

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม



นายกริช ยิ้มชื่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSMISSION EXPANSION PLANNING USING GENETIC ALGORITHM



Mr. Krit Yimchuen

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้ขั้นตอนวิธีทาง
พันธุกรรม

โดย

นาย กริช ยิ้มชื่น

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

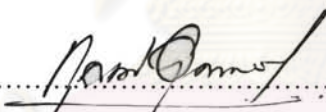
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐภาพ นิรมิตวิวัฒน์)

กฤษ ยิ้มชื่น : การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.
(TRANSMISSION EXPANSION PLANNING USING GENETIC ALGORITHM)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี, 119 หน้า.

การวางแผนการขยายระบบส่งไฟฟ้า (TEP) เป็นกระบวนการของการเลือกแผนการก่อสร้างเพื่อตอบสนองความต้องการไฟฟ้าในอนาคต โดยแผนการก่อสร้างที่เลือกจะต้องมีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดขณะที่ยังคงความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้อย่างมั่นคง ในทางคณิตศาสตร์ ปัญหาการวางแผนการขยายสายส่งจัดเป็นปัญหา Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) ซึ่งมีความยุ่งยากเนื่องจากได้รวมความซับซ้อนของปัญหาแบบไม่เชิงเส้นและปัญหาแบบตัวแปรจำนวนเต็มเข้าด้วยกัน เมื่อมองในมิติของช่วงเวลาในการวางแผน ปัญหาการวางแผนขยายสายส่งยังสามารถแบ่งปัญหาออกได้เป็นสองประเภทคือ การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single stage planning) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้า และการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น (Multi stage planning) ซึ่งคำนึงถึงการเติบโตของความต้องการไฟฟ้าประกอบการวางแผนด้วย

ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุด (Optimization problem) วิธีการหนึ่งที่เหมาะสมกับปัญหาประเภท MINLP วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการวางแผนการขยายสายส่งแบบหลายขั้นโดยพิจารณาการก่อสร้างสายส่งและติดตั้งตัวชดเชยกำลังรีแอคทีฟไปพร้อมๆกัน นอกจากนี้ยังพิจารณาเงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าผ่านทางดัชนี PQ-Voltage Stability Index (PQVSI) ด้วยในการแก้ปัญหาดังกล่าว จะใช้แบบจำลองกระแสสลับ (AC Model) เพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำ วิธีการที่นำเสนอได้ถูกทดสอบกับ ระบบทดสอบ 6 บัส ซึ่งดัดแปลงมาจากระบบทดสอบ Garver และระบบทดสอบ IEEE-RTS 79 ผลการทดสอบที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5270654521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : TRANSMISSION EXPANSION PLANNING / GENETIC ALGORITHM

KRIT YIMCHUEN: TRANSMISSION EXPANSION PLANNING USING GENETIC ALGORITHM. ADVISOR: ASST.PROF. KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 119 pp.

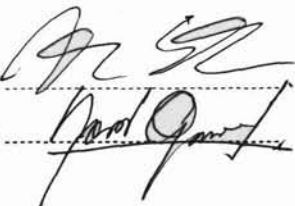
Transmission Expansion Planning (TEP) is a process of selection of transmission construction plans to meet growing demand in the future. The selected construction plan must have the lowest total cost while maintaining the ability of the transmission system to securely transfer power. Mathematically, TEP is classified as a Mixed Integer Nonlinear Programming problem (MINLP). This problem combines difficulties of both nonlinear programming and integer programming together. Considering planning period, TEP can also be divided into 2 problems, i.e. single stage planning which does not consider change of demand and multi stage planning where demand growth is taken into account.

Genetic Algorithm (GA) is one of the techniques to solve the optimization problem which is suitable for handling the MINLP. In this thesis, the GA is used to solve multi stage transmission expansion problems. The TEP considering in this thesis comprises construction of transmission lines, and installation of shunt reactive compensators. In addition, system voltage stability constraint is also considered through the PQ-Voltage Stability Index (PQVSI). All the TEPs in this thesis are formulated using AC models. The proposed method has been tested with the modified-Garver 6-bus and the IEEE-RTS79 test systems. Satisfactory results were obtained.

Department : Electrical Engineering ..
Field of Study : Electrical Engineering ..
Academic Year : 2010

Student's Signature

Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสวี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.เนบบุญ หุนเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ณัฐภพ นิมปิตวัน ที่ได้สละเวลาเพื่อตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนนิสิตในห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง(PSRL) ทุกคนที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีแก่ข้าพเจ้า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	4
2.1 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า (Transmission Expansion Planning, TEP)	4
2.2 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single-stage TEP).....	5
2.3 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น (Multi-stage TEP).....	7
2.4 ตัวประกอบปรับโทษ (Penalty factor).....	9
2.5 วิธีการแก้ปัญหาการวางแผนระบบส่งไฟฟ้า.....	9
2.5.1 วิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดทางคณิตศาสตร์.....	9
2.5.2 วิธีการฮิวริสติก.....	10
2.5.3 วิธีการกึ่งฮิวริสติก.....	10
บทที่ 3 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm).....	11
3.1 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเบื้องต้น.....	11
3.1.1 การลงรหัส (Encoding)	12
3.1.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initialization)	12
3.1.3 การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Value)	12

	หน้า
3.1.4 การคัดเลือก (Reproduction)	13
3.1.5 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)	14
3.1.5.1 พื้นฐานการข้ามสายพันธุ์.....	14
3.1.5.2 การปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์.....	15
3.1.6 การผ่าเหล่า (Mutation).....	17
3.1.7 การเลือกโครโมโซมที่โดดเด่นเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป.....	17
3.1.8 เงื่อนไขการหยุด.....	18
3.2 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบ ชั้นเดียว.....	18
3.2.1 การลงรหัส (Encoding)	18
3.3 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบ หลายชั้น.....	20
3.3.1 การลงรหัส (Encoding)	20
3.3.2 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)	21
3.3.3 การผ่าเหล่า (Mutation)	22
บทที่ 4 ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน (PQ Voltage Stability Index; PQVSI).....	24
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	28
5.1 ระบบทดสอบ 6 บัส.....	28
5.1.1 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง.....	29
5.1.2 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	31
5.2 ระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	33
5.2.1 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้น เดียว.....	35
5.2.2 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการ วางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว.....	37
5.2.3 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของ ปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว.....	37
5.2.4 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้ง พิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบ ชั้นเดียว.....	39

5.2.5 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น.....	40
5.2.6 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น.....	42
5.2.7 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น.....	44
5.2.8 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในทุกชั้นของการวางแผน.....	46
5.2.9 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น.....	48
5.2.10 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในทุกชั้นของการวางแผน.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	56
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ Garver 6 บัส.....	62
ภาคผนวก ข ระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	64
ภาคผนวก ค ข้อมูลบัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าจากการทดสอบในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	119

สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การคัดเลือก.....	13
ตารางที่ 5.1 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง.....	29
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลบัส หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง.....	30
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลสายส่ง หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง.....	30
ตารางที่ 5.4 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ....	31
ตารางที่ 5.5 ข้อมูลบัส หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	32
ตารางที่ 5.6 ข้อมูลสายส่ง หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	32
ตารางที่ 5.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้ามาในระบบ.....	34
ตารางที่ 5.8 ลำดับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้ามาในระบบ.....	35
ตารางที่ 5.9 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว.....	36
ตารางที่ 5.10 สายส่งตามแผนงานตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว.....	37
ตารางที่ 5.11 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว.....	38
ตารางที่ 5.12 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว	39
ตารางที่ 5.13 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายขั้น.....	41
ตารางที่ 5.14 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายขั้น.....	43
ตารางที่ 5.15 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายขั้น.....	45
ตารางที่ 5.16 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียวในทุกๆขั้นของการวางแผน.....	47

ตารางที่ 5.17 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชุดเซยกกำลังรีแอกทีฟ พร้อม ทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลาย ชั้น.....	49
ตารางที่ 5.18 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชุดเซยกกำลังรีแอกทีฟพร้อมกัน พร้อมทั้งพิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว ในทุกๆชั้นของการวางแผน.....	51
ตารางที่ 5.19 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชุดเซยกกำลังรีแอกทีฟ ของ ปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว โดยใช้วิธีฮิวริสติก.....	53
ตารางที่ 5.20 สรุปราคาค่าก่อสร้างตามแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น และ แผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวทุกๆชั้น.....	54
ตารางที่ 5.21 สรุปราคาค่าก่อสร้างตามแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว.....	55
ตารางที่ 5.22 สรุปราคาค่าก่อสร้างตามแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น.....	55
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 6 บัส.....	62
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ 6 บัส.....	62
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 6 บัส.....	63
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งทางเลือก.....	63
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE-RTS79.....	65
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	66
ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น	68
ตารางที่ ข.4 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า.....	71
ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก.....	73
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการ วางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว.....	95
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง ของปัญหา การวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว.....	96
ตารางที่ ค.3 ข้อมูลบัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับ ดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว.....	98
ตารางที่ ค.4 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับ ดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว.....	99

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ.....	7
รูปที่ 3.1 การคัดเลือก.....	14
รูปที่ 3.2 การข้ามสายพันธุ์พื้นฐาน.....	15
รูปที่ 3.3 การปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์.....	16
รูปที่ 3.4 การผ่าเหล่ากรณี $i = 2$	17
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของบิตตัวแปรในกรณีที่สร้างสายส่งเพียงอย่างเดียว.....	18
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของบิตตัวแปรในกรณีที่สร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ...	18
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการวิธีทางพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่ง ไฟฟ้าแบบชั้นเดียว.....	19
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างโครงสร้างบิตตัวแปรของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ที่มี n ชั้น.....	20
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างโครงสร้างบิตแสดงเงื่อนไขของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า แบบหลายชั้น.....	21
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการข้ามสายพันธุ์ของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลาย ชั้น.....	21
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการผ่าเหล่าของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น...	22
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการวิธีทางพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่ง ไฟฟ้าแบบหลายชั้น.....	23
รูปที่ 4.1 แบบจำลองของสายส่งแบบ π	24
รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ 6 บัส.....	29
รูปที่ 5.2 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งในระบบระบบทดสอบ 6 บัส.....	31
รูปที่ 5.3 แผนงานก่อสร้างสายส่งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบระบบทดสอบ 6 บัส.....	33
รูปที่ 5.4 ระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	34
รูปที่ 5.5 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว ในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	36
รูปที่ 5.6 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการ วางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	38

รูปที่ 5.7 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟพร้อมทั้งพิจารณาระดับ ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	40
รูปที่ 5.8 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลาย ชั้นในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	42
รูปที่ 5.9 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผน ขยายสายส่งแบบหลายชั้นในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	44
รูปที่ 5.10 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหา การวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น ในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	46
รูปที่ 5.11 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหา การวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวทุกๆชั้นของการวางแผนในระบบทดสอบ IEEE RTS- 79.....	48
รูปที่ 5.12 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณา ระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นในระบบ ทดสอบ IEEE RTS-79.....	50
รูปที่ 5.13 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟร่วมกันพร้อมทั้ง พิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวทุกๆชั้น ของการวางแผนในระบบทดสอบ IEEE RTS-79.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วน คือ ระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย ตามปกติแล้ว เมื่อมีความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของขนาดประชากรและการเติบโตทางเศรษฐกิจ การไฟฟ้าจะต้องพิจารณาขยายกำลังการผลิตในระบบโดยทำการก่อสร้างโรงไฟฟ้า และจะต้องทำการก่อสร้างระบบส่งเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ใหญ่ในระบบด้วย ดังนั้นการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าจึงมีความสำคัญต่อการวางแผนเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นความต้องการไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศในอนาคต

ความหมายของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า (Transmission Expansion Planning, TEP) คือ การเลือกแผนงานก่อสร้างเพื่อรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยแผนงานที่จะเลือกนั้นต้องมีค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดน้อยที่สุด และทำให้ระบบไฟฟ้ามีความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยไม่ละเมิดขีดจำกัดต่างๆของทั้งระบบไฟฟ้ากำลัง [1] หลักการพื้นฐานของการพิจารณาการเลือกแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าคือการเปรียบเทียบแผนทางเลือก (Comparing alternatives) ซึ่งแผนงานที่เหมาะสมคือ แผนที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดจากแผนทางเลือกทั้งหมด [2] เนื่องจากการพิจารณาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าเป็นการพิจารณาระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวที่จะต้องมีการแก้ปัญหาขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ปัญหาขีดจำกัดทางแรงดันไฟฟ้าที่บัส และปัญหาอื่นๆ เช่นปัญหาเสถียรภาพแรงดัน เป็นต้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาการก่อสร้างสายส่งควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ เพื่อแก้ปัญหาขีดจำกัดของระบบในสถานะอยู่ตัว ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการไฟฟ้าในอนาคต

ทั้งนี้ มีบทความจำนวนมากที่นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาสำหรับการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า แต่เกือบทั้งหมดละเลยปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญที่สุดในปัจจุบัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าที่คำนึงถึงเงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าด้วย โดยพิจารณาผ่านดัชนี PQ Voltage Stability Index (PQVSI) [14] นอกจากนี้ จะพิจารณาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าออกเป็นสองแบบคือ การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single-stage TEP) [15-22] และการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น (Multi-stage TEP) [23-26] เพื่อทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟและการจำกัดค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันที่มีต่อการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า ซึ่งในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น (Multi-

stage TEP) นั้น ต้องใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value) [2] ของแผนการสร้างในแต่ละช่วงเวลา (Stage) มาพิจารณาร่วมกัน

โดยทั่วไป ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าจัดเป็นปัญหาทางออปติไมซ์เซชันประเภท Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) ซึ่งเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นที่มีการใช้ตัวแปรเป็นจำนวนเต็มในการตัดสินใจสร้างสายส่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม [4-13] ในการแก้ปัญหา เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาประเภท MINLP โดยจะพิจารณาการก่อสร้างสายส่ง และการติดตั้งตัวชดเชยกำลังรีแอคทีฟไปพร้อมๆกัน รวมทั้งนำดัชนี PQVSI มาใช้ในการประเมินเสถียรภาพของระบบด้วย ระบบทดสอบที่ใช้เป็นตัวอย่างในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ระบบทดสอบ 6 บัส ซึ่งดัดแปลงมาจากระบบทดสอบ Garver และระบบทดสอบ IEEE RTS-79 [3] เพื่อแก้ปัญหการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าในแบบจำลองกระแสสลับ (AC Model)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการแก้ปัญหการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยอาศัยวิธีการทางพันธุกรรม
2. เพื่อนำวิธีการที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า เพื่อเลือกแผนงานก่อสร้างที่เหมาะสมที่สุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบไฟฟ้าเป็นแบบสามเฟสสมดุล และอยู่ในสถานะอยู่ตัว
2. ละเลยค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (Operating cost)
3. พิจารณาเฉพาะปัญหาขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ขีดจำกัดทางแรงดันไฟฟ้า และขีดจำกัดเสถียรภาพแรงดันเป็นหลัก โดยละเลยปัญหาทางด้านเสถียรภาพจากการรบกวนชั่วคราว (Transient Stability)
4. ละเลยการพิจารณาเงื่อนไข N-1

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการแก้ปัญหการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยค้นคว้าจากวารสารทางวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมในการแก้ปัญหาค่าขีดสุด
3. พัฒนาแนวคิดและวิธีการแก้ปัญหการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

4. ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าเหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม
5. ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพของโปรแกรม
6. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
7. เรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. วิธีการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ที่คำนึงถึง ข้อจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ข้อจำกัดทางแรงดันไฟฟ้า และข้อจำกัดเสถียรภาพแรงดัน

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมเป็นดังต่อไปนี้ บทที่ 1 จะกล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึง หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า

บทที่ 3 จะกล่าวถึง เครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่ง Genetic Algorithm คือวิธีที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ

บทที่ 4 จะกล่าวถึง ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน (PQ Voltage Stability Index; PQVSI)

บทที่ 5 จะกล่าวถึง การทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทที่ 6 จะกล่าวถึง บทสรุปที่ได้จากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า โดยรายละเอียดที่นำเสนอจะประกอบด้วย การแสดงปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวและการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นในรูปของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสม (Optimal Power Flow; OPF) ตามแบบจำลองกระแสสลับ จากนั้นจะกล่าวถึงการแบ่งประเภทของการวางแผนขยายสายส่งไฟฟ้า และวิธีการที่ใช้แก้ปัญหา

2.1 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า (Transmission Expansion Planning, TEP)

จากการเติบโตทางเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม ตลอดจนการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ส่งผลให้มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สิ่งที่จะถูกพิจารณาตามมาคือการก่อสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต แต่เนื่องด้วยตำแหน่งที่ตั้งของโรงไฟฟ้านั้นจะอยู่ห่างไกลจากจุดโหลด หรือระบบส่งเดิมอาจจะไม่มีความสามารถที่จะส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นเพื่อความเพียงพอและความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การขยายระบบส่งไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นต้องถูกพิจารณาควบคู่กันไปด้วย

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าเป็นการพิจารณาเลือกแผนงานก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งอาจพิจารณาล่วงหน้าเป็นระยะเวลาหลายปีขึ้นกับช่วงเวลาของการวางแผน (Planning horizon) โดยอาจพิจารณาได้สองแบบ คือ การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว และการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ทั้งนี้แผนงานก่อสร้างที่ถูกเลือกควรมีค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าจัดเป็นปัญหา OPF ซึ่งในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าจะพิจารณาระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว (Steady State) และจะต้องมีการพิจารณาถึงขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่งและขีดจำกัดทางแรงดันไฟฟ้าที่บัส การก่อสร้างสายเพิ่มขึ้นในระบบร่วมกับการติดตั้งตัวชดเชยกำลังรีแอคทีฟในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยแก้ไขปัญหาขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง และปัญหาขีดจำกัดทางแรงดันไฟฟ้าที่บัสได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแก้ปัญหา OPF โดยใช้แบบจำลองกระแสสลับ และพิจารณาก่อสร้างสายส่งและตัวชดเชยกำลังรีแอคทีฟไปพร้อมๆกัน ทั้งนี้จะนำเอาดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันมาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อจำกัดระดับความใกล้จุดพังทลายทางแรงดัน ซึ่งดัชนีที่ใช้คือดัชนี PQ Voltage Stability Index (PQVSI) [3] ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4

ในหัวข้อ 2.2 และ 2.3 จะนำเสนอระบบสมการที่ใช้แก้ปัญหา OPF สำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single-stage TEP) [15-22] และ การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น (Multi-stage TEP) [23-26] ตามลำดับ

2.2 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single-stage TEP)

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว [15-22] ช่วงเวลาทั้งหมดจะถูกพิจารณา รวมกัน ไม่มีการแบ่งย่อย ซึ่งหมายถึงไม่มีการแยกลำดับก่อนหลังในการก่อสร้างสายส่ง แต่เนื่องจากความเป็นจริงไม่จำเป็นต้องสร้างสายทุกเส้นในแผนพร้อมๆกัน แต่อาจสร้างขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการกำลังไฟฟ้าในแต่ละปี ดังนั้นการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว จึงไม่เหมาะกับแผนก่อสร้างที่มีระยะเวลายาวนานจนเกินไป ใช้การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้นจะเหมาะสมกว่า

ระบบสมการที่ใช้แก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว ถูกแสดงอยู่ในรูปของปัญหาค่าขีดสุด (Optimization Problem) และใช้แบบจำลองกระแสสลับ (AC model) ในการพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า [3] ดังนี้

$$\text{Min} \sum_{ij \in \mathcal{C}} f_{ij}(n_{ij}) + \sum_{i \in \mathcal{N}} (g_i(c_i) + h_i(r_i)) \quad (2.2.1)$$

Subject to

$$S_i = (v_i \angle \delta_i) \sum_{ij \in A_i} I_{ij}^* \quad (2.2.2)$$

$$S_i + S_i^L - S_i^G = 0, \quad \forall i \in \mathcal{N}: i \neq \text{slack} \quad (2.2.3)$$

$$I_{ij} = \left((n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot y_{ij} + \frac{(n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot b_{ij}}{2} \angle 90^\circ \right) \cdot v_i \angle \delta_i - (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot y_{ij} \cdot v_j \angle \delta_j \quad (2.2.4)$$

$$|I_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot I_{ij}^{\max} \quad (2.2.5)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \quad (2.2.6)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i + Q_i^L + v_i^2 \cdot (r_i - c_i + B_i^0) \leq Q_i^{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{N} \quad (2.2.7)$$

$$\lambda_{ij} \leq \lambda^{\max} \quad (2.2.8)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max}, n_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \quad (2.2.9)$$

$$v_i, \delta_i \in \mathbb{R}; c_i, r_i \in \mathbb{R}^+ \quad (2.2.10)$$

$$ij \in \mathcal{E} \cup \mathcal{C}; i \in \mathcal{N} \quad (2.2.11)$$

โดยที่

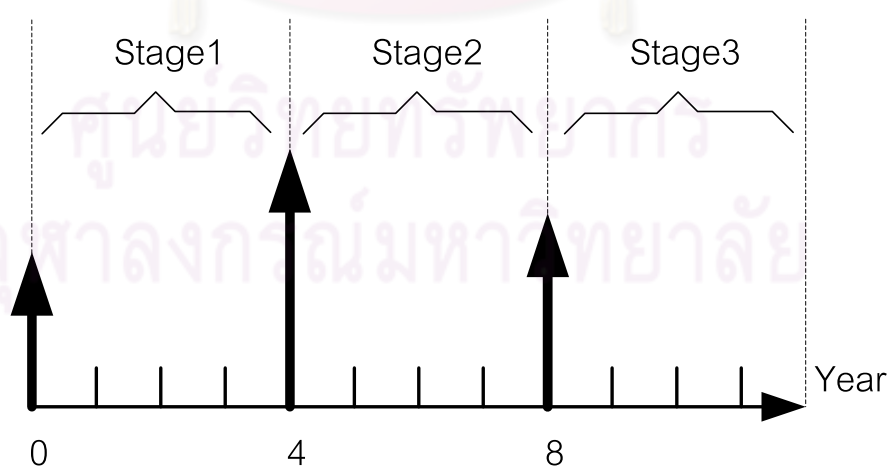
- $f_{ij}(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันของราคาค่าก่อสร้างสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j
- $g_i(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันของราคาค่าติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟประเภทคาปาซิเตอร์ที่บัส i
- $h_i(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันของราคาค่าติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟประเภทรีแอกเตอร์ที่บัส i
- S_i คือ ตัวแปรเชิงซ้อนแทนกำลังปรากฏที่ไหลออกจากบัส i
- I_{ij} คือ ตัวแปรเชิงซ้อนแทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปสู่อบัส j
- I_{ij}^{max} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j เมื่อพิจารณาตามขีดจำกัดทางความร้อนสูงสุด
- v_i คือ ตัวแปรจำนวนจริงแทนขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
- δ_i คือ ตัวแปรจำนวนจริงแทนมุมเฟสแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
- λ_{ij} คือ ตัวแปรจำนวนจริงแทนดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าประจำสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j (PQVSI)
- c_i คือ ตัวแปรจำนวนเต็มบวกแทนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟประเภทคาปาซิเตอร์ที่บัส i (กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 1.0 p.u.)
- r_i คือ ตัวแปรจำนวนเต็มบวกแทนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟประเภทรีแอกเตอร์ที่บัส i (กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 1.0 p.u.)
- B_i^0 คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของอุปกรณ์ชุดเซยที่ติดตั้งอยู่แล้วในระบบที่บัส i (กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 1.0 p.u. ในทิศทางที่ชี้ดออกจากบัส)
- n_{ij} คือ ตัวแปรจำนวนเต็มบวก แทนจำนวนวงจรของสายส่งที่จะก่อสร้างระหว่างบัส i กับบัส j
- n_{ij}^0 คือ จำนวนวงจรของสายส่งที่มีอยู่เดิมระหว่างบัส i กับบัส j
- n_{ij}^{max} คือ จำนวนวงจรของสายส่งที่สามารถก่อสร้างได้สูงสุดระหว่างบัส i กับบัส j
- y_{ij} คือ ค่าเชิงซ้อนของแอดมิตแตนซ์อนุกรมต่อหนึ่งวงจรสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j
- b_{ij} คือ ค่าตัววัดประจุสายส่งต่อหนึ่งวงจรสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j
- P_i^L คือ ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
- P_i^G คือ กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
- Q_i^L คือ ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i
- Q_i^{min} คือ กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุดที่บัส i
- Q_i^{max} คือ กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดที่บัส i
- \mathcal{E} คือ เซตของเส้นทาง ij ที่มีสายส่งติดตั้งอยู่แล้วในระบบ

- C คือ เซ็ตของเส้นทาง ij ที่ใช้เป็นทางเลือกในการก่อสร้างสายส่ง
- \mathcal{N} คือ เซ็ตของบัสในระบบไฟฟ้า
- A_i คือ เซ็ตของเส้นทางที่มีสายส่งเชื่อมโยงกับบัส i โดย $A_i \subset \mathcal{E} \cup C$

ปัญหา OPF ตามสมการที่ (2.2.1) เป็นสมการเป้าประสงค์ เพื่อใช้คำนวณหาค่าก่อสร้าง โดยเป็นแผนที่พิจารณาทั้งการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้า และติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟในระบบพร้อมกัน สำหรับสมการที่ (2.2.2)-(2.2.11) ก็คือ เงื่อนไขบังคับทั้งหมดที่ต้องพิจารณาในการวางแผนก่อสร้างระบบส่ง โดยสมการที่ (2.2.5) จะแทนเงื่อนไขบังคับของสายส่ง สมการที่ (2.2.6) แทนเงื่อนไขบังคับทางด้านขนาดของแรงดันไฟฟ้า และสมการที่ (2.2.7) แทนเงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

2.3 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น (Multi-stage TEP)

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น [23-26] จะพิจารณาช่วงเวลาของการวางแผนออกเป็นช่วงๆ ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันที่เวลาเริ่มต้น ดังนั้นการวางแผนขยายระบบส่งแบบหลายชั้น จึงเปรียบเสมือนมีการวางแผนขยายระบบส่งแบบขั้นเดียวหลายปัญหา โดยแต่ละปัญหาจะมีความเชื่อมโยงกัน กล่าวคือ แผนของชั้นย่อยก่อนหน้าจะมีผลต่อแผนของชั้นย่อยในปัจจุบัน นอกจากนี้มูลค่าเงินลงทุนของแผนงานที่ได้จากการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นจะพิจารณาจากอัตราคิดลด (Discount rate) โดยนำมาคำนวณให้เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) ของแผนงานย่อยทุกชั้นของการวางแผน



รูปที่ 2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

การลงทุนก่อสร้างในแต่ละช่วงนั้นจะถูกคิดลดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) เมื่ออ้างอิงที่เวลาเริ่มต้นของการพิจารณา ตัวอย่างการคิดค่าลงทุนสามารถแสดงได้ในรูป 2.1 หลักการดังกล่าวจะถูกประยุกต์ใช้กับการคิดราคาในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น โดยสมการแสดงการคำนวณตามแนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.3.1

ระบบสมการที่ใช้แก้ปัญหการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ถูกแสดงอยู่ในรูปของปัญหาค่าขีดสุด และใช้แบบจำลองกระแสสลับ (AC model) ในการพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนี้

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{ns} \frac{[\sum_{ij \in C} f_{ij}(n_{ij}) + \sum_{i \in N} (g_i(c_i) + h_i(r_i))]}{(1+r)^{ny_k(ns-1)}} \quad (2.3.1)$$

โดยที่

- r คือ อัตราคิดลด (Discount rate)
- ny_k คือ จำนวนปีใน ชั้นที่ k ของการวางแผน
- ns คือ จำนวนชั้นของการวางแผน

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาแยกการวางแผนเป็นช่วงๆ เช่น แผนการขยายระบบส่งไฟฟ้า 15 ปี แยกเป็นการวางแผน 3 ช่วง ช่วงละ 5 ปี เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ทุกอย่างที่จะทำการก่อสร้างจะถูกพิจารณาในแง่ของลำดับการสร้างภายใต้แผนลำดับย่อยของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ซึ่งปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันด้วยอัตราคิดลด (Discount rate) ทำให้ได้ค่าก่อสร้างที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) ดังสมการเป้าประสงค์ (2.3.1) ทั้งนี้เงื่อนไขบังคับของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นนั้นจะเป็นเงื่อนไขชุดเดียวกันกับการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว และจะถูกพิจารณาในทุกๆ ช่วงของแผนการขยายระบบส่ง

ในการพิจารณาแผนแบบหลายชั้นจะมีลำดับการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งลำดับที่ได้จะมาจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan, PDP) นอกจากนี้จะทำการจัดสรรกำลังการผลิตในแต่ละช่วงของแผนเพื่อแสดงให้เห็นว่าแผนสามารถรองรับการจัดการทางด้านการผลิตด้วย ทั้งนี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจัดสรรกำลังการผลิตในแต่ละช่วงด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) โดยใช้โปรแกรม MathPower4.0 เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาคำตอบ

2.4 ตัวประกอบปรับโทษ (Penalty factor)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการผนวกเงื่อนไขบังคับของระบบเข้ากับสมการเป้าประสงค์โดยจะอาศัยตัวประกอบปรับโทษ (Penalty factor) ที่เกิดจากการละเมิดข้อจำกัดทางด้านขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ระดับแรงดันที่บัส และข้อจำกัดดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบ ซึ่งจะเป็นการถ่วงน้ำหนักเพื่อจัดลำดับความสำคัญของค่าตอบในขั้นตอนวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งในระบบสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบไฟฟ้าสามารถแสดงตัวประกอบปรับโทษ ได้ดังนี้

$$\text{Min } (Z + p[n_{l_v} + n_{v_v} + n_{pQVSI_v}]) \quad (2.4.1)$$

โดยที่

Z	คือ ค่าก่อสร้างสายส่งในฟังก์ชันเป้าประสงค์ตามปกติ
p	คือ ตัวประกอบปรับโทษ (Penalty factor)
n_{l_v}	คือ จำนวนสายส่งหรือหม้อแปลงที่ละเมิดข้อจำกัดทางด้านขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง
n_{v_v}	คือ จำนวนบัสที่ละเมิดข้อจำกัดทางระดับแรงดัน
n_{pQVSI_v}	คือ จำนวนสายส่งหรือหม้อแปลงที่ละเมิดข้อจำกัดทางด้านดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน

2.5 วิธีการแก้ปัญหาการวางแผนระบบส่งไฟฟ้า

การแก้ปัญหาในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท [3] คือ วิธีการออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ วิธีการฮิวริสติก และวิธีการกึ่งฮิวริสติก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 วิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดทางคณิตศาสตร์

วิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดทางคณิตศาสตร์เป็นการใช้เทคนิคทางแคลคูลัสเพื่อแก้ปัญหา OPF ซึ่งแม้ว่าผลตอบที่ได้จากวิธีการนี้จะสามารถยืนยันได้ในทางคณิตศาสตร์ว่ามีค่าของฟังก์ชันเป้าประสงค์ต่ำที่สุด แต่ปัญหาการวางแผนระบบส่งไฟฟ้าก็จัดเป็นปัญหาประเภท Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) ซึ่งจะใช้เวลาในการหาคำตอบค่อนข้างสูง และในบางครั้งไม่สามารถหาคำตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนมากๆ ได้ วิธีการในการแก้ปัญหา MINLP ที่นิยมใช้ได้แก่วิธี Branch and Bound [17] และ Bender decomposition [18] เป็นต้น

2.5.2 วิธีการฮิวริสติก

การหาผลตอบด้วยวิธีการฮิวริสติก [15-16] สามารถได้ผลลัพธ์ในระยะเวลาที่รวดเร็ว ซึ่งโดยทั่วไปจะอาศัยกฎเกณฑ์บางอย่างเช่น ทำการเพิ่มสายส่งเข้าไปในระบบไฟฟ้าครั้งละหนึ่งเส้น จากชุดสายส่งทางเลือก (Transmission line candidate) และคัดเลือกสายส่งโดยพิจารณาจากค่าดัชนีที่สะท้อนถึงความสามารถในการแก้ปัญหาขีดจำกัดของระบบ ซึ่งสามารถจำแนกวิธีการคำนวณค่าดัชนีดังกล่าวได้ 2 ประเภท [3] โดยประเภทแรก คือ การคำนวณดัชนีค่าความไว (Sensitivity Index) ที่มีผลต่อการเพิ่มสายส่งเข้ามาในระบบ และประเภทที่สอง คือ การใช้หลักการคำนวณดัชนีจากการแก้ปัญหา OPF โดยทั่วไป ผลตอบที่ได้จากวิธีฮิวริสติกจะยังไม่ใช่ที่มีประสิทธิภาพมากนัก

2.5.3 วิธีการกึ่งฮิวริสติก

วิธีการกึ่งฮิวริสติก เป็นวิธีการใหม่ที่เกิดขึ้นจากการนำข้อดีของสมรรถนะของการประมวลผลในคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น โดยวิธีการหาค่าตอบจะใช้หลักการทางความน่าจะเป็นมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าตอบ ซึ่งในแต่ละวิธีก็จะมีวิธีการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้แต่ละกระบวนการจะมีหลักเกณฑ์บางอย่างที่จะทำให้ค่าตอบหลีกเลี่ยงไม่ลู่เข้าสู่ local optimum ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการในการหาค่าตอบในลักษณะหลายๆเส้นทาง และจะมีการประเมินศักยภาพของแต่ละเส้นทางว่า สามารถนำไปสู่ global optimum ได้หรือไม่ โดยเส้นทางที่มีศักยภาพสูงกว่าก็จะมีแนวโน้มจะเป็นที่จะนำมาพิจารณาต่อสูงกว่า ตัวอย่างวิธีการกึ่งฮิวริสติก ได้แก่ Genetic Algorithms (GA) [4-8] Simulated Annealing (SA) [16] Tabu Search (TS) [19-21] และ Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) [22] เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (GA) ในการแก้ไขปัญหาวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าทั้งแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้น ซึ่งรายละเอียดของการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอ จะถูกแสดงไว้ในบทที่ 3

บทที่ 3

ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithms)

3.1 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเบื้องต้น

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithms) [4-13] เป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดแบบสุ่ม (Stochastic optimization) อย่างหนึ่งที่เลียนแบบหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรมทางธรรมชาติ (Natural genetics) เพื่อหาค่าเหมาะสมโดยรวม (Global optimum) โดยอาศัยการสมมติจุดคำตอบขึ้นมาหลายๆจุดก่อน (Population of solutions) แล้วประยุกต์ใช้หลักการค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีโอกาสที่จะอยู่รอด (Survival of the fittest) มากที่สุด เพื่อหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้นในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอด (Generation) สำหรับในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอดจะมีการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness) ของจุดคำตอบแต่ละจุด แล้วพิจารณาเลือกจุดคำตอบใหม่จากค่าความเหมาะสมนี้โดยอาศัยวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ วิธีการค้นหาคำตอบดังกล่าวประกอบด้วย การคัดเลือก การข้ามสายพันธุ์ และการผ่าเหล่า จุดคำตอบแต่ละจุดจะประกอบไปด้วยสตริง (String) ของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสไว้เรียกว่าโครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งสามารถถอดรหัสเป็นค่าของตัวแปรจริงได้ โดยทั่วไปนิยมลงรหัสตัวแปรให้เป็นระบบเลขฐานสอง

จากหลักการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาค่าขีดสุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมนั้นจะแตกต่างจาก วิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดวิธีอื่นๆ ดังนี้

- 1) ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมใช้รหัสของตัวแปรเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดแทนที่จะใช้ค่าของตัวแปรโดยตรง ดังนั้นวิธีนี้จึงสะดวกในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับตัวแปรชนิดใดก็ได้โดยไม่ต้องเป็นตัวแปรชนิดต่อเนื่อง
- 2) ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดที่หาจากจุดเริ่มต้นหลายๆจุด เป็นการหาจุดเหมาะสมโดยรวมโดยเทคนิคการแก้ปัญหาค่าขีดสุดแบบขนาน ซึ่งทำให้คำตอบที่ได้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมโดยรวม
- 3) ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมใช้ข้อมูลเพียงแค่ว่าค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเท่านั้น ดังนั้นวิธีนี้สามารถใช้กับฟังก์ชันเป้าหมายได้ทุกชนิด ไม่จำเป็นต้องต่อเนื่องหรือหาอนุพันธ์ได้
- 4) ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมใช้ทฤษฎีทางความน่าจะเป็นในการหาคำตอบ ในขณะที่วิธีการอื่นๆ ส่วนมากใช้วิธีการทางแคลคูลัสของเวกเตอร์ (Vector Calculus)

3.1.1 การลงรหัส (Encoding)

เนื่องจากขั้นตอนวิธีพันธุกรรมใช้รหัสของตัวแปรในการแก้ปัญหาค่าขีดสุด ดังนั้นถ้าเราเลือกวิธีลงรหัสที่เหมาะสมย่อมทำให้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมมีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย การลงรหัสที่นิยมใช้โดยทั่วไปจะเป็นการลงรหัสโดยอาศัยระบบเลขฐานสอง (0 และ 1) เป็นส่วนประกอบของโครโมโซมในการลงรหัส ความยาวของสตริงเป็นตัวกำหนดความละเอียดของตัวแปรที่เราต้องการ ตัวอย่าง เช่น หากเรามีตัวแปรต่อเนื่อง x ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 2 และต้องการความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 6 ในการคำนวณ ตัวแปรดังกล่าวในช่วงตัวแปร -1 ถึง 2 จึงควรถูกแบ่งออกเป็นอย่างน้อย $(2 - (-1)) * 1,000,000 = 3,000,000$ ช่วงย่อยๆ นั้นหมายถึงเราต้องใช้โครโมโซมที่มีความยาว 22 บิตเนื่องจาก

$$2,097,152 = 2^{21} < 3,000,000 < 2^{22} = 4,194,304$$

3.1.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initialization)

การสร้างประชากรเริ่มต้น หมายถึง การหารูปแบบของคำตอบที่เป็นไปได้โดยไม่ละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ ในรูปแบบของโครโมโซมขึ้นมาจำนวนหนึ่งโดยการสุ่ม เพื่อให้กระบวนการทางพันธุกรรมสามารถดำเนินต่อไปได้ นอกจากนี้การหารูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นไปได้นั้นจะต้องคำนึงถึงเวลาในการคำนวณซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนรูปแบบที่ต้องทำการวิเคราะห์ จากเหตุผลดังกล่าวการกำหนดประชากรเริ่มต้นที่ดีจึงต้องมีค่าไม่มากจนทำให้เสียเวลาในการคำนวณเริ่มต้นมาก แต่ก็ต้องไม่น้อยจนเกินไปเพื่อให้มีการผสมสายพันธุ์ที่หลากหลาย

3.1.3 การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Value)

แต่ละค่าคำตอบที่ผ่านการถอดรหัสจากโครโมโซมในขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมจะถูกประเมินความเหมาะสมโดยทั่วไปค่าความเหมาะสมนี้จะขึ้นอยู่กับค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย สำหรับโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ต้องการให้ต้นทุนในการก่อสร้างเพื่อขยายระบบส่งไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด นั่นคือ ต้องการให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยๆ จึงกำหนดให้ค่าความเหมาะสมมีค่าเท่ากับส่วนกลับของค่าฟังก์ชันเป้าหมายดังสมการที่ (3.1.1)

$$f(x) = 1/F(x) \quad (3.1.1)$$

เมื่อ

$f(x)$ คือ ค่าความเหมาะสมของตัวแปร x

$F(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันเป้าหมายของตัวแปร x

3.1.4 การคัดเลือก (Reproduction)

เป็นขั้นตอนที่จะเลือกว่าโครโมโซมแต่ละตัวในกลุ่มประชากรนั้นควรจะอยู่รอดในรุ่นต่อไปหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว ถ้าโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมสูงก็มีโอกาสที่จะอยู่รอดมาก ส่วนโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำก็มีโอกาสอยู่รอดน้อย ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ (3.1.2) ตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างสัดส่วนความเหมาะสมของโครโมโซมจำนวน 4 ตัว การเลือกโครโมโซมจะทำโดยสุ่มหาอันดับของโครโมโซมตามจำนวนโครโมโซม (4 ครั้ง) โครโมโซมอันดับที่ถูกสุ่มนั้นจะได้รับการคัดเลือกให้อยู่รอดต่อไป หลักการนี้เรียกว่า วิธีวงล้อรูเล็ตต์

$$P_i = \left(\frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \right) \times 100 \quad (3.1.2)$$

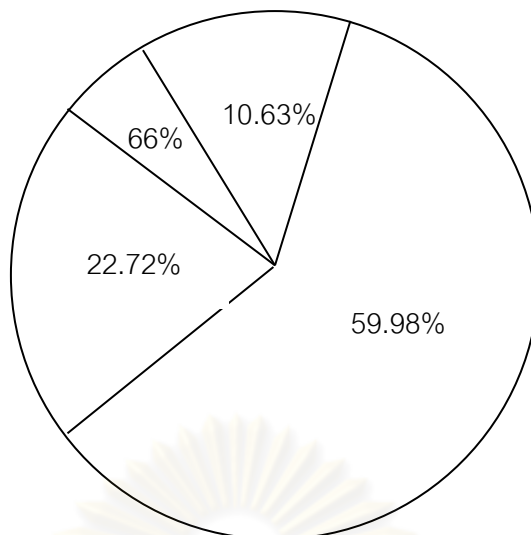
โดย f_i คือ เป็นค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

n คือ เป็นจำนวนประชากรโครโมโซมทั้งหมด (Population Size)

P_i คือ โอกาสของโครโมโซมที่ถูกเลือก (Probability of Selection)

ตารางที่ 3.1 การคัดเลือก

ลำดับที่	โครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	อันดับความเหมาะสม	โอกาสโครโมโซมจะถูกเลือก
1	11010	0.005917	2	22.72
2	11000	0.001736	4	6.66
3	10000	0.015625	1	59.98
4	10011	0.00277	3	10.63
	ผลรวม	0.026048	ผลรวม	100



รูปที่ 3.1 การคัดเลือก

3.1.5 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

3.1.5.1 พื้นฐานการข้ามสายพันธุ์

การข้ามสายพันธุ์เป็นกระบวนการที่โครโมโซมคู่หนึ่งๆจะแลกเปลี่ยนบิตกันในบางตำแหน่งเพื่อให้กำเนิดโครโมโซมโครงสร้างใหม่ๆขึ้นมาด้วยความน่าจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ (Probability of crossover; P_c) ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็คือเลขจริงระหว่าง 0 ถึง 1 ที่เรากำหนดขึ้นมาเพื่อบอกว่าโครโมโซมมีโอกาสจะข้ามสายพันธุ์มากน้อยแค่ไหน รูปที่ 3.2 แสดงการข้ามสายพันธุ์โดยพื้นฐาน โดยในขั้นแรกจะสุ่มเลขจริงในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมาถ้าเลขที่สุ่มนี้มีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะไม่ทำการข้ามสายพันธุ์ แต่ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมานี้มีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะทำการข้ามสายพันธุ์ โดยโครโมโซมคู่หนึ่งจะถูกคัดเลือกขึ้นมาเรียกว่า โครโมโซมพ่อแม่ (Parent Chromosomes) จากนั้นก็จะสุ่มตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์ (Cross site) ขึ้นมา หลังจากนั้นโครโมโซมคู่นั้นก็จะเปลี่ยนบิตกันในตั้งแต่ตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งข้ามสายพันธุ์เป็นต้นไป เพื่อให้กำเนิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมาเรียกว่า โครโมโซมลูก กระบวนการนี้จะถูกกระทำซ้ำจนได้โครโมโซมชุดใหม่ขึ้นมาครบตามจำนวนประชากรที่เราต้องการ

ตำแหน่งข้าม

โครโมโซมพ่อแม่1	1	1	0	0	1
โครโมโซมพ่อแม่2	0	1	0	1	0
โครโมโซมลูก1	1	1	0	1	0
โครโมโซมลูก2	0	1	0	0	1

รูปที่ 3.2 การข้ามสายพันธุ์พื้นฐาน

3.1.5.2 การปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์

การข้ามสายพันธุ์ในหัวข้อที่ 3.1.5.1 นั้นเรียกว่า การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว (Single point crossover) ซึ่งจะให้ผลดีในบางปัญหา เช่น ปัญหาที่มีตัวแปรควบคุมไม่มากนักและปัญหาที่มีความยาวของบิตโครโมโซมน้อยๆ แต่เมื่อปัญหาค่าขีดสุดมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนตัวแปรควบคุมมากขึ้น การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดี่ยวดังกล่าวจะให้ผลที่ไม่ดีนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากการข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดี่ยวนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งข้ามสายพันธุ์ กล่าวคือโครโมโซมคู่หนึ่งๆจะแลกเปลี่ยนบิตโครโมโซมกันในตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งข้ามสายพันธุ์ (ตามรูปที่ 3.2) ซึ่งจะเห็นว่าบิตโครโมโซมที่อยู่ในตำแหน่งแรกของโครโมโซมพ่อแม่จะไม่มีโอกาสได้แลกเปลี่ยนบิตกับโครโมโซมอื่นเลย ซึ่งในบางครั้งโครโมโซมในตำแหน่งดังกล่าวอาจจะเป็นประโยชน์ในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดก็เป็นได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว หลักการปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ จึงถูกนำมาประยุกต์ในโครงร่างวิทยานิพนธ์นี้ โดยการปรับปรุงดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยในขั้นแรก เราจะสุ่มคัดเลือกโครโมโซมที่จะข้ามสายพันธุ์ขึ้นมาคู่หนึ่งก่อนเรียกว่าโครโมโซมพ่อแม่ จากนั้นในขั้นตอนที่สอง จะทำการสุ่มเลขระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นมาโดยถ้าเลขสุ่มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะทำการข้ามสายพันธุ์ แต่ถ้าเลขสุ่มดังกล่าวสูงกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะไม่ทำการข้ามสายพันธุ์ สรุปคือการข้ามสายพันธุ์จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (3.1.3)

$$P_R \leq P_C \quad (3.1.3)$$

โดย P_R คือ ความน่าจะเป็นที่ถูกสุ่มขึ้นมาในแต่ละคู่โครโมโซม
 P_C คือ ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์

ในกรณีที่ต้องมีการข้ามสายพันธุ์ ในขั้นตอนที่สาม จะทำการสุ่มบิตโครโมโซม 0 ถึง 1 ที่มีความยาวเท่ากับความยาวบิตของโครโมโซมพ่อแม่ขึ้นมาชุดหนึ่ง จากนั้นถ้าตำแหน่งใดของบิตโครโมโซมที่สุ่มขึ้นมา มีค่าเป็น 1 ก็ทำการแลกเปลี่ยนบิตตำแหน่งนั้นระหว่างโครโมโซมพ่อแม่คู่นั้น ถ้าตำแหน่งใดของบิตสตรงที่สุ่มขึ้นมา มีค่าเป็น 0 ก็จะไม่คบบิตตำแหน่งนั้นเหมือนเดิม ดังรูปที่ 5 ซึ่งหลักการปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธีการดังกล่าว เรียกว่าการทำยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover)

โครโมโซมพ่อแม่1	0	1	0	0	1
โครโมโซมพ่อแม่2	1	0	1	1	0
โครโมโซมสุ่ม	1	0	0	1	1
โครโมโซมลูก1	1	1	0	1	0
โครโมโซมลูก2	0	0	1	0	1

รูปที่ 3.3 การปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์

จากหลักการดังกล่าวจะเห็นว่าการทำยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์เป็นการข้ามสายพันธุ์ที่ทุกบิตในโครโมโซมมีโอกาสที่จะแลกเปลี่ยนบิตกับโครโมโซมอื่นๆเท่าเทียมกัน ดังนั้นการข้ามสายพันธุ์วิธีนี้จะได้ผลลัพธ์ที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งข้ามสายพันธุ์หรือความยาวบิตของโครโมโซมพ่อแม่

3.1.6 การผ่าเหล่า (Mutation)

เป็นกระบวนการที่ป้องกันการลู่เข้าก่อนกำหนดและไม่ให้สูญเสียข้อมูลที่สำคัญบางอย่างไปในระหว่างกระบวนการถ่ายทอด โดยเราจะกำหนดความน่าจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า (Probability of mutation; P_M) โดยในขั้นแรกจะสุ่มเลขในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ที่ทุกๆบิตของโครโมโซม แล้วเปรียบเทียบเลขที่สุ่มแต่ละบิตกับความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า ถ้าเลขที่สุ่มในบิตตำแหน่งใดมีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าบิตตำแหน่งนั้นก็จะไม่ผ่าเหล่า แต่ถ้าเลขที่สุ่มในบิตตำแหน่งใดมีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าก็จะผ่าเหล่าที่บิตตำแหน่งนั้น โดยเปลี่ยนบิตที่ตำแหน่งนั้นจาก 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 สรุปคือการผ่าเหล่า (Mutation) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (3.1.4)

$$P_{R_i} \leq P_M \quad (3.1.4)$$

โดย P_{R_i} คือ ความน่าจะเป็นที่ถูกสุ่มขึ้นมาในแต่ละบิตโครโมโซม
 P_M คือ ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า

โครโมโซม ก่อนการผ่าเหล่า	0	1	0	0	1
โครโมโซม หลังการผ่าเหล่า	0	0	0	0	1

รูปที่ 3.4 การผ่าเหล่ากรณี $i = 2$

3.1.7 การเลือกโครโมโซมที่โดดเด่นเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป

การดำเนินการทางพันธุกรรมเป็นกระบวนการที่อาศัยความน่าจะเป็นในการถ่ายทอดประชากรจากรุ่นหนึ่งไปยังอีกรุ่นหนึ่ง ซึ่งไม่มีหลักประกันว่าในรอบถัดไปจะมีประชากรที่ดีกว่ารุ่นแรก และในบางครั้งก็อาจจะสูญเสียโครโมโซมที่ดีที่สุดไปในระหว่างการถ่ายทอด จากปัญหานี้เองจึงได้เกิดแนวคิดที่ว่าควรจะเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบของการถ่ายทอดเอาไว้ในรอบถัดไป เพื่อเป็นหลักประกันว่าโครโมโซมที่ดีที่สุดในรอบถัดไปจะดีกว่าในรอบก่อนหน้านี้เสมอ ซึ่งหลักการนี้เรียกว่า อิลิติสซึม (Elitism)

3.1.8 เงื่อนไขการหยุด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เงื่อนไขการหยุดของขั้นตอนวิธีพันธุกรรมก็คือ หยุดหาคำตอบเมื่อครบจำนวนรุ่นการถ่ายทอดสูงสุดที่กำหนดเอาไว้ หรือค่าฟังก์ชันเป้าหมายในแต่ละรุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงครบจำนวนครั้งที่กำหนดไว้

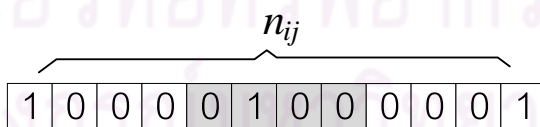
3.2 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว

การประยุกต์ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว มีหัวข้อที่ทำการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับปัญหา ดังนี้

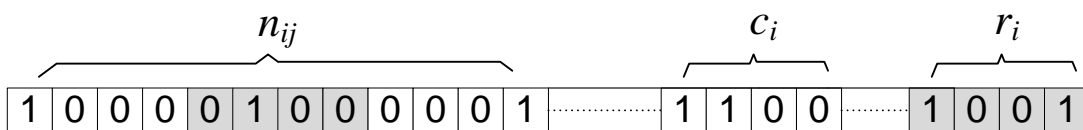
3.2.1 การลงรหัส (Encoding)

การลงรหัสเป็นส่วนสำคัญมากในขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการพิจารณาแผนงานขยายระบบส่งที่ประกอบไปด้วยสายส่งทางเลือกและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ดังนั้นจึงทำออกแบบรหัสไว้สำหรับตัวแปรทั้งสองแบบ คือ ตัวแปรของสายส่งทางเลือก (x_{line}) และตัวแปรของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ($x_{compensate}$)

สายส่งทางเลือกที่ใช้พิจารณานั้นจะมีการแยกตามเส้นทาง (Path) ซึ่งแต่ละเส้นทางนี้ก็จะมีความยาวในการก่อสร้างแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของสายและพื้นที่ที่ก่อสร้างสาย ดังนั้นตัวแปรของสายส่งทางเลือก (x_{line}) จะลงรหัสตามจำนวนทางเลือกของแต่ละเส้นทางเป็นบิตในเลขฐานสอง ส่วนอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟจะพิจารณาติดตั้งในทุกๆ โหลดบัส ดังนั้นตัวแปรของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ($x_{compensate}$) จึงถูกออกแบบให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนโหลดบัส และความยาวของบิตตัวแปรจะขึ้นกับความละเอียดที่กำหนด ทั้งนี้โครงสร้างของบิตตัวแปรจะสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

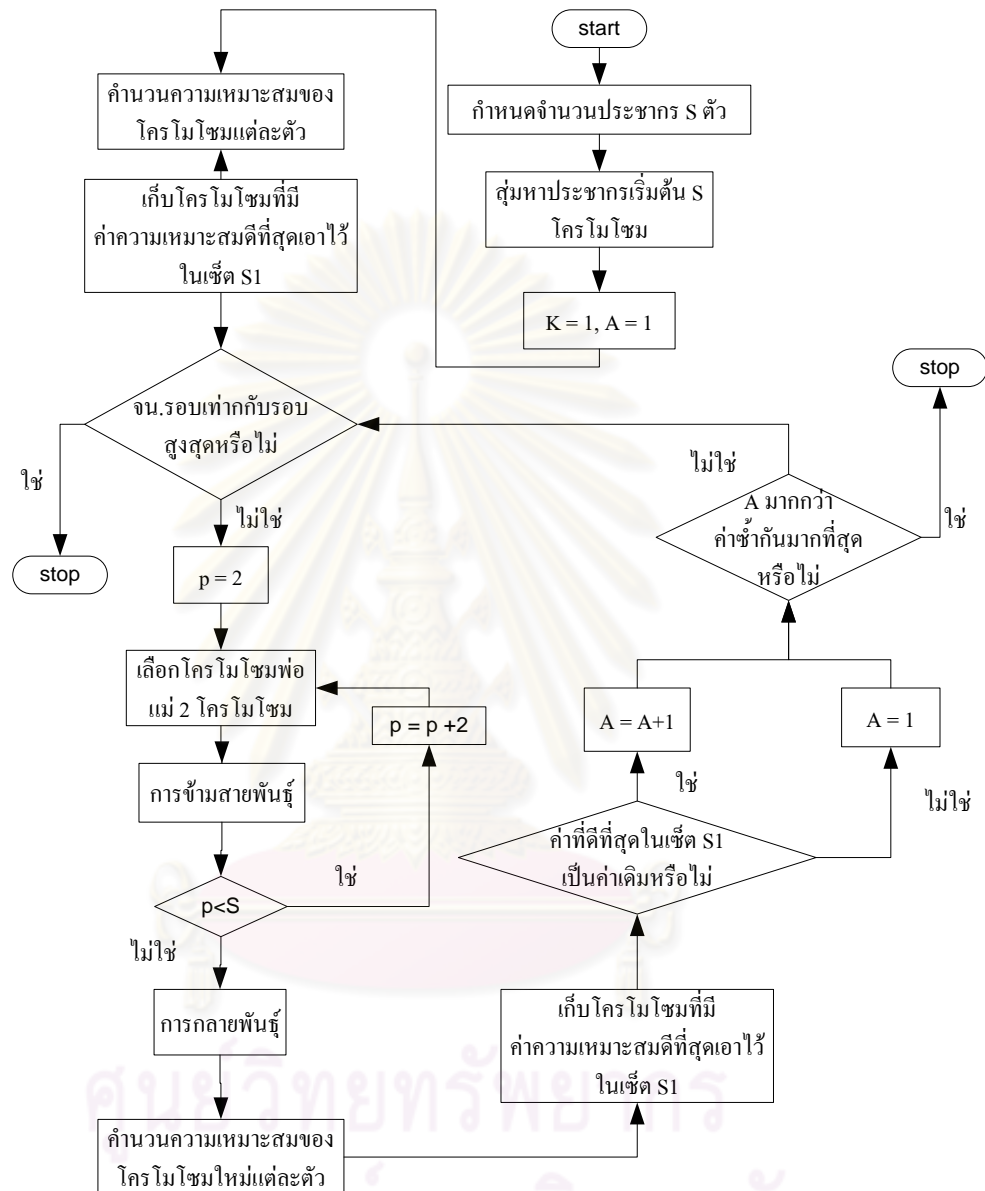


รูปที่ 3.5 โครงสร้างของบิตตัวแปรในกรณีที่สร้างสายส่งเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของบิตตัวแปรในกรณีที่สร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

ทั้งนี้ลำดับกระบวนการต่างๆ ของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่ประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



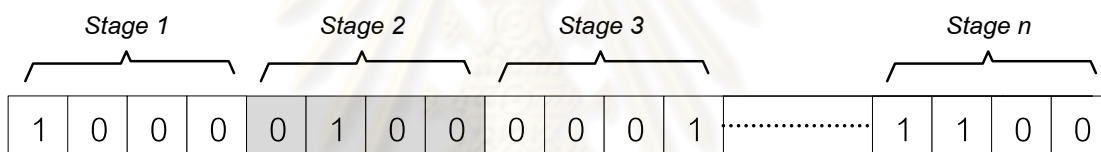
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการวิธีทางพันธุกรรม
สำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว

3.3 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

การประยุกต์ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น จะมีหัวข้อที่ทำการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับปัญหาซึ่งเป้าหมายหลักคือ คงเงื่อนไขของแผนแต่ละชั้นไว้ ซึ่งแผนชั้นปัจจุบันจะคงผลจากแผนชั้นก่อนหน้าไว้โดยไม่เปลี่ยนแปลง หัวข้อในขั้นตอนทางพันธุกรรมที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ มีดังนี้

3.3.1 การลงรหัส (Encoding)

จากหัวข้อที่ 3.2 การลงรหัสขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวจะไม่มีเงื่อนไขระหว่างบิตตัวแปร สามารถสุ่มหาได้ตรงๆ แต่สำหรับการลงรหัสขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นนั้น จะทำการออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้างบิตเหมือนเอาโครงสร้างบิตของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวหลายแผนมาต่อกัน ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างโครงสร้างบิตตัวแปรของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ที่มี n ชั้น

การที่ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นมีความเป็นเงื่อนไขกันระหว่างแผนงานของชั้นก่อนหน้ากับแผนงานชั้นปัจจุบัน ดังนั้นการลงรหัสขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นจะต้องทำการกำหนดเงื่อนไขให้แผนงานชั้นปัจจุบันจะต้องคงสภาพการก่อสร้างของแผนงานชั้นก่อนหน้าด้วย และแผนปัจจุบันจะสามารถสร้างได้เฉพาะส่วนที่แผนงานชั้นก่อนหน้ายังไม่ได้ก่อสร้างทั้งในส่วนของสายส่งทางเลือกและตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ทั้งนี้จึงต้องทำการถอดรหัสของแผนแต่ละชั้นก่อนเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ซึ่งโครงสร้างของบิตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

Stage 1	ก่อนถอดรหัส	$\overbrace{0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0}^{n_{ij}} \quad \overbrace{0\ 0\ 0\ 0}^{c_i} \quad \overbrace{1\ 0\ 0\ 1}^{r_i}$
	หลังถอดรหัส	$0\ 4\ 0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad -70$
Stage 2	ก่อนถอดรหัส	$0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 \quad \dots \quad 1\ 1\ 0\ 0 \quad \dots \quad 1\ 0\ 0\ 1$
	หลังถอดรหัส	$0\ 4\ 1 \quad \dots \quad 80 \quad \dots \quad -70$
Stage 3	ก่อนถอดรหัส	$0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 \quad \dots \quad 1\ 1\ 0\ 0 \quad \dots \quad 1\ 0\ 0\ 1$
	หลังถอดรหัส	$5\ 4\ 1 \quad \dots \quad 80 \quad \dots \quad -70$

