

การควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์แฟคตส์

POWER FLOW CONTROL BY USING FACTS DEVICE

นายดำรง คุ้มทัก รหัส 43362458

นายเฉลิมชัย ศรีมงคล รหัส 43362813

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่รับ... 25 / พ.ค. 2553 / .....  
เลขทะเบียน..... 15016642  
เลขเรียกหนังสือ.....  
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ร.ร.  
05119  
2546

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

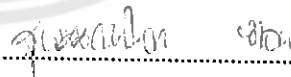
ปีการศึกษา 2546




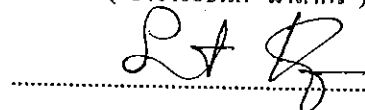
## ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ	การควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์แพคทส์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายคำรัส	คุ้มทศ	รหัส 43362458
	นายเฉลิมชัย	ศรีมงคล	รหัส 43362813
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุพรรณนิภา	ยังอยู่	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์แคทรียา	อัคสูงเนิน	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2546		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

  
.....ประธานกรรมการ  
( อาจารย์สุพรรณนิภา ยังอยู่ )

  
.....กรรมการ  
( อาจารย์ธนิต มาลากร )

  
.....กรรมการ  
( อาจารย์สุรเชษฐ์ กานต์ประชา )

หัวข้อโครงการ	การควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์แพคทส์
ผู้ดำเนินโครงการ	นายดำรัส คุ้มทัต รหัส 43362458 นายเฉลิมชัย ศรีมงคล รหัส 43362813
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุพรรณนิภา ยังอยู่
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์แคทรียา อัดสูงเนิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2546

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบส่งไฟฟ้ามักจะเกิดการโอเวอร์โพล์ ทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โครงการนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้ได้นำระบบ 14 บัสมาพิจารณาโดยมีการเลือกใช้อุปกรณ์แพคทส์บางชนิดมาทดลอง โดยการ  
ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลและเปรียบเทียบผลของการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์  
แพคทส์ชนิดที่เลือก และจากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์แพคทส์นั้น สามารถเพิ่ม  
ประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น เพราะฉะนั้น เราสามารถนำไปแก้ไขปัญหามายาวส่งที่  
เราต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบแรงสูงให้ดีขึ้นได้

<b>Project Title</b>	Power Flow Control by using FACTS Device	
<b>Name</b>	Mr Damrus Khumtut	ID. 43362458
	Mr Chalermchai Srimongkol	ID. 43362813
<b>Project Advisor</b>	Miss Supannika Youngyou	
<b>Co- project advisor</b>	Miss Cattareeya Adsoongneon	
<b>Major</b>	Electrical Engineering	
<b>Department</b>	Electrical and Computer Engineering	
<b>Academic Year</b>	2003	

---

### ABSTRACT

Recently, the transmission systems are always overflow that it affected to a power transmission. This project presents an efficient improvement of power transmission. This project uses the 14 bus system to consider by using FACTS device in experimentally. Matlab program is used to process and compare the result between the used and unused FACTS devices. The result of this study indicate that FACTS device can improve this 14 bus system effectively. From this research we can use FACTS to solve transmission line problem in order to enhance the efficiency of power system transmission.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับอาจารย์ทุกท่านกับการถ่ายทอดความรู้ในการทำ  
โครงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ สุพรรณนิภา ยังอยู่ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตรวจ  
แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอด รวมทั้ง อาจารย์ สุรเชษฐ์ กานต์ประชา และ  
อาจารย์ ธนิต มาลากร กรรมการสอบโครงการ ที่ได้เสียสละเวลาในการตรวจสอบแก้ไขและให้  
คำแนะนำในการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิคามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ  
พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของโครงการเล่มนี้

นายดำรัส            คู่่มทัศ  
นายเฉลิมชัย      ศรีมงคล



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบข่ายของงาน.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งบประมาณ.....	2

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	3
2.2 การศึกษาการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า.....	7
2.3 การคำนวณการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า.....	10
2.4 อุปกรณ์แฟคทส์ (FACTS Device).....	15

## บทที่ 3 ชนิดของอุปกรณ์แฟคทส์ที่เลือกและข้อมูลระบบ IEEE 14 Bus

3.1 ชนิดอุปกรณ์แฟคทส์ที่เลือกใช้ในโครงการ.....	28
3.2 Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) .....	28
3.3 โมเดลของอุปกรณ์แฟคทส์.....	37
3.4 ข้อมูลของระบบ 14 บัส.....	39

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ .....	43
------------------------------	----

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	50
----------------------------------	----

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	51
ภาคผนวก .....	52
ประวัติผู้เขียนโครงการ .....	63



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ข้อมูลของสายส่ง .....	40
2 ข้อมูลของบัส .....	41
3 Regulated Bus Data .....	42
4 Transformer Data .....	42
5 Static capacitor Data .....	42
6 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC.....	43
7 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC.....	43
8 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC เมื่อปรับค่า $X_r$ เป็นค่าต่าง ๆ .....	44
9 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCPS.....	45
10 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCPS.....	45
11 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC เมื่อปรับค่า Alpha เป็นค่าต่าง ๆ .....	46
12 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC & TCPS.....	47
13 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC & TCPS ....	47
14 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์แพคทส์ชนิดต่าง ๆ.....	48
15 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์แพคทส์ชนิดต่าง ๆ.....	48
16 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งต่าง ๆ .....	49
17 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งต่าง ๆ.....	49



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า .....	3
2 สามเหลี่ยมกำลัง .....	5
3 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบ Simple loop .....	17
4 การทำงานของ FACTS ต่อ Parameters ของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	19
5 การทำงานเบื้องต้นของ FACTS .....	20
6 ลักษณะการต่อของ FACTS กับระบบไฟฟ้า .....	21
7 หลักการทำงานของ Shunt FACTS .....	21
8 หลักการทำงานของ Series FACTS .....	22
9 หลักการทำงานของ Shunt - Series FACTS .....	23
10 หลักการทำงานของ Series - Series FACTS .....	23
11 Midpoint shunt compensation .....	24
12 End of voltage support .....	25
13 Equal - area criterion for midpoint compensation .....	25
14 Voltage stability improvement by series compensation .....	26
15 Equal - area criterion for series compensation .....	27
16 ภาพวงจรรายง่ายของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าโดยอุปกรณ์ TCSC...	28
17 วงจรรายง่ายของอุปกรณ์ TCSC เมื่อไทรสเตอร์หยุดนำกระแส .....	30
18 วงจรรายง่ายของอุปกรณ์ TCSC เมื่อไทรสเตอร์นำกระแส.....	31
19 แรงดันและกระแสตัวเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ TCSC ในสถานะอยู่ตัว ....	32
20 แรงดันและกระแสไทรสเตอร์ของอุปกรณ์ TCSC ในสถานะอยู่ตัว .....	32
21 แรงดันและกระแสตัวเก็บประจุของอุปกรณ์ TCSC ในสถานะอยู่ตัว .....	33
22 วงจรอิมพีแดนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC .....	33
23 แผนภาพแสดงอิมพีแดนซ์สมมูลของวงจร TCSC .....	35
24 โมเดล TCSC .....	37
25 โมเดล TCPS .....	38
26 IEEE 14 Bus .....	39
27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $X_s$ กับ P .....	44
28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha_p$ กับ P .....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สำคัญอย่างยิ่ง ในชีวิตประจำวันไม่ว่าจะเป็นทางด้านการศึกษา การสื่อสาร หรือในโรงงานอุตสาหกรรมทำให้ความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันมีปริมาณสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังสถานที่ต่าง ๆ เรามักจะ  
ได้รับปัญหาคือ มักจะเกิดการโอเวอร์โพล์ ซึ่งทำให้ได้รับกำลังงานไฟฟ้าได้ไม่เต็มที่ แต่ในความเป็นจริงเรามีความต้องการใช้กำลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ในการแก้ปัญหาดังกล่าว อาจทำได้โดยการเปลี่ยนสายส่ง แต่สามารถทำได้ยากและมีราคาแพง ดังนั้นเราจึงหาวิธีที่จะใช้ในการแก้ปัญหานี้ โดยกำลังงานการไหลในสายส่งนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า อิมพีแดนซ์ แรงดัน และมุมเฟส ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงสิ่งใดสิ่งหนึ่ง แล้วจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพมีการเปลี่ยนแปลงตามแต่เราต้องการเพียงค่ากำลังไฟฟ้าจริง ดังนั้นเราจึงต้องลดค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ เพราะฉะนั้นการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งและลดค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ เราจึงใช้อุปกรณ์แพคทส์มาควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังแหล่งต่างๆ ในประเทศเพื่อให้เราได้รับกำลังงานไฟฟ้าอย่างเต็มที่ ซึ่งสามารถทำให้ได้รับกำลังไฟฟ้าอย่างเต็มประสิทธิภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่งในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาโครงสร้าง การทำงาน ประโยชน์ของอุปกรณ์แพคทส์
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยอุปกรณ์แพคทส์และศึกษาสถานะโหลตที่เกิดจากความต้องการภายในประเทศ

### 1.3 ขอบข่ายของงาน

1. ศึกษาการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระบบทดสอบ-IEEE-14 บัส
2. เลือกประเภทและชนิดของอุปกรณ์แพคทส์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปแก้ปัญหาการเกิด โอเวอร์โพล์ (overflow) ในระบบสายส่ง
3. เขียนโปรแกรมจาก MATLAB เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์แพคทส์

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
2. ศึกษาการถ่ายเทของกำลังไฟฟ้า
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB
4. กำหนดโหลดโพล์และศึกษาการทำงานของอุปกรณ์แพคทส์
5. เขียนโปรแกรมการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์แพคทส์
6. วิเคราะห์และสรุปผลการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์แพคทส์

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เรื่องการถ่ายเทของกำลังไฟฟ้า
2. ได้รับความรู้เรื่องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
3. ได้รับความรู้เรื่องอุปกรณ์แพคทส์
4. ได้รับความรู้เรื่องจากการเขียนโปรแกรมจาก MATLAB

#### 1.6 งบประมาณ

1. ค่าเอกสาร 1,000 บาท
2. ค่าวัสดุอุปกรณ์ 1,000 บาท



## บทที่ 2

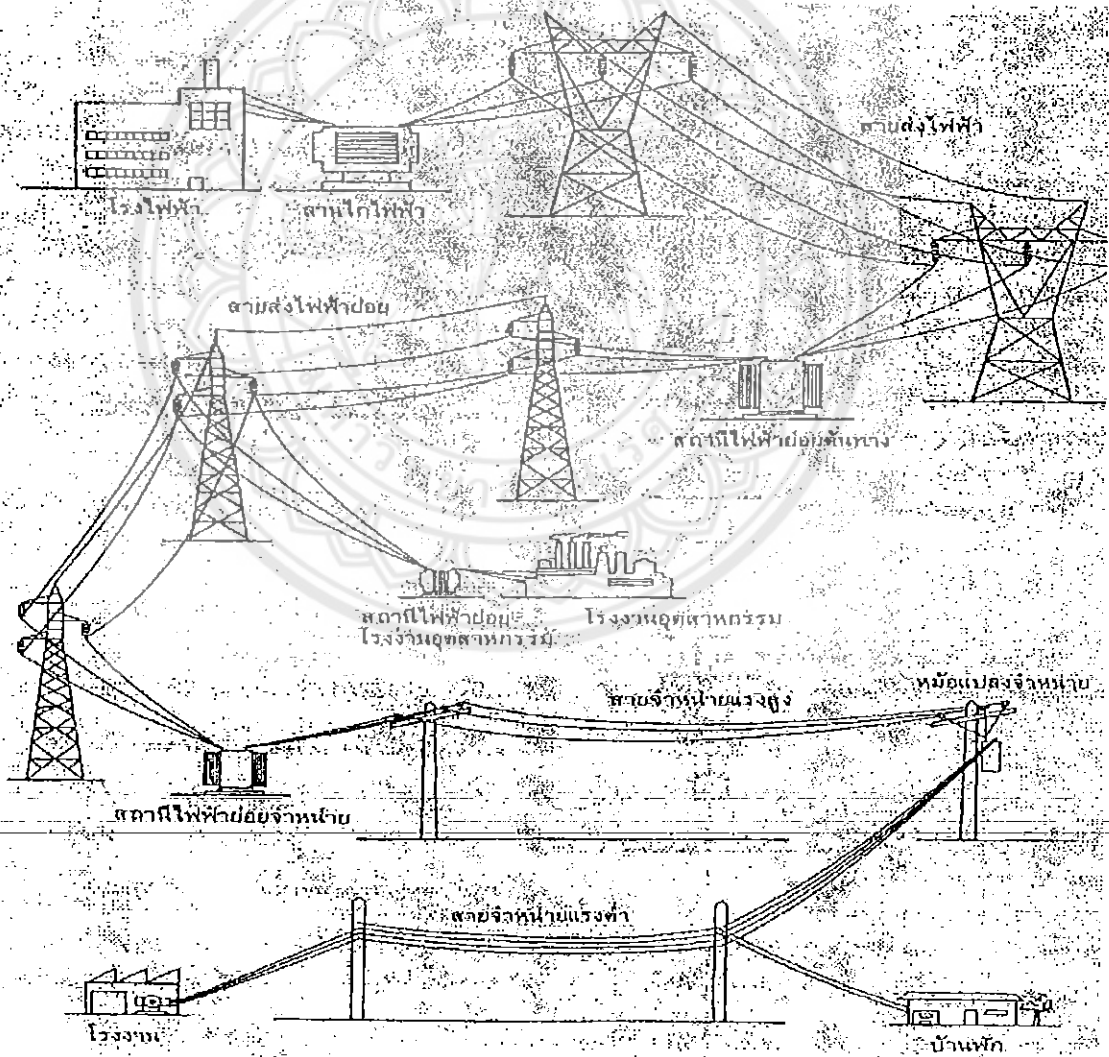
# หลักการและทฤษฎี

### หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Transmission system) [ 2 ]

คือระบบขนส่งพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าไปยังระบบจำหน่ายซึ่งเป็นศูนย์กลางการจ่ายโหลด โดยคำนึงถึงระยะทางที่ใกล้ที่สุดและประหยัดที่สุด

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้นอกจากจะเชื่อมโยงระหว่างโรงไฟฟ้ากับสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อจำหน่ายไฟฟ้าโดยตรงแล้ว ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ดีจะต้องเชื่อมโยงแหล่งจ่ายถึงกันหมดระหว่างสถานีต่อสถานีดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [ 2 ]

เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ทำให้ระบบใหญ่ขึ้น สามารถจ่ายพลังงานได้มากขึ้น โอกาสที่ไฟจะดับนานๆเมื่อเกิดเหตุขัดข้องจะลดลง เพราะเมื่อมีเหตุขัดข้องทางด้านหนึ่งก็สามารถรับไฟฟ้าจากอีกด้านหนึ่งได้ ระบบจึงมีความมั่นคงและเชื่อถือได้มากขึ้น
2. ประหยัดเชื้อเพลิงในการผลิต เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสามารถถ่ายเทกันระหว่างระบบได้ ดังนั้นในช่วงที่ต้องการพลังงานลดลง จึงสามารถหยุดเครื่องบางแห่งได้
3. สามารถวางโปรแกรมการเดินเครื่องอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถกำหนดลงไปได้ว่าจะใช้เครื่องใดในช่วงโหลดฐาน (Base load) เครื่องใดจ่ายเสริมโหลดช่วงยอด (Peak load) และเครื่องใดเป็นเครื่องสำรองเป็นต้น

ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถปรับปรุงการส่งจ่าย ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยใช้อุปกรณ์แฟกต์ส (FACTS device) โดยการส่งจ่ายนั้นจะมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพโดยที่

กำลังไฟฟ้าจริง (P) คือกำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนเป็นกำลังรูปต่างๆที่โหลด เช่น เตาหลอม โลหะเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นความร้อน หรือมอเตอร์เป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลและหลอดไฟฟ้าเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นแสงสว่าง เป็นต้น กำลังชนิดนี้คือกำลังเฉลี่ย (Average power) ที่วัดได้จากมิเตอร์มีหน่วยเป็นวัตต์

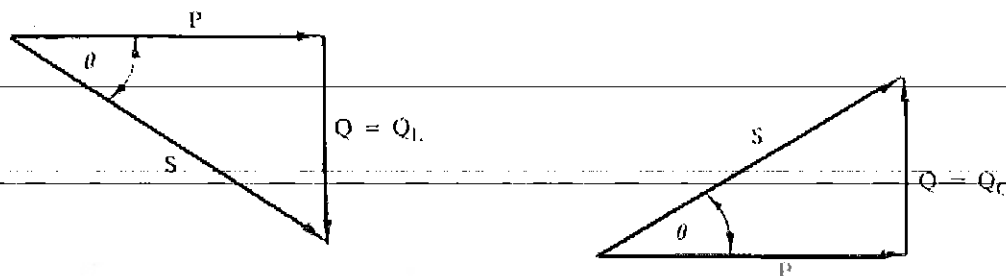
กำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q) คือกำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานรูปอื่นชั่วคราว โดยจะถูกเก็บรักษาไว้ในตัวเก็บพลังงานเพียงครั้งวัฏจักรและจะส่งพลังงานกลับแหล่งจ่าย พร้อมกับเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งในครั้งวัฏจักรต่อไป ทำให้กำลังเฉลี่ยในหนึ่งวัฏจักรเป็นศูนย์ หรือกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพไม่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าแต่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวมัน ตัวเก็บพลังงานดังกล่าวได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ กล่าวคือตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กแต่ตัวเก็บประจุจะเก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้า เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำ ( $Q_L$ ) และตัวเก็บประจุ ( $Q_C$ ) นั้นต่างเฟสกัน

180 องศา ดังนั้น  $Q_L$  ไม่จำเป็นต้องรับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงก็ได้ แต่เพียงให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังแทน และทำหน้าที่เสมือนจ่ายกำลังสำรองให้กับตัวเหนี่ยวนำ ในทางกลับกัน  $Q_C$  ก็ให้ตัวเหนี่ยวนำจ่ายแทนหรืออาจกล่าวได้ว่าตัวเก็บพลังงานทั้งสองชนิดนี้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า แก่กันและกันได้โดยไม่ต้องพึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งกำลังนี้วัดได้จากวาร์มิเตอร์ มีหน่วยเป็น VAR ย่อมา

จาก Voltage Ampere Reactive

กำลังไฟฟ้าปรากฏ(S) คือกำลังไฟฟ้ารวมตามปกติใช้เป็นค่าบอกความสามารถในการรับกำลังงานของโหลดหรือการจ่ายกำลังงานของแหล่งจ่าย

ความสัมพันธ์ของค่ากำลังทั้ง 3 ชนิดจะประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพอดี และเรียกรูปสามเหลี่ยมนี้ว่า รูปสามเหลี่ยมกำลัง (Power triangle) ดังแสดงได้ดังนี้



(ก) สามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสตัวหลัง

(ข) สามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสหน้า

รูปที่ 2 สามเหลี่ยมกำลัง [ 2 ]

