

การปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ  
สำหรับรถไฟความเร็วสูงโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นด้วย  
เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาค

**IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM STABILITY OF AC  
ELECTRIFIED RAILWAY SYSTEMS USING FACTS BASED ON  
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION TECHNIQUE**

ทศพร เจริญจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ  
สำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูงโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหย่น  
ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาค

ทศพร เจริญจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ  
สำหรับรถไฟความเร็วสูงโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุนด้วย  
เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาค

Improvement of Power System Stability of AC Electrified Railway Systems  
using FACTS based on Particle Swarm Optimization Technique


ชื่อ - นามสกุล นายทศพร เจริญจันทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.

ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

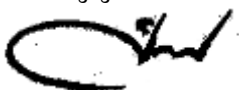
  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนตรี นาวงษ์, วศ.ค.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 9 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาค
ชื่อ-นามสกุล	นายทศพร เจริญจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV 50 Hz สำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาคในหาตำแหน่ง การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าให้กับ โหลดที่เป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูงในเขตพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกมีระยะทาง 155 กิโลเมตร ระยะทางห่างสถานีชุมทางจะเชิงเทรา ถึงปลายทางสถานีมาบตาพุด จังหวัดระยอง อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ SVC และ STATCOM เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองระบบจำหน่าย 43 บัส ในพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟรวมของโหลดเท่ากับ 1860.725 MW และ 612.151 MVar การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้การคำนวณแบบนิวตันราฟสันและการหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สถานะโหลดคงที่

ผลการจำลองพบว่า การติดตั้ง อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังต้องใช้ การติดตั้ง SVC ขนาด 27.3 MVar และ STATCOM ขนาด 31.234 MVar ที่บัส 11 จะทำให้เสถียรภาพแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้าดีขึ้น ส่วนบัสอื่นที่อยู่ระยะไกลจะติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบอยู่แล้ว จึงสามารถคงค่ามีเสถียรภาพแรงดันแต่ละบัสของส่วนที่เหลือของระบบไฟฟ้าได้

**คำสำคัญ :** เสถียรภาพระบบไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง รถไฟฟ้าความเร็วสูง ความเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

<b>Thesis Title</b>	Improvement of Power System Stability of AC Electrified Railway Systems by using FACTS based on Particle Swarm Optimization Technique
<b>Name – Surname</b>	Mr. Tossaporn Charoenchan
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2018

## ABSTRACT

This thesis presented improvement of power system stability of 25 kV AC electrified railway systems at 50 Hz by using FACTS based on the Particle Swarm Optimization technique. The power resource was supplied from the power station to a high-speed electric train in the Eastern Economic Corridor. The distance between Chachoengsao junction station to Map Ta Phut station was about 155 km. The technology of the flexible AC transmission system (FACTS) used in this thesis was the SVC and STATCOM power compensation devices to improve the voltage stability and reliability of the power system.

The model of the 43-bus distribution system in the Thailand Eastern Economic Corridor was used in the thesis. Therefore, the real power and reactive power of the load were included as 1860.725 MW and 612.151 MVar. The power flow analysis was using Newton Raphson technique to calculate the voltage and angle profiles each bus of the proposed power system. The particle swarm optimization techniques were also carried out under voltage stability conditions at constant load.

The simulation results show that the two FACTS devices that were installed in the proposed power system with 27.3 MVar SVC and 31.234 MVar STATCOM at bus no.11 could improve the voltage stability. Another electric bus, at the long-distance line that the power generator installed, still maintained the voltage stability index in the whole power system.

**Keywords:** power system quality, power distribution system, electrified railway, particle swarm optimization

## กิตติกรรมประกาศ

ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ จากรองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างสูงในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี นาวงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านจากชั้นอนุบาลถึงระดับปริญญาโทที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาและผู้เผยแพร่บทความวิชาการ ผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ทศพร เจริญจันทร์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 ข้อมูลเบื้องต้นเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก.....	22
2.3 การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	26
2.4 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Systems).....	27
2.5 การแก้ไขปัญหาโหลดโพลว์.....	29
2.6 ข้อมูลในการศึกษาโหลดโพลว์.....	30
2.7 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Calculation of Power Flow).....	31
2.8 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีการวนรอบของนิวตันราฟสัน.....	32
2.9 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าความเร็วสูง.....	35
2.10 เสถียรภาพระบบไฟฟ้า (Power System Stability).....	38
2.11 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด (Problem of Optimal Power Flow).....	40
2.12 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Method).....	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTS Device).....	49
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	58
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิทยานิพนธ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB M-File.....	58
3.2 กรณีศึกษา.....	60
3.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย.....	65
3.4 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาใช้.....	67
3.5 สรุป.....	68
บทที่ 4 ผลการทดลองผลการวิเคราะห์.....	69
4.1 ผลการดำเนินงาน.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	86
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	129

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
ตารางที่ 2.2 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูง .....	35
ตารางที่ 2.3 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีรถไฟฟ้ความเร็วสูง .....	36
ตารางที่ 2.4 ขนาดแรงดันต่างๆ ในระบบที่สถานะต่างๆ .....	80
ตารางที่ 3.1 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เชื่อมต่อกับรถไฟฟ้ความเร็วสูง. ....	81
ตารางที่ 3.2 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เชื่อมต่อกับสถานีรถไฟฟ้ความเร็วสูง.....	88
ตารางที่ 3.3 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 07.00น. ....	92
ตารางที่ 3.4 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 07.30น. ....	92
ตารางที่ 3.5 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 08.00น. ....	92
ตารางที่ 3.6 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 08.30น. ....	92
ตารางที่ 3.7 ผลการจำลอง IEEE 6 bus.....	92



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	ต้นแบบขบวนการไฟฟ้าความเร็วสูง..... 24
รูปที่ 1.2	การจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูง ..... 31
รูปที่ 2.1	เส้นทางที่เหมาะสมที่ของตำแหน่งสถานีรถไฟความเร็วสูง ..... 32
รูปที่ 2.2	พื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย..... 33
รูปที่ 2.3	การส่งผ่านพลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า..... 34
รูปที่ 2.4	ไดอะแกรมระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก..... 37
รูปที่ 2.5	ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าบริเวณเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ..... 41
รูปที่ 2.6	โครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ..... 42
รูปที่ 2.7	โครงข่ายไฟฟ้าแบบรูป..... 42
รูปที่ 2.8	ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีบัส 3 ประเภทต่ออยู่..... 43
รูปที่ 2.9	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับ 2x25kV 50 Hz..... 46
รูปที่ 2.10	วิวัฒนาการของปัญหาประคิษฐ์..... 50
รูปที่ 2.11	การอยู่ร่วมกันเป็นฝูงของนกและปลา ..... 55
รูปที่ 2.12	การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ..... 56
รูปที่ 2.13	ขั้นตอนการคำนวณหาค่าตอบที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีของกลุ่มอนุภาค ..... 56
รูปที่ 2.14	อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหยุน ..... 57
รูปที่ 2.15	ลักษณะการติดตั้งของ SVC..... 58
รูปที่ 2.16	Thyristor Controlled Reactor, TCR ..... 59
รูปที่ 2.17	Thyristor Switched Capacitor, TSC ..... 60
รูปที่ 2.18	ลักษณะโครงสร้างของ SVC ..... 60
รูปที่ 2.19	แบบจำลองของ SVC ..... 61
รูปที่ 2.20	คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC ..... 61
รูปที่ 2.21	การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสถานะคงตัวของ SVC ..... 61
รูปที่ 2.22	ลักษณะการติดตั้งของ STATCOM ..... 62
รูปที่ 2.23	ลักษณะโครงสร้างของ STATCOM..... 62



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.24 แบบจำลองของ STATCOM .....	63
รูปที่ 2.25 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ STATCOM.....	64
รูปที่ 2.26 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของ SVC .....	64
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB M-File .....	65
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับ 2x25 kV 50 Hz .....	65
รูปที่ 3.3 สถานีรถไฟฟ้ความเร็วสูงสำหรับ 2x2 5kV 50Hz เมื่อเชื่อมกับอโต้ทรานส์ฟอเมอร์65	
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมส่งจ่ายไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพิ่มรถไฟฟ้ความเร็วสูง .....	66
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างไดอะแกรมเบื้องต้นที่ใช้จำลองในระบบ .....	68
รูปที่ 3.6 ระบบทดสอบ 6 บัส .....	69
รูปที่ 4.1 ค่าประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงที่ต้องการของระบบในเขตภาคตะวันออกเฉียง .....	70
รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเฉียงเหนือไม่มีรถไฟฟ้ความเร็วสูง .....	72
รูปที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าขณะทีรถไฟฟ้เคลื่อนที่และกรณีติดตั้ง SVC .....	73
รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าขณะทีรถไฟฟ้เคลื่อนที่และกรณีติดตั้ง SVC .....	73

## สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
$B_e$	ชัตเซียบเตนซ์ของอุปกรณ์ FACTS
$B_{\min}$	ชัตเซียบเตนซ์ต่ำสุด
$B_{\max}$	ชัตเซียบเตนซ์สูงสุด
C	คาปาซิเตอร์
$C_1, C_2$	ค่าคงที่ความเร่ง
$G_{best_d}$	ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุกๆอนภาคของตัวแปร
CPF	Continuation Power Flow
E	แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิด
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
$G_c$	คอนดักเตนซ์ของอุปกรณ์ FACTS
$g_{i,j}$	ความนำไฟฟ้าจากบัส $i$ ไปยังบัส $j$
$I$	กระแสไฟฟ้า
$I_c$	กระแสที่ไหลของคาปาซิเตอร์
$I_L$	กระแสที่ไหลของอินดักเตอร์
$I_{\min}$	กระแสต่ำสุด
$I_{\max}$	กระแสสูงสุด
J	กระแสในสาย
k	รอบการคำนวณทั้งหมด
L	อินดักเตอร์
$N_B$	จำนวนบัส
$N_C$	จำนวนอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ
$N_G$	จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด
$N_L$	จำนวนสายส่งทั้งหมด

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก[1] ในอุตสาหกรรมที่เติบโตซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกหรืออีสเทิร์นซีบอร์ดถือเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์การลงทุนและเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมชั้นนำของประเทศ เช่น ปิโตรเคมี อุตสาหกรรมยานยนต์และพลังงาน เป็นต้น ก่อให้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากปัญหาของการจราจรติดขัดอีกทั้งจำนวนรถยนต์ก็มีเพิ่มขึ้นทุกๆปี ระบบขนส่งมวลชนนั้นจึงเป็นการแก้ปัญหาที่ได้เป็นอย่างดีทำให้มีการที่จะก่อสร้างเพิ่มเติมระบบเดิมที่มีอยู่ให้เพิ่มมากขึ้นเพื่อดึงดูดให้มีผู้คนหันมาใช้ระบบขนส่งมวลชนให้มากขึ้นในอนาคต

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงในการขนส่งทางรถไฟไฟฟ้าในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ซึ่งมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับขนส่งทางบกทางน้ำและทางอากาศ คือสามารถที่จะคาดการณ์หรือกำหนดระยะเวลาของการเดินทางหรือขนส่งอื่นๆได้เป็นอย่างดีมีส่วนช่วยในการรักษาสีสิ่งแวดล้อม ประหยัดและการใช้พลังงานที่รถไฟไฟฟ้าต้องการนั้นเรียกว่าจะถูกนำไปใช้อย่างคุ้มค่าเนื่องจากการดูแลบำรุงรักษาและมีการวางแผนในการเดินรถไฟไฟฟ้าอย่างเป็นขั้นเป็นตอน

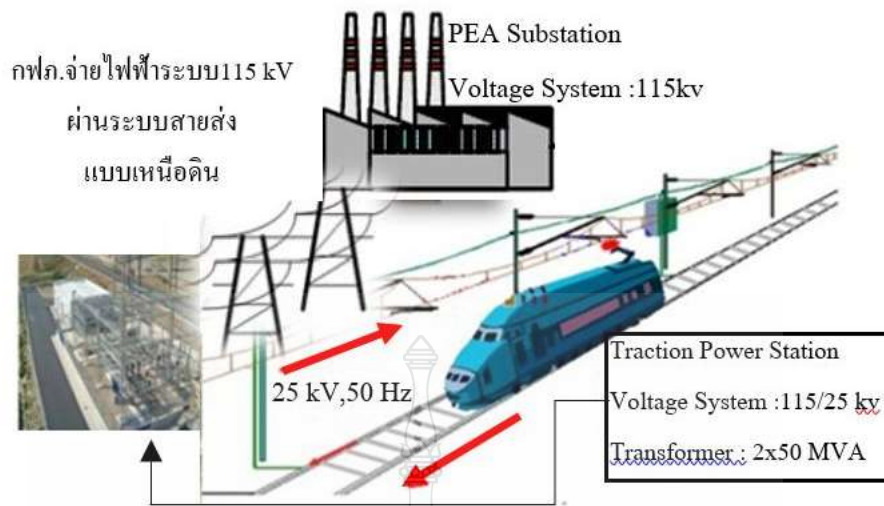


รูปที่ 1.1 ต้นแบบขบวนรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง [2]

ด้วยการพัฒนาเขตพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการจัดสรรพลังงานต้องคำนึงถึงความสอดคล้องกับความต้องการที่เพิ่ม

สูงขึ้น การจัดสรรพลังงานต้องพิจารณาทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งพลังงานที่ให้ความสะดวกในการใช้และมีความสำคัญมากที่สุดคือ พลังงานไฟฟ้า เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องคำนึง เพราะมีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาถึงหลักการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังควรจะต้องวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติที่สำคัญซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย คุณภาพของไฟฟ้ากำลัง (Power Quality, PQ) เสถียรภาพของกำลังไฟฟ้า (Power Stability, PS) ความน่าเชื่อถือได้ของกำลังไฟฟ้า (Power Reliability, PR) และความยืดหยุ่นของกำลังไฟฟ้า (Power Flexibility, PF) [3] ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังมี 3 ส่วนคือ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไประบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเริ่มจากระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้า 13.8 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีระดับสูง 69 kV-500 kV จ่ายผ่านระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจากนั้นจะถูกแปลงให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 11 kV-33 kV ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย โดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีย่อยจ่ายผ่านสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเดินสายแรงดันต่ำไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งระบบรถไฟฟ้าประเภทนี้ใช้ 25 kV เพื่อนำไปใช้งาน

อีกทั้งในปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเป็นส่วนใหญ่โดยจะใช้ระบบอ้างอิงของ Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) เช่น IEEE 33-Bus เป็นต้น สำหรับวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรจะใช้ สำหรับการเชื่อมต่อสายส่งที่มีลักษณะเป็นเครื่องข่ายเน็ตเวิร์คจะใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน โดยการหาค่าผลเฉลยของตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่างๆจะใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปช่วยในการหาผลเฉลยซึ่งจากที่กล่าวไปข้างต้น จะทำให้สามารถหาข้อมูลหรือศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับระบบส่งจ่ายเมื่อโหลดเป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูง



รูปที่ 1.2 การจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟความเร็วสูง [2]

วิทยานิพนธ์นี้เน้นการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกอุปกรณ์ FACTS คือ แบบต่อขนาน (Static VAR Compensator, SVC) เพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ในส่วนของการหาค่าความเหมาะสมใช้วิธี กลุ่มอนุภาค ขณะที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบและแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหลดคำนวณได้จากการไหล ของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงการทำงานของบัสที่ถูกติดตั้งเข้าไปแล้ว ระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอหรือไม่ ถ้าติดตั้งเข้าไปแล้วการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่บัสนั้นไม่เพียงพอ ก็จะต้องทำการชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ เพื่อเพิ่มคุณภาพและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนการวิเคราะห์แบบจำลอง จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ช่วยในการหาผลเฉลยของตัวแปรพารามิเตอร์และจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาขั้นตอนการไหลของกำลังไฟฟ้าในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

1.2.2 เพื่อศึกษาส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากรณีศึกษาโหลดเป็นรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงในเขตพื้นที่เศรษฐกิจภาคตะวันออก

1.2.3 เพื่อศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น SVC และ STATCOM นำมาปรับปรุงคุณภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นรถไฟไฟฟ้าในเขตพื้นที่เศรษฐกิจภาคตะวันออก โดยใช้วิธีของกลุ่มอนุภาค

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 จำลองวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูง
- 1.3.2 สามารถแก้ปัญหาในการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค
- 1.3.3 สามารถใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาคเพื่อหาคำแนะนำตำแหน่งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายรถไฟฟ้าความเร็วสูง

### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

ทำการศึกษาข้อมูลในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทยเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ เพื่อหาคำแนะนำการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมโดยใช้วิธี กลุ่มอนุภาคและหลังจากที่ทำการติดตั้ง FACTS และ เข้าไปในระบบจำหน่ายแล้วโดยจะมี ขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎี และค้นคว้าหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังและการส่งจ่ายการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเพิ่มโหลดเป็นรถไฟฟ้าในเขตพื้นที่เศรษฐกิจภาคตะวันออก
- 1.4.3 ศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น (FACTS) ที่สามารถนำมาใช้ในระบบได้
- 1.4.4 ศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Technique)
- 1.4.5 รวบรวมข้อมูลนำมาวิเคราะห์ ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.6 ตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไขของการจำลองต้นแบบ
- 1.4.7 วิเคราะห์ผล เก็บข้อมูล และสรุปผล

### 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ : องค์กรประกอบในงานวิจัย

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับของรถไฟฟ้าความเร็วสูง
- 1.5.2 เพื่อให้เข้าถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- 1.5.3 เข้าถึงหลักการนำอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น (FACTS) มาใช้กับระบบส่งจ่ายรถไฟฟ้าในเขตพื้นที่เศรษฐกิจภาคตะวันออกด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมกลุ่มอนุภาค
- 1.5.4 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ในระดับชาติ และระดับนานาชาติ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่โหลดโดยใช้ข้อมูลการคำนวณ โหลดโพลาร์ และผลที่ได้จากการคำนวณในทางปฏิบัตินั้นในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ช่วยการประมวลผลเพื่อหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมทั้งหลักการทางงานเบื้องต้นของรถไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลชี้ให้เห็นถึงที่มาของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นก่อนและหลังจากการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อโหลดเป็นรถไฟฟ้า จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลาง เป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่าง ระบบส่งจ่ายกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้า จึงเป็นระบบที่มีความสำคัญ เพราะส่งผลกระทบต่อรถไฟฟ้าโดยตรง เมื่อ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูง จะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด ทำให้ต้องเพิ่มการลงทุนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ และเป็นการเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้าที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าในระบบ ซึ่งแก้ไขโดย การติดตั้ง FACTS เข้าไปที่ระบบจำหน่าย จึงนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาาระบบดังกล่าวขึ้น โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ และสาระสำคัญนำมาประยุกต์ใช้กับงาน ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในลำดับต่อไป

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Rolf Grünbaum [4]	ได้นำเสนออุปกรณ์ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบบยืดหยุ่น สำหรับการปรับปรุงคุณภาพในโครงข่ายให้กับระบบรถไฟฟ้า ความเร็วสูงแบบสมัยใหม่ซึ่งใช้งานบรรทุกสินค้าในอุตสาหกรรมหนัก ซึ่งในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยปกติแล้ว กำลังจะถูกนำมาใช้ระหว่างสองเฟสซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างขั้นตอนต่างๆในโครงข่าย แต่เดิมไม่ได้สร้างขึ้นมาทั้งหมดสำหรับการดำเนินการประเภทนี้ เว้นแต่จะได้รับการผลกระทบที่ได้คือการเสื่อมสภาพของคุณภาพไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>รายอื่น ๆ ในเครือข่ายเดียวกันบทความนี้กล่าวว่า SVC และ STATCOM เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในโครงข่ายที่มีอิทธิพลต่อระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงและเน้นการติดตั้งล่าสุดสำหรับจุดประสงค์เดียวของการขนส่งทางรถไฟซึ่งกำลังได้รับแรงผลักดันในหลายส่วนของโลกด้วยการมุ่งเน้นที่การประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นสำหรับการขนส่งมวลชน ซึ่งหมายถึงการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานทางรถไฟเช่นเดียวกับการอัปเดตและสร้างกระแสไฟฟ้าที่มีอยู่การจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดกรณีแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สามารถยอมรับได้และความไม่สมมาตรระหว่างเฟสของระบบ ดังนั้นอุปกรณ์ FACTS เป็นอุปกรณ์แก้ไขพื้นฐานที่สมบูรณ์แบบ โครงข่ายและเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นข้อดีของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและเก็บพลังงานไฟฟ้าโดยการใช้อุปกรณ์ FACTS เช่น SVC และ STATCOM เป็นส่วนหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟด้วย คุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ FACTS</p>
2010	Jaroslaw Guzinski, Haitham Abu-Rub, Marc Diguët, Zbigniew Krzeminski, Arkadiusz Lewicki [5]	<p>บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำและตัววัดแรงบิดของรถไฟความเร็วสูงในการขับเคลื่อนขนาด 1.2 เมกะวัตต์ของโพลที่เป็นมอเตอร์มีคุณสมบัติที่ดีที่จะใช้ในระบบการแก้ปัญหาที่นำเสนอซึ่งได้รับการยอมรับจากโรงงาน ที่ได้มาตรฐานของรถไฟความเร็วสูง สำหรับการใช้งานในอนาคตและสำหรับการทดสอบต่อเนื่อง</p>



ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	Jako Kilter, Tanel Sarnet, Triin Kangro [6]	บทความนี้กล่าวถึงและแสดงผลของรถไฟ กรณีศึกษาเขตเศรษฐกิจพิเศษบอลติก (Baltic) เพื่อวิเคราะห์และประเมินผล การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าความเร็วสูงโดยพิจารณาจากผลกระทบ ต่อภาระในการลากจูงของรถไฟและความสามารถ ความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า สรุปได้ว่าการใช้งานปกติของโหลดโครงข่ายสายส่งแรงต่ำ และมีกำลังการผลิตที่เพียงพอเพื่อจัดหาระบบลากจูงที่กำลัง พิจารณา ส่งผลกระทบต่อระบบการรับส่งข้อมูลในกรณีส่วน ใหญ่ขึ้นอยู่กับการประเมินค่าปัญหาด้านคุณภาพพลังงานเช่น ความไม่สมดุลของแรงดัน, ฮาร์โมนิก, การเปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเนื่องจากที่ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่เป็น เรื่องยากที่จะปรับวิธีการของการคำนวณในระบบส่งจากการ วิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าของบัสสามารถสรุปได้ว่าภาระโหลดมี ผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าบัสสถานี ย่อยในสถานีย่อยที่ วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับการ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าควรใช้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมในการ ควบคุมการเปลี่ยนหม้อแปลง, สายส่งและอื่น ๆ อย่างเหมาะสม เช่นการต่อหม้อแปลง สก๊อต คอนเน็คชั่น จากผลการทดลอง ในบทความนี้
2011	Mohammad Ali Akbari Baseri, Mehdi Niaki Nezhad, Mohammad Ali Sandidzadeh [7]	บทความนี้เป็นการใช้งานประเภทของอุปกรณ์กำลังไฟฟ้า แบบยึดหยุ่น (FACTS) สำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของ ระบบรถไฟไฟฟ้าซึ่งได้รับการประกอบไปด้วยตัวควบคุม ฮีสทรอโรเซออร์เฟสที่ควบคุมด้วยเฟสเพื่อป้อนไครฟ์กระแส ตรงของมอเตอร์ตู้รถไฟ ส่วนของเฟสเดียวแบบทั่วไป 25-kV, 50Hz ของระบบรถไฟไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ac-dc thyristor-