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างโครงสร้างบิตแสดงเงื่อนไขของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

3.3.2 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

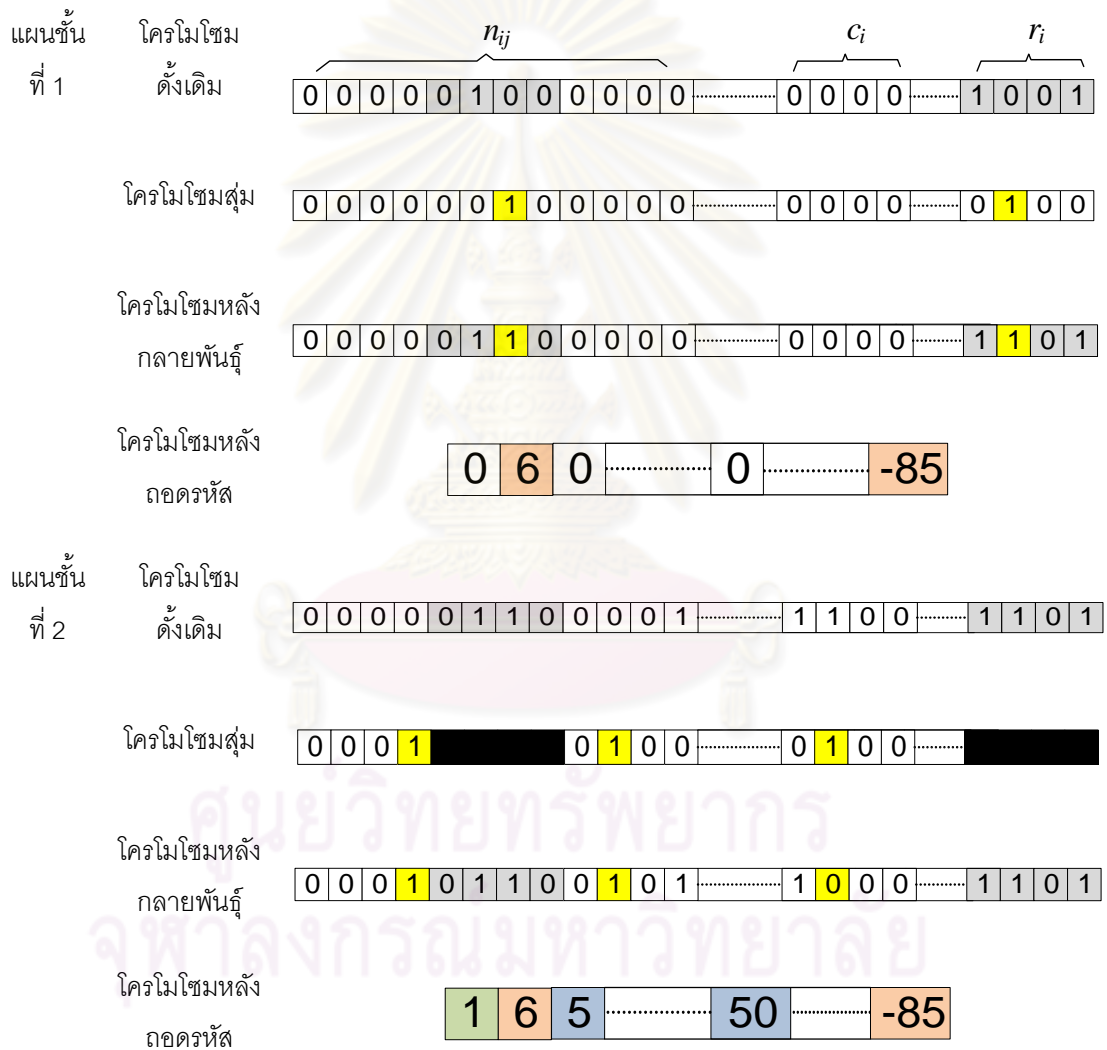
การข้ามสายพันธุ์ในปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น จะใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมเบื้องต้น แต่จะแตกต่างกันที่การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นจะกำหนดให้พิจารณาเฉพาะชั้นแรกชั้นเดียว จากนั้นจะทำการสลับบิตในตำแหน่งเดียวกันทุกๆชั้นของการวางแผน ซึ่งสามารถยกตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.10

โครโมโซม	แผนชั้น	$\overbrace{0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0}^{n_{ij}} \quad \overbrace{0\ 0\ 0\ 0}^{c_i} \quad \overbrace{1\ 0\ 0\ 1}^{r_i}$
แม่	ที่ 1	$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix}$
	แผนชั้น	$\begin{matrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix}$
โครโมโซม	แม่	$0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0 \quad \dots \quad 1\ 1\ 0\ 0 \quad \dots \quad 0\ 1\ 0\ 1$
โครโมโซม	แผนชั้น	$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$
โครโมโซม	ลูก	$0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0 \quad \dots \quad 1\ 0\ 1\ 0 \quad \dots \quad 1\ 1\ 0\ 0$
	ที่ 1	$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$
	แผนชั้น	$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$
	ที่ 2	$0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \quad \dots \quad 1\ 0\ 1\ 0 \quad \dots \quad 1\ 1\ 0\ 0$

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการข้ามสายพันธุ์ของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

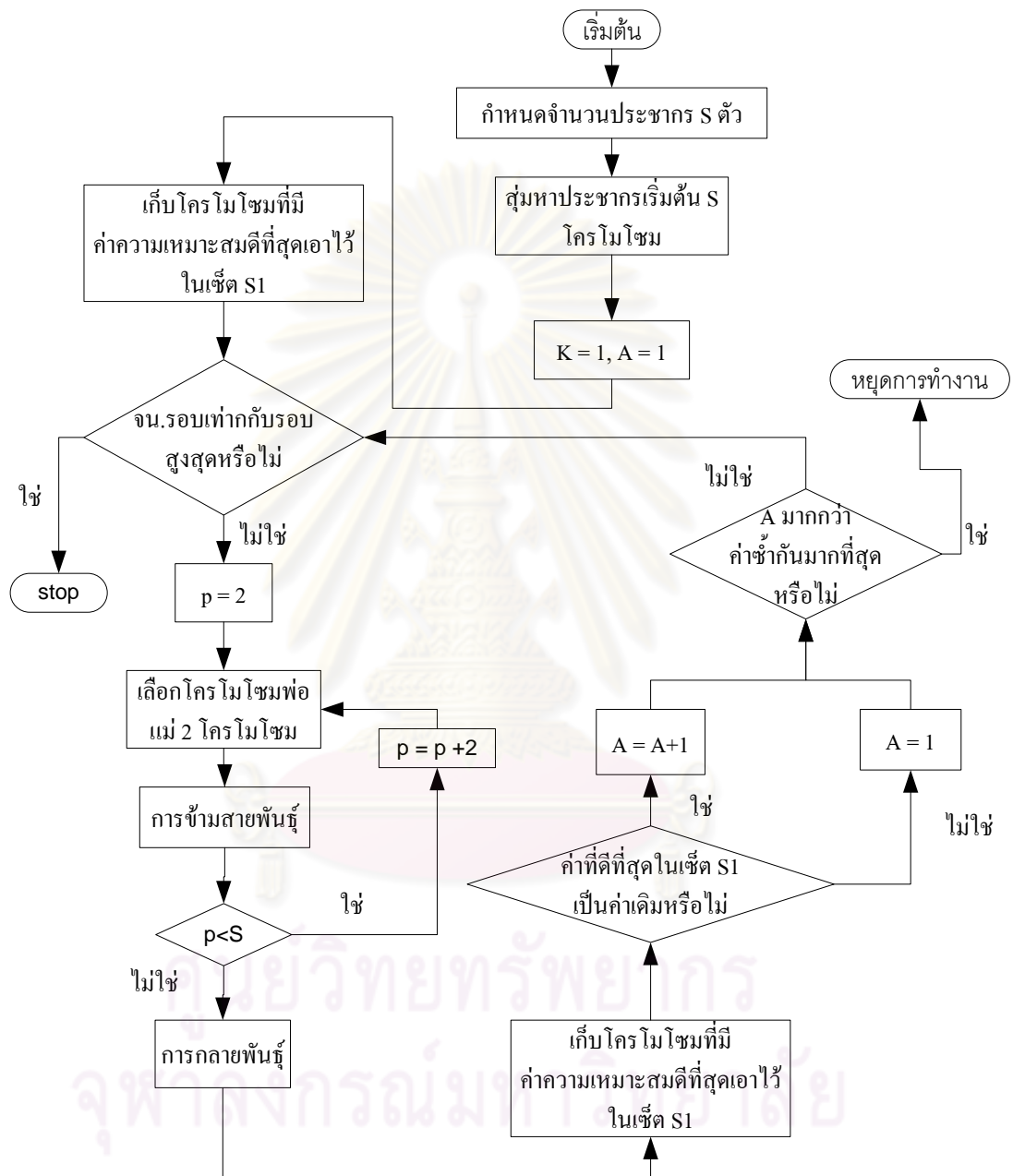
3.3.3 การผ่าเหล่า (Mutation)

การผ่าเหล่าในปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น จะพิจารณาที่ละชั้นของการวางแผน โดยใช้วิธีการคล้ายกับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมเบื้องต้น แต่จะต่างกันที่การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นจะกำหนดเงื่อนไขให้มีการผ่าเหล่าได้เฉพาะตำแหน่งเส้นทางของสายส่งทางเลือกหรือโหลดบัสของอุปกรณ์ชุดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไม่ได้มาจากแผนงานก่อนหน้า ดังนั้นจึงต้องทำการถอดรหัสของแผนแต่ละชั้นก่อนเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขว่าสามารถทำการผ่าเหล่าที่ปิดได้ ตัวอย่างการผ่าเหล่าถูกแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการผ่าเหล่าของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

ทั้งนี้ลำดับกระบวนการต่างๆ ของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่ประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งกระบวนการประเมินค่าความเหมาะสมจะอยู่ในส่วนการสุ่มหาประชากรและการกลายพันธุ์



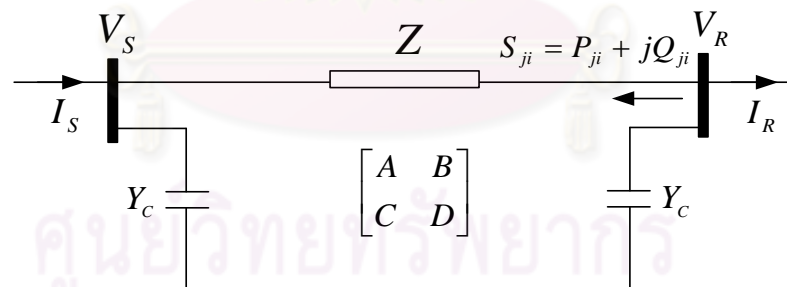
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการวิธีทางพันธุกรรมสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

บทที่ 4

ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน (PQ Voltage Stability Index; PQVSI)

ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญที่สุดทั้งในการวางแผน (Planning) และการปฏิบัติการ (Operation) ในระบบไฟฟ้ากำลัง การประเมินเสถียรภาพเชิงแรงดันที่แม่นยำและรวดเร็วมีความสำคัญมากในการประกอบการตัดสินใจที่จะจัดการวางแผนให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการประเมินเสถียรภาพเชิงแรงดันคือการประเมินความสามารถของระบบไฟฟ้าที่จะสามารถรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ

เราจะบ่งชี้ความมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน โดยดัชนีที่ดีที่สุดคือดัชนีที่สามารถเตือนภัยให้กับผู้ดูแลระบบได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วเมื่อระบบไฟฟ้าใกล้ถึงจุดพังทลาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยการวัดความทนทานต่อเสถียรภาพของแรงดันจากดัชนี $PQVSI$ [14] ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้เพื่อประเมินเสถียรภาพแรงดันของสายส่งไฟฟ้าโดยพัฒนาจากแนวคิดที่ว่า ระบบไฟฟ้ากำลังที่แข็งแรงจะต้องมีจุดทำงานในสภาวะปัจจุบันห่างจากจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) มาก [14] ดัชนี $PQVSI$ สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของแบบจำลองสายส่งแบบที่มีค่าตัวแปรของสายส่งเป็นแบบวงจร 2 ท่า $ABCD$ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของสายส่งแบบ π

โดย

V_S, V_R คือ ขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต้นทางและบัสปลายทางตามลำดับ

S_{ji} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลจากบัสปลายทางไปสู่อบัสต้นทาง

โดยที่ $A = 1 + ZY_C$ และ $B = Z$ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่บัสใดๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของวงจร 2 ท่าแบบตัวแปร $ABCD$ สามารถแสดงได้ดังสมการ (4.1)

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (4.1)$$

กระแสไฟฟ้าที่บัสปลายทางสามารถแสดงได้ดัง (4.2)

$$I_R = \left(\frac{-S_{ji}}{V_R} \right) \quad (4.2)$$

แทนค่า (4.2) ลงใน (4.1) จะสามารถจัดรูปสมการได้ดัง (4.3)-(4.6)

$$V_S V_R^* - A|V_R|^2 = -B(P_{ji} - Q_{ji}) \quad (4.3)$$

$$B^* V_S V_R^* = AB^* |V_R|^2 - |B|^2 (P_{ji} - Q_{ji}) \quad (4.4)$$

$$B^* V_S V_R^* = (|V_R|^2 \operatorname{Re}\{AB^*\} - |B|^2 P_{ji}) + j(|V_R|^2 \operatorname{Im}\{AB^*\} - |B|^2 Q_{ji}) \quad (4.5)$$

$$|B||V_S||V_R| = (|V_R|^2 \operatorname{Re}\{AB^*\} - |B|^2 P_{ji})^2 + (|V_R|^2 \operatorname{Im}\{AB^*\} - |B|^2 Q_{ji})^2 \quad (4.6)$$

เราสามารถจัดรูป (4.6) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการกำลังสอง (quadratic equation) ได้ดัง (4.7) ซึ่งจะมีคำตอบแสดงได้ดัง (4.8)

$$a(|V_R|^2)^2 + b|V_R|^2 + c = 0 \quad (4.7)$$

$$|V_R|^2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.8)$$

- โดย
- a คือ $\operatorname{Re}\{AB^*\}^2 + \operatorname{Im}\{AB^*\}^2$
 - b คือ $2\operatorname{Im}\{AB^*\}|B|^2 Q_{ji} - 2\operatorname{Re}\{AB^*\}|B|^2 P_{ji} - |B|^2 |V_S|^2$
 - c คือ $|B|^4 P_{ji}^2 + |B|^4 Q_{ji}^2$

จาก (4.8) จะพบว่า ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นจำนวนจริงจะมีอยู่สองคำตอบเสมอ แต่ที่จุดพังทลายทางแรงดันนั้น คำตอบของแรงดันทั้งสองจะเป็นจุดเดียวกันตามเงื่อนไข (4.9)

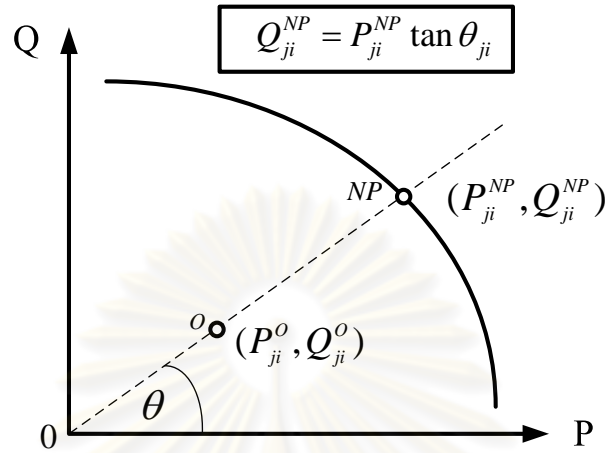
$$b^2 - 4ac = 0 \quad (4.9)$$

แทนค่า a, b และ c ลงในสมการ (4.9) จะได้ (4.10)

$$\begin{aligned} & |B|^4 (2\operatorname{Im}\{AB^*\}Q_{ji}^{NP} - 2\operatorname{Re}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} - |V_S|^2)^2 \\ & = 4(\operatorname{Re}\{AB^*\}^2 + \operatorname{Im}\{AB^*\}^2)|B|^4 (P_{ji}^{NP2} + Q_{ji}^{NP2}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

จัดรูปสมการ (4.10) ใหม่ จะได้ว่า

$$(2\text{Im}\{AB^*\}Q_{ji}^{NP} - 2\text{Re}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} - |V_s|^2)^2 = 4|A|^2|B|^2(P_{ji}^{NP2} + Q_{ji}^{NP2}) \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ ณ สภาวะที่เกิดการพังทลายของแรงดัน

ความหมายของ (4.11) คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายส่งที่สอดคล้องตามสมการนี้ จะทำให้เกิดสภาวะพังทลายของแรงดันขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ดัชนี $PQVSI$ จะทำการวัดเสถียรภาพของแรงดันตามแนวเส้นประที่แสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จุดพังทลายทางแรงดันตามเงื่อนไขดังกล่าว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_{ji}^{NP} = P_{ji}^{NP} \tan \theta_{ji} \quad (4.12)$$

แทนค่า (4.12) ลงใน (4.11) จะได้ว่า

$$(2\text{Im}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} \tan \theta_{ji} - 2\text{Re}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} - |V_s|^2)^2 = 4|A|^2|B|^2P_{ji}^{NP2} \sec^2 \theta_{ji} \quad (4.13)$$

เมื่อจัดรูป (4.13) เราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง ณ สภาวะที่เกิดการพังทลายของแรงดันกับพารามิเตอร์ของสายส่งและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันได้ดัง (4.14)

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_s|^2}{2\text{Im}\{AB^*\} \tan \theta_{ji} - 2\text{Re}\{AB^*\} \pm 2|A||B| \sec \theta_{ji}} \quad (4.14)$$

เนื่องจากค่า $\sec\theta_{ji} < 0$ เสมอ และสายส่งที่พิจารณากำหนดให้บัสปลายทางมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่บัสนั้นคือ $P_{ji}^{NP} < 0$ ดังนั้นจาก (4.14) เราสามารถสรุปได้ว่า

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_S|^2}{2\text{Im}\{AB^*\}\tan\theta_{ji} - 2\text{Re}\{AB^*\} + 2|A||B|\sec\theta_{ji}} \quad (4.15)$$

จากแนวคิดที่ว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่แข็งแกร่งจะต้องมีจุดทำงานในสถานะปัจจุบันห่างจากจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) มาก ดังนั้นจะนิยามให้ VSI_{ij} จะถูกนิยามจากอัตราส่วนระหว่างขนาดของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่จุดทำงานปัจจุบันกับขนาดของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่จุดพังทลายทางแรงดัน นั่นคือ

$$VSI_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ji}^o{}^2 + Q_{ji}^o{}^2}}{\sqrt{P_{ji}^{NP}{}^2 + Q_{ji}^{NP}{}^2}} \quad (4.16)$$

$$VSI_{ij} = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \sqrt{\frac{1 + \tan^2\theta_{ji}}{1 + \tan^2\theta_{ji}}} \quad (4.17)$$

ซึ่งสามารถจัด VSI_{ij} ให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายดังนี้

$$VSI_{ij} = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \quad (4.18)$$

โดยที่ดัชนี $PQVSI$ จะนิยามให้เป็นค่า VSI_{ij} ที่มากที่สุดในระบบ ดังสมการ

$$PQVSI = \max\{VSI_{ij}\} \quad (4.19)$$

โดย P_{ji}^o คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสด้านรับ
 P_{ji}^{NP} คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงคาดหวังที่จุดพังทลายทางแรงดันที่ไหลออกจากบัสด้านรับ

หากสายส่งใดที่มีค่า VSI_{ij} เข้าใกล้ 1 หมายความว่าสายส่งเส้นดังกล่าวจะเป็นสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดปัญหาการพังทลายของแรงดันในระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ ทั้งนี้ค่า VSI_{ij} ที่มีค่ามากที่สุดหรือดัชนี $PQVSI$ จึงเป็นชี้วัดว่าระบบอยู่ห่างไกลจากจุดพังทลายของแรงดันมากน้อยเพียงใด

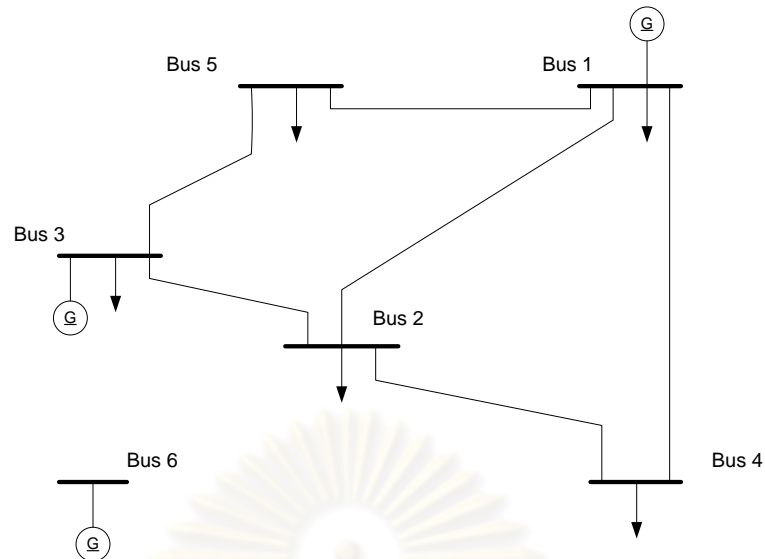
บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบและวิเคราะห์ผลของการวางแผนขยายระบบส่งที่นำเสนอ โดยจะนำวิธีการที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับระบบทดสอบ 6 บัส ซึ่งดัดแปลงมาจากระบบทดสอบ Garver และระบบทดสอบ IEEE RTS-79 [3] ซึ่งทั้งสองระบบสามารถถูกพิจารณาได้เป็นตัวแทนของระบบขนาดเล็กและระบบขนาดกลาง ตามลำดับ ผลการทดสอบที่ได้จะแสดงผลการขยายระบบส่งซึ่งประกอบไปด้วยการสร้างสายส่งและการสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ โดยในระบบทดสอบ 6 บัสมีการแยกเงื่อนไขการก่อสร้างออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ แผนการสร้างเฉพาะสายส่งอย่างเดียว และแผนการสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของแผนที่มีการก่อสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟร่วมกับสายส่ง ส่วนระบบทดสอบ IEEE RTS-79 จะมีการแยกเงื่อนไขการก่อสร้างออกเป็น 4 เงื่อนไข คือ แผนการสร้างเฉพาะสายส่งอย่างเดียว, แผนการสร้างสายส่งพร้อมทั้งพิจารณาอันดับของดัชนีเสถียรภาพแรงดัน, แผนการสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ และแผนการสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟพร้อมทั้งพิจารณาอันดับของดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ทั้งนี้ เงื่อนไขทั้ง 4 ข้อนี้จะถูกนำไปพิจารณาทั้งการวางแผนขยายระบบส่งแบบขั้นเดียวและการวางแผนขยายระบบส่งแบบหลายขั้น เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของแผนที่มีการก่อสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟร่วมกับสายส่งและการพิจารณาอันดับของดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งการทดสอบวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้โปรแกรมที่พัฒนาบนโปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

5.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

ระบบทดสอบแรกที่จะนำมาใช้ทดสอบเป็นระบบ 6 บัสที่ดัดแปลงมาจาก ระบบทดสอบ Garver [3] เพื่อใช้ในการทดสอบกับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียวโดยใช้แบบจำลองกระแสลับ ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งระบบทดสอบนี้จะใช้เพื่อแสดงให้เห็นเฉพาะผลของการสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟ เนื่องจากผลจากระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันยังไม่ชัดเจนนัก แต่จะแสดงผลในระบบทดสอบ IEEE RTS-79 ต่อไป ทั้งนี้ข้อมูลรายละเอียดต่างๆของระบบทดสอบ 6 บัส รวมทั้งข้อมูลสายส่งทางเลือกจะแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ก



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

5.1.1 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง

ในการทดสอบนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการทางพันธุกรรมไว้ดังนี้ $P_c = 0.5$, $P_m = 0.025$, $Population = 100$, $\lambda^{max} = 0.7$ โดยที่เงื่อนไขการหยุดการคำนวณ คือ การมีค่าตอบที่ดีที่สุดซ้ำกับค่าเดิมไม่ต่ำกว่า 1000 รุ่นของการถ่ายทอด

แผนงานก่อสร้างที่ได้จากการทดสอบ และข้อมูลต่างๆที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ระบบซึ่งรวมสายส่งที่ก่อสร้างในแผนไปแล้ว เป็นดังตารางที่ 5.1-5.3 และแสดงได้ดังรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง

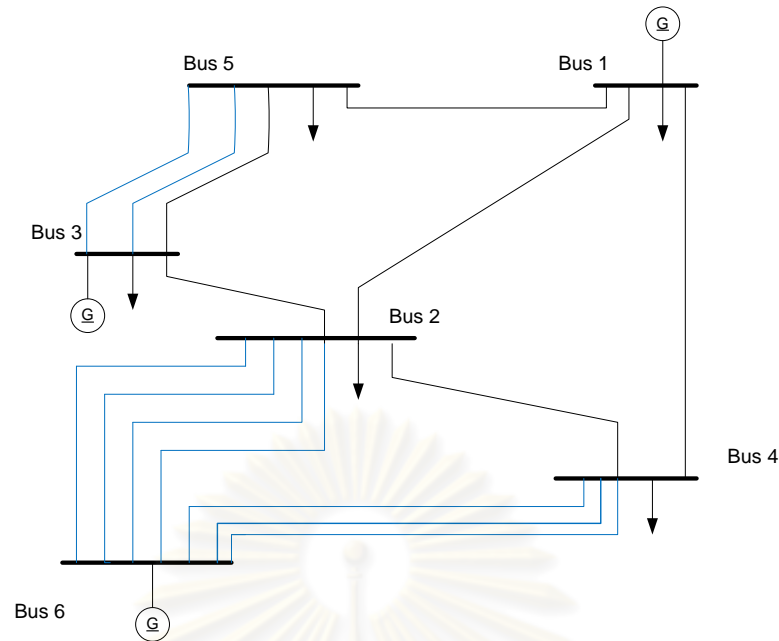
สายส่ง		จำนวนวงจร	ราคา (USD)	เวลาที่ใช้ (นาที)
จากบัส	ถึงบัส			
2	6	4	120000	5
3	5	2	40000	
4	6	3	90000	
รวมค่าก่อสร้าง			250000	

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลบัส หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		ความต้องการไฟฟ้า	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)
1	1.031	0	57.601	72.327	80	49.58
2	1.034	1.116	-	-	240	148.74
3	1.039	0.285	165	144.310	40	24.79
4	1.034	1.037	-	-	160	99.159
5	1.026	-0.577	-	-	240	148.74
6	1.050	2.386	545	149.022	-	-

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลสายส่ง หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง

สายส่ง		กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	ขีดจำกัดของสายส่ง (MVA)	รับภาระ (%)
ถึงบัส	จากบัส				
1	2	-39.365	6.101	100	39.8345
1	4	-33.764	6.341	80	42.9430
1	5	50.173	10.168	100	51.1929
2	3	66.696	-48.489	100	82.4588
2	4	-11.353	3.352	100	11.8377
3	5	63.748	47.125	100	79.2757
2	6	-334.921	-97.504	100*4	87.2063
3	5	127.497	94.250	100*2	79.2757
4	6	-205.375	-88.694	100*3	74.5694



รูปที่ 5.2 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งในระบบระบบทดสอบ 6 บัส

5.1.2 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ในการทดสอบนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการทางพันธุกรรมไว้ดังนี้ $P_c = 0.5$, $P_m = 0.025$, $Population = 100$, $\lambda^{max} = 0.7$ โดยที่เงื่อนไขการหยุดคือ การมีคำตอบที่ดีที่สุดซ้ำกันค่าเดิม 1000 รุ่นของการถ่ายทอดเช่นเดียวกับแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง

แผนงานก่อสร้างที่ได้จากการทดสอบ และข้อมูลต่างๆที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ระบบซึ่งรวมอุปกรณ์และสายส่งที่ก่อสร้างในแผนไปแล้ว ดังตารางที่ 5.4-5.6 และแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.4 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

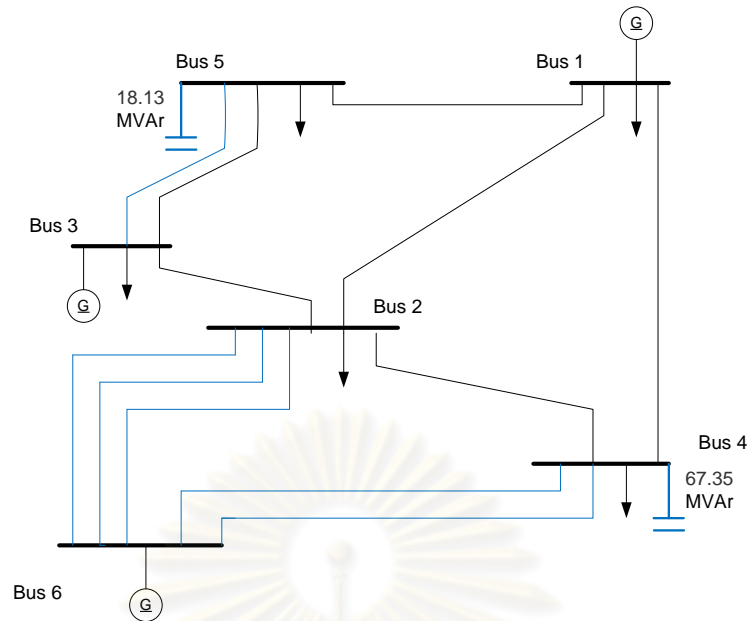
สายส่ง		จำนวนวงจร	ราคา (USD)	เวลาที่ใช้ (นาท)
จากบัส	ถึงบัส			
2	6	4	120,000	20
3	5	1	20,000	
4	6	2	60,000	
อุปกรณ์ชดเชย		ขนาด (MVAr)	ราคา	
บัส	4	18.13	1,813	
บัส	5	67.35	6,735	
ค่าก่อสร้างรวม			208,548	

