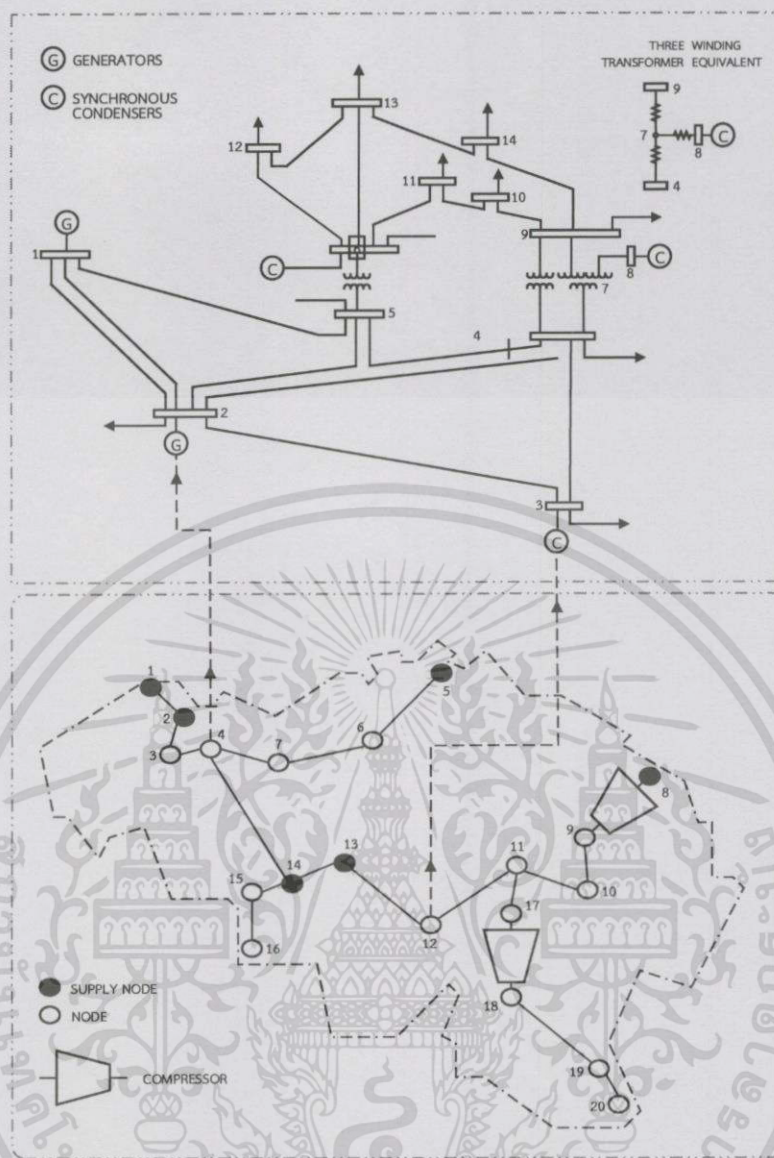
รูปที่ 3.2 แสดงระบบตัวอย่างระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ 20 node 24 pipeline ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา โดยระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยแหล่งผลิตแก๊สธรรมชาติทั้งหมด 6 โหนด ได้แก่ โหนดที่ 1, 2, 5, 8, 13 และ 14 และมีลักษณะการไหลของแก๊สผ่านท่อเป็นแบบ active 3 ท่อและ passive 21 ท่อ โดยการศึกษาการระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาตินี้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไข ไม่พิจารณาสมการของคอมเพรสเซอร์และลักษณะการวางท่อส่งจ่าย



รูปที่ 3.2 ระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ 20 node 24 pipeline

3.4 การออกแบบระบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

รูปที่ 3.3 แสดงระบบตัวอย่างระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัสที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา โดยระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 5 บัส ได้แก่ บัสที่ 1, 2, 3, 4 และ 8 โดยที่มีบัส 2 และ 3 เชื่อมต่ออยู่กับระบบแก๊สที่โหนด 4 และ 12 ตามลำดับ โดยระบบแก๊สจะประกอบไปด้วยแหล่งผลิตแก๊สธรรมชาติทั้งหมด 6 โหนด ได้แก่ โหนดที่ 1, 2, 5, 8, 13 และ 14 มีลักษณะการไหลของแก๊สผ่านท่อส่งเป็นแบบ active 3 ท่อและแบบ passive 21 ท่อ โดยระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาตินี้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไข ไม่พิจารณาสมการของคอมเพรสเซอร์และลักษณะการวางท่อส่งจ่ายซึ่งจากข้อมูลข้างต้น เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกันบนระบบเดียว จะได้ระบบตัวอย่างสำหรับกรณีศึกษาดังกล่าว



รูปที่ 3.3 ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

รูปที่ 3.3 เมื่อนำมาพิจารณาภายใต้ขอบเขตการศึกษาที่ไม่มีการนำสมการคอมเพรสเซอร์มาคำนวณร่วม จะได้สมการสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้ราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงมีค่าต่ำที่สุดได้ดังต่อไปนี้

ก. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์(Objective function)

$$f = \left(\sum_{i \in N_{Be}} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \right) + \sum_{i \in N_s} g_i s_i \quad (3.1)$$

จะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นราคาของต้นทุนการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส และส่วนที่ 2 เป็นราคาต้นทุนของระบบการจ่ายแก๊สธรรมชาติ เนื่องจากเราต้องการทำให้ราคาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด จึงกำหนดให้สมการดังกล่าวเป็นสมการวัตถุประสงค์ของระบบที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. สมการกำหนดขอบเขตของตัวแปรควบคุม

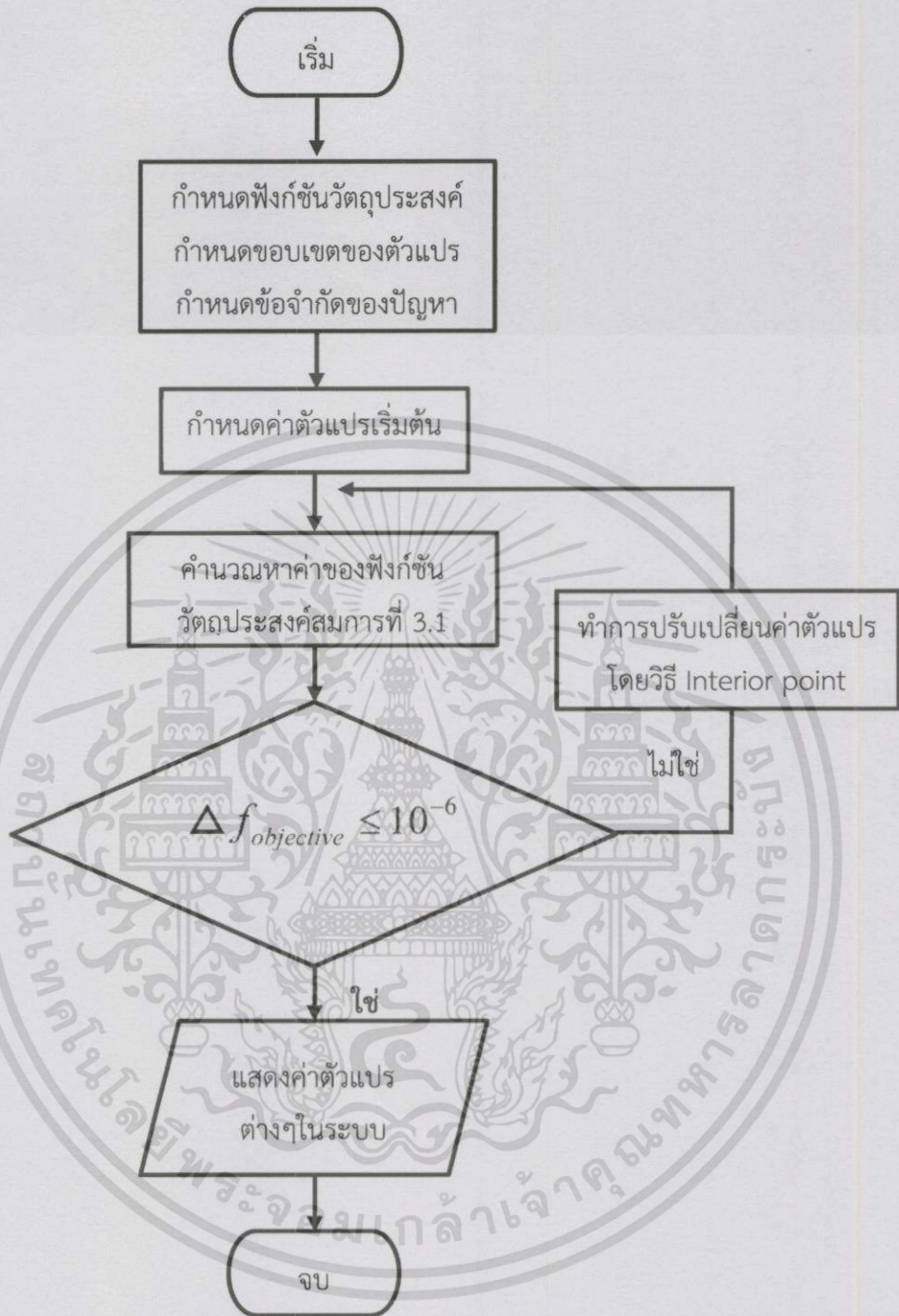
แบ่งเป็น ฝั่งระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ สมการที่ (2.32) , (2.33), (2.34) และ (2.35) เป็นสมการกำหนดขอบเขตบนและล่าง ของแรงดันที่บัส มุมเฟสของแรงดัน กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าที่ผ่านการ Optimization ออกมามีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว และฝั่งระบบแก๊ส ได้แก่ สมการที่ (2.43), (2.36) และ (2.39) เป็นสมการกำหนดขอบเขตบนและล่าง ของค่าพลังงานที่จัดหาได้กับค่าความดันที่โนดนั้นๆ และเป็นสมการกำหนดให้ค่าอัตราการไหลของแก๊สมีค่าเป็นบวกเสมอ ตามนิยามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นตามลำดับ

ค. สมการข้อจำกัดของปัญหา

แบ่งเป็น ฝั่งระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ สมการที่ (2.29) และ (2.30) ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ กับค่าตัวแปรต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังตามลำดับ และฝั่งระบบแก๊ส ได้แก่ สมการที่ (2.37) , (2.38) ซึ่งเป็นสมการแสดงการไหลของแก๊สผ่านท่อส่งในลักษณะ passive และ active ตามลำดับ ซึ่งเครื่องหมายขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของแก๊สธรรมชาติ ซึ่งจะแสดงค่าเพียง 1 หรือ -1 เท่านั้นและสมการที่ (2.40) ซึ่งเป็นสมการแสดงกฎอนุรักษ์พลังงานของระบบแก๊ส และยังเป็นสมการที่เชื่อมความสัมพันธ์ของระบบทั้งสอง