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>based ภายในตู้รถไฟ มีตัวชดเชย VAR แบบคงที่ (SVC) หรือตัวชดเชย ซิงโครนัส แบบสถิต (STATCOM) ความสามารถของระบบนี้เป็นเครื่องปรับอากาศได้รับการยืนยันโดยใช้การจำลองรายละเอียดในซอฟต์แวร์ MATLAB/ Simulink ในตอนแรก, ปัญหาเสถียรภาพที่เกิดขึ้นโดยไม่ใช้สิ่งเหล่านี้ชดเชยได้รับการพิจารณา จากนั้นการตรวจสอบเสถียรภาพเช่นรายละเอียดแรงดันไฟฟ้าของสถานีป้อนและการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสถานะคงที่จะดำเนินการเกี่ยวกับผลกระทบของตัวชดเชยเหล่านี้ในกรณีศึกษา พบว่า SVC และ STATCOM ปรับปรุงพารามิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าของระบบอย่างมากซึ่งแบบจำลองการลากจูงขบวนรถไฟขนาด 2.5 เมกะวัตต์ซึ่งได้รับการพัฒนาในระบบรถไฟแบบเฟสเดียว 25 กิโลวัตต์ในบทความนี้พบว่า SVC และ STATCOM สามารถเพิ่มความเสถียรภาพของระบบได้ด้วยดีของโหลดในระบบรถไฟ STATCOM มีความสามารถในการให้พลังงานปฏิกิริยาได้ดีขึ้น การชดเชยในแง่ของแรงดันไฟฟ้า AC ต่ำกว่า SVC อย่างไรก็ตาม ผลการปฏิบัติงานของ SVC ไม่เป็นที่น่าพอใจ แต่ราคาถูกกว่า การควบคุมจะง่ายกว่า</p>
2012	<p>อนุชาติ ศรีศิริวัฒน์, สุรพันธ์ ดันศรีวงษ์, พูลศักดิ์ โกษียาภรณ์ [8]</p>	<p>บทความนี้มุ่งประเด็นไปที่การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (PSO) สำหรับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมหลายสาขา สำหรับการให้ PSO กับงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าก็คือการประยุกต์ PSO เพื่อช่วยจัดสรรงบประมาณรักษาแบบป้องกันที่เหมาะสมที่สุดระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยพิจารณาปัจจัยที่มีของผู้ใช้ไฟจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้อง สถิติไฟฟ้าขัดข้องย้อนหลัง บำรุงรักษาแบบป้องกันและงบที่ใช้ ข้อเสนอการประยุกต์ PSO สำหรับกำลังไฟฟ้า</p>

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

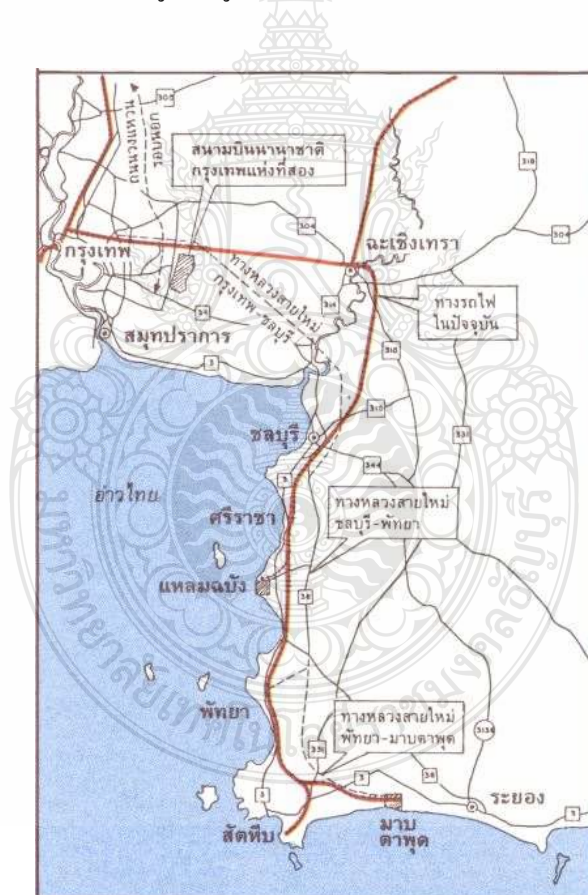
ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Khaled M. Metweely, Gamal. A. Morsy Ragab. A. Amer [9]	<p>พลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเป็นกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หรือเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ในที่นี้ PSO ถูกนำมาใช้เพื่อหายุทธศาสตร์การควบคุมด้วยตัวแปรควบคุมแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลการเรียงข้อมูล Hybrid binary and real-valued version ของอัลกอริทึม และพบว่าการใช้เทคนิค continuation power flow ทำให้เกิดเสถียรภาพของระบบ</p> <p>บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของอุปกรณ์ FACTS ประเภทต่างๆกับปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม (OPF) โดยนำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการจับกลุ่มของอนุภาค (PSO) ใช้ในการแก้ปัญหาของ OPF และเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการตั้งค่าและการจัดการอุปกรณ์ FACTS อุปกรณ์พิจารณาในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอุปกรณ์ FACTS จำนวน 3 ชนิดคือ (SVC, STATCOM หรือ UPFC) จะรวมเข้ากับระบบทดสอบกำลังของ IEEE 30 บัสทีละตัวในจุดเปรียบเทียบคือจุดมุ่งหมายของปัญหา OPF เพื่อทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า พิจารณาผลของการเพิ่มแหล่งพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงไปยังอุปกรณ์ STATCOM ผลการจำลองพบว่าการตรวจสอบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ FACTS ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ</p>
2017	Maulikkumar C. Pandya Dr. Jitendra G. Jamnani [10]	<p>ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ แบบยึดหยุ่น (FACTS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้า คือมีลักษณะการทำงานได้เร็วขึ้นและสามารถแก้ปัญหาได้หลายแบบปัญหาในการศึกษาระบบไฟฟ้า ซึ่งบทความนี้ กล่าวถึง (PSO) ในขั้นตอนวิธีการใช้อนุภาคที่จะออกแบบพารามิเตอร์คงที่ของ VAR ด้วยอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า (SVC) และชุด</p>

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>ควบคุมไทริสเตอร์ Capacitor (TCSC) ซึ่งจะนำเสนอ กับ พฤติกรรม nonlinearities ของระบบไฟฟ้า, ด้วยวิธีการเชิงเส้น ที่ไม่สามารถใช้ในการออกแบบพารามิเตอร์ของ คอนโทรลเลอร์แบบจำลองได้ ภายใต้มาตรฐาน IEEE (WSCC) 9 บัส ระบบใน MATLAB/Simulink และกล่อง เครื่องมือของ MATLAB พบว่าการรวมของอุปกรณ์ FACTS กับแต่ละชนิดยืนยันว่าประสิทธิภาพของการเสนอวิธีการ ปรับปรุงรูปแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำงานของ SVC และ TCSC สามารถจัดหาได้ การสนับสนุนเพิ่มเติมเพื่อยกระดับ ประสิทธิภาพขั้นต้นผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงใน ระบบบัส 9 บัสประกอบด้วย SVC และ TCSC ได้รับพิจารณา ว่าอุปกรณ์ FACTS มีผลต่ออุปกรณ์หลายชนิดการบำรุงรักษา โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้า การปรับแต่งที่เหมาะสมเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ผล ของการจำลองการตรวจสอบอย่างชัดเจนว่าข้อมูล แรงดันไฟฟ้ามีการปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพด้วยการ ควบคุม</p>
2017	<p>วีรภัทร ปัญญาหอม ศิวพล ศรีสนพันธุ์, คมสันต์ หงษ์สมบัติ, และ ตฤณภพ บุญเส็ง [11]</p>	<p>ได้นำเสนอการศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อ แปลงอ้อ ได้ในแบบขนานในแบบจำลองระบบไฟฟ้า เพื่อที่ จะช่วยลดปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในสายส่งอันเนื่องมา จากสถานีจ่ายไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึง ความแตกต่างระหว่างระบบที่มีการเชื่อมต่อและไม่มีการเชื่อม ต่อหม้อแปลงอ้อได้โดยมุ่งเน้นศึกษาปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก และปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล บทความนี้สามารถใช้เป็น แนวทางในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ามาเชื่อมต่อกับระบบ ผลิตไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้า</p>

## 2.2 ข้อมูลเบื้องต้นเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

พื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกหรืออีสเทิร์นซีบอร์ดถือเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์การลงทุนและเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมชั้นนำของประเทศ อาทิปิโตรเคมี อุตสาหกรรมยานยนต์และพลังงาน ซึ่งมีผลิตภัณฑ์มวลรวมคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 5 ของประเทศจากปัจจัยและความสำคัญดังกล่าวนำมาซึ่งโครงการ“พัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก” (Eastern Economic Corridor-EEC) ดังรูปที่ 2.2 ตามนโยบายของภาครัฐเพื่อพัฒนาไปสู่การเป็นเขตเศรษฐกิจชั้นนำของอาเซียน โดยนำร่องในพื้นที่ 3 จังหวัดได้แก่ จังหวัด ระยอง ชลบุรีและฉะเชิงเทราประกอบกับปัจจัยสนับสนุนจากการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานจากภาครัฐรวมทั้งการพัฒนานิคมอุตสาหกรรม จะก่อให้เกิดการเชื่อมโยงทางเศรษฐกิจการลงทุนในธุรกิจและอุตสาหกรรมต่อเนื่องหลากหลายประเภทในการก่อสร้าง เช่น การก่อสร้างระบบรางรถไฟความเร็วสูง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทางที่เหมาะสมที่สุดและตำแหน่งของสถานีรถไฟความเร็วสูง [12]

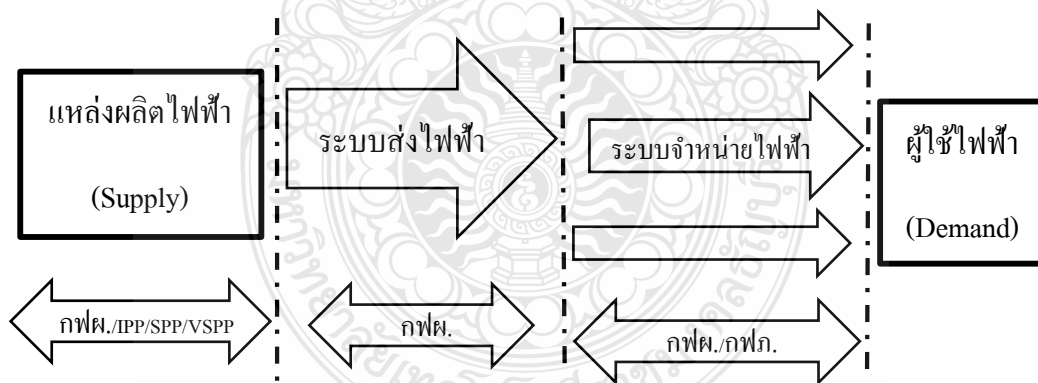




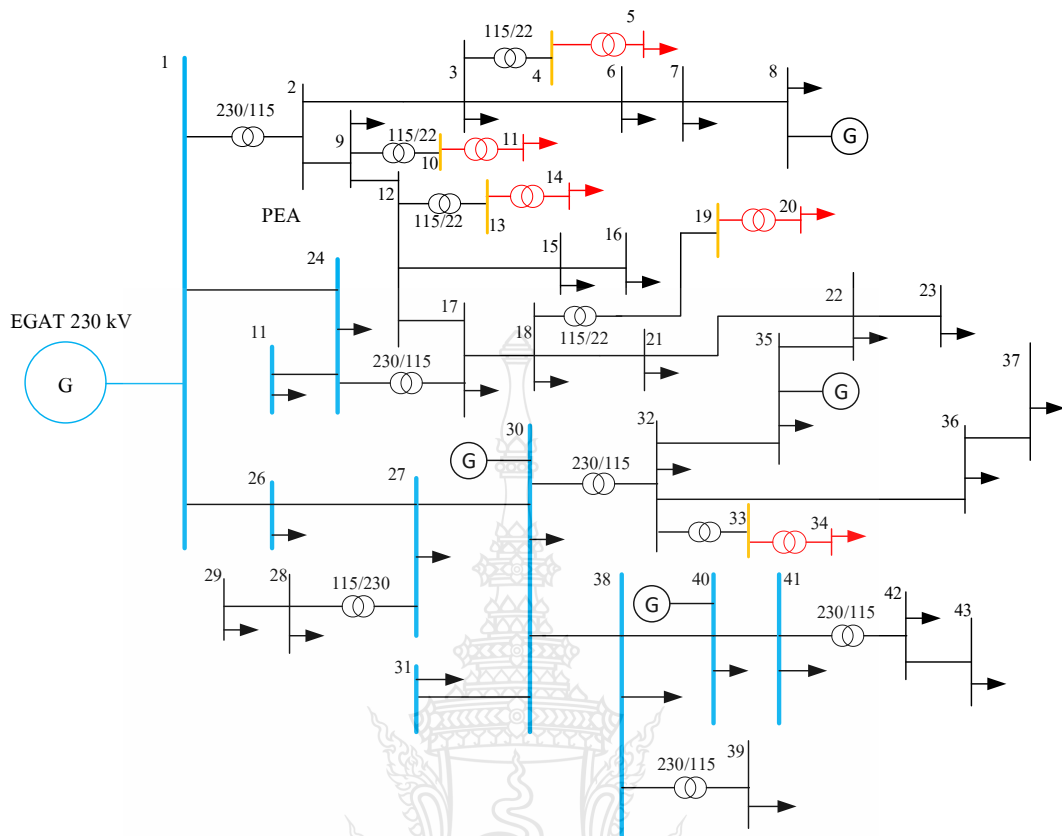
รูปที่ 2.2 พื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย [13]

### 2.2.1 ความมั่นคงของระบบส่งจ่ายระบบไฟฟ้า [14]

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้า (Supply) ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า (Demand) ดังรูปที่ 2.3 ทั่วประเทศ ซึ่ง กฟผ. มีหน้าที่ดูแล ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของประเทศไทยให้มีความมั่นคงและเชื่อถือได้ในระดับที่เหมาะสมและได้อะแกรมของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้า (Supply) ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า (Demand)



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

ตารางที่ 2.2 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูงจากรูปที่ 2.4

ลำดับที่	คำย่อภาษาอังกฤษ	ชื่อสถานีไฟฟ้าแรงสูง	ระดับแรงดัน (kV)
1	BPK-EGAT	บางปะกง บัส B	230
2	BPK-PEA	บางปะกง บัส PEA	115
3	CC-PEA	ฉะเชิงเทรา	115
4	CC-PEA	ฉะเชิงเทรา	22
6	PA-PEA	ปราจีนบุรี	115
7	SMP-PEA	ศรีมหาโพธิ	115
8	WNK-PEA	วัฒนานคร	115
9	CB-PEA	ชลบุรี	115
10	CB-PEA	ชลบุรี	22
12	SC-PEA	ศรีราชา	115

ตารางที่ 2.2 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูงจากรูปที่ 2.4 (ต่อ)

ลำดับที่	คำย่อภาษาอังกฤษ	ชื่อสถานีไฟฟ้าแรงสูง	ระดับแรงดัน (kV)
13	SC-PEA	ศรีราชา	22
15	BBG-PEA	บ้านบึง	115
16	BWN-PEA	บ่อวิน	115
25	AU2-EGAT	อ่าวอุดม 2	230
24	AP-EGAT	อ่าวไผ่	230
17	AP-PEA	อ่าวไผ่	115
18	BL-PEA	บางละมุง	115
19	BL-PEA	บางละมุง	22
21	CTN-PEA	จอมเทียน	115
22	SH 1-PEA	สัตหีบ 1	115
23	SH 2-PEA	สัตหีบ 2	115
26	PTG-EGAT	พานทอง	230
27	BWN-EGAT	บ่อวิน	230
30	RY 2-EGAT	ระยอง 2	230
32	RY 2-PEA	ระยอง 2	115
33	RY 2-PEA	ระยอง 2	22
35	RY 3-PEA	ระยอง 3	115
36	KLA-PEA	แกลง	115

ตารางที่ 2.3 ลำดับตัวเลขของแต่ละสถานีรถไฟฟ้ความเร็วสูง จากรูปที่ 2.4

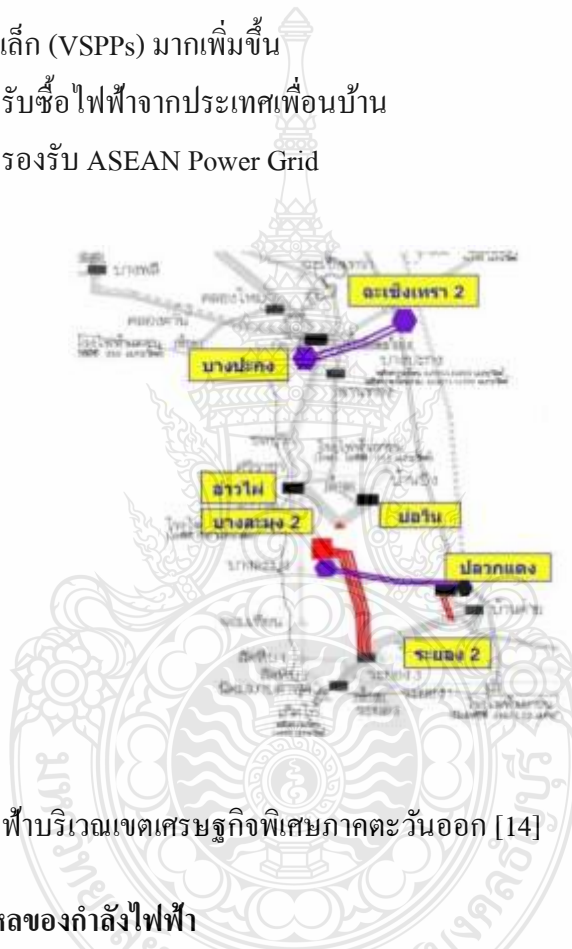
ลำดับที่	คำย่อภาษาอังกฤษ	ชื่อสถานีรถไฟฟ้ความเร็วสูง	ระดับแรงดัน (kV)
5	HE05*	ฉะเชิงเทรา	25
11	HE06*	ชลบุรี	25
14	HE07*	ศรีราชา	25
20	HE08*	พัทยา	25
34	HE10*	มาบตาพุด(ระยอง)	25

<https://th.wikipedia.org/wiki/รถไฟความเร็วสูงในประเทศไทย> หมายเหตุ\*- ชื่อสถานีรถไฟฟ้ความเร็วสูง จากเว็บไซต์



### 2.2.1.1 ความสำคัญของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

- 1) เพื่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้าของประเทศ
- 2) เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่จะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต
- 3) เพื่อรับไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า กฟผ. ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ (IPPs) และผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็ก (SPPs)
- 4) เพื่อเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า กรณีมีการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก (VSPPs) มากเพิ่มขึ้น
- 5) เพื่อรับซื้อไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน
- 6) เพื่อรองรับ ASEAN Power Grid



รูปที่ 2.5 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [14]

### 2.3 การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษากำลังไฟฟ้าของโหลด [14] คือการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าภายในระบบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและไหลในสายแต่ละเส้นมีขนาดเท่าใด กำลังไฟฟ้าดังกล่าวมีขนาดมากเกินกว่าพิกัดที่อุปกรณ์ในระบบจะสามารถรับได้หรือไม่หรือต่ำเกินไปจนอาจทำให้อุปกรณ์ที่ต่ออยู่เสียหายได้ การศึกษาและการวิเคราะห์การไหลของโหลดจึงมีประโยชน์ในการวางแผนการก่อสร้างเพิ่มเติมอุปกรณ์เข้าไปในระบบและนอกจากนี้ยังศึกษาสภาพการทำงานทั้งเวลาปกติและในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มโหลดเพื่อสามารถวิเคราะห์และแก้ไขระบบได้ ในการวิเคราะห์ด้านการไหลของโหลดหรือคอมพิวเตอร์โปรแกรมสำเร็จรูปการไหลของ

โหลดเสมือนเครื่องมือที่สามารถช่วยให้มนุษย์สามารถตัดสินใจได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมของโหลดเกิดขึ้นภายในระบบควรมีการแก้ไขระบบอย่างไรเพื่อให้การผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติมของโหลดอย่างปกติ ไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดการลัดวงจรในระบบ

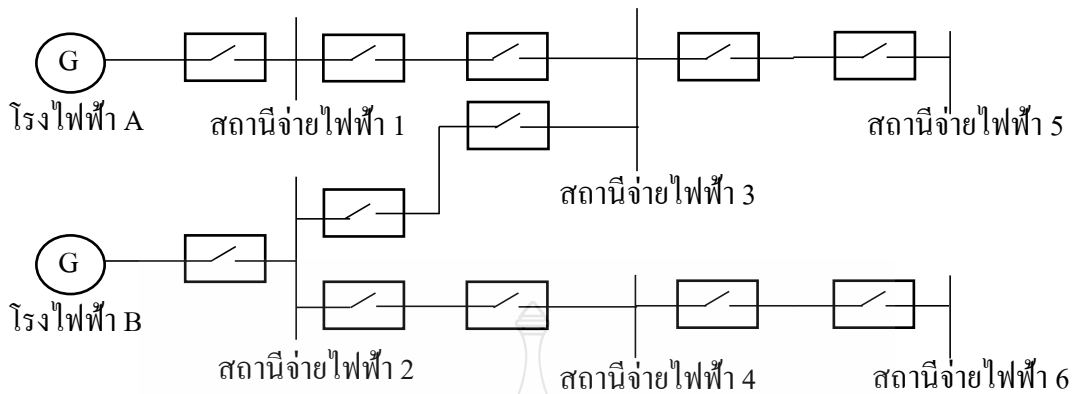
## 2.4 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Systems)

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เป็นระบบที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างมาจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ผ่านมายังระบบส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อแยกการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดผู้ใช้ไฟ มีส่วนประกอบสำคัญคือสถานีไฟฟ้าทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าครอบคลุมทั้งด้านปฏุมภูมิ ทุติยภูมิรวมถึงระดับแรงดันสูงสุดสำหรับประเทศไทยจะกำหนดแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 115 kV รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลักคือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดิน และระบบไฟฟ้าใต้ดิน การเลือกใช้ระบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่นค่าใช้จ่ายในการลงทุน ความปลอดภัย สิ่งแวดล้อมและความสวยงาม เป็นต้น แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปในประเทศไทยจะเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าใต้ดินมาก แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีบ้านเรือนหนาแน่น กรณีเดินสายไฟข้ามแม่น้ำหรือภายในนิคมอุตสาหกรรมนิยมใช้ระบบกำลังไฟฟ้าใต้ดินเพราะสายใต้ดินเป็นสายที่มีฉนวนหุ้ม ยังมีความปลอดภัยและความมั่นคงสูงกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินในอากาศซึ่งมักจะเป็สายเปลือย

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ดีต้องมีการวางแผนการก่อสร้างระบบไฟฟ้า โดยคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้า ชนิดของวงจรการจ่ายไฟ ตลอดจนความเหมาะสมในการใช้งานแต่ละพื้นที่ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำรูปแบบของระบบไฟฟ้าอยู่ 2 แบบคือ

### 2.4.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial Distribution Systems)

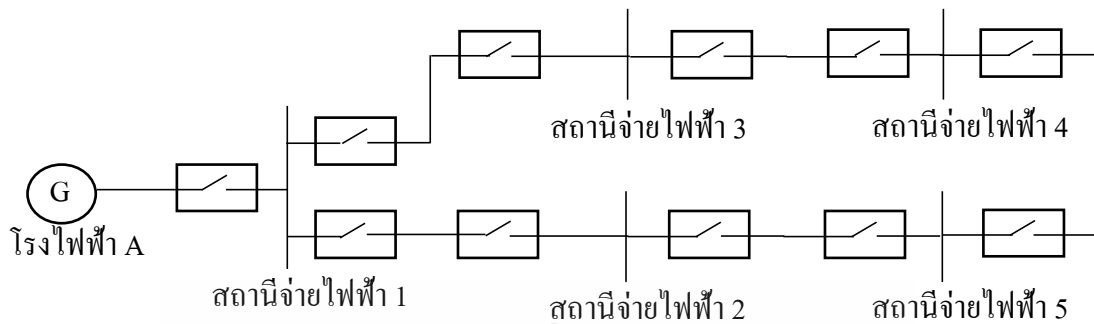
เป็นโครงข่ายระบบไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดที่มีการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านสายจำหน่ายเพียงด้านเดียว โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากสถานีไฟฟ้าไปยังโหลดภาระการใช้งาน การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายแบบลูบได้หรือระบบจำหน่ายแบบร่างแหต่อไปได้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือชนบท เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทที่ลงทุนต่ำ มีการป้องกันระบบง่ายและลักษณะการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ลักษณะระบบไฟฟ้าแบบเรเดียลแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