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลบัส หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		ความต้องการไฟฟ้า	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)
1	1.031	0.000	57.760	78.360	80	49.58
2	1.034	1.121	-	-	240	148.74
3	1.039	0.285	165.000	147.650	40	24.79
4	1.031	1.086	-	-	160	99.159
5	1.026	-0.573	-	-	240	148.74
6	1.050	2.387	545.000	170.650	-	-

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลสายส่ง หลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

สายส่ง		กำลัง	กำลังไฟฟ้า	ขีดจำกัดของสายส่ง	รับภาระ
ถึงบัส	จากบัส	ไฟฟ้าจริง(MW)	รีแอกทีฟ(MVAr)	(MVA)	(%)
1	2	-48.29	10.45	100	49.408
1	4	-29.67	10.51	80	39.346
1	5	55.73	7.82	100	56.276
2	3	61.20	-48.56	100	78.125
2	4	3.71	5.50	100	6.634
3	5	92.90	36.73	100	99.897
2	6	-353.52	-95.56	100*4	91.552
3	5	92.90	36.73	100	99.897
4	6	-186.18	-62.98	100*2	98.272



รูปที่ 5.3 แผนงานก่อสร้างสายส่งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบระบบทดสอบ 6 บัส

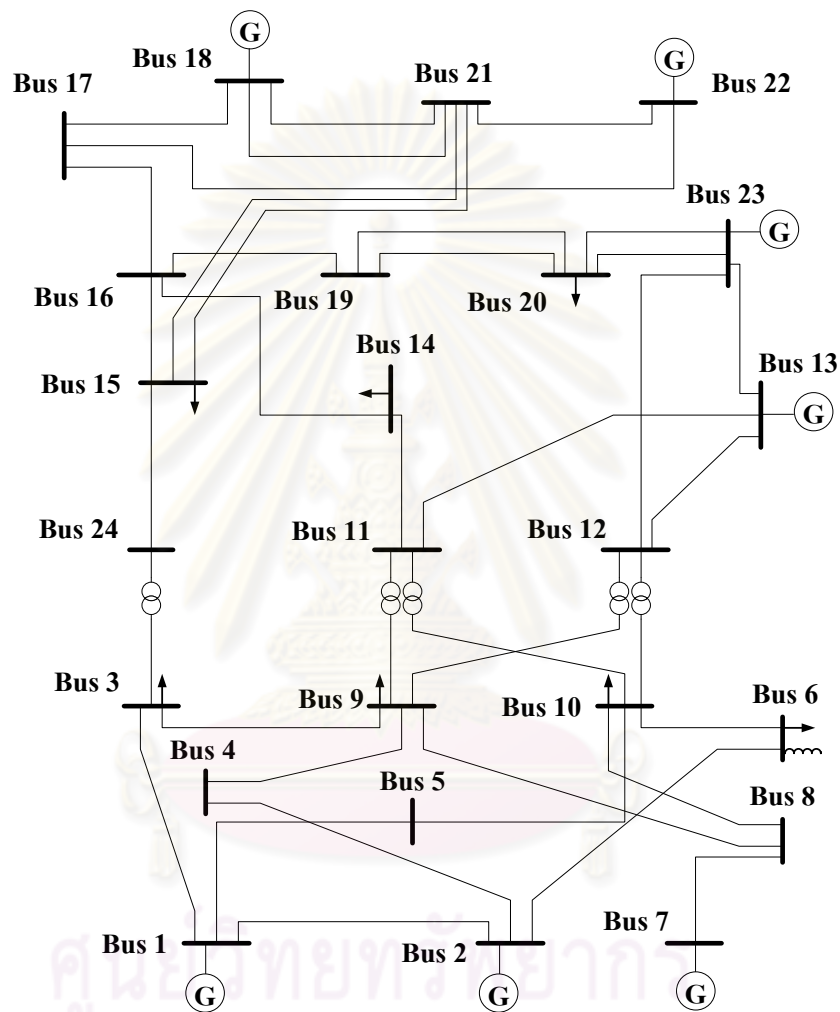
จากแผนคำตอบของการคิดทั้งสองกรณี จะเห็นว่าแผนที่ได้จากหัวข้อ 5.1.2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟพร้อมกันมีค่าก่อสร้างต่ำกว่าการสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวที่แสดงในหัวข้อ 5.1.1 แต่การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟพร้อมกันจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาขนาดของตัวเก็บประจุเป็นแบบจำนวนเต็มไม่ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม หากรวบรวมการวิเคราะห์นี้ไว้ในขั้นตอนของการวางแผน เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.2 ระบบทดสอบ IEEE RTS-79

ระบบทดสอบ IEEE RTS-79 (รูปที่ 5.4) [3] ใช้ในการทดสอบกับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว และปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นซึ่งในระบบทดสอบนี้จะใช้เพื่อแสดงให้เห็นผลของการสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟและผลจากการกำหนดระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน จากเงื่อนไขทั้ง 4 ของการทดสอบดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

ในส่วนของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว จะทำการเพิ่มความต้องการไฟฟ้าขึ้น 80% จากที่มีอยู่เดิม 2850 MW เป็น 5130 MW นอกจากนี้จะเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีก 7 เครื่องเข้ามาในระบบดังตารางที่ 5.7 ส่วนราคาสายส่งทางเลือกจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข และราคาอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟในเบื้องต้นจะตั้งไว้ที่ 0.3 ล้านบาทต่ออุปกรณ์ชดเชยขนาด 1 MVar ทั้งชนิดคาปาซิเตอร์และรีแอคเตอร์ จากนั้นจะใช้วิธีการที่นำเสนอทำการวิเคราะห์การวางแผน โดยผลตอบที่จะนำเสนอคือแผนงานก่อสร้างตามเงื่อนไขทั้ง 4 ที่กำหนดขึ้น

ทั้งนี้ทุกเงื่อนไขจะพิจารณาตัวประกอบปรับโทษ โดยกำหนดค่าการถ่วงน้ำหนัก ให้มีค่าเป็นสิบเท่าของราคาการก่อสร้างสายส่ง ซึ่งค่าเฉลี่ยของราคาสายส่งทางเลือกหนึ่งเส้นมีค่าประมาณ 400 ล้านบาท ดังนั้นตัวประกอบปรับโทษ (Penalty factor) ที่กำหนดขึ้นจึงให้มีค่าเท่ากับ 4,000 ล้านบาทต่อการละเมิดข้อกำหนดของระบบซึ่งประกอบด้วย ข้อจำกัดทางความร้อนในสายส่ง ข้อจำกัดของแรงดันบัล และระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน



รูปที่ 5.4 ระบบทดสอบ IEEE RTS-79

ตารางที่ 5.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้ามาในระบบ

บัส	จำนวน*ขนาด(MW)
16	1*350
18	2*400
21	3*400
23	1*350

ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นจะพิจารณาเป็น 3 ชั้นของการวางแผนโดยมีระยะเวลาชั้นละ 3 ปี โดยที่แต่ละชั้นจะมีการเพิ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าชั้นละ 26.67% จากข้อมูลตั้งต้น และใช้อัตราคิดลดปีละ 3% ส่วนลำดับการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นตามความเป็นจริงแล้วจะมีข้อมูลจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan, PDP) เป็นตัวกำหนดซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสมมติว่า ลำดับการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.8 โดยจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดจะเท่ากับกับจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว นอกจากนี้แต่ละชั้นของการวางแผนยังได้ทำการจัดสรรกำลังการผลิต (Dispatch) เพื่อใช้เป็นค่าฐานของการวิเคราะห์ประกอบด้วย ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละชั้นของแผนถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ทั้งนี้จะแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 10 กรณี เพื่อเปรียบเทียบผลของแผนงานก่อสร้างสายส่งแบบชั้นเดียว แผนงานก่อสร้างสายส่งแบบชั้นเดียวต่อเนื่องกันไป และแผนงานก่อสร้างสายส่งแบบหลายชั้น เพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างของผลการวางแผนขยายสายส่ง พร้อมทั้งแสดงผลกระทบในแผนเมื่อพิจารณาสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการกำหนดระดับดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบผ่านทางดัชนี PQVSI ทั้งนี้ข้อมูลแรงดันที่บัสและข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานที่ได้จากแต่ละเงื่อนไขจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 5.8 ลำดับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้ามาในระบบ

	บัส	จำนวน*ขนาด(MW)
แผนชั้นที่ 1	21	3*400
แผนชั้นที่ 2	18	2*400
แผนชั้นที่ 3	16	1*350
	23	1*350

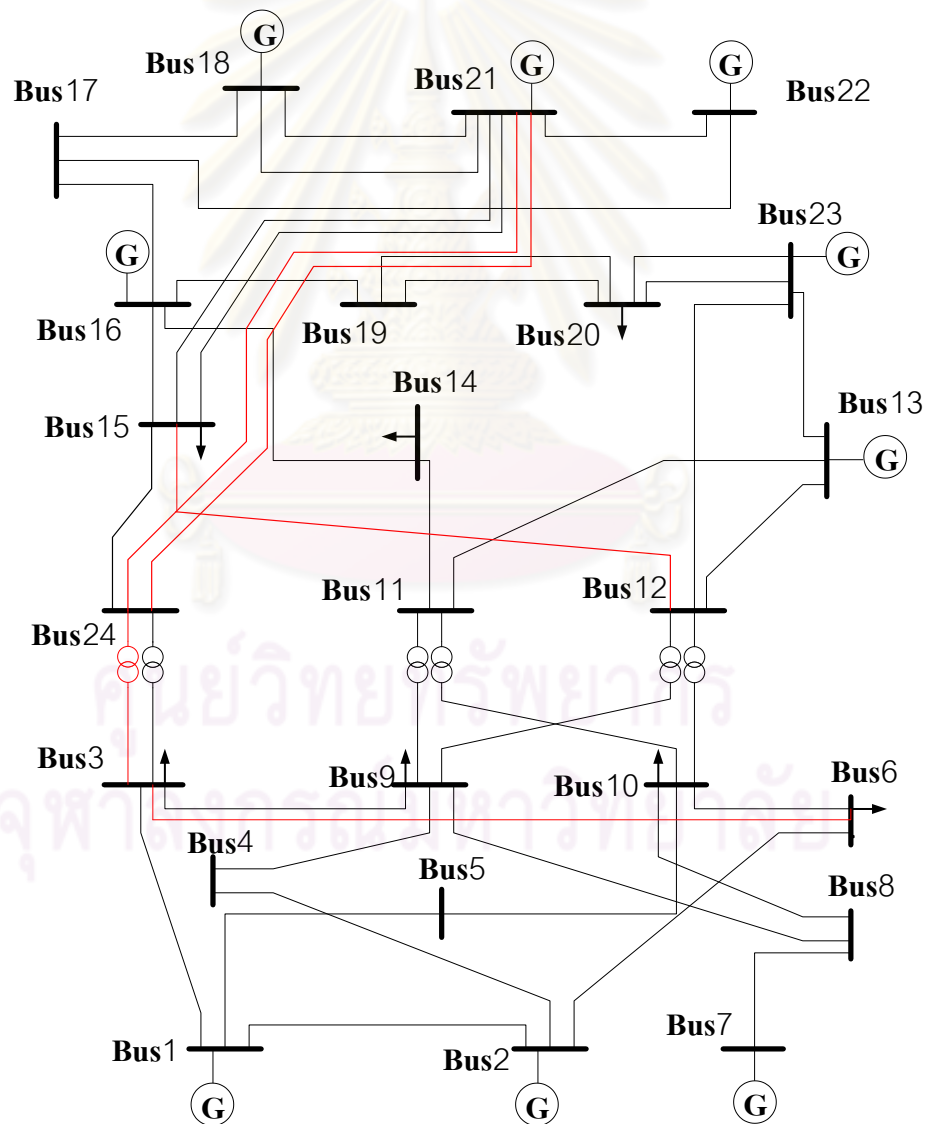
5.2.1 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว โดยมีเงื่อนไขว่าจะก่อสร้างเฉพาะสายส่งเพียงอย่างเดียว จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.9 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 โดยเส้นสีแดงคือสายส่งที่สร้างขึ้นใหม่

การทดสอบในเงื่อนไขนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการทางพันธุกรรมไว้ ดังนี้ $P_c = 0.3$, $P_m = 0.03$, $Population = 100$ โดยที่เงื่อนไขการหยุดคือ การมีคำตอบที่ดีที่สุดซ้ำกันค่าเดิม 2500 รุ่นของการถ่ายทอด

ตารางที่ 5.9 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนแบบขั้นเดียว

สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)
จากบัส	ถึงบัส				
3	6	3	1	154.4	235
3	24	3	1	135.0	
12	15	2	1	105.7	
24	21	4	2	182.7	
Total cost				577.8	
<i>PQVSI</i>				0.5583	



รูปที่ 5.5 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนแบบขั้นเดียวระบบ IEEE RTS-79

5.2.2 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว โดยมีเงื่อนไขว่าสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟร่วมกัน จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.10 ซึ่งเป็นคำตอบเดียวกันกับเงื่อนไขสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 5.10 สายส่งตามแผนงานตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

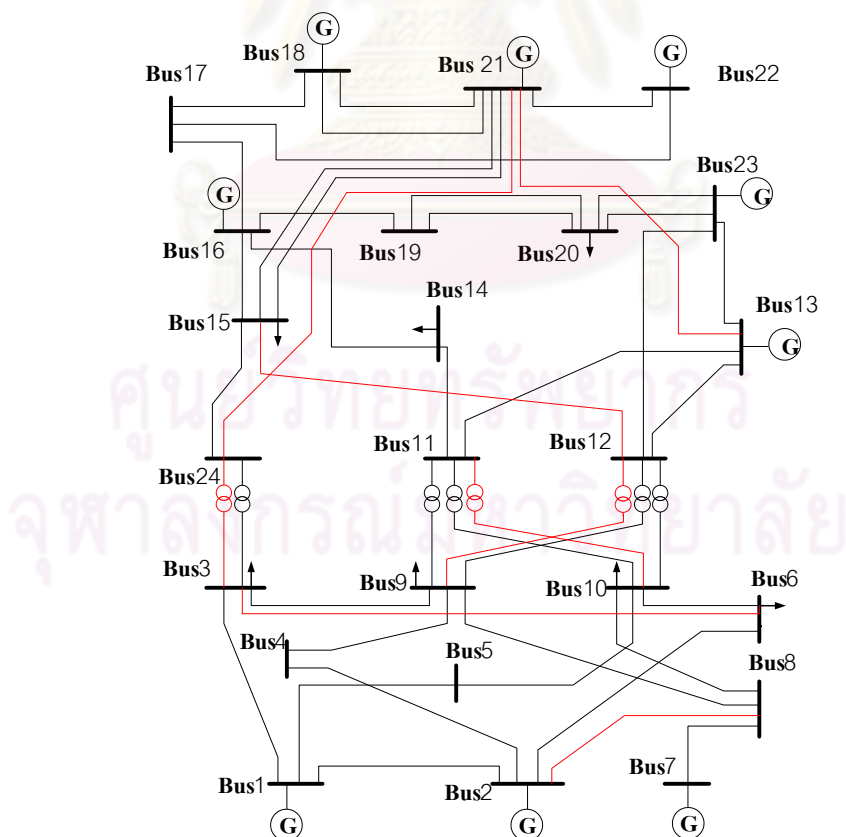
สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)
จากบัส	ถึงบัส				
3	6	3	1	154.4	298
3	24	3	1	135.0	
12	15	2	1	105.7	
24	21	4	2	182.7	
ค่าก่อสร้าง				577.8	
<i>PQVSI</i>				0.5583	

5.2.3 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว โดยมีเงื่อนไขให้สร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันร่วมด้วย ซึ่งพิจารณาจำกัดระดับดัชนี *PQVSI* ให้ไม่เกิน 0.50 จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.11 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.11 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของ
ปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)
จากบัส	ถึงบัส				
2	8	3	1	44.9	237
3	6	3	1	154.4	
3	24	2	1	100.0	
9	12	2	1	100.0	
10	11	1	1	135.0	
12	15	1	1	90.6	
13	21	2	1	152.3	
24	21	2	1	121.6	
Total cost				898.8	
<i>PQVSI</i>				0.4549	



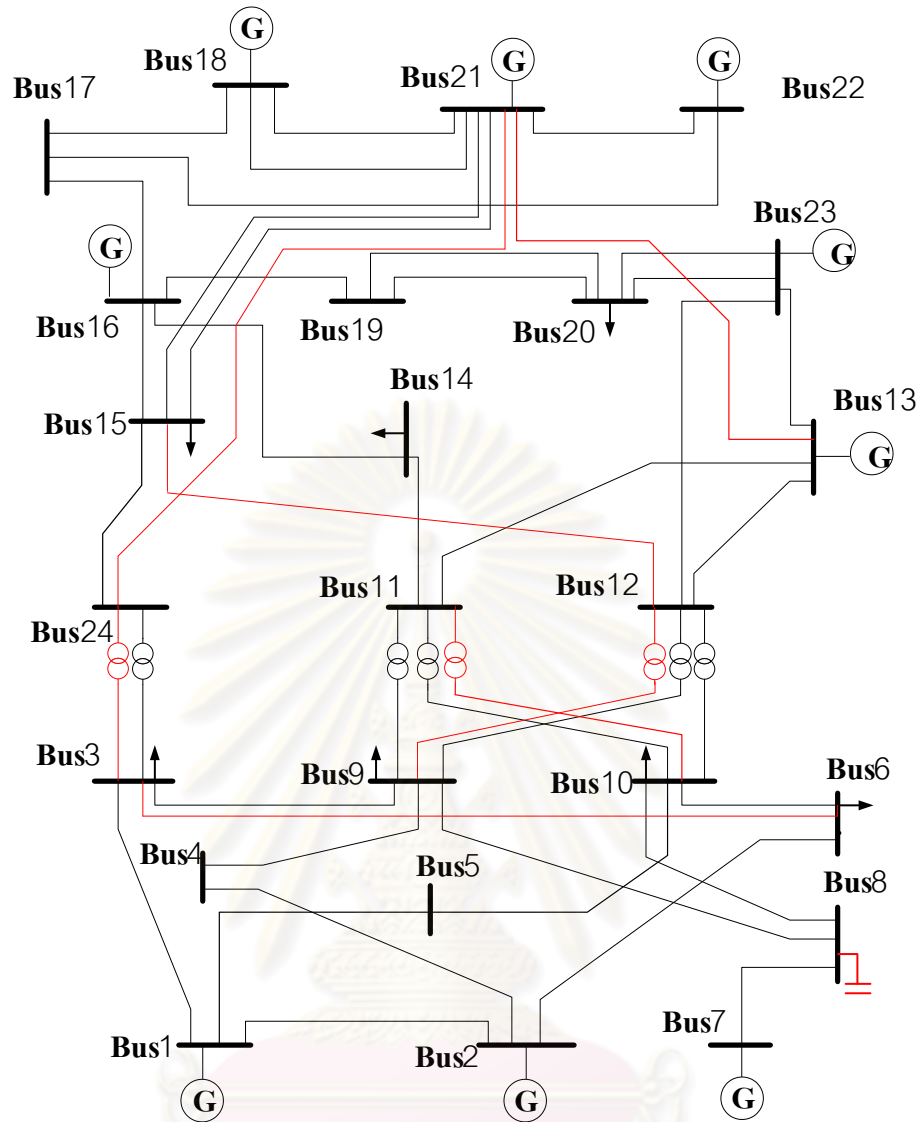
รูปที่ 5.6 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการ
วางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียวในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

5.2.4 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้ง พิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว โดยกำหนดให้สร้างสายส่งร่วมกับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันโดยกำหนดให้ดัชนี *PQVSI* มีค่าไม่เกิน 0.50 จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.12 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.12 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟพร้อมทั้ง
พิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)	
จากบัส	ถึงบัส					
3	6	3	1	154.4	293	
3	24	2	1	100.0		
9	12	2	1	100.0		
10	11	1	1	135.0		
12	15	1	1	90.6		
13	21	2	1	152.3		
24	21	2	1	121.6		
อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ			ขนาด (MVAr)	ราคา		
bus	8	-	47	14.1		
ค่าก่อสร้าง				868.0		
<i>PQVSI</i>				0.4995		



รูปที่ 5.7 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟพร้อมทั้งพิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนแบบชั้นเดียวในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

5.2.5 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

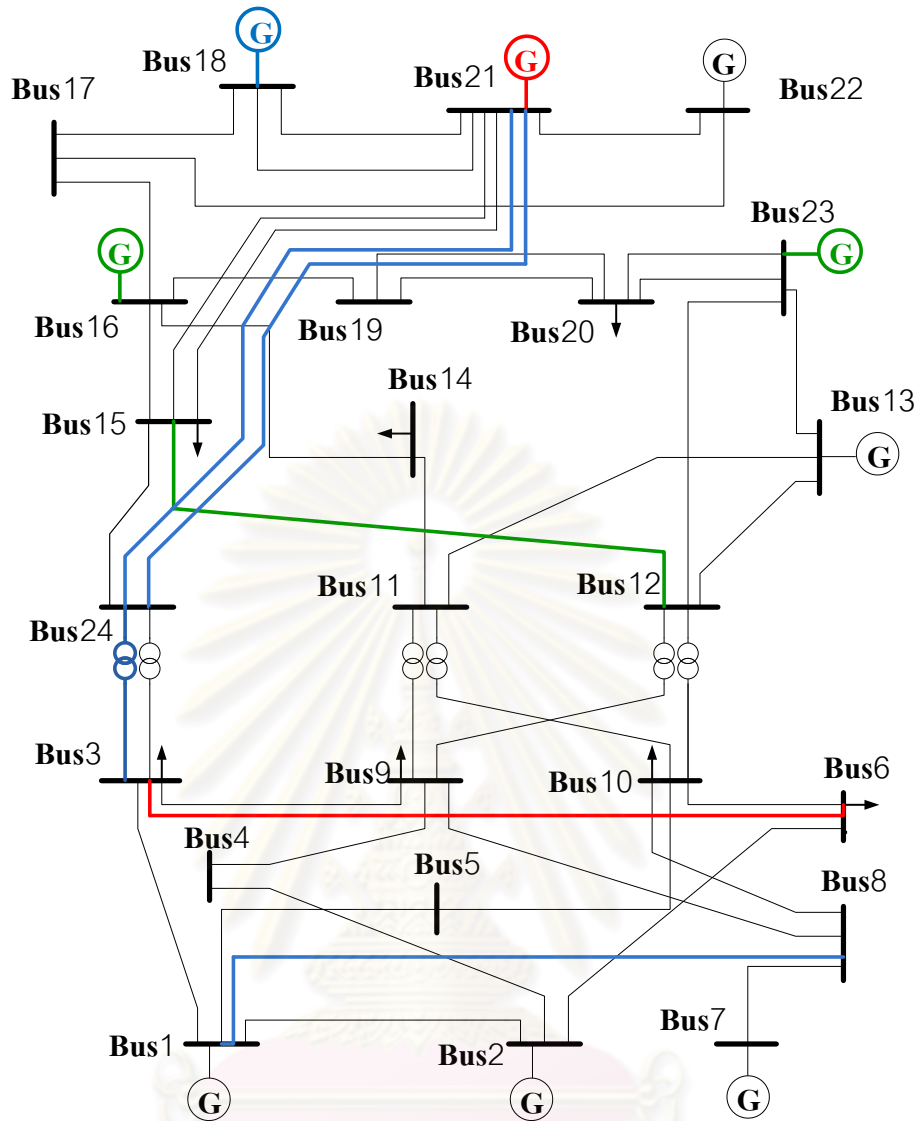
จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น โดยมีเงื่อนไขให้สร้างสายส่งเพียงอย่างเดียว จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.13 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูป 5.8 โดยเส้นสีแดง สีน้ำเงิน สีเขียวแทนสายที่สร้างในแผนงานชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สอง และชั้นที่สาม ตามลำดับ

การทดสอบในเงื่อนไขนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการทางพันธุกรรมไว้
 ดังนี้ $P_c = 0.25$, $P_m = 0.025$, $Population = 100$ โดยที่เงื่อนไขการหยุดคือ การมีคำตอบที่ดี
 ที่สุดซ้ำกันค่าเดิม 2500 รุ่นของการถ่ายทอด

ตารางที่ 5.13 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนแบบหลายชั้น

แผนชั้นที่ 1	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	6	3	1	154.4	1007
ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)					154.4	
<i>PQVSI</i>					0.4804	
แผนชั้นที่ 2	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	
	จากบัส	ถึงบัส				
	1	8	3	1	25.3	
	3	24	3	1	135	
	24	21	4	2	182.7	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)					
<i>PQVSI</i>					0.5017	
แผนชั้นที่ 3	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	
	จากบัส	ถึงบัส				
	12	15	2	1	105.7	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)					88.5
	<i>PQVSI</i>					0.5328
ค่าก่อสร้างรวม					556.8	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



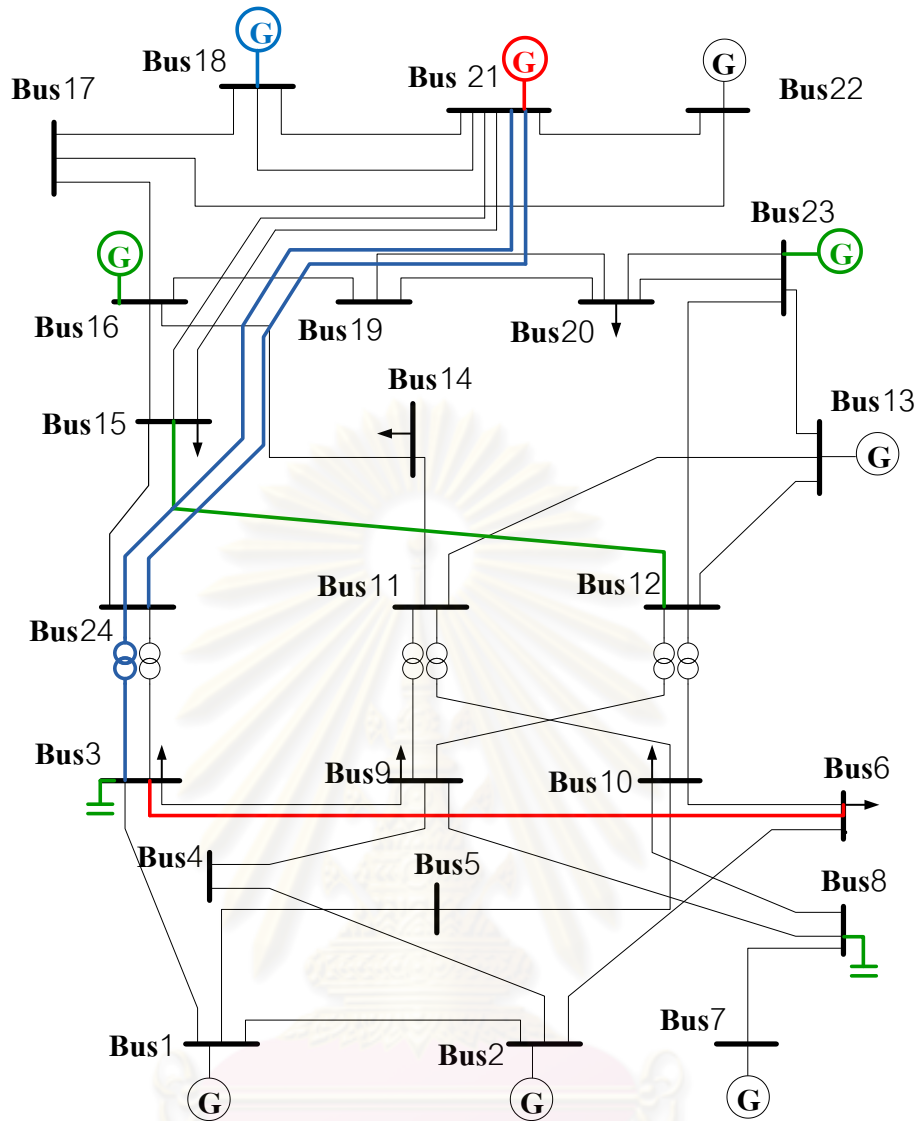
รูปที่ 5.8 แผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่งของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

5.2.6 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น โดยกำหนดให้สร้างสายส่งร่วมกับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.14 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.14 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชุดเซย์กำลังรีแอกทีฟของปัญหา
การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

แผนชั้นที่ 1	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาท)
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	6	3	1	154.4	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				154.4	
	PQVSI				0.4804	
แผนชั้นที่ 2	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	1130
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	24	3	1	135	
	24	21	4	2	182.7	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				290.7	
PQVSI				0.5003		
แผนชั้นที่ 3	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	1130
	จากบัส	ถึงบัส				
	12	15	2	1	105.7	
	อุปกรณ์ชุดเซย์กำลังไฟฟารีแอกทีฟ			ขนาด (MVAr)	ราคา	
	bus	3	-	21	6.3	
	bus	8	-	19	5.7	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				98.6	
	PQVSI				0.5330	
ค่าก่อสร้างรวม					543.7	