3.5 หลักการทำงานของโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

หลักการทำงานของโปรแกรม เริ่มจากการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือฟังก์ชันที่เราต้องการให้ค่าที่ได้ออกมามีค่าต่ำที่สุด ซึ่งในแบบจำลองดังกล่าวจะกำหนดให้สมการราคาต้นทุนการผลิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ อีกทั้งยังต้องกำหนดขอบเขตของตัวแปรควบคุมและกำหนดข้อจำกัดของปัญหาต่างๆ เพื่อให้ผลลัพธ์ของตัวแปรมีความสัมพันธ์กันตามสมการและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ขั้นต่อมาต้องกำหนดค่าตัวแปรควบคุมเริ่มต้นสำหรับกระบวนการคำนวณในรอบแรก หลังจากกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้น โปรแกรมจะดำเนินการคำนวณเพื่อหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในการคำนวณรอบต่อไปถ้าค่าผลต่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Δf) มีค่าต่ำกว่า 10^{-6} โปรแกรมจะหยุดกระบวนการคำนวณซ้ำ และแสดงผลค่าตัวแปรต่างๆของระบบ เป็นอันจบขั้นตอนการคำนวณ แต่กรณีที่มีผลลัพธ์จากผลต่างดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด โปรแกรมจะดำเนินการกระบวนการทำซ้ำ โดยจะสุ่มค่าตัวแปรควบคุมเริ่มต้นค่าใหม่ และทำการวนลูปเหมือนเดิมจนกว่าจะได้ค่าตัวแปรควบคุมที่ส่งผลให้ ผลต่างของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบก่อนหน้าการคำนวณกับรอบปัจจุบันมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการแก้ปัญหาระบบตัวอย่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow : OPF)

เป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมด้วยวิธี ED กับวิธี OPF ระบบที่นำมาใช้ในการพิจารณา คือ ระบบ IEEE 26 บัสซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 - 4.4

Power Flow Solution by Economic Dispatch Method

Maximum Power Mismatch = 2.33783e-005

No. of Iterations = 2

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.025	0.000	51.000	41.000	447.611	250.582	4.000
2	1.020	-0.200	22.000	15.000	173.087	57.303	0.000
3	1.045	-0.639	64.000	50.000	263.363	78.280	0.000
4	1.050	-2.101	25.000	10.000	138.716	33.449	2.000
5	1.045	-1.453	50.000	30.000	166.099	142.890	5.000
6	1.001	-2.874	76.000	29.000	0.000	0.000	2.000
7	0.995	-2.406	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.998	-2.278	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.010	-4.387	89.000	50.000	0.000	0.000	3.000
10	0.991	-4.311	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.998	-2.824	25.000	15.000	0.000	0.000	1.500
12	0.994	-3.282	89.000	48.000	0.000	0.000	2.000
13	1.022	-1.261	31.000	15.000	0.000	0.000	0.000
14	1.008	-2.445	24.000	12.000	0.000	0.000	0.000
15	0.999	-3.229	70.000	31.000	0.000	0.000	0.500
16	0.990	-3.990	55.000	27.000	0.000	0.000	0.000
17	0.983	-4.366	78.000	38.000	0.000	0.000	0.000
18	1.007	-1.884	153.000	67.000	0.000	0.000	0.000
19	1.005	-6.074	75.000	15.000	0.000	0.000	5.000
20	0.983	-4.759	48.000	27.000	0.000	0.000	0.000
21	0.977	-5.411	46.000	23.000	0.000	0.000	0.000
22	0.980	-5.325	45.000	22.000	0.000	0.000	0.000
23	0.978	-6.388	25.000	12.000	0.000	0.000	0.000
24	0.969	-6.672	54.000	27.000	0.000	0.000	0.000
25	0.975	-6.256	28.000	13.000	0.000	0.000	0.000
26	1.015	-0.284	40.000	20.000	86.939	27.892	0.000
Total			1263.000	637.000	1275.815	590.396	25.000

Total generation cost = 15447.72 \$

รูปที่ 4.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดยวิธี Economic Dispatch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line Flow and Losses

--Line-- from to	Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer tap
	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	396.611	213.582	450.464			
2	87.168	93.764	128.023	0.089	-5.497	
18	309.444	119.820	331.832	1.382	-0.171	
2	151.087	42.303	156.897			
1	-87.079	-99.261	132.043	0.089	-5.497	
3	17.610	30.163	34.927	0.021	-10.381	0.960
7	72.243	29.682	78.103	0.615	-0.155	
8	124.738	38.095	130.426	1.233	-2.596	
13	22.410	40.559	46.338	0.075	-3.394	0.960
26	1.165	2.402	2.670	0.002	0.013	
3	199.363	28.280	201.359			
2	-17.589	-40.544	44.195	0.021	-10.381	
13	216.952	68.826	227.608	0.344	2.584	1.017
4	113.716	25.449	116.529			
8	13.074	6.486	14.594	0.002	0.031	1.050
12	100.642	19.119	102.442	0.169	-0.798	1.050
5	116.099	117.890	165.460			
6	116.099	117.891	165.461	1.898	-12.471	
6	-76.000	-27.000	80.654			
5	-114.201	-130.362	173.309	1.898	-12.471	
7	-22.796	21.583	31.392	0.053	0.093	
11	-0.693	4.940	4.988	0.002	-0.006	
18	-81.238	-16.295	82.856	0.256	1.279	
19	93.491	70.381	117.022	0.455	-0.956	0.950
21	49.437	22.266	54.220	0.152	-1.684	
7	0.000	0.000	0.000			
2	-71.628	-29.837	77.594	0.615	-0.155	
6	22.849	-21.489	31.367	0.053	0.093	
8	-38.515	-36.775	53.252	0.034	0.178	
9	87.294	87.834	123.835	0.137	0.888	0.950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8		0.000	0.000	0.000		
	2	-123.505	-40.691	130.035	1.233	-2.596
	4	-13.072	-6.455	14.579	0.002	0.031
	7	38.549	36.954	53.400	0.034	0.178
	12	98.028	10.192	98.556	0.196	-2.208
9		-89.000	-47.000	100.648		
	7	-87.157	-86.946	123.109	0.137	0.888
	10	-1.843	39.946	39.988	0.016	0.576
10		0.000	0.000	0.000		
	9	1.860	-39.370	39.414	0.016	0.576
	12	-133.936	-0.469	133.937	0.451	0.441
	19	11.094	-8.121	13.749	0.105	0.454
	20	57.870	24.868	62.987	0.267	0.452
	22	63.112	23.093	67.204	0.319	0.407
11		-25.000	-13.500	28.412		
	6	0.696	-4.946	4.994	0.002	-0.006
	25	22.017	0.250	22.018	0.469	-0.628
	26	-47.713	-8.805	48.518	0.389	1.476
12		-89.000	-46.000	100.185		
	4	-100.473	-19.917	102.429	0.169	-0.798
	8	-97.832	-12.401	98.615	0.196	-2.208
	10	134.387	0.910	134.390	0.451	0.441
	14	-21.590	-8.142	23.074	0.176	0.432
	15	-3.492	-6.450	7.335	0.010	0.033
13		-31.000	-15.000	34.438		
	2	-22.334	-43.952	49.301	0.075	-3.394
	3	-216.609	-66.242	226.511	0.344	2.584
	14	85.409	40.285	94.433	0.393	2.108
	15	62.913	28.573	69.098	0.530	2.786
	16	59.621	26.336	65.179	0.730	3.411
14		-24.000	-12.000	26.833		
	12	21.766	8.574	23.394	0.176	0.432
	13	-85.017	-38.177	93.195	0.393	2.108
	15	39.251	17.603	43.017	0.126	0.696
15		-70.000	-30.500	76.356		
	12	3.502	6.483	7.368	0.010	0.033
	13	-62.383	-25.787	67.503	0.530	2.786
	14	-39.125	-16.907	42.622	0.126	0.696
	16	28.007	5.712	28.583	0.171	0.419

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	-55.000	-27.000	61.270		
13	-58.891	-22.926	63.196	0.730	3.411
15	-27.836	-5.293	28.334	0.171	0.419
17	8.345	-1.392	8.460	0.072	0.044
20	23.382	2.610	23.527	0.135	0.330
17	-78.000	-38.000	86.764		
16	-8.273	1.436	8.396	0.072	0.044
18	-73.349	-38.832	82.994	0.219	-3.415
21	3.621	-0.603	3.671	0.032	0.062
18	-153.000	-67.000	167.027		
1	-308.063	-119.991	330.606	1.382	-0.171
6	81.495	17.574	83.368	0.256	1.279
17	73.568	35.417	81.649	0.219	-3.415
19	-75.000	-10.000	75.664		
6	-93.037	-71.337	117.238	0.455	-0.956
10	-10.989	8.576	13.939	0.105	0.454
23	8.334	18.472	20.265	0.122	0.533
24	14.172	24.983	28.723	0.248	0.645
25	6.519	9.307	11.363	0.161	-0.479
20	-48.000	-27.000	55.073		
10	-57.603	-24.415	62.564	0.267	0.452
16	-23.247	-2.280	23.359	0.135	0.330
21	7.256	0.714	7.291	0.036	0.086
22	25.594	-1.019	25.614	0.102	0.248
21	-46.000	-23.000	51.430		
6	-49.285	-23.950	54.796	0.152	-1.684
17	-3.589	0.665	3.650	0.032	0.062
20	-7.220	-0.627	7.248	0.036	0.086
24	14.094	0.912	14.124	0.099	0.315
22	-45.000	-22.000	50.090		
10	-62.793	-22.686	66.765	0.319	0.407
20	-25.492	1.267	25.523	0.102	0.248
23	16.978	-3.288	17.294	0.090	0.309
24	26.307	2.707	26.446	0.226	0.641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23		-25.000	-12.000	27.731		
	19	-8.212	-17.939	19.729	0.122	0.533
	22	-16.888	3.597	17.266	0.090	0.309
	25	0.100	2.342	2.344	0.006	0.007
24		-54.000	-27.000	60.374		
	19	-13.924	-24.338	28.040	0.248	0.645
	21	-13.995	-0.597	14.008	0.099	0.315
	22	-26.081	-2.065	26.163	0.226	0.641
25		-28.000	-13.000	30.871		
	11	-21.548	-0.879	21.566	0.469	-0.628
	19	-6.358	-9.786	11.670	0.161	-0.479
	23	-0.094	-2.335	2.337	0.006	0.007
26		46.939	7.892	47.598		
	2	-1.163	-2.389	2.657	0.002	0.013
	11	48.101	10.281	49.188	0.389	1.476
Total loss					12.816	-22.861

รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์อัตราการไหลของกำลังไฟฟ้าและการสูญเสียในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power Flow Solution by Optimal Power Flow
No. of Iterations = 52

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Radian	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.025	0.000	51.000	41.000	446.874	140.021	4.000
2	1.025	-0.004	22.000	15.000	171.449	163.053	0.000
3	1.051	-0.012	64.000	50.000	262.121	76.075	0.000
4	1.063	-0.039	25.000	10.000	135.823	79.999	2.000
5	1.025	-0.016	50.000	30.000	173.921	79.483	5.000
6	0.998	-0.048	76.000	29.000	0.000	0.000	2.000
7	1.001	-0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.005	-0.041	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.017	-0.077	89.000	50.000	0.000	0.000	3.000
10	0.998	-0.076	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	1.002	-0.049	25.000	15.000	0.000	0.000	1.500
12	1.003	-0.058	89.000	48.000	0.000	0.000	2.000
13	1.028	-0.023	31.000	15.000	0.000	0.000	0.000
14	1.015	-0.044	24.000	12.000	0.000	0.000	0.000
15	1.005	-0.057	70.000	31.000	0.000	0.000	0.500
16	0.995	-0.070	55.000	27.000	0.000	0.000	0.000
17	0.984	-0.075	78.000	38.000	0.000	0.000	0.000
18	1.007	-0.032	153.000	67.000	0.000	0.000	0.000
19	1.006	-0.105	75.000	15.000	0.000	0.000	5.000
20	0.989	-0.083	48.000	27.000	0.000	0.000	0.000
21	0.978	-0.093	46.000	23.000	0.000	0.000	0.000
22	0.985	-0.093	45.000	22.000	0.000	0.000	0.000
23	0.982	-0.111	25.000	12.000	0.000	0.000	0.000
24	0.972	-0.115	54.000	27.000	0.000	0.000	0.000
25	0.978	-0.108	28.000	13.000	0.000	0.000	0.000
26	1.032	-0.009	40.000	20.000	84.869	47.370	0.000
Total			1263.000	637.000	1275.057	586.001	25.000
Total generation cost =					15436.82 \$		

รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดยวิธี Optimal Power Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line Flow and Losses

--Line-- from to	Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer tap
	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	395.874	103.021	409.060			
2	92.256	-23.040	95.090	0.047	-5.900	
18	303.618	126.061	328.748	1.357	-0.378	
2	149.449	148.053	210.368			
1	-92.210	17.141	93.789	0.047	-5.900	
3	18.623	30.046	35.350	0.021	-10.495	0.960
7	72.432	30.054	78.419	0.614	-0.203	
8	125.637	33.177	129.944	1.209	-2.800	
13	22.941	40.576	46.612	0.075	-3.451	0.960
26	2.026	-3.611	4.141	0.005	0.032	
3	198.121	26.075	199.829			
2	-18.603	-40.541	44.605	0.021	-10.495	
13	216.723	66.617	226.731	0.337	2.533	1.017
4	110.823	71.999	132.158			
8	10.413	30.599	32.323	0.008	0.224	1.050
12	100.409	41.559	108.670	0.186	-0.636	1.050
5	123.921	54.483	135.369			
6	123.921	54.483	135.369	1.286	-14.667	
6	-76.000	-27.000	80.654			
5	-122.636	-69.150	140.788	1.286	-14.667	
7	-19.740	-5.391	20.463	0.022	-0.081	
11	0.556	-7.811	7.830	0.006	0.015	
18	-77.196	-26.413	81.590	0.250	1.241	
19	93.666	63.470	113.145	0.427	-1.471	0.950
21	49.349	17.811	52.465	0.142	-1.849	
7	0.000	0.000	0.000			
2	-71.818	-30.257	77.931	0.614	-0.203	
6	19.762	5.310	20.463	0.022	-0.081	
8	-35.686	-62.178	71.691	0.062	0.336	
9	87.742	86.855	123.460	0.135	0.726	0.950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8		0.000	0.000	0.000		
	2	-124.429	-35.977	129.526	1.209	-2.800
	4	-10.405	-30.375	32.108	0.008	0.224
	7	35.747	62.514	72.013	0.062	0.336
	12	99.087	3.838	99.161	0.195	-2.277
9		-89.000	-47.000	100.648		
	7	-87.607	-86.129	122.854	0.135	0.726
	10	-1.393	39.129	39.154	0.016	0.532
10		0.000	0.000	0.000		
	9	1.409	-38.597	38.623	0.016	0.532
	12	-134.018	-11.881	134.544	0.449	0.398
	19	10.862	-5.868	12.346	0.084	0.361
	20	58.724	29.459	65.699	0.287	0.498
	22	63.023	26.887	68.519	0.327	0.431
11		-25.000	-13.500	28.412		
	6	-0.550	7.826	7.845	0.006	0.015
	25	22.008	0.693	22.019	0.466	-0.653
	26	-46.459	-22.019	51.412	0.431	1.707
12		-89.000	-46.000	100.185		
	4	-100.223	-42.195	108.743	0.186	-0.636
	8	-98.892	-6.115	99.081	0.195	-2.277
	10	134.467	12.278	135.026	0.449	0.398
	14	-21.269	-6.227	22.162	0.160	0.392
	15	-3.082	-3.741	4.847	0.004	0.014
13		-31.000	-15.000	34.438		
	2	-22.865	-44.027	49.610	0.075	-3.451
	3	-216.386	-64.084	225.676	0.337	2.533
	14	85.335	38.314	93.542	0.381	2.036
	15	63.021	27.728	68.852	0.520	2.735
	16	59.895	27.069	65.728	0.734	3.428
14		-24.000	-12.000	26.833		
	12	21.429	6.619	22.428	0.160	0.392
	13	-84.954	-36.278	92.376	0.381	2.036
	15	39.524	17.660	43.290	0.126	0.696

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15		-70.000	-30.500	76.356		
	12	3.087	3.755	4.861	0.004	0.014
	13	-62.501	-24.993	67.313	0.520	2.735
	14	-39.399	-16.964	42.896	0.126	0.696
	16	28.814	7.702	29.825	0.184	0.451
16		-55.000	-27.000	61.270		
	13	-59.162	-23.641	63.710	0.734	3.428
	15	-28.630	-7.252	29.534	0.184	0.451
	17	10.149	1.997	10.344	0.107	0.065
	20	22.642	1.895	22.721	0.125	0.305
17		-78.000	-38.000	86.764		
	16	-10.042	-1.932	10.227	0.107	0.065
	18	-71.612	-35.513	79.934	0.203	-3.728
	21	3.654	-0.555	3.696	0.032	0.063
18		-153.000	-67.000	167.027		
	1	-302.261	-126.439	327.641	1.357	-0.378
	6	77.446	27.654	82.235	0.250	1.241
	17	71.815	31.785	78.534	0.203	-3.728
19		-75.000	-10.000	75.664		
	6	-93.240	-64.941	113.626	0.427	-1.471
	10	-10.778	6.230	12.449	0.084	0.361
	23	8.476	16.680	18.710	0.104	0.453
	24	14.158	23.490	27.426	0.226	0.549
	25	6.384	8.541	10.664	0.142	-0.519
20		-48.000	-27.000	55.073		
	10	-58.438	-28.961	65.220	0.287	0.498
	16	-22.517	-1.591	22.573	0.125	0.305
	21	7.337	3.669	8.203	0.045	0.108
	22	25.618	-0.117	25.618	0.101	0.246
21		-46.000	-23.000	51.430		
	6	-49.207	-19.660	52.989	0.142	-1.849
	17	-3.622	0.617	3.674	0.032	0.063
	20	-7.291	-3.561	8.115	0.045	0.108
	24	14.120	-0.396	14.126	0.099	0.315

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22		-45.000	-22.000	50.090		
	10	-62.696	-26.456	68.049	0.327	0.431
	20	-25.518	0.363	25.520	0.101	0.246
	23	16.936	-1.330	16.988	0.086	0.294
	24	26.277	5.423	26.831	0.230	0.653
23		-25.000	-12.000	27.731		
	19	-8.372	-16.227	18.259	0.104	0.453
	22	-16.850	1.625	16.928	0.086	0.294
	25	0.222	2.602	2.611	0.007	0.008
24		-54.000	-27.000	60.374		
	19	-13.932	-22.940	26.839	0.226	0.549
	21	-14.021	0.711	14.039	0.099	0.315
	22	-26.047	-4.771	26.481	0.230	0.653
25		-28.000	-13.000	30.871		
	11	-21.543	-1.346	21.585	0.466	-0.653
	19	-6.242	-9.061	11.003	0.142	-0.519
	23	-0.215	-2.594	2.603	0.007	0.008
26		44.869	27.370	52.558		
	2	-2.020	3.643	4.166	0.005	0.032
	11	46.890	23.726	52.551	0.431	1.707
Total loss					12.057	-27.264

รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์อัตราการผลิตของกำลังไฟฟ้าและการสูญเสียในสายส่ง

จากข้อมูลผลลัพธ์การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี ED เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธี OPF จะพบว่าค่ากำลังสูญเสียรวมของทั้งระบบในกรณีวิธี ED จะมีค่าสูงกว่า 0.759 MW ซึ่งค่าดังกล่าวจะสูญเสียอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในสายส่ง อีกทั้งเมื่อมาพิจารณาที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือค่าต้นทุนการผลิต จะพบว่ากรณีของการแก้ปัญหาด้วยวิธี OPF จะให้ค่าต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าเป็นมูลค่า 10.9 \$ เมื่อพิจารณาถึง 2 ปัจจัยข้างต้น จึงสามารถวิเคราะห์แนวโน้มได้ว่าการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี OPF ดังกล่าวจะให้ค่าที่เหมาะสมกว่าการแก้ปัญหาด้วยวิธี ED ทั้งด้านการสูญเสียและราคาต้นทุนของการผลิตกำลังไฟฟ้าตามที่กล่าวไว้ดังบทที่ 2 นอกจากนี้ OPF ยังสามารถพิจารณาข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ความปลอดภัยของระบบ (security) เสถียรภาพของระบบ (stability) ดังนั้นปัญญานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกใช้กระบวนการ OPF ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

4.2 การไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม (Optimal Gas Flow : OGF)

การไหลของแก๊สอย่างเหมาะสม(OGF) [10] นั้นได้แนวคิดมาจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม(OPF) ระบบที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือ ระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ 20 node 24 pipeline ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 – 4.6