#### 2.4.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป (Loop Distribution Systems)

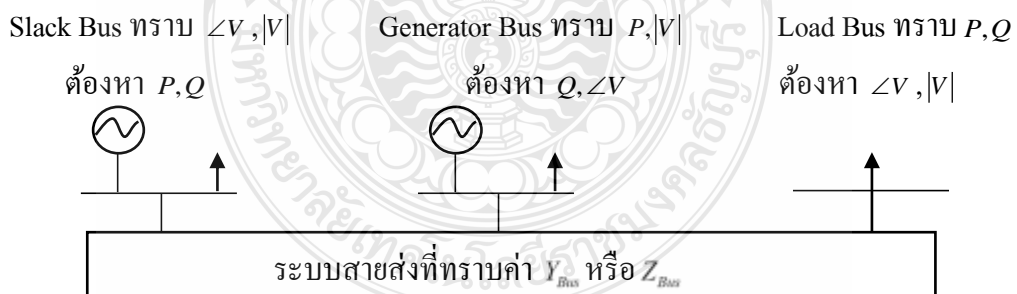
เป็นระบบที่มีการจ่ายไฟเข้าที่ต้นทางและปลายทางโดยสถานีจ่ายไฟฟ้าแห่งเดียวกัน โดยผู้ใช้ไฟจะสามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าหนึ่งทาง ระบบจำหน่ายแบบนี้ในการใช้งานจริงบางครั้งจะเปิดวงจรออกทำให้ระบบเป็นวงจรจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลก็ได้ การกระทำเช่นนี้จะทำการป้องกันระบบนั้นทำได้ง่ายขึ้น ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูปนี้สามารถนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชนขนาดใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ข้อดีของระบบนี้คือ เมื่ออุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดเกิดขัดข้องก็สามารถทำการตัดส่วนนั้นออกไปและวงจรส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟต่อไปได้อีก ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือได้สูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ข้อเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูปคือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระทำได้โดยผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้าเพียงสถานีเดียว ดังนั้นถ้าเกิดการขัดข้องขึ้นภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า ย่อมทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นระบบป้องกันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป ก็ยังต้องมีขีดความสามารถสูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล เนื่องจากระบบป้องกันตรวจสอบให้ทราบว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นที่อุปกรณ์ตัวใด เพื่อที่จะได้ตัดอุปกรณ์ส่วนนั้นออกจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดโหลดที่ไม่ได้รับผลกระทบต่อการเกิดขัดข้องของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ลักษณะของระบบไฟฟ้าแบบลูปแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบลูบ

## 2.5 การแก้ไขปัญหาโหลดโพลว์

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการศึกษาโหลดโพลว์เพื่อหากระแสที่ผ่านอุปกรณ์ต่างๆและแรงดันที่บัสเพื่อพิจารณาว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อใช้งานหรือไม่ ทั้งในสภาพของระบบปัจจุบันและระบบที่มีโหลดมากขึ้นในอนาคตที่ได้จากการพยากรณ์ พิจารณารูปที่ 2.4 เป็นระบบไฟฟ้ากำลังใดที่มีบัสต่างๆของระบบ แยกออกมาได้เป็น 3 กลุ่มคือ Slack Bus บัสเครื่องกำเนิด และบัสโหลด และแต่ละบัสมีพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ  $P, Q, |V|$  และ  $\angle V$  โดยทั่วไปทราบสองค่าของพารามิเตอร์ ส่วนอีกสองพารามิเตอร์ต้องคำนวณหาตามรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแสดงถึงระบบไฟฟ้าที่ทราบค่า  $Y_{Bus}$  หรือ  $Z_{Bus}$  และมีบัสชนิดต่างๆต่ออยู่แต่ไม่ได้แสดงจำนวนทั้งหมดที่ต่ออยู่กับระบบ รูปที่ 2.8 แสดงถึงระบบไฟฟ้าที่ทราบค่า  $Y_{Bus}$  หรือ  $Z_{Bus}$  และมีบัสชนิดต่างๆต่ออยู่แต่ไม่ได้แสดงจำนวนบัสทั้งหมดที่ต่ออยู่กับระบบ



รูปที่ 2.8 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีบัส 3 ประเภทต่ออยู่

จากระบบไฟฟ้ากำลังดังในรูปที่ 2.8 การศึกษาโหลดโพลว์ก็เพื่อหา

ก. พารามิเตอร์ที่ค้นหาสำหรับบัสแต่ละประเภทดังในรูปทำให้ทราบค่าแรงดันที่บัสทุกบัส

ข. หาค่า P ของ Slack Bus เพื่อทราบว่ามีความมากเกินไปที่เครื่องกำเนิดจ่ายให้ใดหรือไม่

ค. หาค่ากระแสที่ไหลในสายส่งต่างๆเพื่อให้ทราบว่าเกินขนาดสายส่งจะรับได้หรือไม่

จากการศึกษาโหลดโพลว์ตามตัวอย่างที่อธิบายข้างต้นก็เพื่อศึกษาว่าถ้าระบบมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลด กระแสในสายส่งแรงดันที่บัสต่างๆอยู่ในเกณฑ์ที่ทำงานได้เหมาะสม

## 2.6 ข้อมูลในการศึกษาโหลดโพลว์

ก่อนที่จะศึกษาเทคนิคที่ใช้แก้ปัญหาโหลดโพลว์ในแต่ละวิธี ควรทำความเข้าใจก่อนว่าข้อมูลใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณ และข้อมูลใดบ้างที่จะได้จากการศึกษาโหลดโพลว์ ซึ่งสามารถแยกรายละเอียดแต่ละหัวข้อได้ดังนี้

ข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณ ข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ข้อมูลระบบ และข้อมูลแสดงสภาพการทำงานของระบบ

ข้อมูลของระบบข้อมูลนี้จำเป็นต้องทราบเพื่อจะได้หาค่า  $Y_{Bus}$  หรือ  $Z_{Bus}$  ของระบบเพราะเมตริกซ์  $Y_{Bus}$  หรือ  $Z_{Bus}$  มีความสำคัญในการศึกษาโหลดโพลว์ และการวิเคราะห์ไฟฟ้ากำลังในด้านอื่นๆด้วย ข้อมูลของระบบเพื่อหา  $Y_{Bus}$  หรือ  $Z_{Bus}$  ประกอบด้วย

- ชิงกิลไลน์ไดอะแกรม ที่แสดงการต่อวงจรของระบบไฟฟ้า
- อิมพีแดนซ์ และ แอดมิตแตนซ์ ของสายส่ง
- ขนาดของเครื่อง และ อิมพีแดนซ์ ของหม้อแปลง
- ขนาด คาปาซิเตอร์ ที่ใช้ในระบบ

ข้อมูลแสดงสภาพการทำงานของระบบ หมายถึง

- กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่เข้าไปในระบบสำหรับ PQ บัส
- กำลังไฟฟ้าจริงที่เข้าไปในระบบและขนาดแรงดันไฟฟ้าสำหรับ PV บัส
- ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้าของ Slack บัส

ข้อมูลที่ต้องการจากการศึกษาโหลดโพลว์ มีมากมายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการศึกษาแต่ข้อมูลสำคัญที่ได้จากการศึกษาโหลดโพลว์ที่จะกล่าวถึงนี้ ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าบัสกระแสและกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

แรงดันไฟฟ้าบัส เป็นข้อมูลอันดับแรกที่สำคัญมาก เพราะหากสามารถหาได้ทั้งขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าบัสได้แล้ว ข้อมูลอื่นๆก็จะสามารถคำนวณได้ง่าย เทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาโหลดโพลว์ เน้น ทางด้านการหาแรงดันไฟฟ้าบัสทั้งนั้น

## 2.7 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

แม้ว่าระบบจ่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นระบบเรเดียล การวิเคราะห์การไหลของกำลังก็ยังคงมีความสำคัญ เพราะคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าควรเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย จะช่วยทำให้ทราบระดับแรงดันที่โหนดต่างๆ ได้นอกจากนี้คำตอบของการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย จะช่วยทำให้การวางแผนเพื่อควบคุมระบบ ตลอดจนการขยายระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อนึ่งการจำลองระบบเมื่อต้องเจอกับสถานะที่ไม่คาดคิดนั้นจะรู้คำตอบได้ก็ต้องทำการคำนวณการไหลของโหลดเช่นกัน การคำนวณการไหลของกำลังหรือการวิเคราะห์การไหลของกำลังในระบบจำหน่ายจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบส่งจ่าย เพราะในระบบจำหน่ายจะเป็นระบบเรเดียลเสียส่วนใหญ่ แต่ในระบบส่งจ่ายจะเป็นระบบโครงข่าย อีกประการหนึ่งพารามิเตอร์สายในระบบส่งจ่ายจะประกอบไปด้วยความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ และความจุ แต่ในระบบจำหน่ายเราจะพิจารณาเพียงความต้านทาน และความเหนี่ยวนำของสายเท่านั้น โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้การคำนวณการไหลของกำลังด้วยหลักการใช้เมทริกจาโคเบียน ด้วยระเบียบการวนรอบนิวตันราฟสัน

### 2.7.1 ข้อมูลในระบบจำหน่าย

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจำหน่ายนั้น ขั้นตอนจะต้องทราบข้อมูลของระบบจำหน่ายคือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จำนวนโหนด ค่าพารามิเตอร์ของสายตัวนำในแต่ละสาขาและค่ากำลังไฟฟ้าของแต่ละโหนด

- 1.) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือ หม้อแปลงกำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้า กำหนดให้เป็นแหล่งจ่าย แรงดันคงที่เรียกว่า รูดโหนด ใช้เป็นบัสอ้างอิง
- 2.) โหนด หรือ บัส คือ จุดรวมของสาขาตั้งแต่ สองสาขาขึ้นไป สำหรับระบบจำหน่ายแทนจุดต่อแยกของสายย่อย หรือจุดที่เป็นตำแหน่งหม้อแปลงจำหน่าย
- 3.) สาขา คือ สายตัวนำที่ต่อระหว่างโหนดสองโหนดใดๆ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการคือ ค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์มีหน่วยเป็น โอห์มต่อหน่วยความยาว ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์รวมตัวนำแต่ละสาขาหาได้เมื่อทราบค่าความยาวของสาย ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองแปลงให้อยู่ในรูปต่อหน่วย
- 4.) โหลด คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด แทนด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าต้านกลับ ทั้งสองค่าคิดจากเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดจริงเทียบกับพิกัดกำลังของหม้อแปลงแต่ละตัว

อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าต้านกลับ กำหนดให้มีค่าอัตราส่วนคงที่เมื่อ  
กำหนดค่าประกอบกำลัง

## 2.8 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีการวนรอบของนิวตันราฟสัน

จากสมการการไหลกำลังไฟฟ้าในรูปพิกัดเชิงขั้ว [15]

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i) \quad (2.1)$$

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \angle (\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.2)$$

กำหนดให้

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = (P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) \quad (2.3)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันที่บัสที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมดุล  
อย่างไรก็ตามในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบัสซึ่งทำ  
ได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นแบบราบเรียบ (Flat Start) โดยกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นของทุก  
บัสมีค่าเป็น  $1.0 \angle 0^\circ$  p.u. หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่  
ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำ  
ให้สมการดังกล่าวไม่เป็น 0 เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัส เรียกว่า ความไม่  
สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (Power Mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k} \quad (2.4)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k} \quad (2.5)$$

โดยที่

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i + \delta_k) \quad (2.6)$$

$$Q_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i + \delta_k) \quad (2.7)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบนิวตันราฟสันโดยประมาณผลเฉลยของระบบสมการที่วนรอบ  
การคำนวณที่  $k+1$  จะได้

$$f_{p,k+1} = \Delta P_{k+1} = \Delta P_k + [\nabla f_{p,k}]^T \cdot \nabla x = 0 \quad (2.8)$$

$$\Delta P_k = -[\nabla f_{p,k}]^T \cdot \nabla x \quad (2.9)$$

เมื่อ  $x = [\delta |V|]^T$  นั่นคือ

$$\Delta P_k = -\left( \frac{\partial f_{p,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial f_{p,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \right) \quad (2.10)$$

เนื่องจาก  $P_{sch,k}$  มีค่าคงที่ จะได้ว่า  $\frac{\partial f_{p,k}}{\partial x} = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial x}$  นั่นคือ

$$\Delta P_k = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้ว่า

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.12)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีนิวตันกราฟสัน จะได้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{cal}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{cal}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{(-1h)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(h)} \quad (2.14)$$

การคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน ( $J_1, J_2, J_3, J_4$ )



$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ในสมการที่ (2.15) ไม่ได้แสดง Superscript ที่เป็นตัวบอกลำดับที่ของ Iteration ไว้ เนื่องจากในกระบวนการวิเคราะห์ ตัวเลขบ่งชี้ลำดับนี้จะเปลี่ยนไปในแต่ละ Iteration ค่า element ใน Jacobian นี้หาได้จาก Partial derivative ของสมการหาค่า  $P_k$  และ  $Q_k$  ดังนั้นจากสมการที่ (2.6) จะได้

เมตริกซ์ย่อย  $J_1$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_k V_j Y_{k,j}| \sin(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = |V_k V_i Y_{k,i}| \sin(\theta_{k,j} + \delta_i - \delta_k); i \neq k \quad (2.17)$$

เมตริกซ์ย่อย  $J_2$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|V_k Y_{k,k}| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_j Y_{k,j}| \cos(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |V_k Y_{k,i}| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k); i \neq k \quad (2.19)$$

เมตริกซ์ย่อย  $J_3$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_k V_j Y_{k,j}| \cos(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = |V_k V_i Y_{k,i}| \cos(\theta_{k,j} + \delta_i - \delta_k); i \neq k \quad (2.21)$$

เมตริกซ์ย่อย  $J_4$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = -2|V_k Y_{k,k}| \sin(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_j Y_{k,j}| \sin(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = -|V_k Y_{k,i}| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k); i \neq k \quad (2.23)$$

การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยจะดำเนินไป จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสุด (Maximum Power Mismatch :  $\text{Max}(|P_{mis,max}|, |Q_{mis,max}|)$ ) มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Error Allowance :  $\varepsilon_{tol}$ ) หรือ  $\text{max}(|P_{mis,max}|, |Q_{mis,max}|) < \varepsilon_{tol}$  ในทำนองเดียวกันสมการทั่วไป Partial derivative สำหรับการคำนวณค่า Element อื่นๆใน Submatrices สามารถหาได้จากสมการ (2.6) และ (2.7) ค่า Element ที่คำนวณได้จะถูกนำไปแทนลงในสมการที่ (2.15) เพื่อหาค่าคำตอบของตัวแปรในสมการ ค่า  $\Delta \delta_k$  และ  $\Delta |V_k|$  ที่ได้จากการแก้สมการ จะถูกนำไปบวกเข้ากับขนาดของแรงดัน  $|V_k|^{(0)}$  และมุมเฟส  $\delta_k^{(0)}$  ซึ่งจะได้ค่าขนาดของแรงดันและมุมเฟสค่าใหม่คือ  $|V_k|^{(1)}$  และ  $\delta_k^{(1)}$  ค่าที่ได้นี้จะนำไปคำนวณหาค่าของ  $P_{k,cal}$  และ  $Q_{k,cal}$  สำหรับเริ่มการคำนวณใน Iteration ใหม่ กระบวนการคำนวณนี้จะทำซ้ำๆกันจนกระทั่งได้ค่า Solution ของตัวแปรที่มีค่าความเที่ยงตรงตามต้องการ สำหรับบัสที่เป็น Voltage Control bus ขนาดของแรงดันที่บัสนั้นถูกกำหนดให้ค่าคงที่ จึงไม่ต้องมีการคำนวณหา ดังนั้นใน Jacobian Column จึงไม่ปรากฏค่า Partial Differentiate ที่ขึ้นอยู่กับการคำนวณขนาดของบัสนี้ และเนื่องจากการควบคุมขนาดของแรงดันที่บัสทำได้โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟซึ่งค่าของ  $Q$  ที่บัสนี้จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.7) หลังจากหาค่า Convergence ของสมการได้แล้ว ดังนั้นไม่ต้องแทนค่า Partial Differentiate ที่ขึ้นอยู่กับการคำนวณขนาดของ  $Q$  ที่บัสนี้ลงใน Jacobian row เช่นกัน

## 2.9 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าความเร็วสูง

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าความเร็วสูง รับแรงดันไฟฟ้าขนาด 230 kV จากกริดไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าให้มีระดับ 230/115 kV จ่ายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งโหลดระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงจะใช้ขนาดแรงดัน 25 kV เพื่อ

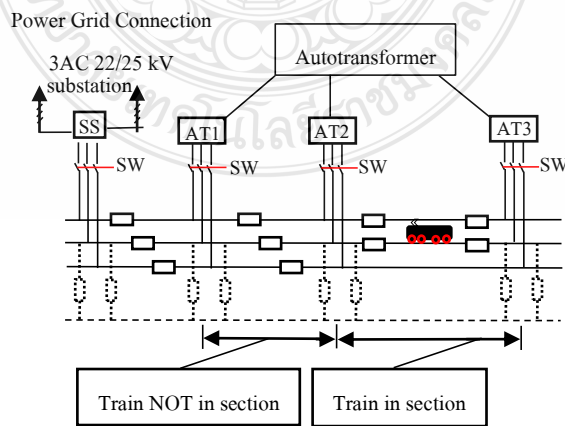
นำไปใช้การคำนวณโหลดสายส่งของภาคตะวันออกของประเทศไทยที่มีขนาดแรงดันของระบบที่ 230/115 kV และ 115/25 kV ในการใช้งานใช้ร่วมกับระบบรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงกระแสสลับขนาด 25 kV 50 Hz ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการจะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเหลือขนาด 25 kV เพื่อใช้ในระบบการเดินรถไฟ

### 2.9.1 ระบบสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟแอร์ไฟฟ้า

จะนำเสนอในระดับแรงดันที่ใช้ในโครงการ ส่วนใหญ่ มี 2 ระบบ คือ

1) ระบบสายป้อนเดี่ยว (1x25 kV Systems) คือสายป้อนเดี่ยวที่อยู่เหนือบนรถไฟไฟฟ้าเพียงเส้นเดียวตลอดเส้นทางเดินรถไฟไฟฟ้า ข้อดีของระบบนี้ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หัวรถไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 4-6 MW ข้อเสียของสจะสามารถรองรับโหลดหรือจำนวนเที่ยวของการเดินรถไฟได้จำกัดและจะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวรถไฟฟ้าได้โดยจะมีหม้อแปลงกำลังคอยเพิ่มแรงดันต่ออยู่ตลอดระยะทางของการเดินรถไฟไฟฟ้า ส่วนตำแหน่งที่ติดตั้งนั้นจะต้องพิจารณาระดับแรงดันให้เป็นมาตรฐาน BS EN 50163 , IEC 60850 ส่วนอุปกรณ์อื่นๆในระบบ

2) ระบบสายป้อน 2 เส้น (2x25 kV Systems) จะมีสายป้อนอีก 1 เส้นป้อนเข้ามาในวงจรเพื่อช่วยให้แหล่งจ่ายมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ระบบนี้จะต้องใช้ร่วมกับหม้อแปลงออโต้ (Autotransformer) และเช่นกันในการพิจารณาตำแหน่งที่จะติดตั้งหม้อแปลงจะเหมือนกับระบบสายป้อนเดี่ยว ข้อดีของระบบนี้สามารถรองรับจำนวนเที่ยวของการเดินรถไฟที่อาจเพิ่มมากขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจและความมั่นคงของระบบมีมากขึ้นด้วย ความเร็วของรถไฟไฟฟ้าสามารถใช้ความเร็วได้สูงกว่าระบบแรกเนื่องจากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าทำได้สูงกว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 50 kV ( Line to Line ) ข้อเสียของระบบนี้ การก่อสร้าง การควบคุมอาจมีความยุ่งยากขึ้นกว่าแบบระบบสายป้อนเดี่ยวและจะต้องเพิ่มอุปกรณ์ในการสวิตซ์ซึ่งต่างๆด้วย



รูปที่ 2.9 โดอะแกรมเส้นเดี่ยวของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับ 2 x 25 kV 50 Hz [16]

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษากับระบบ 2 x 25 kV เนื่องจากเป็นระบบที่ถูกใช้อยู่ในรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงซึ่งมีขนาดพิกัดแรงดันของระบบ 25 kV 50 Hz เพื่อให้เห็นภาพของระบบสายส่งในระบบรถไฟฟ้ามายังขึ้น โครงสร้างของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถดูได้ในรูปที่ 2.9

### 2.9.2 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟไฟฟ้า

มีระดับแรงดันที่ใช้มากที่สุด 6 ระดับทั่วโลก โดยมาตรฐานยุโรปและสากล ได้กำหนดขึ้นมีอีกหลายระดับแรงดันที่ถูกใช้อยู่ทั่วโลกเช่นกัน ช่วงของระดับแรงดันที่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน BS EN 50163 (British Standard European. Standard) และ IEC 60850 (International Electrotechnique Commission) ซึ่งระดับแรงดันที่กำหนดขึ้นนี้จะกำนังถึงจำนวนรถไฟไฟฟ้า การไหลของกระแสและระยะทางของสถานีส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่อย ระดับแรงดันต่างๆดูได้ในรูปที่ 2.21 สำหรับแรงดัน 25 kV ,AC,50 Hz ขนาดแรงดันต่ำสุดชั่วขณะอยู่ที่ 17.5 kV ขนาดแรงดันต่ำสุดในสภาวะปกติ 19 kV ขนาดแรงดันปกติ 25 kV ขนาดแรงดันสูงสุดชั่วขณะ 29 kV ขนาดแรงดันสูงสุดในสภาวะปกติ 27.5 kV

ตารางที่ 2.4 ขนาดแรงดันต่างๆ ในระบบที่สภาวะต่างๆ\*

ระบบไฟฟ้า	แรงดันต่ำสุด	แรงดันต่ำสุด	แรงดันใช้ งาน	แรงดันสูงสุด	แรงดันสูงสุด
	ไม่ถาวร	ถาวร		ถาวร	ไม่ถาวร
600 V ไฟฟ้า กระแสตรง	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1,000 V
1,500 V DC	1,000 V	1,000 V	1,500 V	1,800 V	1,950 V
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3.6 kV	3.9 kV
15 kV AC, 16.7 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17.25 kV	18 kV
25 kV AC, 50 Hz	17.25 kV	19 kV	25 kV	27.25 kV	29 kV

หมายเหตุ\*- ขนาดแรงดันที่ได้ตามมาตรฐาน จากเว็บไซต์ <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบการจ่ายไฟฟ้าแก่ทางรถไฟ>

### 2.9.3 ระบบสายส่งกระแสไฟฟ้าด้านบน (Overhead Contact System, OCS)

ความสามารถของระบบ OCS ถูกนำมาใช้ในโครงการนี้เป็นครั้งแรกในประเทศไทย โดยใช้เป็นสายส่งจ่ายพลังงานให้กับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของระบบ ในสภาวะปกติ เช่น รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงค์ 1 ขบวน มีความเร็วสูงสุดที่ 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ยิ่งไปกว่านั้น ระบบ OCS ยังสามารถรับการลดวงจรของระบบได้อีกด้วย กำหนดให้สภาพโดยรอบ