หลักการของพลังงานการไหลในสายส่ง

กำลังงานการไหลในสายส่งขึ้นอยู่กับ

- Impedance
- Voltage
- Phase angle

โดยที่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสิ่งใดสิ่งหนึ่งจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพเปลี่ยนแปลงตาม

สามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้ดังนี้

$$P_r = \frac{V_s V_r}{X_L} \sin \delta \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_r = \frac{V_s V_r}{X_L} \left( \cos \delta - \frac{V_r}{V_s} \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

โดยที่

$P_r$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลไปถึงปลายทาง

$Q_r$  คือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ปลายทาง

$V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าต้นทาง

$V_r$  คือ แรงดันไฟฟ้าปลายทาง

$X_L$  คือ อิมพีแดนซ์ในสายส่ง

$\delta$  คือ มุมที่แสดง Phase shift ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต้นทางกับแรงดันไฟฟ้าปลายทาง

ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

กำลังไฟฟ้าจริงที่ส่งผ่านไปได้นั้น คิดโดยประมาณได้จากสมการ

$$P_r = \frac{V_s V_r}{X_L} \sin \delta \quad \dots \quad (3)$$

ค่า  $P_r$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุม  $\delta = 90$  องศา  
จะได้

$$P_r = \frac{V_s V_r}{X_L} \quad \dots \quad (4)$$

การเพิ่มขีดความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอาจทำได้หลายวิธี เช่น

- ก. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้น หรือ ใช้ระบบแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น
- ข. สร้างสายส่งไฟฟ้าหลาย ๆ วงจร
- ค. ใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม
- ง. ใช้ความถี่ไฟฟ้าต่ำลง
- จ. ใช้การส่งไฟฟ้าด้วยกระแสตรง
- ฉ. ใช้ Synchronous condenser เดินปรับแรงดันระหว่างทางให้สูงขึ้น

## 2.2 การศึกษาการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า (Load flow) [ 4 ]

การศึกษาโหลดฟลว์ก็คือการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าและกระแสที่จุดต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะการทำงานปกติผลที่ได้จากการศึกษาโหลดฟลว์โดยทั่วไปประกอบด้วย ขนาดและมุมของศักดาไฟฟ้าที่มีสต่างๆในระบบกระแสและกำลังที่ไหลในระบบทุกเส้น ค่าต่างๆที่ได้ออกมาจากการศึกษาโหลดฟลว์ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของศักดาไฟฟ้าหรือกระแสจะถูกนำมาพิจารณาว่าค่าต่างๆ อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้หรือไม่ คือศักดาไฟฟ้าทุกจุดในระบบมีค่าสูงเกินไปหรือต่ำเกินไปกระแสที่ไหลผ่านจุดต่างๆมีค่าไม่มากกว่าอัตราของอุปกรณ์หรือสายที่จะรับได้ ดังนั้นการศึกษาโหลดฟลว์จึงเป็นหัวใจสำคัญอันหนึ่งในการวางแผนการจ่ายไฟฟ้ารวมทั้งการขยายงานระบบไฟฟ้าด้วย

การศึกษาโหลดฟลว์มีความสำคัญเนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้

1. การศึกษาดังกล่าวเป็นสิ่งจำเป็นในการวางแผนระบบไฟฟ้า
2. การศึกษาดังกล่าวเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานและการควบคุมระบบ
3. การศึกษาดังกล่าวให้ข้อมูลซึ่งเป็นสถานะเริ่มต้นของการศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันระบบ และเสถียรภาพของระบบ

ปัญหาของโหลดฟลว์ก็คือการคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ไหลในแต่ละสายส่งไฟฟ้ารวมทั้งการคำนวณหาค่าขนาด(Magnitude) และค่าของมุม(Phase Angle) ของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแต่ละบัสของระบบสายส่ง ที่กำหนดไว้โดยเลือกช่วงเวลาของโหลดในการวิเคราะห์การหาต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุด และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังความต้องการของผู้บริโภคอย่างประหยัดที่สุด สำหรับตัวเอนเนเรเตอร์และโหลดในสถานะของการทำงานลักษณะต่างๆนั้นค่ารายละเอียดที่คำนวณหาได้จากการคำนวณโหลดฟลว์ก็ยังสามารถใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำงานของระบบไฟฟ้า ความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าจากตัวเอนเนเรเตอร์ ไปยังโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าโดยไม่ทำให้ระบบสายส่งเกิดการโอเวอร์โหลด(Overload) รวมทั้งมีค่าระดับของแรงเคลื่อน(Voltage Regulation) ที่ดีโดยมีวิธีควบคุมระดับของแรงเคลื่อนโดยใช้ Shunt capacitor, Shunt reactor และ Tap-changing transformer และตัวเอนเนเรเตอร์ที่ใช้ในการผลิตค่าของกำลังไฟฟ้าจินตภาพ(Q) แต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง(P)



ข้อที่ควรสังเกตในการพิจารณาผลการคำนวณ โหลดโพล์ของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมโยงเป็นปกติและอยู่ในกรณี Peak load คือ

1. ขนาดของแรงดันที่ Busbar ต่างๆในระบบควรมีค่าใกล้เคียงค่าปกติ
2. อุปกรณ์ต่างๆที่ต่ออยู่กับระบบควรทำงานไม่เกินค่า Rated capacities
3. กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าควรสัมพันธ์กับต้นทุนการผลิต
4. การจ่ายกำลังไฟฟ้าจินตภาพควรจัดสรรให้เหมาะสม ที่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในระบบน้อยที่สุด

ความต้องการเหล่านี้อาจเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกัน การศึกษาโหลดโพล์จะแสดงให้เห็นขอบเขตของจุดทำงานที่ระบบสามารถตอบสนองได้ และแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงระบบเพื่อให้มีการตอบสนองที่น่าพอใจยิ่งขึ้น

ปัญหาการแก้สมการของวงจรระบบไฟฟ้ากำลังในการศึกษาโหลดโพล์ ซ้ำยุ่งยากในการคำนวณโหลดโพล์นั้นเป็นผลมาจาก

1. การใช้ Phasor ซึ่งเป็นเลขเชิงซ้อนในการวิเคราะห์ข่ายวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ Steady State
2. ธรรมชาติของข้อมูลที่มีอยู่และผลลัพธ์ที่ต้องการ ซึ่งทำให้ได้สมการของระบบแบบ Nonlinear
3. ความซับซ้อนของวงจรระบบไฟฟ้าเอง

ในการวิเคราะห์ข่ายวงจรไฟฟ้าโดยทั่วไปตัวแปร หรือข้อมูลของข้อมูลจะเป็นแรงดันและกระแสแต่สำหรับการคำนวณ โหลดโพล์ เราจะสนใจความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของบัส(ซึ่งแยกเป็นขนาดและมุมเฟส)กับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากความต้องการอันนี้ทำให้สมการโหลดโพล์เป็น Nonlinear ถึงแม้ว่าข่ายวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสแบบเชิงเส้นก็ตามอุปสรรคข้อนี้แสดงได้โดยพิจารณาส่วนๆของระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยแอดมิแดนซ์ต่อเชื่อมโยงระหว่างบัสคู่หนึ่งในกรณีที่กำหนดแรงดัน  $V_1$  ที่บัส, เราจะคำนวณหาค่า  $V_2$  เมื่อรู้ค่า  $I_2$  หรือในทางกลับกันเราจะหาค่า  $I_2$  ได้เมื่อรู้ค่า  $V_2$  โดยอาศัยสมการ

$$V_2 = V_1 + I_2 / Y \quad \dots \dots \dots (5)$$

ในกรณีของโหลดโพลีแทนที่เราจะรู้ค่า  $I_2$  เราจะรู้ค่า  $S_2 = P_2 + jQ_2$  การหาค่า  $V_2$  ก็จะไม่ตรงไปตรงมาเนื่องจากกำลังเชิงซ้อน  $S_2$  ขึ้นอยู่กับทั้ง  $V_2$  และ  $I_2$  ทำให้ไม่สามารถแยกการคำนวณ  $V_2$  และ  $I_2$  อย่างอิสระต่อกันได้ เราเขียนสมการ  $S_2$

$$S_2 = P_2 + jQ_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$= V_2 I_2^*$$

$$= V_2 (V_2 - V_1)^* Y^*$$

$$= |V_2|^2 |Y| \angle -\theta - |V_1 V_2 Y| \angle \delta_2 - \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อเครื่องหมาย \* แทนการสังยุคของปริมาณเชิงซ้อนและ

$$V_1 = |V_1| \angle 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$V_2 = |V_2| \angle \delta_2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$Y = |Y| \angle \theta \quad \dots\dots\dots (10)$$

แยกสมการที่ (7) ออกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพจะได้

$$P_2 = |V_2|^2 |Y| \cos(\theta) - |V_1 V_2 Y| \cos(\delta_2 - \theta) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_2 = -|V_2|^2 |Y| \sin(\theta) - |V_1 V_2 Y| \sin(\delta_2 - \theta) \quad \dots\dots\dots (12)$$

สมการที่ได้เป็นสมการ Nonlinear ที่มี  $V_2$  และ  $\delta_2$  เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและการแก้สมการต้องอาศัยการคำนวณเชิงเลข(Numerical method) วิธีการคำนวณแบบนี้เหมาะที่จะอาศัยดิจิทัลคอมพิวเตอร์ และเมื่อระบบไฟฟ้าที่วิเคราะห์มีขนาดใหญ่การใช้คอมพิวเตอร์ก็เป็นสิ่งที่จำเป็น

การพิจารณาระบบไฟฟ้าซึ่งมีโรงจักรกำเนิดไฟฟ้า 3 แห่ง ระบบมี 4 บัส และมีโหลดอยู่ทุกๆบัสและทราบค่าโหลดทุกบัส กำลังไฟฟ้าจริงจากโรงไฟฟ้าสามารถควบคุมได้ว่าจะจ่ายให้โหลดทั้งหมดควรมาจากโรงจักรไหนบ้าง เท่าไร ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจริงนี้จะกำหนดเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจ่ายของแต่ละโรงจักร หรืออาจเป็นขนาดของกำลังไฟฟ้าที่ผ่านโปรแกรมทางเศรษฐศาสตร์ระบบไฟฟ้ากำลังจะได้ว่า  $P_1, P_2, P_3$  ควรมีค่าเท่าใดจึงจะประหยัดที่สุดส่วนค่าขนาดศักดาไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจัดให้มีค่าคงที่เท่าไรก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมโดยใช้ Automatic Voltage Regulation ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมให้คงที่ตลอดเวลาที่ค่าที่ตั้งไว้ค่าต่างๆที่ทราบค่าดังกล่าวก็จะเป็นอินพุตของ โปรแกรม โหลดโพลีเพื่อการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่มาจากแต่ละโรงจักรไฟฟ้า

## 2.3 การคำนวณการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า [ 4 ]

### 2.3.1 Load Flow equation

$$S_i = V_i I_i^* \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$S_i^* = V_i^* I_i \quad \dots\dots\dots (14)$$

โดยที่

$$I_i = \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \quad \dots\dots\dots (15)$$

ดังนั้น

$$S_i^* = V_i^* \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \quad \dots\dots\dots (17)$$

โดยที่

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j |V_i| \sin \delta_i \quad \dots\dots\dots (19)$$

นำค่าจาก (18) และ (19) แทนใน (17) จะได้

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^{n_{bus}} |V_i Y_{ij} V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{n_{bus}} |V_i Y_{ij} V_j| \cos (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^{n_{bus}} |V_i Y_{ij} V_j| \sin (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad \dots\dots\dots (22)$$

### 2.3.2 การจำแนกชนิดของบัส

#### 1. slack bus (swing or reference bus )

ค่าที่กำหนด คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดัน ( V และ  $\delta$  )

ค่าที่ไม่ทราบ คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ( P และ Q )

slack bus มีไว้เพื่อจ่ายกำลังชดเชยให้กับกำลังสูญเสียในระบบและชดเชยความแตกต่างระหว่างกำลังผลิตกับโหลดของระบบ

#### 2. Generator bus ( voltage-controlled bus )

ค่าที่ทราบ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และขนาดของแรงดันไฟฟ้า ( P และ V )

ค่าที่ไม่ทราบ คือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพ และมุมเฟสของแรงดัน ( Q และ  $\delta$  )

การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าทำได้โดยการเพิ่มหรือลดการผลิต กำลังไฟฟ้าจินตภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ปริมาณกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดหรือน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตได้ทำให้ต้องแทนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพของบัสนั้นด้วยค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดและเปลี่ยนให้ขนาดของแรงดันเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งเป็นผลให้บัสนั้นเดิมเป็น generator bus กลายเป็น load bus

#### 3. Load bus

ค่าที่กำหนดคือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ( P และ V )

ค่าที่ไม่ทราบ คือ ขนาดและมุมของแรงดัน ( Q และ  $\delta$  )

### 2.3.3 ข้อจำกัดพิสัยของตัวแปร

- ข้อจำกัดพิสัยของกำลังผลิต เป็นข้อจำกัดของกำลังการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อยู่ในรูป

$$P_{gi,min} < P_{gi} < P_{gi,max}$$

และ

$$Q_{gi,min} < Q_{gi} < Q_{gi,max}$$

- ข้อจำกัดบนพิสัยของขนาดของแรงดัน

$$V_{i,min} < V_i < V_{i,max}$$

### 2.3.4 การคำนวณโหลดโพลาร์

Initial condition

- slack bus : กำหนดเป็นบัสที่ 1 มีมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็น 0
- generator bus : ขนาดของแรงดันไฟฟ้าถูกกำหนดเป็น ค่าจำเพาะและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็น 0
- load bus : ขนาดของแรงดันไฟฟ้ามีค่า 1.0 p.u. และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็น 0

### 2.3.5 การคำนวณโดยวิธี Newton - Raphson method

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = |V_i| \sum_{j=1}^{n_{bus}} |Y_{ij} V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad \dots \dots \dots (23)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = |V_i| \sum_{j=1}^{n_{bus}} |Y_{ij} V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad \dots \dots \dots (24)$$

- โดยที่  $P_{Gi}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับบัสที่  $i$   
 $Q_{Gi}$  คือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับบัสที่  $i$   
 $P_{Di}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากบัสที่  $i$  เพื่อจ่ายให้กับโหลด  
 $Q_{Di}$  คือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ออกจากบัสที่  $i$  เพื่อจ่ายให้กับโหลด

**Jacobian matrix**

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & H_{24} & \dots & H_{2n} & N_{22} & N_{23} & N_{24} & \dots & N_{2n} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & \dots & H_{3n} & N_{32} & N_{33} & N_{34} & \dots & N_{3n} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & \dots & H_{4n} & N_{42} & N_{43} & N_{44} & \dots & N_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{n2} & H_{n3} & H_{n4} & \dots & H_{nn} & N_{n2} & N_{n3} & N_{n4} & \dots & N_{nn} \\ J_{22} & J_{23} & J_{24} & \dots & J_{2n} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & \dots & L_{2n} \\ J_{32} & J_{33} & J_{34} & \dots & J_{3n} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & \dots & L_{3n} \\ J_{42} & J_{43} & J_{44} & \dots & J_{4n} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & \dots & L_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{n2} & J_{n3} & J_{n4} & \dots & J_{nn} & L_{n2} & L_{n3} & L_{n4} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_4 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta V_2 / V_2 \\ \Delta V_3 / V_3 \\ \Delta V_4 / V_4 \\ \vdots \\ \Delta V_n / V_n \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - P_i = \text{เศษเหลือของ Real power}$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_i = \text{เศษเหลือของ Reactive power}$$

$$\Delta \delta_i = \text{ผลต่างของเฟสของแรงดัน (ค่าที่คำนวณได้ที่ต่างจากค่าผลลัพธ์ที่แท้จริง)}$$

$$\Delta V_i = \text{ผลต่างของขนาดของแรงดัน (ค่าที่คำนวณได้ที่ต่างจากค่าผลลัพธ์ที่แท้จริง)}$$

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \dots \dots \dots (25)$$

$$N_{ik} = V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} \dots \dots \dots (26)$$

$$J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} \dots \dots \dots (27)$$

$$L_{ik} = V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \dots \dots \dots (28)$$

#### Element of Jacobian matrix

- พจน์นอกทแยงมุม (Off diagonal element) i ไม่เท่ากับ k

$$H_{ik} = L_{ik} = |V_i Y_{ik} V_k| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \dots \dots \dots (29)$$

$$N_{ik} = -J_{ik} = |V_i Y_{ik} V_k| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \dots \dots \dots (30)$$

- พจน์ทแยงมุม (Diagonal element) i = k

$$H_{ii} = -Q_i + |V_i^2 Y_{ii}| \sin(-\theta_{ii}) \dots \dots \dots (31)$$

$$J_{ii} = P_i + |V_i^2 Y_{ii}| \cos(-\theta_{ii}) \dots \dots \dots (32)$$

$$N_{ii} = P_i - |V_i^2 Y_{ii}| \cos(-\theta_{ii}) \dots \dots \dots (33)$$

$$L_{ii} = Q_i + |V_i^2 Y_{ii}| \sin(-\theta_{ii}) \dots \dots \dots (34)$$

### 2.3.6 ขั้นตอนการคำนวณโหลดโพลีโพลีโดยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

1. กำหนดค่าแรงดันที่บัสต่าง ๆ ให้เป็น 1.0 p.u. และมุมเฟสเป็น 0 องศา
2. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนและผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ
3. คำนวณ Jacobian matrix
4. แก้ระบบสมการเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}$$

### 5. นำค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสและขนาดแรงดันไปแก้ไขค่าเดิม

$$\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \quad i=2,3,\dots,n_{bus} \quad \dots \quad (35)$$

$$V_i^{k+1} = V_i^k \left[ 1 + \left( \frac{\Delta V_i}{V_i} \right)^k \right] \quad i = \text{load bus} \quad \dots \quad (36)$$



## 2.4 อุปกรณ์แฟคทส์ ( Facts Devices ) [ 5 ]

### 2.4.1 จุดเริ่มต้นของ FACTS กับปัญหาของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี 3 ประการเป็นตัวจุดชนวนเริ่มต้นแนวคิดยุทธวิธีของ Electrical Power Research Institute (EPRI) ในการผลการดำเนินการของระบบไฟฟ้ากำลังให้ รุดหน้าไป เทคโนโลยีที่เป็นเหตุแห่งการเปลี่ยนแปลงประกอบด้วย

- 1) Microelectronics ( รวมเอาคอมพิวเตอร์ และ Microprocessors ด้วย )
- 2) การสื่อสาร
- 3) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ยุทธวิธีของ EPRI ในการผลักดันการดำเนินการระบบไฟฟ้ากำลังให้ก้าวหน้าได้แก่การ พัฒนา