Optimal Pressures at Nodes

No. of Iterations = 34

Node No.	Supply	Demand	Pressures Bars	Sum.flow i to j	Sum.flow j to i
1	15.5752	0.0000	59.0627	15.5752	0.0000
2	0.1540	0.0000	59.0061	15.7292	15.5752
3	0.0000	3.9180	58.9193	11.8112	15.7292
4	0.0000	0.0000	58.0647	9.7002	9.7002
5	7.1790	0.0000	62.7094	7.1790	0.0000
6	0.0000	4.0340	58.4672	3.1450	7.1790
7	0.0000	5.2560	57.8954	-2.1110	3.1450
8	20.3477	0.0000	61.6570	20.3477	0.0000
9	0.0000	0.0000	61.6570	20.3477	20.3477
10	0.0000	6.3650	60.1689	13.9827	20.3477
11	0.0000	0.0000	59.2729	13.9827	13.9827
12	0.0000	2.1200	57.8874	9.7217	11.8417
13	1.6672	0.0000	56.9803	11.3889	9.7217
14	1.3749	0.0000	56.8232	22.4640	21.0891
15	0.0000	6.8480	55.5858	15.6160	22.4640
16	0.0000	15.6160	54.0532	0.0000	15.6160
17	0.0000	0.0000	58.5164	2.1410	2.1410
18	0.0000	0.0000	58.7573	2.1410	2.1410
19	0.0000	0.2220	27.5877	1.9190	2.1410
20	0.0000	1.9190	25.0740	0.0000	1.9190

Total generation cost = **3.397 M\$**

รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละโหนด

Optimal Natural Gas Flow at Pipelines

No. of Iterations = 34

Pipe. No.	Type	From	To	Flow Max. (10 ⁶ SCM)	Flow Rate (10 ⁶ SCM)
1	0	1	2	231.9000	7.7876
2	0	1	2	231.9000	7.7876
3	0	2	3	196.7227	7.8646
4	0	2	3	196.7227	7.8646
5	0	3	4	94.5027	11.8112
6	0	5	6	25.3306	7.1790
7	0	6	7	28.5937	3.1450
8	0	7	4	38.1068	-2.1110
9	0	4	14	64.9754	9.7002
10	1	8	9	178.3254	17.8619
11	1	8	9	21.7589	2.4858
12	0	9	10	89.1626	18.1349
13	0	9	10	10.8795	2.2128
14	0	10	11	79.7494	12.4621
15	0	10	11	9.7309	1.5206
16	0	11	12	61.5281	11.8417
17	0	12	13	63.0475	9.7217
18	0	13	14	178.3254	11.3889
19	0	14	15	126.0951	22.4640
20	0	15	16	79.7494	15.6160
21	0	11	17	15.0151	2.1410
22	1	17	18	5.3042	2.1410
23	0	18	19	2.7321	2.1410
24	0	19	20	11.0415	1.9190

รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละท่อส่ง

จากผลลัพธ์ที่ได้ในรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาผลรวมของค่าพลังงานที่จัดหาได้ในแต่ละโหนดจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความต้องการพลังของทั้งระบบโดยค่าความดันที่ได้จะเป็นค่าความดันภายในท่อส่งที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีราคาต่ำที่สุด และรูปดังกล่าวยังแสดงถึงผลรวมของอัตราการไหลเข้าและไหลออกในแต่ละโหนดด้วย

ต่อมาพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าที่ท่อส่งใดๆ ที่มีการส่งจ่ายแก๊สจากโหนด i ไปโหนด j ที่มีลักษณะการส่งจ่ายแก๊สแบบ passive (Type = 0) ค่าอัตราการไหลที่ได้จะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยขึ้นอยู่กับความดันที่โหนด i มากกว่าหรือน้อยกว่าโหนด j แต่สำหรับลักษณะการส่งจ่ายแก๊สแบบ active (Type = 1) นั้นค่าอัตราการไหลที่ได้จะมีเพียงค่าบวกเท่านั้น ไม่ว่าจะความดันที่โหนด i มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าก็ตามเข้าใกล้ศูนย์ทุกโหนด

4.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส (Optimal Electric Power System Connected to Gas Supply System)

เป็นการนำระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัสเชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline เพื่อคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของระบบที่ทำให้ราคาต่ำที่สุดโดยจะเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากบทความ [9] ซึ่งใช้วิธีการแก้ปัญหา 3 วิธี นั่นคือการใช้ Newton's Method แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า Interior Point Method แก้ปัญหาการไหลของแก๊สและ Evolutionary Generation เพื่อหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กับโปรแกรมจำลองที่ได้จัดทำขึ้นมา ซึ่งใช้เพียงกระบวนการ Interior Point Method ในการหาค่าของระบบทั้งสองผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 4.7 - 4.13

4.3.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากบทความทางวิศวกรรมศาสตร์

Optimal Operation State and Power Generation

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Radian	-----Load-----		---Generation---	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.060	0.000	0.000	0.000	63.44	21.54
2	1.045	-0.012	21.700	12.700	94.79	3.14
3	1.010	-0.052	94.200	19.000	82.84	-8.11
4	1.021	-0.081	47.800	-3.900	0.00	0.00
5	1.024	-0.067	7.600	1.600	0.00	0.00
6	1.070	-0.126	11.200	7.500	21.64	7.35
7	1.062	-0.128	0.000	0.000	0.00	0.00
8	1.090	-0.128	0.000	0.000	0.00	17.09
9	1.056	-0.153	29.500	16.600	0.00	0.00
10	1.051	-0.153	9.000	5.800	0.00	0.00
11	1.056	-0.142	3.500	1.800	0.00	0.00
12	1.055	-0.142	6.100	1.600	0.00	0.00
13	1.050	-0.144	13.500	5.800	0.00	0.00
14	1.035	-0.167	14.900	5.000	0.00	0.00
Total			259.000	73.500	262.71	41.02

Total generation cost = 5540.4 \$

รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม

Optimal Natural Gas Supply and Pressures at Nodes

Node No.	Supply	Demand	ei	Pressures Bars
1	14.687	0.000	0.0000	65.0000
2	6.546	0.000	0.0000	64.9498
3	0.000	3.918	0.0000	64.7620
4	0.000	0.000	0.4739	64.1138
5	0.382	0.000	0.0000	58.0042
6	0.000	4.034	0.0000	57.8905
7	0.000	5.256	0.0000	58.3239
8	20.574	0.000	0.0000	53.9316
9	0.000	0.000	0.0000	65.0000
10	0.000	6.365	0.0000	64.6991
11	0.000	0.000	0.0000	64.4808
12	0.000	2.120	0.4142	63.7616
13	3.590	0.000	0.0000	63.4569
14	1.407	0.000	0.0000	63.2515
15	0.000	6.848	0.0000	61.5299
16	0.000	15.616	0.0000	59.8420
17	0.000	0.000	0.0000	53.7605
18	0.000	0.000	0.0000	59.0379
19	0.000	0.222	0.0000	57.6260
20	0.000	1.919	0.0000	53.4860

Total generation cost = 3.4227 M\$

รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละโหนด

Optimal Natural Gas Flow at Pipelines

Pipe. No.	Type	From	To	Flow Rate ~ (Mm ³)
1	0	1	2	7.344
2	0	1	2	7.344
3	0	2	3	10.617
4	0	2	3	10.617
5	0	3	4	17.315
6	0	5	6	0.382
7	0	6	7	-3.652
8	0	7	4	-8.908
9	0	4	14	7.933
10	1	8	9	18.191
11	1	8	9	1.957
12	0	9	10	13.425
13	0	9	10	6.723
14	0	10	11	8.467
15	0	10	11	5.315
16	0	11	12	12.068
17	0	12	13	9.534
18	0	13	14	13.124
19	0	14	15	22.464
20	0	15	16	15.616
21	0	11	17	1.714
22	1	17	18	1.714
23	0	18	19	1.714
24	0	19	20	1.919

รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละท่อส่ง

4.3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองที่ได้จัดทำขึ้น

Power Flow Solution by Optimal Power Flow
No. of Iterations = 43

Bus No.	Voltage Injected		-----Load-----		---Generation---			
	Mag.	Angle Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	
1	1.060	0.000	0.000	0.000	64.725	43.668	0.000	
2	1.035	-0.004	21.700	12.700	91.116	-5.006	0.000	
3	0.948	-0.249	94.200	19.000	55.611	19.378	0.000	
4	0.995	-0.118	47.800	-3.900	0.000	0.000	0.000	
5	1.006	-0.084	7.600	1.600	0.000	0.000	0.000	
6	1.040	-0.089	11.200	7.500	63.496	3.189	0.000	
7	1.013	-0.148	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
8	1.020	-0.148	0.000	0.000	0.000	4.003	0.000	
9	1.007	-0.164	29.500	16.600	0.000	0.000	19.000	
10	1.004	-0.156	9.000	5.800	0.000	0.000	0.000	
11	1.017	-0.125	3.500	1.800	0.000	0.000	0.000	
12	1.024	-0.109	6.100	1.600	0.000	0.000	0.000	
13	1.016	-0.115	13.500	5.800	0.000	0.000	0.000	
14	0.992	-0.161	14.900	5.000	0.000	0.000	0.000	
Total			259.000	73.500	274.948	65.232	19.000	
Total generation cost =			6668.18 \$					

รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม

Line Flow and Losses

--Line--	Power at bus & line flow	--Line loss--	Transformer
from to	MW Mvar MVA	MW Mvar	tap
1	64.725 43.668 78.078		
2	20.616 32.616 38.586	0.330 -10.579	
5	44.109 11.052 45.472	1.068 -6.101	
2	69.416 -17.706 71.639		
1	-20.286 -43.196 47.722	0.330 -10.579	
3	127.010 25.340 129.513	7.476 22.872	
4	67.546 0.822 67.551	2.489 -0.154	
5	48.601 -0.672 48.606	1.261 -3.232	
3	-38.589 0.378 38.591		
2	-119.534 -2.468 119.560	7.476 22.872	
4	-69.813 2.846 69.871	3.662 2.815	
4	-47.800 3.900 47.959		
2	-65.057 -0.976 65.064	2.489 -0.154	
3	73.476 -0.031 73.476	3.662 2.815	
5	-79.776 -1.194 79.785	0.858 0.144	
7	14.933 2.255 15.102	0.000 0.461	0.978
9	8.624 3.847 9.443	0.000 0.470	0.969
5	-7.600 -1.600 7.767		
1	-43.041 -17.153 46.333	1.068 -6.101	
2	-47.340 -2.560 47.409	1.261 -3.232	
4	80.634 1.338 80.645	0.858 0.144	
6	2.147 16.775 16.912	-0.000 0.618	0.932
6	52.296 -4.311 52.474		
5	-2.147 -16.156 16.298	-0.000 0.618	
11	20.449 2.713 20.628	0.373 0.782	
12	9.478 2.157 9.720	0.107 0.223	
13	24.516 6.975 25.489	0.397 0.782	
7	0.000 0.000 0.000		
4	-14.933 -1.794 15.041	0.000 0.461	
8	0.000 -3.976 3.976	0.000 0.027	
9	14.933 5.770 16.009	0.000 0.275	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8		0.000	4.003	4.003		
	7	-0.000	4.003	4.003	0.000	0.027
9		-29.500	2.400	29.597		
	4	-8.624	-3.376	9.261	0.000	0.470
	7	-14.933	-5.495	15.912	0.000	0.275
	10	-7.328	6.256	9.635	0.029	0.077
	14	1.386	5.015	5.203	0.034	0.072
10		-9.000	-5.800	10.707		
	9	7.358	-6.178	9.608	0.029	0.077
	11	-16.358	0.378	16.362	0.218	0.510
11		-3.500	-1.800	3.936		
	6	-20.075	-1.932	20.168	0.373	0.782
	10	16.575	0.132	16.576	0.218	0.510
12		-6.100	-1.600	6.306		
	6	-9.371	-1.934	9.568	0.107	0.223
	13	3.271	0.334	3.288	0.023	0.021
13		-13.500	-5.800	14.693		
	6	-24.119	-6.193	24.902	0.397	0.782
	12	-3.248	-0.313	3.263	0.023	0.021
	14	13.867	0.706	13.885	0.319	0.649
14		-14.900	-5.000	15.717		
	9	-1.352	-4.943	5.125	0.034	0.072
	13	-13.548	-0.057	13.548	0.319	0.649
Total loss					15.948	10.732

รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์อัตราการใช้และการสูญเสียในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimal Pressures at Nodes
No. of Iterations = 43

Node No.	Supply	Demand	ei	Pressures Bars	Sum.flow i to j	Sum.flow j to i
1	12.8774	0.0000	0.0000	56.5709	12.8774	0.0000
2	2.1423	0.0000	0.0000	56.5305	15.0197	12.8774
3	0.0000	3.9180	0.0000	56.4479	11.1017	15.0197
4	0.0000	0.0000	0.4556	55.6601	8.1189	8.5744
5	6.7627	0.0000	0.0000	59.8010	6.7627	0.0000
6	0.0000	4.0340	0.0000	55.8568	2.7287	6.7627
7	0.0000	5.2560	0.0000	55.4067	-2.5273	2.7287
8	23.6465	0.0000	0.0000	62.2589	23.6465	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	62.2589	23.6465	23.6465
10	0.0000	6.3650	0.0000	60.2605	17.2815	23.6465
11	0.0000	0.0000	0.0000	58.8886	17.2815	17.2815
12	0.0000	2.1200	0.2781	56.5906	12.7424	15.1405
13	0.8237	0.0000	0.0000	54.9862	13.5661	12.7424
14	0.7790	0.0000	0.0000	54.7551	22.4640	21.6850
15	0.0000	6.8480	0.0000	53.4699	15.6160	22.4640
16	0.0000	15.6160	0.0000	51.8748	0.0000	15.6160
17	0.0000	0.0000	0.0000	58.1271	2.1410	2.1410
18	0.0000	0.0000	0.0000	60.0756	2.1410	2.1410
19	0.0000	0.2220	0.0000	30.2942	1.9190	2.1410
20	0.0000	1.9190	0.0000	28.0243	0.0000	1.9190

Total generation cost = 3.417 M\$

รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละโหนด

Optimal Natural Gas Flow at Pipelines
No. of Iterations = 43

Pipe. No.	Type	From	To	Flow Max. (Mm ³)	Flow Rate (Mm ³)
1	0	1	2	231.9000	6.4387
2	0	1	2	231.9000	6.4387
3	0	2	3	196.7227	7.5099
4	0	2	3	196.7227	7.5099
5	0	3	4	94.5027	11.1017
6	0	5	6	25.3306	6.7627
7	0	6	7	28.5937	2.7287
8	0	7	4	38.1068	-2.5273
9	0	4	14	64.9754	8.1189
10	1	8	9	178.3254	15.8789
11	1	8	9	21.7589	7.7675
12	0	9	10	89.1626	21.0750
13	0	9	10	10.8795	2.5715
14	0	10	11	79.7494	15.4021
15	0	10	11	9.7309	1.8793
16	0	11	12	61.5281	15.1405
17	0	12	13	63.0475	12.7424
18	0	13	14	178.3254	13.5661
19	0	14	15	126.0951	22.4640
20	0	15	16	79.7494	15.6160
21	0	11	17	15.0151	2.1410
22	1	17	18	5.3042	2.1410
23	0	18	19	2.7321	2.1410
24	0	19	20	11.0415	1.9190

รูปที่ 4.13 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติในแต่ละท่อส่ง

เมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์ที่แสดงข้างต้น จะพบว่าต้นทุนการผลิตจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนต้นทุนการผลิตฝั่งระบบไฟฟ้าคิดเป็นมูลค่าเท่ากับ 6668.18 \$ และต้นทุนการผลิตฝั่งระบบแก๊สคิดเป็นมูลค่า 3.417 M\$ เมื่อพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆในระบบ จะพบว่ามีค่าสอดคล้องกันตามสมการข้อจำกัดและค่าของตัวแปรต่างๆ มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามสมการกำหนดขอบเขตดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 อีกทั้งเมื่อเรานำค่าผลลัพธ์ที่ได้ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากบทความ [9] จะพบว่าราคาต้นทุนในการผลิตทั้งหมดของวิธีที่ปริญญาณิพนธ์เล่มนี้นำเสนอจะให้ค่าที่ต่ำกว่า ภายใต้งบเงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกัน

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์การแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าระหว่างวิธี ED และ OPF พบว่าวิธีที่สองให้ค่ากำลังสูญเสียที่น้อยกว่า และส่งผลให้ค่าต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำกว่าตามไปด้วย นอกจากนี้วิธี OPF ยังสามารถพิจารณาข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ความปลอดภัยของระบบเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นจึงเลือกนำวิธีการ OPF มาเป็นวิธีที่ใช้นำเสนอในปริญญาณิพนธ์เล่มนี้สำหรับการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะต้องประกอบไปด้วยสมการ 3 ส่วน ได้แก่ สมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สมการกำหนดขอบเขตของตัวแปรควบคุมและสมการข้อจำกัด เพื่อเป็นพื้นฐานในการคำนวณแก้ปัญหาระบบ เพื่อให้ค่าตัวแปรที่ได้ต่างๆจากการคำนวณมีค่าที่สอดคล้องเป็นจริงตามสมการพื้นฐานและยังเป็นการช่วยให้ผลที่ได้นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ กระบวนการดังกล่าวจะมุ่งเน้นเพื่อการจัดการให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มีค่าที่ต่ำสุด โดยในปริญญาณิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่าต้นทุนการผลิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊สออกมาจะพบว่าค่าต้นทุนการผลิตจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนต้นทุนการผลิตฝั่งของระบบไฟฟ้าคิดเป็นมูลค่า 6668.18 \$ และต้นทุนการผลิตฝั่งของระบบแก๊ส คิดเป็นมูลค่า 3.417 M\$ เมื่อพิจารณาถึงค่าตัวแปรต่างๆในระบบทางด้านระบบไฟฟ้าจะพบว่าตัวแปรต่างๆ มีความสัมพันธ์จริงเป็นไปตามสมการ อีกทั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ทั้งหมดสามารถจ่ายไหลได้เพียงพอต่อความต้องการ และเมื่อพิจารณาถึงค่าตัวแปรต่างๆในระบบทางด้านระบบแก๊ส จะพบว่าผลรวมของค่าพลังงานที่จัดหาได้ในแต่ละโนดมีค่าเพียงพอต่อความต้องการพลังงานรวมในระบบ อีกทั้งค่าอัตราการไหลที่ได้สำหรับการส่งจ่ายแก๊สแบบ passive จะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ แต่สำหรับการส่งจ่ายแก๊สแบบ active นั้นค่าอัตราการไหลที่ได้จะมีเพียงค่าบวกเท่านั้น ซึ่งเป็นไปตามนิยามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยเมื่อนำระบบทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน ความสัมพันธ์ระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังกับระบบส่งจ่ายแก๊สจะถูกนิยามตามสมการที่ (2.40) และ (2.41) โดยเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊สมาเปรียบเทียบกับบทความ [9] ซึ่งได้แสดงผลลัพธ์ไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 จะพบว่าราคาต้นทุนในการผลิตทั้งหมดของปริญญาณิพนธ์จะให้ค่าที่ต่ำกว่า ภายใตเงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกัน อีกทั้งวิธีการที่ปริญญาณิพนธ์เล่มนี้นำเสนออย่างใช้เพียงวิธีการ Interior Point Method เพียงวิธีเดียว ซึ่งส่งผลให้โปรแกรมจำลองสามารถคำนวณและแสดงผลลัพธ์ได้รวดเร็วกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส ภายใต้ขอบเขตการศึกษาและแบบจำลองเบื้องต้น ซึ่งมีได้พิจารณาถึงลักษณะการวางท่อ ความสูง ความยาวของท่อส่งจ่าย อีกทั้งยังไม่ได้นำสมการคอมเพรสเซอร์มาร่วมพิจารณา ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นนั่นเป็นเพียงแนวทางสำหรับกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ ดังนั้นสำหรับผู้ที่ต้องการนำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ไปทำการวิจัยเพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองดังกล่าว อาจนำสมการคอมเพรสเซอร์หรือลักษณะการวางท่อส่งจ่าย มาร่วมพิจารณาเพื่อให้แบบจำลองเทียบเคียงความเป็นจริงมากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายพลังงาน, แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย [ออนไลน์], 25 มีนาคม 2553. แหล่งที่มา <http://www.eppo.go.th/power/pdp/page-1.html>
- [2] ฝ่ายสื่อสารองค์กร บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), “ก๊าซไทยมาจากไหน?”, **ก๊าซธรรมชาติ พลังงานในมือเรา 1** (ธันวาคม 2555): 17.
- [3] ปริญา อุทัยทัศน์ และ เล็ก หล่อสมฤดี, “การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธี จุดภายใน,” **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2547.
- [4] S.Mehrotra, “On the implementation of a primal-dual interior point method,” **Siam Journal on Optimization**, vol.2, 1992.
- [5] รศ.ดร. ชำนาญ ห่อเกียรติ, **ระบบไฟฟ้ากำลัง power system**, กรุงเทพฯ, โครงการพัฒนา ความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง, 2552
- [6] Hadi Sadaat, **Power System Analysis**, 2nd Ed., Boston, WCB McGraw-Hill, 1999.
- [7] HERMANN W. DOMMEL, and WILLIAM F. TINNEY, “Optimal Power Flow Solutions,” **IEEE Trans. (Power App. & Syst.)**, Vol. PAS-87, October, 1968, pp. 1866-1876.
- [8] SEUNGWON AN, “Natural Gas and Electricity Optimal Power Flow,” **Master of Engineering**, Oklahoma State University, 1999, pp. 39-40.
- [9] J. W. Marangon Lima, and A. C. Zambroni de Souza, “Modeling the Integrated Natural Gas and Electricity Optimal Power Flow,” in **Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2007, pp. 1-7.
- [10] Daniel De Wolf, and Yves Smeers, “The gas transmission problem solved by an extension of the Simplex algorithm,” **Management Science**, Vol. 46, 2000, pp. 1454-1465.
- [11] University of Washington Electrical Engineering, **14 Bus Power Flow Test Case** [Online], August, 1993. http://www.ee.washington.edu/research/h/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 26 Bus