ของอุณหภูมิรอบตัวนำระยะยาวอย่างต่อเนื่อง เช่น ความเร็วลมไม่น้อยกว่า 1 m/s ความเสียหายดังกล่าวจะยังสามารถทำให้วงจรยังคงสามารถใช้งานได้ เมื่อมีการกำหนดกำลังการผลิตไฟฟ้าระยะยาวระบบ OCS สามารถรับได้ 650 A ภายใต้การทำงานอย่างต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้าของระบบ OCS จะเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน IEC 60850 และ EN 50163 สายตัวนำที่ใช้ในระบบคือสายชนิด Cu AC-107 ตามมาตรฐาน EN 50149 สาย Messenger wire 70 sq.mm. bronze 0.5 และ droppers 10 sq.mm. bronze 0.5 [17]

## 2.10 เสถียรภาพระบบไฟฟ้า (Power System Stability)

เสถียรภาพระบบไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่ระบบสามารถรักษาสมดุลภายใต้การทำงานปกติ และหากเกิดการรบกวนภายในระบบแล้วยังสามารถนำกลับสู่สภาวะสมดุลที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจจะเป็นการรบกวนขนาดเล็ก (Small Disturbance) หรือการรบกวนขนาดใหญ่ (Large Disturbance) ก็จะส่งผลต่อปัญหาการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ เสถียรภาพระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เสถียรภาพทางมุม (Angle Stability) เสถียรภาพความถี่ (Frequency Stability) และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) สามารถจำแนกประเภทเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าตามลักษณะที่เกิดขึ้นทางด้านเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เสถียรภาพทางมุม คือ ความสามารถของระบบในการรักษาสภาวะสมดุลของเครื่องกลเชิงโคโรนัสที่เชื่อมต่อกับระบบ

2. เสถียรภาพความถี่ คือ ความสามารถของระบบในการรักษาให้คงที่ หลังจากเกิดการขาดความสมดุลของแหล่งจ่ายกับโหลดและจะส่งผลกระทบต่อระบบอย่างมาก ซึ่งความสามารถของระบบนี้ขึ้นอยู่กับการรักษาและฟื้นฟูความสมดุลระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลดสำหรับความไม่มีเสถียรภาพนี้อาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำให้แหล่งจ่ายหรือโหลดถูกตัดออกจากการทำงาน

3. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจากเกิดปัญหาขึ้นภายในระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบความไม่มีเสถียรภาพนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการสูญเสียที่โหลดหรือในสายส่ง

สภาวะแรงดันไฟฟ้าพังทลาย (Breakdown Voltage) คือ สภาวะที่แรงดันไฟฟ้าของระบบเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของโหลด เมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้นแรงดันไฟฟ้าของระบบจะค่อยๆ ลดลงจนถึงจุดวิกฤต ในขณะนี้หากมีการเพิ่มขึ้นของโหลดเพียงเล็กน้อยจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบตกลงอย่างมาก เป็นเหตุให้ระบบไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลดได้อีก ซึ่งมีสาเหตุมา

จากความสามารถของระบบในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดไม่เพียงพอ สาเหตุของการเกิดพอจะสรุปได้เป็น 2 กรณี คือ การเพิ่มขึ้นของโหลด และ ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่วนมากสูญเสียไปกับสายส่งระหว่างตำแหน่งของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากับตำแหน่งของโหลด ซึ่งในทางปฏิบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบใช้อุปกรณ์ชดเชยต่างๆ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ และ อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหย่น กันการที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือสายส่งชุดใดชุดหนึ่งถูกตัดออกจากระบบทันทีทันใด ทำให้สายส่งหรือแหล่งจ่ายพลังงานอีกชุดหนึ่งต้องจ่ายโหลดเกินพิกัด

#### 2.10.1 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

1. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนภายในระบบอย่างรุนแรง (Large Disturbance Voltage Stability) คือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนภายในระบบอย่างรุนแรง เช่น การเกิดความผิดปกติในระบบหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบตัวใดตัวหนึ่งชำรุดเสียหาย

2. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนภายในระบบเพียงเล็กน้อย (Small- Disturbance Voltage Stability) คือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวน หรือมีความผิดปกติภายในระบบเพียงเล็กน้อย เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

กรอบเวลาสำหรับปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบส่วนมากจะเริ่มจากวินาทีไปจนถึง 10 นาที ดังนั้นเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ระยะเวลาสั้น ๆ (Short-term) และระยะเวลานาน (Long-Term)

1. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระยะเวลาสั้นๆ คือ ส่วนประกอบของโหลดที่มีการเคลื่อนที่รวดเร็ว เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมโหลด และอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า กระแสตรง คาบเวลาการศึกษาจะมีหน่วยเป็นวินาที

2. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระยะเวลานาน คือ อุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เช่น การควบคุมอุณหภูมิของโหลด และการจำกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาบเวลาของการศึกษามีหน่วยเป็นนาที

## 2.10.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ การเกิดแรงดันไฟฟ้าพียงหลายมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ป้องกันด้วย ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรจะพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และมีการตัดตอนส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุดออกไป

2. กรณีการเกิดความผิดปกติในระบบ ถ้าใช้เวลาในการตัดความผิดปกติมากเกินไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบลดลงจนอาจทำให้เกิดสภาวะการพียงหลายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบและการตั้งเวลาวิกฤติของระบบ จะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าพียงหลายเอาไว้ด้วย

3. ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลด เนื่องจากความสูญเสียในสายส่งระหว่างการจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งต้องมีปริมาณที่พอเพียงและอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแรงดันไฟฟ้าพียงหลาย

4. ปัจจัยอื่น ๆ เนื่องมาจากปัญหาเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง เพราะปกติการเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าพียงหลายมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่มีอยู่ในสภาวะเครียดนั้น คือ ระบบมีความยืดหยุ่นต่ำอันเนื่องมาจากรายจ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรายได้ จากสภาวะทางสังคมและเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้บรรดาผู้ผลิตไฟฟ้าต่างๆ ต้องปิดโรงไฟฟ้าลงอันเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุน ส่งผลให้แหล่งจ่ายพลังงานลดลงแต่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

## 2.11 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด (Problem of Optimal Power Flow)

### 2.11.1 สมการรูปแบบปัญหา

เป็นการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงที่ [18] โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร่วมกับขอบเขตเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรควบคุม โดยมีรูปแบบทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\text{Max / Minimize } f(x) \quad (2.24)$$

$$\text{Subject to } g(x) = 0, \text{ เงื่อนไขสมการ} \quad (2.25)$$

$$h(x) \dots 0, \text{ เงื่อนไขสมการ} \quad (2.26)$$

การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขสมการและอสมการให้เป็นพจน์ปรับโทษ และนำไปรวมกับสมการวัตถุประสงค์เดิมจะได้ฟังก์ชันปรับโทษและเทอมปรับโทษ ดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10)

$$P(x) = f(x) + X(x) \quad (2.27)$$

$$X(x) = \rho \{ g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2 \} \quad (2.28)$$

โดยที่  $P(x)$  คือ ฟังก์ชันปรับโทษ

$X(x)$  คือ เทอมปรับโทษ

$\rho$  คือ ตัวประกอบการปรับโทษ

การใช้วิธีการปรับโทษทำให้การแก้ปัญหาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันปรับโทษนี้ แทน ซึ่งง่ายกว่าและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อน

### 2.11.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมนำมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดเป็น ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ ดังสมการที่ (2.29)

$$\min P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_l} g_{ij} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (2.29)$$

โดยที่  $P_{loss}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในสายส่งทั้งหมด

$N_L$  คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด

$V_i$  คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่  $i$

$V_j$  คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่  $j$

$\delta_i$  คือ มุมมองดันไฟฟ้าบัสที่  $i$

$\delta_j$  คือ มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่  $j$

$g_{i,j}$  คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส  $i$  ไปยังบัส  $j$

### 2.11.3 ระบบเงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ตัวแปรปรับตั้งในวิทยานิพนธ์ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากโรงจักรไฟฟ้า ขนาดแรงดันไฟฟ้า ถูกควบคุม โดยสถานีไฟฟ้า แทปหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยจะการปรับตั้งตัวแปรเหล่านี้ เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด และยังคงในช่วงขีดจำกัดของตัวแปรแต่ละตัว โดยมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมตาม คือ พิกัดการไหลกำลังไฟฟ้าของสายส่ง พิกัดช่วงขนาดแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้



1. เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า (Equality Constraints)

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (2.30)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (2.31)$$

โดยที่	$P_{loss}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส $i$
	$P_{D,i}$	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$
	$Q_{G,i}$	คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟผลิตที่บัส $i$
	$Q_{D,i}$	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส $i$
	$N_B$	คือ จำนวนบัส
	$\theta_{i,j}$	คือ มุมแอดมิตแตนซ์บัส $i$ ไปยังบัส $j$
	$Y_{i,j}$	คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์บัส $i$ ไปยังบัส $j$

2. เงื่อนไขบังคับสมการเป็นขอบเขตตัวแปรที่ต้องการปรับตั้ง (Un Equality Constraints)

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (2.32)$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (2.33)$$

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (2.34)$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (2.35)$$

โดยที่	$V_i^{\min}$	คือ ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด
	$V_i^{\max}$	คือ ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
	$T_i^{\min}$	คือ ขอบเขตแทปหม้อแปลงต่ำสุด
	$T_i^{\max}$	คือ ขอบเขตแทปหม้อแปลงสูงสุด
	$P_{G,i}^{\min}$	คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุด
	$P_{G,i}^{\max}$	คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด
	$Q_{comp,i}^{\min}$	คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟต่ำสุด
	$Q_{comp,i}^{\max}$	คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุด

ดังนั้นฟังก์ชันปรับโทษสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.36)

$$P(x) = P_{loss} + X_P + X_Q + X_C + X_T + X_V + X_G \quad (2.36)$$

$$\text{โดยที่ } X_P = \rho \sum_{j=1}^{N_B} \left\{ P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_1 + \delta_j) \right\}^2 \quad (2.37)$$

$$X_Q = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ Q_{G,i} - Q_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_1 + \delta_j) \right\}^2 \quad (2.38)$$

$$X_C = \rho \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \max(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \max(0, Q_{comp,i}^{\min} - Q_{comp,i}) \right\}^2 \quad (2.39)$$

$$X_T = \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i - T_i^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i^{\min} - T_i) \right\}^2 \quad (2.40)$$

$$X_V = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, V_i - V_i^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, V_i^{\min} - V_i) \right\}^2 \quad (2.41)$$

$$X_G = \rho \sum_{i=1}^{N_G} \left\{ \max(0, P_{G,i} - P_{G,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_G} \left\{ \max(0, P_i^{\min} - P_{G,i}) \right\}^2 \quad (2.42)$$

โดยที่  $N_G$  คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

$N_C$  คือ จำนวนตัวอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ

$N_T$  คือ จำนวนของหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ

$N_B$  คือ จำนวนบัส

## 2.12 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Method)

วิธีกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นจากแนวความคิดที่ต้องการศึกษาเลียนแบบการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง วิธีกลุ่มอนุภาคนี้มีต้นกำเนิดมาจากความคิดของนักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่ง ที่สนใจและสังเกตเกี่ยวกับพฤติกรรมการอยู่ร่วมกันเป็นฝูง หรือ การอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ต่างสายพันธุ์มากมายหลายชนิด สิ่งแรกที่นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ได้ศึกษา คือ พฤติกรรมการอยู่ร่วมกันเป็นสังคมของสัตว์ชนิดนั้น ๆ สำหรับสายพันธุ์ของสัตว์บางชนิด ฝูง หรือ กลุ่ม จะถูกควบคุมด้วยตัวที่เป็นจ่าฝูง ซึ่งอาจมีลักษณะที่แข็งแรงและได้รับการยอมรับจากสมาชิกตัวอื่น ๆ ในฝูง เช่น สิงโต ฝูงลิงบาบูน เป็นต้น แต่ก็มีสัตว์บางสายพันธุ์ที่มีพฤติกรรมการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มที่น่าสนใจแตกต่างออกไป คือ การอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และ ฝูงแมลง ความน่าสนใจของพฤติกรรมของสัตว์เหล่านี้ คือ การปรับตัวในการอยู่ร่วมกันในกลุ่มโดยไม่ต้องมีผู้นำมาคอยควบคุม สังคมการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มของสัตว์เหล่านี้อาศัยการปรับตัวด้วยตัวเองตามสภาพแวดล้อม โดยอาศัยการเรียนรู้คุณลักษณะที่เหมาะสมของการอยู่ร่วมกันภายในกลุ่ม เริ่มต้นจากการปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคในกลุ่มย่อยจากกลุ่มย่อยรวมไปเป็นกลุ่มใหญ่ [19]

จากพฤติกรรมที่น่าสนใจนี้ ในปี 1995 อัลกอริทึมในการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคจึงถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [20] การหาค่าตอบจะอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง กระบวนการ หรือ ตัวดำเนินการของวิธีกลุ่มอนุภาคนี้ จะเป็นอัลกอริทึมของการเรียนรู้ในการปรับตำแหน่งของแต่ละอนุภาค จนกระทั่งแต่ละอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมไม่มีการเคลื่อนที่ ปัจจุบันวิธีกลุ่มอนุภาคนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในหลายๆ แขนงวิชารวมถึงปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ปัญหาการเลือกจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ ปัญหาการควบคุมให้เหมาะสม ปัญหาการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง และปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมอื่น ๆ เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์ หลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค การกำหนดค่าตัวแปรของวิธีกลุ่มอนุภาคแบบจำลองของวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาค่าตอบที่ดีที่สุด

### 2.12.1 วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์

วิธีกลุ่มอนุภาคเป็นหนึ่งในวิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เป็นวิธีการหาค่าตอบที่ใช้การสุ่มค่าเริ่มต้น และมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของคำตอบโดยใช้อัลกอริทึมที่คิดค้นขึ้นโดย Kennedy และ Eberhart ในปี 1995 ซึ่งวิธีปัญญาประดิษฐ์นี้ ได้มีการนำเสนอขึ้นมาใช้งานหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการและอัลกอริทึมต่างกัน โดยมีวิวัฒนาการมายาวนานตั้งแต่ปี 1953 ดังรูปที่ 2.9

Simulated	Expert	Genetic	Tabu	Ant	Particle Swarm
Annealing	System	Algorithm	Search	System	Optimization
1953	1969	1975	1989	1991	1995

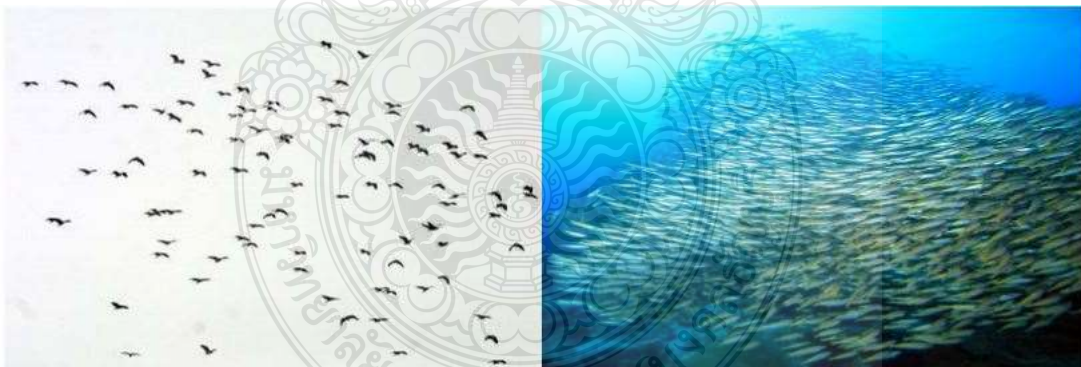
### รูปที่ 2.10 วิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของวิธีปัญญาประดิษฐ์ที่เป็นมายาวนาน โดยในปี 1953 ได้มีการนำเสนอวิธีการอบเหนียว ซึ่งใช้หลักของการให้ความร้อนหลอมเหล็กที่อุณหภูมิสูงและลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณภาพที่ดี ต่อมาในปี 1969 ได้มีการนำเสนอวิธีระบบผู้เชี่ยวชาญวิธีนี้ใช้หลักการในการอาศัยประสบการณ์และข้อมูลการเรียนรู้ที่ได้เก็บรวบรวมไว้นำมาใช้เปรียบเทียบกับคำตอบของข้อมูลปัจจุบัน ปี 1975 วิธีเชิงพันธุกรรม ถูกนำเสนอครั้งแรกต่อสาธารณชนโดยการหาค่าตอบของวิธีนี้จะอาศัยทฤษฎีการวิวัฒนาการสิ่งมีชีวิต ที่กล่าวว่าผู้ที่แข็งแกร่ง

กว่ายอมมีโอกาสนี้จะรอด และถ่ายทอดคุณลักษณะเด่นที่มีไปยังรุ่นถัดไปในขณะที่ผู้อ่อนแอกว่ายอมตามไป ปี 1989 ได้มีการนำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ซึ่งใช้หลักการการค้นหาคำตอบไปทั่วพื้นที่ของการค้นหา โดยจะเก็บค่าตัวแปรที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดไว้ในตารางตาบู่ ปี 1991 วิธีการที่ใช้ธรรมชาติในการเลือกเส้นทางเดินทางอาหารของมด ได้ถูกนำเสนอขึ้นโดยใช้หลักการที่ว่ามดจะจดจำเส้นทางการเดินทางที่สั้นที่สุดในการเดินทางไปยังจุดหมายและปล่อยฟีโรโมนเพื่อให้มดตัวอื่นรู้และปรับเส้นทางการเดินทางให้เหมาะสม และในปี 1995 ได้มีการนำเสนออัลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคซึ่งใช้หลักการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของนก ปลา และแมลง

### 2.12.2 หลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค

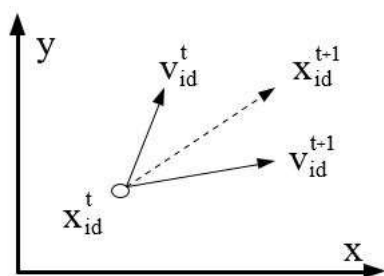
จากที่กล่าวมาข้างต้นหลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาคนั้น คือ การอาศัยการเรียนรู้ของการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง ซึ่งต่อไปจะเรียกว่ากลุ่มอนุภาค (Swarm) อนุภาคเหล่านี้จะเรียนรู้และเคลื่อนที่ปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเองไปตามอนุภาคแวดล้อมที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีและเหมาะสมกว่าเมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งจนทุกอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันแล้วก็จะหยุดการปรับเปลี่ยนทิศทางเดียวกันแล้วก็จะหยุดการปรับเปลี่ยนทิศทางดังจะเห็นได้จากตัวอย่างการบินของฝูงนก และการว่ายน้ำของฝูงปลา แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การอยู่รวมกันเป็นฝูงของนกและปลา [20]

### 2.12.3 อัลกอริทึมในการปรับตำแหน่งของวิธีกลุ่มอนุภาค

อัลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคเป็นอัลกอริทึมที่ปรับตัวเองบนพื้นฐานของการเรียนรู้สถานการณ์และใช้ข้อมูลร่วมกัน อนุภาคที่อยู่ภายในกลุ่มจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งโดยการอาศัยการเรียนรู้จากอนุภาคข้างเคียงที่อยู่ตำแหน่งที่ให้ค่าที่ดีกว่า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค

อัลกอริทึมที่สำคัญในการปรับตำแหน่งแสดงได้ตามสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.44) โดยสมการที่ (2.43) แสดงถึงความเร็วในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค และสมการที่ (2.44) แสดงถึงตำแหน่งใหม่ของอนุภาคหลังปรับเปลี่ยนตำแหน่งแล้ว

$$V_{id}^{t+1} = W * V_{id}^t + Rand_1() * C_1 (Pbest_{id} - X_{id}^t) + Rand_2() * C_2 (Gbest_d - X_{id}^t) \quad (2.43)$$

$$X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \quad (2.44)$$

- โดยที่
- $X_{id}^t$  คือ ตำแหน่งของอนุภาค  $i$  ของตัวแปร  $d$  ในรอบการคำนวณที่  $t$
  - $X_{id}^{t+1}$  คือ ตำแหน่งของอนุภาค  $i$  ของตัวแปร  $d$  ในรอบการคำนวณที่  $t+1$
  - $V_{id}^t$  คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค  $I$  ของตัวแปร  $d$  ในรอบการคำนวณที่  $t$
  - $V_{id}^{t+1}$  คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค  $I$  ของตัวแปร  $d$  ในรอบการคำนวณที่  $t+1$
  - $Rand_1(), Rand_2()$  คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1
  - $Pbest_{id}$  คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของคุณภาพ  $i$  ของตัวแปร  $d$
  - $Gbest_d$  คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุกๆ อนุภาคของตัวแปร  $d$
  - $w$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก
  - $C_1, C_2$  คือ ค่าคงที่ความเร่ง

จากสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.44) สามารถอธิบายการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคได้ดังนี้ สมการที่ (2.43) นั้นเป็นสมการที่แสดงการปรับความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละอนุภาคโดยประกอบไปด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $w$ ) คูณอยู่กับความเร็วของอนุภาคเดิม ( $V_{id}^t$ ) เป็นการทำให้คำตอบเกิดความหลากหลายไม่ติดอยู่กับคำตอบเฉพาะที่เดิมๆ ส่วนที่สองเป็นส่วนที่แต่ละอนุภาคจะปรับค่าความเหมาะสมของตัวเองในปัจจุบันกับค่าของ

อนุภาคที่ดีที่สุดเฉพาะที่เท่าที่มีอยู่ในขณะนั้น แทนอนุภาคที่ดีที่สุดเฉพาะที่ด้วยตัวแปร  $Pbest_{id}$  ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่แต่ละอนุภาคจะปรับค่าเหมาะสมของตัวเองในปัจจุบันกับค่าของอนุภาคที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคในรุ่นนั้น แทนอนุภาคที่ดีที่สุดในกลุ่มว่า  $Gbest_d$

#### 2.12.4 การกำหนดค่าตัวแปรของวิธีกลุ่มอนุภาค

การกำหนดค่าตัวแปรในวิธีกลุ่มอนุภาคมีความสำคัญในการลู่เข้าของคำตอบดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ให้มีความเหมาะสมกับปัญหาดังกล่าวต่อไปนี้

1. ค่าคงที่ความเร่ง ( $C_1, C_2$ ) ค่าคงที่ความเร่ง  $C_1$  และ  $C_2$  มีผลต่อความเร็วในการลู่เข้าสู่คำตอบ โดย  $C_1$  มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีของตำแหน่งในปัจจุบันและ  $C_2$  มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดของตำแหน่งในปัจจุบันการกำหนดค่าคงที่ทั้งสองนี้มีความสำคัญโดยปกติจะกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4 ซึ่งผลของการกำหนดค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

ก. กำหนดให้ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าต่ำทั้งคู่ การกำหนดให้ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าสูงทั้งคู่ นั้นจะส่งผลให้การค้นหาคำตอบห่างไกลจากเป้าหมายเนื่องจากอนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ต่ำ จึงวนอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ไม่สามารถข้ามผ่านไปสู่อุณหภูมิให้คำตอบที่ดีกว่าได้

ข. กำหนดให้ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าสูงทั้งคู่ การกำหนดให้ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าสูงทั้งคู่ นั้นจะส่งผลให้การค้นหาคำตอบเกิดการเคลื่อนที่ผ่านเป้าหมายไปเนื่องจากอนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่สูง เพราะฉะนั้นการที่อนุภาคมีอัตราเร่งในการเคลื่อนที่สูงอาจทำให้ไม่เจอคำตอบ

ค. กำหนดให้ค่าคงที่  $C_1$  มีค่าต่ำ และ  $C_2$  มีค่าสูง การกำหนดค่าคงที่แบบนี้จะทำให้การค้นหาคำตอบลู่เข้าสู่คำตอบอย่างรวดเร็ว แต่คำตอบที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นคำตอบเฉพาะที่