- 1) Flexible AC transmission system ( FACTS ) คือการใช้เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้า และเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบส่ง กำลังไฟฟ้า
- 2) การบริหารไฟฟ้าตามความต้องการของลูกค้า ( Custom power ) ให้บริการไฟฟ้า ด้านอื่นแก่ลูกค้าอุตสาหกรรมและลูกค้าพาณิชย์กรรม เพิ่มเติมจากการขายพลังงาน ไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว
- 3) ศูนย์ควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ทันสมัย ( Advanced energy control center ) เป็น ศูนย์รวมเบ็ดเสร็จในการควบคุมและจัดสรรกำลังไฟฟ้า มีการอาศัยเครื่องมือใหม่ ๆ ที่ทันสมัยในการเสริมความมั่นคงของระบบ และมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าแบบ On – line
- 4) การควบคุมและป้องกันร่วมแบบอัตโนมัติสำหรับระบบจำหน่าย ( Integrated distribution automation )
- 5) ระบบสารสนเทศรวมของการไฟฟ้า ( Utility integrated information system ) อาศัยมาตรฐานสากลเพื่อให้อุปกรณ์สื่อสารของต่างการองค์กรการไฟฟ้าทำงาน ร่วมกันได้

เป้าหมายของกลยุทธ์การผลักดันให้ระบบไฟฟ้าก้าวหน้าคือ การเพิ่มมูลค่าของทรัพย์สิน ของระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า การแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมการไหลของกำลังและเพิ่มขีด ความสามารถในการรับภาระกำลังของระบบส่งที่จะดำเนินการในแบบ Open access และช่วย จัดหาและส่งพลังงานไฟฟ้าที่คุณภาพเป็นที่เชื่อถือได้แก่ลูกค้าในอนาคต



ในที่นี้จะกล่าวถึงกลวิธีแรกคือการพัฒนา FACTS แต่เพียงหัวข้อเดียว ซึ่งการนำ FACTS มาใช้เป็นการสร้างโอกาสหลัก ๆ ให้กับองค์การไฟฟ้าในด้าน

- 1) ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้ไหลไปตามเส้นทางที่ต้องการ
- 2) ใช้งานระบบส่งได้อย่างมั่นคงจนถึงขีดความร้อน ( Thermal limits ) พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการใช้งานเกินกำลัง
- 3) ลดกำลังผลิตสำรองโดยการขีดความสามารถการรับภาระกำลังไฟฟ้าของระบบส่ง
- 4) ป้องกัน Cascading outages ด้วยการจำกัดผลกระทบของ Faults และผลกระทบ

#### จากอุปกรณ์ทำงานล้มเหลว

โอกาสหลัก ๆ ข้างต้นนี้เกิดจากความสามารถและความรวดเร็วของ FACTS Controller ในการปรับเปลี่ยนตัวแปร ( Parameters ) ต่าง ๆ อาทิ อิมพีแดนซ์อนุกรม อิมพีแดนซ์ขนาน แอมพลิจูดและเฟสของแรงดันหรือกระแส การลดทอนการแกว่งไกวของกำลัง ที่สร้างข้อจำกัดในการดำเนินการใช้งานระบบส่งกำลังไฟฟ้า การตอบสนองที่รวดเร็วของ FACTS ต่อสัญญาณควบคุมทำให้ FACTS มีสมรรถนะสูงในการลดขนาดหรือจำกัดการทำงานที่เบี่ยงเบนออกไปจุดทำงานปกติที่กำหนดไว้

ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่การควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีตัวควบคุมในจุดสุดท้ายเป็นแบบกลไก ซึ่งตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมได้ช้า สึกหรองง่ายเมื่อต้องทำงานที่ซ้ำ ๆ บ่อยครั้ง ในมุมมองภาคพลวัตที่แตกต่างหากจากการควบคุมในสถานะ Steady - state แล้ว ถือได้ว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้การควบคุมเชิงพลวัตโดยสิ้นเชิง และเพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตลอดรอดฝั่งในสถานะที่มีการรบกวนที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนออกจากจุด Steady - state การออกแบบอุปกรณ์ให้กับระบบในตอนต้น จะต้องมีการเผื่ออัตราความสามารถในการรับภาระของอุปกรณ์ไว้ อย่างเพียงพอ ถึงแม้ว่าอัตราการรับภาระส่วนที่เผื่อไว้แทบจะไม่ได้ถูกใช้ให้เกิดประโยชน์ในสถานะ Steady - state เลยก็ตาม และเมื่อมองจากมุมเศรษฐศาสตร์ การออกแบบเผื่อไว้เป็นการลดประสิทธิภาพของผลตอบแทนการลงทุน

การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งก่อนการนำ FACTS Controller มาใช้งาน เป็นแบบ Free flow mode คือปริมาณและเส้นทางไหลเป็นไปตามกฎของ Kirchhoff การควบคุมการไหลทำได้อย่างค่อนข้างจำกัดโดยอาศัย Internal angle ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะเป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยหวังผลในด้าน Economic dispatch ที่ถูกจำกัดโดยเงื่อนไขด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ในกรณีที่เกิด Outages ขึ้นในระบบส่ง อาจจำเป็นต้องปรับผังการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ ( Generator rescheduling ) เพื่อป้องกันการรับภาระเกินกำลังของสายส่งบางเส้นทางในระบบส่ง

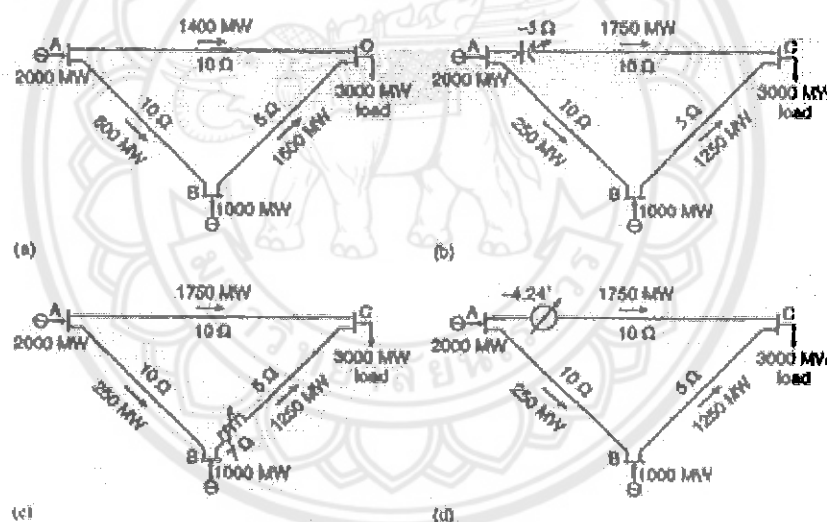
การนำ FACTS Controller มาใช้งานทำให้สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งให้มีปริมาณและเส้นทางตามที่ปรารถนาได้ ( Controlled flow mode ) ในกรณีที่เกิด

Outages ในระบบสายส่ง FACTS Controller จะช่วยให้สามารถปรับการไหลของกำลัง (Power flow rescheduling) ได้ในทันทีโดยไม่ต้องทำ Generation rescheduling เป็นผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคงการจ่ายกำลังที่จุดเดิม เป็นผลให้การทำงานของระบบยังคงอยู่ในบริเวณจุดที่ประหยัดที่สุดได้

ตัวอย่างของระบบไฟฟ้าอย่างง่าย ๆ ตามรูปที่ 3 ซึ่งมีรีแอคแตนซ์ของสายตามตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงแนวความคิดในการปรับควบคุม Parameter พื้นฐาน ในการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการ

ตารางที่ 1

สายส่ง	รีแอคแตนซ์อนุกรม	Loading limit
AB	10 ohms	1000 MW
AC	10 ohms	2000 MW
BC	5 ohms	1250 MW



รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบ Simple loop

ในรูปที่ 3(a) ผลของการคำนวณ Load flow แสดงว่าสายส่ง BC ต้องรับภาระกำลังไฟฟ้า 1600 MW ซึ่งเกินความสามารถของสาย และหารติดตั้ง Series compensators ค่า  $-5j$  ohms อนุกรมกับสาย AC ตามรูปที่ 3(b) หรือ ค่า  $7j$  ohms กับสายส่ง BC ตามรูปที่ 3(c) จะทำให้สามารถปรับการไหลของกำลังในสายส่งได้ และกำลังที่ไหลในสายส่ง BC ก็จะมีค่าอยู่ที่ค่าสูงสุดคือ 1250 MW พอดี และในรูปที่ 3(d) แสดงถึงอีกทางเลือกหนึ่งโดยใช้ Phase angle regulator ปรับเฟสของแรงดันและกระแสในสาย AC เป็นมุม  $-4.24$  องศา ก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน ถ้าหากไม่มี FACTS Controller แล้วการที่จะลดการไหลในสาย BC จะต้องทำโดย Generation rescheduling หรือโดยการสร้างสายส่งวงจรใหม่ขนานกับสายส่ง BC เดิม

FACTS มีคำนิยามที่กำหนดโดย IEEE คือ

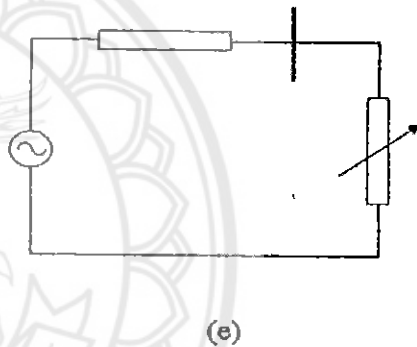
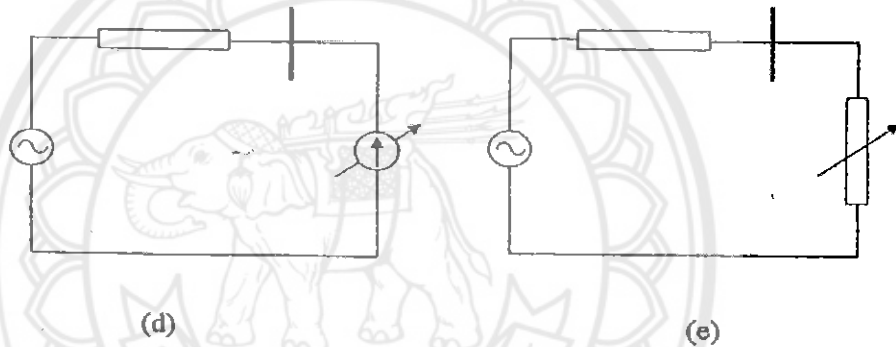
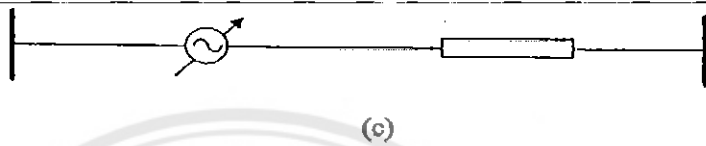
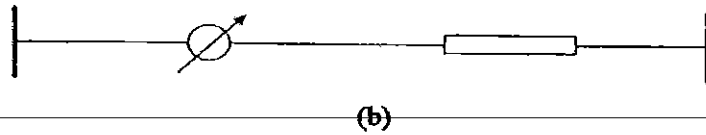
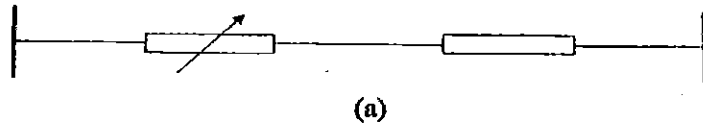
Flexible AC transmission system : “ Alternating current transmission systems incorporating power electronic based and other static controllers to enhance controllability and increase power transfer capability.”

FACTS Controller : “ A power electronic - based system and other static equipment that provide control of one or more AC Transmission system parameters. ”

#### 2.4.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของ FACTS และการจำแนกประเภท

การทำงานของ FACTS ในระบบไฟฟ้ากำลังคือการเปลี่ยนค่า parameters ของระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 4 parameters ที่ FACTS ทำการควบคุมและผลกระทบของการควบคุมต่อระบบไฟฟ้ากำลังคือ

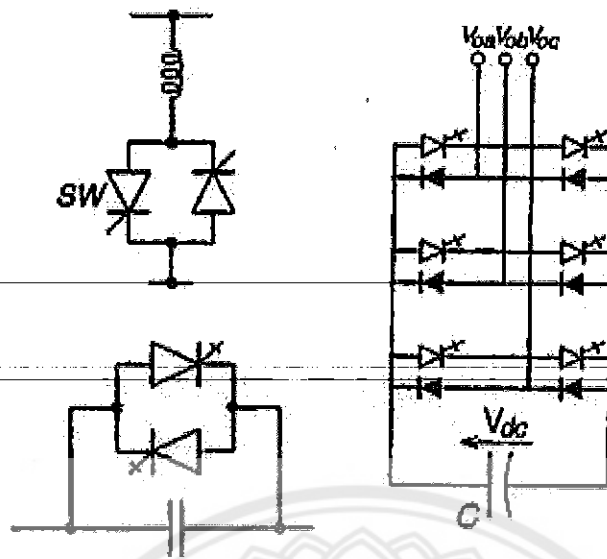
- 1) อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ( รีแอกแตนซ์เป็นหลัก ) มีผลต่อกระแสในสายส่ง และเมื่อรวมต่างเฟสหัวท้ายสายไม่มากนัก การเปลี่ยนอิมพีแดนซ์มีผลกระทบอย่างมากต่อการไหลของ Real power ( รูปที่ 4(a) )
- 2) เฟสของแรงดัน มีผลต่อการไหลของ Real power ( รูปที่ 4(b) )
- 3) การสอดใส่แรงดันอนุกรมกับสายส่ง มีผลต่อกระแสในสาย มีผลต่อการไหลของ Real power และ Reactive power ขึ้นอยู่กับขนาดและเฟสของแรงดันที่สอดใส่ในอนุกรมเข้ากับสายส่ง ( รูปที่ 4(c) )



รูปที่ 4 การทำงานของ FACTS ต่อ Parameters ของระบบไฟฟ้ากำลัง [ 5 ]

- 4) Reactive current ( กระแสส่วนที่เฟสตั้งฉากกับแรงดันที่บัส ) ง่ายเข้าหรือดึงออก ขนานกับบัส มีผลต่อแรงดันที่บัสที่ Reactive current ต่ออยู่ ( รูปที่ 4(d) )
- 5) แอดมิตแตนซ์ขนาน ( ชัตเซปแตนซ์เป็นส่วนใหญ่ ) มีผลต่อแรงดันที่บัสที่แอดมิตแตนซ์ต่ออยู่ ( รูปที่ 4(e) )

การควบคุม parameters โดย FACTS สามารถแยกเป็นสองวิธีหลักคือ



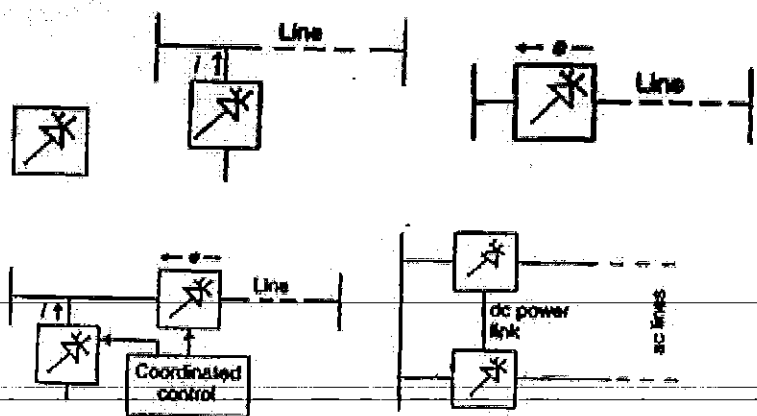
รูปที่ 5 การทำงานเบื้องต้นของ FACTS [5]

- 1) ใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น Thyristor ควบคุมกระแสใน Reactor หรือ ควบคุมแรงดันคร่อม Capacitor ทำให้เมื่อมองจาก Fundamental component ของกระแสหรือแรงดันแล้ว จะเหมือนอิมพีแดนซ์ปรีแอดมิตแตนซ์ของ Reactor หรือ Capacitor เปลี่ยนไป
- 2) ใช้ AC/DC converter ผลิตแรงดันสามเฟสที่ปรับแอมพลิจูดและเฟสได้

โดยทั่วไปเราจัดแบ่งประเภท FACTS Controller ตามลักษณะการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า กำลังเบื้องต้น 4 ประเภท คือ

- 1) Shunt FACTS Controllers
- 2) Series FACTS Controllers
- 3) Combined shunt - series FACTS Controllers
- 4) Combined series - series FACTS Controllers

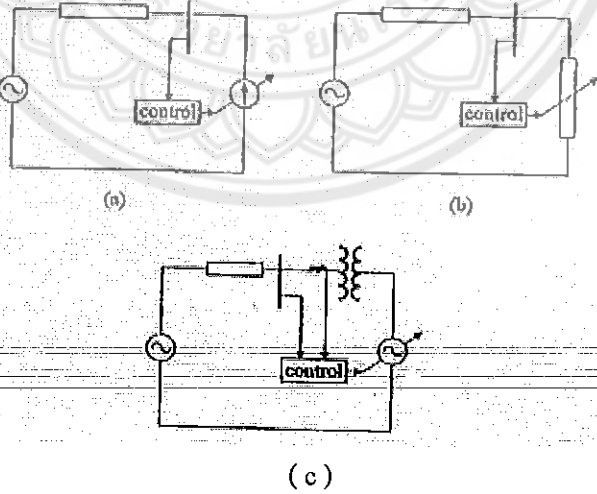
หากกำหนดสัญลักษณ์ให้ FACTS Controllers ดังรูปที่ 4 (a) แล้วจะได้ไดอะแกรมแสดงประเภทของ FACTS Controllers ข้างต้น ตามรูปที่ 4 (b) - (e) ตามลำดับ



รูปที่ 6 ลักษณะการต่อของ FACTS กับระบบไฟฟ้า [ 5 ]

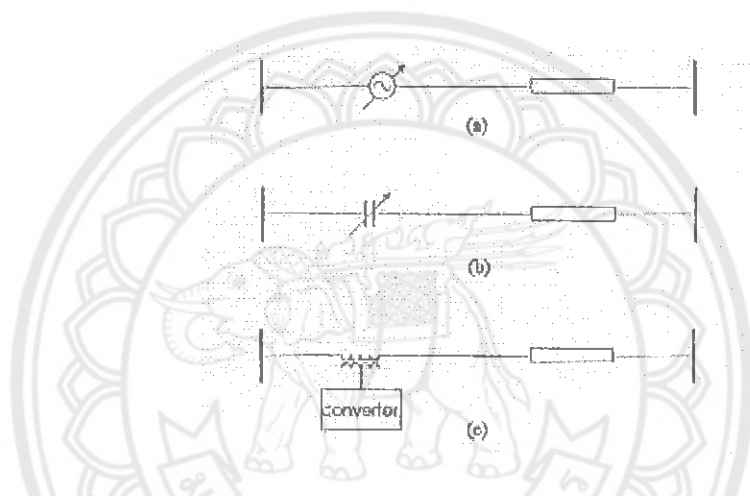
Shunt FACTS Controllers จะจ่ายหรือดูดซับ Reactive current ณ จุดต่อ หรืออีกนัยหนึ่งคือการจ่ายหรือดูดซับ Reactive power ในปริมาณที่ควบคุมได้ตามต้องการ Reactive current นั้นอาจมาจากการต่อ Variable shunt susceptance หรือได้จาก Converter จ่ายแรงดันที่ปรับแอมพลิจูดได้เข้ากับระบบผ่านรีแอคแตนซ์ โดยเฟสของแรงดันจาก Converter ตรงกับเฟสของแรงดันของระบบ หลักการของ Shunt FACTS Controllers นี้แสดงด้วยไดอะแกรมง่าย ๆ ตามรูปที่ 7