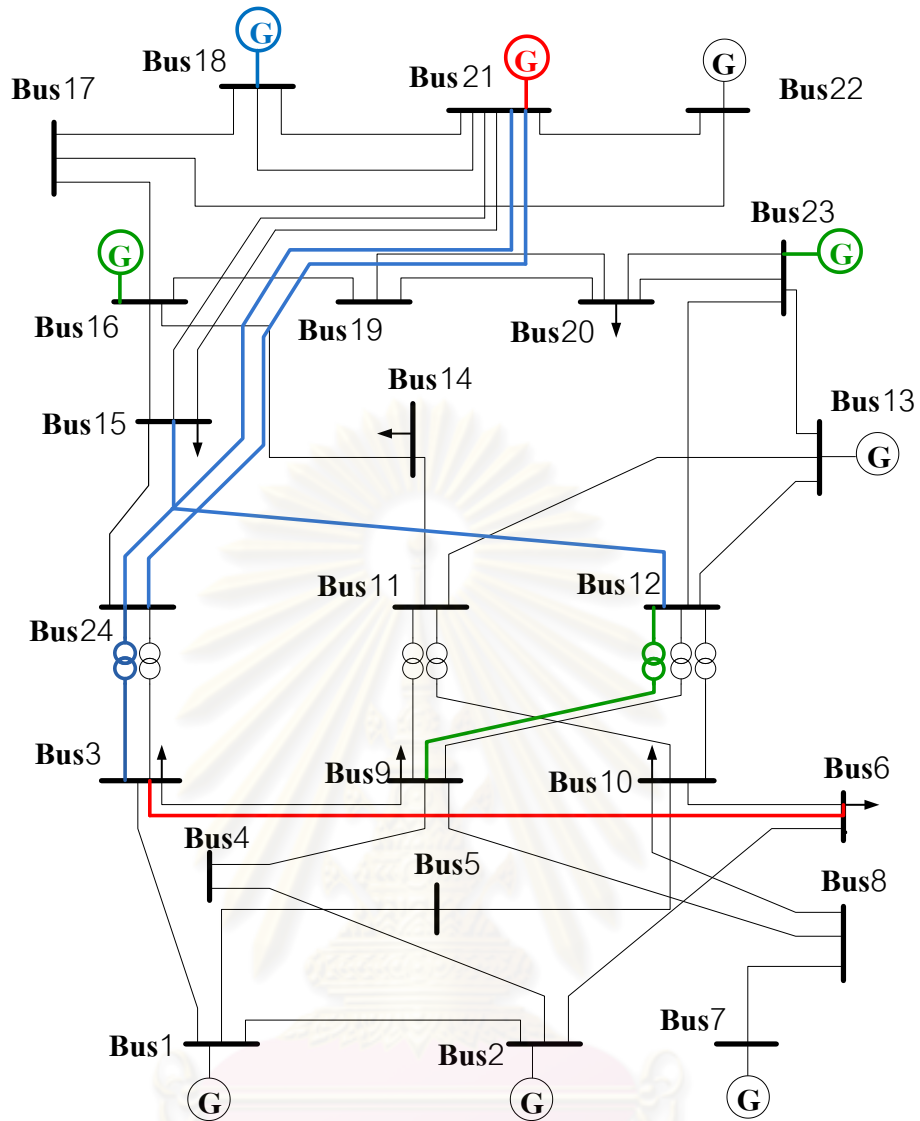
รูปที่ 5.9 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

5.2.7 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น โดยกำหนดให้สร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวพร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันโดยกำหนดให้ดัชนี $PQVSI$ มีค่าไม่เกิน 0.50 จะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างดังตารางที่ 5.15 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.15 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

แผนชั้นที่ 1	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	6	3	1	154.4	936
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				154.4	
	<i>PQVSI</i>				0.4804	
แผนชั้นที่ 2	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	24	3	1	135	
	12	15	2	1	105.7	
	24	21	4	2	182.7	
		ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				
	<i>PQVSI</i>				0.4366	
แผนชั้นที่ 3	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	
	จากบัส	ถึงบัส				
	9	12	1	1	135	
		ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				113.1
		<i>PQVSI</i>				0.4982
	ค่าก่อสร้างรวม				654.9	



รูปที่ 5.10 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น ในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

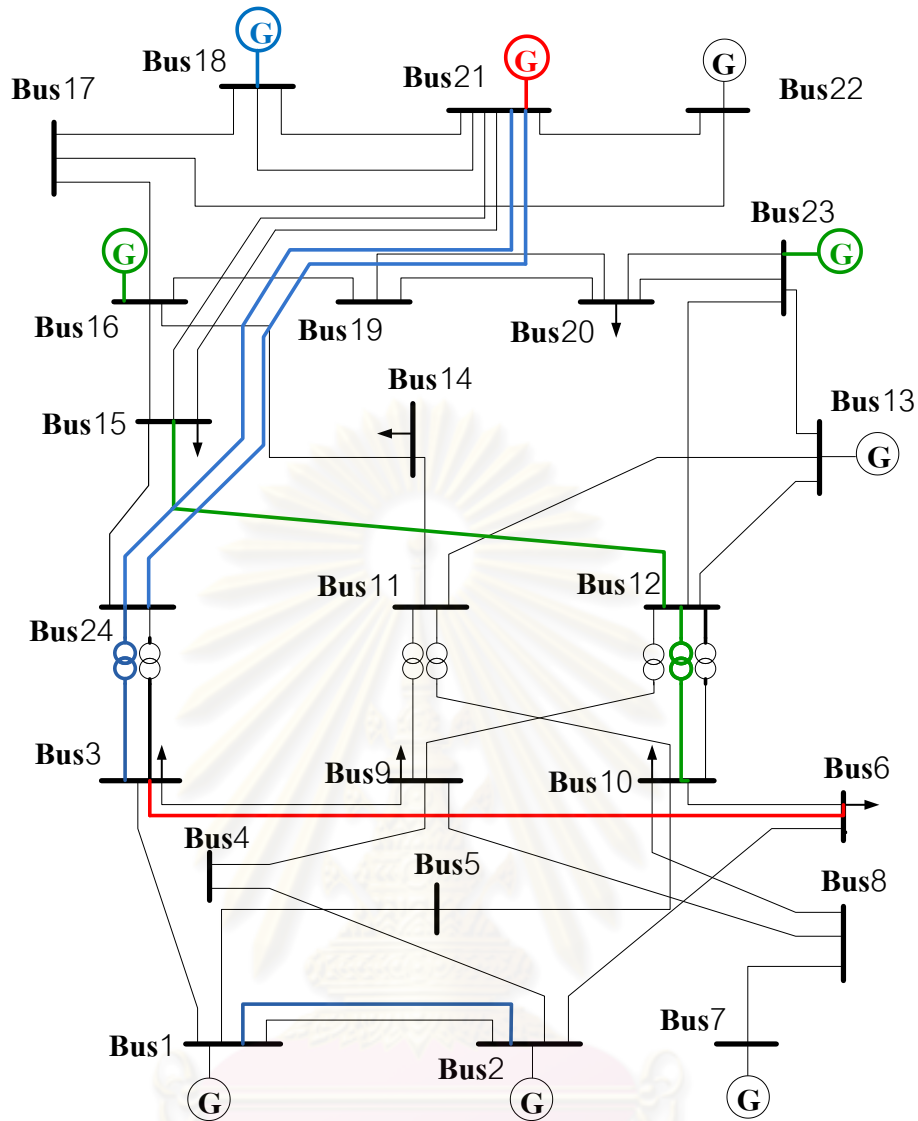
5.2.8 แผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในทุกชั้นของการวางแผน

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวในทุกๆชั้นของการวางแผน โดยที่ จะทำการวางแผนให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างแต่ละช่วงเวลามีค่าต่ำที่สุดโดยผลของการวางแผนในชั้นที่ 1 จะถูกพิจารณาเป็นกรณีฐานสำหรับการวางแผนในช่วงเวลาถัดไป ผลของการวางแผนในกรณีนี้จะใช้เพื่อเปรียบเทียบกับการวางแผนแบบหลายชั้นที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.2.7 ซึ่งในหัวข้อนี้จะกำหนดให้ดัชนี $PQVSI$ มีค่าไม่เกิน 0.50 ซึ่งจะ

ได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างเป็นดังตารางที่ 5.16 และระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้
 ดังรูป 5.11

ตารางที่ 5.16 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
 ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียวในทุกๆชั้นของการวางแผน

แผนชั้นที่ 1	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	6	3	1	154.4	767
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				154.4	
	<i>PQVSI</i>				0.4804	
แผนชั้นที่ 2	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	
	จากบัส	ถึงบัส				
	1	2	3	1	62.4	
	3	24	3	1	135	
	24	21	4	2	182.7	
		ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				347.8
	<i>PQVSI</i>				0.4898	
แผนชั้นที่ 3	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	
	จากบัส	ถึงบัส				
	10	12	2	1	100	
	12	15	2	1	105.7	
		ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				172.3
		<i>PQVSI</i>				0.4842
	ค่าก่อสร้างรวม				674.5	



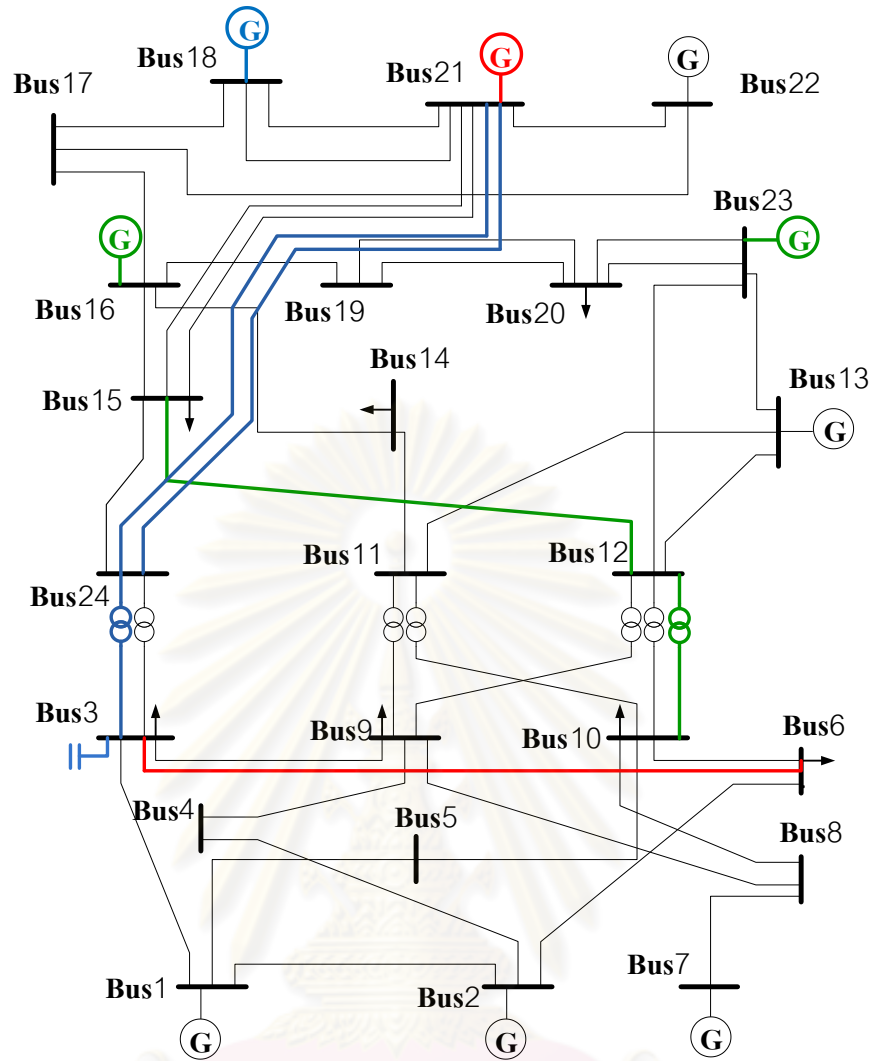
รูปที่ 5.11 แผนงานก่อสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวและพิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวทุกๆชั้นของการวางแผนในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

5.2.9 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นโดยมีเงื่อนไขสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันจะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้าง ข้อมูลแรงดันที่บันทึกหลังการก่อสร้างและข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างดังตารางที่ 5.17 ซึ่งระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูป 5.12

ตารางที่ 5.17 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้ง
พิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

แผนชั้นที่ 1	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาที)	
	จากบัส	ถึงบัส					
	3	6	3	1	154.4	1203	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				154.4		
	<i>PQVSI</i>				0.4804		
แผนชั้นที่ 2	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา จากบัส		1203
	จากบัส	ถึงบัส					
	3	24	3	1	135		
	24	21	4	2	182.7		
	อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ			ขนาด (MVAr)	ราคา		
	bus	3	-	10	3		
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				293.5		
<i>PQVSI</i>				0.4967			
แผนชั้นที่ 3	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา จากบัส	1203	
	จากบัส	ถึงบัส					
	10	12	2	1	100		
	12	15	2	1	105.7		
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				172.3		
	<i>PQVSI</i>				0.4841		
ค่าก่อสร้างรวม					620.2		



รูปที่ 5.12 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟพร้อมกันพร้อมทั้งพิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดันของการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

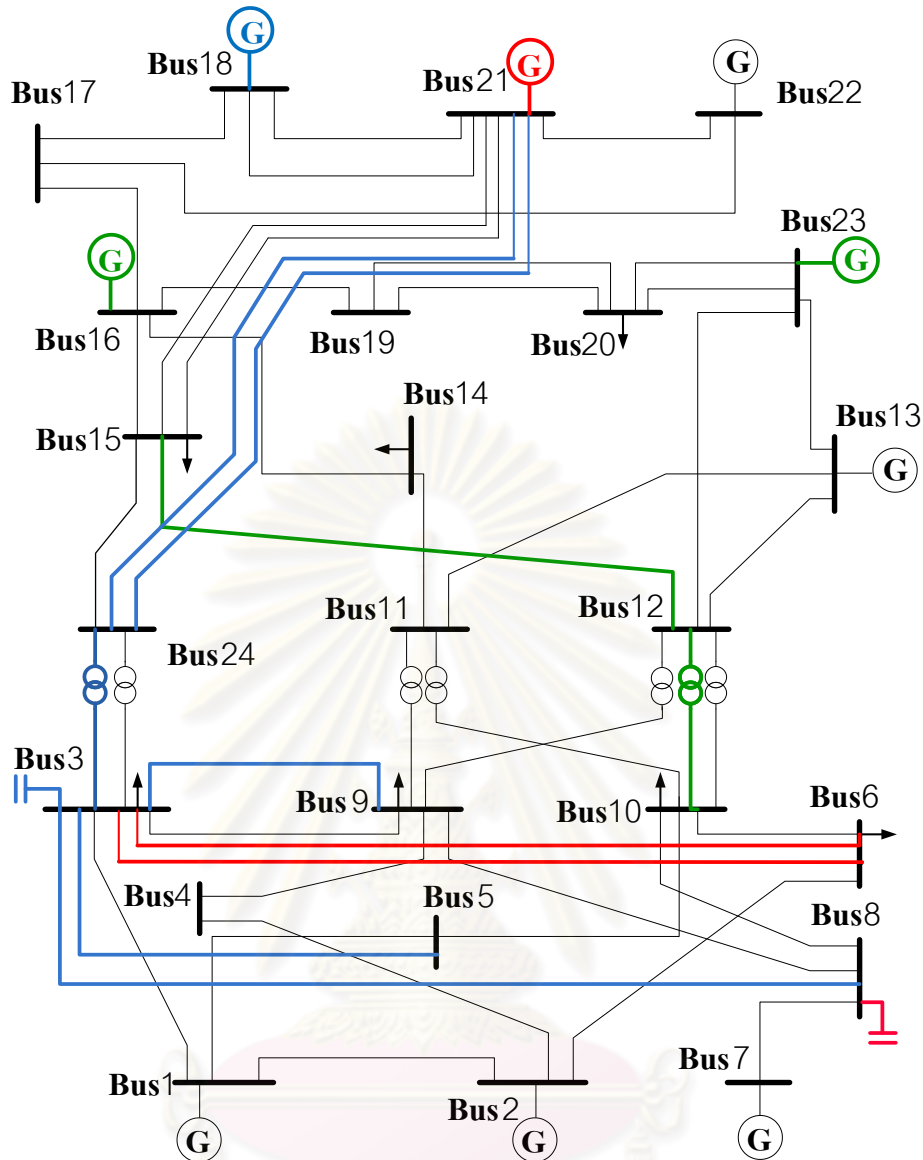
5.2.10 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว ในทุกชั้นของการวางแผน

จากการใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอมาแก้ปัญหาการขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวในทุกๆชั้นของการวางแผน โดยที่จะทำการวางแผนให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างแต่ละช่วงเวลามีค่าต่ำที่สุดโดยผลของการวางแผนในชั้นที่ 1 จะถูกพิจารณาเป็นกรณีฐานสำหรับการวางแผนในเวลาถัดไป ผลของการวางแผนในกรณีนี้จะใช้เพื่อเปรียบเทียบกับการวางแผนแบบหลายชั้นที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.2.9 ซึ่งในหัวข้อนี้จะกำหนดให้ดัชนี $PQVSI$ มีค่าไม่เกิน 0.50 ซึ่งจะได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างเป็นดังตารางที่ 5.18 และระบบหลังการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังรูป 5.13

ตารางที่ 5.18 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟร่วมกัน
พร้อมทั้งพิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

ในทุกๆชั้นของการวางแผน

แผนชั้นที่ 1	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)	เวลา (นาทีก)
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	6	1	2	142.4	
	อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ			ขนาด(MVAr)	ราคา	
	bus	8	-	27	8.1	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				150.5	
	PQVSI				0.4738	
แผนชั้นที่ 2	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา จากบัส	961
	จากบัส	ถึงบัส				
	3	5	1	1	350.5	
	3	8	1	1	416.3	
	3	9	1	1	132.3	
	3	24	1	1	135	
	24	21	4	2	182.7	
	อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ			ขนาด(MVAr)	ราคา	
	bus	3	-	89	26.7	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				1138.0	
PQVSI				0.4998		
แผนชั้นที่ 3	สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา จากบัส	
	จากบัส	ถึงบัส				
	10	12	2	1	100	
	12	15	2	1	90.6	
	ค่าก่อสร้าง(มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)				172.3	
PQVSI				0.4968		
ค่าก่อสร้างรวม					1460.7	



รูปที่ 5.13 แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟพร้อมกันพร้อมทั้งพิจารณา
ดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียวทุกๆขั้นของการวางแผน

ในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 5.2.2 ซึ่งเป็นแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียวโดย
พิจารณาสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟพร้อมกัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผล
ที่ได้จากวิธีการฮิวริสติกที่กล่าวถึงในรายการอ้างอิง [3] โดยใช้ชุดสายส่งทางเลือกเดียวกัน จะ
พบว่า แผนที่ได้จากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมจะได้คำตอบที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า แต่ใช้เวลาในการ
คำนวณมากกว่าอย่างมาก อย่างไรก็ตามในขั้นตอนของการวางแผนระยะเวลาในการคำนวณ
ดังกล่าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งนี้แผนที่ได้จากวิธีฮิวริสติกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 สายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชุดเซย์กำลังรีแอกทีฟร่วมกันของ
ปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว โดยใช้วิธีฮิวริสติก [3]

สายส่ง		ชนิดสาย	จำนวนของ วงจรสายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
จากบัส	ถึงบัส			
3	6	3	1	154.4
3	24	1	1	135
13	21	2	1	152.3
24	21	2	1	121.6
อุปกรณ์ชุดเซย์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ			ขนาด (MVAr)	ราคา
bus	4	-	30.9	9.27
bus	8	-	62	18.6
bus	9	-	71.4	21.42
ค่าก่อสร้าง				612.59

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 5.2.7 และ 5.2.9 ซึ่งเป็นแผนงานก่อสร้างของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น และผลการทดสอบในหัวข้อ 5.2.8 และ 5.2.10 ซึ่งเป็นแผนงานก่อสร้างของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียวต่อเนื่องกันไปในทุกชั้นของการวางแผน สามารถเปรียบเทียบให้เห็นได้ว่าการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นจะมีค่าก่อสร้างรวมที่น้อยกว่าการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียวต่อเนื่องกันไปในทุกชั้นของการวางแผน ถึงแม้ว่าในช่วงเวลาของการวางแผนจากการพิจารณาแบบขั้นเดียวจะมีค่าก่อสร้างต่ำกว่า แต่เมื่อรวมแผนทั้งสามชั้นเข้าด้วยกันแล้ว แผนที่ได้จากการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นจะได้แผนคำตอบที่ดีกว่าเนื่องจากการที่พิจารณาวางแผนแบบขั้นเดียวจะทำการหาค่าก่อสร้างต่ำสุดในแต่ละชั้นโดยใช้ผลการก่อสร้างของแผนชั้นก่อนหน้าเป็นกรณีฐาน แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวมแล้วสายส่งบางเส้นในแผนงานก่อนหน้าอาจไม่มีความจำเป็นที่จะต้องสร้างก็ได้ส่งผลให้แผนที่ได้มีค่าก่อสร้างมากเกินไปเกินความจำเป็น รวมทั้งอาจสร้างสายที่ราคาถูกในแผนงานก่อนหน้าแต่ส่งผลให้มีการก่อสร้างสายส่งที่มากเกินไปเกินความจำเป็นในแผนงานขั้นต่อมา ทั้งนี้ข้อมูลราคาที่น่ามาเปรียบเทียบระหว่างหัวข้อ 5.2.7 และ 5.2.8 และหัวข้อ 5.2.9 และ 5.2.10 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 สรุปราคาค่าก่อสร้างตามแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้นและแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวต่อเนื่องกัน

แผนงานสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวและพิจารณาเสถียรภาพแรงดัน	แผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น	แผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวต่อเนื่องกัน
ค่าก่อสร้างชั้นที่ 1 (ล้านบาท)	154.4	154.4
ค่าก่อสร้างชั้นที่ 2 (ล้านบาท)	387.5	347.8
ค่าก่อสร้างชั้นที่ 3 (ล้านบาท)	113.1	172.3
ค่าก่อสร้างรวม (ล้านบาท)	654.9	674.5
แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟร่วมกันพร้อมทั้งพิจารณาดัชนีเสถียรภาพแรงดัน	แผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น	แผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวต่อเนื่องกัน
ค่าก่อสร้างชั้นที่ 1 (ล้านบาท)	154.4	150.5
ค่าก่อสร้างชั้นที่ 2 (ล้านบาท)	293.5	1138.0
ค่าก่อสร้างชั้นที่ 3 (ล้านบาท)	172.3	172.3
ค่าก่อสร้างรวม (ล้านบาท)	620.2	1460.7

จากแผนคำตอบของการคิดทั้งสองกรณีของปัญหาการวางแผนทั้งแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้นซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.21 และ 5.22 จะเห็นว่ากรณีวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟร่วมกัน มีค่าก่อสร้างต่ำกว่าการสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นผลมาจากการที่อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟช่วยในการปรับการไหลของกำลังไฟฟ้ารวมทั้งช่วยปรับระดับแรงดันที่บัสด้วย ทั้งนี้การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟร่วมกัน ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการสร้างสายส่งเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟเป็นแบบจำนวนเต็มไม่ต่อเนื่องทำให้มีจำนวนของบิตตัวแปรที่มากขึ้นเวลาที่ใช้คำนวณจึงมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม หากเราพิจารณาว่าการวิเคราะห์นี้อยู่ในขั้นตอนของการวางแผน เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้การพิจารณาจำกัดระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน จะทำให้การวางแผนต้องพิจารณาก่อสร้างมากกว่าแผนที่ไม่พิจารณาจำกัดระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นหรือมีเสถียรภาพทางแรงดันตามระดับที่กำหนดไว้ ดังนั้นราคาค่าก่อสร้างของแผนงานจึงสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 5.21 สรุปราคาค่าก่อสร้างตามแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว

แผนงาน	สายส่ง	สายส่งและอุปกรณ์ชุดเซยกำลังรีแอกทีฟ	สายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน	สายส่ง, อุปกรณ์ชุดเซยกำลังรีแอกทีฟ และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
ราคา (ล้านบาท)	577.8	577.8	898.8	868.0

ตารางที่ 5.22 สรุปราคาค่าก่อสร้างตามแผนงานขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

แผนงาน	สายส่ง	สายส่งและอุปกรณ์ชุดเซยกำลังรีแอกทีฟ	สายส่งและพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน	สายส่ง, อุปกรณ์ชุดเซยกำลังรีแอกทีฟ และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
ราคา (ล้านบาท)	556.8	543.7	654.9	620.2

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า โดยคำนึงถึงเงื่อนไขขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ขีดจำกัดทางแรงดันไฟฟ้า และเงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองกระแสสลับในการหาผลตอบของการไหลกำลังไฟฟ้า โดยได้ทำการพิจารณาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไขเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ ที่มีต่อการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าทั้งแบบขั้นเดียวและแบบหลายขั้น นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังแสดงให้เห็นประโยชน์ของการวางแผนแบบหลายขั้น แทนที่จะพิจารณาวางแผนแบบขั้นเดียวต่อเนื่องกันไปในแต่ละช่วงเวลาของการวางแผน

จากผลการศึกษาพบว่า แผนที่ได้จากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมมีค่าก่อสร้างที่น้อยกว่าวิธีที่ได้จากวิธีฮิวริสติกที่นำเสนอในรายการอ้างอิง [3] เนื่องจากวิธีการดังกล่าวใช้แบบจำลองกระแสตรงเพื่อหาชุดสายส่งก่อนแล้วจึงพิจารณาสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่หลังจึงทำให้ผลที่ได้มีค่าใช้จ่ายมากกว่าวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งวิธีที่นำเสนอจะพิจารณาสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไปพร้อมๆกัน ในแบบจำลองกระแสสลับ

นอกจากนั้นผลการศึกษายังสามารถแสดงให้เห็นอีกว่า การวางแผนแบบหลายขั้นจะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าแผนที่ได้จากการพิจารณาวางแผนแบบขั้นเดียวต่อเนื่องกันไปในแต่ละช่วงเวลาของการวางแผน เนื่องจากการวางแผนแบบหลายขั้นมีเป้าประสงค์คือค่าก่อสร้างรวมน้อยที่สุด แต่การพิจารณาวางแผนแบบขั้นเดียวในทุกๆขั้นมีเป้าประสงค์ที่จะหาแผนที่ราคาก่อสร้างน้อยที่สุดในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้นผลที่ได้ในขั้นการวางแผนช่วงแรกๆ ของการวางแผนแบบขั้นเดียวในทุกๆขั้น อาจจะมีค่าก่อสร้างน้อยแต่เมื่อรวมค่าก่อสร้างทั้งหมดแล้วการวางแผนแบบหลายขั้นที่มองภาพรวมของแผนเป็นหลักจะมีค่าก่อสร้างรวมน้อยกว่า

ในส่วนของผลการพิจารณาผลของเงื่อนไขดัชนีเสถียรภาพแรงดันในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้านั้น จะส่งผลให้ต้องมีการวางแผนก่อสร้างระบบส่งมากกว่าเดิมเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพทางแรงดันมากขึ้น ดังนั้นการที่แผนกำหนดการจำกัดระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันจะมีค่าก่อสร้างรวมมากกว่าแผนที่ไม่มีการจำกัดระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ไม่ว่าจะเป็นทั้งการวางแผนขยายระบบส่งแบบขั้นเดียวหรือหลายขั้น

ผลกระทบจากการพิจารณาสร้างสายส่งไปพร้อมๆกันกับการหาตำแหน่งและขนาดของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ คือทำให้ได้แผนงานก่อสร้างที่มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการแยกพิจารณาอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการที่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟไปช่วย

บริการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบและชุดเซยระดับแรงดันอาจส่งผลให้ไม่ต้องทำการก่อสร้างสายส่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าซึ่งมีการพิจารณาแผนสร้างสายส่งไปพร้อมกับการหาตำแหน่งและขนาดของการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่ซับซ้อนเนื่องจากมีเงื่อนไขบังคับเป็นจำนวนมากและยังมีตัวแปรประเภทจำนวนเต็ม นั้น สามารถทำได้สะดวกขึ้นโดยใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอ โดยหากเราพิจารณาว่าการวิเคราะห์นี้อยู่ในขั้นตอนของการวางแผนแล้ว เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ในอนาคตหากหน่วยประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ (CPU) มีการพัฒนาในมีความสามารถมากขึ้น ข้อจำกัดด้านเวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมที่นำเสนอ ก็จะไม่เป็นจุดด้อยอีกต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Wang, X., and McDonald, J. R. Modern power system planning. London: McGraw-Hill, 1994
- [2] Sullivan, W. G., Wicks, E. M., and Luxhoj, J. T. Engineering economy New Jersey: Prentice Hall, 2003
- [3] สมภาพ อัจฉรมงคล, การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้วิธีทางฮิวริสติก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2550
- [4] da Silva, E. L., Gil, H. A. and Areiza, J. M., Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm. IEEE Trans. Power Syst., 15 (August 2000): 1168-1175.
- [5] Duan, G., and Yu, Y., Problem-specific genetic algorithm for power transmission system planning. Electric Power Systems Research, 61 (February 2002): 41-50.
- [6] Gallego, R. A., Monticelli, A. and R. Romero, Transmission expansion planning by an extended genetic algorithm. Proc. IEE-Gen. Transm. Dist., 145 (May 1998): 329-335.
- [7] Gil, H. A., and da Silva, E. L. A, reliable approach for solving the transmission network expansion planning problem using genetic algorithms. Electric Power Systems Research, 58 (May 2001): 45-51.
- [8] Jingdong, X., and Guoqing, T., The application of genetic algorithms in the multi-objective transmission network planning. Proc. 4th Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management. (1997): 338-341.
- [9] Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison Wesley, 1989
- [10] Man, K.F., Tang, K.S., and Kwong, S Genetic algorithm: Concept and application. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 43 , 5 (October 1996): 519-534
- [11] Syswerda, G. Uniform crossover in genetic algorithm. Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993: 2-9.

- [12] ปฐม อัดตวิริยะนุภาพ, การทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2540
- [13] ศุภศิษฐ์ ศรีสวัสดิ์นุภาพ, การจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายเพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยอาศัยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2551
- [14] พรเทพ เทียบรัตน์, วัชรินทร์ ยกย่อง, กุลยศ อุดมวงศ์เสวี, ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน PQ (PQVSI) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดัน, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON31)
- [15] Romeo, R., and Monticelli, A., A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning. IEEE Transactions on Power Systems 9, 10 (February 1994): 373-380
- [16] Romero, R., Gallego, R., A., and Monticelli, A., Transmission system expansion planning by simulated annealing .IEEE Transactions on Power Systems, 11 (February 1996): 364-369.
- [17] Haffner, S., Monticelli, A., Garcia, A., Mantovani, J., and Romero, R. Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model.. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 147 (May 2000): 149-156.
- [18] Binato, S., Pereira, M. V., F., and Granville S., A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems. IEEE Transactions on Power Systems 16, 2 (May 2001): 235-240.
- [19] Wen, F., and Chang, C. S., Transmission network optimal using the Tabu search method. Electric Power Systems Research 42 (August 1997): 153-163.
- [20] Gallego, R. A., Romero, R., and Monticelli, A. J., Tabu search algorithm for network synthesis. IEEE Trans. Power Syst., 15 (May 2000): 490-495.
- [21] da Silva, E. L., Ortiz, J. M. A., de Oliveira, G. C., and Binato, S., Transmission network expansion planning under a tabu search approach. IEEE Trans. Power Syst., 16 (February 2001): 62-68.