IEEE 26-BUS TEST SYSTEM (American Electric Power)
 Bus Bus Voltage Angle --Load--- ----Generator----

Injected

No	code	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	Qmin	Qmax	Mvar
busdata=[1	1	1.025	0.0	51	41	0	0	0	0	4
	2	1.020	0.0	22	15	79	0	40	250	0
	3	1.025	0.0	64	50	20	0	40	150	0
	4	1.050	0.0	25	10	100	0	25	80	2
	5	1.045	0.0	50	30	300	0	40	160	5
	6	1.00	0.0	76	29	0	0	0	0	2
	7	1.00	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	8	1.00	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	9	1.00	0.0	89	50	0	0	0	0	3
	10	1.00	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	11	1.00	0.0	25	15	0	0	0	0	1.5
	12	1.00	0.0	89	48	0	0	0	0	2
	13	1.00	0.0	31	15	0	0	0	0	0
	14	1.00	0.0	24	12	0	0	0	0	0
	15	1.00	0.0	70	31	0	0	0	0	0.5
	16	1.00	0.0	55	27	0	0	0	0	0
	17	1.00	0.0	78	38	0	0	0	0	0
	18	1.00	0.0	153	67	0	0	0	0	0
	19	1.00	0.0	75	15	0	0	0	0	5
	20	1.00	0.0	48	27	0	0	0	0	0
	21	1.00	0.0	46	23	0	0	0	0	0
	22	1.00	0.0	45	22	0	0	0	0	0
	23	1.00	0.0	25	12	0	0	0	0	0
	24	1.00	0.0	54	27	0	0	0	0	0
	25	1.00	0.0	28	13	0	0	0	0	0
	26	1.015	0.0	40	20	60	0	15	50	0];

รูปที่ ก.1 ข้อมูลพื้นฐานในแต่ละบัส

nl	Bus bus		R p.u.	Line code		= 1 for lines >1 or<1 tr. tap at bus
	nl	nr		X p.u.	1/2 B p.u.	
linedata=[1	2	0.00055	0.00480	0.03000	1
	1	18	0.00130	0.01150	0.06000	1
	2	3	0.00146	0.05130	0.05000	0.96
	2	7	0.01030	0.05860	0.01800	1
	2	8	0.00740	0.03210	0.03900	1
	2	13	0.00357	0.09670	0.02500	0.96
	2	26	0.03230	0.19670	0.00000	1
	3	13	0.00070	0.00548	0.00050	1.017
	4	8	0.00080	0.02400	0.00010	1.050
	4	12	0.00160	0.02070	0.01500	1.050
	5	6	0.00690	0.03000	0.09900	1
	6	7	0.00535	0.03060	0.00105	1
	6	11	0.00970	0.05700	0.00010	1
	6	18	0.00374	0.02220	0.00120	1
	6	19	0.00350	0.06600	0.04500	0.95
	6	21	0.00500	0.09000	0.02260	1
	7	8	0.00120	0.00693	0.00010	1
	7	9	0.00095	0.04290	0.02500	0.95
	8	12	0.00200	0.01800	0.02000	1
	9	10	0.00104	0.04930	0.00100	1
	10	12	0.00247	0.01320	0.01000	1
	10	19	0.05470	0.23600	0.00000	1
	10	20	0.00660	0.01600	0.00100	1
	10	22	0.00690	0.02980	0.00500	1
	11	25	0.09600	0.27000	0.01000	1
	11	26	0.01650	0.09700	0.00400	1
	12	14	0.03270	0.08020	0.00000	1
	12	15	0.01800	0.05980	0.00000	1
	13	14	0.00460	0.02710	0.00100	1
	13	15	0.01160	0.06100	0.00000	1
	13	16	0.01793	0.08880	0.00100	1
	14	15	0.00690	0.03820	0.00000	1
	15	16	0.02090	0.05120	0.00000	1
	16	17	0.09900	0.06000	0.00000	1
	16	20	0.02390	0.05850	0.00000	1
	17	18	0.00320	0.06000	0.03800	1
	17	21	0.22900	0.44500	0.00000	1
	19	23	0.03000	0.13100	0.00000	1
	19	24	0.03000	0.12500	0.00200	1
	19	25	0.11900	0.22490	0.00400	1
	20	21	0.06570	0.15700	0.00000	1
	20	22	0.01500	0.03660	0.00000	1
	21	24	0.04760	0.15100	0.00000	1
	22	23	0.02900	0.09900	0.00000	1
	22	24	0.03100	0.08800	0.00000	1
	23	25	0.09870	0.11680	0.00000	1];

รูปที่ ก.2 ข้อมูลลักษณะการเชื่อมต่อในแต่ละบัส ค่าความต้านทาน และอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
cost = [240 7.0 0.007
        200 10 0.0095
        220 8.5 0.009
        200 11 0.009
        220 10.5 0.0080
        190 12 0.0075];
```

รูปที่ ก.3 ข้อมูลราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง

```
mwlimits = [100 500
             50 200
             80 300
             50 150
             50 200
             50 120];
```

รูปที่ ก.4 ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า

ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 Bus