ง. กำหนดให้ค่าคงที่  $C_1$  มีค่าสูง และ  $C_2$  มีค่าต่ำ การกำหนดค่าคงที่แบบนี้จะทำให้เกิดการค้นหาคำตอบในแต่ละพื้นที่เป็นแบบกระจัดกระจายไม่เป็นรูปแบบที่สอดคล้องกัน ทำให้ไม่สามารถลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีได้

จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  นั้นมีผลในการลู่เข้าสู่คำตอบดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าให้เหมาะสม ที่นิยมใช้กัน คือ ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าเท่ากับ 2 ในส่วนของการกำหนดจำนวนอนุภาคในการคำนวณนั้น จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 แล้วแต่ความเหมาะสมของปัญหาจำนวนรอบสูงสุดที่ใช้โดยทั่วไปประมาณ 500 รอบ

2. ค่าถ่วงน้ำหนัก ( $W$ ) ค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะทำให้คำตอบมีความหลากหลายไม่ติดอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมจะทำให้การค้นหาคำตอบมีความสมดุลระหว่างการหาคำตอบเฉพาะที่และการค้นหาคำตอบจากขอบเขตทั้งหมด ซึ่งจะช่วยให้รอบในการค้นหาคำตอบน้อยลง

โดยทั่วไปขอบเขตของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะถูกกำหนดอยู่ระหว่าง 0.4 กับ 0.9 โดยสมการในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักนี้ แสดงได้ตามสมการที่ (2.45)

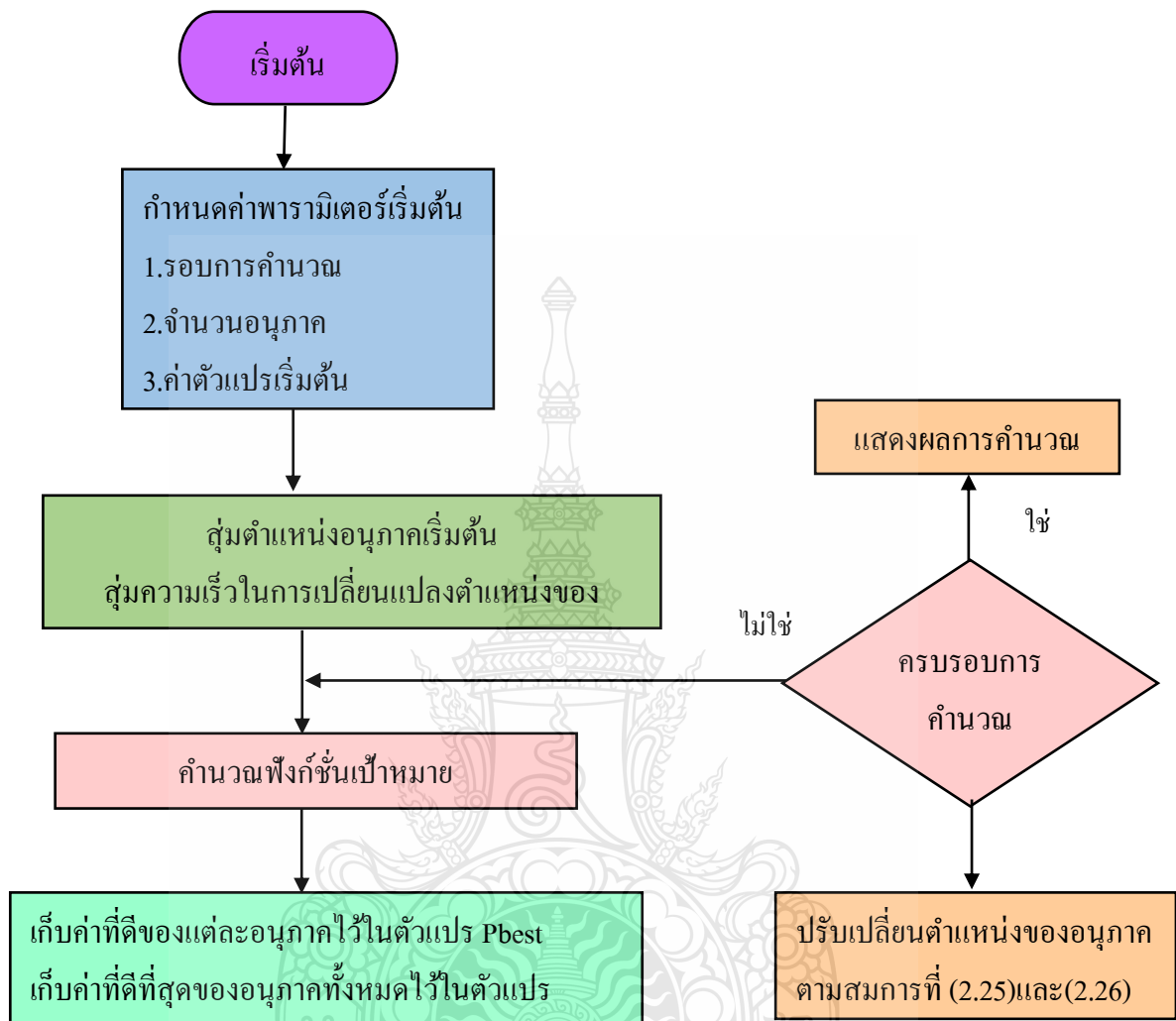
$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{k} t \quad (2.45)$$

โดยที่  $W_{\min}$  คือ ขอบเขตล่างของค่าถ่วงน้ำหนัก  
 $W_{\max}$  คือ ขอบเขตบนของค่าถ่วงน้ำหนัก  
 $t$  คือ รอบการคำนวณปัจจุบัน  
 $k$  คือ รอบการคำนวณทั้งหมด

#### 2.12.5 แบบจำลองของวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

จากหลักการและอัลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดได้โดยเริ่มจากสร้างฟังก์ชันเป้าหมายและใช้การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคในสมการข้างต้นเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณได้แสดงดังรูปที่ 2.21





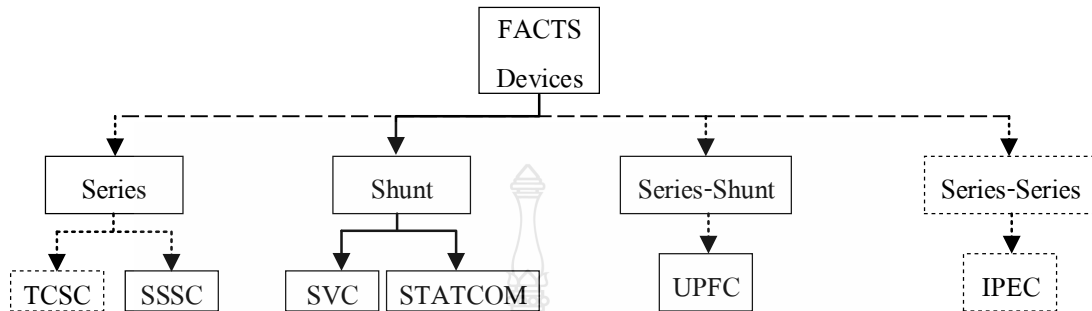
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

### 2.13 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTS Device)

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังในยุคปัจจุบันที่อิเล็กทรอนิกส์มีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น FACTS ทำให้การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เรียบและยืดหยุ่นและยังสามารถตอบสนองได้รวดเร็วกว่าอุปกรณ์การควบคุมแบบดั้งเดิมมาก FACTS มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด หากกล่าวถึง D-FACT แล้วก็จะหมายความเฉพาะถึงอุปกรณ์ที่จะใช้ชดเชยปัญหาคุณภาพอุปกรณ์ FACTS มีหลายประเภท ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนออุปกรณ์ FACTS 2 ชนิด คือ แบบต่อขนาน SVC และ STATCOM ด้วยการ



ทำงานที่รวดเร็วและเรียบของอุปกรณ์ FACTS การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบสามารถจัดสรรได้ใหม่ ทำให้ขีดความสามารถของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

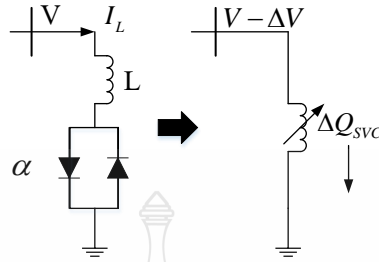
### 2.13.1 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิติตัดตั้งขนาน Static Var Compensator (SVC)

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิติตัดตั้งขนานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายและโหลดทางไฟฟ้า เพราะสามารถจ่ายและรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบได้ และจะช่วยในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ TCR และ TSC ซึ่งลักษณะการติดตั้งของ SVC แสดงดังรูปที่ 2.16



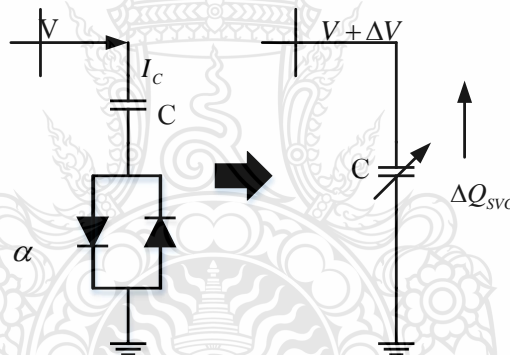
รูปที่ 2.15 ลักษณะการติดตั้งของ SVC [3]

1. ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor, TCR) และตัวเหนี่ยวนำ จะใช้ไทริสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ โดยมีรูปแบบการต่อแสดงดังรูปที่ 2.16

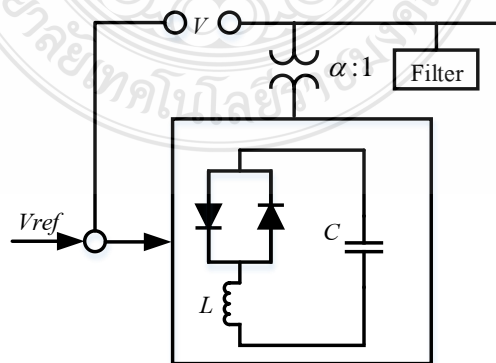


รูปที่ 2.16 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์

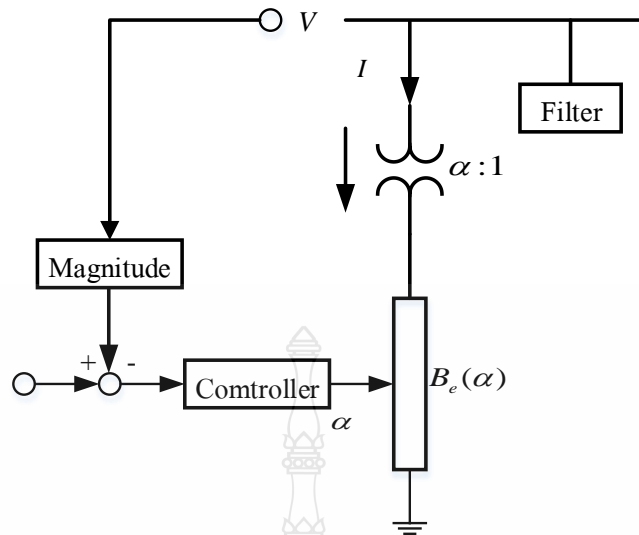
2. ตัวเก็บประจุไทริสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์ (Thyristor Switched Capacitor, TSC) และตัวเก็บประจุคงที่ (FC Fixed Capacitor) หรือเรียกย่อว่า TSC / FC ตัวเก็บประจุคงที่ จะใช้การสวิตซ์ทางกล โดยมีรูปแบบการต่อแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ไทริสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์

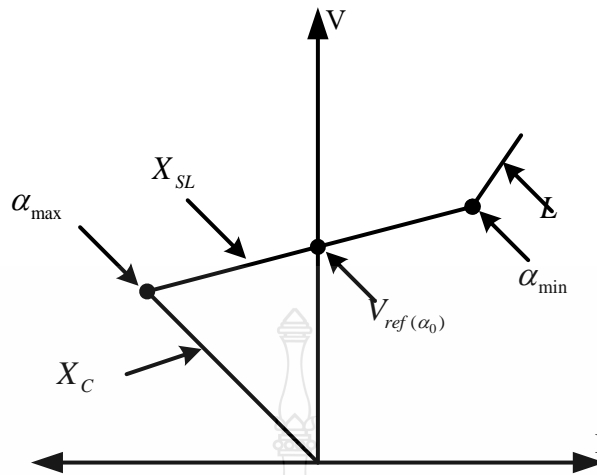


รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC



รูปที่ 2.19 แบบจำลองของ SVC

ความสำคัญของ SVC ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ รักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่ หรือใกล้เคียง ภายใต้ภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ของโหลด แก้ไขการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ของโหลด แก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การปลดโหลด การล้มเหลวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวในระบบไฟฟ้าลดการกระพริบของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของโหลด เช่น โหลดเตาหลอมแบบอาร์ค ปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ปรับปรุงเสถียรภาพ SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานได้ดังรูปที่ 2.20 โดย SVC จะสามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานได้ดังรูปที่ 2.20 โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังได้ และจากรูปที่ 2.27 SVC จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ รับ หรือ จ่าย ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ มุมจุดชนวนจะอยู่ในช่วงระหว่าง  $90^\circ$  ถึง  $180^\circ$  คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC

จากรูปที่ 2.20 การทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ส่วนขอบเขตของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ SVC จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่จุด  $\alpha_{min}$  คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงานรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบตามพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ และที่จุด  $\alpha_{max}$  คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมเก็บประจุทำงานจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ

ส่วนระกอบในการควบคุมของ SVC มีความสำคัญมากในแบบจำลองของ SVC ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองของ SVC สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิตได้ ดังสมการที่ (2.28) และสมการที่ (2.29)

$$\begin{bmatrix} X_c \\ \alpha \end{bmatrix} = f(X_c, \alpha, V, V_{ref}) \quad (2.46)$$

$$0 = \begin{bmatrix} B_e - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L / X_C)}{\pi X_L} \\ I - V_i B_e \\ Q - V_i^2 B_e \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

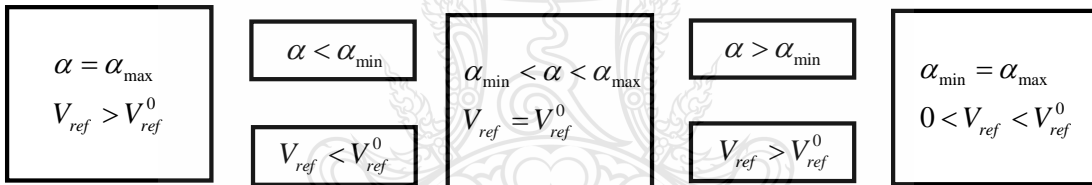
$$g(a, V, V_1, I, Q, B_e)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าจะต้องกำหนดค่าให้ชัดเจนในรูปแบบที่ 2.20 โดยที่  $X_c$  และ  $f(\cdot)$  ยังคงอยู่ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดขอบเขตของสมการยกเว้น มุมการจูดชนวน ( $\alpha$ ) โดยเฉพาะกระแส (1) การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) และแรงดันไฟฟ้า SVC ( $V_i$ ) เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ

จากสมการที่ (2.28) และสมการที่ (2.29) แบบจำลองของ SVC ในสถานะคงตัวสามารถเขียนแทนได้ ดังสมการที่ (2.30)

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ g(\alpha, V, V_i I, Q, B_e) \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

ขอบเขตการควบคุมของ SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจูดชนวนไทรสเตอร์ ซึ่งอยู่ในช่วง  $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$  เมื่อ  $\alpha_m$  และ  $\alpha_M$  คือ มุมจูดชนวนน้อยที่สุดและมุมจูดชนวนมากที่สุดตามลำดับ ถ้าไม่รู้วิธีหาขอบเขตมุมจูดชนวน ให้กำหนดมุมจูดชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_{ref}$  วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขต แสดงรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.21 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสถานะคงตัวของ SVC

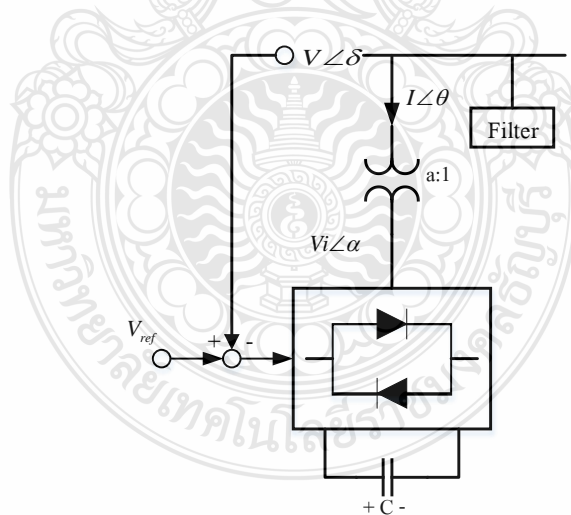
### 2.13.2 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ Static Synchronous Compensator (STATCOM)

โดยทั่วไปแล้วคำว่า STATCOM มักนิยมใช้หมายถึงถึงอุปกรณ์ที่เป็นการชดเชย STATCOM มีลักษณะคล้ายกันกับซิงโครนัสคอนเดนเซอร์แต่เป็นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและมีหม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับบัส STATCOM สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสโดยการควบคุมการจ่าย หรือ รับ กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟจากระบบไฟฟ้ากำลัง (Distribution Static Synchronous Compensator) [20] ซึ่งลักษณะการติดตั้งของ STATCOM แสดงดังรูปที่ 2.31

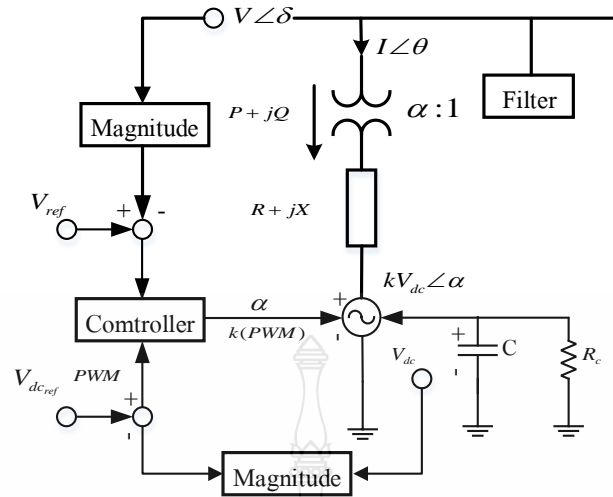


รูปที่ 2.22 ลักษณะการติดตั้งของ STATCOM [3]

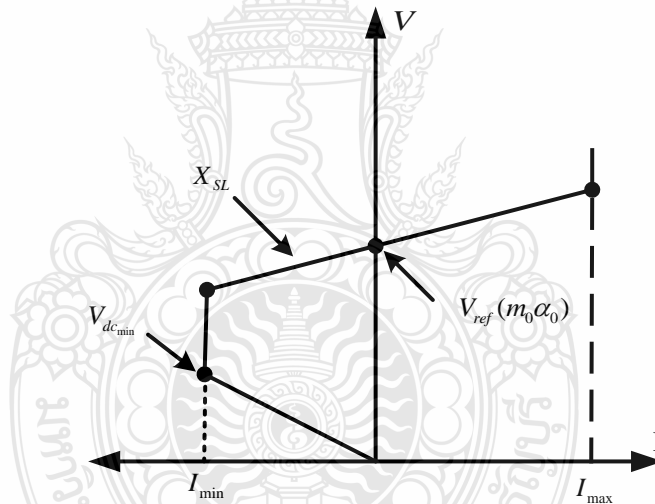
STATCOM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต่อในลักษณะขนานเข้ากับระบบ โดยใช้หลักการของลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงผัน โดยวงจรแปลงผันจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีการควบคุมระดับความถี่ให้เท่ากับระบบที่เชื่อมต่อ และชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมของ STATCOM มี 2 วิธี คือ การควบคุมมุมเฟสเป็นการควบคุมการเลื่อนมุมเฟส ( $\alpha$ ) ที่ควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของ STATCOM และอีกวิธีหนึ่งคือ การควบคุม โดยการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของ STATCOM และมุมเฟส



รูปที่ 2.23 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM



รูปที่ 2.24 แบบจำลองของ STATCOM



รูปที่ 2.25 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ STATCOM

แบบจำลองของ STATCOM มีข้อจำกัดระหว่างการควบคุมและการทำงานโดยทั่วไปจะนิยมให้แบบจำลองของ STATCOM มีลักษณะเดียวกับเครื่องจักรซิงโครนัส ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์แบบจำลองของ STATCOM สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิตได้ ดังสมการที่ (2.49) สมการที่ (2.50) และสมการที่ (2.51) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} X_c \\ \alpha \\ m \end{bmatrix} = f(X_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dc,ref}) \quad (2.49)$$

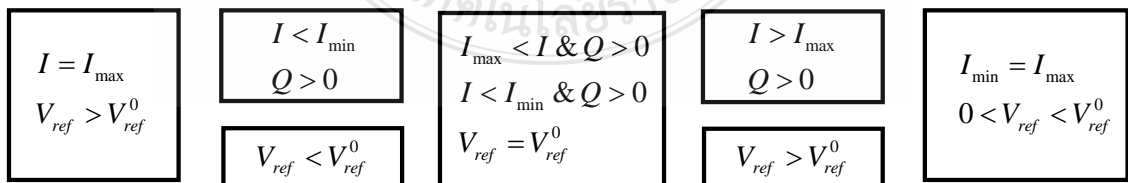
$$V_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{R_c C} V_{dc} - \frac{R I^2}{C V_{dc}} \quad (2.50)$$

$$0 = \frac{\begin{pmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \alpha) \\ Q - V^2 B + kV_{dc} VB \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VG \sin(\delta - \alpha) \end{pmatrix}}{g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q)} \quad (2.51)$$

เมื่อ  $m$  คือ ค่ามอดูลุสของอุปกรณ์แปลงผัน  $X_c$  และ  $f(\cdot)$  สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ จากสมการที่ (2.49) สมการที่ (2.50) และสมการที่ (2.51) แบบจำลองของ STATCOM ในสภาวะคงตัวสามารถเขียนแทนได้ ดังสมการที่ (2.52)

$$0 = \begin{pmatrix} V - V_{ref} \pm X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dc,ref} \\ P - V_{dc}^2 / R_c - R I^2 \\ g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q) \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มี STATCOM ในสภาวะคงตัว การจำกัดขอบเขตของกระแสของแบบจำลองในสภาวะคงตัวที่ได้นั้น อัตราส่วนของการมอดูลุส  $k$  หรือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันได้ในแบบจำลองที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.26 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของ STATCOM



## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการการศึกษาระบบรถไฟฟ้ายานพาหนะวันออก โดยจะศึกษาขั้นตอนและวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นรถไฟฟ้ายานพาหนะ ระบบ 25 kV 50 Hz โดยทำวิทยานิพนธ์ได้ใช้โปรแกรม คณิตศาสตร์ เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ ในการจำลองโครงสร้างของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับสายป้อน 2 เส้น ขนาด 2x25 kV 50 Hz ของระบบรถไฟฟ้ายานพาหนะวันออก เป็นต้นแบบ โดยอาศัยข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม แล้วจึงนำผลเฉลยของตัวแปรพารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์แรงดันกระแสในแต่ละบัสตลอดจนคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งผู้ทำวิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิทยานิพนธ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB M-File

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการทำวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จัดเตรียมค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบจำหน่ายที่จะมาทดสอบเพื่อเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากขั้นตอนที่ 1 แล้วก็นำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเพื่อวิเคราะห์ค่าแรงดัน และกระแสแต่ละบัส ด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนนี้เริ่มเข้าสู่กระบวนการนำค่าที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ามาวิเคราะห์ปรับปรุงค่าแรงดันและกระแสให้เหมาะสม