FACTS Controllers ที่จัดอยู่ในประเภท Shunt FACTS Controllers นี้ได้แก่ Static var compensators (SVC) และ Static synchronous compensators (STATCOM)



รูปที่ 7 หลักการทำงานของ Shunt FACTS [ 5 ]

Series FACTS Controllers จะผลิตแรงดันและสอดใส่แรงดันนั้นอนุกรมกับสายส่ง ในกรณีที่ FACTS Controllers นั้นไม่มีแหล่งจ่ายพลังงาน แรงดันอนุกรมนั้นจะต้องมีเฟสตั้งฉากกับกระแสและมีแอมพลิจูดที่ปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ การใช้ Variable series capacitor หรือ Variable series reactor ก็เป็นวิธีผลิตแรงดันที่เฟสตั้งฉากกับกระแสในสายส่งและแรงดัน ก็จะเป็นผลตอบสนองของ Variable series capacitor หรือ Variable series reactor ต่อกระแส หากแอมพลิจูดของกระแสต่ำ แอมพลิจูดของแรงดันอนุกรมก็จะต่ำตามไปด้วย อีกวิธีหนึ่งเป็นการใช้ Converter ผลิตแรงดันอนุกรมที่ปรับแอมพลิจูดได้ และมีระบบควบคุมภายในของ Converter ให้เฟสของแรงดันอนุกรมนี้ตั้งฉากกับกระแสในสาย หลักการของ Series FACTS Controllers ที่กล่าวมานี้แสดงได้ด้วยไดอะแกรมวงจรตามรูปที่ 8



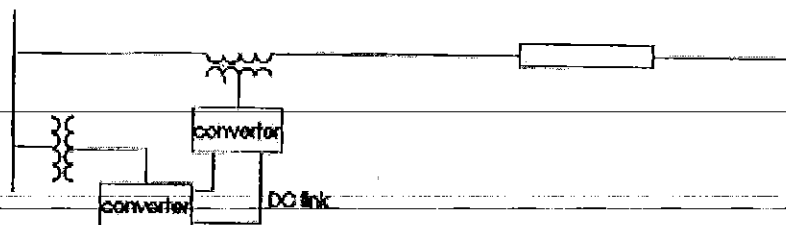
รูปที่ 8 หลักการทำงานของ Series FACTS [ 5 ]

FACTS Controllers ที่จัดอยู่ในประเภท Series FACTS Controllers นี้ได้แก่ Thyristor-controlled series capacitors ( TCSC ), GTO thyristor -- controlled series capacitors ( GCSC ) และ Static synchronous series compensator ( SSSC )

Combine shunt - series FACTS Controllers มีสองลักษณะคือ ลักษณะแรกเป็นการใช้ Thyristors ช่วยการทำงานใน Tap changer ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันหรือหม้อแปลงปรับเฟส การทำงานลักษณะนี้จะได้ Thyristor - controlled voltage regulators หรือ Thyristor - controlled phase angle regulators ( หรือ Thyristor - controlled phase shifting transformer ) ตามลำดับ

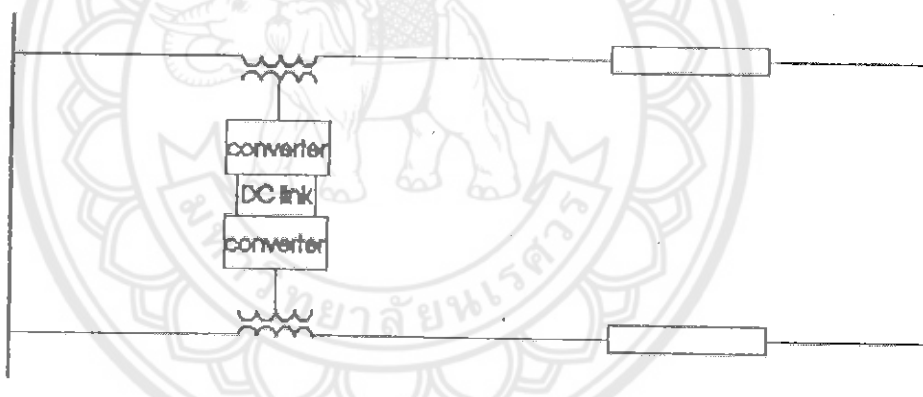
การทำงานอีกลักษณะหนึ่งใช้ Converters สองชุดที่ต่อด้าน DC bus เข้าด้วยกัน Converters ชุดแรกต่อขนานจ่ายกระแสให้กับระบบไฟฟ้า Converters ชุดที่สองต่ออนุกรมจ่ายแรงดันอนุกรมให้กับสายส่งดังรูปที่ 9 การที่ Converter ทั้งสองมี DC Bus ต่อเข้าด้วยกัน จึงสามารถและเปลี่ยน Real power ทาง DC bus และทำให้ด้าน AC ไม่ถูกจำกัดให้แลกเปลี่ยน

เฉพาะ Reactive power แต่สามารถแลกเปลี่ยน Real power ได้ด้วย กระแสและแรงดันด้าน AC ของ Converter ทั้งสองสามารถมีเฟสไม่ใช่มุมฉากได้ ตัวอย่าง Combine shunt - series FACTS Controllers ที่สำคัญ คือ Unified power flow controller (UPEC)



รูปที่ 9 หลักการทำงานของ Shunt-Series FACTS [5]

Combine shunt - series FACTS Controllers เป็น Series FACTS Controllers ตั้งแต่สองชุดขึ้นไปที่ใช้ DC bus ร่วมกันดังรูปที่ 10 ตัวอย่างที่สำคัญ ได้แก่ Interline power flow controller (IPFC)



รูปที่ 10 หลักการทำงานของ Series-series FACTS [5]

นอกเหนือจาก FACTS Controllers ประเภทหลัก ๆ 4 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมี FACTS Controllers ที่ไม่ได้จัดเข้าประเภทหลักข้างต้นอีก เช่น NGH subsynchronous damping controller เป็นต้น และด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่กำลังดำเนินไป ในอนาคตเป็นที่คาดหมายว่า FACTS Controllers ประเภทใหม่ ๆ จะได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพิ่มจากที่มีอยู่ในปัจจุบัน

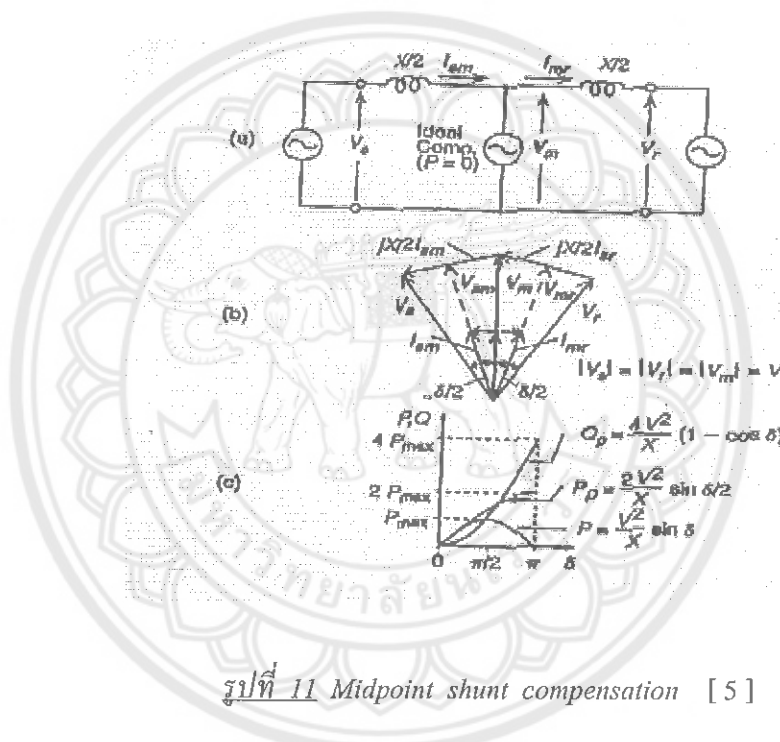


2. Shunt compensation และ Series compensation

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงศักยภาพในการใช้งาน FACTS 2 ประการ คือ ศักยภาพของ Shunt compensation และศักยภาพของ Series compensation

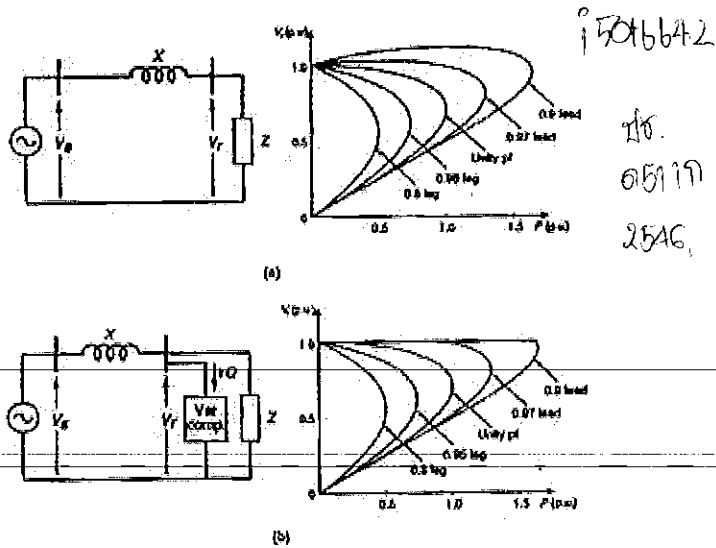
ศักยภาพหลัก ๆ ของ Shunt compensation

- 1) Midpoint voltage regulation เพื่อแบ่งสายส่งออกเป็นสองช่วง สำหรับสายที่มีการป้อนสองทาง การปรับรักษาระดับแรงดันที่กึ่งกลางสายส่งให้คงที่และมีค่าเท่ากับแรงดันสายและปลายสาย เป็นการแบ่งสายส่งออกเป็นช่วงอิสระต่อกัน จะทำให้ Steady-state power transfer limit ของสายเพิ่มจากค่าเดิมเป็นสองเท่า ดังแสดงในรูปที่ 11



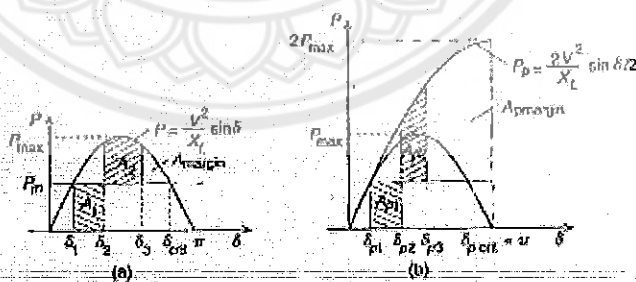
รูปที่ 11 Midpoint shunt compensation [ 5 ]

- 2) End of line voltage support เพื่อป้องกันการเสถียรภาพแรงดันที่ปลายสายปรี้อที่ Weak bus รูปที่ 12 แสดงให้เห็นแนวโน้มการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเมื่อเพิ่มโหลดที่มี Lagging power factor จุดที่ถือว่า ระบบไฟฟ้าสูญเสียเสถียรภาพแรงดันคือจุดที่เส้นกราฟแรงดัน อยู่ในแนวตั้ง ( $dv/dp = \infty$ ) การต่อ FACTS ที่สามารถทำ Shunt compensation ได้ จะช่วยรักษาระดับแรงดัน และดึงจุดทำงานให้ห่างจากจุดไร้เสถียรภาพมากขึ้น (เมื่อ FACTS จ่าย Reactive power ให้กับระบบเพิ่มขึ้น Power factor ก็จะเข้าใกล้หนึ่งมากขึ้น การทำงานของระบบจะย้ายไปอยู่บนเส้นกราฟที่ Power factor สูงขึ้น )



รูปที่ 12 End of voltage support [5]

- 3) ปรับปรุง Transient stability ให้ดีขึ้น เมื่อปรับรักษาระดับแรงดันที่จุดกึ่งกลางสายส่งให้มีค่าคงที่ ความสามารถในการส่งจ่ายกำลังในช่วง Transient swing ก็ จะสูงขึ้นเมื่อใช้ Equal - area criterion ช่วยวิเคราะห์ระบบที่อยู่ในรูปแบบ Single machine - infinite bus system จะได้ Power angle curve ดังรูปที่ 13 ซึ่งเห็นได้ว่า Decelerating area เพิ่มขึ้นเมื่อมี Shunt compensation และ Maximum rotor swing จะลดลง แสดงว่า Transient stability swing เพิ่มขึ้น



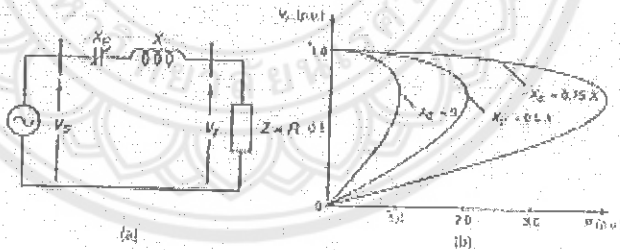
รูปที่ 13 Equal - area criterion for midpoint compensation [5]

- 4) ลดทอนการแกว่งไกวของกำลัง ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ บางครั้งจะเกิดการแกว่งไกวของกำลังในสายส่งที่ใช้เวลานานกว่าแอมพลิจูดของการแกว่งไกวจะลดลง การแกว่งไกวของกำลังนี้ทำให้เราไม่สามารถใช้งานสายส่งได้เต็มอัตราการใช้

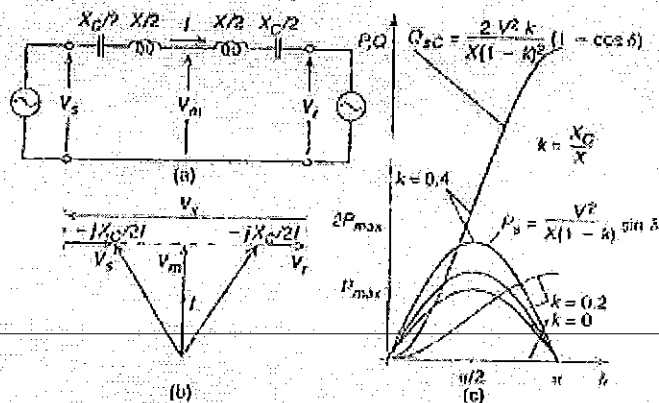
รับโหลดที่ออกแบบมา ด้วยการตอบสนองที่รวดเร็วของ FACTS ต่อสัญญาณควบคุม เราสามารถเลือกสัญญาณป้อนกลับที่เหมาะสมสำหรับ Shunt compensation เพื่อลดทอนการแกว่งไกวของกำลังได้ การวิเคราะห์จะอาศัย Linearized models เป็นหลัก และอยู่เหนือขอบเขตของการศึกษา

### ศักยภาพหลัก ๆ ของ Series compensation

- 1) ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดัน Series compensation จะลด Thevenin impedance ลง ทำให้เมื่อมองจากโหลด จะเห็นระบบไฟฟ้าที่แรงดันค่อนข้างคงตัวขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14 การเพิ่ม Series compensation (เพิ่ม  $X_c$ ) จะลดความไวของแรงดันต่อการเปลี่ยนค่าของโหลด จุดวิกฤติแรงดันจะเลื่อนไปทางขวา ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถรองรับโหลดได้เพิ่มขึ้นจากเดิมกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ Voltage stability margin เพิ่มขึ้น
- 2) ปรับปรุง Transient stability ให้ดีขึ้น Series compensation จะปรับยกระดับ P -  $\delta$  curve (หรือลดระดับ P -  $\delta$  curve) เป็นการเพิ่ม Decelerating area และลด Maximum rotor swing ลง Transient stability swing จะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 Voltage stability improvement by series compensation [ 5 ]



รูปที่ 15 Equal - area criterion for series compensation [ 5 ]

- 3) ลดทอนการแกว่งไกวของกำลัง การแกว่งของกำลังนี้ทำให้เราไม่สามารถใช้งานสายส่งได้ เต็มอัตราการใช้โหลดที่ออกแบบมา ด้วยการตอบสนองที่รวดเร็วของ FACTS ต่อ สัญญาณควบคุม เราสามารถเลือกสัญญาณป้อนกลับที่เหมาะสมสำหรับ Series compensation เพื่อลดทอนการแกว่งไกวของกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีระบบ ก่อนติดตั้ง FACTS มีอัตราการใช้โหลดที่ต่ำกว่าค่ากำลังของระบบได้
- 4) ลดทอน Subsynchronous oscillations การที่ระบบไฟฟ้าบางระบบติดตั้ง Fixed series capacitor compensation อาจเกิด Natural frequency ที่ต่ำกว่าความถี่กำลังของระบบได้ และถ้าหาก Natural frequency ที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับ Natural frequency ของ Turbine - generator shaft ก็จะสามารถเกิด Subsynchronous resonance ได้ หากปล่อยให้ ไม่ทำการแก้ไขลดทอน Subsynchronous oscillations อายุการใช้งานของ Turbine - generator shaft ก็จะลดลงหรือ Turbine - generator shaft เกิดความเสียหายได้ การเลือก กรองเอาสัญญาณที่มี Subsynchronous frequency มาป้อนกลับควบคุม Series compensation FACTS ก็จะลดทอนหรือกำจัด Subsynchronous resonance ได้

### บทที่ 3

## ชนิดของอุปกรณ์เฟลคทส์ที่เลือกและข้อมูลระบบ IEEE 14

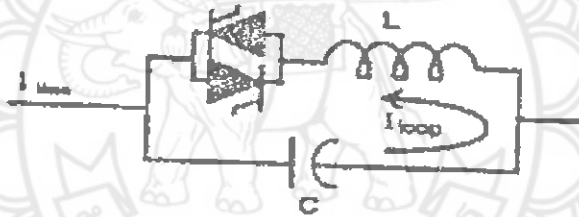
### 3.1 ชนิดของอุปกรณ์เฟลคทส์ที่เลือกใช้ในโครงการ

1. Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)
2. Thyristor-Controlled Phase Shifting (TCPS)

### 3.2 Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) [ 1 ]

#### 3.2.1 ลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)

อุปกรณ์ TCSC ประกอบด้วยชุดไทรสเตอร์ (Thyristor) ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ



รูปที่ 16 ภาพวงจรอย่างง่ายของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าโดยอุปกรณ์ Thyristors Controlled Series Capacitors [ 1 ]

อุปกรณ์ TCSC ถูกควบคุมการทำงานโดยไทรสเตอร์ใช้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสในวงจร TCSC ในการควบคุมมุมการทำงานของไทรสเตอร์ (Thyristors Firing Angle ( $\alpha$ )) โดยทั่วไปมุมการทำงานของไทรสเตอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 90-180 องศา ทำให้ไทรสเตอร์ นำกระแสเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุมีเฟสต่างกัน และทำให้เกิดกระแสไหลวน

ระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ภายในอุปกรณ์ TCSC ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีค่าเพิ่มขึ้นและช่วยเพิ่มระดับการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสายส่ง โดยเมื่อมุมการทำงานของไทรสเตอร์ ลดลงจาก 180 องศา ค่ากระแสไหลวนภายในอุปกรณ์ TCSC จะมีค่าสูงขึ้น

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC มีค่าดังสมการ

$$X_{\text{TCSC}} = \frac{\pi X_L}{(\sigma - \sin \sigma) + \pi \frac{X_L}{X_C}} \quad \dots\dots\dots (37)$$

เมื่อ

$$\sigma = 2\pi - 2\alpha$$

$X_C$  = ค่าความต้านทานความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ TCSC

$X_L$  = ค่าความต้านทานความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในอุปกรณ์ TCSC

หรือสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$X_{\text{TCSC}} = X_C \frac{\pi X_L}{(\sigma - \sin \sigma) X_C + \pi X_L}$$

ให้

$$\frac{\pi X_L}{(\sigma - \sin \sigma) X_C + \pi X_L} = \frac{U_C(\alpha)}{I_{\text{LINE}}}$$

จะได้

$$X_{\text{TCSC}}(\alpha) = X_C \frac{U_C(\alpha)}{I_{\text{LINE}}} \quad \dots\dots\dots (38)$$

เมื่อ

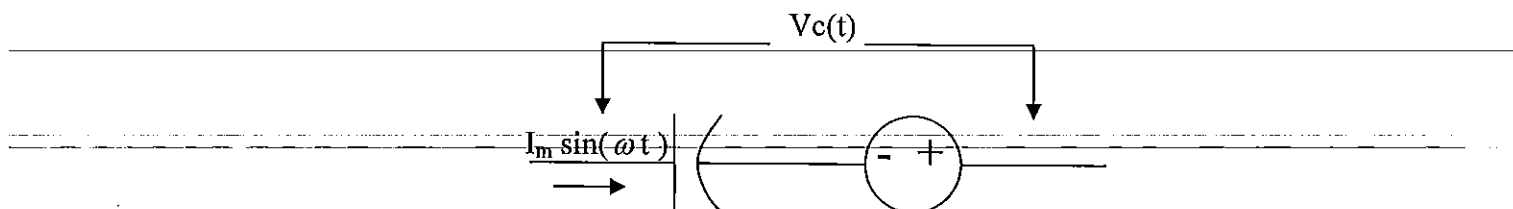
$U_C(\alpha)$  = แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$I_{\text{LINE}}$  = กระแสสาย

### 3.2.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ TCSC

การทำงานของอุปกรณ์ TCSC มี 2 สภาวะการทำงานคือ

1. ไทริสเตอร์หยุดนำกระแส (Thyristors Off) ในสภาวะไทริสเตอร์หยุดนำกระแสจะง่ายของอุปกรณ์ TCSC ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิดแรงดันที่มีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุก่อนมีการเปลี่ยนสภาวะ



รูปที่ 17 วงจรอย่างง่ายของอุปกรณ์ TCSC เมื่อไทริสเตอร์หยุดนำกระแส [ 1 ]

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในสภาวะหยุดนำกระแส มีค่า

$$V_{c_{off}}(t, \alpha) = \frac{I_M \sin \alpha}{\omega C} [1 - \sin(\omega t + \alpha)] - \frac{I_M \cos \alpha}{\omega C} \cos(\omega t + \alpha) + V_{s'} \quad \dots \quad (39)$$

เมื่อ

$I_M$  = กระแสสายสูงสุด (Peak Line Current)

$\alpha$  = มุมการทำงานของไทริสเตอร์

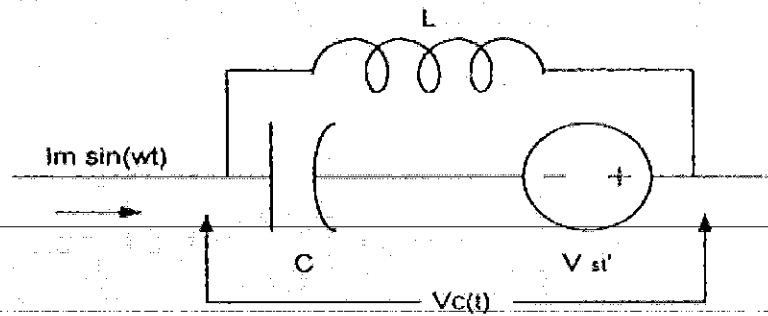
$\omega = 2\pi f$

$V_{s'}$  = แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ขณะที่ไทริสเตอร์มีการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุมีค่า

$$I_{c_{off}}(t, \alpha) = I_M \sin \omega t \quad \dots \quad (40)$$

กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและไทริสเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์

2. ไทริสเตอร์นำกระแส (Thyristors On)



รูปที่ 18 วงจรอย่างง่ายของอุปกรณ์ TCSC เมื่อไทริสเตอร์นำกระแส [ 1 ]

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและแรงดันตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากัน ในสภาวะไทริสเตอร์

นำกระแสมีค่า

$$V_{c_{on}} = I_M \frac{\omega_o^2 L \cos \alpha}{\omega_o^2 - \omega^2} \left\{ \omega \cos(\omega t - \alpha) - \omega_o \sin \left[ \omega_o t - \frac{\omega_o}{\omega} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} - I_M \frac{\omega_o^2 \omega \sin \alpha}{\omega_o^2 - \omega^2} \left\{ \sin(\omega t - \alpha) + \cos \left[ \omega_o t - \frac{\omega_o}{\omega} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} + V_{st}'' \cos \left[ \omega_o t - \frac{\omega_o}{\omega} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] \dots (41)$$

เมื่อ  $V_{st}''$  แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขณะที่ไทริสเตอร์เริ่มทำงาน  
 $\omega_o = 2\pi f_o$  :  $f_o$  คือความถี่เริ่มต้นเมื่อไทริสเตอร์เริ่มทำงาน  
 กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุ มีค่า

$$I_{c_{on}}(t, \alpha) = I_{L_{on}}(t, \alpha) + I_m \sin \omega t \dots (42)$$

กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและไทริสเตอร์มีค่าเท่ากัน มีค่า

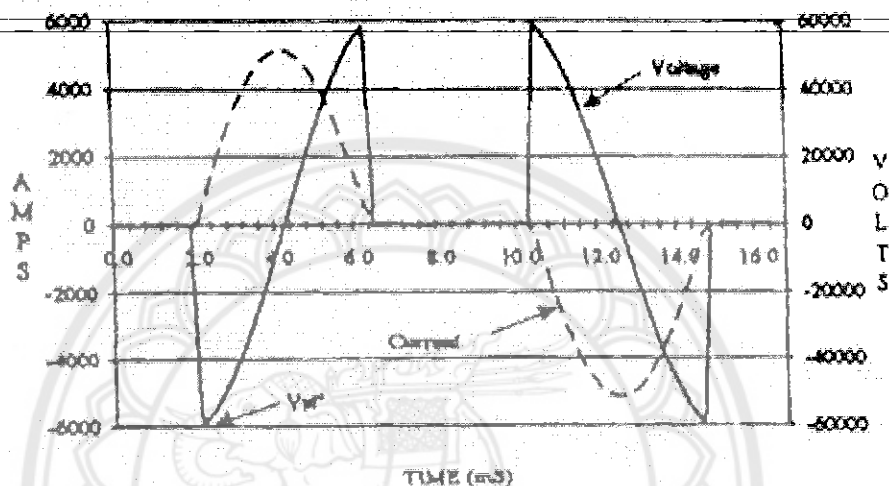
$$I_{L_{on}}(t, \alpha) = I_M \frac{\omega \omega_o^2 \sin \alpha}{\omega_o^2 - \omega^2} \left\{ \frac{\sin \left[ \omega_o t - \frac{\omega_o}{\omega} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right]}{\omega_o} - \frac{\cos(\omega t - \alpha)}{\omega} \right\} - I_M \frac{\omega_o^2 \cos \alpha}{\omega_o^2 - \omega^2} \left\{ \cos \left[ \omega_o t - \frac{\omega_o}{\omega} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] + \sin(\omega t - \alpha) \right\} \dots (43)$$



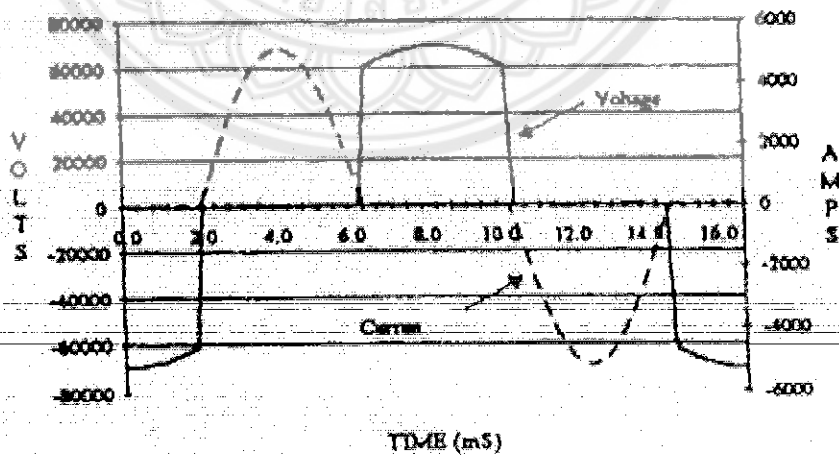
จากสมการที่ (43) ถ้าค่า  $\omega$  ซึ่งมีค่าความถี่  $f$  มีค่าเท่ากับค่า  $\omega_0$  ซึ่งมีค่า  $f_0$  เป็นความถี่ของอุปกรณ์ จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในตัวอุปกรณ์ ทำให้เกิดกระแสไหลเป็นอนันต์

ในสภาวะอยู่ตัวช่วงเวลาที่ไทรสเตอร์นำกระแสใน 1 คาบมีค่า

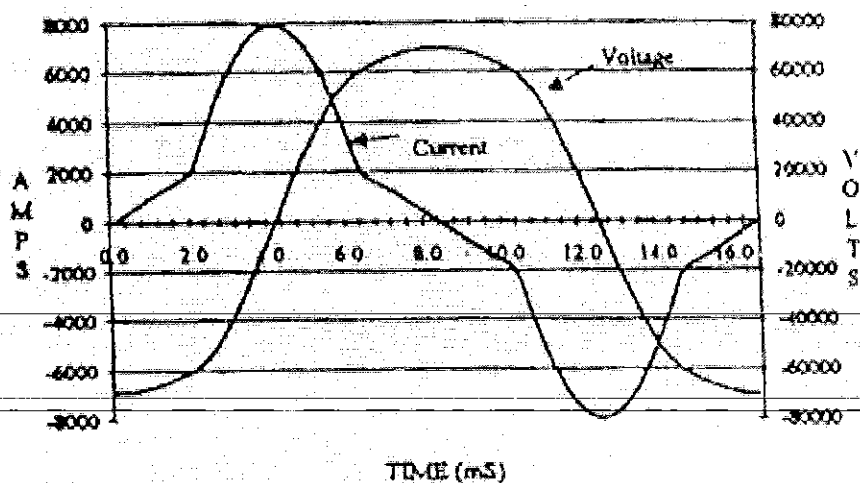
$$t_{\text{cond}} = \frac{2(\pi - \alpha)}{\omega} \dots\dots\dots (44)$$



รูปที่ 19 แรงดันและกระแสตัวเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ TCSC ในสภาวะอยู่ตัว [ 1 ]

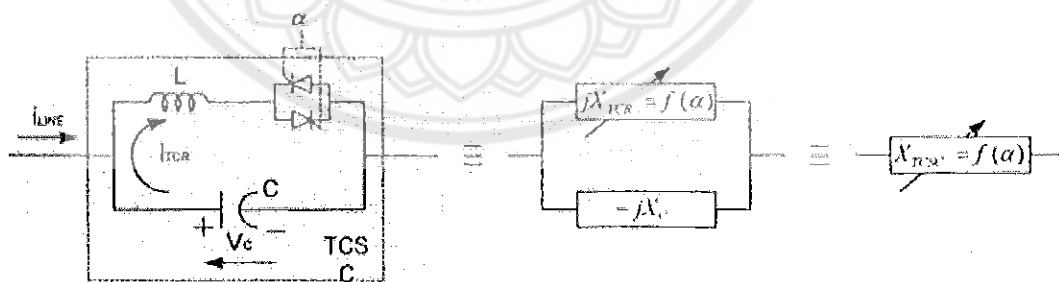


รูปที่ 20 แรงดันและกระแสไทรสเตอร์ของอุปกรณ์ TCSC ในสภาวะอยู่ตัว [ 1 ]



รูปที่ 21 แรงดันและกระแสตัวเก็บประจุของอุปกรณ์ TCSC ในสภาวะอยู่ตัว [ 1 ]

### 3.2.3 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC



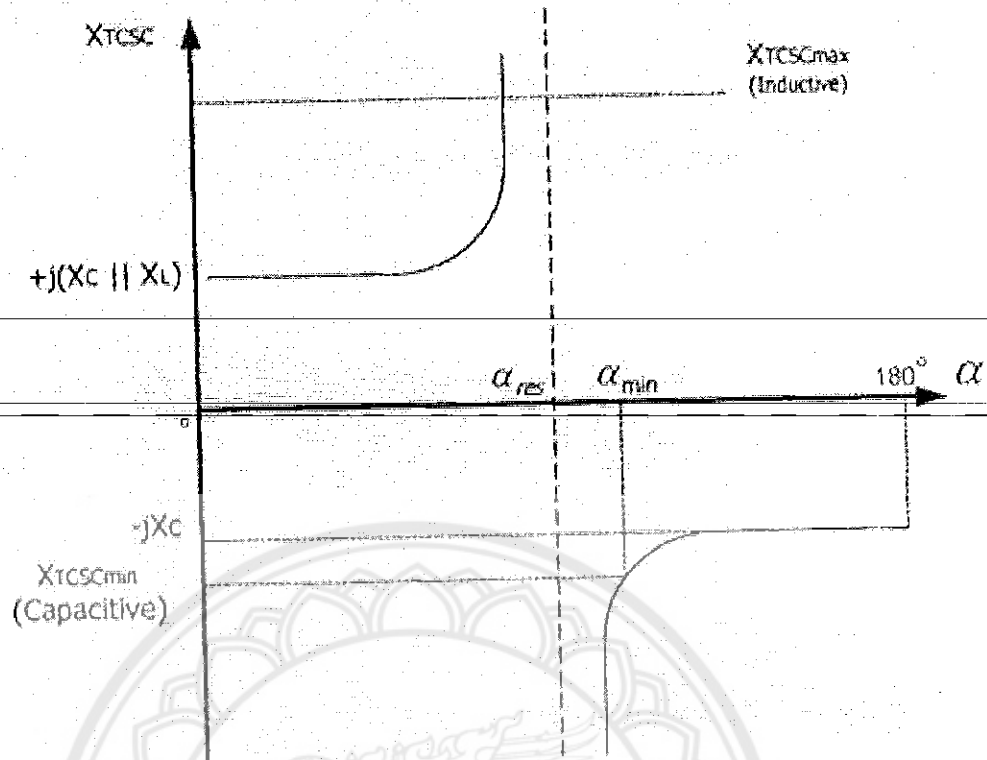
รูปที่ 22 วงจรอิมพีแดนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC [ 1 ]

การศึกษาอุปกรณ์ TCSC ประกอบด้วยความต้านทานความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุค่าคงที่ ( $-jX_C$ ) ต่อขนานกับค่าความต้านทานความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ ( $jX_{TCR}$ ) ที่เปลี่ยนค่าได้ตามมุมการทำงานของไทรสเตอร์ โดยค่าความต้านทานความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยที่สุดที่  $jX_{TCRmin} = jX_L = j\omega_0 L$  เมื่อไทรสเตอร์นำกระแสตลอดเวลา ( $\alpha = 90^\circ$ ) และมีค่าสูงสุดที่  $jX_{TCRmax} = \infty$  เมื่อไทรสเตอร์ไม่นำกระแสตลอดเวลา ( $\alpha = 180^\circ$ ) โดยค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC มีค่า

$$X_{TCSC} = \frac{jX_{TCR} \times (-jX_C)}{jX_{TCR} + (-jX_C)} = j \frac{|X_C| \times |X_{TCR}|}{|X_{TCR}| - |X_C|} \quad \dots\dots\dots (45)$$

เมื่อ  $|X_{TCR}| > |X_C|$  อุปกรณ์ TCSC จะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และเมื่อ  $|X_{TCR}| < |X_C|$  อุปกรณ์ TCSC จะทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ และเมื่อ  $|X_{TCR}| = |X_C|$  จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในวงจรของอุปกรณ์ TCSC โดยมีค่าอิมพีแดนซ์สมมูลเป็นอนันต์

ในการทำงานของอุปกรณ์ TCSC โดยทั่วไปจะทำงานอยู่ในช่วงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลอยู่ในบริเวณที่ ค่าความต้านทานเป็นความจุไฟฟ้า ทำให้มุมการทำงานของไทรสเตอร์ อยู่ในช่วง  $\alpha = 180^\circ$  และ  $\alpha_{min}$



รูปที่ 23 แผนภาพแสดงอิมพีแดนซ์สมมูลของวงจร TCSC [1]

การออกแบบอุปกรณ์ TCSC ค่าความต้านทานความจุไฟฟ้าต่ำสุดของวงจร TCSC มีค่า  $-jX_c$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทานความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภายในวงจร TCSC และค่าความต้านทานความจุไฟฟ้าสูงสุด ( $X_{TCSCmax}$ ) ของวงจร TCSC มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดค่าความต้านทาน (Reactance Order) หรือ  $X_{order}$  ของอุปกรณ์ TCSC

$$X_{order} = \frac{|X_{TCSCmax}|}{|X_c|} \dots \dots \dots (46)$$

เมื่อ  $X_{order}$  เป็นค่าความสามารถในการเพิ่มระดับการชดเชยกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ TCSC โดยมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 การคำนวณค่าความต้านทานความเหนี่ยวนำ ( $|X_L| = \omega_o L$ ) ของตัวเหนี่ยวนำในอุปกรณ์ TCSC โดยทั่วไปจะกำหนดค่า  $|X_L|$  เท่ากับ 0.15-0.45 เท่าของค่าความต้านทานความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ( $X_c$ ) ภายในวงจร TCSC

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของชุดตัวเหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor) หรือ TRC ของวงจร TCSC มีค่า

$$X_{\text{TCR}}(\alpha) = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad \dots \quad (47)$$

โดยค่ามุมการทำงานวิกฤตของอุปกรณ์ TCSC จะเกิดขึ้นเมื่อ  $X_{\text{TCR}} = X_C$  ซึ่งใช้ในการคำนวณค่ามุมการทำงานที่เหมาะสมในการควบคุมอุปกรณ์ TCSC