```
IEEE 14-BUS TEST SYSTEM (American Electric Power)
Bus Bus Voltage Angle --Load--- ----Generator---- Injected
No code Mag. Degree MW Mvar MW Mvar Qmin Qmax Mvar
busdata= [1 1 1.06 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0 0
          2 2 1.045 0.0 21.70 12.7 40.0 0.0 -40 50 0 1
          3 2 1.0 0.0 94.2 19.0 0.0 0.0 0 40 0 1
          4 0 1.06 0.0 47.8 -3.9 0.0 0.0 0 0 0 0
          5 0 1.01 0.0 7.6 1.6 0.0 0.0 0 0 0 0
          6 2 1 0.0 11.2 7.5 0.0 0.0 -6 24 0 0
          7 0 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0 0
          8 2 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 -6 24 0 0
          9 0 1 0.0 29.5 16.6 0.0 0.0 0 0 19 0
          10 0 1 0.0 9.0 5.8 0.0 0.0 0 0 0 0
          11 0 1 0.0 3.5 1.8 0.0 0.0 0 0 0 0
          12 0 1 0 6.1 1.6 0 0 0 0 0 0
          13 0 1 0 13.5 5.8 0 0 0 0 0 0
          14 0 1 0 14.9 5.0 0 0 0 0 0 0];
```

รูปที่ ก.5 ข้อมูลพื้นฐานในแต่ละบัส

Bus nl	bus nr	R p.u.	Line code X p.u.	1/2 B = 1 for lines p.u. >1 or <1 tr.tap at bus nl	
linedata=[1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
2	5	0.05695	0.17388	0.034	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
4	7	0	0.20912	0	0.978
4	9	0	0.55618	0	0.969
5	6	0	0.25202	0	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0	1
6	12	0.12291	0.25581	0	1
6	13	0.06615	0.13027	0	1
7	8	0	0.17615	0	1
7	9	0	0.11001	0	1
9	10	0.03181	0.08450	0	1
9	14	0.12711	0.27038	0	1
10	11	0.08205	0.19207	0	1
12	13	0.22092	0.19988	0	1
13	14	0.17093	0.34802	0	1];

รูปที่ ก.6 ข้อมูลลักษณะการเชื่อมต่อในแต่ละบัส ค่าความต้านทาน และอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง

Cost coefficients = [2239 21.02 0.009
1469 19.71 0.077
0 0 0];

รูปที่ ก.7 ข้อมูลราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง

mwlimits = [10 150
10 100
0 0];

รูปที่ ก.8 ข้อมูลขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า

Gas supply coefficients = [0.00 0.005 0.00
0.00 0.005 0.00];

รูปที่ ก.9 ข้อมูลการบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบัสที่เชื่อมต่อกันของทั้งสองระบบ

mwlimitsg = [0 100
0 100];

รูปที่ ก.10 ข้อมูลขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

coneg = [2 4
3 12];

รูปที่ ก.11 ข้อมูลบัสและโนดที่เชื่อมต่อกันของระบบทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลของระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ 20 node 24 pipeline

The Belgium Gas Network(20 node 24 pipeline)

Node No.	Pressure (bar)	Supply	Demand	---Supply---		-Pressure-	
				Min	Max	Min	Max
1	55.822877	10.911288	0.0	8.87	17.39	0.0	77.0
2	55.793487	8.4	0.0	0.0	12.6	0.0	77.0
3	55.655143	0.0	3.918	0.0	0.0	30.0	80.0
4	54.108114	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.0
5	53.027490	2.814712	0.0	0.0	7.2	0.0	77.0
6	52.277058	0.0	4.034	0.0	0.0	30.0	80.0
7	52.372622	0.0	5.256	0.0	0.0	30.0	80.0
8	59.851968	22.012	0.0	20.344	33.02	50.0	66.2
9	59.407217	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.2
10	57.593877	0.0	6.365	0.0	0.0	30.0	66.2
11	56.418520	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.2
12	54.514990	0.0	2.12	0.0	0.0	0.0	66.2
13	53.187918	1.2	0.0	0.0	1.8	0.0	66.2
14	52.982300	0.96	0.0	0.0	1.44	0.0	66.2
15	51.653023	0.0	6.848	0.0	0.0	0.0	66.2
16	50.000000	0.0	15.616	0.0	0.0	50.0	66.2
17	55.623250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.2
18	63.000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.0
19	35.744537	0.0	0.222	0.0	0.0	0.0	66.2
20	33.842225	0.0	1.919	0.0	0.0	25.0	66.2];

รูปที่ ก.12 ข้อมูลพื้นฐานในแต่ละโหนด

Price of gas supply

Node No.	Price MS/Mm ³
1	0.085
2	0.085
5	0.085
8	0.062
13	0.062
14	0.062

รูปที่ ก.13 ข้อมูลราคาซื้อเพลิงที่แหล่งผลิตแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

branchdata=	Node	Node	Type	Branch code	length	Cij ²
	nf	nt	ty	Diameter		
				[mm]	[km]	c2
[1	2	0	0	890.0	4.0	9.07027
1	2	0	0	890.0	4.0	9.07027
2	3	0	0	890.0	6.0	6.04685
2	3	0	0	890.0	6.0	6.04685
3	4	0	0	890.0	26.0	1.39543
5	6	0	0	590.1	43.0	0.100256
6	7	0	0	590.1	29.0	0.148655
7	4	0	0	590.1	19.0	0.226895
4	14	0	0	890.0	55.0	0.659656
8	9	1	1	890.0	5.0	7.25622
8	9	1	1	395.5	5.0	0.108033
9	10	0	0	890.0	20.0	1.81405
9	10	0	0	395.5	20.0	0.0270084
10	11	0	0	890.0	25.0	1.45124
10	11	0	0	395.5	25.0	0.0216067
11	12	0	0	890.0	42.0	0.863836
12	13	0	0	890.0	40.0	0.907027
13	14	0	0	890.0	5.0	7.25622
14	15	0	0	890.0	10.0	3.62811
15	16	0	0	890.0	25.0	1.45124
11	17	0	0	395.5	10.5	0.0514445
17	18	1	1	315.5	26.0	0.00641977
18	19	0	0	315.5	98.0	0.00170320
19	20	0	0	315.5	6.0	0.027819

รูปที่ ก.14 ข้อมูลลักษณะการเชื่อมต่อในแต่ละโนด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

Analysis of Electric Power System Connected to Gas Supply System

กรกช ทันทิสิทธิ์ เกรียงไกร เนตรเอี่ยม และ คชาวุธ บัวชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยจลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: silver_brema@hotmail.com

บทคัดย่อ

จากการศึกษาแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP 2010) พบว่ามีการใช้แก๊สธรรมชาติในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส ซึ่งในบทความฉบับนี้จะใช้กระบวนการ Interior Point Method ในการแก้ปัญหาของระบบทั้งสองเพื่อหาจุดร่วมที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ต้นทุนเชื้อเพลิงการผลิตมีค่าต่ำที่สุดภายใต้ขอบเขตของการศึกษาที่ระบุไว้

ABSTRACT

According to the current PDP 2010. Electricity production in Thailand relies on natural gas as the main source of fuel. Therefore we need a simulation program capable of analysis the interrelation between electrical power system and gas supply system. In this paper use the process of Interior Point Method to solve both systems. So, we can find the optimal operating point resulting in the cheapest fuel cost while maintaining various constrains with in their respective limits.

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
S_i	ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัส i
P_i	ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
Q_i	ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i
V_i	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
I_i	ค่ากระแสไฟฟ้าที่บัส i
Y_{bus}	แอดมิตแดนซ์เมทริกซ์
n	จำนวนบัสทั้งหมดในระบบไฟฟ้า
θ_{ij}	มุมของแอดมิตแดนซ์เมทริกซ์ที่แถว i หลัก j
δ_i	มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
a_i, b_i, c_i	ค่าสัมประสิทธิ์ของราคาเชื้อเพลิงในการผลิตที่บัส i
$P_{G,i}, P_{L,i}$	ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i และค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i

$Q_{G,i}, Q_{L,i}$	ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i และค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i
N_B	จำนวนของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
N_{BG}	จำนวนของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงอื่น ๆ ยกเว้น เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติ
N_N	จำนวนโหนดทั้งหมดในระบบแก๊ส
N_S	จำนวนโหนดที่เป็นแหล่งผลิตแก๊ส
p_i	ความดันที่โหนด i
s_i	พลังงานที่จัดหาได้ที่โหนด i
g_i	ราคาต้นทุนการผลิตแก๊สต่อลูกบาศก์เมตรที่โหนด i
f_{ij}	อัตราการไหลของแก๊สจากโหนด i ไปยังโหนด j
C_{ij}	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อส่ง
A_p, A_a	จำนวนท่อส่งแก๊สที่มีลักษณะการส่งจ่ายแก๊สแบบ passive และ แบบ active
e_i	ความสัมพันธ์ของการบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโหนด i
\emptyset	เซตของลักษณะการเชื่อมต่อท่อส่งมีมิติ $N_N \times N_N$
$K_{2,i}, K_{1,i}, K_{0,i}$	ค่าสัมประสิทธิ์ของแก๊ส โหนด i

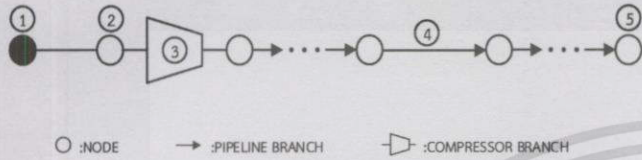
1. บทนำ

จากบทความข้างต้นจะพบว่าประเทศไทยมีการพึ่งพาแก๊สธรรมชาติในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีโปรแกรมจำลองของทั้งสองระบบที่เชื่อมต่อกัน สำหรับหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าและลดการส่งจ่ายแก๊ส เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด

โดยระบบตัวอย่างที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัสที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline ซึ่งในส่วนขอระบบแก๊สจะถูกจำลองให้เป็นระบบอย่างง่าย ไม่มีการนำสมการคอมเพรสเซอร์และลักษณะการวางท่อส่งจ่ายมาร่วมพิจารณา ซึ่งการหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังกล่าวสามารถหาได้จากกระบวนการจุดภายใน (Interior Point Method) [1]

2. ระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติจะถูกส่งมาจากผู้ผลิตแก๊สให้กับลูกค้าในสถานที่ต่างๆระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติโดยทั่วไปประกอบด้วยผู้ผลิตแก๊ส ลูกค้าสถานีคอมเพรสเซอร์ และท่อส่งซึ่งแสดงเป็นแบบจำลองแบบง่ายได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ

แบบจำลองระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ[2] ประกอบไปด้วยหมายเลข 1 แสดง แหล่งผลิตแก๊สธรรมชาติหมายเลข 2แสดง ผู้ผลิตหรือผู้ส่งจ่ายแก๊สหมายเลข 3 แสดง ท่อส่งแก๊สที่มีการติดตั้งสถานีคอมเพรสเซอร์เข้าไปเรียกว่า การส่งจ่ายแก๊สแบบ activeหมายเลข 4แสดงท่อส่งแก๊สที่ไม่มีการติดตั้งสถานีคอมเพรสเซอร์เข้าไป เรียกว่า การส่งจ่ายแก๊สแบบ passiveหมายเลข 5 แสดง ผู้บริโภคแก๊ส

ลักษณะการส่งจ่ายแก๊สส่วนที่ส่งจ่ายจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ แบบ passive และแบบ active

แบบ passive ทิศทางการไหลจะขึ้นอยู่กับความดันระหว่างโหนด ซึ่งสามารถหาค่าอัตราการไหลของแก๊ส[4]ได้จากสมการ