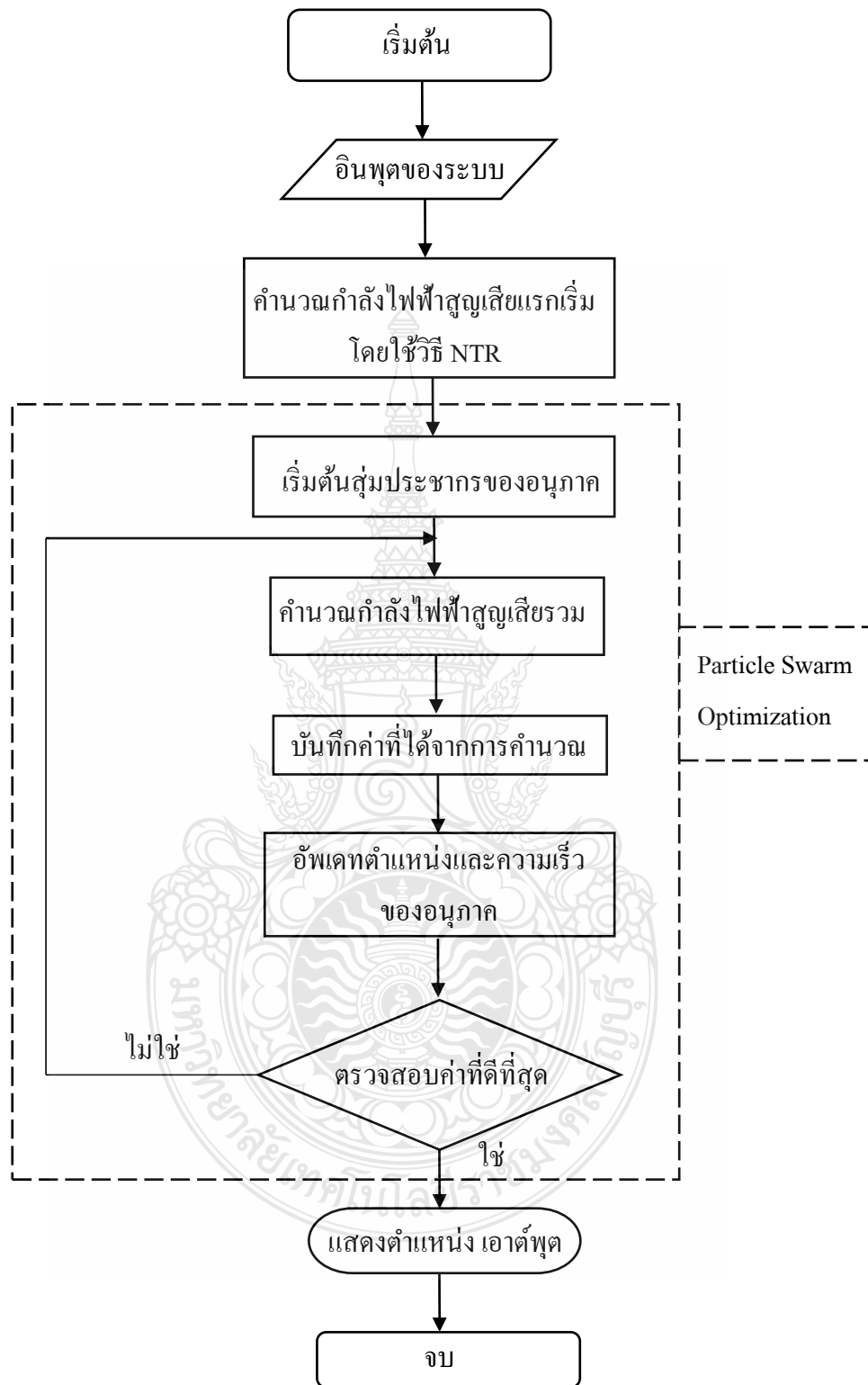
ขั้นตอนที่ 4 ทำการบันทึกค่าแรงดันและกระแสที่บัสต่างๆ

ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงแรงดันและกระแสที่บัสต่างๆ โดยคำนวณจากค่าแรงดันและกระแสที่บันทึก

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบการทำงานของกระบวนการว่าครบกำหนดที่ตั้งไว้หรือไม่ ถ้าไม่ให้นำค่าจากการปรับปรุงไปสู่กระบวนการที่ 3 ถ้าได้ครบกำหนดให้ไปสู่กระบวนการที่ 7 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 ได้ขนาดของแรงดัน และกระแสที่บัสต่างๆที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 8 แสดงผลฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีที่สุดสำหรับตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะติดตั้ง FACTS และเพื่อให้สอดคล้องกับระบบใหม่มีกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวมต่ำที่สุด



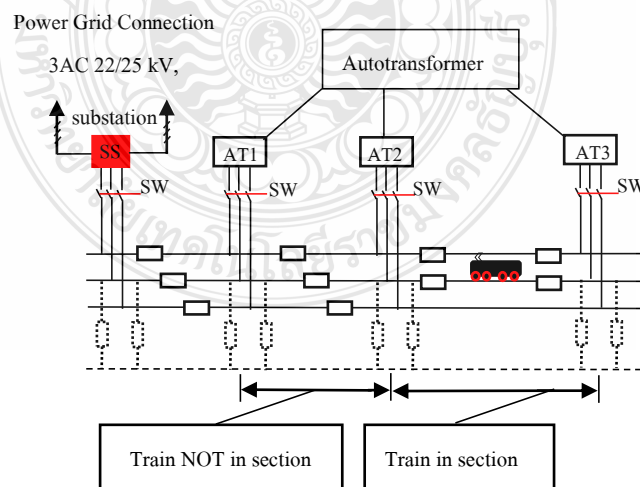
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB M-File

จากรูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ในกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

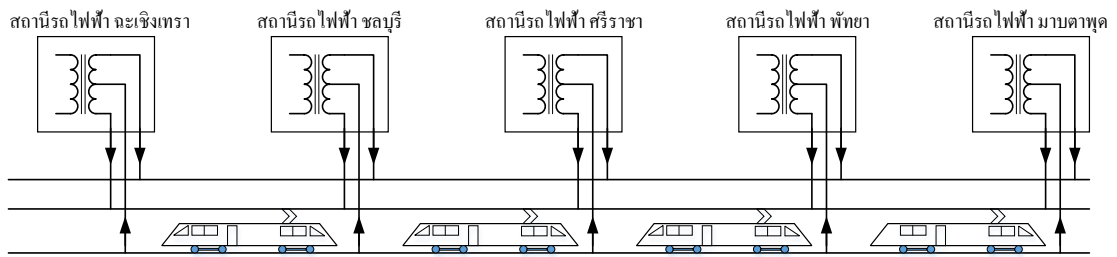
1. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์
2. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้ง FACTS แบบต่อ ขนาน โดยใช้ SVC
3. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้ง FACTS แบบต่อ ขนาน โดยใช้ STATCOM

### 3.2 กรณีศึกษา

โครงสร้างของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับสายป้อน 2 เส้น ขนาด 2x25 kV 50 Hz ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ระบบสายป้อน 2 เส้น (2x25 kV Systems) จะมีสายป้อนอีก 1 เส้นป้อนเข้ามาในวงจรเพื่อช่วยให้แหล่งจ่ายมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ระบบนี้จะต้องใช้ร่วมกับหม้อแปลงออโต้ (Autotransformer) ในการพิจารณาดำเนินการที่จะติดตั้งหม้อแปลงจะเหมือนกับระบบสายป้อนเดียวความเร็วของรถไฟฟ้าสามารถใช้ความเร็วได้สูงกว่าระบบสายป้อนวงจรเดียว เนื่องจากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าทำได้สูงกว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 50 kV (Line to line) สำหรับข้อมูลระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจะใช้เป็นกรณีศึกษาสามารถดูได้ดังรูป 3.2 และรูปที่ 3.3

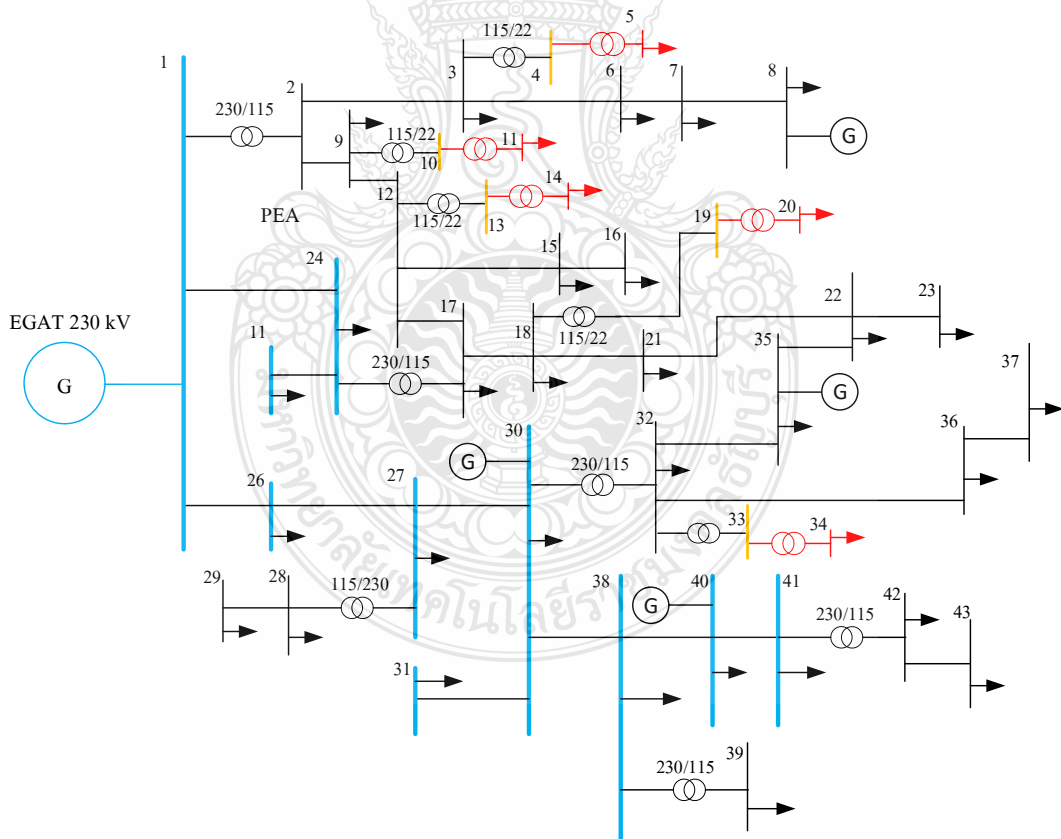


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรสายกำลังไฟฟ้าสำหรับ 2x25 kV 50 Hz



รูปที่ 3.3 สถานีรถไฟฯ ความเร็วสูงสำหรับ 2x25 kV 50 Hz เมื่อเชื่อมกับอโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์

โดยจะพิจารณา Substation 1 Substation ซึ่งหม้อแปลงขนาด 25 MVA จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งจำลองมาจาก Substation ที่ใช้งานในระบบส่งจ่ายของ รถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยให้ตัวรถไฟเป็นโหลดคงที่ขนาด 4.8 MW ต่อ 1 ขบวน และจากรูปที่ 3.2 ไดอะแกรมจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และอยู่ที่ตำแหน่งที่ต่างกันออกไปของสถานีรถไฟฯ ความเร็วสูงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมระบบส่งจ่ายไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือกรณีเพิ่มโหลดระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง

จากรูปที่ 3.4 โดอะแกรมระบบส่งจ่ายไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพิ่มโหลดระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยเพิ่มการจำลองติดตั้งที่ สถานีไฟฟ้าบางละมุง, สถานีไฟฟ้าชลบุรี, สถานีไฟฟ้าระยอง, สถานีไฟฟ้าศรีราชา, สถานีไฟฟ้าระยอง 2 เชื่อมเข้ากับสถานีรถไฟไฟฟ้าและลำดับตัวเลขของแต่ละบัสที่เชื่อมต่อรถไฟฟ้าความเร็วสูงในดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

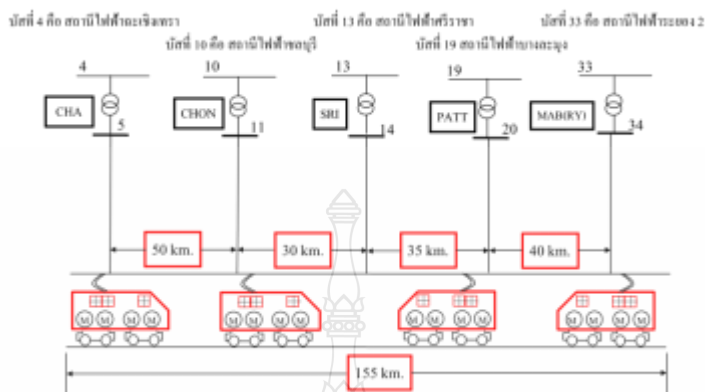
ตารางที่ 3.1 ลำดับตัวเลขของสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เชื่อมต่อรถไฟฟ้าความเร็วสูง จากรูปที่ 3.1

ลำดับที่	คำย่อภาษาอังกฤษ	ชื่อสถานีไฟฟ้าแรงสูง	ระดับแรงดัน (kV)
4	CC	ระยอง	22
10	CB	ชลบุรี	22
13	SC	ศรีราชา	22
19	BL	บางละมุง	22
33	RY2	ระยอง 2	22

ตารางที่ 3.2 ลำดับตัวเลขแต่ละบัสที่เชื่อมต่อสถานีรถไฟความเร็วสูง จากรูปที่ 3.2

ลำดับที่	ชื่อสถานีรถไฟความเร็วสูง	ระดับแรงดัน (kV)
5	ระยอง	22/25
11	ชลบุรี	22/25
14	ศรีราชา	22/25
20	พัทยา	22/25
34	มาบตาพุด	22/25

### 3.2.2 ตัวอย่างไดอะแกรมเบื้องต้นที่ใช้จำลองในระบบ



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างไดอะแกรมเบื้องต้นที่ใช้จำลองในระบบ

จากรูปที่ 3.5 ตัวอย่างไดอะแกรมเบื้องต้นที่ใช้จำลองในระบบส่งจ่ายรถไฟฟ้าความเร็วสูงในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย มีระยะทางระหว่างแต่ละสถานี ซึ่งคาดการณ์โดยประมาณดังรูปที่ 3.5 โดยการจำลองของส่งจ่ายระบบไฟฟ้าให้กับสถานีรถไฟฟ้าความเร็วสูงมี 5 สถานี ซึ่งเริ่มต้นจากสถานีชุมทางบางซื่อ (CHA), สถานีชลบุรี(CHON), สถานีศรีราชา(SRI), สถานีไฟฟ้าพญา (PATT) และสถานีมาบตาพุดจังหวัดระยอง(MAB RY2) การจำลองระบบส่งจ่ายรถไฟฟ้าความเร็วสูงนั้นแบ่งเป็น 4 รูปแบบ จากการจำลองของเวลาเดินรถไฟฟ้าความเร็วสูงในช่วงเวลาเร่งด่วนตั้งแต่เวลา 07.00น.ถึงเวลา 08.30น. ในขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงนั้นเคลื่อนที่ออกจากสถานีไปแล้ว โดยการจำลองของเวลาเดินรถของรถไฟฟ้าความเร็วสูงแบ่งได้ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 เวลาเดินรถไฟฟ้าความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 07.00 น.

ต้นทาง	ปลายทาง	ออกเวลา	ถึงเวลา	จอดรอผู้โดยสาร
CHA	CHON	07.00 น.	07.19 น.	5 minute
CHON	SRI	07.00 น.	07.12 น.	5 minute
SRI	PATT	07.00 น.	07.14	5 minute
PATT	MAB	07.00 น.	07.15	5 minute
MAB	PATT	07.00 น.	07.15	5 minute

ตารางที่ 3.4 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 07.30 น.

ต้นทาง	ปลายทาง	ออกเวลา	ถึงเวลา	จอดรอผู้โดยสาร
CHA	CHON	07.30 น.	07.49 น.	5 minute
CHON	SRI	07.24 น.	07.36 น.	5 minute
SRI	PATT	07.17 น.	07.31 น.	5 minute
PATT	MAB	07.20 น.	07.35 น.	5 minute
MAB	PATT	07.20 น.	07.35 น.	5 minute
PATT	SRI	07.20 น.	07.34 น.	5 minute

ตารางที่ 3.5 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 08.00 น.

ต้นทาง	ปลายทาง	ออกเวลา	ถึงเวลา	จอดรอผู้โดยสาร
CHA	CHON	08.00 น.	08.19 น.	5 minute
CHON	SRI	07.54 น.	08.05 น.	5 minute
SRI	PATT	07.41 น.	07.56 น.	5 minute
PATT	MAB	07.36 น.	07.51 น.	5 minute
MAB	PATT	07.56 น.	08.41 น.	5 minute
PATT	SRI	07.39 น.	07.54 น.	5 minute
SRI	CHON	07.39 น.	07.51 น.	5 minute

ตารางที่ 3.6 เวลาเดินรถไฟฟ้ความเร็วสูงระหว่างเมือง เริ่มเวลา 08.30 น.

ต้นทาง	ปลายทาง	ออกเวลา	ถึงเวลา	จอดรอผู้โดยสาร
CHA	CHON	08.30 น.	08.49 น.	5 minute
CHON	SRI	08.24 น.	08.36 น.	5 minute
SRI	PATT	08.10 น.	07.24 น.	5 minute
PATT	MAB	08.01 น.	07.16 น.	5 minute
MAB	PATT	07.21 น.	08.36 น.	5 minute
PATT	SRI	08.46 น.	09.01 น.	5 minute
SRI	CHON	08.01 น.	08.13 น.	5 minute
CHON	CHA	07.56 น.	08.37 น.	5 minute

ด้วยระยะทางระหว่างสถานีจากรูปที่ 3.4 และตารางเวลาเดินรถไฟฟ้าความเร็วสูงดังตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.6 ซึ่งแบ่งออกเป็นระยะทางสถานีรถไฟต่อเวลาโดยประมาณดังนี้

- 1) จากสถานีรถไฟพะเชิงเทราถึงสถานีรถไฟชลบุรี เท่ากับ 50 km./19 minute
- 2) จากสถานีรถไฟชลบุรีถึงสถานีรถไฟศรีราชา เท่ากับ 30 km./12 minute
- 3) จากสถานีรถไฟศรีราชาถึงสถานีรถไฟพัทยา เท่ากับ 35 km./14 minute
- 4) จากสถานีรถไฟพัทยาสู่สถานีรถไฟมาบตาพุด จ.ระยอง เท่ากับ 40 km./15 minute

3.2.2 ข้อมูลพารามิเตอร์ข้อมูลพารามิเตอร์ ที่นำมาใช้ในการจำลองระบบส่งจ่ายให้กับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง

1. ความต้านทานของสายที่ใช้ในระบบ โดยในระบบส่งจ่ายจะใช้สาย CU AC-107 ซึ่งมี ความต้านทานสูงสุดที่  $0.171 \Omega / km$

2. ค่าความต้านทานเนื่องจากความเหนี่ยวนำ ( Reactance ,  $X_L$  )

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$$

$$X_L = 2\pi f \times 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{D}{r'} \right)$$

$$X_L = 2\pi f \times 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{12.30}{0.7788 \times \frac{12.30}{2}} \right) \Omega / m$$

$$5.9253 \times 10^{-5} \Omega / m = 0.05926 \Omega / km$$

3. Power Transformer ที่ใช้ในระบบส่งจ่ายใน Substation ของรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง เป็นแบบ Single Phase Transformer ขนาด 25 MVA แรงดัน 22/25 kV

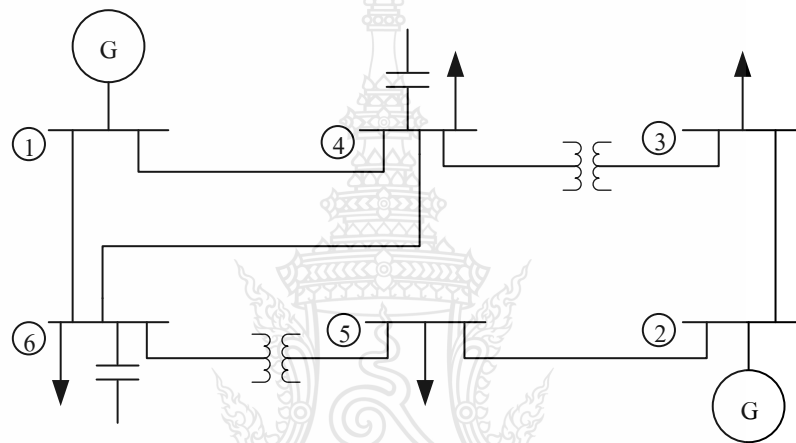
4. ขนาดของกำลังไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงมีขนาด  $1.2 MW$  โดย 1 ขบวนสำหรับหัวรถจักรมี 4 เครื่อง จะเท่ากับ  $1.2 MW \times 4 = 4.8 MW$

### 3.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบจำหน่ายจะต้องคำนึงถึงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะช่วยให้ทราบถึงระดับของแรงดัน และกำลังไฟฟ้าในระบบ และสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อวางแผนปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นได้อีกด้วย ระบบที่นำมาทดสอบและใช้สำหรับอ้างอิงในงานวิจัยนี้ คือ ระบบส่งจ่าย IEEE 6 BUS ซึ่ง เป็นระบบส่งจ่ายแบบลูปเช่นเดียวกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก โดยจะนำเอา



ค่าพารามิเตอร์ของระบบมาวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบด้วยวิธี วิธีนิวตันราฟสัน โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์ คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ เพื่อหาค่าแรงดัน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและผลการจำลองระบบจำหน่าย คว้าบัสไหน ของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ จะเป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อ ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่าย แบบรูป 6 บัส ของมาตรฐาน IEEE แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบทดสอบ 6 บัส

จากรูปที่ 3.6 แสดงถึงลักษณะของระบบทดสอบ IEEE 6 Bus ที่นำมาใช้เป็นระบบอ้างอิง โดยมีลักษณะของระบบเป็นรูป

### 3.3.1 ผลการทดสอบระบบ IEEE 6 Bus

จากการทดสอบระบบ IEEE 6 Bus เมื่อคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้วิธีนิวตันราฟสันในระบบ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสียในระบบเท่ากับ 10.421 MW และ 33.018 kVAR

### ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า IEEE 6 bus

Bus NO.	Vm pu.	Angle (deg)	$P_g$ MW	$Q_g$ MVAR
1	1.050	0	95.421	24.696
2	1.1	-5.034	50	29.049
3	0.878	-12.967	0	0
4	0.977	-9.887	0	0
5	0.923	-12.973	0	0
6	0.957	-12.466	0	0

### 3.4 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาใช้

ระบบจำหน่ายที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบจำหน่ายแบบ 43 บัส ในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย และนำระบบของรถไฟฟ้าความเร็วสูงเพิ่มในระบบที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของสถานีรถไฟฟ้าความเร็วสูงของแต่ละสถานี โดยการนำข้อมูลต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายมาใช้ในโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและผลการจำลองระบบจำหน่าย คว้าบัสไหน ของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ จะเป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อ ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ในส่วนของกำลังไฟฟ้รวมของโหลดเท่ากับ 1860.725 MW 612.151 MVAR กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าระบบเท่ากับ 1869.226 MW และ 1160.724 MVAR โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน เท่ากับ 100 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 230 kV

### 3.5 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และเพิ่ม โหลดที่เป็นรฟไฟฟ้าความเร็วสูง รวมทั้งหมด 43 บัส ในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ก่อนติดตั้ง FACTS มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 1860.725 MW , 612.151 MVAR กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ สูญเสียรวมในระบบเท่ากับ 1869.226 MW , 1160.724 MVAR โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน เท่ากับ 100 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 230 kV