มุมการทำงานวิกฤตของไทรสเตอร์ในอุปกรณ์ TCSC มีค่าดังนี้

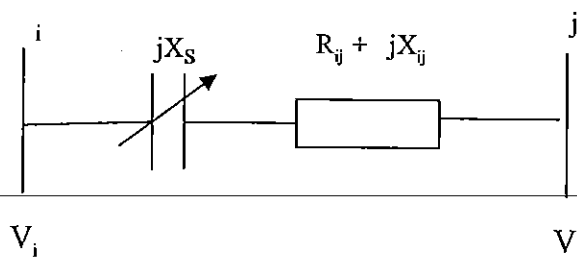
$$\alpha_{\min} = \pi - (2n-1) \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{X_L}{X_C}} \quad \dots \quad (48)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

ที่มุมการทำงานวิกฤต ( $\alpha_{\min}$ ) เป็นมุมการทำงานที่ควรหลีกเลี่ยงในการทำงานของอุปกรณ์ TCSC เนื่องจากทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในวงจร TCSC และไม่สามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ TCSC ได้

### 3.3 โมเดลของอุปกรณ์แฟคทส์ [ 6 ]

#### 3.3.1 โมเดลของอุปกรณ์แฟคทส์ ชนิด TCSC



รูปที่ 24 โมเดล TCSC [ 6 ]

TCSC เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในสายส่ง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ ( $X_{new}$ ) โดยการใส่ค่า  $X_s$  คังสมการ

$$X_{new} = X_{ij} - X_s$$

โดยที่สมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใส่อุปกรณ์แฟคทส์แล้วจะได้

$$P_{ij} = |V_i|^2 G_{ij} - |V_i||V_j|(G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})) \quad \dots \quad (49)$$

$$Q_{ij} = -|V_i|^2 B_{ij} - |V_i||V_j|(G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})) \quad \dots \quad (50)$$

$$P_{ji} = |V_j|^2 G_{ij} - |V_i||V_j|(G_{ij} \cos(\delta_{ij}) - B_{ij} \sin(\delta_{ij})) \quad \dots \quad (51)$$

$$Q_{ji} = -|V_j|^2 B_{ij} + |V_i||V_j|(G_{ij} \sin(\delta_{ij}) + B_{ij} \cos(\delta_{ij})) \quad \dots \quad (52)$$

เมื่อ

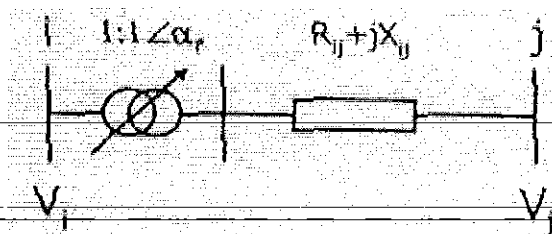
$$G_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{new}^2} \quad \dots \quad (53)$$

$$B_{ij} = \frac{X_{new}}{R_{ij}^2 + X_{new}^2} \quad \dots \quad (54)$$

$\delta_{ij}$ : ผลต่างระหว่างมุมของแรงดันของบัส I กับบัส j

### 3.3.2 โมเดลของอุปกรณ์เฟคท์ ชนิด TCPS

TCPS สามารถแทนด้วย Phase shift transformer ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟสของแรงดันที่บัสนั้น ๆ โดยจะมีการควบคุม  $\alpha_p$  ดังรูป



รูปที่ 25 โมเดล TCPS [6]

โดยที่สมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใส่อุปกรณ์ TCPS แล้วจะได้

$$P_{ij} = \frac{|V_i|^2 G_{ij}}{K^2} - \frac{|V_i||V_j|}{K} (G_{ij} \cos(\delta) + B_{ij} \sin(\delta)) \quad \dots \quad (55)$$

$$Q_{ij} = -\frac{|V_i|^2 B_{ij}}{K^2} - \frac{|V_i||V_j|}{K} (G_{ij} \sin(\delta) - B_{ij} \cos(\delta)) \quad \dots \quad (56)$$

$$P_{ji} = |V_j|^2 G_{ij} - \frac{|V_i||V_j|}{K} (G_{ij} \cos(\delta) - B_{ij} \sin(\delta)) \quad \dots \quad (57)$$

$$Q_{ji} = -|V_j|^2 B_{ij} + \frac{|V_i||V_j|}{K} (G_{ij} \sin(\delta) + B_{ij} \cos(\delta)) \quad \dots \quad (58)$$

เมื่อ  $G_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad \dots \quad (59)$

$$B_{ij} = \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad \dots \quad (60)$$

$$K = \cos(\alpha_p)$$

$$\delta = \delta_{ij} + \alpha_p$$

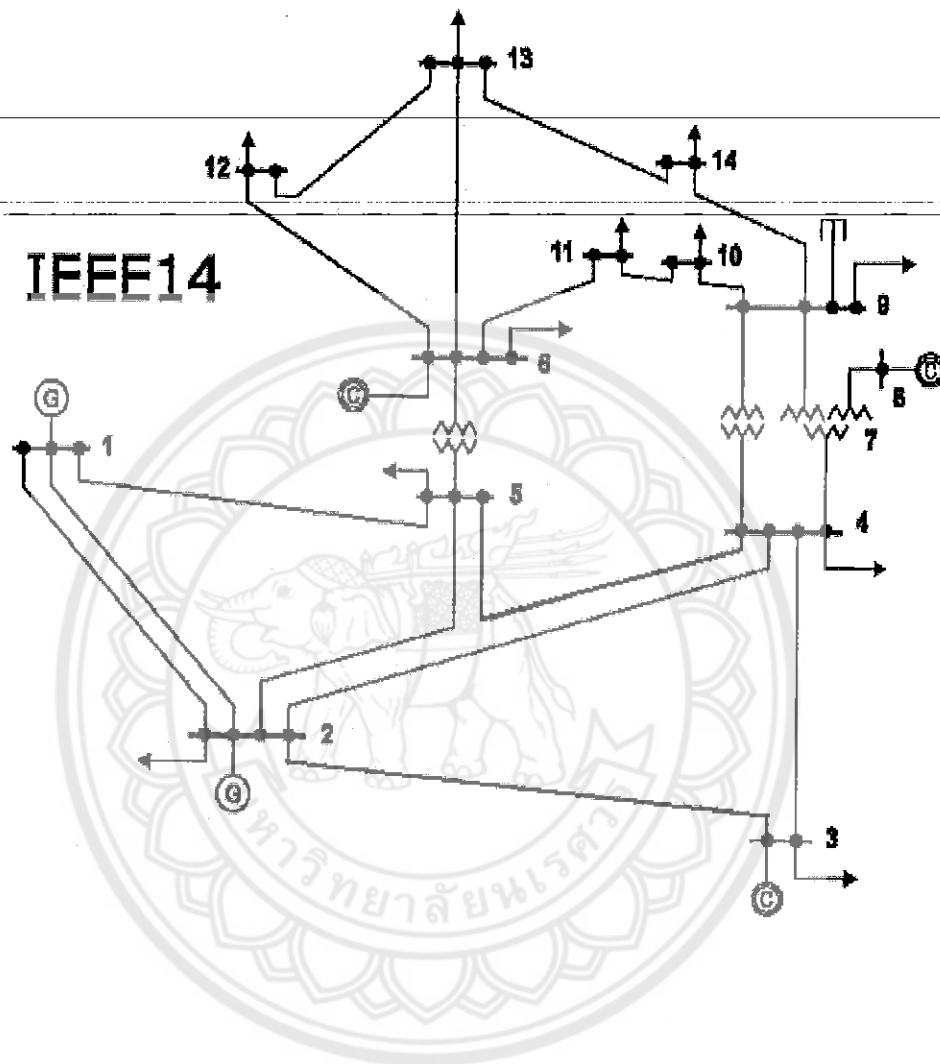
\*\*ในโครงการนี้ผู้จัดทำกำหนดให้ ค่า  $X_s$  ของอุปกรณ์ TCSC มีค่า ในระบบเปอร์เซ็นต์

$$0 \leq X_s \leq 0.2$$

และค่าของมุมเฟสของอุปกรณ์ TCPS ในหน่วย radian มีค่า

$$0 \leq \alpha_p \leq 0.3$$

## 3.4 ข้อมูลของระบบ 14 บัส [3]



รูปที่ 26 IEEE 14 Bus [3]



## ข้อมูลของสายส่ง

Line Designation	resistance p.u.	reactance p.u.	line charging
1-2	0.01938	0.05917	0.0264
1-5	0.05403	0.22304	0.0246
2-3	0.04699	0.19797	0.0219
2-4	0.05811	0.17632	0.0187
2-5	0.05695	0.17388	0.0170
3-4	0.06701	0.17103	0.0173
4-5	0.01335	0.04211	0.0064
4-7	0	0.20912	0
4-9	0	0.55618	0
5-6	0	0.25202	0
6-11	0.09498	0.19890	0
6-12	0.12291	0.25581	0
6-13	0.06615	0.13027	0
7-8	0	0.17615	0
7-9	0	0.11001	0
9-10	0.03181	0.08450	0
9-14	0.12711	0.27038	0
10-11	0.08205	0.19207	0
12-13	0.22092	0.19988	0
13-14	0.017093	0.03802	0

ตารางที่ 1 ข้อมูลสายส่ง

## ข้อมูลของบัส

Bus Number	Starting Bus Voltage		Generation		Load	
	Magnitude p.u.	Phase angle deg	MW	MVar	MW	MVar
1*	1.06	0	0	0	0	0
2	1.0	0	40	0	21.7	12.7
3	1.0	0	0	0	94.2	19.0
4	1.0	0	0	0	47.8	3.9
5	1.0	0	0	0	7.6	1.8
6	1.0	0	0	0	11.2	7.5
7	1.0	0	0	0	0	0
8	1.0	0	0	0	0	0
9	1.0	0	40	0	29.5	16.6
10	1.0	0	0	0	9.0	5.8
11	1.0	0	0	0	3.5	1.8
12	1.0	0	0	0	6.1	1.6
13	1.0	0	0	0	13.5	5.8
14	1.0	0	0	0	14.9	5.6

## ตารางที่ 2 ข้อมูลของบัส

### Regulated Bus Data

Bus Number	Voltage magnitude , p.u.	Minimum MVar capability	Maximum MVar capability
2	1.045	-40	50
3	1.010	0	40
6	1.070	-6	24
8	1.090	-6	24

ตารางที่ 3 Regulated Bus Data

### Transformer Data

Transformer designation	Tab setting ( a )
4-7	0.978
4-9	0.969
5-6	0.932

ตารางที่ 4 Transformer Data

### Static Capacitor Data

Bus number	Susceptancet p.u.
9	0.19

ตารางที่ 5 Static Capacitor Data

**บทที่ 4**  
**ผลการวิเคราะห์**

**ตัวอย่างผลของโปรแกรม**

1. เปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์ TCSC พร้อมทั้งปรับพารามิเตอร์ Xs ในสายส่ง 2-5

line		ไม่ใช้อุปกรณ์	Xs = 0	Xs = 0.01	Xs=0.02
1	2	1.5561 - 0.2011i	1.5561 - 0.2011i	1.5614 - 0.2023i	1.5671 - 0.2036i
1	5	0.7625 - 0.0305i	0.7625 - 0.0305i	0.7574 - 0.0292i	0.7520 - 0.0278i
2	3	0.7250 + 0.0363i	0.7250 + 0.0363i	0.7224 + 0.0366i	0.7196 + 0.0369i
2	4	0.5576 - 0.0752i	0.5576 - 0.0752i	0.5518 - 0.0734i	0.5458 - 0.0713i
2	5	0.4143 - 0.0747i	0.4143 - 0.0747i	0.4277 - 0.0823i	0.4418 - 0.0909i
3	4	-0.2398 - 0.0244i	-0.2398 - 0.0244i	-0.2422 - 0.0228i	-0.2449 - 0.0209i
4	5	-0.6158 + 0.0391i	-0.6158 + 0.0391i	-0.6232 + 0.0438i	-0.6310 + 0.0490i
4	7	0.2547 - 0.1260i	0.2547 - 0.1260i	0.2543 - 0.1262i	0.2540 - 0.1265i
4	9	0.1463 - 0.0321i	0.1463 - 0.0321i	0.1461 - 0.0322i	0.1459 - 0.0323i
5	6	0.3946 - 0.1288i	0.3946 - 0.1288i	0.3951 - 0.1295i	0.3956 - 0.1303i
6	11	0.0761 + 0.0519i	0.0761 + 0.0519i	0.0764 + 0.0519i	0.0768 + 0.0519i
6	12	0.0788 + 0.0276i	0.0788 + 0.0276i	0.0788 + 0.0276i	0.0788 + 0.0276i
6	13	0.1791 + 0.0825i	0.1791 + 0.0825i	0.1793 + 0.0825i	0.1795 + 0.0825i
7	8	0.0000 - 0.2111i	0.0000 - 0.2111i	0.0000 - 0.2114i	0.0000 - 0.2118i
7	9	0.2657 + 0.0660i	0.2657 + 0.0660i	0.2654 + 0.0661i	0.2651 + 0.0662i
9	10	0.0499 + 0.0263i	0.0499 + 0.0263i	0.0496 + 0.0263i	0.0492 + 0.0263i
9	14	0.0920 + 0.0297i	0.0920 + 0.0297i	0.0918 + 0.0297i	0.0915 + 0.0297i
10	11	-0.0402 - 0.0320i	-0.0402 - 0.0320i	-0.0405 - 0.0320i	-0.0408 - 0.0320i
12	13	0.0170 + 0.0100i	0.0170 + 0.0100i	0.0170 + 0.0100i	0.0171 + 0.0100i
13	14	0.0588 + 0.0300i	0.0588 + 0.0300i	0.0590 + 0.0300i	0.0592 + 0.0300i

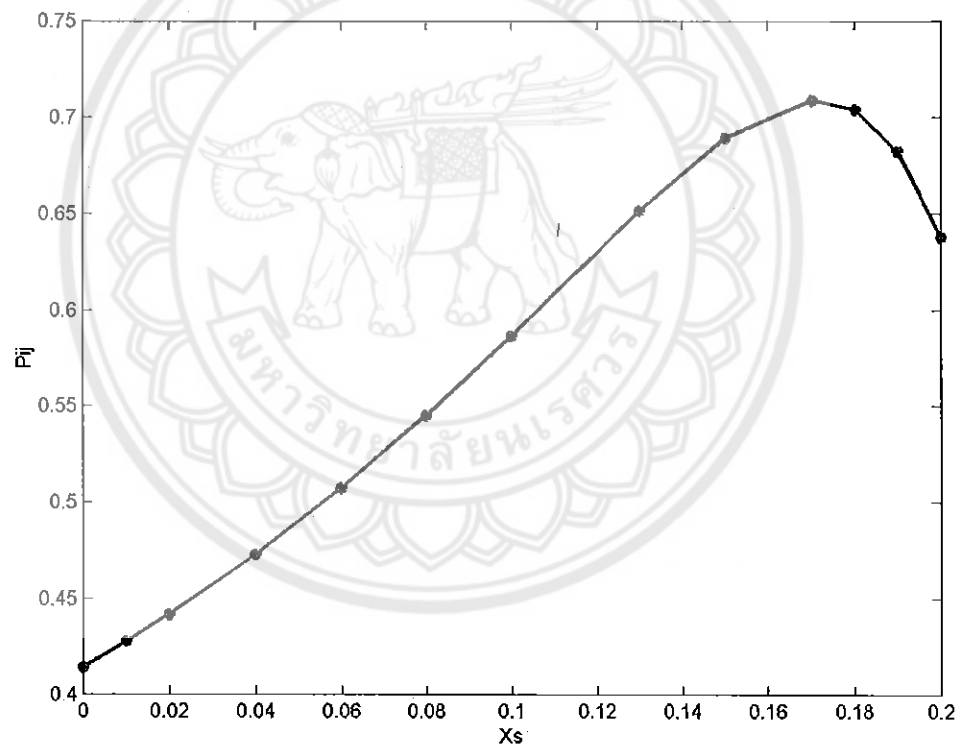
ตารางที่ 6 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC

Bus	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส
1	1.06	0	1.06	0	1.06	0	1.06	0
2	1.045	-0.0862	1.045	-0.0862	1.045	-0.0865	1.045	-0.0869
3	1.01	-0.2199	1.01	-0.2199	1.01	-0.2197	1.01	-0.2195
4	1.0278	-0.1809	1.0278	-0.1809	1.0277	-0.1801	1.0276	-0.1794
5	1.0343	-0.1559	1.0343	-0.1559	1.0341	-0.1548	1.0339	-0.1537
6	1.07	-0.2459	1.07	-0.2459	1.07	-0.2449	1.07	-0.2439
7	1.0547	-0.23	1.0547	-0.23	1.0547	-0.2292	1.0546	-0.2284
8	1.09	-0.23	1.09	-0.23	1.09	-0.2292	1.09	-0.2284
9	1.0482	-0.2564	1.0482	-0.2564	1.0482	-0.2556	1.0481	-0.2548
10	1.0446	-0.2595	1.0446	-0.2595	1.0445	-0.2587	1.0445	-0.2578
11	1.0536	-0.2549	1.0536	-0.2549	1.0536	-0.254	1.0536	-0.2531
12	1.0545	-0.2607	1.0545	-0.2607	1.0545	-0.2598	1.0545	-0.2588
13	1.049	-0.2618	1.049	-0.2618	1.049	-0.2609	1.049	-0.2599
14	1.0296	-0.276	1.0296	-0.276	1.0296	-0.2751	1.0295	-0.2742

ตารางที่ 7 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC

$X_s$	กำลังไฟฟ้าที่ไหล
0	0.4143 - 0.0747i
0.01	0.4277 - 0.0823i
0.02	0.4418 - 0.0909i
0.04	0.4726 - 0.1118i
0.06	0.5070 - 0.1393i
0.08	0.5450 - 0.1760i
0.1	0.5865 - 0.2261i
0.13	0.6513 - 0.3407i
0.15	0.6893 - 0.4589i
0.17	0.7088 - 0.6297i
0.18	0.7038 - 0.7417i
0.19	0.6824 - 0.8751i
0.2	0.6376 - 1.0314i

ตารางที่ 8 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC เมื่อปรับค่า  $X_s$  เป็นค่าต่าง ๆ



รูปที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $X_s$  กับ  $P$

จากผลของโปรแกรมจะเห็นว่าเมื่อเราปรับค่าพารามิเตอร์  $X_s$  ให้มีค่าเพิ่มจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่เราพิจารณานั้นมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าค่า  $X_s$  ที่ทำให้กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ ค่า  $X_s$  มีค่าเท่ากับค่า  $X_{ij}$  ของสายส่งที่เราพิจารณา ซึ่งการวิเคราะห์จะเห็นว่าผลของโปรแกรมที่ได้สอดคล้องกับสมการที่ (49)

2. เปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์ TCPS พร้อมทั้งปรับพารามิเตอร์ Alpha ในสายส่ง 2 - 5

line	ไม่ใช้อุปกรณ์	alpha=0.02	alpha=0.05	alpha=0.1
1 2	1.5561 - 0.2011i	1.3871 - 0.1606i	1.1493 - 0.1006i	0.7931 - 0.0042i
1 5	0.7625 - 0.0305i	0.6961 - 0.0242i	0.5997 - 0.0134i	0.4468 + 0.0079i
2 3	0.7250 + 0.0363i	0.7167 + 0.0372i	0.7036 + 0.0385i	0.6806 + 0.0410i
2 4	0.5576 - 0.0752i	0.5399 - 0.0712i	0.5123 - 0.0647i	0.4635 - 0.0528i
2 5	0.4143 - 0.0747i	0.5056 + 0.2187i	0.6437 + 0.2814i	0.8774 + 0.4031i
3 4	-0.2398 - 0.0244i	-0.2476 - 0.0210i	-0.2598 - 0.0155i	-0.2815 - 0.0058i
4 5	-0.6158 + 0.0391i	-0.6390 + 0.0490i	-0.6753 + 0.0645i	-0.7398 + 0.0917i
4 7	-0.2547 - 0.1260i	-0.2537 - 0.1259i	-0.2523 - 0.1258i	-0.2497 - 0.1257i
4 9	0.1463 - 0.0321i	0.1458 - 0.0321i	0.1449 - 0.0320i	0.1435 - 0.0318i
5 6	0.3946 - 0.1288i	0.3960 - 0.1290i	0.3982 - 0.1293i	0.4021 - 0.1298i
6 11	0.0761 + 0.0519i	0.0770 + 0.0516i	0.0785 + 0.0512i	0.0810 + 0.0506i
6 12	0.0788 + 0.0276i	0.0789 + 0.0275i	0.0790 + 0.0274i	0.0794 + 0.0273i
6 13	0.1791 + 0.0825i	0.1796 + 0.0823i	0.1803 + 0.0821i	0.1816 + 0.0818i
7 8	0.0000 - 0.2111i	0.0000 - 0.2113i	0.0000 - 0.2115i	0.0000 - 0.2119i
7 9	0.2657 + 0.0660i	0.2648 + 0.0663i	0.2633 + 0.0668i	0.2607 + 0.0676i
9 10	0.0499 + 0.0263i	0.0490 + 0.0266i	0.0476 + 0.0270i	0.0450 + 0.0278i
9 14	0.0920 + 0.0297i	0.0914 + 0.0299i	0.0905 + 0.0302i	0.0889 + 0.0307i
10 11	-0.0402 - 0.0320i	-0.0411 - 0.0317i	-0.0425 - 0.0312i	-0.0451 - 0.0304i
12 13	0.0170 + 0.0100i	0.0171 + 0.0100i	0.0173 + 0.0099i	0.0176 + 0.0097i
13 14	0.0588 + 0.0300i	0.0594 + 0.0298i	0.0603 + 0.0295i	0.0619 + 0.0289i

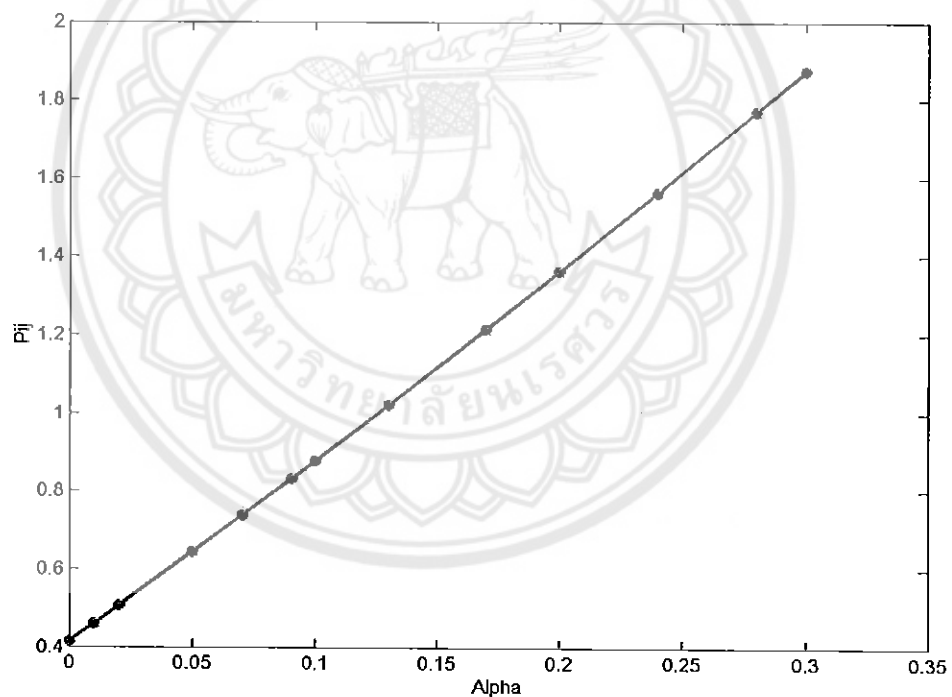
ตารางที่ 9 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCPS

Bus	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส
1	1.06	0	1.06	0	1.06	0	1.06	0
2	1.045	-0.0862	1.045	-0.0765	1.045	-0.0627	1.045	-0.0419
3	1.01	-0.2199	1.01	-0.2085	1.01	-0.1922	1.01	-0.167
4	1.0278	-0.1809	1.0278	-0.168	1.0278	-0.1493	1.0278	-0.1199
5	1.0343	-0.1559	1.0342	-0.1419	1.0341	-0.1216	1.0339	-0.0893
6	1.07	-0.2459	1.07	-0.2322	1.07	-0.2124	1.07	-0.181
7	1.0547	-0.23	1.0547	-0.2169	1.0547	-0.198	1.0546	-0.1681
8	1.09	-0.23	1.09	-0.2169	1.09	-0.198	1.09	-0.1681
9	1.0482	-0.2564	1.0482	-0.2433	1.0481	-0.2242	1.0479	-0.194
10	1.0446	-0.2595	1.0445	-0.2463	1.0445	-0.2271	1.0443	-0.1967
11	1.0536	-0.2549	1.0536	-0.2415	1.0536	-0.222	1.0535	-0.1911
12	1.0545	-0.2607	1.0545	-0.2471	1.0545	-0.2274	1.0545	-0.1961
13	1.049	-0.2618	1.049	-0.2482	1.049	-0.2285	1.0489	-0.1973
14	1.0296	-0.276	1.0296	-0.2627	1.0295	-0.2433	1.0294	-0.2127

ตารางที่ 10 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCPS

Alpha	กำลังไฟฟ้าที่ไหล
0	0.4143 + 0.1812i
0.01	0.4599 + 0.1995i
0.02	0.5056 + 0.2187i
0.05	0.6437 + 0.2814i
0.07	0.7366 + 0.3275i
0.09	0.8303 + 0.3770i
0.1	0.8774 + 0.4031i
0.13	1.0200 + 0.4866i
0.17	1.2133 + 0.6104i
0.2	1.3611 + 0.7128i
0.24	1.5623 + 0.8627i
0.28	1.7690 + 1.0285i
0.3	1.8746 + 1.1177i

ตารางที่ 11 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCPS เมื่อปรับค่า Alpha เป็นค่าต่าง ๆ



รูปที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha_p$  กับ P

จากผลของโปรแกรมจะเห็นว่าเมื่อเราปรับค่าพารามิเตอร์  $\alpha_p$  ให้มีค่าเพิ่มจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่เราพิจารณานั้นมีค่า ซึ่งการวิเคราะห์จะเห็นว่าผลของโปรแกรมที่ได้สอดคล้องกับสมการที่ (55) ซึ่งในสมการเมื่อเราใส่อุปกรณ์ TCPS เข้าไปในสายส่งที่เราพิจารณานั้นสมการของกำลังไฟฟ้าจะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ K เข้าไปซึ่งเป็นผลทำให้เมื่อเราเพิ่มค่า  $\alpha_p$  แล้วกำลังไฟฟ้าที่ไหลมีค่าเพิ่มตามด้วย

3. เปรียบเทียบการใช้อุปกรณ์ TCSC & TCPS และไมใช้ พร้อมทั้งปรับพารามิเตอร์  $X_s$  และ Alpha ในสายส่ง 2 - 5

line	ไมใช้อุปกรณ์	$X_s = 0.01$ & Alpha = 0.05	$X_s = 0.01$ & Alpha = 0.1	$X_s = 0.02$ & Alpha = 0.1
1 2	1.5561 - 0.2011i	1.1340 - 0.0966i	0.7586 + 0.0055i	0.7215 + 0.0161i
1 5	0.7625 - 0.0305i	0.5874 - 0.0102i	0.4277 + 0.0134i	0.4074 + 0.0197i
2 3	0.7250 + 0.0363i	0.7005 + 0.0388i	0.6769 + 0.0414i	0.6730 + 0.0418i
2 4	0.5576 - 0.0752i	0.5054 - 0.0618i	0.4553 - 0.0489i	0.4467 - 0.0445i
2 5	0.4143 - 0.0747i	0.6668 + 0.3060i	0.9106 + 0.4377i	0.9461 + 0.4774i
3 4	-0.2398 - 0.0244i	-0.2628 - 0.0129i	-0.2850 - 0.0022i	-0.2887 + 0.0018i
4 5	-0.6158 + 0.0391i	-0.6842 + 0.0716i	-0.7504 + 0.1012i	-0.7615 + 0.1119i
4 7	0.2547 - 0.1260i	0.2519 - 0.1263i	0.2492 - 0.1265i	0.2486 - 0.1275i
4 9	0.1463 - 0.0321i	0.1447 - 0.0322i	0.1431 - 0.0321i	0.1428 - 0.0325i
5 6	0.3946 - 0.1288i	0.3989 - 0.1307i	0.4030 - 0.1319i	0.4039 - 0.1345i
6 11	0.0761 + 0.0519i	0.0789 + 0.0513i	0.0816 + 0.0507i	0.0822 + 0.0509i
6 12	0.0788 + 0.0276i	0.0791 + 0.0274i	0.0794 + 0.0273i	0.0795 + 0.0273i
6 13	0.1791 + 0.0825i	0.1805 + 0.0822i	0.1819 + 0.0819i	0.1822 + 0.0820i
7 8	0.0000 - 0.2111i	0.0000 - 0.2121i	0.0000 - 0.2128i	0.0000 - 0.2139i
7 9	0.2657 + 0.0660i	0.2629 + 0.0668i	0.2601 + 0.0677i	0.2595 + 0.0678i
9 10	0.0499 + 0.0263i	0.0471 + 0.0269i	0.0445 + 0.0276i	0.0439 + 0.0274i
9 14	0.0920 + 0.0297i	0.0902 + 0.0302i	0.0885 + 0.0306i	0.0881 + 0.0305i
10 11	-0.0402 - 0.0320i	-0.0429 - 0.0313i	-0.0456 - 0.0306i	-0.0461 - 0.0308i
12 13	0.0170 + 0.0100i	0.0174 + 0.0099i	0.0177 + 0.0097i	0.0178 + 0.0097i
13 14	0.0588 + 0.0300i	0.0605 + 0.0295i	0.0622 + 0.0290i	0.0626 + 0.0291i

ตารางที่ 12 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC & TCPS

Bus	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส
1	1.06	0	1.06	0	1.06	0	1.06	0
2	1.045	-0.0862	1.045	-0.0618	1.045	-0.0399	1.045	-0.0377
3	1.01	-0.2199	1.01	-0.1907	1.01	-0.1643	1.01	-0.1614
4	1.0278	-0.1809	1.0276	-0.1471	1.0275	-0.1163	1.0271	-0.1125
5	1.0343	-0.1559	1.0337	-0.119	1.0333	-0.0852	1.0326	-0.0808
6	1.07	-0.2459	1.07	-0.21	1.07	-0.1772	1.07	-0.173
7	1.0547	-0.23	1.0546	-0.1957	1.0544	-0.1644	1.0543	-0.1605
8	1.09	-0.23	1.09	-0.1957	1.09	-0.1644	1.09	-0.1605
9	1.0482	-0.2564	1.048	-0.2219	1.0477	-0.1903	1.0475	-0.1864
10	1.0446	-0.2595	1.0444	-0.2248	1.0442	-0.193	1.044	-0.189
11	1.0536	-0.2549	1.0535	-0.2196	1.0534	-0.1873	1.0533	-0.1832
12	1.0545	-0.2607	1.0545	-0.2249	1.0545	-0.1922	1.0545	-0.1881
13	1.049	-0.2618	1.049	-0.2261	1.0489	-0.1934	1.0489	-0.1893
14	1.0296	-0.276	1.0294	-0.241	1.0293	-0.2089	1.0291	-0.2049

ตารางที่ 13 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์ TCSC & TCPS



## 4. เปรียบเทียบการใช้อุปกรณ์เฟลทส์ชนิดต่าง ๆ และไม่ใช้อุปกรณ์ ในสายส่ง 2 - 5

line	ไม่ใช้อุปกรณ์	ใช้ TCSC	ใช้ TCPS	ใช้ TCSC & TCPS
1 2	1.5561 - 0.2011i	1.5671 - 0.2036i	0.7931 - 0.0042i	0.7215 + 0.0161i
1 5	0.7625 - 0.0305i	0.7520 - 0.0278i	0.4468 + 0.0079i	0.4074 + 0.0197i
2 3	0.7250 + 0.0363i	0.7196 + 0.0369i	0.6806 + 0.0410i	0.6730 + 0.0418i
2 4	0.5576 - 0.0752i	0.5458 - 0.0713i	0.4635 - 0.0528i	0.4467 - 0.0445i
2 5	0.4143 - 0.0747i	0.4418 - 0.0909i	0.8774 + 0.4031i	0.9461 + 0.4774i
3 4	-0.2398 - 0.0244i	-0.2449 - 0.0209i	-0.2815 - 0.0058i	-0.2887 + 0.0018i
4 5	-0.6158 + 0.0391i	-0.6310 + 0.0490i	-0.7398 + 0.0917i	-0.7615 + 0.1119i
4 7	0.2547 - 0.1260i	0.2540 - 0.1265i	0.2497 - 0.1257i	0.2486 - 0.1275i
4 9	0.1463 - 0.0321i	0.1459 - 0.0323i	0.1435 - 0.0318i	0.1428 - 0.0325i
5 6	0.3946 - 0.1288i	0.3956 - 0.1303i	0.4021 - 0.1298i	0.4039 - 0.1345i
6 11	0.0761 + 0.0519i	0.0768 + 0.0519i	0.0810 + 0.0506i	0.0822 + 0.0509i
6 12	0.0788 + 0.0276i	0.0788 + 0.0276i	0.0794 + 0.0273i	0.0795 + 0.0273i
6 13	0.1791 + 0.0825i	0.1795 + 0.0825i	0.1816 + 0.0818i	0.1822 + 0.0820i
7 8	0.0000 - 0.2111i	0.0000 - 0.2118i	0.0000 - 0.2119i	0.0000 - 0.2139i
7 9	0.2657 + 0.0660i	0.2651 + 0.0662i	0.2607 + 0.0676i	0.2595 + 0.0678i
9 10	0.0499 + 0.0263i	0.0492 + 0.0263i	0.0450 + 0.0278i	0.0439 + 0.0274i
9 14	0.0920 + 0.0297i	0.0915 + 0.0297i	0.0889 + 0.0307i	0.0881 + 0.0305i
10 11	-0.0402 - 0.0320i	-0.0408 - 0.0320i	-0.0451 - 0.0304i	-0.0461 - 0.0308i
12 13	0.0170 + 0.0100i	0.0171 + 0.0100i	0.0176 + 0.0097i	0.0178 + 0.0097i
13 14	0.0588 + 0.0300i	0.0592 + 0.0300i	0.0619 + 0.0289i	0.0626 + 0.0291i

ตารางที่ 14 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์เฟลทส์ชนิดต่าง ๆ

Bus	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส
1	1.06	0	1.06	0	1.06	0	1.06	0
2	1.045	-0.0862	1.045	-0.0869	1.045	-0.0419	1.045	-0.0377
3	1.01	-0.2199	1.01	-0.2195	1.01	-0.167	1.01	-0.1614
4	1.0278	-0.1809	1.0276	-0.1794	1.0278	-0.1199	1.0271	-0.1125
5	1.0343	-0.1559	1.0339	-0.1537	1.0339	-0.0893	1.0326	-0.0808
6	1.07	-0.2459	1.07	-0.2439	1.07	-0.181	1.07	-0.173
7	1.0547	-0.23	1.0546	-0.2284	1.0546	-0.1681	1.0543	-0.1605
8	1.09	-0.23	1.09	-0.2284	1.09	-0.1681	1.09	-0.1605
9	1.0482	-0.2564	1.0481	-0.2548	1.0479	-0.194	1.0475	-0.1864
10	1.0446	-0.2595	1.0445	-0.2578	1.0443	-0.1967	1.044	-0.189
11	1.0536	-0.2549	1.0536	-0.2531	1.0535	-0.1911	1.0533	-0.1832
12	1.0545	-0.2607	1.0545	-0.2588	1.0545	-0.1961	1.0545	-0.1881
13	1.049	-0.2618	1.049	-0.2599	1.0489	-0.1973	1.0489	-0.1893
14	1.0296	-0.276	1.0295	-0.2742	1.0294	-0.2127	1.0291	-0.2049

ตารางที่ 15 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งเมื่อใช้อุปกรณ์เฟลทส์ชนิดต่าง

\*\*หมายเหตุ  $X_s = 0.02$   $\alpha = 0.1$

5. เปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์เฟคทส์ชนิดต่าง ๆ ในสายส่งต่าง ๆ ดังตาราง

กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งต่าง ๆ

line		ไม่ใช้อุปกรณ์	ใช้อุปกรณ์เฟคทส์	ชนิดที่ใช้
1	2	1.5561 - 0.2011i	0.0174 + 0.2335i	ไม่ใช้
1	5	0.7625 - 0.0305i	-0.1249 + 0.0707i	ไม่ใช้
2	3	0.7250 + 0.0363i	0.4392 + 0.0799i	TCSC
2	4	0.5576 - 0.0752i	-0.0896 + 0.0775i	ไม่ใช้
2	5	0.4143 - 0.0747i	-0.1504 + 0.0260i	ไม่ใช้
3	4	-0.2398 - 0.0244i	-0.5116 + 0.0674i	ไม่ใช้
4	5	-0.6158 + 0.0391i	-0.2361 - 0.2378i	ไม่ใช้
4	7	0.2547 - 0.1260i	0.1632 - 0.0609i	TCPS
4	9	0.1463 - 0.0321i	-0.0987 + 0.0001i	ไม่ใช้
5	6	0.3946 - 0.1288i	-0.5698 - 0.0623i	ไม่ใช้
6	11	0.0761 + 0.0519i	0.2316 + 0.0230i	ไม่ใช้
6	12	0.0788 + 0.0276i	-0.0208 + 0.1047i	ไม่ใช้
6	13	0.1791 + 0.0825i	0.5051 + 0.4299i	TCSC & TCPS
7	8	0.0000 - 0.2111i	0.0000 - 0.2291i	ไม่ใช้
7	9	0.2657 + 0.0660i	0.1722 + 0.1608i	ไม่ใช้
9	10	0.0499 + 0.0263i	-0.0989 + 0.0701i	ไม่ใช้
9	14	0.0920 + 0.0297i	-0.1061 + 0.1176i	TCSC
10	11	-0.0402 - 0.0320i	-0.1893 + 0.0109i	ไม่ใช้
12	13	0.0170 + 0.0100i	-0.0830 + 0.0861i	ไม่ใช้
13	14	0.0588 + 0.0300i	0.2696 - 0.0324i	ไม่ใช้

ตารางที่ 16 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งต่าง ๆ

Bus	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส	ขนาดแรงดัน	มุมเฟส
1	1.06	0	1.06	0
2	1.045	-0.0862	1.045	0.0037
3	1.01	-0.2199	1.01	-0.0658
4	1.0278	-0.1809	1.0337	0.0236
5	1.0343	-0.1559	1.0461	0.0299
6	1.07	-0.2459	1.07	0.1586
7	1.0547	-0.23	1.0516	0.0923
8	1.09	-0.23	1.09	0.0923
9	1.0482	-0.2564	1.035	0.0749
10	1.0446	-0.2595	1.0323	0.0848
11	1.0536	-0.2549	1.046	0.1193
12	1.0545	-0.2607	1.0475	0.1748
13	1.049	-0.2618	1.0491	0.2072
14	1.0296	-0.276	1.0204	0.1143

ตารางที่ 17 แสดงค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันในสายส่งต่าง ๆ

\*\*หมายเหตุ  $X_s = 0.02$   $\alpha = 0.1$

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

1. อุปกรณ์เฟลคทส์ชนิด TCSC เมื่อเราปรับค่าพารามิเตอร์  $X_c$  เพิ่มจะทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามด้วย เนื่องจากสังเกตจากสมการที่ (49) จะเห็นว่าถ้าเราปรับค่า  $X_c$  เพิ่มจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลมีค่าเพิ่ม

2. อุปกรณ์เฟลคทส์ชนิด TCPS เมื่อเราปรับค่าพารามิเตอร์ Alpha เพิ่ม จะทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามด้วย เนื่องจากสังเกตจากสมการที่ (55) จะเห็นว่าค่าการใส่อุปกรณ์ TCPS จะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ K เข้าไปในสมการทำให้ ยิ่งเราปรับค่า Alpha เพิ่มจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลมีค่าเพิ่ม

3. เมื่อนำอุปกรณ์เฟลคทส์ชนิด TCSC & TCPS ( ใช้ร่วมกัน ) ใช้ในสายส่งจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่า อุปกรณ์ TCPS และ TCSC ตามลำดับโดยที่ TCPS จะเพิ่มได้ดีกว่าเพราะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ K เข้าไปด้วยแต่ TCSC เพียงแค่ปรับค่า  $X_c$  ซึ่งจากการวิเคราะห์การปรับค่าพารามิเตอร์ K จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการปรับค่า  $X_c$

ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ โหลดโพล้ว ในที่นี้ได้ทำการคำนวณในสภาวะคงตัว และไม่ได้คิดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่งซึ่งอาจทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลเกิดความคลาดเคลื่อนได้

อุปกรณ์เฟลคทส์ที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นเป็นแค่บางชนิดเท่านั้น ยังมีอีกหลายชนิดที่ไม่ได้นำมาพิจารณา ซึ่งอุปกรณ์เฟลคทส์แต่ละชนิดก็จะมีข้อดีข้อเสีย ที่แตกต่างกันออกไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยฤกษ์ จักพัฒน์จิต, “การจำลองและวิเคราะห์อุปกรณ์ Thyristor-Controlled-Series Capacitors โดยใช้ โปรแกรม EMTP” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2544.
- [2] ชวลิต ดำรงรัตน์, การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เล่ม 1, กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2538.
- [3] พิทักษ์ ทางรัตนสุวรรณ, “การปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์แฟลคส์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย 2544.
- [4] สุรัชย์ ลิ้มยิ่งยง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, ขอนแก่น: หน่วยสารบรรณงานบริหารและธุรการ, 2534.
- [5] สุรัชย์ ลิ้มยิ่งเจริญ, Flexible AC Transmission System – FACTS, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [6] Bhasaputra Pornrapeepat, “Optimal power flow with facts devices by hybrid TS/SA Approach” A thesis of Master of Engineering ,Electrical Engineering, Asian Institute of Technology, School of Environment, 2001.

## ภาคผนวก

## โปรแกรมการคำนวณ LOAD FLOW 14 BUS

%	m	n							
%	bus-bus	R	X	SH	tab	setting	TYPE		
clear								% FACTS = 0 no facts	
data=[	1 2	0.01938	0.05917	0.0264	0	0;		% = 1 use TCSC	
	1 5	0.05403	0.22304	0.0246	0	0;		% = 2 use TCPS	
	2 3	0.04699	0.19797	0.0219	0	0;		% = 3 use TCSC \$ TCPS	
	2 4	0.05811	0.17632	0.0187	0	0;			
	2 5	0.05695	0.17388	0.0170	0	0;			
	3 4	0.06701	0.17103	0.0173	0	0;			
	4 5	0.01335	0.04211	0.0064	0	0;			
	4 7	0	0.20912	0	0.978	0;			
	4 9	0	0.55618	0	0.969	0;			
	5 6	0	0.25202	0	0.932	0;			
	6 11	0.09498	0.19890	0	0	0;			
	6 12	0.12291	0.25581	0	0	0;			
	6 13	0.06615	0.13027	0	0	0;			
	7 8	0	0.17615	0	0	0;			
	7 9	0	0.11001	0	0	0;			
	9 10	0.03181	0.08450	0	0	0;			
	9 14	0.12711	0.27038	0	0	0;			
	10 11	0.08205	0.19207	0	0	0;			
	12 13	0.22092	0.19988	0	0	0;			
	13 14	0.17093	0.34802	0	0	0];			

%	bus	starting bus	voltage	generation	Load	Type_bus		
%		mag	angle	MW	MVar	MW	MVar	
PQdata=[	1	1.06	0	0	0	0	0	1;
	2	1.045	0	0.4	0	0.217	0.127	2;

3	1.010	0	0	0	0.942	0.190	2;
4	1.0	0	0	0	0.478	0.039	3;
5	1.0	0	0	0	0.076	0.018	3;
6	1.070	0	0	0	0.112	0.075	2;
7	1.0	0	0	0	0	0	3;
8	1.090	0	0	0	0	0	2;
9	1.0	0	0	0	0.295	0.166	3;
10	1.0	0	0	0	0.09	0.058	3;
11	1.0	0	0	0	0.035	0.018	3;
12	1.0	0	0	0	0.061	0.016	3;
13	1.0	0	0	0	0.135	0.058	3;
14	1.0	0	0	0	0.149	0.056	3];

%TCCS TCPS

% Xj ALpha

FACTS=[ 0.02 0.1 ];

Num\_Data=length(data(:,1));

Num\_Bus=length(PQdata(:,1));

B\_m=data(:,1);

B\_n=data(:,2);

R=data(:,3);

X=data(:,4);

SH=data(:,5);

SHH=zeros(Num\_Bus,Num\_Bus);

Tab\_setting=data(:,6);

Facts=data(:,7);

% Add paramiter for line used facts (-TCSC-)

for i=1:Num\_Data

if Facts(i)==1

```

        X(i)=X(i)-FACTS(1);
    end
    if Facts(i)==3
        X(i)=X(i)-FACTS(1);
    end
end
end

```

---

```

% Add parameter for line used facts (-TCPS-)

```

```

Alpha=FACTS(2);
K=cos(Alpha);

for i=1:Num_Bus
    SHH(B_m(i),B_n(i))=SH(i);
    SHH(B_n(i),B_m(i))=SHH(B_m(i),B_n(i));
end
SHH
Y=zeros(Num_Bus,Num_Bus);
for i=1:Num_Data
    if Tab_setting(i)==0
        Y(B_m(i),B_n(i))=-1/(R(i)+j*X(i));
    else
        Y(B_m(i),B_n(i))=(-1/(R(i)+j*X(i)))/Tab_setting(i);
    end
end
Y(B_n(i),B_m(i))=Y(B_m(i),B_n(i));
end

for i=1:Num_Bus
    for k=1:Num_Bus
        if i~=k
            Y(i,i)=-Y(i,k)+j*SHH(i,k)+Y(i,i);

```

```

        end
    end
end
for i=1:Num_Data
    if Tab_setting(i)~=0
        Y(B_m(i),B_m(i))=((Tab_setting(i)-1)/Tab_setting(i))*j*(R(i)+j*X(i))+Y(B_m(i),B_m(i));
        Y(B_n(i),B_n(i))=((1-
Tab_setting(i))/(Tab_setting(i)^2))*j*(R(i)+j*X(i))+Y(B_n(i),B_n(i));
    end
end
Y(9,9)=Y(9,9)+j*0.19;
Type_Bus=PQdata(:,8);
MAG_V=PQdata(:,2);
ANG_V=PQdata(:,3);
P_GEN=PQdata(:,4);
Q_GEN=PQdata(:,5);
P_LOAD=PQdata(:,6);
Q_LOAD=PQdata(:,7);
for i=1:Num_Bus
    Psch(i)=P_GEN(i)-P_LOAD(i);
    Qsch(i)=Q_GEN(i)-Q_LOAD(i);
end

G=1;
tot=0.00005;
dvmax=2

while dvmax>tot&G<50
    dvmax=0
    disp('.....iteration..... ')

    PPP=zeros(Num_Bus,Num_Bus);
    QQQ=zeros(Num_Bus,Num_Bus);

```



```

BBB=zeros(14,1);
for i=1:Num_Data
    if Facts(i)>1&Facts(i)<4

        PPP(B_m(i),B_n(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*cos(ANG_V(B
        _m(i))-ANG_V(B_n(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))+Alpha)/K ;

        PPP(B_n(i),B_m(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*cos(ANG_V(B
        _n(i))-ANG_V(B_m(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))+Alpha)/K ;

        QQQ(B_m(i),B_n(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*sin(ANG_V(
        B_m(i))-ANG_V(B_n(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))+Alpha)/K ;

        QQQ(B_n(i),B_m(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*sin(ANG_V(
        B_n(i))-ANG_V(B_m(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))+Alpha)/K ;

        BBB(B_m(i))=1;

    else

        PPP(B_m(i),B_n(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*cos(ANG_V(B
        _m(i))-ANG_V(B_n(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))) ;

        PPP(B_n(i),B_m(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*cos(ANG_V(B
        _n(i))-ANG_V(B_m(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))) ;

        QQQ(B_m(i),B_n(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*sin(ANG_V(
        B_m(i))-ANG_V(B_n(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))) ;

        QQQ(B_n(i),B_m(i))=MAG_V(B_m(i))*abs(Y(B_m(i),B_n(i)))*MAG_V(B_n(i))*sin(ANG_V(
        B_n(i))-ANG_V(B_m(i))-angle(Y(B_m(i),B_n(i)))) ;
    
```

```

end
end
for i=2:Num_Bus
    P(i)=0;
    Q(i)=0;
    for r=1:Num_Bus
        P(i)=PPP(i,r)+P(i);
        Q(i)=QQQ(i,r)+Q(i);
    end
    if BBB(i)==1
        P(i)=MAG_V(i)*abs(Y(i,i))*MAG_V(i)*cos(ANG_V(i)-ANG_V(i)-
angle(Y(i,i)))/(K^2)+P(i);
        Q(i)=MAG_V(i)*abs(Y(i,i))*MAG_V(i)*sin(ANG_V(i)-ANG_V(i)-
angle(Y(i,i)))/(K^2)+Q(i);
    else
        P(i)=MAG_V(i)*abs(Y(i,i))*MAG_V(i)*cos(ANG_V(i)-ANG_V(i)-angle(Y(i,i)))+P(i);
        Q(i)=MAG_V(i)*abs(Y(i,i))*MAG_V(i)*sin(ANG_V(i)-ANG_V(i)-angle(Y(i,i)))+Q(i);
    end
end
end

for i=2:Num_Bus
    for k=2:Num_Bus
        if i==k
            J(i,i)=P(i)-MAG_V(i)^2*abs(Y(i,i))*cos(-angle(Y(i,i)));
            N(i,i)=P(i)+MAG_V(i)^2*abs(Y(i,i))*cos(-angle(Y(i,i)));
            H(i,i)=-Q(i)+MAG_V(i)^2*abs(Y(i,i))*sin(-angle(Y(i,i)));
            L(i,i)=Q(i)+MAG_V(i)^2*abs(Y(i,i))*sin(-angle(Y(i,i)));
        else
            H(i,k)=MAG_V(i)*abs(Y(i,k))*MAG_V(k)*sin(ANG_V(i)-ANG_V(k)-angle(Y(i,k)));
            L(i,k)=H(i,k);
            J(i,k)=-MAG_V(i)*abs(Y(i,k))*MAG_V(k)*cos(ANG_V(i)-ANG_V(k)-angle(Y(i,k)));

```

```

        N(i,k)=-J(i,k);
    end
end
end
r=1;
for i=2:Num_Bus
    B(i-1)=Psch(i)-P(i);
    r=r+1;
end
e=1;
for i=2:Num_Bus
    if Type_Bus(i)~=2
        B(r)=Qsch(i)-Q(i);
        r=r+1;
        g(e)=i;
        e=e+1;
    end
end
C=B';
for i=1:length(B)
    if B(i) > dvmax
        dvmax = B(i);
    end
end
for i=2:Num_Bus
    for k=2:Num_Bus
        m(i-1,k-1)=H(i,k);
    end
end
for i=2:Num_Bus
    for k=1:length(g)

```

```

    t(i-1,k)=N(i,g(k));
    end
end
for i=1:length(g)
    for k=2:Num_Bus
        s(i,k-1)=J(g(i),k);
    end
end
for i=1:length(g)
    for k=1:length(g)
        u(i,k)=L(g(i),g(k));
    end
end
% Jakobain matrix
D=[m t;
    s u];
[L,U]=lu(D);
XX=inv(U)*inv(L)*C;
XX=XX';
for i=2:Num_Bus
    ANG_V(i)=ANG_V(i)+XX(i-1);
end
-LL=length(B)-length(g);
for i=1:length(g)
    MAG_V(g(i))=MAG_V(g(i))*(1+XX(i+LL));
end
MAG_V
ANG_V

```

```

G=G+1;
dvmax;
end

%ANG_V=ANG_V*180/pi;
P=zeros(14,1);
Q=zeros(14,1);
for i=1:Num_Bus
    for r=1:Num_Bus
        P(i)=MAG_V(i)*abs(Y(i,r))*MAG_V(r)*cos(ANG_V(i)-ANG_V(r)-angle(Y(i,r)))+P(i);
        Q(i)=MAG_V(i)*abs(Y(i,r))*MAG_V(r)*sin(ANG_V(i)-ANG_V(r)-angle(Y(i,r)))+Q(i);
    end
end
for i=1:Num_Bus
    V(i)=MAG_V(i)*cos(ANG_V(i))+j*MAG_V(i)*sin(ANG_V(i));
end

% parameter for Power flow
for i=1:Num_Data
    G(B_m(i),B_n(i))=R(i)/(R(i)^2+X(i)^2);
    B(B_m(i),B_n(i))=-X(i)/(R(i)^2+X(i)^2);
end

% Start find Pij flow
P_flow=zeros;
Q_flow=zeros;

for i=1:Num_Data
    SSS=ANG_V(B_n(i))-ANG_V(B_m(i));
    if Facts(i)>1&Facts(i)<4
        SSS=SSS+Alpha;
    end
end

```

```

P_flow(B_m(i),B_n(i))=MAG_V(B_m(i))^2*G(B_m(i),B_n(i))/(K^2)-
MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS)+B(B_m(i),B_n(i))*sin(SSS))/
K;

```

```

Q_flow(B_m(i),B_n(i))=-j*(-MAG_V(B_m(i))^2*B(B_m(i),B_n(i))/K^2-
MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*sin(-SSS)-B(B_m(i),B_n(i))*cos(-
SSS))/K)-j*V(B_m(i))*conj(V(B_m(i)))*SHH(B_m(i),B_n(i));

```

```

else

```

```

P_flow(B_m(i),B_n(i))=MAG_V(B_m(i))^2*G(B_m(i),B_n(i))-
MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS)+B(B_m(i),B_n(i))*sin(SSS));
Q_flow(B_m(i),B_n(i))=-j*(-MAG_V(B_m(i))^2*B(B_m(i),B_n(i))-
MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*sin(SSS)-B(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS)))-
j*V(B_m(i))*conj(V(B_m(i)))*SHH(B_m(i),B_n(i));

```

```

end

```

```

PP(i)=P_flow(B_m(i),B_n(i));

```

```

QQ(i)=Q_flow(B_m(i),B_n(i));

```

```

end

```

```

Sij_flow=(PP-QQ)'

```

```

% STOP find Pij flow

```

```

% Start find Pji flow

```

```

P2_flow=zeros;

```

```

Q2_flow=zeros;

```

```

for i=1:Num_Data

```

```

SSS=ANG_V(B_n(i))-ANG_V(B_m(i));

```

```

if Facts(i)>1&Facts(i)<4

```

```

SSS=SSS+Alpha;

```

```

P2_flow(B_n(i),B_m(i))=MAG_V(B_n(i))^2*G(B_m(i),B_n(i))-
MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS)-
B(B_m(i),B_n(i))*sin(SSS))/K;

```

```

Q2_flow(B_n(i),B_m(i))=-j*(-
MAG_V(B_n(i))^2*B(B_m(i),B_n(i))+MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*s
in(SSS)+B(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS))/K)-j*V(B_n(i))*conj(V(B_n(i)))*SHH(B_m(i),B_n(i));

```

```

else

```

```

P2_flow(B_n(i),B_m(i))=MAG_V(B_n(i))^2*G(B_m(i),B_n(i))-
MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS)-B(B_m(i),B_n(i))*sin(SSS));

```

```

Q2_flow(B_n(i),B_m(i))=-j*(-
MAG_V(B_n(i))^2*B(B_m(i),B_n(i))+MAG_V(B_m(i))*MAG_V(B_n(i))*(G(B_m(i),B_n(i))*s
in(SSS)+B(B_m(i),B_n(i))*cos(SSS)))-j*V(B_n(i))*conj(V(B_n(i)))*SHH(B_m(i),B_n(i));

```

```

end

```

```

PP2(i)=P2_flow(B_n(i),B_m(i));

```

```

QQ2(i)=Q2_flow(B_n(i),B_m(i));

```

```

end

```

```

Sji_flow=(PP2-QQ2)

```

```

% STOP find Pji flow

```

## ประวัติผู้เขียนโครงการ

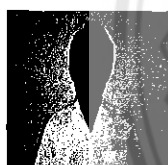
ชื่อ นายดำรัส กุ่มทัก  
 ภูมิลำเนา 61 ม.8 ต.บ้านหม้อ อ.พิชัย จ.อุตรดิตถ์  
 ประวัติการศึกษา



- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิชัย
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : att2458@hotmail.com

ชื่อ นายเฉลิมชัย ศรีมงคล  
 ภูมิลำเนา 34/1 ม.3 ต.บ้านเก่า อ.หนองจาง จ.อุทัยธานี  
 ประวัติการศึกษา



- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองจางวิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : auysrimongkol@hotmail.com