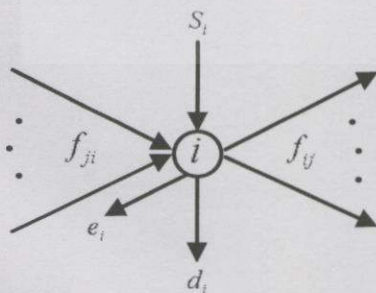
$$f_{ij}^2 = C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2); \forall (i, j) \in A_p \quad (1)$$

แบบ active ลักษณะการส่งจ่ายแก๊สจะเสมือนมีสถานีคอมเพรสเซอร์ติดตั้งอยู่ที่ท่อส่งจ่าย เพื่อใช้ในการกำหนดทิศทางการไหลของแก๊ส ซึ่งจะไม่ขึ้นกับความดันระหว่างโหนด ซึ่งสามารถหาค่าอัตราการไหลของแก๊สได้จากสมการ

$$f_{ij}^2 \geq C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2); \forall (i, j) \in A_a \quad (2)$$

$$f_{ij} \geq 0; \forall (i, j) \in A_a \quad (3)$$

ความสมดุลของระบบส่งจ่ายแก๊ส



รูปที่ 2 ความสมดุลของระบบส่งจ่ายแก๊สที่โหนด i ใดๆ

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการการไหลของแก๊สได้ดังนี้

$$s_i + \sum_{j(j,i) \in \mathcal{O}} f_{ji} = d_i + e_i(P_{G,i}) + \sum_{j(i,j) \in \mathcal{O}} f_{ij}; \forall (i, j) \in N_N \quad (4)$$

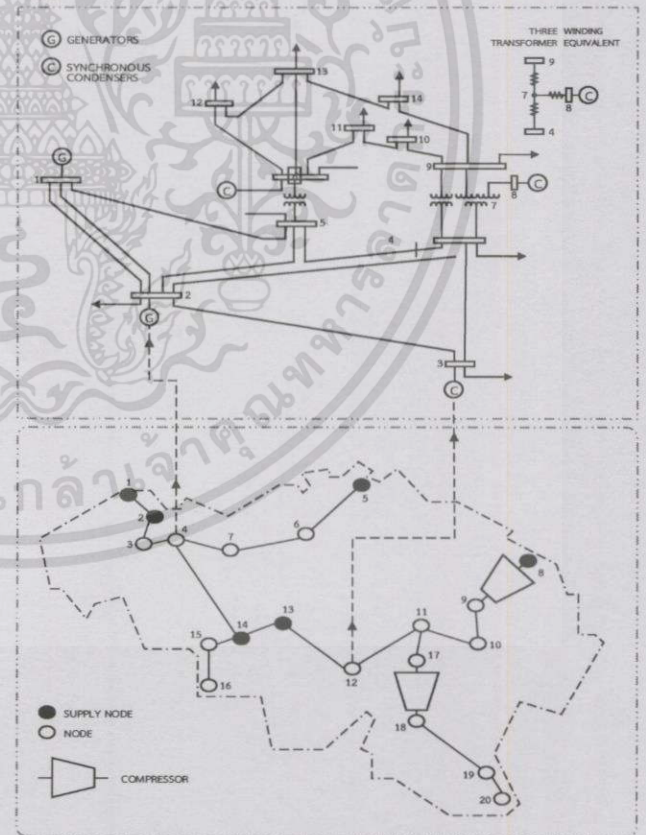
ผลรวมของความต้องการพลังงานที่โหนด i กับผลรวมอัตราการไหลของแก๊สจากโหนด j ไปยังโหนด i ใดๆ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของความต้องการพลังงานที่โหนด i การบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโหนด i และผลรวมอัตราการไหลของแก๊สจากโหนด i ไปยังโหนด j ใดๆ โดยค่าความสัมพันธ์ของการบริโภคแก๊สของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (e_i) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$e_i(P_{G,i}) = K_{2,i} P_{G,i}^2 + K_{1,i} P_{G,i} + K_{0,i}; \forall i \in N_N \quad (5)$$

3. การไหลของกำลังไฟฟ้าและแก๊สอย่างเหมาะสม ในระบบ

ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

จากรูปที่ 3 เป็นระบบตัวอย่างที่ใช้สำหรับกรณีศึกษา ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส[4] ที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline[3]



รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส

รูปที่ 3 เมื่อนำมาพิจารณาภายใต้ขอบเขตการศึกษาที่ไม่มีการนำสมการคอมพิวเตอร์มาคำนวณร่วม จะได้สมการสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้ราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงมีค่าต่ำที่สุดได้ดังต่อไปนี้

ก. สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์(Objective function)

$$f = \left(\sum_{i \in N_{Be}} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + \sum_{i \in N_s} g_i s_i \right) \quad (6)$$

ข. สมการขอบเขตของตัวแปรควบคุม

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (7)$$

$$\delta_{i,\min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,\max} \quad (8)$$

$$P_{G_{i,\min}} \leq P_{G_i} \leq P_{G_{i,\max}} \quad (9)$$

$$Q_{G_{i,\min}} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_{i,\max}} \quad (10)$$

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq s_{i,\max} ; \forall i \in N_s \quad (11)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} ; \forall i \in N_N \quad (12)$$

ค. สมการข้อจำกัดของปัญหา

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (13)$$

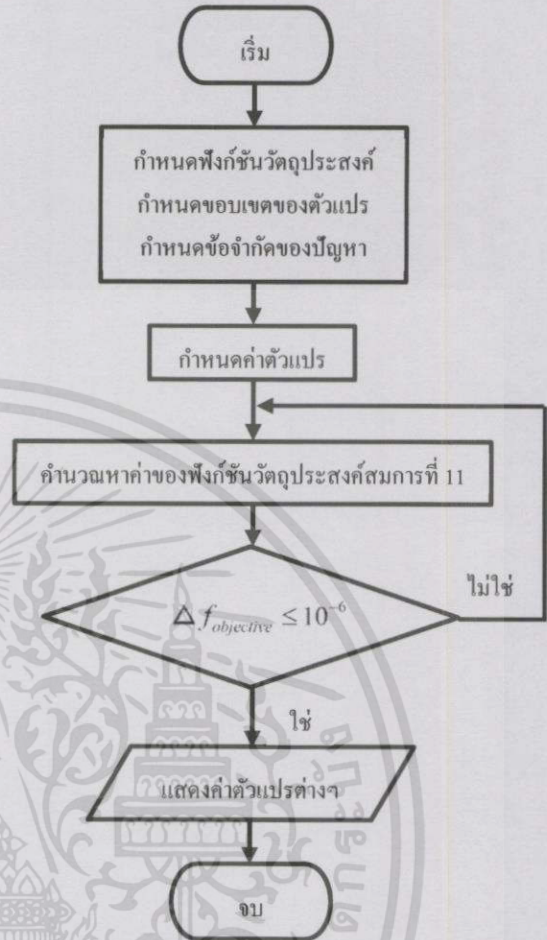
$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad (14)$$

และสมการที่ (1), (2) และ (3)

ส่วนสมการที่ (4) เป็นสมการแสดงกฎอนุรักษ์พลังงานของระบบแก๊สและเป็นสมการที่เชื่อมความสัมพันธ์ของระบบทั้งสอง

หลักการการทำงานของโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าที่เชื่อมกับระบบแก๊ส

เริ่มจากการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งในแบบจำลองดังกล่าวจะกำหนดให้สมการราคาต้นทุนการผลิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ อีกทั้งยังต้องกำหนดขอบเขตของตัวแปรควบคุมและกำหนดข้อจำกัดของปัญหาต่างๆ เพื่อให้ผลลัพธ์ของตัวแปรมีความสัมพันธ์กันตามสมการและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ขั้นตอนถัดมาต้องกำหนดค่าตัวแปรควบคุมเริ่มต้นสำหรับกระบวนการคำนวณในรอบแรก หลังจากกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณเพื่อหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในการคำนวณรอบต่อไปถ้าค่าผลต่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Δf) มีค่าต่ำกว่า 10^{-6} โปรแกรมจะหยุดกระบวนการคำนวณซ้ำ และแสดงผลค่าตัวแปรต่างๆของระบบ เป็นอันจบขั้นตอนการคำนวณ แต่กรณีที่มีผลลัพธ์จากผลต่างดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด โปรแกรมจะดำเนินการคำนวณซ้ำ โดยจะสุ่มค่าตัวแปรควบคุมเริ่มต้นค่าใหม่ และทำการวนลูปเหมือนเดิมจนกว่าจะได้ค่าตัวแปรควบคุมที่ส่งผลให้ ผลต่างของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดซึ่งขั้นตอนดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังแสดงขั้นตอนการแก้ปัญหา

4. ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

Power Flow Solution by Optimal Power Flow
No. of Iterations = 43

Bus No.	Voltage		Load		Gen	
	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.060	0.000	0.000	0.000	64.725	43.668
2	1.035	-0.004	21.700	12.700	91.116	-5.006
3	0.948	-0.249	94.200	19.000	55.611	19.378
4	0.995	-0.118	47.800	-3.900	0.000	0.000
5	1.006	-0.084	7.600	1.600	0.000	0.000
6	1.040	-0.089	11.200	7.500	63.496	3.189
7	1.013	-0.148	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.020	-0.148	0.000	0.000	0.000	4.003
9	1.007	-0.164	29.500	16.600	0.000	0.000
10	1.004	-0.156	9.000	5.800	0.000	0.000
11	1.017	-0.125	3.500	1.800	0.000	0.000
12	1.024	-0.109	6.100	1.600	0.000	0.000
13	1.016	-0.115	13.500	5.800	0.000	0.000
14	0.992	-0.161	14.900	5.000	0.000	0.000

Total 259.000 73.500 274.948 65.232
Total generation cost = 6668.18 \$

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้าในแต่ละบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimal Pressures at Nodes
No. of Iterations = 43

Node No.	Supply	Demand	ei	Pressures Bars
1	12.8774	0.0000	0.0000	56.5709
2	2.1423	0.0000	0.0000	56.5305
3	0.0000	3.9180	0.0000	56.4479
4	0.0000	0.0000	0.4556	55.6601
5	6.7627	0.0000	0.0000	59.8010
6	0.0000	4.0340	0.0000	55.8568
7	0.0000	5.2560	0.0000	55.4067
8	23.6465	0.0000	0.0000	62.2589
9	0.0000	0.0000	0.0000	62.2589
10	0.0000	6.3650	0.0000	60.2605
11	0.0000	0.0000	0.0000	58.8886
12	0.0000	2.1200	0.2781	56.5906
13	0.8237	0.0000	0.0000	54.9862
14	0.7790	0.0000	0.0000	54.7551
15	0.0000	6.8480	0.0000	53.4699
16	0.0000	15.6160	0.0000	51.8748
17	0.0000	0.0000	0.0000	58.1271
18	0.0000	0.0000	0.0000	60.0756
19	0.0000	0.2220	0.0000	30.2942
20	0.0000	1.9190	0.0000	28.0243

Total generation cost = 3.417 M\$

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาในระบบแก๊สในแต่ละโหนด

เมื่อพิจารณาตารางที่ 1 และ 2 จะพบว่าราคาค่าต้นทุนในการผลิต

กระแสไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนต้นทุนการผลิตของระบบไฟฟ้ากำลังและส่วนต้นทุนการผลิตของระบบส่งจ่ายแก๊สธรรมชาติ ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 6668.18 \$ และ 3.417 M\$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาด้านระบบไฟฟ้ากำลังจะพบว่าผลรวมกำลังไฟฟ้าจริงของบัสเครื่องกำเนิดแต่ละบัสจะมีค่าเพียงพอต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าจริงในระบบ โดยมีกำลังสูญเสียคิดเป็น 15.948 MW ซึ่งค่าดังกล่าวสูญเสียอยู่ในรูปของความร้อนในสายส่ง และเมื่อพิจารณาด้านระบบส่งจ่ายแก๊ส จะพบว่าผลรวมของพลังงานที่จัดหาได้ในแต่ละโหนดมีค่าเพียงพอต่อความต้องการพลังงานรวมในระบบ โดยมีพลังงานที่สูญเสียคิดเป็น 0.7.336 Mm³ ซึ่งจะสูญเสียในรูปของการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สและสภาพแวดล้อม

5. สรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอการแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส เพื่อให้การจัดสรรพลังงานของทั้งสองระบบเป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยวิธีจุดภายใน (Interior Point Method) จะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับหาค่าตัวแปรสถานะของระบบทั้งสองที่ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตมีค่าต่ำสุดภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดและขอบเขตที่กำหนด ระบบที่ใช้ในการนำเสนอ ได้แก่ ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัสที่เชื่อมต่อกับระบบแก๊ส 20 node 24 pipeline โดยในส่วนของระบบแก๊สจะถูกจำลองให้เป็นระบบอย่างง่าย ไม่มีการนำสมการคอมเพรสเซอร์และลักษณะการวางท่อส่งจ่ายมารวมพิจารณา

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปรีชญญา อุทัยทัศน์ และ เล็ก หล่อสมฤดี, "การแก้ปัญหาการจ่ายโหลอย่างประหยัดโดยวิธีจุดภายใน," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2547.
- [2] SEUNGWON AN, "Natural Gas and Electricity Optimal Power Flow," *Master of Engineering*, Oklahoma State University, 1999, pp. 39-40.
- [3] J. W. Marangon Lima, and A. C. Zamboni de Souza, "Modeling the Integrated Natural Gas and Electricity Optimal Power Flow," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-7.
- [4] University of Washington Electric Engineering, *14 Bus Power Flow Test Case* [Online], August, 1993. http://www.ee.washington.edu/research/h/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm

ประวัติผู้เขียน



นายกรกช ทันพิสิทธิ์

ที่อยู่ : 167/2 ซ.ยาสุข1 ถ.ราชวิถี ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมืองนครปฐม
จ.นครปฐม 73000

อีเมล : silver_brema@hotmail.com

เบอร์โทรศัพท์ : 085-4448744



นายเกรียงไกร เนตรเอี่ยม

ที่อยู่ : 10/1 ม.7 ต.รางพิบูล อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

อีเมล : moo_konmaisamkan@hotmail.com

เบอร์โทรศัพท์ : 082-2476972



นายคทาวุธ บัว้อย

ที่อยู่ : 250 หมู่ 4 ต. สบง อ. ภูซาง จ.พะเยา 56110

อีเมล : b.katawut.way@hotmail.com

เบอร์โทรศัพท์ : 084-3641734