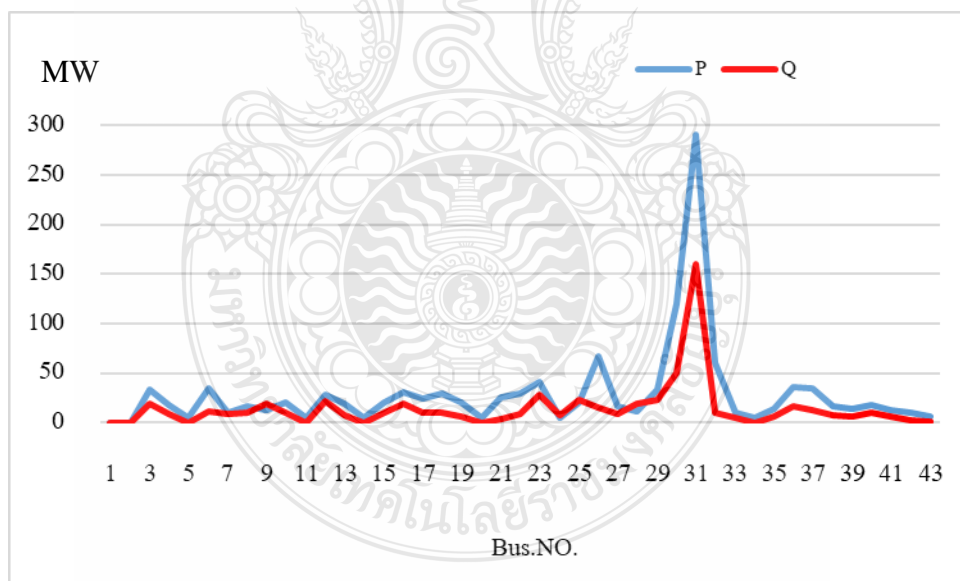


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

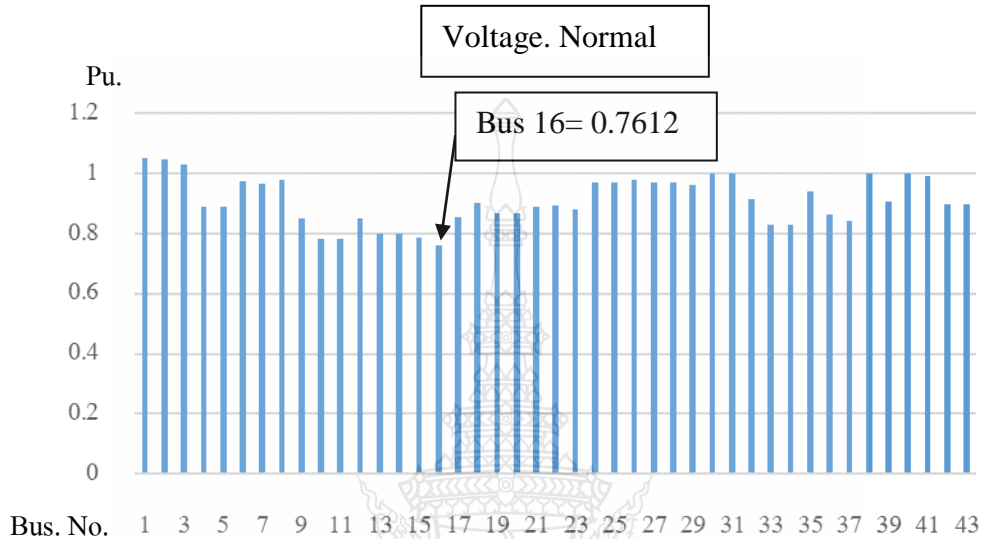
ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบจำหน่าย 43 บัส ของเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก เพิ่มด้วยโหลดให้กับห้วงจรที่เป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูงโดยการนำข้อมูลต่าง ๆ ของระบบมาใช้ในโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้าของระบบและหาบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย โดยใช้วิธี กลุ่มอนุภาคในการหาตำแหน่งที่เหมาะสม คว้าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุด ก็จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยใช้ FACTS 2 ชนิด คือ SVC และ STATCOM ผลการจำลองค่าต่าง ๆ ของระบบจำหน่าย แสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการดำเนินงาน



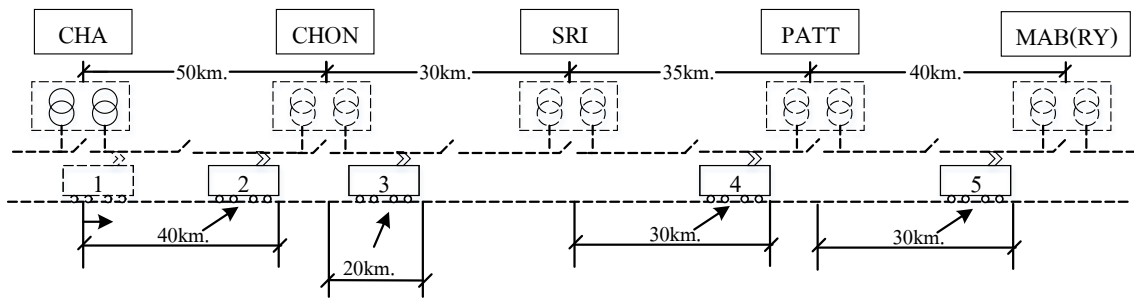
รูปที่ 4.1 ค่าประมาณกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่ต้องการของระบบในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

จากรูปที่ 4.1 ค่าประมาณกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่ต้องการของระบบในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือบัสที่ 31 เท่ากับ 290 MW 60.1 MVAR ซึ่งเป็นพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง



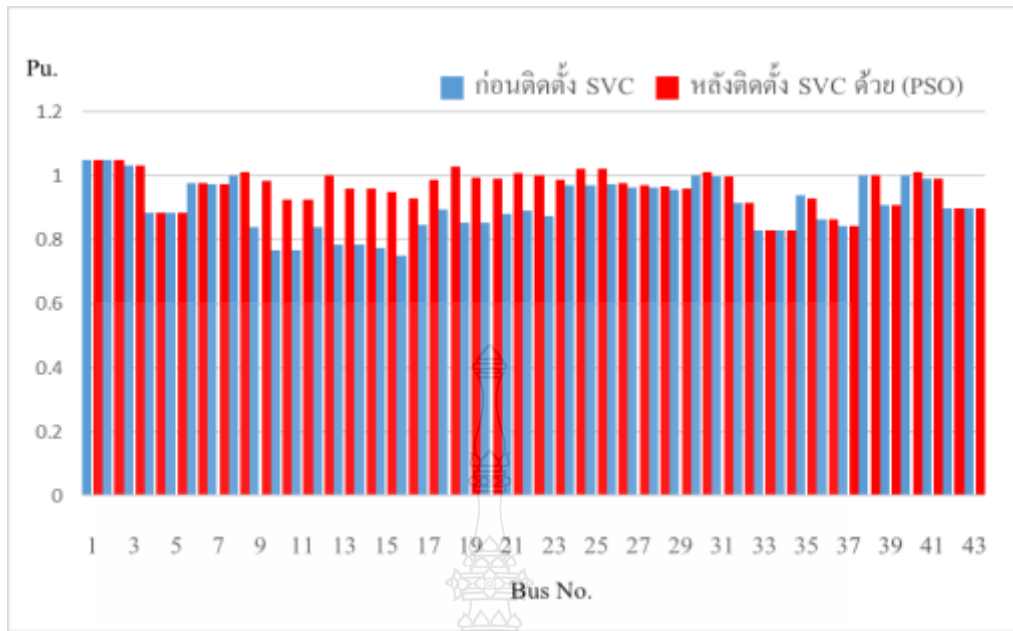
**รูปที่ 4.2** แรงดันไฟฟ้า ในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกขณะยังไม่มีการไฟฟ้าความเร็วสูง

รูปที่ 4.2 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า ในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกขณะยังไม่มีการไฟฟ้าความเร็วสูงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดคือบัสที่ 16 เท่ากับ 0.7612 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมชลบุรี(บ่อวิน) จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่สถานีจ่ายไฟฟ้า หรือ PV BUS และมีนิคมอุตสาหกรรมชั้นนำดังต่อไปนี้ นิคมอุตสาหกรรมเหมราชชลบุรี,นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร,นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร (โครงการ 2),นิคมอุตสาหกรรมปิ่นทอง,นิคมอุตสาหกรรมปิ่นทอง (แหลมฉบัง),นิคมอุตสาหกรรมปิ่นทอง (โครงการ 3),นิคมอุตสาหกรรมปิ่นทอง (โครงการ 4),นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง,นิคมอุตสาหกรรมปิ่นทอง (โครงการ 5),นิคมอุตสาหกรรมบ้านบึง,นิคมอุตสาหกรรมเหมราชชลบุรี (โครงการ 2),นิคมอุตสาหกรรมเหมราชอีสเทิร์นซีบอร์ด แห่งที่ 2,นิคมอุตสาหกรรมเหมราชอีสเทิร์นซีบอร์ด แห่งที่ 3,นิคมอุตสาหกรรมเหมราชอีสเทิร์นซีบอร์ด แห่งที่ 4,นิคมอุตสาหกรรมยามาโตะ อินดัสตรีส์

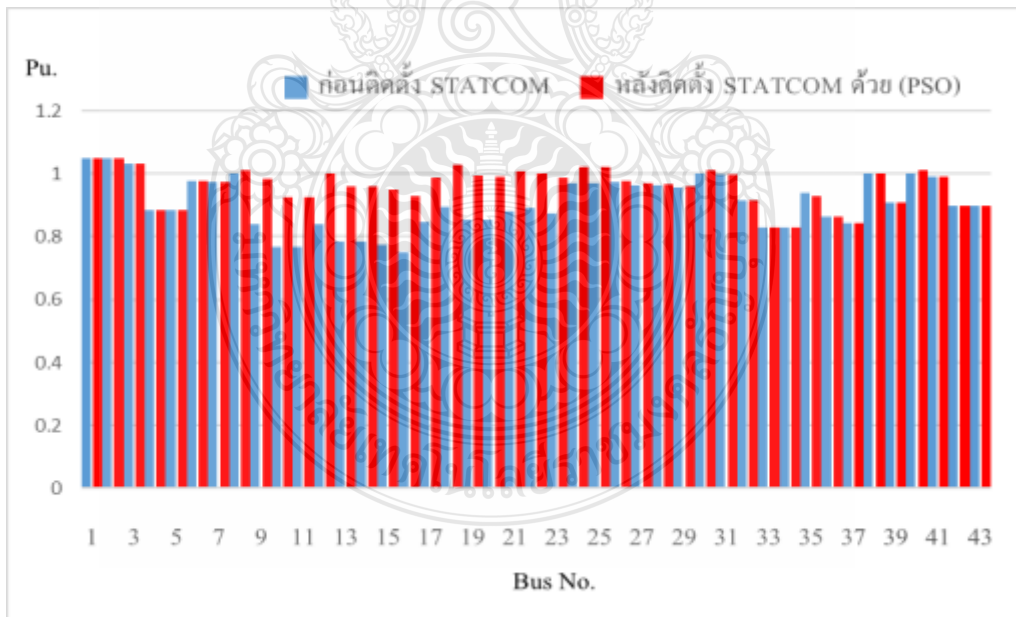


รูปที่ 4.3 ไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 07.00น.

จากรูปที่ 4.3 เป็นไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 07.00น. วึ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 160-200 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความเร็วของรถไฟฟ้าความเร็วสูงเท่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและอยู่ตำแหน่งดังต่อไปนี้ ขบวนที่ 1 เริ่มออกจากต้นทางสถานีรถไฟฟ้าความเร็วสูงจะเชิงเทราปลายทางสถานีชลบุรี ขบวนที่ 2 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้าจะเชิงเทรา 40 กิโลเมตรกำลังเข้าสู่สถานีชลบุรี ขบวนที่ 3 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้าชลบุรี 20 กิโลเมตรกำลังเข้าสู่สถานีรถไฟฟ้าศรีราชา ขบวนที่ 4 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้าศรีราชา 30 กิโลเมตรกำลังเข้าสู่สถานีพัทยา ขบวนที่ 5 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้าพัทยา 30 กิโลเมตรกำลังเข้าสู่สถานีรถไฟฟ้ามมาตพุด จากการจำลองพบว่าแรงดันไฟฟ้า ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC รูปที่ 4.4 และ STATCOM รูปที่ 4.5 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



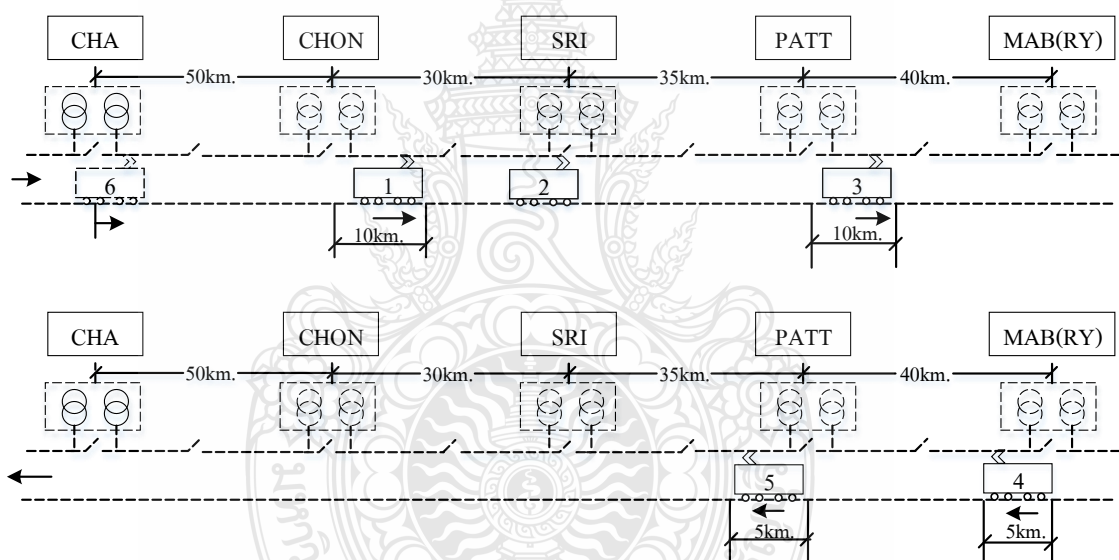
รูปที่ 4.4 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4.5 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 4.4 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง SVC มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 16 เท่ากับ 0.7674 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง SVC ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 26.5933 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.5 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง STATCOM มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 11 เท่ากับ 0.7674 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง STATCOM ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 31.12 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

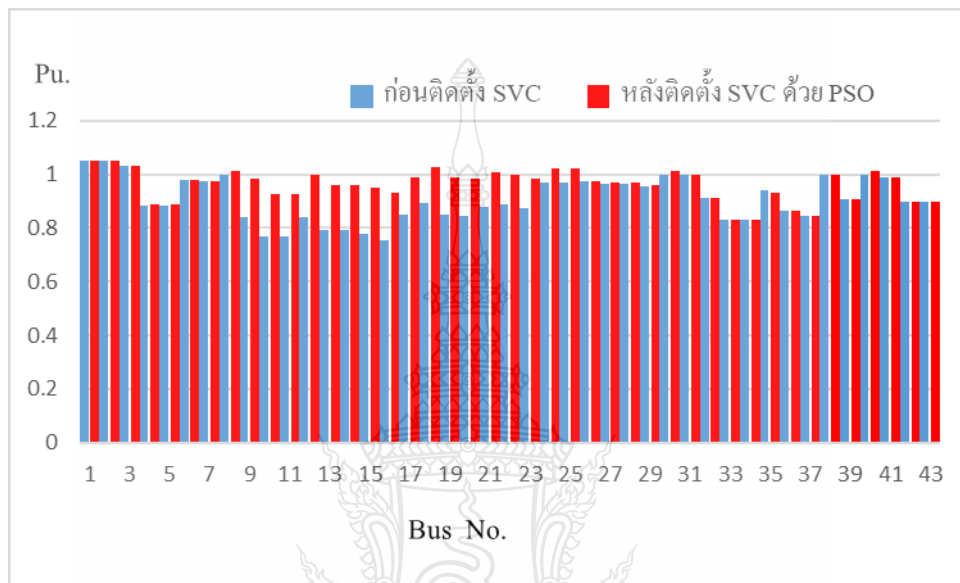


รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมแบบจำลองรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 07.30น.

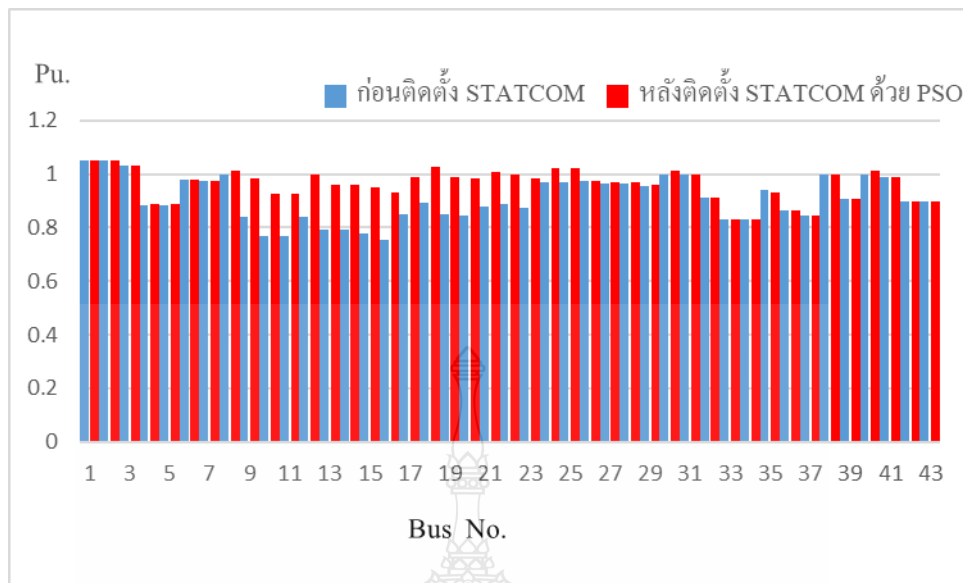
จากรูปที่ 4.6 เป็น ไดอะแกรมแบบจำลองรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 07.30น. วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 160 ถึง 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความเร็วของรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงเท่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและอยู่ตำแหน่งดังต่อไปนี้ ขบวนที่ 6 เริ่มออกจากต้นทางสถานีรถไฟความเร็วสูงฉะเชิงเทราปลายทางสถานีชลบุรี ขบวนที่ 1 คือขณะที่รถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟาชลบุรี 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 2 คือขณะที่รถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงจอดสถานีรถไฟฟาศรีราชา ขบวนที่ 3 คือขณะที่รถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีพัทยา 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 4 คือ



ขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้ามารดาพุด 5 กิโลเมตร ขบวนที่ 5 คือ ขณะที่รถไฟฟ้าวิ่งออกจากสถานีพญา 5 กิโลเมตร จากการจำลองพบว่าแรงดันไฟฟ้า ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC รูปที่ 4.7 และ STATCOM รูปที่ 4.8 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



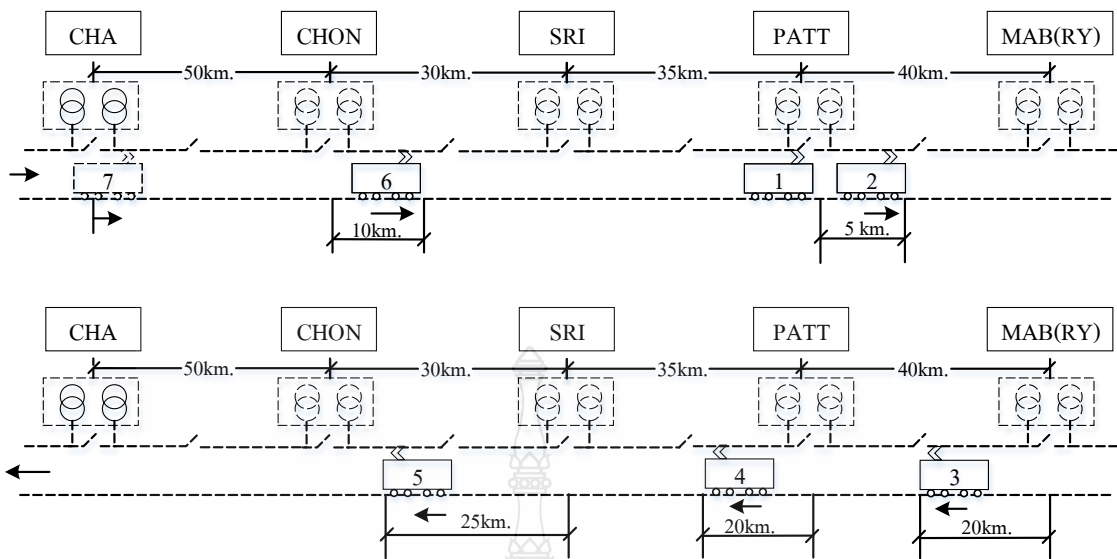
รูปที่ 4.7 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4.8 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

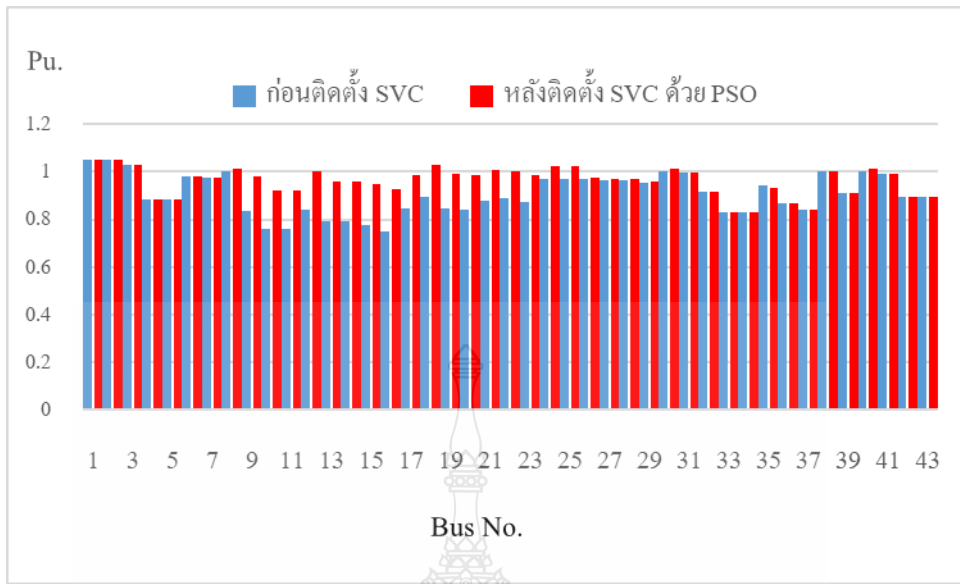
จากรูปที่ 4.7 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง SVC มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 16 เท่ากับ 0.7515 เฟอร์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบอวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง SVC ที่บัส 11 ที่สถานีรถไฟความเร็วสูงชลบุรี ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 26.6733 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.8 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง STATCOM มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 16 เท่ากับ 0.7515 เฟอร์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบอวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง STATCOM ที่สถานีรถไฟความเร็วสูงชลบุรี ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 30.84 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

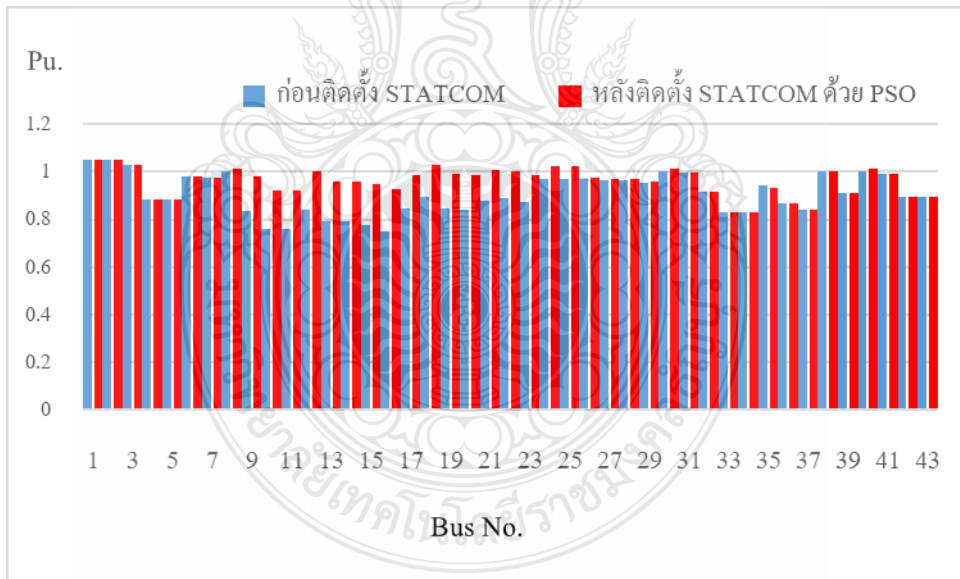


รูปที่ 4.9 ไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 08.00น.