- [22] Binato, S., de Oliveira, G.C., and de Araujo, J. L., A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning. IEEE Transactions on PowerSystems, 16, 2 (May 2001): 247-253
- [23] Escobar, A. H., Gallego, R. A., and Romero, R., Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems. IEEE Transactions on Power Systems, 19 (May 2004): 735-744.
- [24] Wang, X. L., Wang, X. F., and Mao, Y. B., Improved genetic algorithm for optimal multistage transmission system planning. Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., 3 (July 2001): 1737-1742.
- [25] Youseef, H. K. M., Dynamic transmission planning using a constrained genetic algorithm. Int. J. of Electr. Power Energy Syst 23 (November 2001): 857-862.
- [26] Braga, A. S. D., and Saraiva, J. T., A multiyear dynamic approach for transmission expansion planning and long-term marginal costs computation. IEEE Trans. Power Syst, 20 (August 2005): 1631-1639.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ Garver 6 บัส

ในภาคผนวก ข ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของระบบทดสอบ 6 บัสที่ดัดแปลงจากระบบ Garver โดยในระบบทดสอบนี้จะประกอบด้วยบัส 6 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง และสายส่ง 6 เส้น โดยค่าฐานของการคำนวณเป็น 100 MVA รายละเอียดของข้อมูลของบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลสายส่ง และข้อมูลสายส่งทางเลือก ได้แสดงดังตารางที่ ก.1 ก.2 ก.3 และก.4 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 6 บัส

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		แรงดันสูงสุด	แรงดันต่ำสุด	แรงดันฐาน
		P(MW)	Q(MVAr)	(p.u.)	(p.u.)	(kV)
1	บัสอ้างอิง	80	49.58	1.050	0.980	230
2	โหลดบัส	240	148.74	1.050	0.980	230
3	บัสควบคุมแรงดัน	40	24.79	1.050	0.980	230
4	โหลดบัส	160	99.16	1.050	0.980	230
5	โหลดบัส	240	148.74	1.050	0.980	230
6	บัสควบคุมแรงดัน	0	0.00	1.050	0.980	230

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ 6 บัส

บัส	กำลังการผลิต		แรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(p.u.)	กำลังจริงสูงสุด (MW)	กำลังจริงต่ำสุด (MW)	กำลังรีแอกทีฟสูงสุด (MW)	กำลังรีแอกทีฟต่ำสุด (MW)
	P (MW)	Q (MVAr)					
1	0	0	1.031	150	0	100	-100
3	165	0	1.039	360	0	300	-300
6	545	0	1.05	600	0	500	-500

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 6 บัส

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)
		R	X	B	
1	2	0.0143	0.04	0.0056	100
1	4	0.0214	0.06	0.0084	80
1	5	0.0071	0.02	0.0028	100
2	3	0.0071	0.02	0.0028	100
2	4	0.0143	0.04	0.0056	100
3	5	0.0071	0.02	0.0028	100

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งทางเลือก

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สูงสุด	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
1	2	0.0143	0.0400	0.0056	100	4	40
1	3	0.0136	0.0380	0.0053	100	4	38
1	4	0.0214	0.0600	0.0084	80	4	60
1	5	0.0071	0.0200	0.0028	100	4	20
1	6	0.0243	0.0680	0.0095	70	4	68
2	3	0.0071	0.0200	0.0028	100	4	20
2	4	0.0143	0.0400	0.0056	100	4	40
2	5	0.0111	0.0310	0.0043	100	4	31
2	6	0.0107	0.0300	0.0042	100	4	30
3	4	0.0211	0.0590	0.0083	82	4	59
3	5	0.0071	0.0200	0.0028	100	4	20
3	6	0.0171	0.0480	0.0067	100	4	48
4	5	0.0225	0.0630	0.0088	75	4	63

ภาคผนวก ข ระบบทดสอบ IEEE RTS-79

ในภาคผนวก ข ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของระบบทดสอบ IEEE RTS-79 โดยในระบบทดสอบนี้จะประกอบด้วยบัส 24 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 11 เครื่อง และสายส่ง 38 เส้น โดยค่าฐานของการคำนวณเป็น 100 MVA รายละเอียดของข้อมูลของบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น ข้อมูลสายส่ง และข้อมูลสายส่งทางเลือก ได้แสดงดังตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE-RTS79

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		อุปกรณ์ตัวต่อแบบขนาน		แรงดันสูงสุด (p.u.)	แรงดันต่ำสุด (p.u.)	แรงดันฐาน (kV)
		P(MW)	Q(MVAr)	G_s (Mw)	B_s (MVAr)			
1	บัสควบคุมแรงดัน	108	22	0	0	1.05	0.95	138
2	บัสควบคุมแรงดัน	97	20	0	0	1.05	0.95	138
3	โหลดบัส	180	37	0	0	1.05	0.95	138
4	โหลดบัส	74	15	0	0	1.05	0.95	138
5	โหลดบัส	71	14	0	0	1.05	0.95	138
6	โหลดบัส	136	28	0	-100	1.05	0.95	138
7	บัสควบคุมแรงดัน	125	25	0	0	1.05	0.95	138
8	โหลดบัส	171	35	0	0	1.05	0.95	138
9	โหลดบัส	175	36	0	0	1.05	0.95	138
10	โหลดบัส	195	40	0	0	1.05	0.95	138
11	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95	230
12	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95	230
13	บัสควบคุมแรงดัน	265	54	0	0	1.05	0.95	230
14	บัสควบคุมแรงดัน	194	39	0	0	1.05	0.95	230
15	บัสควบคุมแรงดัน	317	64	0	0	1.05	0.95	230
16	บัสควบคุมแรงดัน	100	20	0	0	1.05	0.95	230
17	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95	230
18	บัสควบคุมแรงดัน	333	68	0	0	1.05	0.95	230
19	โหลดบัส	181	37	0	0	1.05	0.95	230
20	โหลดบัส	128	26	0	0	1.05	0.95	230
21	บัสอ้างอิง	0	0	0	0	1.05	0.95	230
22	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95	230
23	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95	230
24	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95	230

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	กำลังการผลิต		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า(p.u.)	กำลังจริง สูงสุด (MW)	กำลังจริง ต่ำสุด (MW)	กำลังรีแอก ทีฟสูงสุด (MW)	กำลังรีแอก ทีฟต่ำสุด (MW)
	P (MW)	Q (MVAr)					
1	17.00	0.00	1.024	20	0	10	0
1	17.00	0.00	1.024	20	0	10	0
1	64.60	0.00	1.024	76	0	30	-25
1	64.60	0.00	1.024	76	0	30	-25
2	17.00	0.00	1.027	20	0	10	0
2	17.00	0.00	1.027	20	0	10	0
2	64.60	0.00	1.027	76	0	30	-25
2	64.60	0.00	1.027	76	0	30	-25
7	85.00	0.00	1.050	100	0	60	0
7	85.00	0.00	1.050	100	0	60	0
7	85.00	0.00	1.050	100	0	60	0
13	167.45	0.00	1.042	197	0	80	0
13	167.45	0.00	1.042	197	0	80	0
13	167.45	0.00	1.042	197	0	80	0
14	0.00	0.00	1.037	0	0	200	-50
15	10.20	0.00	1.043	12	0	6	0
15	10.20	0.00	1.043	12	0	6	0
15	10.20	0.00	1.043	12	0	6	0
15	10.20	0.00	1.043	12	0	6	0
15	10.20	0.00	1.043	12	0	6	0
15	131.75	0.00	1.043	155	0	80	-50
16	131.75	0.00	1.050	155	0	80	-50
18	340.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
21	0.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
22	42.50	0.00	1.050	50	0	16	-10
22	42.50	0.00	1.050	50	0	16	-10

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

บัส	กำลังการผลิต		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า(p.u.)	กำลังจริง สูงสุด (MW)	กำลังจริง ต่ำสุด (MW)	กำลังรีแอก ทีฟสูงสุด (MW)	กำลังรีแอก ทีฟต่ำสุด (MW)
	P (MW)	Q (MVAr)					
22	42.50	0.00	1.050	50	0	16	-10
22	42.50	0.00	1.050	50	0	16	-10
22	42.50	0.00	1.050	50	0	16	-10
22	42.50	0.00	1.050	50	0	16	-10
23	131.75	0.00	1.050	155	0	80	-50
23	131.75	0.00	1.050	155	0	80	-50
23	297.50	0.00	1.050	350	0	150	-25
16	297.50	0.00	1.050	350	0	150	-25
18	340.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
18	340.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
21	0.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
21	0.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
21	0.00	0.00	1.050	400	0	200	-50
23	297.50	0.00	1.050	350	0	150	-25

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น

บัส	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 1		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 2		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 3		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
	P(MW)	Q(MVAr)		P(MW)	Q(MVAr)		P(MW)	Q(MVAr)	
1	0.00	6.95	1.050	2.97	10.00	1.001	9.50	10.00	1.0190
1	0.00	6.95	1.050	2.97	10.00	1.001	9.50	10.00	1.0190
1	76.00	13.22	1.050	76.00	30.00	1.001	76.00	30.00	1.0190
1	76.00	13.22	1.050	76.00	30.00	1.001	76.00	30.00	1.0190
2	0.00	5.82	1.050	7.65	0.59	0.994	14.77	7.16	1.0177
2	0.00	5.82	1.050	7.65	0.59	0.994	14.77	7.16	1.0177
2	76.00	7.01	1.050	76.00	-21.74	0.994	76.00	14.40	1.0177
2	76.00	7.01	1.050	76.00	-21.74	0.994	76.00	14.40	1.0177
7	87.81	27.06	1.050	100.00	31.69	1.010	100.00	55.60	1.0500
7	87.81	27.06	1.050	100.00	31.69	1.010	100.00	55.60	1.0500
7	87.81	27.06	1.050	100.00	31.69	1.010	100.00	55.60	1.0500
13	153.32	62.64	1.047	197.00	76.26	1.050	118.11	80.00	1.0363
13	153.32	62.64	1.047	197.00	76.26	1.050	118.10	80.00	1.0363

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น (ต่อ)

บัส	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 1		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 2		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 3		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
	P(MW)	Q(MVAr)		P(MW)	Q(MVAr)		P(MW)	Q(MVAr)	
13	153.32	62.64	1.047	197.00	76.26	1.050	118.10	80.00	1.0363
14	0.00	184.23	1.033	0.00	200.00	1.041	0.00	200.00	1.0335
15	0.74	6.00	1.013	0.00	6.00	1.037	0.00	6.00	1.0190
15	0.74	6.00	1.013	0.00	6.00	1.037	0.00	6.00	1.0190
15	0.74	6.00	1.013	0.00	6.00	1.037	0.00	6.00	1.0190
15	0.74	6.00	1.013	0.00	6.00	1.037	0.00	6.00	1.0190
15	0.74	6.00	1.013	0.00	6.00	1.037	0.00	6.00	1.0190
15	155.00	80.00	1.013	69.67	80.00	1.037	155.00	80.00	1.0190
16	155.00	34.82	1.019	155.00	80.00	1.037	110.25	80.00	1.0384
18	197.41	61.48	1.034	347.62	27.02	1.050	400.00	29.25	1.0500
21	400.00	54.77	1.050	335.37	67.48	1.050	302.41	104.55	1.0500
22	50.00	-10.00	1.031	50.00	-5.91	1.050	50.00	-6.03	1.0500
22	50.00	-10.00	1.031	50.00	-5.91	1.050	50.00	-6.03	1.0500

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น (ต่อ)

บัส	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 1		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 2		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	กำลังการผลิต ในการวางแผนช่วงที่ 3		แรงดันที่บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
	P(MW)	Q(MVAr)		P(MW)	Q(MVAr)		P(MW)	Q(MVAr)	
22	50.00	-10.00	1.031	50.00	-5.91	1.050	50.00	-6.03	1.0500
22	50.00	-10.00	1.031	50.00	-5.91	1.050	50.00	-6.03	1.0500
22	50.00	-10.00	1.031	50.00	-5.91	1.050	50.00	-6.03	1.0500
22	50.00	-10.00	1.031	50.00	-5.91	1.050	50.00	-6.03	1.0500
23	155.00	17.81	1.048	155.00	12.91	1.050	155.00	4.76	1.0500
23	155.00	17.81	1.048	155.00	12.91	1.050	155.00	4.76	1.0500
23	350.00	66.28	1.048	350.00	59.69	1.050	350.00	48.71	1.0500
23	-	-	-	-	-	-	350.00	48.71	1.0500
21	0.66	54.77	1.050	0.00	67.48	1.050	302.42	104.55	1.0500
21	400.00	54.77	1.050	335.31	67.48	1.050	302.42	104.55	1.0500
21	400.00	54.77	1.050	335.31	67.48	1.050	302.42	104.55	1.0500
18	-	-	-	347.62	27.02	1.050	400.00	29.25	1.0500
18	-	-	-	347.62	27.02	1.050	400.00	29.25	1.0500
16	-	-	-	-	-	-	249.36	150.00	1.0384

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)
		R	X	B	
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175
1	3	0.0546	0.2112	0.0572	175
1	5	0.0218	0.0845	0.0229	175
2	4	0.0328	0.1267	0.0343	175
2	6	0.0497	0.192	0.052	175
3	9	0.0308	0.119	0.0322	175
3	24	0.0023	0.0839	0	400
4	9	0.0268	0.1037	0.0281	175
5	10	0.0139	0.0605	0.0239	175
6	10	0.0139	0.0605	2.459	400
7	8	0.0159	0.0614	0.0166	175
8	9	0.0427	0.1651	0.0447	175
8	10	0.0427	0.1651	0.0447	175
9	11	0.0023	0.0839	0	400
9	12	0.0023	0.0839	0	400
10	11	0.0023	0.0839	0	400
10	12	0.0023	0.0839	0	400
11	13	0.0061	0.0476	0.0999	500
11	14	0.0054	0.0418	0.0879	500
12	13	0.0061	0.0476	0.0999	500
12	23	0.0124	0.0966	0.0203	500
13	23	0.0111	0.0865	0.1818	500
14	16	0.0050	0.0589	0.0818	500
15	16	0.0020	0.0173	0.0364	500
15	21	0.0063	0.049	0.103	500
15	21	0.0063	0.049	0.103	500
15	24	0.0067	0.0519	0.1091	500

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)
		R	X	B	
16	17	0.0033	0.0259	0.0545	500
16	19	0.0030	0.0231	0.049	500
17	18	0.0018	0.0144	0.0303	500
17	22	0.0135	0.1053	0.2212	500
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500
21	22	0.0087	0.0678	0.1424	500

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	300	1	72.0
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	300	2	103.0
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175	1	62.4
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175	2	89.1
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	300	1	86.4
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	300	2	123.4
1	3	0.0893	0.2625	0.0335	119.5	2	203.7
1	3	0.0553	0.2431	0.0364	182.9	2	253.0
1	3	0.0277	0.1843	0.0474	325.9	1	290.2
1	3	0.0277	0.1843	0.0474	325.9	2	426.3
1	3	0.0893	0.2625	0.0335	119.5	2	381.4
1	3	0.0553	0.2431	0.0364	182.9	2	430.7
1	3	0.0277	0.1843	0.0474	325.9	1	467.9
1	3	0.0277	0.1843	0.0474	325.9	2	604.1
1	4	0.0558	0.1641	0.0209	119.5	2	253.5
1	4	0.0346	0.1519	0.0228	182.9	2	284.3
1	4	0.0173	0.1152	0.0296	325.9	1	300.0
1	4	0.0173	0.1152	0.0296	325.9	2	392.7
1	5	0.0357	0.1050	0.0134	119.5	2	105.5
1	5	0.0221	0.0972	0.0146	182.9	2	125.2
1	5	0.0111	0.0737	0.0190	325.9	1	128.1
1	5	0.0111	0.0737	0.0190	325.9	2	194.5
1	5	0.0357	0.1050	0.0134	119.5	2	176.6
1	5	0.0221	0.0972	0.0146	182.9	2	196.3
1	5	0.0111	0.0737	0.0190	325.9	1	199.2
1	5	0.0111	0.0737	0.0190	325.9	2	265.6
1	6	0.0839	0.2467	0.0315	119.5	2	361.0

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
1	6	0.0520	0.2285	0.0342	182.9	2	407.3
1	6	0.0260	0.1732	0.0445	325.9	1	441.1
1	6	0.0260	0.1732	0.0445	325.9	2	570.3
1	7	0.0276	0.0811	0.0104	119.5	2	145.7
1	7	0.0171	0.0751	0.0113	182.9	2	161.0
1	7	0.0086	0.0570	0.0147	325.9	1	158.7
1	7	0.0086	0.0570	0.0147	325.9	2	214.7
1	8	0.0011	0.0031	0.0004	119.5	2	44.1
1	8	0.0007	0.0029	0.0004	182.9	2	44.7
1	8	0.0003	0.0022	0.0006	325.9	1	25.3
1	8	0.0003	0.0022	0.0006	325.9	2	46.7
2	4	0.0536	0.1575	0.0201	119.5	2	138.2
2	4	0.0332	0.1459	0.0218	182.9	2	167.8
2	4	0.0166	0.1106	0.0284	325.9	1	182.1
2	4	0.0166	0.1106	0.0284	325.9	2	271.8
2	4	0.0536	0.1575	0.0201	119.5	2	244.9
2	4	0.0332	0.1459	0.0218	182.9	2	274.4
2	4	0.0166	0.1106	0.0284	325.9	1	288.8
2	4	0.0166	0.1106	0.0284	325.9	2	378.5
2	5	0.0437	0.1286	0.0164	119.5	2	207.1
2	5	0.0271	0.1191	0.0178	182.9	2	231.2
2	5	0.0136	0.0903	0.0232	325.9	1	239.2
2	5	0.0136	0.0903	0.0232	325.9	2	316.0
2	6	0.0812	0.2386	0.0305	119.5	2	188.8
2	6	0.0503	0.2210	0.0331	182.9	2	233.6
2	6	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	1	265.6
2	6	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	2	391.2

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
2	6	0.0812	0.2386	0.0305	119.5	2	350.4
2	6	0.0503	0.2210	0.0331	182.9	2	395.2
2	6	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	1	427.2
2	6	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	2	552.8
2	7	0.0279	0.0820	0.0105	119.5	2	146.7
2	7	0.0173	0.0760	0.0114	182.9	2	162.1
2	7	0.0087	0.0576	0.0148	325.9	1	159.9
2	7	0.0087	0.0576	0.0148	325.9	2	216.2
2	8	0.0050	0.0146	0.0019	119.5	2	59.0
2	8	0.0031	0.0135	0.0020	182.9	2	61.7
2	8	0.0015	0.0103	0.0026	325.9	1	44.9
2	8	0.0015	0.0103	0.0026	325.9	2	71.4
3	4	0.0981	0.2885	0.0368	119.5	2	415.2
3	4	0.0608	0.2671	0.0400	182.9	2	469.4
3	4	0.0304	0.2025	0.0521	325.9	1	512.2
3	4	0.0304	0.2025	0.0521	325.9	2	659.9
3	5	0.0812	0.2386	0.0305	119.5	2	350.5
3	5	0.0503	0.2210	0.0331	182.9	2	395.3
3	5	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	1	427.4
3	5	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	2	553.0
3	6	0.0268	0.0788	0.0101	119.5	2	142.4
3	6	0.0166	0.0729	0.0109	182.9	2	157.2
3	6	0.0083	0.0553	0.0142	325.9	1	154.4
3	6	0.0083	0.0553	0.0142	325.9	2	209.2
3	8	0.0984	0.2893	0.0369	119.5	2	416.3
3	8	0.0610	0.2680	0.0401	182.9	2	470.7
3	8	0.0305	0.2031	0.0522	325.9	1	513.7

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
3	8	0.0305	0.2031	0.0522	325.9	2	661.7
3	9	0.0503	0.1480	0.0189	119.5	2	132.3
3	9	0.0312	0.1370	0.0205	182.9	2	160.0
3	9	0.0156	0.1039	0.0267	325.9	1	172.3
3	9	0.0156	0.1039	0.0267	325.9	2	257.7
3	9	0.0503	0.1480	0.0189	119.5	2	228.8
3	9	0.0312	0.1370	0.0205	182.9	2	256.6
3	9	0.0156	0.1039	0.0267	325.9	1	270.7
3	9	0.0156	0.1039	0.0267	325.9	2	354.3
3	24	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135.0
3	24	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100.0
3	24	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135.0
3	24	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100.0
3	24	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135.0
4	5	0.0231	0.0680	0.0087	119.5	2	128.6
4	5	0.0143	0.0630	0.0094	182.9	2	141.4
4	5	0.0072	0.0478	0.0123	325.9	1	136.2
4	5	0.0072	0.0478	0.0123	325.9	2	186.3
4	6	0.0731	0.2148	0.0274	119.5	2	319.5
4	6	0.0452	0.1989	0.0298	182.9	2	359.8
4	6	0.0227	0.1508	0.0388	325.9	1	386.7
4	6	0.0227	0.1508	0.0388	325.9	2	501.7
4	7	0.0372	0.1095	0.0140	119.5	2	182.4
4	7	0.0231	0.1014	0.0152	182.9	2	203.0
4	7	0.0116	0.0769	0.0198	325.9	1	206.9
4	7	0.0116	0.0769	0.0198	325.9	2	275.3
4	8	0.0569	0.1673	0.0214	119.5	2	257.5

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
4	8	0.0353	0.1550	0.0232	182.9	2	288.9
4	8	0.0177	0.1175	0.0302	325.9	1	305.3
4	8	0.0177	0.1175	0.0302	325.9	2	399.3
4	9	0.0438	0.1289	0.0164	119.5	2	120.4
4	9	0.0271	0.1193	0.0179	182.9	2	144.5
4	9	0.0136	0.0905	0.0233	325.9	1	152.6
4	9	0.0136	0.0905	0.0233	325.9	2	229.7
4	9	0.0438	0.1289	0.0164	119.5	2	204
4	9	0.0271	0.1193	0.0179	182.9	2	228.2
4	9	0.0136	0.0905	0.0233	325.9	1	238.1
4	9	0.0136	0.0905	0.0233	325.9	2	313.3
5	6	0.0590	0.1733	0.0221	119.5	2	265.3
5	6	0.0365	0.1605	0.0240	182.9	2	297.8
5	6	0.0183	0.1217	0.0313	325.9	1	315.5
5	6	0.0183	0.1217	0.0313	325.9	2	412.2
5	7	0.0331	0.0972	0.0124	119.5	2	166.6
5	7	0.0205	0.0901	0.0135	182.9	2	184.8
5	7	0.0103	0.0683	0.0176	325.9	1	186
5	7	0.0103	0.0683	0.0176	325.9	2	249.1
5	8	0.0403	0.1184	0.0151	119.5	2	193.9
5	8	0.0249	0.1097	0.0164	182.9	2	216.1
5	8	0.0125	0.0831	0.0214	325.9	1	221.9
5	8	0.0125	0.0831	0.0214	325.9	2	294.2
5	10	0.0373	0.1098	0.0140	119.5	2	108.5
5	10	0.0231	0.1017	0.0152	182.9	2	129.1
5	10	0.0116	0.0771	0.0198	325.9	1	133
5	10	0.0116	0.0771	0.0198	325.9	2	201.6

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
5	10	0.0373	0.1098	0.0140	119.5	2	182.8
5	10	0.0231	0.1017	0.0152	182.9	2	203.4
5	10	0.0116	0.0771	0.0198	325.9	1	207.3
5	10	0.0116	0.0771	0.0198	325.9	2	275.9
6	7	0.0907	0.2667	0.0340	119.5	2	386.9
6	7	0.0562	0.2470	0.0370	182.9	2	436.9
6	7	0.0281	0.1872	0.0482	325.9	1	475
6	7	0.0281	0.1872	0.0482	325.9	2	613.1
6	8	0.0844	0.2482	0.0317	119.5	2	362.7
6	8	0.0523	0.2298	0.0344	182.9	2	409.3
6	8	0.0262	0.1742	0.0448	325.9	1	443.3
6	8	0.0262	0.1742	0.0448	325.9	2	573.1
6	10	0.0139	0.0605	2.4590	300	1	384
6	10	0.0139	0.0605	2.4590	300	2	548.6
6	10	0.0139	0.0605	2.4590	175	1	332.8
6	10	0.0139	0.0605	2.4590	175	2	475.4
6	10	0.0139	0.0605	2.4590	300	1	460.8
6	10	0.0139	0.0605	2.4590	300	2	658.3
7	8	0.0260	0.0764	0.0097	119.5	2	87.6
7	8	0.0161	0.0707	0.0106	182.9	2	102
7	8	0.0081	0.0536	0.0138	325.9	1	98.6
7	8	0.0081	0.0536	0.0138	325.9	2	152.4
7	8	0.0260	0.0764	0.0097	119.5	2	139.3
7	8	0.0161	0.0707	0.0106	182.9	2	153.7
7	8	0.0081	0.0536	0.0138	325.9	1	150.3
7	8	0.0081	0.0536	0.0138	325.9	2	204.1
8	10	0.0217	0.1441	0.0371	325.9	2	342

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
8	10	0.0698	0.2052	0.0262	119.5	2	306.9
8	10	0.0432	0.1901	0.0285	182.9	2	345.5
8	10	0.0217	0.1441	0.0371	325.9	1	379.2
8	10	0.0217	0.1441	0.0371	325.9	2	481
9	11	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
9	11	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100
9	11	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
9	11	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100
9	11	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
9	12	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
9	12	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100
9	12	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
9	12	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100
9	12	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
10	1	0.0760	0.2234	0.0285	119.5	2	330.8
10	1	0.0471	0.2069	0.0310	182.9	2	372.7
10	1	0.0236	0.1569	0.0403	325.9	1	401.5
10	1	0.0236	0.1569	0.0403	325.9	2	520.4
10	2	0.0812	0.2386	0.0305	119.5	2	350.4
10	2	0.0503	0.2210	0.0331	182.9	2	395.2
10	2	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	1	427.2
10	2	0.0252	0.1675	0.0431	325.9	2	552.8
10	7	0.0741	0.2178	0.0278	119.5	2	323.2
10	7	0.0459	0.2017	0.0302	182.9	2	364.1
10	7	0.0230	0.1529	0.0393	325.9	1	391.5
10	7	0.0230	0.1529	0.0393	325.9	2	507.9
10	11	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
10	12	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
10	12	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100
10	12	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
10	12	0.0000	0.0605	0.0000	400	1	100
10	12	0.0000	0.0550	0.0000	600	1	135
11	14	0.0023	0.0244	0.0994	858.9	1	235.3
11	14	0.0046	0.0334	0.0734	429.4	2	252.1
11	14	0.0023	0.0244	0.0994	858.9	2	359.3
11	14	0.0046	0.0334	0.0734	429.4	1	286.5
11	14	0.0023	0.0244	0.0994	858.9	1	361.2
11	14	0.0046	0.0334	0.0734	429.4	2	374.3
11	14	0.0023	0.0244	0.0994	858.9	2	481.5
12	13	0.0026	0.0278	0.1131	858.9	2	397.9
12	13	0.0052	0.0380	0.0835	429.4	1	324.6
12	13	0.0026	0.0278	0.1131	858.9	1	409.6
12	13	0.0052	0.0380	0.0835	429.4	2	423.2
12	13	0.0026	0.0278	0.1131	858.9	2	545.2
12	15	0.0009	0.0068	0.0149	429.4	1	90.6
12	15	0.0005	0.0049	0.0201	858.9	1	105.7
12	15	0.0009	0.0068	0.0149	429.4	2	141
12	15	0.0005	0.0049	0.0201	858.9	2	162.7
12	16	0.0015	0.0108	0.0237	429.4	1	121
12	16	0.0007	0.0079	0.0321	858.9	1	145.2
12	16	0.0015	0.0108	0.0237	429.4	2	177.7
12	16	0.0007	0.0079	0.0321	858.9	2	212.4
12	17	0.0046	0.0335	0.0736	429.4	1	290.6
12	17	0.0023	0.0245	0.0996	858.9	1	365.5

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
12	17	0.0046	0.0335	0.0736	429.4	2	382.3
12	17	0.0023	0.0245	0.0996	858.9	2	489.7
12	18	0.0037	0.0272	0.0598	429.4	1	243.9
12	18	0.0019	0.0199	0.0810	858.9	1	304.8
12	18	0.0037	0.0272	0.0598	429.4	2	325.9
12	18	0.0019	0.0199	0.0810	858.9	2	413.3
12	19	0.0043	0.0310	0.0682	429.4	1	272.5
12	19	0.0021	0.0227	0.0923	858.9	1	342
12	19	0.0043	0.0310	0.0682	429.4	2	360.4
12	19	0.0021	0.0227	0.0923	858.9	2	460.1
12	20	0.0091	0.0659	0.1447	429.4	1	533.4
12	20	0.0045	0.0481	0.1960	858.9	1	680.7
12	20	0.0091	0.0659	0.1447	429.4	2	675
12	20	0.0045	0.0481	0.1960	858.9	2	886.4
12	21	0.0050	0.0364	0.0800	429.4	1	312.6
12	21	0.0025	0.0266	0.1084	858.9	1	394
12	21	0.0050	0.0364	0.0800	429.4	2	408.7
12	21	0.0025	0.0266	0.1084	858.9	2	525.6
12	22	0.0103	0.0749	0.1645	429.4	1	600.7
12	22	0.0052	0.0547	0.2228	858.9	1	768.1
12	22	0.0103	0.0749	0.1645	429.4	2	756.1
12	22	0.0052	0.0547	0.2228	858.9	2	996.4
12	23	0.0053	0.0564	0.2296	858.9	1	491.3
12	23	0.0106	0.0772	0.1696	429.4	2	477.7
12	23	0.0053	0.0564	0.2296	858.9	2	725.3
12	23	0.0106	0.0772	0.1696	429.4	1	617.8
12	23	0.0053	0.0564	0.2296	858.9	1	790.4