จากรูปที่ 4.9 เป็นไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 08.00น. วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 160-200 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความเร็วของรถไฟฟ้าความเร็วสูงเท่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและอยู่ตำแหน่งดังต่อไปนี้ ขบวนที่ 7 เริ่มออกจากต้นทางสถานีรถไฟฟ้าความเร็วสูงจะเชิงเทราปลายทางสถานีชลบุรี ขบวนที่ 6 คือขบวนที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้าชลบุรี 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 1 คือขบวนที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงจอดสถานีรถไฟฟ้าพญา ขบวนที่ 2 คือขบวนที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีพญา 5 กิโลเมตร ขบวนที่ 3 คือขบวนที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้ามารดาพุด 20 กิโลเมตร ขบวนที่ 4 คือ ขบวนที่รถไฟฟ้าวิ่งออกจากสถานีพญา 20 กิโลเมตร ขบวนที่ 5 คือ ขบวนที่รถไฟฟ้าวิ่งออกจากสถานีศรีราชา 25 กิโลเมตร จากการจำลองพบว่าแรงดันไฟฟ้า ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC รูปที่ 4.10 และ STATCOM รูปที่ 4.11 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



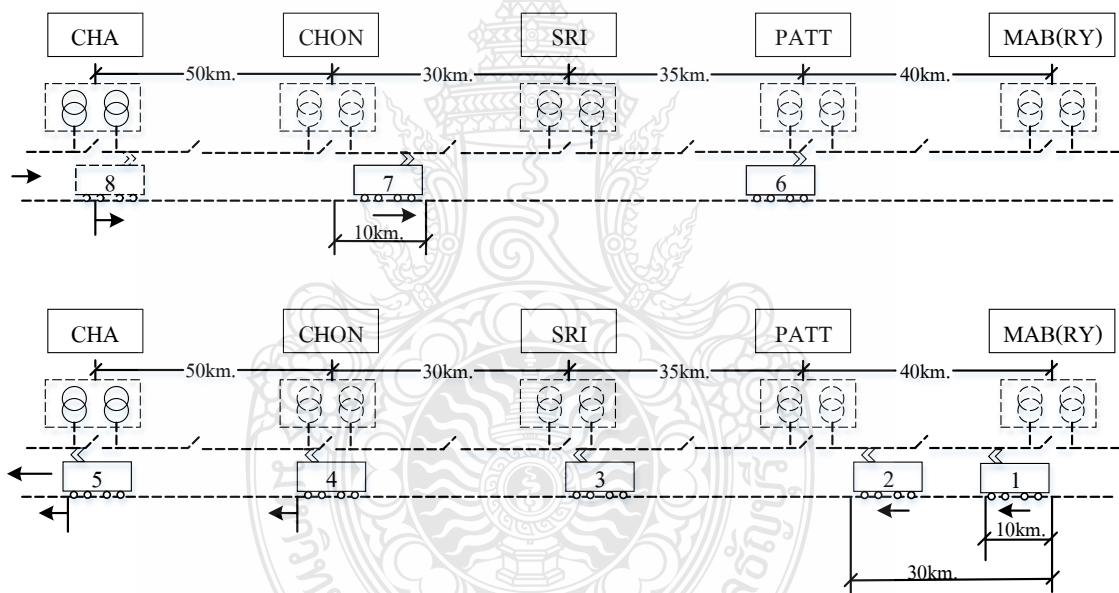
รูปที่ 4.10 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4.11 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 4.10 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง SVC มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 16 เท่ากับ 0.7497 เปรอร์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง SVC ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 25.933 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

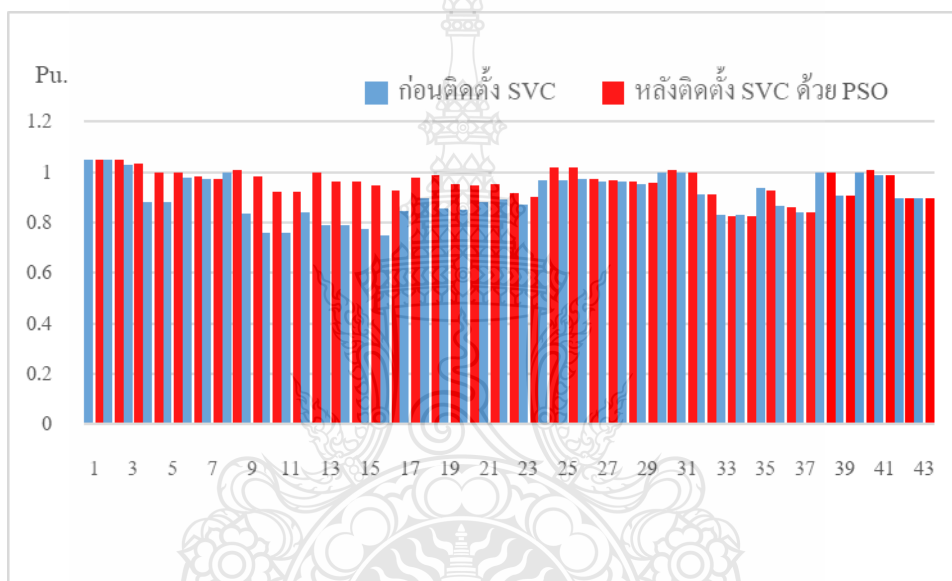
จากรูปที่ 4.11 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง STATCOM มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 11 เท่ากับ 0.7497 เปรอร์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง STATCOM ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 30.10 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น



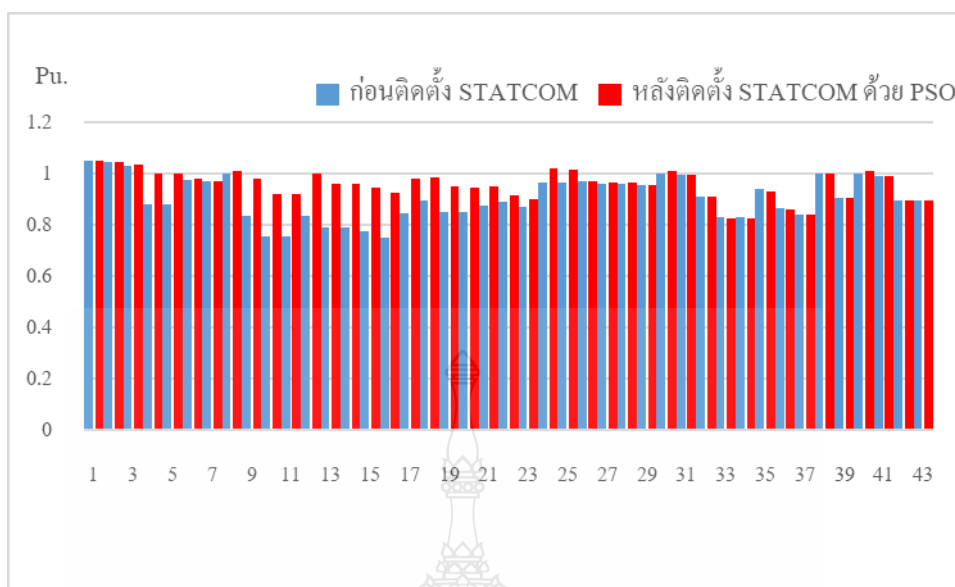
รูปที่ 4.12 ไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 08.30น.

จากรูปที่ 4.9 เป็นไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 08.30น. วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 160-200 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความเร็วของรถไฟฟ้าความเร็วสูงเท่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและอยู่ตำแหน่งดังต่อไปนี้ ขบวนที่ 8 เริ่มออกจากต้นทางสถานีรถไฟความเร็วสูงฉะเชิงเทราปลายทางสถานีชลบุรี ขบวนที่ 7 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟชลบุรี 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 6 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงจอดสถานีรถไฟพัทยา

ขบวนที่ 1 คือขณะที่รถไฟความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีมาพบจุด 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 2 คือ ขณะที่รถไฟความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟมาพบจุด 30 กิโลเมตรกำลังเข้าสู่สถานีรถไฟ พัทยา ขบวนที่ 3 คือรถไฟความเร็วสูงจอดที่สถานีศรีราชา ขบวนที่ 4 คือ ขณะที่รถไฟกำลังวิ่ง ออกจากสถานีชลบุรีปลายทางฉะเชิงเทรา ขบวนที่ 5 คือ ขณะที่รถไฟกำลังวิ่งออกจากสถานี ฉะเชิงเทราปลายทางกรุงเทพมหานคร จากการจำลองพบว่าแรงดันไฟฟ้า ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้ง ของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC รูปที่ 4.13 และ STATCOM รูปที่ 4.14 ด้วยเทคนิคการหาค่าความ เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4.13 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความ เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

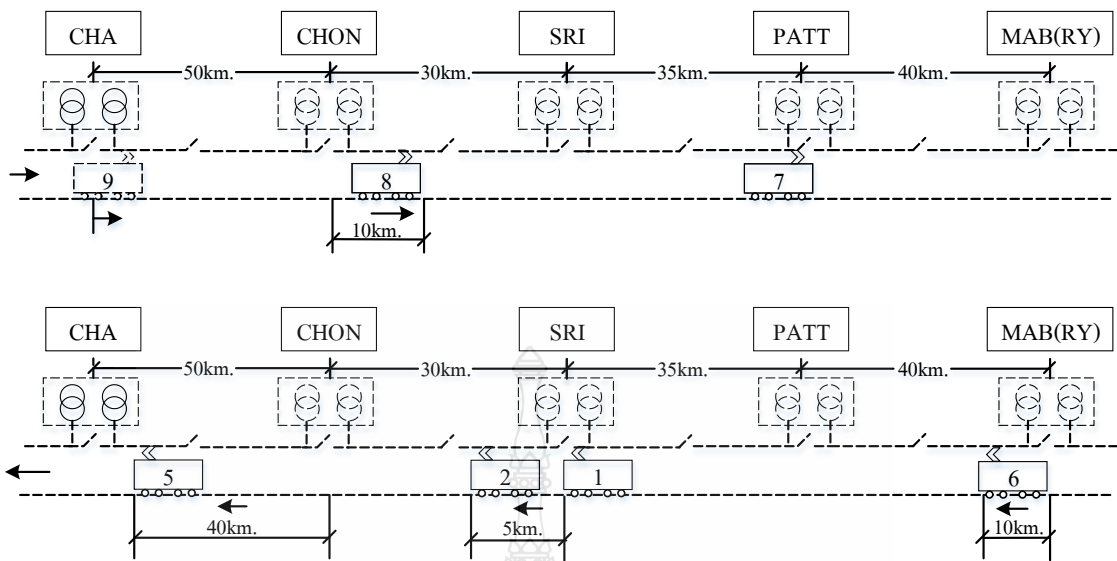


รูปที่ 4.14 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 4.13 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง SVC มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 16 เท่ากับ 0.7499 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง SVC ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 35.973 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.14 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง STATCOM มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 11 เท่ากับ 0.7499 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง STATCOM ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 40.14 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

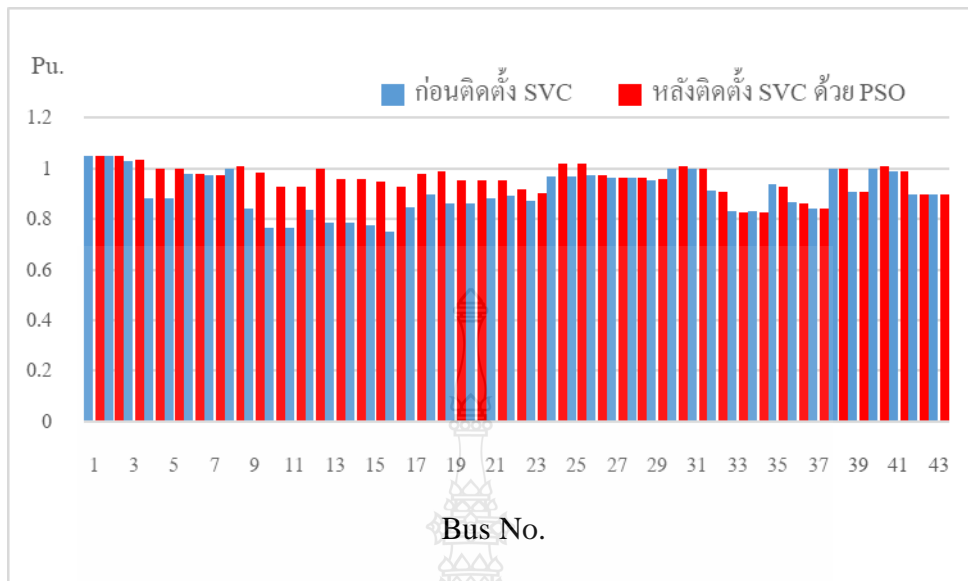




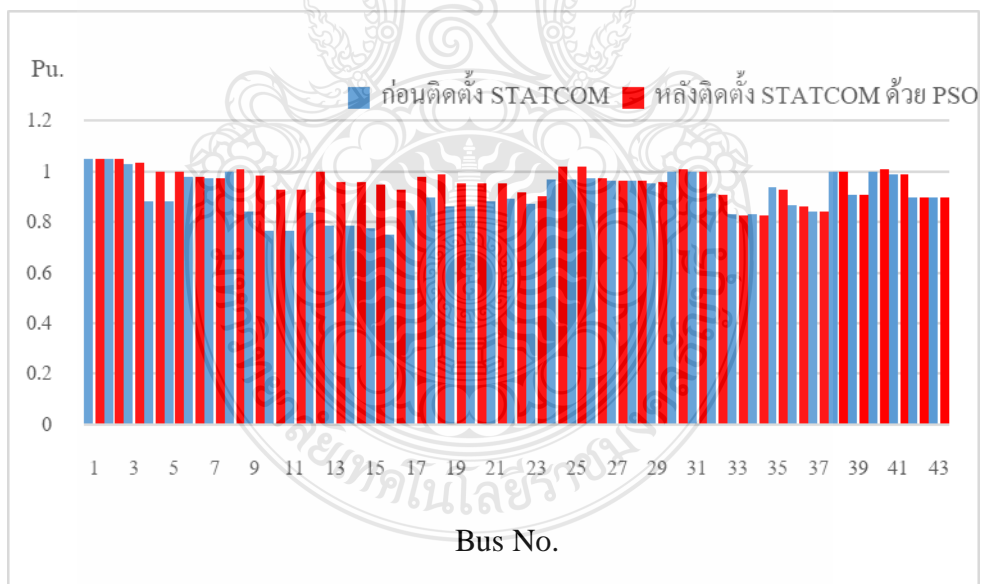
รูปที่ 4.15 ไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 09.00น.

จากรูปที่ 4.15 เป็นไคอะแกรมแบบจำลองรถไฟฟ้าความเร็วสูงช่วงเวลา 09.00น. วึ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 160-200 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความเร็วของรถไฟฟ้าความเร็วสูงเท่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและอยู่ตำแหน่งดังต่อไปนี้ ขบวนที่ 9 เริ่มออกจากต้นทางสถานีรถไฟฟ้าความเร็วสูงจะเชิงเทราปลายทางสถานีชลบุรี ขบวนที่ 8 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีรถไฟฟ้าชลบุรี 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 7 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงจอดสถานีรถไฟฟ้าพัทยา ขบวนที่ 6 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีมาบตาพุด 10 กิโลเมตร ขบวนที่ 1 รถไฟฟ้าความเร็วสูงจอดที่สถานีศรีราชา ขบวนที่ 2 คือขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงวิ่งออกจากสถานีศรีราชา 5 กิโลเมตร ขบวนที่ 3 คือขณะที่รถไฟฟ้ากำลังวิ่งออกจากสถานีชลบุรี 40 กิโลเมตรกำลังเข้าสู่สถานีรถไฟฟ้าจะเชิงเทรา ขบวนที่ 4 คือ ขณะที่รถไฟฟ้ากำลังวิ่งออกจากสถานีจะเชิงเทราออกไป 15 กิโลเมตร ซึ่งขบวนที่ 4 จะไม่มีการคำนวณ และการจำลองพบว่าแรงดันไฟฟ้า ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC รูปที่ 4.16 และ STATCOM รูปที่ 4.17 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค





รูปที่ 4.16 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4.17 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 4.16 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง SVC มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 16 เท่ากับ 0.7502 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง SVC ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 35.95 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.17 ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า STATCOM ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค พบว่าก่อนการติดตั้ง STATCOM มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ บัส 11 เท่ากับ 0.7502 เปรอ์ยูนิต ซึ่งเป็นพื้นที่สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อวินระดับแรงดัน 115 kV และหลังจากติดตั้ง STATCOM ที่บัส 12 ด้วยเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ด้วยขนาด 40.12 MVAR ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้า มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

## สรุป

จากผลการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย สามารถสรุปประเด็นการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ระบบจำหน่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบจำหน่าย 43 บัส ของเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 1860.725 MW และ 612.151 MVAR โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 100 MVA การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้การคำนวณแบบนิวตันราฟสันและใช้เทคนิคการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย สามารถสรุปประเด็นการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ระบบจำหน่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบจำหน่าย 43 บัส ของเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ที่มีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 1860.725 MW และ 612.151 MVAR โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 100 MVA การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้การคำนวณแบบนิวตันราฟสันและใช้เทคนิคการหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ ผลการจำลองการติดตั้ง FACTS จากการติดตั้ง SVC และ STATCOM ตามการจำลองในบทที่ 4 มีเสถียรภาพในระบบจำหน่ายที่ดีขึ้น ส่วนบัสอื่นๆที่อยู่ไกลออกไปนั้น มีบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ในระบบทำให้บางบัสในส่วนที่เหลือยังคงมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเฉพาะการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในของระบบจำหน่ายในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่เป็นไปได้จริง ระบบที่ทดสอบเป็นระบบสามเฟสแบบสมดุล พิจารณาเฉพาะการทำงานในช่วงเวลาคงตัวแบบจำลอง โหลดจะใช้เป็นค่ากำลังคงที่ที่วิทยานิพนธ์นี้ไม่เน้นถึงการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าทางด้านอื่น ๆ ดังนั้นหากที่ผู้สนใจในวิทยานิพนธ์นี้ควรมีการศึกษาและพิจารณาเพิ่มเติม ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย และภาพรวมของโหลดในระดับ 230kV 115kV 22kV ซึ่งในอนาคตอาจมีการขยายระบบให้เชื่อมกับเส้นทางอื่นๆเพิ่มเติม บทความนี้จึงครอบคลุมเฉพาะเส้นทางส่งจ่ายที่ใช้เชื่อมสถานีชุมทางฉะเชิงเทราถึงสถานีมาบตาพุด (จังหวัดระยอง)



## บรรณานุกรม

- [1] นายปิยพงศ์ พู่ฉิมชัย. การพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกกับอนาคตธุรกิจก่อสร้างไทย. หน้า 1-6
- [2] ดร.ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์. มาตรฐานสากลด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ตอนที่ 1 กรณีศึกษา.รถไฟความเร็วสูง ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ October-November 2011. Vol.38 No.219
- [3] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. เทคนิคการควบคุมเสถียรภาพแรงดัน. โครงการจัดทำตำราและเอกสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. หน้า65-74
- [4] Rolf Grünbaum. **FACTS for power quality improvement in grids feeding high speed rail Traction.** Member. IEEE ABB Power Technologies AB Power Systems FACTS, SE-721 Vasteras, Sweden, vol. 40,September 2007.pp.219-263
- [5] Jaroslaw Guzinski, Haitham Abu-Rub, Marc Diguët, Zbigniew Krzeminski, Arkadiusz Lewicki. **Speed and Load Torque Observer Application in High-Speed Train Electric Drive.** IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. VOL. 57. No. 2. FEBRUARY 2010 .pp.565-574
- [6] Jako Kilter, Tanel Sarnet, Triin Kangro. **Modelling of High-Speed Electrical Railway System for Transmission Network Voltage Quality Analysis: Rail Baltic Case Study.** IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 21. no. 2, April 2006. pp. 979–986
- [7] Mohammad Ali Akbari Baseri, Mehdi Niaki Nezhad, Mohammad Ali Sandidzadeh. **Compensating Procedures for Power Quality Amplification of AC Electrified Railway Systems Using FACTS.** 2011 2nd Power Electronics. Drive Systems and Technologies Conference. pp.518-521
- [8] อนุชาติ ศรีศิริวัฒน์, สุรพันธ์ ตันศรีวงษ์, พูลศักดิ์ โกษียาภรณ์. การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคสำหรับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม. บทความวิชาการสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน เล่มที่4 .พฤษภาคม-สิงหาคม 2012 หน้า53-60

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Khaled M. Metweely, Gamal. A. Morsy,Ragab. A. Amer. **Optimization of Optimal Power Flow Problems with FACTS Devices Using PSO Technique**. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Menoufia University, Egypt. 19-21.December 2017.pp181-189
- [10] Maulikkumar C. Pandya ,Dr. Jitendra G. Jamnani. **Coordinated control of SVC and TCSC for Voltage Profile Improvement employing Particle Swarm Optimization**. 2017 International Conference On Smart Technology for Smart Nation pp.81-84
- [11] วีรภัทร ปัญญาหอม ศิวพล ศรีสนพันธุ์ คมสันต์ หงษ์สมบัติ และ ตฤณภพ บุญเส็ง. **การศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงอัตโนมัติในระบบแรงดันไฟฟ้า**. วิศวกรรมวารสาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 77-86
- [12] สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. **การศึกษารถไฟความเร็วสูง (ประเทศไทย)**. เล่มที่ 1. มีนาคม 2537.อัดสำเนา
- [13] สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมและการลงทุน. **เขตพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเพื่ออนาคตของ ASEAN**. สืบค้นจาก. [www.boi.go.th](http://www.boi.go.th)
- [14] นายกิจจา ศรีพัฒน์ทางกูระ. **ทิศทางและยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศ**. โรงแรมเซนทารา แกรนด์ แอท เซ็นทรัล พลาซ่า กรุงเทพฯ 12 พฤศจิกายน 2557. หน้า18-21
- [15] เอกชัย ชัยดี ‘ระบบไฟฟ้ากำลัง’ 2557, หน้า 373-394
- [16] Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan. **OpenPowerNet temen Simulation of Railway Power Supply Systems**. ,อัดสำเนา
- [17] Find this product online. [elandcables.com](http://elandcables.com) . **Cables & Accessories Rail Cable Overhead Line**
- [18] อุเทน ลีตน และ รัชชชัย กุลรวรานิชพงษ์. **การแก้ปัญหากำลังงานสูญเสียในสายส่งต่ำ ที่สุดโดยใช้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่อาศัยปัญญาเชิงกลุ่ม**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33. ธันวาคม 2553.หน้า 81-84.
- [19] A. P. Engelbrecht, **Fundamentals of Computational Swarm Intelligence**. West Sussex: John Wiley & Sons. 2005.
- [20] J. Kennedy, and R. Eberhart. **Particle Swarm Optimization**. Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Network. Perth : Piscataway, 1995

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายทศพร เจริญจันทร์  
วัน เดือน ปีเกิด 14 สิงหาคม 2532  
ที่อยู่ 261/202 ถ.รังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี  
จังหวัดปทุมธานี 12110  
การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
เบอร์โทรศัพท์ 091-2061023  
อีเมล Tossaporn\_c@mail.rmutt.ac.th