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
12	23	0.0106	0.0772	0.1696	429.4	2	776.8
12	23	0.0053	0.0564	0.2296	858.9	2	1024.4
13	14	0.0100	0.0726	0.1596	429.4	1	583.8
13	14	0.0050	0.0531	0.2162	858.9	1	746.2
13	14	0.0100	0.0726	0.1596	429.4	2	735.7
13	14	0.0050	0.0531	0.2162	858.9	2	968.8
13	15	0.0067	0.0485	0.1066	429.4	1	403.5
13	15	0.0033	0.0354	0.1444	858.9	1	512.1
13	15	0.0067	0.0485	0.1066	429.4	2	518.4
13	15	0.0033	0.0354	0.1444	858.9	2	674.1
13	16	0.0054	0.0389	0.0854	429.4	1	331.1
13	16	0.0027	0.0284	0.1157	858.9	1	418.1
13	16	0.0054	0.0389	0.0854	429.4	2	431.1
13	16	0.0027	0.0284	0.1157	858.9	2	555.9
13	17	0.0064	0.0462	0.1016	429.4	1	385.9
13	17	0.0032	0.0338	0.1375	858.9	1	489.3
13	17	0.0064	0.0462	0.1016	429.4	2	497.2
13	17	0.0032	0.0338	0.1375	858.9	2	645.4
13	18	0.0047	0.0338	0.0743	429.4	1	293.2
13	18	0.0023	0.0247	0.1007	858.9	1	368.8
13	18	0.0047	0.0338	0.0743	429.4	2	385.3
13	18	0.0023	0.0247	0.1007	858.9	2	493.8
13	19	0.0054	0.0394	0.0865	429.4	1	334.7
13	19	0.0027	0.0288	0.1172	858.9	1	422.7
13	19	0.0054	0.0394	0.0865	429.4	2	435.4
13	19	0.0027	0.0288	0.1172	858.9	2	561.7
13	20	0.0083	0.0605	0.1330	429.4	1	493.4

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
13	20	0.0042	0.0442	0.1802	858.9	1	628.8
13	20	0.0083	0.0605	0.1330	429.4	2	626.8
13	20	0.0042	0.0442	0.1802	858.9	2	821.1
13	21	0.0016	0.0115	0.0253	429.4	1	126.4
13	21	0.0008	0.0084	0.0343	858.9	1	152.3
13	21	0.0016	0.0115	0.0253	429.4	2	184.2
13	21	0.0008	0.0084	0.0343	858.9	2	221.3
13	22	0.0066	0.0482	0.1060	429.4	1	401.2
13	22	0.0033	0.0352	0.1435	858.9	1	509.1
13	22	0.0066	0.0482	0.1060	429.4	2	515.5
13	22	0.0033	0.0352	0.1435	858.9	2	670.3
13	23	0.0048	0.0505	0.2057	858.9	1	444.2
13	23	0.0095	0.0691	0.1519	429.4	2	436.2
13	23	0.0048	0.0505	0.2057	858.9	2	657.9
13	23	0.0095	0.0691	0.1519	429.4	1	557.4
13	23	0.0048	0.0505	0.2057	858.9	1	712
13	23	0.0095	0.0691	0.1519	429.4	2	704
13	23	0.0048	0.0505	0.2057	858.9	2	925.8
14	15	0.0045	0.0328	0.0721	429.4	1	285.6
14	15	0.0023	0.0240	0.0977	858.9	1	359.9
14	15	0.0045	0.0328	0.0721	429.4	2	376.1
14	15	0.0023	0.0240	0.0977	858.9	2	481.4
14	16	0.0021	0.0227	0.0925	858.9	1	221.9
14	16	0.0043	0.0311	0.0683	429.4	2	240.3
14	16	0.0021	0.0227	0.0925	858.9	2	340.1
14	16	0.0043	0.0311	0.0683	429.4	1	272.9
14	16	0.0021	0.0227	0.0925	858.9	1	342.4

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
14	16	0.0043	0.0311	0.0683	429.4	2	360.8
14	16	0.0021	0.0227	0.0925	858.9	2	460.6
14	17	0.0049	0.0353	0.0777	429.4	1	304.9
14	17	0.0024	0.0258	0.1052	858.9	1	384
14	17	0.0049	0.0353	0.0777	429.4	2	399.4
14	17	0.0024	0.0258	0.1052	858.9	2	513
14	18	0.0058	0.0423	0.0930	429.4	1	356.8
14	18	0.0029	0.0309	0.1260	858.9	1	451.4
14	18	0.0058	0.0423	0.0930	429.4	2	462.1
14	18	0.0029	0.0309	0.1260	858.9	2	597.8
14	19	0.0055	0.0400	0.0878	429.4	1	339.3
14	19	0.0028	0.0292	0.1189	858.9	1	428.7
14	19	0.0055	0.0400	0.0878	429.4	2	440.9
14	19	0.0028	0.0292	0.1189	858.9	2	569.2
14	20	0.0089	0.0643	0.1413	429.4	1	521.2
14	20	0.0044	0.0470	0.1913	858.9	1	664.9
14	20	0.0089	0.0643	0.1413	429.4	2	660.2
14	20	0.0044	0.0470	0.1913	858.9	2	866.5
14	21	0.0087	0.0633	0.1392	429.4	1	514.5
14	21	0.0044	0.0463	0.1885	858.9	1	656.2
14	21	0.0087	0.0633	0.1392	429.4	2	652.2
14	21	0.0044	0.0463	0.1885	858.9	2	855.5
14	22	0.0153	0.1114	0.2447	429.4	1	873.8
14	22	0.0077	0.0814	0.3314	858.9	1	1122.9
14	22	0.0153	0.1114	0.2447	429.4	2	1085.5
14	22	0.0077	0.0814	0.3314	858.9	2	1442.9
14	23	0.0112	0.0812	0.1784	429.4	1	648

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
14	23	0.0056	0.0593	0.2416	858.9	1	829.6
14	23	0.0112	0.0812	0.1784	429.4	2	823.2
14	23	0.0056	0.0593	0.2416	858.9	2	1073.7
15	16	0.0010	0.0101	0.0411	858.9	1	120.8
15	16	0.0019	0.0138	0.0304	429.4	2	151.2
15	16	0.0010	0.0101	0.0411	858.9	2	195.6
15	16	0.0019	0.0138	0.0304	429.4	1	143.5
15	16	0.0010	0.0101	0.0411	858.9	1	174.4
15	16	0.0019	0.0138	0.0304	429.4	2	204.8
15	16	0.0010	0.0101	0.0411	858.9	2	249.2
15	17	0.0050	0.0364	0.0799	429.4	1	312.3
15	17	0.0025	0.0266	0.1082	858.9	1	393.6
15	17	0.0050	0.0364	0.0799	429.4	2	408.3
15	17	0.0025	0.0266	0.1082	858.9	2	525
15	18	0.0044	0.0321	0.0706	429.4	1	280.3
15	18	0.0022	0.0235	0.0955	858.9	1	352.1
15	18	0.0044	0.0321	0.0706	429.4	2	369.8
15	18	0.0022	0.0235	0.0955	858.9	2	472.8
15	19	0.0048	0.0351	0.0770	429.4	1	302.6
15	19	0.0024	0.0256	0.1043	858.9	1	381
15	19	0.0048	0.0351	0.0770	429.4	2	396.6
15	19	0.0024	0.0256	0.1043	858.9	2	509.2
15	20	0.0096	0.0696	0.1530	429.4	1	561.3
15	20	0.0048	0.0509	0.2072	858.9	1	717
15	20	0.0096	0.0696	0.1530	429.4	2	708.6
15	20	0.0048	0.0509	0.2072	858.9	2	932
15	21	0.0027	0.0286	0.1165	858.9	2	407.5

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
15	21	0.0054	0.0392	0.0861	429.4	1	333.2
15	21	0.0027	0.0286	0.1165	858.9	1	420.8
15	21	0.0054	0.0392	0.0861	429.4	2	433.6
15	21	0.0027	0.0286	0.1165	858.9	2	559.3
15	22	0.0110	0.0800	0.1759	429.4	1	639.5
15	22	0.0055	0.0585	0.2382	858.9	1	818.5
15	22	0.0110	0.0800	0.1759	429.4	2	802.9
15	22	0.0055	0.0585	0.2382	858.9	2	1059.8
15	23	0.0122	0.0886	0.1947	429.4	1	703.5
15	23	0.0061	0.0647	0.2637	858.9	1	901.6
15	23	0.0122	0.0886	0.1947	429.4	2	880.1
15	23	0.0061	0.0647	0.2637	858.9	2	1164.4
15	24	0.0029	0.0303	0.1234	858.9	1	282.5
15	24	0.0057	0.0415	0.0911	429.4	2	293.7
15	24	0.0029	0.0303	0.1234	858.9	2	426.8
15	24	0.0057	0.0415	0.0911	429.4	1	350.5
15	24	0.0029	0.0303	0.1234	858.9	1	443.2
15	24	0.0057	0.0415	0.0911	429.4	2	454.4
15	24	0.0029	0.0303	0.1234	858.9	2	587.5
16	17	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	1	161.3
16	17	0.0029	0.0207	0.0456	429.4	2	186.9
16	17	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	2	253.4
16	17	0.0029	0.0207	0.0456	429.4	1	195.2
16	17	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	1	241.6
16	17	0.0029	0.0207	0.0456	429.4	2	267.2
16	17	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	2	333.7
16	18	0.0023	0.0169	0.0372	429.4	1	166.5

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
16	18	0.0012	0.0124	0.0503	858.9	1	204.3
16	18	0.0023	0.0169	0.0372	429.4	2	232.5
16	18	0.0012	0.0124	0.0503	858.9	2	286.7
16	19	0.0013	0.0135	0.0548	858.9	1	147.8
16	19	0.0025	0.0184	0.0405	429.4	2	175
16	19	0.0013	0.0135	0.0548	858.9	2	234.1
16	19	0.0025	0.0184	0.0405	429.4	1	178
16	19	0.0013	0.0135	0.0548	858.9	1	219.2
16	19	0.0025	0.0184	0.0405	429.4	2	246.4
16	19	0.0013	0.0135	0.0548	858.9	2	305.5
16	20	0.0076	0.0551	0.1210	429.4	1	452.5
16	20	0.0038	0.0402	0.1639	858.9	1	575.8
16	20	0.0076	0.0551	0.1210	429.4	2	577.5
16	20	0.0038	0.0402	0.1639	858.9	2	754.3
16	21	0.0043	0.0310	0.0680	429.4	1	271.7
16	21	0.0021	0.0226	0.0921	858.9	1	340.9
16	21	0.0043	0.0310	0.0680	429.4	2	359.4
16	21	0.0021	0.0226	0.0921	858.9	2	458.7
16	22	0.0108	0.0781	0.1716	429.4	1	625
16	22	0.0054	0.0571	0.2324	858.9	1	799.7
16	22	0.0108	0.0781	0.1716	429.4	2	785.5
16	22	0.0054	0.0571	0.2324	858.9	2	1036.2
16	23	0.0102	0.0741	0.1628	429.4	1	594.8
16	23	0.0051	0.0541	0.2204	858.9	1	760.5
16	23	0.0102	0.0741	0.1628	429.4	2	749
16	23	0.0051	0.0541	0.2204	858.9	2	986.8
17	18	0.0008	0.0084	0.0343	858.9	1	107.4

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
17	18	0.0016	0.0115	0.0253	429.4	2	139.4
17	18	0.0008	0.0084	0.0343	858.9	2	176.3
17	18	0.0016	0.0115	0.0253	429.4	1	126.2
17	18	0.0008	0.0084	0.0343	858.9	1	152
17	18	0.0016	0.0115	0.0253	429.4	2	184
17	18	0.0008	0.0084	0.0343	858.9	2	221
17	19	0.0009	0.0068	0.0150	429.4	1	91.3
17	19	0.0005	0.0050	0.0204	858.9	1	106.6
17	19	0.0009	0.0068	0.0150	429.4	2	141.9
17	19	0.0005	0.0050	0.0204	858.9	2	163.8
17	20	0.0046	0.0336	0.0739	429.4	1	291.7
17	20	0.0023	0.0246	0.1000	858.9	1	366.9
17	20	0.0046	0.0336	0.0739	429.4	2	383.6
17	20	0.0023	0.0246	0.1000	858.9	2	491.5
17	21	0.0048	0.0349	0.0767	429.4	1	301.4
17	21	0.0024	0.0255	0.1039	858.9	1	379.5
17	21	0.0048	0.0349	0.0767	429.4	2	395.2
17	21	0.0024	0.0255	0.1039	858.9	2	507.3
17	22	0.0058	0.0614	0.2502	858.9	1	531.7
17	22	0.0116	0.0841	0.1848	429.4	2	513.3
17	22	0.0058	0.0614	0.2502	858.9	2	783.1
17	22	0.0116	0.0841	0.1848	429.4	1	669.6
17	22	0.0058	0.0614	0.2502	858.9	1	857.6
17	22	0.0116	0.0841	0.1848	429.4	2	839.2
17	22	0.0058	0.0614	0.2502	858.9	2	1109
17	23	0.0072	0.0525	0.1153	429.4	1	433
17	23	0.0036	0.0383	0.1562	858.9	1	550.4

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
17	23	0.0072	0.0525	0.1153	429.4	2	553.9
17	23	0.0036	0.0383	0.1562	858.9	2	722.3
18	19	0.0009	0.0062	0.0136	429.4	1	86.4
18	19	0.0004	0.0045	0.0184	858.9	1	100.3
18	19	0.0009	0.0062	0.0136	429.4	2	136
18	19	0.0004	0.0045	0.0184	858.9	2	155.9
18	20	0.0054	0.0394	0.0865	429.4	1	334.9
18	20	0.0027	0.0288	0.1172	858.9	1	422.9
18	20	0.0054	0.0394	0.0865	429.4	2	435.6
18	20	0.0027	0.0288	0.1172	858.9	2	561.9
18	21	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	2	253.4
18	21	0.0029	0.0207	0.0456	429.4	1	195.2
18	21	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	1	241.6
18	21	0.0029	0.0207	0.0456	429.4	2	267.2
18	21	0.0014	0.0151	0.0617	858.9	2	333.7
18	22	0.0110	0.0798	0.1754	429.4	1	637.7
18	22	0.0055	0.0583	0.2376	858.9	1	816.2
18	22	0.0110	0.0798	0.1754	429.4	2	800.8
18	22	0.0055	0.0583	0.2376	858.9	2	1056.9
18	23	0.0080	0.0582	0.1280	429.4	1	475.9
18	23	0.0040	0.0425	0.1733	858.9	1	606.1
18	23	0.0080	0.0582	0.1280	429.4	2	605.7
18	23	0.0040	0.0425	0.1733	858.9	2	792.5
19	20	0.0022	0.0231	0.0943	858.9	2	344.9
19	20	0.0044	0.0317	0.0696	429.4	1	277.2
19	20	0.0022	0.0231	0.0943	858.9	1	348
19	20	0.0044	0.0317	0.0696	429.4	2	366

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
19	20	0.0022	0.0231	0.0943	858.9	2	467.6
19	21	0.0039	0.0281	0.0617	429.4	1	250.1
19	21	0.0019	0.0205	0.0835	858.9	1	312.9
19	21	0.0039	0.0281	0.0617	429.4	2	333.4
19	21	0.0019	0.0205	0.0835	858.9	2	423.4
19	22	0.0118	0.0859	0.1887	429.4	1	683.1
19	22	0.0059	0.0627	0.2556	858.9	1	875.1
19	22	0.0118	0.0859	0.1887	429.4	2	855.5
19	22	0.0059	0.0627	0.2556	858.9	2	1131.1
19	23	0.0074	0.0538	0.1183	429.4	1	443.1
19	23	0.0037	0.0393	0.1602	858.9	1	563.5
19	23	0.0074	0.0538	0.1183	429.4	2	566.1
19	23	0.0037	0.0393	0.1602	858.9	2	738.8
20	21	0.0069	0.0501	0.1101	429.4	1	415.3
20	21	0.0035	0.0366	0.1491	858.9	1	527.4
20	21	0.0069	0.0501	0.1101	429.4	2	532.6
20	21	0.0035	0.0366	0.1491	858.9	2	693.4
20	22	0.0149	0.1084	0.2382	429.4	1	851.5
20	22	0.0075	0.0792	0.3226	858.9	1	1093.8
20	22	0.0149	0.1084	0.2382	429.4	2	1058.6
20	22	0.0075	0.0792	0.3226	858.9	2	1406.3
20	23	0.0012	0.0126	0.0514	858.9	2	224.5
20	23	0.0024	0.0173	0.0380	429.4	1	169.4
20	23	0.0012	0.0126	0.0514	858.9	1	208
20	23	0.0024	0.0173	0.0380	429.4	2	236
20	23	0.0012	0.0126	0.0514	858.9	2	291.4
21	22	0.0037	0.0395	0.1611	858.9	1	356.6

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
21	22	0.0075	0.0541	0.1190	429.4	2	359
21	22	0.0037	0.0395	0.1611	858.9	2	532.7
21	22	0.0075	0.0541	0.1190	429.4	1	445.3
21	22	0.0037	0.0395	0.1611	858.9	1	566.4
21	22	0.0075	0.0541	0.1190	429.4	2	568.8
21	22	0.0037	0.0395	0.1611	858.9	2	742.5
21	23	0.0092	0.0665	0.1462	429.4	1	538.2
21	23	0.0046	0.0486	0.1979	858.9	1	687.1
21	23	0.0092	0.0665	0.1462	429.4	2	680.8
21	23	0.0046	0.0486	0.1979	858.9	2	894.4
22	23	0.0169	0.1226	0.2694	429.4	1	957.7
22	23	0.0084	0.0896	0.3648	858.9	1	1231.8
22	23	0.0169	0.1226	0.2694	429.4	2	1186.7
22	23	0.0084	0.0896	0.3648	858.9	2	1580
24	12	0.0049	0.0357	0.0785	429.4	1	169
24	12	0.0025	0.0261	0.1063	858.9	1	248.8
24	12	0.0049	0.0357	0.0785	429.4	2	264
24	12	0.0025	0.0261	0.1063	858.9	2	378.6
24	12	0.0054	0.0393	0.0864	429.4	1	334.1
24	12	0.0027	0.0287	0.1170	858.9	1	421.9
24	12	0.0054	0.0393	0.0864	429.4	2	434.6
24	12	0.0027	0.0287	0.1170	858.9	2	560.7
24	13	0.0026	0.0191	0.0419	429.4	1	182.9
24	13	0.0013	0.0139	0.0568	858.9	1	225.6
24	13	0.0026	0.0191	0.0419	429.4	2	252.4
24	13	0.0013	0.0139	0.0568	858.9	2	313.6
24	14	0.0085	0.0615	0.1353	429.4	1	500.9

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
24	14	0.0042	0.0450	0.1832	858.9	1	638.5
24	14	0.0085	0.0615	0.1353	429.4	2	635.8
24	14	0.0042	0.0450	0.1832	858.9	2	833.3
24	16	0.0044	0.0317	0.0698	429.4	1	277.8
24	16	0.0022	0.0232	0.0945	858.9	1	348.9
24	16	0.0044	0.0317	0.0698	429.4	2	366.8
24	16	0.0022	0.0232	0.0945	858.9	2	468.7
24	17	0.0041	0.0299	0.0658	429.4	1	264.2
24	17	0.0021	0.0219	0.0891	858.9	1	331.2
24	17	0.0041	0.0299	0.0658	429.4	2	350.4
24	17	0.0021	0.0219	0.0891	858.9	2	446.5
24	18	0.0027	0.0194	0.0426	429.4	1	184.8
24	18	0.0013	0.0141	0.0576	858.9	1	228
24	18	0.0027	0.0194	0.0426	429.4	2	254.6
24	18	0.0013	0.0141	0.0576	858.9	2	316.7
24	19	0.0032	0.0233	0.0513	429.4	1	214.5
24	19	0.0016	0.0170	0.0694	858.9	1	266.6
24	19	0.0032	0.0233	0.0513	429.4	2	290.4
24	19	0.0016	0.0170	0.0694	858.9	2	365.2
24	20	0.0058	0.0418	0.0918	429.4	1	352.9
24	20	0.0029	0.0305	0.1243	858.9	1	446.3
24	20	0.0058	0.0418	0.0918	429.4	2	457.3
24	20	0.0029	0.0305	0.1243	858.9	2	591.4
24	21	0.0012	0.0084	0.0185	429.4	1	102.9
24	21	0.0006	0.0062	0.0251	858.9	1	121.6
24	21	0.0012	0.0084	0.0185	429.4	2	155.8
24	21	0.0006	0.0062	0.0251	858.9	2	182.7

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าทางเลือก (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	จ.น.วงจร สายส่ง	ราคา (ล้านบาท)
		R	X	B			
24	22	0.0093	0.0673	0.1479	429.4	1	544.1
24	22	0.0046	0.0492	0.2003	858.9	1	694.6
24	22	0.0093	0.0673	0.1479	429.4	2	687.9
24	22	0.0046	0.0492	0.2003	858.9	2	903.9
24	23	0.0080	0.0582	0.1278	429.4	1	475.5
24	23	0.0040	0.0425	0.1731	858.9	1	605.6
24	23	0.0080	0.0582	0.1278	429.4	2	605.2
24	23	0.0040	0.0425	0.1731	858.9	2	791.9



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ข้อมูลบัสและการไหลของกำลังไฟฟ้า
จากการทดสอบในระบบทดสอบ IEEE RTS-79

ในภาคผนวก ค ประกอบด้วยข้อมูลบัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE RTS-79 จากเงื่อนไขการก่อสร้างต่างๆ ของการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวและการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้นในบทที่ 5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		ความต้องการไฟฟ้า	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)
1	1.024	-29.926	163.20	74.65	194.40	39.60
2	1.025	-30.089	163.20	80.00	174.60	36.00
3	1.003	-17.262	-	-	324.00	66.60
4	0.961	-31.825	-	-	133.20	27.00
5	0.989	-31.674	-	-	127.80	25.20
6	1.012	-26.772	-	-	244.80	50.40
7	1.037	-41.591	255.00	180.00	225.00	45.00
8	0.952	-41.406	-	-	307.80	63.00
9	0.978	-25.271	-	-	315.00	64.80
10	1.006	-27.333	-	-	351.00	72.00
11	1.004	-17.738	-	-	-	-
12	1.012	-9.491	-	-	-	-
13	1.041	-10.910	502.35	240.00	477.00	97.20
14	1.034	-15.967	0.00	200.00	349.20	70.20
15	1.020	-7.944	182.75	110.00	570.60	115.20
16	1.041	-6.741	429.25	230.00	180.00	36.00
17	1.046	-1.267	-	-	-	-
18	1.050	0.902	1020.00	97.75	599.40	122.40
19	1.028	-7.373	-	-	325.80	66.60
20	1.037	-4.523	-	-	230.40	46.80
21	1.050	0.000	1412.94	385.14	-	-
22	1.050	5.032	255.00	-36.17	-	-
23	1.050	-1.716	858.50	92.17	-	-
24	1.039	-1.695	-	-	-	-

ตาราง ค.2 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว

สายส่ง		กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	ขีดจำกัดของสายส่ง (MVA)	รับภาระ (%)
ถึงบัส	จากบัส				
1	2	18.85	-38.28	175	24.38
1	3	-94.68	43.32	175	59.50
1	5	44.62	30.01	175	30.73
2	4	34.86	41.87	175	31.13
2	6	-27.42	12.19	175	17.15
3	9	114.84	-1.75	175	65.63
3	24	-328.71	-5.64	400	82.19
4	9	-99.31	14.5	175	57.35
5	10	-83.79	4.75	175	47.96
6	10	18	-119.44	175	69.02
7	8	30	135	175	79.02
8	9	-145.09	43.1	175	86.49
8	10	-135.57	19.5	175	78.27
9	11	-150.33	-48.34	400	39.48
9	12	-312.07	-19.62	400	78.17
10	11	-197.62	6.53	400	49.43
10	12	-365.31	42.57	400	91.95
11	13	-264.9	-33.68	500	53.41
11	14	-84.59	-64.72	500	21.30
12	13	46.27	-72.09	500	17.13
12	23	-150.15	-11.07	500	30.11
13	23	-197.96	21.44	500	39.82
14	16	-434.37	69.74	500	87.99
15	16	-141.99	-104.33	500	35.24
15	21	-302.43	-7.07	500	60.50

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว (ต่อ)

สายส่ง		กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	ขีดจำกัดของสายส่ง (MVA)	รับภาระ (%)
ถึงบัส	จากบัส				
15	21	-302.43	-7.07	500	60.50
15	24	-221.85	-1.58	500	44.37
16	17	-394.69	46.9	500	79.49
16	19	57.86	49.52	500	15.23
17	18	-287.21	10.42	500	57.48
17	22	-112.3	4.59	500	22.48
18	21	66.02	-10.89	500	13.38
18	21	66.02	-10.89	500	13.38
19	20	-134.05	-6.59	500	26.84
19	20	-134.05	-6.59	500	26.84
20	23	-250.12	-27.85	500	50.33
20	23	-250.12	-27.85	500	50.33
21	22	-139.53	16.32	500	28.10
3	6	298.11	-36.76	325.9	92.17
3	24	-508.71	4.37	600	84.79
12	15	-579.17	-100.42	858.9	68.44
24	21	-532.49	-125	858.9	63.68
24	21	-532.49	-125	858.9	63.68

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลบัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		ความต้องการไฟฟ้า	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)
1	0.994	-32.587	163.20	80.00	194.40	39.60
2	0.998	-32.260	163.20	80.00	174.60	36.00
3	1.004	-17.773	-	-	324.00	66.60
4	0.951	-32.030	-	-	133.20	27.00
5	0.973	-32.262	-	-	127.80	25.20
6	1.004	-24.982	-	-	244.80	50.40
7	1.050	-32.504	255.00	132.87	225.00	45.00
8	0.994	-32.741	-	-	307.80	63.00
9	0.987	-23.781	-	-	315.00	64.80
10	1.009	-25.631	-	-	351.00	72.00
11	1.008	-16.670	-	-	-	-
12	1.018	-8.488	-	-	-	-
13	1.042	-9.933	502.35	221.91	477.00	97.20
14	1.037	-15.258	0.00	196.65	349.20	70.20
15	1.022	-7.732	182.75	110.00	570.60	115.20
16	1.042	-6.392	429.25	230.00	180.00	36.00
17	1.047	-1.104	-	-	-	-
18	1.050	0.981	1020.00	93.17	599.40	122.40
19	1.029	-6.872	-	-	325.80	66.60
20	1.037	-3.895	-	-	230.40	46.80
21	1.050	0.000	1400.94	384.69	-	-
22	1.050	5.096	255.00	-36.79	-	-
23	1.050	-1.019	858.50	83.12	-	-
24	1.039	-1.723	-	-	-	-

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

สายส่ง		กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	ขีดจำกัดของสายส่ง (MVA)	รับภาระ (%)
ถึงบัส	จากบัส				
1	2	-44.18	-41.51	175.00	34.64
1	3	-110.58	36.96	175.00	66.62
1	5	-0.04	23.87	175.00	13.64
2	4	6.12	33.56	175.00	19.49
2	6	-61.76	14.37	175.00	36.23
3	9	86.25	-5.23	175.00	49.38
3	24	-338.69	-1.71	400.00	84.67
4	9	-127.50	8.19	175.00	73.01
5	10	-127.98	0.35	175.00	73.13
6	10	16.50	-134.65	175.00	77.52
7	8	30.00	87.87	175.00	53.06
8	9	-84.04	30.59	175.00	51.11
8	10	-71.47	11.91	175.00	41.40
9	11	-143.81	-44.10	400.00	37.60
9	12	-307.13	-18.07	400.00	76.92
10	11	-185.94	2.36	400.00	46.49
10	12	-354.30	34.79	400.00	89.00
11	13	-261.80	-27.73	500.00	52.65
11	14	-69.32	-64.05	500.00	18.88
12	13	48.81	-62.70	500.00	15.89
12	23	-144.58	-7.15	500.00	28.95
13	23	-192.12	20.43	500.00	38.64
14	16	-418.96	68.16	500.00	84.89
15	16	-156.75	-102.64	500.00	37.47
15	21	-294.71	-6.55	500.00	58.96

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลสายหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว (ต่อ)

สายส่ง		กำลัง	กำลังไฟฟ้า	ขีดจำกัดของสายส่ง	รับภาระ
ถึงบัส	จากบัส	ไฟฟ้าจริง(MW)	รีแอกทีฟ(MVAr)	(MVA)	(%)
15	21	-294.71	-6.55	500.00	58.96
15	24	-213.49	-0.84	500.00	42.70
16	17	-381.85	47.02	500.00	76.95
16	19	46.25	54.07	500.00	14.23
17	18	-275.80	12.87	500.00	55.22
17	22	-110.55	4.75	500.00	22.13
18	21	71.77	-11.53	500.00	14.54
18	21	71.77	-11.53	500.00	14.54
19	20	-139.85	-4.23	500.00	27.98
19	20	-139.85	-4.23	500.00	27.98
20	23	-255.99	-26.07	500.00	51.46
20	23	-255.99	-26.07	500.00	51.46
21	22	-141.29	16.71	500.00	28.45
1	8	123.60	21.09	325.90	38.47
3	6	167.29	-28.27	182.90	92.76
3	6	167.29	-28.27	182.90	92.76
3	24	-524.34	10.05	600.00	87.41
12	15	-285.49	-53.79	858.90	33.82
12	15	-285.49	-53.79	858.90	33.82
24	21	-541.07	-126.01	858.90	64.68
24	21	-541.07	-126.01	858.90	64.68

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลบัลหลังการก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชุดเซยกกำลังรีแอกทีฟ

พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

บัล	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		ความต้องการไฟฟ้า	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)
1	1.024	-29.115	163.20	68.91	194.40	39.60
2	1.025	-29.229	163.20	80.00	174.60	36.00
3	1.009	-17.623	-	-	324.00	66.60
4	0.965	-31.220	-	-	133.20	27.00
5	0.989	-30.806	-	-	127.80	25.20
6	1.010	-24.823	-	-	244.80	50.40
7	1.041	-40.845	255.00	180.00	225.00	45.00
8	0.957	-40.661	-	-	307.80	63.00
9	0.984	-24.960	-	-	315.00	64.80
10	1.007	-26.409	-	-	351.00	72.00
11	1.007	-17.361	-	-	-	-
12	1.014	-9.295	-	-	-	-
13	1.042	-10.641	502.35	233.43	477.00	97.20
14	1.036	-15.697	0.00	200.00	349.20	70.20
15	1.022	-7.796	182.75	110.00	570.60	115.20
16	1.042	-6.589	429.25	230.00	180.00	36.00
17	1.046	-1.197	-	-	-	-
18	1.050	0.936	1020.00	94.46	599.40	122.40
19	1.029	-7.199	-	-	325.80	66.60
20	1.037	-4.334	-	-	230.40	46.80
21	1.050	0.000	1412.02	368.97	-	-
22	1.050	5.059	255.00	-36.62	-	-
23	1.050	-1.517	858.50	87.36	-	-
24	1.039	-1.722	-	-	-	-

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลสายหลังการก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ
พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว

สายส่ง		กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	ขีดจำกัดของสายส่ง (MVA)	รับภาระ (%)
ถึงบัส	จากบัส				
1	2	12.50	-37.45	175.00	22.56
1	3	-87.12	36.83	175.00	54.05
1	5	43.42	29.93	175.00	30.13
2	4	37.49	38.22	175.00	30.59
2	6	-36.40	16.71	175.00	22.89
3	9	106.50	-1.70	175.00	60.86
3	24	-337.18	2.14	400.00	84.30
4	9	-96.65	10.99	175.00	55.58
5	10	-84.97	4.75	175.00	48.63
6	10	45.39	-130.20	175.00	78.79
7	8	30.00	135.00	175.00	79.02
8	9	-143.34	40.34	175.00	85.09
8	10	-137.30	22.35	175.00	79.49
9	11	-152.84	-44.25	400.00	39.78
9	12	-312.24	-15.32	400.00	78.15
10	11	-187.13	2.24	400.00	46.79
10	12	-351.79	36.46	400.00	88.42
11	13	-261.22	-30.80	500.00	52.61
11	14	-80.21	-64.34	500.00	20.57
12	13	43.87	-69.60	500.00	16.45
12	23	-150.24	-9.31	500.00	30.11
13	23	-196.51	21.71	500.00	39.54
14	16	-429.94	70.50	500.00	87.14
15	16	-142.47	-102.84	500.00	35.14
15	21	-297.06	-5.69	500.00	59.42

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลสายหลังการก่อสร้างสายส่งและอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบขั้นเดียว (ต่อ)

สายส่ง		กำลัง ไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ(MVAr)	ขีดจำกัดของสายส่ง (MVA)	รับภาระ (%)
ถึงบัส	จากบัส				
15	21	-297.06	-5.69	500.00	59.42
15	24	-215.90	-0.89	500.00	43.18
16	17	-389.13	48.41	500.00	78.43
16	19	56.46	51.95	500.00	15.34
17	18	-282.26	12.79	500.00	56.51
17	22	-111.55	4.83	500.00	22.33
18	21	68.51	-11.17	500.00	13.88
18	21	68.51	-11.17	500.00	13.88
19	20	-134.75	-5.38	500.00	26.97
19	20	-134.75	-5.38	500.00	26.97
20	23	-250.83	-26.69	500.00	50.45
20	23	-250.83	-26.69	500.00	50.45
21	22	-140.28	16.49	500.00	28.25
3	6	168.47	-29.55	182.90	93.52
3	6	168.47	-29.55	182.90	93.52
3	24	-522.16	16.33	600.00	87.07
12	15	-563.05	-96.45	858.90	66.51
24	21	-540.44	-119.11	858.90	64.43
24	21	-540.44	-119.11	858.90	64.43

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลแรงดันที่บัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

บัส	แรงดันไฟฟ้า					
	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)
1	1.050	-39.940	0.993	-28.829	0.997	-31.635
2	1.050	-39.952	0.994	-28.619	1.002	-31.386
3	0.998	-37.290	1.012	-16.098	1.001	-17.113
4	1.004	-41.041	0.963	-30.177	0.953	-31.735
5	1.028	-41.015	0.985	-30.303	0.976	-32.091
6	1.038	-40.530	1.024	-25.190	1.010	-26.455
7	1.050	-39.663	1.010	-25.185	1.050	-29.865
8	1.003	-42.714	0.991	-28.931	0.996	-31.764
9	1.011	-36.716	0.995	-24.730	0.985	-23.966
10	1.041	-38.080	1.023	-26.579	1.010	-26.296
11	1.015	-28.053	1.018	-18.435	1.006	-17.623
12	1.009	-27.633	1.008	-17.287	1.012	-9.316
13	1.047	-23.758	1.050	-13.734	1.036	-11.892
14	1.031	-22.921	1.041	-15.939	1.033	-15.771
15	1.013	-10.443	1.037	-5.606	1.019	-7.827
16	1.019	-12.462	1.037	-7.101	1.038	-6.443
17	1.026	-5.789	1.043	-0.966	1.044	-0.446
18	1.034	-3.522	1.050	1.448	1.050	1.939
19	1.020	-15.164	1.029	-9.292	1.025	-6.388
20	1.035	-15.029	1.038	-8.281	1.035	-2.931
21	1.050	0.000	1.050	0.000	1.050	0.000
22	1.031	4.514	1.050	6.136	1.050	6.339
23	1.048	-14.047	1.050	-6.644	1.050	0.202
24	0.967	-20.427	1.040	-1.506	1.038	-1.676

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
1	2	175	25.73	14.70	61.53	35.16	61.53	35.16
1	3	175	34.31	19.61	116.24	66.42	116.24	66.42
1	5	175	34.33	19.62	26.08	14.90	26.08	14.90
2	4	175	39.12	22.35	37.52	21.44	37.52	21.44
2	6	175	9.80	5.60	44.63	25.50	44.63	25.50
3	9	175	14.53	8.30	97.62	55.78	97.62	55.78
3	24	400	335.55	83.89	342.19	85.55	342.19	85.55
4	9	175	72.32	41.33	124.34	71.05	124.34	71.05
5	10	175	62.20	35.55	117.12	66.93	117.12	66.93
6	10	175	161.35	92.20	126.26	72.15	126.26	72.15
7	8	175	117.58	67.19	103.27	59.01	103.27	59.01
8	9	175	63.01	36.00	78.69	44.96	78.69	44.96
8	10	175	54.98	31.42	57.41	32.81	57.41	32.81
9	11	400	186.73	46.68	143.26	35.81	143.26	35.81
9	12	400	192.38	48.10	309.50	77.37	309.50	77.37
10	11	400	218.23	54.56	181.98	45.49	181.98	45.49
10	12	400	227.18	56.80	357.58	89.40	357.58	89.40
11	13	500	180.51	36.10	228.72	45.74	228.72	45.74
11	14	500	227.29	45.46	104.19	20.84	104.19	20.84
12	13	500	170.11	34.02	113.08	22.62	113.08	22.62
12	23	500	264.84	52.97	188.29	37.66	188.29	37.66
13	23	500	213.61	42.72	264.51	52.90	264.51	52.90
14	16	500	491.21	98.24	446.35	89.27	446.35	89.27

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างเฉพาะสายส่ง
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น (ต่อ)

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง ปี	จาก ปี		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
15	16	500	210.97	42.19	186.91	37.38	186.91	37.38
15	21	500	404.78	80.96	305.59	61.12	305.59	61.12
15	21	500	404.78	80.96	305.59	61.12	305.59	61.12
15	24	500	344.31	68.86	221.68	44.34	221.68	44.34
16	17	500	468.46	93.69	436.17	87.23	436.17	87.23
16	19	500	210.75	42.15	60.52	12.10	60.52	12.10
17	18	500	295.58	59.12	317.02	63.40	317.02	63.40
17	22	500	179.90	35.98	123.42	24.68	123.42	24.68
18	21	500	263.87	52.77	143.01	28.60	143.01	28.60
18	21	500	263.87	52.77	143.01	28.60	143.01	28.60
19	20	500	42.98	8.60	162.69	32.54	162.69	32.54
19	20	500	42.98	8.60	162.69	32.54	162.69	32.54
20	23	500	104.78	20.96	282.47	56.49	282.47	56.49
20	23	500	104.78	20.96	282.47	56.49	282.47	56.49
21	22	500	129.01	25.80	178.76	35.75	178.76	35.75
1	8	325.9	-	-	98.605	30.26	110.67	33.96
3	6	325.9	129.31	39.68	295.90	90.80	295.85	90.78
3	24	600	-	-	495.89	82.65	521.49	86.92
12	15	858.9	-	-	-	-	566.56	65.96
24	21	858.9	-	-	484.43	56.40	545.77	63.54
24	21	858.9	-	-	484.43	56.40	545.77	63.54

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลแรงดันที่บัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และอุปกรณ์ชุดเซย์กำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

บัส	แรงดันไฟฟ้า					
	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)
1	1.050	-39.940	1.001	-26.389	1.001	-26.389
2	1.050	-39.952	0.994	-26.420	0.994	-26.420
3	0.998	-37.290	1.011	-15.970	1.011	-15.970
4	1.004	-41.041	0.959	-29.622	0.959	-29.622
5	1.028	-41.015	0.987	-29.302	0.987	-29.302
6	1.038	-40.530	1.021	-25.062	1.021	-25.062
7	1.050	-39.663	1.010	-30.614	1.010	-30.614
8	1.003	-42.714	0.959	-33.995	0.959	-33.995
9	1.011	-36.716	0.988	-25.464	0.988	-25.464
10	1.041	-38.080	1.017	-27.057	1.017	-27.057
11	1.015	-28.053	1.015	-18.823	1.015	-18.823
12	1.009	-27.633	1.005	-17.708	1.005	-17.708
13	1.047	-23.758	1.050	-14.116	1.050	-14.116
14	1.031	-22.921	1.041	-16.196	1.041	-16.196
15	1.013	-10.443	1.037	-5.666	1.037	-5.666
16	1.019	-12.462	1.037	-7.225	1.037	-7.225
17	1.026	-5.789	1.043	-1.024	1.043	-1.024
18	1.034	-3.522	1.050	1.420	1.050	1.420
19	1.020	-15.164	1.029	-9.480	1.029	-9.480
20	1.035	-15.029	1.038	-8.523	1.038	-8.523
21	1.050	0.000	1.050	0.000	1.050	0.000
22	1.031	4.514	1.050	6.113	1.050	6.113
23	1.048	-14.047	1.050	-6.915	1.050	-6.915
24	0.967	-20.427	1.040	-1.498	1.040	-1.498

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และอุปกรณ์ชุดเซยกำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
1	2	175	25.73	14.70	70.56	40.32	71.14	40.65
1	3	175	34.31	19.61	85.09	48.62	65.60	37.48
1	5	175	34.33	19.62	60.03	34.30	47.82	27.32
2	4	175	39.12	22.35	48.60	27.77	38.42	21.95
2	6	175	9.80	5.60	19.49	11.14	23.03	13.16
3	9	175	14.53	8.30	137.31	78.46	86.78	49.59
3	24	400	335.55	83.89	322.59	80.65	267.76	66.94
4	9	175	72.32	41.33	70.15	40.08	80.17	45.81
5	10	175	62.20	35.55	54.57	31.18	67.74	38.71
6	10	175	161.35	92.20	146.19	83.54	136.89	78.22
7	8	175	117.58	67.19	122.92	70.24	112.89	64.51
8	9	175	63.01	36.00	85.49	48.85	85.82	49.04
8	10	175	54.98	31.42	78.55	44.88	77.25	44.15
9	11	400	186.73	46.68	153.79	38.45	131.14	32.79
9	12	400	192.38	48.10	168.29	42.07	245.63	61.41
10	11	400	218.23	54.56	175.78	43.94	155.48	38.87
10	12	400	227.18	56.80	195.88	48.97	278.04	69.51
11	13	500	180.51	36.10	198.16	39.63	259.89	51.98
11	14	500	227.29	45.46	131.01	26.20	56.00	11.20
12	13	500	170.11	34.02	167.79	33.56	67.10	13.42
12	23	500	264.84	52.97	213.13	42.63	116.23	23.25
13	23	500	213.61	42.72	159.43	31.89	112.18	22.44
14	16	500	491.21	98.24	430.23	86.05	324.78	64.96
15	16	500	210.97	42.19	168.13	33.63	63.50	12.70
15	21	500	404.78	80.96	220.21	44.04	268.26	53.65

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และอุปกรณ์ชุดเซย์กำลังรีแอกทีฟของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น (ต่อ)

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
15	21	500	404.78	80.96	220.21	44.04	268.26	53.65
15	24	500	344.31	68.86	150.71	30.14	199.86	39.97
16	17	500	468.46	93.69	450.28	90.06	420.33	84.07
16	19	500	210.75	42.15	184.35	36.87	52.60	10.52
17	18	500	295.58	59.12	325.21	65.04	299.37	59.87
17	22	500	179.90	35.98	129.64	25.93	125.45	25.09
18	21	500	263.87	52.77	104.82	20.96	117.91	23.58
18	21	500	263.87	52.77	104.82	20.96	117.91	23.58
19	20	500	42.98	8.60	52.38	10.48	118.34	23.67
19	20	500	42.98	8.60	52.38	10.48	118.34	23.67
20	23	500	104.78	20.96	150.05	30.01	219.98	44.00
20	23	500	104.78	20.96	150.05	30.01	219.98	44.00
21	22	500	129.01	25.80	172.44	34.49	176.58	35.32
3	6	325.9	129.31	39.68	294.15	90.26	237.42	72.85
3	24	600	-	-	491.82	81.97	408.27	68.05
12	15	858.9	-	-	-	-	363.34	42.30
24	21	858.9	-	-	482.20	56.14	439.30	51.15
24	21	858.9	-	-	482.20	56.14	439.30	51.15

ตารางที่ ค.11 ข้อมูลแรงดันที่บัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

บัส	แรงดันไฟฟ้า					
	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)	ขนาด(p.u.)	มุมเฟส(องศา)
1	1.050	-39.940	1.001	-21.232	1.019	-26.004
2	1.050	-39.952	0.994	-21.218	1.018	-25.969
3	0.998	-37.290	1.020	-13.347	1.011	-15.445
4	1.004	-41.041	0.965	-23.750	0.968	-26.582
5	1.028	-41.015	0.992	-23.559	0.991	-28.637
6	1.038	-40.530	1.030	-20.535	1.019	-24.506
7	1.050	-39.663	1.010	-24.032	1.050	-32.819
8	1.003	-42.714	0.964	-27.469	0.971	-34.381
9	1.011	-36.716	0.999	-19.135	0.999	-19.278
10	1.041	-38.080	1.026	-20.762	1.014	-25.262
11	1.015	-28.053	1.019	-13.514	1.012	-16.552
12	1.009	-27.633	1.022	-7.847	1.010	-10.177
13	1.047	-23.758	1.050	-7.090	1.036	-11.873
14	1.031	-22.921	1.041	-13.235	1.033	-15.360
15	1.013	-10.443	1.027	-6.897	1.018	-8.407
16	1.019	-12.462	1.034	-6.450	1.038	-6.678
17	1.026	-5.789	1.043	-0.651	1.044	-0.557
18	1.034	-3.522	1.050	1.595	1.050	1.887
19	1.020	-15.164	1.026	-6.942	1.025	-6.659
20	1.035	-15.029	1.037	-4.465	1.035	-3.233
21	1.050	0.000	1.050	0.000	1.050	0.000
22	1.031	4.514	1.050	6.259	1.050	6.296
23	1.048	-14.047	1.050	-2.046	1.050	-0.117
24	0.967	-20.427	1.042	-1.376	1.039	-1.596

ตารางที่ ค.12 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
1	2	175	25.73	14.70	74.16	42.38	34.33	19.62
1	3	175	34.31	19.61	65.75	37.57	87.24	49.85
1	5	175	34.33	19.62	47.67	27.24	62.77	35.87
2	4	175	39.12	22.35	38.78	22.16	38.65	22.09
2	6	175	9.80	5.60	21.50	12.29	14.14	8.08
3	9	175	14.53	8.30	86.30	49.32	56.16	32.09
3	24	400	335.55	83.89	268.71	67.18	308.61	77.15
4	9	175	72.32	41.33	79.98	45.70	120.26	68.72
5	10	175	62.20	35.55	67.07	38.32	70.40	40.23
6	10	175	161.35	92.20	135.10	77.20	130.82	74.76
7	8	175	117.58	67.19	119.46	68.26	136.53	78.02
8	9	175	63.01	36.00	85.95	49.12	152.59	87.19
8	10	175	54.98	31.42	78.69	44.97	97.13	55.50
9	11	400	186.73	46.68	132.62	33.16	76.10	19.03
9	12	400	192.38	48.10	246.91	61.73	195.25	48.81
10	11	400	218.23	54.56	156.16	39.04	184.77	46.19
10	12	400	227.18	56.80	278.86	69.72	317.82	79.46
11	13	500	180.51	36.10	260.61	52.12	187.07	37.41
11	14	500	227.29	45.46	58.66	11.73	75.46	15.09
12	13	500	170.11	34.02	68.30	13.66	87.74	17.55
12	23	500	264.84	52.97	116.31	23.26	198.66	39.73
13	23	500	213.61	42.72	112.32	22.46	257.18	51.44
14	16	500	491.21	98.24	325.46	65.09	415.45	83.09

ตารางที่ ค.12 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง

และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น (ต่อ)

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง ปี	จาก ปี		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
15	16	500	210.97	42.19	64.37	12.87	219.68	43.94
15	21	500	404.78	80.96	268.77	53.75	327.53	65.51
15	21	500	404.78	80.96	268.77	53.75	327.53	65.51
15	24	500	344.31	68.86	200.20	40.04	245.91	49.18
16	17	500	468.46	93.69	420.83	84.17	445.01	89.00
16	19	500	210.75	42.15	52.37	10.47	59.94	11.99
17	18	500	295.58	59.12	299.82	59.96	324.75	64.95
17	22	500	179.90	35.98	125.49	25.10	124.62	24.92
18	21	500	263.87	52.77	117.69	23.54	139.13	27.83
18	21	500	263.87	52.77	117.69	23.54	139.13	27.83
19	20	500	42.98	8.60	118.32	23.66	161.27	32.25
19	20	500	42.98	8.60	118.32	23.66	161.27	32.25
20	23	500	104.78	20.96	219.98	44.00	281.04	56.21
20	23	500	104.78	20.96	219.98	44.00	281.04	56.21
21	22	500	129.01	25.80	176.52	35.30	177.55	35.51
3	6	325.9	129.31	39.68	237.38	72.84	292.20	89.66
3	24	600	-	-	409.17	68.19	470.26	78.38
9	12	600	-	-	-	-	293.60	48.93
12	15	858.9	-	-	364.90	42.48	666.62	77.61
24	21	858.9	-	-	440.28	51.26	515.10	59.97
24	21	858.9	-	-	440.28	51.26	515.10	59.97

ตารางที่ ค.13 ข้อมูลแรงดันที่บัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียว
ในทุกๆชั้นของการวางแผน

บัส	แรงดันไฟฟ้า					
	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)
1	1.050	-39.940	1.027	-26.435	1.019	-24.953
2	1.050	-39.952	1.023	-26.449	1.018	-25.030
3	0.998	-37.290	1.018	-15.904	1.012	-15.290
4	1.004	-41.041	0.977	-29.400	0.963	-28.335
5	1.028	-41.015	1.005	-29.124	0.993	-25.982
6	1.038	-40.530	1.032	-24.890	1.022	-22.510
7	1.050	-39.663	1.010	-30.181	1.050	-32.665
8	1.003	-42.714	0.963	-33.607	0.969	-34.211
9	1.011	-36.716	0.995	-25.261	0.987	-23.181
10	1.041	-38.080	1.026	-26.835	1.019	-20.952
11	1.015	-28.053	1.019	-18.727	1.011	-16.425
12	1.009	-27.633	1.009	-17.610	1.012	-10.243
13	1.047	-23.758	1.050	-14.017	1.036	-11.847
14	1.031	-22.921	1.043	-16.132	1.033	-15.304
15	1.013	-10.443	1.037	-5.651	1.019	-8.450
16	1.019	-12.462	1.037	-7.199	1.038	-6.687
17	1.026	-5.789	1.043	-1.013	1.044	-0.562
18	1.034	-3.522	1.050	1.426	1.050	1.885
19	1.020	-15.164	1.029	-9.436	1.025	-6.670
20	1.035	-15.029	1.038	-8.466	1.035	-3.246
21	1.050	0.000	1.050	0.000	1.050	0.000
22	1.031	4.514	1.050	6.118	1.050	6.294
23	1.048	-14.047	1.050	-6.851	1.050	-0.131
24	0.967	-20.427	1.041	-1.503	1.040	-1.588

ตารางที่ ค.14 ข้อมูลสายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับชั้นเสถียรภาพ
แรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในทุกๆชั้นของการวางแผน

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
1	2	175	25.73	14.70	51.11	29.21	33.61	19.20
1	3	175	34.31	19.61	88.27	50.44	80.05	45.74
1	5	175	34.33	19.62	61.32	35.04	37.15	21.23
2	4	175	39.12	22.35	53.10	30.35	60.48	34.56
2	6	175	9.80	5.60	15.54	8.88	23.75	13.57
3	9	175	14.53	8.30	137.19	78.40	115.00	65.71
3	24	400	335.55	83.89	321.17	80.29	305.51	76.38
4	9	175	72.32	41.33	68.35	39.06	83.66	47.81
5	10	175	62.20	35.55	51.08	29.19	102.74	58.71
6	10	175	161.35	92.20	145.75	83.28	149.22	85.27
7	8	175	117.58	67.19	120.05	68.60	138.30	79.03
8	9	175	63.01	36.00	85.22	48.70	109.46	62.55
8	10	175	54.98	31.42	79.51	45.44	140.07	80.04
9	11	400	186.73	46.68	151.11	37.78	153.74	38.43
9	12	400	192.38	48.10	166.32	41.58	275.21	68.80
10	11	400	218.23	54.56	174.37	43.59	96.35	24.09
10	12	400	227.18	56.80	195.64	48.91	226.98	56.75
11	13	500	180.51	36.10	195.93	39.19	183.59	36.72
11	14	500	227.29	45.46	128.57	25.71	74.51	14.90
12	13	500	170.11	34.02	163.81	32.76	83.17	16.63
12	23	500	264.84	52.97	212.04	42.41	199.46	39.89
13	23	500	213.61	42.72	158.68	31.74	256.30	51.26
14	16	500	491.21	98.24	429.87	85.97	412.41	82.48

ตารางที่ ค.14 ข้อมูลสายส่งตามแผนงานก่อสร้างสายส่งและพิจารณาระดับชั้นเสถียรภาพ
แรงดันของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบชั้นเดียวในทุกๆชั้นของการวางแผน (ต่อ)

สายส่ง		ขีดจำกัด ของสายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
15	16	500	210.97	42.19	166.88	33.38	220.40	44.08
15	21	500	404.78	80.96	219.65	43.93	328.96	65.79
15	21	500	404.78	80.96	219.65	43.93	328.96	65.79
15	24	500	344.31	68.86	150.16	30.03	247.69	49.54
16	17	500	468.46	93.69	449.34	89.87	445.38	89.08
16	19	500	210.75	42.15	183.28	36.66	60.17	12.03
17	18	500	295.58	59.12	324.34	64.87	325.07	65.01
17	22	500	179.90	35.98	129.53	25.91	124.67	24.93
18	21	500	263.87	52.77	105.25	21.05	138.97	27.79
18	21	500	263.87	52.77	105.25	21.05	138.97	27.79
19	20	500	42.98	8.60	52.67	10.53	161.17	32.23
19	20	500	42.98	8.60	52.67	10.53	161.17	32.23
20	23	500	104.78	20.96	150.51	30.10	280.93	56.19
20	23	500	104.78	20.96	150.51	30.10	280.93	56.19
21	22	500	129.01	25.80	172.57	34.51	177.50	35.50
1	2	175	-	-	51.11	29.21	33.61	19.20
3	6	325.9	129.31	39.68	297.26	91.21	234.68	72.01
3	24	600	-	-	490.30	81.72	465.54	77.59
10	12	400	-	-	-	-	319.31	79.83
12	15	858.9	-	-	-	-	673.04	78.36
24	21	858.9	-	-	480.90	55.99	511.91	59.60
24	21	858.9	-	-	480.90	55.99	511.91	59.60

ตารางที่ ค.15 ข้อมูลแรงดันที่บัสหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และอุปกรณ์ชุดเซย์กำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

บัส	แรงดันไฟฟ้า					
	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)
1	1.050	-39.940	1.001	-26.317	1.019	-24.863
2	1.050	-39.952	0.994	-26.347	1.018	-25.026
3	0.998	-37.290	1.013	-15.949	1.014	-15.277
4	1.004	-41.041	0.959	-29.557	0.964	-28.316
5	1.028	-41.015	0.987	-29.237	0.993	-25.921
6	1.038	-40.530	1.022	-25.010	1.024	-22.483
7	1.050	-39.663	1.010	-30.541	1.050	-32.621
8	1.003	-42.714	0.960	-33.926	0.970	-34.170
9	1.011	-36.716	0.989	-25.412	0.988	-23.155
10	1.041	-38.080	1.018	-27.003	1.019	-20.925
11	1.015	-28.053	1.015	-18.790	1.012	-16.409
12	1.009	-27.633	1.005	-17.673	1.012	-10.233
13	1.047	-23.758	1.050	-14.083	1.036	-11.834
14	1.031	-22.921	1.041	-16.174	1.033	-15.292
15	1.013	-10.443	1.037	-5.660	1.019	-8.443
16	1.019	-12.462	1.037	-7.215	1.038	-6.680
17	1.026	-5.789	1.043	-1.020	1.044	-0.558
18	1.034	-3.522	1.050	1.422	1.050	1.886
19	1.020	-15.164	1.029	-9.464	1.025	-6.661
20	1.035	-15.029	1.038	-8.503	1.035	-3.237
21	1.050	0.000	1.050	0.000	1.050	0.000
22	1.031	4.514	1.050	6.115	1.050	6.296
23	1.048	-14.047	1.050	-6.892	1.050	-0.122
24	0.967	-20.427	1.041	-1.500	1.040	-1.590

ตารางที่ ค.16 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และอุปกรณ์ชุดเซย์กำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น

สายส่ง		ชนิดจำกัดของ สายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
1	2	175	60.11	34.35	71.97	41.13	37.01	21.15
1	3	175	48.53	27.73	85.02	48.58	79.63	45.50
1	5	175	20.01	11.44	60.11	34.35	37.26	21.29
2	4	175	137.59	78.62	48.53	27.73	60.15	34.37
2	6	175	308.95	176.55	20.01	11.44	24.00	13.71
3	9	175	68.45	39.12	137.59	78.62	115.49	65.99
3	24	400	53.95	13.49	322.11	80.53	305.17	76.29
4	9	175	145.56	83.18	70.16	40.09	83.92	47.95
5	10	175	122.64	70.08	54.64	31.22	102.24	58.42
6	10	175	82.74	47.28	145.56	83.18	150.63	86.08
7	8	175	74.96	42.83	122.64	70.08	137.94	78.82
8	9	175	144.98	82.84	85.48	48.85	109.44	62.54
8	10	175	160.34	91.62	78.60	44.91	140.05	80.03
9	11	400	173.25	43.31	153.35	38.34	153.42	38.36
9	12	400	195.09	48.77	167.96	41.99	274.87	68.72
10	11	400	194.14	48.54	175.44	43.86	96.12	24.03
10	12	400	130.48	32.62	195.65	48.91	226.68	56.67
11	13	500	165.00	33.00	197.90	39.58	183.38	36.68
11	14	500	204.19	40.84	130.48	26.10	74.09	14.82
12	13	500	156.67	31.33	167.30	33.46	82.99	16.60
12	23	500	429.84	85.97	212.85	42.57	199.44	39.89
13	23	500	167.61	33.52	159.22	31.84	256.24	51.25

ตารางที่ ค.16 ข้อมูลสายส่งหลังการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างสายส่ง
และอุปกรณ์ชุดเซกกำลังรีแอกทีฟ พร้อมทั้งพิจารณาระดับดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
ของปัญหาการวางแผนขยายสายส่งแบบหลายชั้น (ต่อ)

สายส่ง		ชนิดจำกัดของ สายส่ง (MVA)	แผนชั้นที่ 1		แผนชั้นที่ 2		แผนชั้นที่ 3	
ถึง บัส	จาก บัส		ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)	ขนาดกำลัง ปรากฏ (MVA)	รับภาระ (%)
14	16	500	217.40	43.48	429.84	85.97	412.21	82.44
15	16	500	217.40	43.48	167.61	33.52	220.39	44.08
15	21	500	149.04	29.81	220.01	44.00	328.68	65.74
15	21	500	446.76	89.35	220.01	44.00	328.68	65.74
15	24	500	183.94	36.79	150.52	30.10	247.47	49.49
16	17	500	323.10	64.62	449.91	89.98	445.09	89.02
16	19	500	126.87	25.37	183.94	36.79	60.18	12.04
17	18	500	104.99	21.00	324.88	64.98	324.81	64.96
17	22	500	104.99	21.00	129.60	25.92	124.63	24.93
18	21	500	52.53	10.51	104.99	21.00	139.11	27.82
18	21	500	52.53	10.51	104.99	21.00	139.11	27.82
19	20	500	149.78	29.96	52.53	10.51	161.20	32.24
19	20	500	149.78	29.96	52.53	10.51	161.20	32.24
20	23	500	170.50	34.10	150.24	30.05	280.96	56.19
20	23	500	291.76	58.35	150.24	30.05	280.96	56.19
21	22	500	478.32	95.66	172.49	34.50	177.54	35.51
3	6	325.9	478.45	146.81	294.07	90.23	234.83	72.05
3	24	600	-	-	491.33	81.89	465.24	77.54
10	12	400	-	-	-	-	319.04	79.76
12	15	858.9	-	-	-	-	672.01	78.24
24	21	858.9	-	-	481.78	56.09	511.56	59.56
24	21	858.9	-	-	481.78	56.09	511.56	59.56

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกริช ยิ้มชื่น เกิดวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย