

การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรด้วยตัวชดเชย  
กำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ควบคุมด้วยพีชชีลอจิกชนิดเฟสเพลงน

THE STABILITY INCREASING OF MULTI-MACHINE POWER SYSTEM  
USING STATIC VAR COMPENSATOR CONTROLLED BY THE PHASE  
PLANE TYPE FUZZY LOGIC

กิตติ โพธิ์รัง  
KITTI PHORANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-620-2

การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรด้วยตัวชดเชย  
กำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกชนิดเฟสเพลน

THE STABILITY INCREASING OF MULTI-MACHINE POWER SYSTEM  
USING STATIC VAR COMPENSATOR CONTROLLED BY THE PHASE  
PLANE TYPE FUZZY LOGIC

กิตติ โพรธีรัง

KITTI PHORANG

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน..... 43268  
วัน, เดือน, ปี..... 12 1 ค.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974 - 648 - 629 - 2

**THE STABILITY INCREASING OF MULTI-MACHINE POWER SYSTEM  
USING STATIC VAR COMPENSATOR CONTROLLED BY THE PHASE  
PLANE TYPE FUZZY LOGIC**

**KITTI PHORANG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974 – 648 – 629 - 2**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร ด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ควบคุมด้วยฟิซซี่ลอจิก ชนิดเฟสเฟลน
นักศึกษา	นาย กิตติ โพธิ์รัง
รหัสประจำตัว	40061033
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. มณฑล ตีลาจินดาไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอแนวความคิดในการประยุกต์ตัวควบคุมฟิซซี่ชนิดเฟสเฟลน เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์(Static Var Compensator , SVC) โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบที่ใช้ทดสอบคือระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 4 เครื่องโดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณและถูกเชื่อมต่อกันด้วยระบบสายส่งระยะไกล SVC จะถูกติดตั้งที่สายส่งซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบริเวณทั้ง 2 นี้ สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมฟิซซี่คือ สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งซึ่งเชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้งSVC การศึกษาด้วยระบบจำลองบนคอมพิวเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงผลของ SVC ซึ่งถูกควบคุมด้วยฟิซซี่ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อมีการรบกวนซึ่งได้แก่ การเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินขึ้นในระบบ

<b>Thesis Title</b>	The Stability Increasing of Multi-Machine Power System using Static Var Compensator controlled by the Phase Plane Type Fuzzy Logic
<b>Student</b>	Mr. Kitti Phorang
<b>Student ID.</b>	40061033
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Monthon Leelajindakraireak

### **ABSTRACT**

This thesis presents an idea of applying a phase plane type fuzzy logic controller to generate a supplementary control signal to a static var compensator (SVC) for the purpose of increasing in power system stability. The test system is a two-area multi-machine power system consisting of 4 synchronous generators. The SVC is installed at the transmission line, linked between two power system areas. The input signal of the fuzzy controller is the power flowing in the transmission line connected to the SVC bus. Simulation results demonstrate the effect of SVC controlled by the fuzzy in the power system stability subjected to a 3-phase to ground short circuit disturbance.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง จาก รศ.มณฑล ติลาจินดาไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และ เป็นกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณอมริสา มณีรุ่ง ผู้ให้คำปรึกษา และ เป็นแรงผลักดันที่สำคัญยิ่ง ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณคมสันต์ หงษ์สมบัติ ผู้ให้คำปรึกษา รวมทั้งข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากท่านเป็นสิ่งสำคัญยิ่งต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณอมรินทร์ ผ่องโสภา ประสบการณ์ของท่านทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังและโรงไฟฟ้ารวมทั้งข้อมูลต่างๆ เป็นสิ่งสำคัญยิ่งต่อวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กิตติ โพธิ์รัง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
คำจำกัดความ .....	XVI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา .....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย .....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา .....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	6
2.1.1 เสถียรภาพของมุมโรเตอร์ .....	7
2.1.2 สมการสวิง .....	8
2.1.3 การแก้สมการสวิง .....	9
2.1.4 การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร .....	10
2.2 การใช้ SVC เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	12
2.2.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ .....	12
2.2.2 การทำงานและชนิดของ SVC .....	13
2.2.2.1 ไทริสเตอร์คอนโทรลลิ่งแอกเตอร์ .....	13
2.2.2.2 ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ .....	14
2.2.3 สัญญาณควบคุมเสริมของ SVC .....	16

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.4 ผลกระทบของ SVC ต่อระบบไฟฟ้ากำลัง .....	17
2.2.5 การควบคุมการทำงานของ SVC .....	18
2.2.5.1 การควบคุมด้วย $\Delta\delta$ .....	21
2.2.5.2 การควบคุมด้วย $\Delta\omega$ .....	22
2.2.6 การใช้งานSVC .....	23
2.3 การใช้ฟิซซี่ลอจิกในระบบไฟฟ้ากำลัง .....	24
2.3.1 พื้นฐานของกฎฟิซซี่สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง .....	24
2.3.2 เฟสเพลน .....	28
<b>บทที่ 3 วิเคราะห์ระบบจำลอง .....</b>	<b>32</b>
3.1 แบบจำลองระบบ .....	32
3.2 สมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	34
3.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	37
3.4 แบบจำลอง SVC และตัวควบคุมฟิซซี่ของ SVC .....	41
3.5 สถานะเริ่มต้นของระบบไฟฟ้า .....	43
3.6 สถานะการรบกวน .....	46
<b>บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมฟิซซี่ซึ่งอาศัยข้อมูลจากเฟสเพลนสำหรับSVC .....</b>	<b>48</b>
4.1 การแปลงความหมายข้อมูลจากเฟสเพลน .....	48
4.2 การคำนวณสัญญาณควบคุม .....	52
4.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมฟิซซี่ .....	53
4.4 การปรับการควบคุม SVC โดยใช้ข้อมูลจากเฟสเพลน .....	55
4.5 ข้อสรุปเกี่ยวกับฟิซซี่ซนิกเฟสเพลนและตัวอย่างการคำนวณ .....	57
<b>บทที่ 5 การออกแบบโปรแกรม .....</b>	<b>60</b>
5.1 การออกแบบโปรแกรมสำหรับจำลองระบบ .....	60
5.1.1 การหาค่าเริ่มต้นของระบบ .....	63
5.1.2 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกในสถานะต่างๆ .....	64

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การแก้สมการอนุพันธ์ .....	68
5.2 โปรแกรมจำลองระบบกรณีควบคุมด้วยPSS .....	71
5.3 โปรแกรมจำลองระบบกรณีควบคุมด้วย SVCชนิดพีซีซี .....	74
5.3.1 การหาค่าของมุม $\theta$ .....	78
5.3.2 การหาค่าของ $\mu_N$ .....	80
5.3.3 การหาค่าของ $\mu_G$ และ $U_{SVC}$ .....	82
5.4 โปรแกรมจำลองระบบกรณีควบคุมแบบผสมผสาน .....	84
5.5 โปรแกรมออกแบบตัวควบคุมพีซีซีของSVC .....	88
บทที่ 6 ผลการทดลอง .....	90
6.1 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วย PSS .....	91
6.2 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วย SVC .....	95
6.3 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วย FPSVC .....	98
6.4 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วยการควบคุมแบบผสมผสาน .....	101
6.5 การทดสอบกรณีอื่นๆ .....	105
6.5.1 ผลการทดสอบในกรณีที่มีการติดตั้ง PSS ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มากกว่า 1 ยูนิต .....	105
6.5.2 การแกว่งไกวอันเนื่องมาจากการเปิดวงจรในระบบส่งอย่าง ทันทีทันใด .....	108
6.5.3 อิมพีแดนซ์ของสายส่งเพิ่มขึ้น .....	110
6.5.4 ช่วงเวลาในการกำจัดฟอสต์ยาวนานจนเกินเวลาวิกฤติ .....	111
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	113
7.1 สรุป .....	113
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	116
เอกสารอ้างอิง .....	118

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก .....	122
ภาคผนวก ก .....	123
ภาคผนวก ข. ....	125
ภาคผนวก ค. ....	141
ภาคผนวก ง .....	143
ประวัติผู้เขียน .....	152

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร .....	34
3.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	37
3.3 ค่าคงที่ของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	40
3.4 ค่าคงที่ของ SVC และ ตัวควบคุมฟิซซี .....	43
4.1 การปรับการควบคุมและผลจากการปรับSVC .....	56
ผ.1 โหลดพลวัตกรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบปกติ .....	123
ผ.2 โหลดพลวัตกรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด 120%ของปกติ .....	123
ผ.3 ข้อมูลลิมิตแค้นซ์ที่ฐานกำลัง100MVA .....	124
ผ.4 ค่าดัชนีการทำงานที่ได้จากการทดสอบกรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลด แบบปกติ .....	141
ผ.5 ค่าดัชนีการทำงานที่ได้จากการทดสอบกรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลด 120% ของแบบปกติ .....	141
ผ.6 เปอร์เซนต์ของค่าดัชนีการทำงานที่ลดลงโดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ มีการควบคุมเสถียรภาพกับการควบคุมแบบต่างๆ โดยระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ กับโหลดแบบปกติ .....	142
ผ.7 เปอร์เซนต์ของค่าดัชนีการทำงานที่ลดลงโดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ มีการควบคุมเสถียรภาพกับการควบคุมแบบต่างๆ โดยระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ กับโหลด120%ของแบบปกติ .....	142

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสต่อการรบกวน .....	8
2.2 วงจรสมมูลย์ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร .....	11
2.3 วงจรสมมูลย์ของ SVC .....	13
2.4 วงจรของ TCR และ รูปแบบการต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง .....	13
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแส ของTCR .....	14
2.6 วงจรของ TSC และ รูปแบบการต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง .....	14
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแส ของTSC .....	15
2.8 รูปแบบการต่อ SVC เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง .....	15
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแส ของSVC .....	16
2.10 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเครื่องจักรซึ่งติดตั้งSVC .....	17
2.11 ผลของSVCที่มีต่อกราฟP- $\delta$ .....	18
2.12 การแกว่งไกวเมื่อระบบไม่มีการหน่วง .....	19
2.13 การควบคุมเพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ .....	20
2.14 แบบจำลองของ Phillips-Heffron .....	21
2.15 การแกว่งไกวเมื่อSVCถูกควบคุมด้วย $\Delta\delta$ .....	22
2.16 การแกว่งไกวเมื่อSVCถูกควบคุมด้วย $\Delta\omega$ .....	23
2.17 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเครื่องจักร .....	24
2.18 กราฟ P- $\delta$ .....	25
2.19 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ $\Delta\omega$ และ $\Delta\omega'$ .....	27
2.20 เฟสเพลนสำหรับPSS .....	28
2.21 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม $\theta$ .....	30
3.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร .....	33
3.2 การแกว่งไกวเนื่องจากการรบกวน .....	33
3.3 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	35
3.4 แบบจำลองสองแกน .....	35
3.5 บล็อกไดอะแกรมของ AVR .....	38

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 บล็อกไดอะแกรมของ PSS .....	39
3.7 บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	41
3.8 บล็อกไดอะแกรมของSVC .....	41
3.9 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟิซซี .....	42
3.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	44
3.11(a) เกิดการลัดวงจร ขึ้นที่สายส่ง ณ ตำแหน่งใกล้บัส3 .....	47
3.11(b) ปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรซึ่งอยู่ระหว่างบัส3 และบัส101 .....	47
4.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟิซซี .....	49
4.2 เฟสเพลนสำหรับSVC .....	49
4.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม $\theta$ .....	51
4.4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของระยะDr .....	51
4.5 เปรียบเทียบผลตอบสนอง 2 กรณีที่มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน .....	54
4.6 บล็อกไดอะแกรมการเชื่อมต่อSVC และตัวควบคุมฟิซซีเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง .....	55
4.7 ตัวอย่างการปรับการควบคุมของSVC .....	56
5.1 โพลัวซาร์ตของโปรแกรมระบบจำลอง .....	61
5.2 โพลัวซาร์ตการหาค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและAVR .....	63
5.3 โพลัวซาร์ตการสร้างบัสแอดมิทแตนซ์เมตริก .....	65
5.4 โพลัวซาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์ .....	68
5.5 โพลัวซาร์ตการตรวจสอบลิมิตของAVR .....	70
5.6 โพลัวซาร์ตการกำหนดค่าเริ่มต้นกรณีควบคุมด้วยPSS .....	71
5.7 โพลัวซาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์กรณีควบคุมด้วยPSS .....	72
5.8 โพลัวซาร์ตการกำหนดค่าเริ่มต้นกรณีควบคุมด้วยSVCชนิดฟิซซี .....	74
5.9 โพลัวซาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์กรณีควบคุมด้วย SVCชนิดฟิซซี .....	75
5.10 โพลัวซาร์ตการหาค่าของมุม $\theta$ .....	79
5.11 โพลัวซาร์ตการหาค่าของ $\mu_N$ .....	81

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 โพลีชาร์ตการหาค่าของ $U_{SVC}$ .....	83
5.13 โพลีชาร์ตการกำหนดค่าเริ่มต้นกรณีควบคุมแบบผสมผสาน .....	84
5.14 โพลีชาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์กรณีควบคุมแบบผสมผสาน .....	85
5.15 โพลีชาร์ตการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิชชี .....	88
6.1 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 3 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	91
6.2 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของ โหลดปกติ .....	92
6.3 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 101 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	92
6.4 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 101 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของ โหลดปกติ .....	93
6.5 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	93
6.6 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 13 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของ โหลดปกติ .....	94
6.7 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	95

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของโหลดปกติ .....	95
6.9 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	96
6.10 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 101 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของ โหลดปกติ .....	96
6.11 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 13 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	97
6.12 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 13 และระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของ โหลดปกติ .....	97
6.13 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบ คุมเสถียรภาพ, การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อ เกิดการลัดวงจรแบบ3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	98
6.14 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบ คุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อ เกิดการลัดวงจรแบบ3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	99
6.15 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบ คุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อ เกิดการลัดวงจรแบบ3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด ปกติ .....	99

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของโหลดปกติ .....	100
6.17 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	100
6.18 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของโหลดปกติ .....	101
6.19 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	102
6.20 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของโหลดปกติ .....	102
6.21 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	103
6.22 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของโหลดปกติ .....	103

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	104
6.24 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	104
6.25 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 1, 2 และ 3 ยูนิตตามลำดับ เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	105
6.26 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 2 ยูนิต เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	106
6.27 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 3 ยูนิต เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	106
6.28 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 2 ยูนิต เปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	107
6.29 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 3 ยูนิต เปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบ ไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลด 120% ของ โหลดปกติ .....	107

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.30 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย PSS และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	108
6.31 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วย SVC และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่าย โหลดปกติ .....	108
6.32 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ.....	109
6.33 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ .....	109
6.34 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 โดยมีกำลังงานไฟฟ้า200MW ส่งผ่านสายส่ง 1 เส้น .....	110
6.35 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 โดยมีกำลังงานไฟฟ้า200MW ส่งผ่านสายส่ง 1 เส้น .....	110
6.36 ผลตอบสนองของมูมโรเตอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมกรณีต่างๆเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด120% ของ โหลดปกติ .....	111

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

## 1. สัญลักษณ์

$\delta$	= มุมโรเตอร์ ( Rotor angle : rad )
$\omega$	= ความเร็วเชิงมุม ( Angular velocity : rad/s )
$\mu$	= ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ( Membership function )
$B$	=  susceptance ( Susceptance : pu )
$E'$	= แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Internal induce voltage : pu )
$f$	= ความถี่ ( Frequency : Hz )
$G$	= ค่าความนำ ( Conductance : pu )
$H$	= ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Inertia constant : s )
$I_n$	= เวกเตอร์ของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ( pu )
$nbr$	= จำนวนของสายส่ง
$nbrt$	= จำนวนของสายส่งเมื่อรวมส่วนของอิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว
$nbus$	= จำนวนของบัส
$nbust$	= จำนวนของบัสเมื่อรวมส่วนของบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว
$nf$	= บัสที่เกิดการลัดวงจร
$ngg$	= จำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$nlf$	= ปลายด้านส่งของสายส่งที่จะถูกปลดออกจากวงจร
$nrf$	= ปลายด้านรับของสายส่งที่จะถูกปลดออกจากวงจร
$P_e$	= กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( Electrical output power : pu )
$P_L$	= กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดได้รับในสถานะก่อนเกิดการรบกวน ( Prefault active power : pu )
$Q_L$	= กำลังไฟฟ้าเสมือนที่โหลดได้รับในสถานะก่อนเกิดการรบกวน ( Prefault reactive power : pu )
$r$	= ความต้านทานของสายส่ง
$r_a$	= ความต้านทานภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$T_a$	= แรงบิดเร่ง ( Accelerating torque : pu )
$T_e$	= แรงบิดทางไฟฟ้าที่แปรผัน โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( Electrical torque : pu )
$T_m$	= แรงบิดทางกลที่เครื่องต้นกำลังจ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Mechanical torque : pu )
$V_g$	= แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Terminal voltage : pu )

$V_L$	=	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของโหลดในสถานะก่อนเกิดการรบกวน ( Prefault voltage magnitude : pu )
$V_n$	=	เวกเตอร์ของแรงดันกำเนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (pu)
$V_r$	=	เวกเตอร์ของแรงดันบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ (pu)
$x$	=	รีแอกแตนซ์ของสายส่ง
$x_{dd}$	=	ทรานส์เซียนรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$X_T$	=	รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง ( Transformer reactance : pu )
$Y_{af}$	=	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลรูปในสถานะหลังเกิดการลัดวงจร
$Y_{bf}$	=	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลรูปในสถานะก่อนเกิดการลัดวงจร
$Y_{df}$	=	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลรูปในสถานะขณะเกิดการลัดวงจร
$Y_{bus}$	=	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริก
$Y_L$	=	ค่าชัณฑ์แอดมิตแตนซ์ของโหลด ( Equivalent shunt admittance : pu )
$Y_{nn}$	=	ส่วนของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (pu)
$Y_{nr}$	=	ส่วนของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าเดิม (pu)
$Y_m$	=	ส่วนของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าเดิม (pu)
$Y_{rr}$	=	ส่วนของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกัลของระบบไฟฟ้าเดิม (pu)
$z_g$	=	อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 1.1 สัญลักษณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$E'_d$	=	แรงดันเหนี่ยวนำทรานส์เซียนในแกน d ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Transient d-axis induce voltage : pu )
$E'_q$	=	แรงดันเหนี่ยวนำทรานส์เซียนในแกน q ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Transient q-axis induce voltage : pu )
$E_{FD}$	=	แรงดันของขดลวดฟิลด์ ( Field voltage : pu )
$I_d$	=	กระแสในแกน d ( d-axis current : pu )
$I_q$	=	กระแสในแกน q ( q-axis current : pu )
$r_a$	=	ความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Synchronous resistance : pu )
$x_d$	=	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแกน d ( d-axis synchronous reactance : pu )
$x'_d$	=	ทรานส์เซียนรีแอกแตนซ์ในแกน d ( d-axis transient reactance : pu )
$x_q$	=	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแกน q ( q-axis synchronous reactance : pu )
$x'_q$	=	ทรานส์เซียนรีแอกแตนซ์ในแกน q ( q-axis transient reactance : pu )

- $T'_{d0}$  = ค่าคงที่เวลาเปิดวงจรทรานส์เซียนในแกน d ( Transient d-axis open circuit time constant : s )
- $T'_{q0}$  = ค่าคงที่เวลาเปิดวงจรทรานส์เซียนในแกน q ( Transient q-axis open circuit time constant : s )
- $V_t$  = แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Terminal voltage : pu )

## 1.2 สัญลักษณ์ของ AVR

- $k_A$  = เกนของเอกไซเตอร์ ( Exciter gain )
- $T_A$  = ค่าคงที่เวลาของเอกไซเตอร์ ( Exciter time constant : s )
- $T_B$  = ค่าคงที่เวลาของวงจรทรานส์เซียนรีดักชัน ( Transient reduction time constant : s )
- $T_C$  = ค่าคงที่เวลาของวงจรทรานส์เซียนรีดักชัน ( Transient reduction time constant : s )
- $T_R$  = ค่าคงที่เวลาของทรานส์ดิวเซอร์ของเอกไซเตอร์ ( Transducer filter time constant : s )

## 1.3 สัญลักษณ์ของ PSS

- $K$  = เกนของ PSS ( PSS gain )
- $T$  = ค่าคงที่เวลาของวงจรวอชเอาท์ของ PSS ( Washout time constant : s )
- $T_1$  = ค่าคงที่เวลานำของ PSS ( PSS lead time constant : s )
- $T_2$  = ค่าคงที่เวลาตามของ PSS ( PSS lag time constant : s )
- $T_3$  = ค่าคงที่เวลานำของ PSS ( PSS lead time constant : s )
- $T_4$  = ค่าคงที่เวลาตามของ PSS ( PSS lag time constant : s )

## 1.4 สัญลักษณ์ของ SVC และ ตัวควบคุมฟัซซี่

- $K_R$  = เกนของ SVC ( SVC gain )
- $T_m$  = ค่าคงที่เวลาของวงจรวัดของตัวควบคุมฟัซซี่ ( Fuzzy measurement circuit time constant : s )
- $T_R$  = ค่าคงที่เวลาของ SVC ( SVC time constant : s )
- $T_r$  = ค่าคงที่เวลาของวงจรรีเซ็ตของตัวควบคุมฟัซซี่ ( Fuzzy reset circuit time constant : s )
- $T_v$  = ค่าคงที่เวลาของวงจรวัดของ SVC ( SVC Measurement circuit time constant : s )

## 2. คำย่อ

- AVR = ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator)
- PSS = ตัวควบคุมเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer)
- SVC = ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Static Var Compensator)
- FPSVC = ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ซึ่งรับสัญญาณควบคุมเสริมจากตัวควบคุมพีชชีชนิดเฟสเฟลน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน ความต้องการทางด้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้สภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้ามีความกดดันมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องขยายและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆเหล่านี้ ได้ทำงานผสมผสานกัน และช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดทั้งระบบอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูงและปัญหาเรื่องสภาพแวดล้อม ทำให้การขยายของระบบไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก ผลจากการที่ไม่สามารถขยายระบบผลิตพลังงานให้เพียงพอกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นก็คือ ปัญหาเรื่องเสถียรภาพ การที่ระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพนั้น จะส่งผลกระทบต่อต่างๆ ขึ้นมากมาย เช่น เกิดปัญหาเรื่องไฟดับอันเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้อย่างเพียงพอซึ่งผลกระทบก็จะตกอยู่กับลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นครัวเรือน ธุรกิจ และอุตสาหกรรมต่างๆ และนอกจากนี้ การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวถูกทริปออกไปจากระบบ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากสิ่งรบกวนจนไม่สามารถรักษาสภาพการซิงโครไนซ์กับระบบได้อีกนั้น อาจจะทำให้เกิดสภาวะโหลตเกินขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆที่เหลือ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำการทริป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนั้นๆออกจากระบบ ผลกระทบลักษณะนี้อาจเกิดขึ้นในลักษณะถูกโซ่จันในที่สุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดไม่สามารถซิงโครไนซ์กับระบบได้และถูกทริปออกจากระบบ ทำให้เกิดสภาวะไฟดับทั้งระบบ ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เลวร้ายสุดขีด

การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำได้หลายวิธี วิธีการหนึ่งที่รู้จักกันเป็นอย่างดีคือ การควบคุมตัวควบคุมระบบแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator, AVR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer, PSS) [1-4] แต่สำหรับกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังที่ต้องการมีการเชื่อมต่อกันด้วยระบบสายส่งระยะไกลนั้น การควบคุมด้วยวิธีการนี้ยังไม่สามารถสร้างการหน่วง (Damping) ให้กับระบบได้อย่างเพียงพอซึ่งในกรณีของระบบเช่นนี้การใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Static Var Compensator, SVC) โดยติดตั้งไว้ที่ระบบสายส่ง จะช่วยปรับปรุงการหน่วงของระบบได้ดีกว่า [5-10] ทั้งนี้เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีความรุดหน้าเป็นอย่างมาก ดังนั้นการใช้ SVC ร่วมกับการควบคุมด้วยไทรสเตอร์ จะทำให้ได้อุปกรณ์ควบคุมที่สามารถตอบสนอง ต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องจากผลของการรบกวนได้อย่างทันท่วงที

การควบคุม SVC ด้วยวิธีเดิมนั้น จะมีเฉพาะรูปควบคุมแรงดันโดยจะรับสัญญาณของแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง SVC เป็นสัญญาณอินพุทของตัวควบคุมเท่านั้น ซึ่งวิธีการนี้ยังไม่สามารถ

สร้างการหน่วงให้กับระบบได้อย่างเพียงพอ จึงมีการเสนอวิธีการ สร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ อุปกรณ์ควบคุมแรงดันของ SVC ซึ่งจะเพิ่มการหน่วงของระบบ [11-14] และทำให้เสถียรภาพของระบบ ดีขึ้น

การสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC นั้น ได้ถูกนำเสนอในบทความต่างๆ โดยอาศัย หลักการควบคุมสมัยใหม่ แต่ก็ยังไม่สามารถทำงานได้ในย่านที่กว้างเพียงพอ เนื่องจากตัวควบคุม เหล่านั้น เป็นตัวควบคุมแบบเกนคงที่ ซึ่งเมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามจุดทำงาน ที่เปลี่ยนไป รวมถึงลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลัง ก็จะทำให้ตัวควบคุมเหล่านั้นไม่ สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีได้ หรือในบางครั้งอาจไม่สามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้เลย จึงได้มีการ พัฒนาตัวควบคุมที่สามารถปรับเกนได้ด้วยตัวเอง ซึ่งให้ผลตอบสนองที่ดี และสามารถทำงาน ได้ในย่านที่กว้างขึ้น แต่ก็ต้องอาศัยการคำนวณสัญญาณควบคุมที่ซับซ้อน รวมถึงต้องใช้พารามิเตอร์ต่างๆของระบบเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ผลก็คือ เวลาที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนมากๆ การควบคุม ด้วยวิธีนี้จึงเป็นเรื่องที่ลำบากมาก

การนำแนวความคิดทางด้านพีชชีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุม เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพ ระบบไฟฟ้ากำลังจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ[15-20] เนื่องจากตัวควบคุมชนิดพีชชีมีความยืดหยุ่นที่ดี ต่อ ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งยังไม่ต้องทำการคำนวณที่ซับซ้อน ซึ่งจะทำให้ เวลาที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมลดลง และเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบ เร็ลไทม์

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นการนำ SVC มาใช้งานในอีกรูปแบบหนึ่ง คือการรักษาเสถียรภาพ ซึ่งต่างจากสมัยก่อนที่ SVCจะถูกนำมาใช้ในการรักษาแรงดันที่บัส หรือใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังเท่านั้น อีกทั้งยังได้มีการนำแนว ความคิดทางด้านพีชชีมาใช้ในการควบคุมกับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่มีการยอมรับ มากขึ้นในทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์ คือ นำเสนอแนวความคิดในการประยุกต์ตัวควบคุมพีชชีชนิด เฟสเฟลน เพื่อการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า กำลังแบบหลายเครื่องจักร ระบบที่ใช้ทดสอบจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จำนวน 4 ยูนิต โดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ และถูกเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งระยะไกล ความสามารถของตัวควบคุมพีชชีจะถูกทดสอบด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ โดยผลการทดลองคือ ผลตอบสนองของมุม โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยการลัดวงจรแบบ 3 เฟส

ลงดิน โดยจะแสดงผลเปรียบเทียบ ในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS, SVC, SVC ที่มีตัวควบคุมฟิชซี และ PSS ร่วมกับ SVC ที่มีตัวควบคุมฟิชซี

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สมมุติฐานของงานวิจัยคือ เมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้สภาพสมดุลย์ของระบบสูญเสียไป สิ่งที่มาคือ เกิดการแกว่งไกวขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในกรณีที่เกิดการรบกวนอย่างรุนแรง เช่น การลัดวงจรในสายส่ง อาจจะทำให้การแกว่งไกวมีขนาดเพิ่มขึ้น จนทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งการติดตั้ง SVC ที่ควบคุมด้วยหลักการฟิชซี จะช่วยเพิ่มความหน่วงของการแกว่งไกวที่เกิดขึ้น ทำให้ความสามารถในการกลับสู่เสถียรภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่

1. เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. การประยุกต์ SVC กับระบบไฟฟ้ากำลัง
3. ฟิชซีลอจิกชนิดเฟสเฟลน และการประยุกต์เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตคือ จะทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร เพื่อทดสอบความสามารถของ SVC ซึ่งรับสัญญาณควบคุมเสริม จากตัวควบคุมฟิชซี ในการเพิ่มเสถียรภาพให้ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยความมีเสถียรภาพจะถูกพิจารณาจากผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดทำงานเดิมไปสู่จุดทำงานใหม่ โดยกระบวนการแกว่งไกวจะเริ่มขึ้นเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ สำหรับการรบกวนที่ใช้จะเป็นการรบกวนแบบรุนแรง ซึ่งได้แก่ การเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงดินขึ้นที่สายส่งแบบจำลองที่ใช้จะอ้างอิงจากแบบจำลองมาตรฐาน IEEE [21-24] และโปรแกรมจะถูกเขียนด้วย MATLAB [25]

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและแนวความคิดพื้นฐานต่างๆ คือ
  - 1.1. เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
  - 1.2. การประยุกต์ใช้งาน SVC กับระบบไฟฟ้ากำลัง
  - 1.3. ฟิซซึ่ล่อจิกชนิดเฟสเพลน และการประยุกต์ใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาแบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกี่ยวข้องซึ่งได้แก่
  - 2.1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
  - 2.2. อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ AVR และ PSS
  - 2.3. SVC
3. เขียนโปรแกรมจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร
4. เขียนโปรแกรมจำลองส่วนอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
5. เขียนโปรแกรมจำลองส่วนของ SVC
6. เขียนโปรแกรมส่วนของตัวควบคุมฟิซซึ่ของ SVC
7. ทำการทดลองโดยจำลองการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และบันทึกผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยจะทดสอบภายใต้เงื่อนไขการควบคุมเสถียรภาพในกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้
  - 7.1. ใช้ PSS ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสถียรภาพเสริมให้กับ AVR ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
  - 7.2. ใช้ SVC ซึ่งมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียว
  - 7.3. เพิ่มตัวควบคุมฟิซซึ่ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมเสถียรภาพเสริมให้กับ SVC ซึ่งต่อไปจะเรียกการควบคุมลักษณะนี้ว่า FPSVC
  - 7.4. ให้มีการทำงานร่วมกันระหว่าง PSS และ FPSVC
8. ทำการทดลองเพิ่มเติมในกรณีต่อไปนี้
  - 8.1. เพิ่มระดับของโหลดเป็น 120%
  - 8.2. เปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดที่เกิดการลัดวงจร
9. สรุปผลการทดลอง

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ด้วยวิธีควบคุมฟิซซึ่แบบอาศัยข้อมูลจากเฟสเพลน

2. วิธีควบคุมพีชชีที่นำเสนอเป็นวิธีที่ง่าย ไม่มีความซับซ้อนแต่ให้ผลลัพธ์ที่ดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้วิธีนี้กับอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ
3. การจำลองบนคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถทราบปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพได้ล่วงหน้า และสามารถทำการทดสอบวิธีควบคุมที่สามารถแก้ไขปัญหาเสถียรภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ
4. มีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้เกิดความเข้าใจในปัญหาที่เกิดขึ้น และเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์การควบคุมแบบใหม่กับระบบไฟฟ้ากำลัง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง [26-27]

การดำเนินการของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะปกตินั้นมักประสบกับปัญหาสำคัญประการหนึ่งคือ การเกิดสิ่งรบกวน (Disturbance) ต่อระบบ สิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีมากมายหลายชนิด สิ่งรบกวนบางชนิดอาจสร้างผลกระทบต่อระบบอย่างรุนแรง เช่น การเกิดการลัดวงจรในองค์ประกอบต่างๆ และในทำนองกลับกัน สิ่งรบกวนบางชนิดอาจไม่สร้างผลกระทบใดๆ ต่อระบบได้เลย เช่น การเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างช้าๆ เป็นต้น หากพิจารณาผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อสถานะการทำงาน of ระบบ สิ่งรบกวนบางชนิดอาจทำให้จุดทำงานของระบบเปลี่ยนแปลงไปในสถานะชั่วคราว (Transient state) แต่เมื่อเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (Steady State) ระบบจะกลับมาทำงานที่จุดเดิม หรือระบบอาจย้ายไปทำงานที่จุดใหม่ ซึ่งจุดทำงานใหม่นี้ยังคงอยู่ในสภาวะปกติดังเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ดี สิ่งรบกวนบางชนิดอาจมีความรุนแรงจนทำให้จุดทำงานของระบบเคลื่อนย้ายไปจากจุดเดิมและไม่สามารถกลับมาทำงานที่จุดเดิมหรือจุดใหม่ซึ่งอยู่ในสภาวะปกติได้อีก ผลกระทบที่เกิดขึ้นในลักษณะหลังนี้ถือว่าเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ในขณะดำเนินงานของระบบ

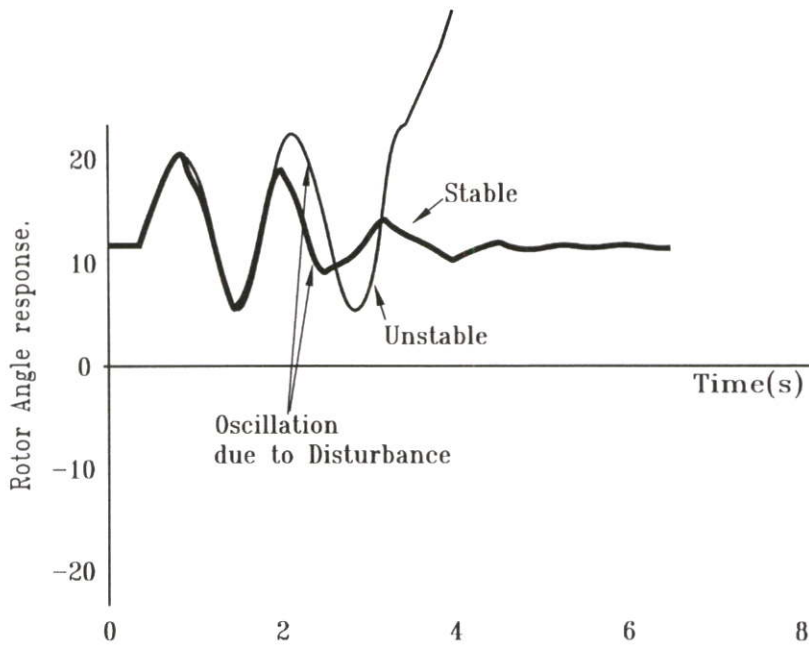
องค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังที่มักได้รับผลกระทบจากการเกิดสิ่งรบกวนอย่างชัดเจนที่สุด คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ในสภาวะก่อนเกิดสิ่งรบกวนซึ่งเป็นสภาวะการทำงานอย่างปกติ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วเชิงโครนัส ในสภาวะนี้ กำลังกลอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีลักษณะสมดุลกัน แต่ต่อมาสมมุติว่าเกิดสิ่งรบกวนขึ้น กำลังกลอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีลักษณะไม่สมดุลทันที จึงทำให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนพลังงานจลน์ซึ่งสะสมอยู่ในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดสภาวะสมดุลของพลังงานอีกครั้งหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงค่าของพลังงานจลน์ซึ่งเก็บสะสมในโรเตอร์มีผลทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากความเร็วเชิงโครนัส ภายหลังการเกิดสิ่งรบกวนชั่วคราว ระบบป้องกันจะดำเนินการขจัดสิ่งรบกวนออกจากระบบ ในสถานะหลังการขจัดสิ่งรบกวน ถ้าโรเตอร์สามารถกลับมาหมุนที่ความเร็วเชิงโครนัสได้อีกครั้งก็ถือว่าระบบสามารถกลับมาทำงานได้อย่างปกติ แต่ถ้าโรเตอร์ไม่สามารถกลับมาหมุนที่ความเร็วเชิงโครนัสได้อีกครั้งก็ถือว่าระบบไม่สามารถกลับมาทำงานได้อย่างปกติ ผลที่ตามมา คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นไม่สามารถชิงโครไนซ์กับระบบได้อีกต่อไป เพราะค่าความถี่ของแรงดันกำเนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าแตกต่างไปจากค่าความถี่ของระบบ ในที่สุดระบบป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะดำเนินการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นออกไปจากระบบ [28-29]

โดยทั่วไปเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะพิจารณาจากผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยในสภาวะปกติจะมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งหมายถึงการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส หรือซิงโครไนซ์กับระบบได้นั่นเอง ระบบที่มีคุณสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนในลักษณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดสามารถซิงโครไนซ์กับระบบได้อีกต่อไปก็ถือว่าระบบนั้น มีเสถียรภาพ แต่ถ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางยูนิตไม่สามารถซิงโครไนซ์กับระบบได้อีกต่อไป ก็ถือว่าระบบนั้น ไม่มีเสถียรภาพ

### 2.1.1 เสถียรภาพของมุมโรเตอร์

เสถียรภาพของมุมโรเตอร์ (Rotor Angle Stability) คือ การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละตัวซึ่งเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบขนาดใหญ่ สามารถรักษาสภาพการทำงานอย่างซิงโครไนส์เอาไว้ได้ โดยปัญหาเสถียรภาพในลักษณะนี้จะเกี่ยวข้องกับ การแกว่งไกวทางกล ซึ่งเป็นพฤติกรรมภายในของระบบไฟฟ้ากำลัง [30-31]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ขดลวดฟิลด์ และขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยขดลวดฟิลด์จะถูกติดตั้งไว้ที่โรเตอร์ เมื่อโรเตอร์ถูกหมุนด้วยตัวขับ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดฟิลด์ และจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งถูกติดตั้งที่สเตเตอร์ ความถี่ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความเร็วของโรเตอร์ กล่าวคือ ความถี่ของปริมาณไฟฟ้าที่สเตเตอร์จะซิงโครไนซ์กับ ความเร็วทางกลของโรเตอร์ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไปถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน กระแสและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะต้องมีความถี่เดียวกัน และโรเตอร์จะต้องหมุนด้วยความเร็วที่ซิงโครไนซ์กับความถี่นี้ กระแสที่ไหลในสเตเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นโดยการทำงานในสภาวะอยู่ตัวนั้น (Steady State) สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์และสเตเตอร์จะหมุนไปด้วยความเร็วที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามจะมีมุมที่ห่างกันอยู่ค่าหนึ่งโดยจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของกำเนิดไฟฟ้า สำหรับเสถียรภาพทรานส์เซียนของมุมโรเตอร์นั้นจะกล่าวถึงความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลัง ในการที่จะรักษาสภาพการซิงโครไนส์เอาไว้ได้เมื่อเกิดการรบกวนแบบรุนแรง ซึ่งระบบจะกลับเข้าสู่จุดสมดุลที่จุดทำงานค่าใหม่ การรบกวนของระบบไฟฟ้ากำลังจะมีหลายรูปแบบแต่ ในการออกแบบระบบไฟฟ้านั้น จะพิจารณาให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพภายใต้การรบกวนรูปแบบใดแบบหนึ่งเท่านั้น ซึ่งการรบกวนที่นิยมใช้ในการพิจารณาได้แก่ การลัดวงจรแบบ 3 เฟส ซึ่งโดยปกติจะถูกสมมุติให้เกิดขึ้นที่สายส่ง รูปที่ 2.1 จะแสดงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยจะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในสภาวะที่มีเสถียรภาพซึ่งมุมโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดและลดลงแล้วแกว่งไกวโดยมีขนาดลดลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว และในสภาวะที่ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งมุมของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนหมดสภาพการซิงโครไนส์



รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อการรบกวน

### 2.1.2 สมการสวิง

จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า สามารถใช้มุมโรเตอร์ซึ่งเทียบกับจุดอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสเป็นเงื่อนไขที่ใช้ทดสอบความมีเสถียรภาพได้ โดยถ้าผลต่างของมุมโรเตอร์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก็จะแสดงถึงระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ

สมการสวิง (Swing Equation) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์, แรงบิดทางกล และแรงบิดทางไฟฟ้า

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.1)$$

จากสมการ 2.1 จะเห็นว่าในสภาวะปกติ แรงบิดทางกลจะเท่ากับแรงบิดทางไฟฟ้าทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส เมื่อเกิดการรบกวนจะทำให้ โรเตอร์ถูกเร่งหรือหน่วงเทียบกับความเร็วซิงโครนัส เนื่องจากแรงบิดทั้ง 2 ไม่เท่ากันทำให้โรเตอร์เกิดการแกว่งไกว และในกรณีที่โรเตอร์แกว่งไกว โดยใช้ช่วงเวลาค่าหนึ่งแล้วกลับมาหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสได้ แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ

### 2.1.3 การแก้สมการสวิง [32]

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายยูนิตนั้นนิยมตรวจสอบ โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละยูนิต การหาความเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์นี้ สามารถทำได้โดยการแก้สมการสวิง แล้วนำผลลัพธ์คือ  $\delta(t)$  มาพล็อตกราฟ กราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์นี้ถูกเรียกว่า เส้นโค้งสวิง

การแก้สมการสวิงซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 2 นั้น ต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน แต่สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีของออยเลอร์แบบแก้ไข (Modified Euler) วิธีการนี้จะเป็นการแก้สมการโดยแบ่งช่วงเวลาที่ต้องการคำนวณหาผลลัพธ์ ออกเป็นช่วงเวลาย่อยๆ แล้วคำนวณหาผลลัพธ์ ณ ปลายช่วงเวลา จากข้อมูล ณ ต้นช่วงเวลา โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำนาย (Predict) ค่าสุดท้ายของช่วงเวลา จากอนุพันธ์ของค่า ณ ต้นช่วงเวลา จากสมการ

$$x_1^p = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0} \Delta t \quad (2.2)$$

2. หาอนุพันธ์ของค่าสุดท้ายของช่วงเวลา จากค่าที่ทำนายได้;  $x_1^p$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_1^p} = f(t_1, x_1^p) \quad (2.3)$$

3. นำค่าเฉลี่ยของค่าอนุพันธ์ทั้ง 2 มาใช้ในการหาค่าสุดท้ายที่ถูกต้อง (Corrective Value)

$$x_1^c = x_0 + \left( \frac{\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_1^p}}{2} \right) \Delta t \quad (2.4)$$

จากขั้นตอนข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปของวิธีออยเลอร์แบบแก้ไขได้ดังนี้

$$x_{i+1}^c = x_i + \left( \frac{\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_i} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t \quad (2.5)$$

สำหรับการแก้สมการสวิงนั้นจำเป็นต้องแปลงสมการสวิงซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ให้อยู่ในรูปของสมการอันดับหนึ่ง จำนวนสองสมการดังนี้

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (2.6)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H} T_a \quad (2.7)$$

จากนั้นใช้วิธีของออยเลอร์แบบแก้ไขในการหาค่าสุดท้ายของตัวแปรสถานะทั้ง 2 ในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

$$\delta_{i+1}^c = \delta_i + \left( \frac{\frac{d\delta}{dt} \Big|_{\Delta\omega_i} + \frac{d\delta}{dt} \Big|_{\Delta\omega_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t \quad (2.8)$$

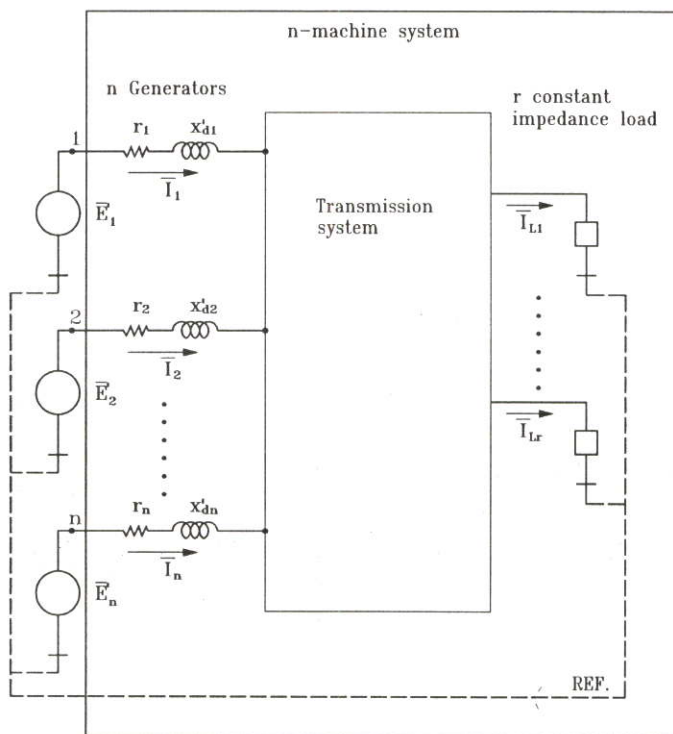
$$\Delta\omega_{i+1}^c = \Delta\omega_i + \left( \frac{\frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\delta_i} + \frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\delta_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t \quad (2.9)$$

#### 2.1.4 การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยคำนึงถึงรายละเอียดต่างๆ อย่างครบถ้วนนั้น จะทำให้ประสบกับปัญหายุ่งยากมาก ดังนั้นจึงมักตั้งสมมุติฐานบางประการเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น แต่ทั้งนี้ความถูกต้องของผลลัพธ์ก็ต้องอยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยสมมุติฐานที่ตั้งขึ้นสำหรับศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร ได้แก่

1. ผลของขั้วแม่เหล็กนูนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่ถูกนำมาพิจารณา
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สแล็กบัสจะไม่ได้รับผลกระทบจากสิ่งรบกวนใดๆ ดังนั้นในการศึกษาจึงกำหนดให้แรงดันที่สแล็กบัสมีขนาดและมุมเฟสคงที่ ซึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นเฟสเซอร์อ้างอิงสำหรับการศึกษา
3. ไม่พิจารณาผลของฮาร์โมนิกของคลื่นแรงดันหรือ กระแสซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4. กำลังงานกลอินพุทจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ทั้งนี้เนื่องจาก GOV มีการตอบสนองที่ช้า
5. โหลดทั้งหมดจะถูกพิจารณาให้เป็น แอดมิตแตนซ์สมมูล ที่มีค่าคงที่
6. มุมทางกลของโรเตอร์ จะเป็นมุมเดียวกับมุมของแรงดันภายในเครื่องของกำเนิดไฟฟ้า
7. ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยบัสจำนวน  $r$  บัส และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน  $n$  ยูนิต จะมีวงจรสมมูลยักรูปที่ 2.2 โดยบัสที่  $1, 2, \dots, n$  คือบัสภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

ค่าชั้นแอดมิตแตนซ์ของโหลด สามารถหาได้จากผลการคำนวณโหลดโพลว์ ดังนี้

$$Y_L = (P_L - jQ_L) / V_L^2 \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.2 สามารถสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกให้อยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_n \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

หรือ

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.12)$$

$Y_{bus}$  ในสมการ 2.12 จะคล้ายกับบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกที่ใช้ในการคำนวณโหลดโพลว์ แต่จะมีการเพิ่มเติมส่วนของบัสของแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ทรานส์เซียนรีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดแอดมิตแตนซ์สมมูลย์ และเพื่อความสะดวกในการคำนวณ เราจะกำจัดบัสที่ไม่ได้ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกไป โดยใช้กฎการลดรูปของครอน ดังต่อไปนี้

จากสมการ 2.11 จะได้

$$I_n = Y_{nn} V_n + Y_{nr} V_r \quad (2.13)$$

$$0 = Y_{rn} V_n + Y_{rr} V_r \quad (2.14)$$

เมื่อกำจัด  $V_r$  จะได้

$$I_n = (Y_{nn} - Y_{nr} Y_{rr}^{-1} Y_{rn}) V_n \quad (2.15)$$

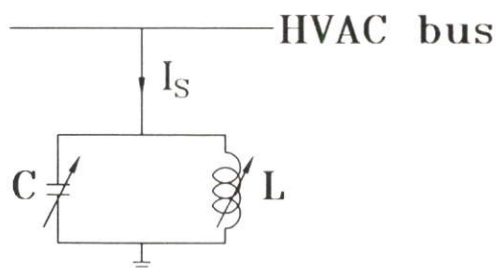
โดย  $(Y_{nn} - Y_{nr} Y_{rr}^{-1} Y_{rn})$  คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซึ่งถูกลดรูป โดยจะมีมิติ  $n \times n$  ซึ่งเท่ากับจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

## 2.2 การใช้ SVC เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

### 2.2.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Static Var Compensator :SVC) จะถูกต่อแบบขนาน (Shunt-Connected) เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง [30,33] คำว่าสถิตย์เป็นตัวบ่งชี้ว่าอุปกรณ์ชนิดนี้ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่เป็นองค์ประกอบหลัก SVCจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนของอุปกรณ์ควบคุม, ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่าย และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นโหลด SVCไม่ได้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันดังเช่น กรณีของซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ แต่SVCจะทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดัน ณ จุดติดตั้ง โดยการปรับเปลี่ยนการรับหรือจ่ายกระแสแอคทีฟกับระบบไฟฟ้ากำลัง SVCจึงจัดเป็นอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟประเภทหนึ่งซึ่งมีความสามารถในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส

ให้คงที่หรือใกล้เคียงกับระดับคงที่ค่าหนึ่ง ในทางไฟฟ้ากำลัง SVC จะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ปรับค่าได้ ซึ่งถูกต่อขนเข้ากับระบบดังรูปที่ 2.3



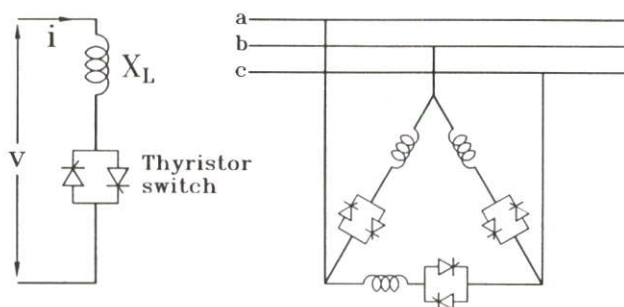
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของ SVC

### 2.2.2 การทำงานและชนิดของ SVC

การทำงานของ SVC สามารถอธิบายได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันที่ต้องการควบคุมและกระแสรีแอกทีฟของ SVC โดยจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของ SVC เช่น

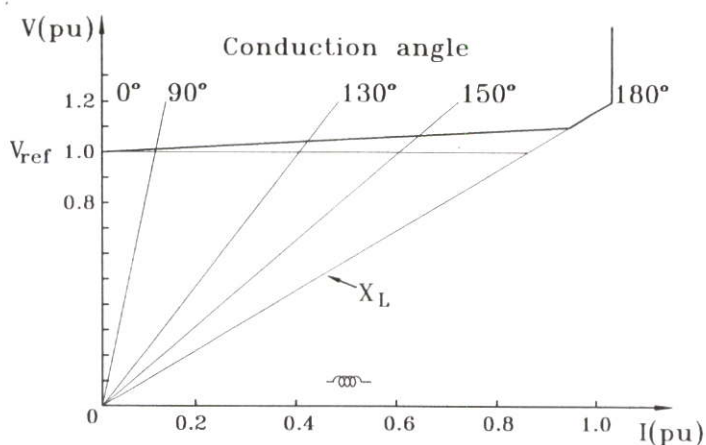
#### 2.2.2.1 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor: TCR)

อุปกรณ์ชนิดนี้มีส่วนประกอบพื้นฐานคือ รีแอคเตอร์ ซึ่งต่ออนุกรมกับไทริสเตอร์แบบสองทิศทาง (Bidirectional Thyristor) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรของ TCR และ รูปแบบการต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง

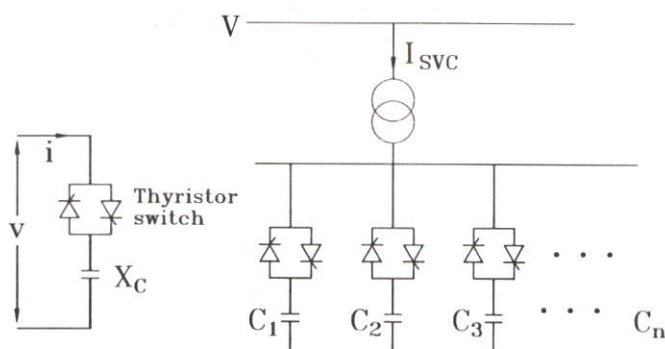
TCR เปรียบเสมือนซัสเซบแดนซ์ที่ปรับค่าได้และถูกควบคุมด้วยมุมยิง (Firing Angle) ซึ่งเป็นตัวกำหนดให้ไทริสเตอร์ทำงาน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ TCR แสดงดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแส ของTCR

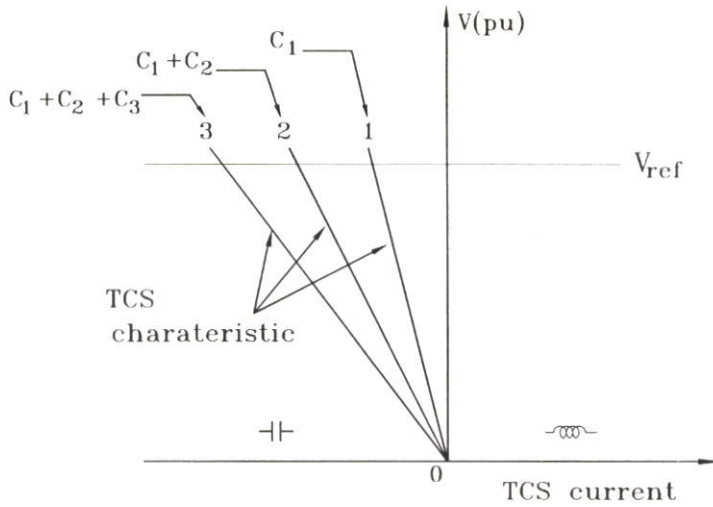
### 2.2.2.2 ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ (Thyristor Switched Capacitor: TSC)

อุปกรณ์ชนิดนี้มีส่วนประกอบพื้นฐานคือหน่วยของคาปาซิเตอร์แบงก์ ซึ่งแต่ละหน่วยถูกควบคุมให้มีการเชื่อมต่อกับระบบด้วยไทริสเตอร์ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรของ TSC และ รูปแบบการต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง

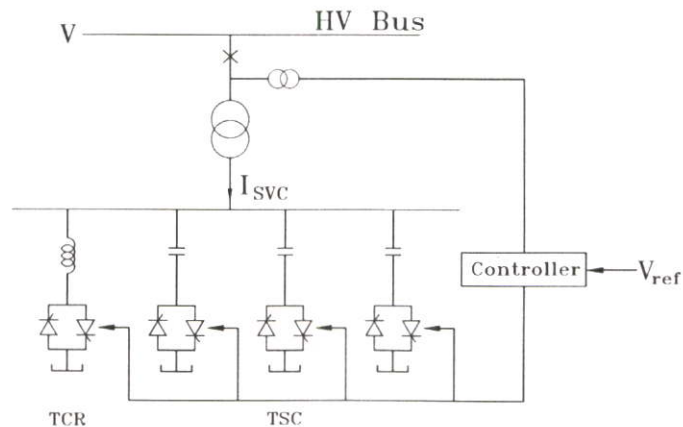
เมื่อแรงดันเปลี่ยนไปจากค่าที่ต้องการ คาปาซิเตอร์แบงก์ก็จะถูกสับเข้าหรือออกจากระบบ โดยจำนวนของแบงก์จะขึ้นกับขนาดของแรงดันที่เปลี่ยนไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ TSC แสดงดังรูป 2.7 โดยกราฟเส้นที่ 1 คือ กรณีที่สับเฉพาะ  $C_1$  เข้ากับระบบ , เส้นที่ 2 คือ กรณีที่สับทั้ง  $C_1$  และ  $C_2$  เข้ากับระบบ และ เส้นที่ 3 คือ กรณีที่สับทั้ง  $C_1, C_2$  และ  $C_3$  เข้ากับระบบ



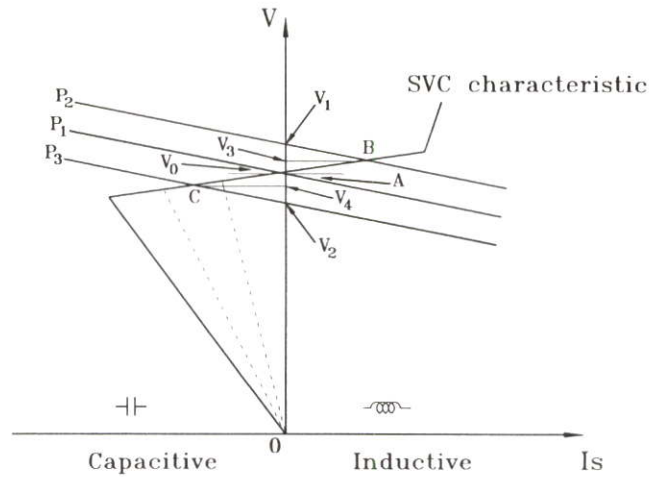
รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแส ของTSC

นอกจาก TCR และ TSC แล้วยังมีอุปกรณ์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟอีกหลายชนิดเช่น รีแอกเตอร์อิ่มตัว(Saturated Reactor: SR), ไทริสเตอร์สวิตซ์รีแอกเตอร์(Thyristor Switched Reactor: TSR), แมคคานิคอลลีสวิตซ์คาปาซิเตอร์ (Mechanically Switched Capacitor: MSC) และ ตัวเก็บประจุคงที่ (Fixed Capacitor :FC) เป็นต้น [33]

ในทางปฏิบัติเพื่อให้การทำงานของSVCอยู่ในช่วงที่กว้างจึงจัดให้มีการทำงานร่วมกันระหว่าง อุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้น รูปที่2.8 แสดงรูปแบบการต่อ SVC เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบด้วย TCR และ TSC ทำให้ SVC สามารถทำหน้าที่ทั้งรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟได้ และมี กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสดังรูป 2.9



รูปที่ 2.8 รูปแบบการต่อ SVC เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแส ของSVC

จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นกรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังมีสถานะการทำงานต่างๆ คือ  $P_1$ ,  $P_2$  และ  $P_3$  โดย  $P_1$  คือสถานะปกติซึ่งตัดกับกราฟของ SVC ที่จุด A โดย  $V = V_0$  และ  $I_s = 0$  เมื่อระบบเปลี่ยนไปเป็น  $P_2$  พบว่ากรณีที่ไม่มี SVC แรงดันจะมีค่าเป็น  $V_1$  แต่ถ้ามี SVC จุดทำงานก็จะไปอยู่ที่ B และมีแรงดันเป็น  $V_3$  ในทางกลับกันถ้าระบบเปลี่ยนไปเป็น  $P_3$  จะทำให้แรงดันเปลี่ยนไปเป็น  $V_2$  และ  $V_4$  ในกรณีที่ไม่มีและมี SVC ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า SVC ทำให้แรงดันมีค่าอยู่ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการคือ  $V_0$  อยู่ตลอดเวลา

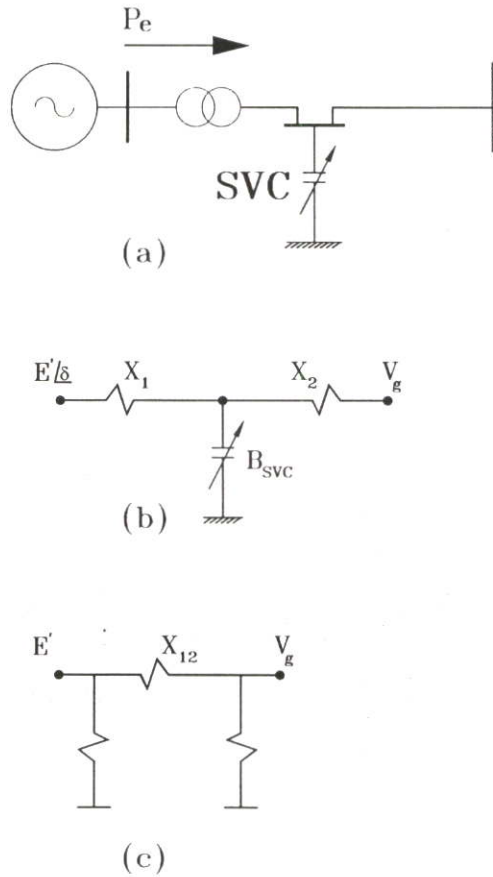
### 2.2.3 สัญญาณควบคุมเสริมของ SVC

ในปัจจุบัน SVC ได้ถูกพัฒนาให้มีการตอบสนองให้เร็วขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการควบคุมสถานะทางไดนามิกส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง [6,7,34,35] โดยปกติแล้วจุดประสงค์หลักของ SVC ก็คือ การควบคุมระดับแรงดันให้กับระบบไฟฟ้า ต่อมาได้มีแนวคิดที่จะนำ SVC มาติดตั้งเข้ากับระบบสายส่ง เพื่อให้ระบบสายส่งนั้นมีความสามารถในการส่งถ่ายพลังงานมากขึ้น โดย SVC จะช่วยเพิ่มการหน่วงของการ แกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดจากสิ่งรบกวนให้กับระบบสายส่งนั้นๆ ซึ่งจะทำให้ขีดจำกัดเสถียรภาพของระบบเพิ่มขึ้น

โดยปกติ SVC จะถูกควบคุมการทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณควบคุม แต่การใช้สัญญาณจากแรงดันเพียงอย่างเดียว นั้น ยังไม่สามารถสร้างการหน่วงที่มากพอได้ จึงได้มีการเพิ่มสัญญาณควบคุมเสริมให้กับรูปควบคุมแรงดัน เพื่อที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีการหน่วงเพิ่มขึ้น โดยสัญญาณควบคุมเสริมนี้จะถูกกำหนดโดย การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งซึ่งเชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้ง SVC

2.2.4 ผลกระทบของ SVC ต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลกระทบของ SVC ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง [7]สามารถพิจารณาอย่างคร่าวๆ ได้จากระบบดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเครื่องจักรซึ่งติดตั้งSVC

SVC จะทำหน้าที่คล้ายกับชัสนเซนแดนซ์ ;  $B_{svc}$  ที่ปรับค่าได้ โดยเมื่อ  $B_{svc} > 0$  SVCจะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและแสดงตัวเป็นคาปาซิทีฟของระบบ ในทางกลับกันเมื่อ  $B_{svc} < 0$  SVCจะรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและแสดงตัวเป็นโวลตอินดักทีฟของระบบ

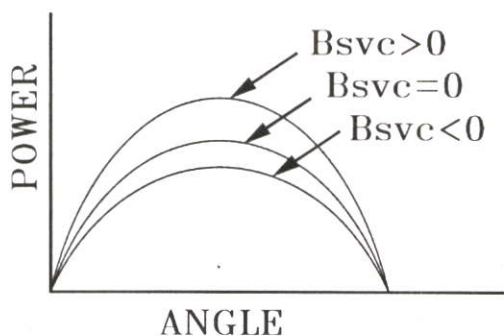
เมื่อพิจารณาจากรูป 2.10(c) ซึ่งได้จากการแปลงวงจรแบบ Y เป็น  $\Delta$  ของรูป 2.10(b) จะพบว่ารีแอกแตนซ์สมมูลระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอินฟินิตบัสคือ

$$X_{12} = X_1 + X_2 - B_{svc}X_1X_2 \tag{2.16}$$

จากสมการที่ 2.16 พบว่าเมื่อ SVC เป็นคาปาซิทีฟ( $B_{SVC}>0$ ) จะทำให้  $X_{12} < X_1+X_2$  และเมื่อ SVC เป็นอินดักทีฟ( $B_{SVC}<0$ ) จะทำให้  $X_{12} > X_1+X_2$  เมื่อนำค่า  $X_{12}$  ที่ได้ในกรณีต่างๆมาพิจารณาพร้อมกับกราฟ P- $\delta$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.17

$$P_e = \frac{E'V_g}{X_{12}} \sin \delta \quad (2.17)$$

จะพบว่าเมื่อ SVC เป็นคาปาซิทีฟ( $B_{SVC}>0$ ) จะทำให้กราฟ P- $\delta$  ถูกยกขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบ แต่เมื่อ SVC เป็นโหลดอินดักทีฟ( $B_{SVC}<0$ ) SVC ก็จะได้รับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบส่งผลให้กราฟถูกยกลงดังรูปที่ 2.11

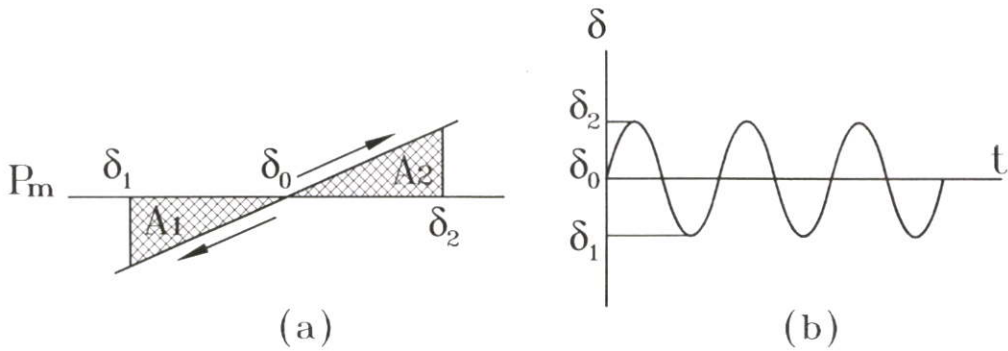


รูปที่ 2.11 ผลของSVCที่มีต่อกราฟP- $\delta$

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของSVCจะทำให้คุณลักษณะการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าหรือกราฟP- $\delta$ ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงสามารถนำ SVC มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าได้ แต่ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ติดตั้ง SVC และขนาดของ SVC ด้วย

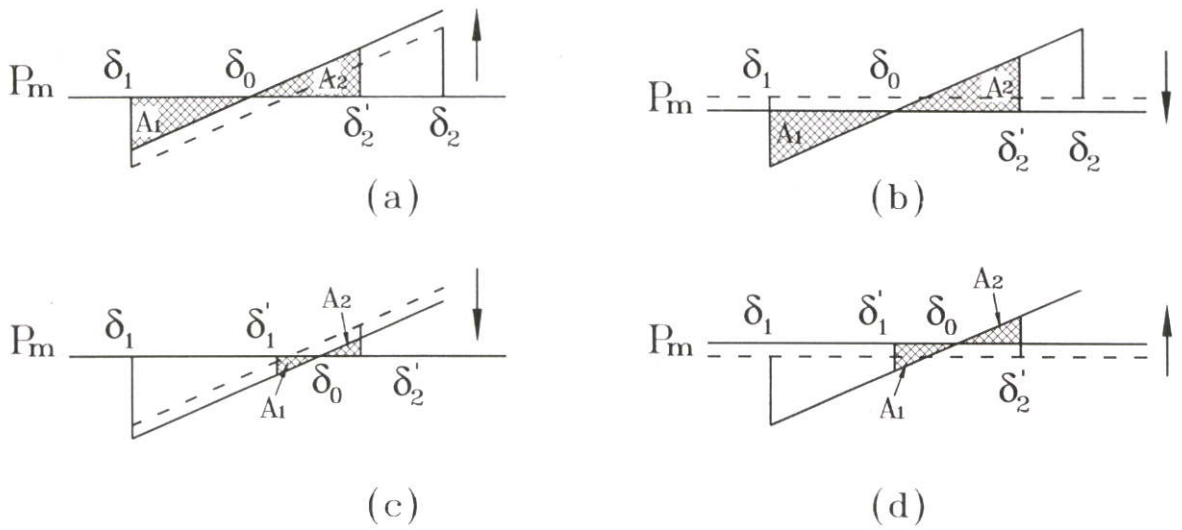
### 2.2.5 การควบคุมการทำงานของ SVC

เมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.10 ซึ่งในขณะนั้นไม่มีการติดตั้ง SVC จะส่งผลให้มุม  $\delta$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งไกวด้วยขนาดคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.12(b) เนื่องจากระบบไม่มีการหน่วงใดๆเลย(ไม่พิจารณาผลของแฉมปีงทอร์ค)



รูปที่ 2.12 การแกว่งไกวเมื่อระบบไม่มีการหน่วง

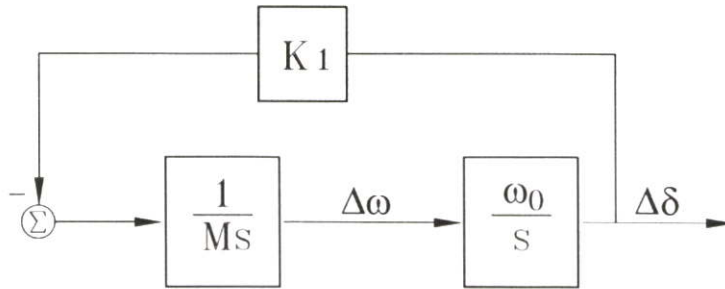
เหตุการณ์ข้างต้นเป็นไปตามกฎพื้นที่เท่ากันกล่าวคือ การแกว่งไกวของระบบจะเกิดขึ้นในลักษณะที่ทำให้พื้นที่  $A_1 = A_2$  ซึ่งพิจารณาได้ดังรูป 2.12(a) โดย  $P_m$  คือกำลังงานอินพุททางกล พื้นที่  $A_1$  คือ พื้นที่เร่งซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่มุม  $\delta$  เพิ่มขึ้น และ  $\Delta\omega > 0$  ส่วนพื้นที่  $A_2$  คือ พื้นที่เร่งเมื่อมุม  $\delta$  ลดลง และ  $\Delta\omega < 0$  พื้นที่เร่งต่างๆ หรือพลังงานทรานเซียนส์ที่เกิดขึ้นสามารถถูกทำให้ลดลงได้ด้วยวิธีการควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่มุม  $\delta_0$  เมื่อมุม  $\delta$  เพิ่มขึ้น ( $\Delta\omega > 0$ ) การควบคุมควรจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้กราฟ  $P-\delta$  ยกขึ้นหรือเป็นไปในลักษณะที่ทำให้  $P_m$  มีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 2.13(a) แต่เมื่อมุม  $\delta$  ลดลงและ ( $\Delta\omega < 0$ ) ควรจะควบคุมให้กราฟ  $P-\delta$  กลงหรือให้  $P_m$  เพิ่มขึ้นดังรูป 2.13(b) ทั้งนี้เพื่อให้ระบบเกิดการหน่วง ซึ่งจากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงกราฟ  $P-\delta$  หรือ  $P_m$  จะทำให้มุม  $\delta$  มีการเคลื่อนที่จาก  $\delta_1 \rightarrow \delta_2 \rightarrow \delta_1'$  และเคลื่อนที่เข้าสู่มุม  $\delta_0$  แทนที่จะเป็นเพียงการแกว่งไกวในลักษณะคงที่ระหว่างมุม  $\delta_1$  และ  $\delta_2$  ดังเช่นกรณีของระบบที่ไม่มีการควบคุม



รูปที่ 2.13 การควบคุมเพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ

กำลังอินพุททางกล:  $P_m$  สามารถควบคุมด้วย GOV แต่เนื่องจากการตอบสนองของอุปกรณ์ชนิดนี้ค่อนข้างช้าจึงมีผลกระทบต่อสถานะทางไดนามิกเล็กน้อยมาก ดังนั้นในการควบคุมสำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะตัดการพิจารณาในส่วนนี้ออกไป ส่วนการควบคุมกราฟ  $P-\delta$  นั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์หลายชนิดที่สามารถปรับกราฟ  $P-\delta$  ได้ เช่น การปรับค่า  $E'$  ด้วย PSS ทำให้กราฟ  $P-\delta$  ถูกปรับไปตามระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ระบบมีการหน่วงมากขึ้น หรือใช้ SVC ช่วยในการปรับค่า  $B_{SVC}$  ซึ่งจะทำให้กราฟ  $P-\delta$  ถูกยกขึ้นหรือลงได้เช่นกันซึ่ง SVC จะมีความได้เปรียบตรงที่มีผลตอบสนองที่เร็ว ดังนั้นการควบคุม SVC ด้วยวิธีการที่เหมาะสมจะทำให้สามารถสร้างการหน่วงที่เพียงพอให้กับระบบได้

ในการศึกษาเกี่ยวกับการหน่วงของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะใช้แบบจำลองของ Phillips-Heffron ดังรูปที่ 2.14 [7,30]



รูปที่ 2.14 แบบจำลองของ Phillips-Heffron

จะพบว่ามีความแปรปรวนอยู่ 2 ตัวคือ  $\Delta\omega$  และ  $\Delta\delta$  ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วจะใช้ตัวแปรสถานะทั้ง 2 นี้ ในการควบคุมค่า  $B_{SVC}$  เอาท์พุทของ SVC ดังนี้

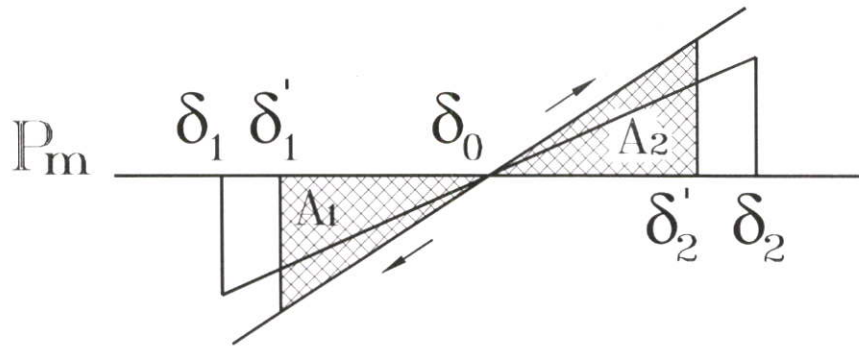
### 2.2.5.1 การควบคุมด้วย $\Delta\delta$

ในการควบคุมด้วยวิธีนี้ ค่า  $B_{SVC}$  เอาท์พุทของ SVC จะควบคุมไปตามการเปลี่ยนแปลงของมุม  $\delta$  ของเครื่องจักร:  $\Delta\delta$  ดังสมการ

$$B_{SVC} = K_{\Delta\delta} \Delta\delta \quad (2.18)$$

โดยที่  $K_{\Delta\delta}$  คือ เกนของการควบคุม และ  $\Delta\delta = \delta - \delta_0$

สมมุติว่าเกิดการรบกวนขึ้นกับระบบในรูปที่ 2.10 ซึ่งมี SVC ต่ออยู่ จะส่งผลให้มุม  $\delta$  เปลี่ยนแปลงไปจาก  $\delta_0$  และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.18 พบว่าขณะที่  $\Delta\delta > 0$  จะทำให้  $B_{SVC}$  เป็นบวก ทำให้กราฟ  $P-\delta$  ดูกยกขึ้น แต่เมื่อ  $\Delta\delta < 0$  จะทำให้กราฟ  $P-\delta$  ยกลง ซึ่งทั้ง 2 เหตุการณ์ที่กล่าวมาสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.15 พบว่าการควบคุม SVC โดยใช้  $\Delta\delta$  นั้นสามารถทำให้ขนาดของการแกว่งไกวลดลงจาก  $\delta_1 \leftrightarrow \delta_2$  เป็น  $\delta_1' \leftrightarrow \delta_2'$  และเพิ่มสัมประสิทธิ์ชิงโครนัสทอร์คเนื่องจากกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการควบคุม SVC ด้วย  $\Delta\delta$  จะไม่มีผลต่อการหน่วงของระบบ แต่จะเป็นเพียงแต่ลดขนาดของการแกว่งไกวมาอยู่ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.15 การแกว่งไกวเมื่อSVCถูกควบคุมด้วย $\Delta\delta$

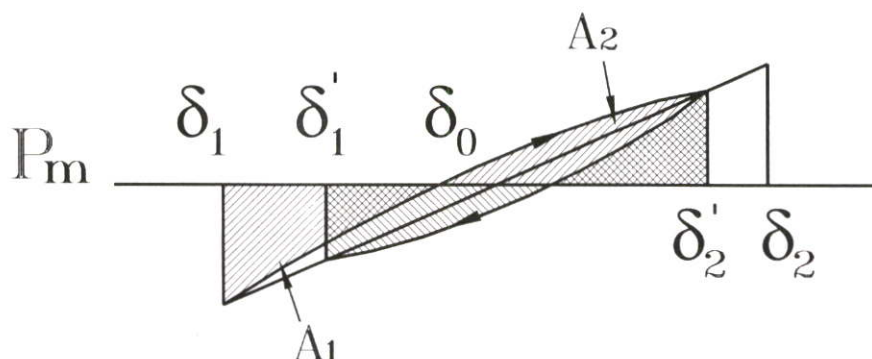
จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถอธิบายถึงสาเหตุที่ว่า ทำไมการควบคุมSVCด้วยแรงดันที่บัส จึงไม่มีผลต่อการหน่วงของระบบ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส( $\Delta V$ ) เกือบจะมีเฟสไปในทิศทางเดียวกับ $\Delta\delta$  จึงสรุปได้ว่าการควบคุมด้วย $\Delta V$  จัดเป็นการควบคุมด้วย $\Delta\delta$ ประเภทหนึ่ง และจะไม่สามารถสร้างการหน่วงที่เพียงพอให้กับระบบได้

### 2.2.5.2 การควบคุมด้วย $\Delta\omega$

ในการควบคุมด้วย $\Delta\omega$  นั้นค่า $B_{SVC}$  เอาท์พุทของSVC จะควบคุมไปตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุม $\omega$ : $\Delta\omega$  ของเครื่องจักร ดังสมการ

$$B_{SVC} = K_{\Delta\omega} \Delta\omega \quad (2.19)$$

โดย  $K_{\Delta\omega}$  คือเกนของการควบคุม และผลของการควบคุมที่มีต่อกราฟP- $\delta$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การแกว่งไกวเมื่อSVCถูกควบคุมด้วย $\Delta\omega$

เมื่อมุม $\delta$ เพิ่มขึ้นและ $\Delta\omega > 0$  จะทำให้ $B_{SVC}$ เป็นบวกดังในสมการที่2.19 และส่งผลให้กราฟ P- $\delta$ ถูกยกขึ้น แต่เมื่อ $\delta$ ลดลง และ $\Delta\omega < 0$  จะทำให้ $B_{SVC}$ เป็นลบและให้กราฟP- $\delta$ ถูกยกลง การเปลี่ยนแปลงกราฟP- $\delta$ ไปตาม $B_{SVC}$ ซึ่งขึ้นอยู่กับ $\Delta\omega$ นั้น สามารถทำให้การหน่วงของระบบเพิ่มขึ้นได้ โดยมุม $\delta$ จะเปลี่ยนจาก $\delta_1 \rightarrow \delta_2 \rightarrow \delta_1$  ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งทำให้ระบบถูกดึงกลับเข้าสู่จุดสมดุล $\delta_0$

การที่จะทำให้ระบบมีการหน่วงที่มากเพียงพอ นั้น จำเป็นจะต้องมีการสร้างสัญญาณเสริมให้กับSVC หรืออาจกล่าวได้ว่าจะต้องมีการเพิ่มลูปลการหน่วง(Damping Loop)ให้กับลูปลควบคุมแรงดันเดิมของ SVC สัญญาณควบคุมเสริมนี้ ควรจะมีเฟสไปในทิศทางเดียวกับ $\Delta\omega$  โดยในทางปฏิบัติแล้วสัญญาณ $\Delta\omega$ จะไม่สามารถตรวจจับได้จากตำแหน่งที่มีการติดตั้งSVC ดังนั้นจึงมีการนำสัญญาณอื่นๆ มาใช้แทน เช่นสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า: $\Delta P$  ณ จุดติดตั้ง SVC

### 2.2.6 การใช้งานSVC

ตั้งแต่ได้มีการพัฒนา SVC ขึ้นมาเป็นครั้งแรกในปี 1970 จนกระทั่งปัจจุบันนี้ SVCได้ถูกนำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลาย และด้วยความสามารถในการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟและแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้SVCถูกนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังคือ

1. ควบคุมการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ
2. รักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า
3. ทำสมดุลย์ของโหลด
4. เพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเพิ่มเสถียรภาพทรานเซียนส์ และเพิ่มการหน่วง

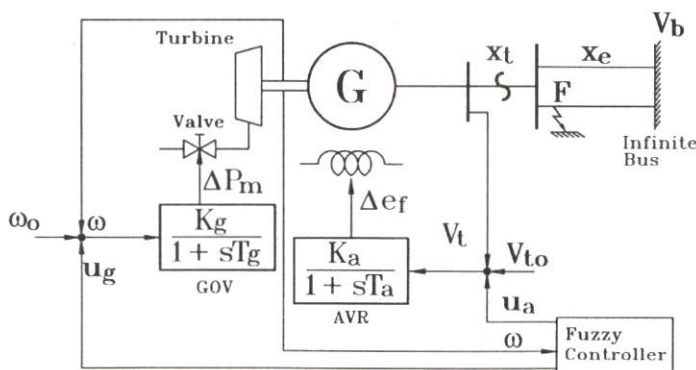
## 2.3 การใช้ฟuzzyลอจิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันทฤษฎีฟuzzy ได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมและคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย จึงเป็นแรงจูงใจให้วิศวกรไฟฟ้ากำลังได้ศึกษาและนำทฤษฎีนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวในการแก้ปัญหา การใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญอย่างเช่น ฟuzzy จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกหยิบยกขึ้นมา

ตัวควบคุมของฟuzzy จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสริม [16,17,36,37] ให้กับอุปกรณ์ควบคุมเดิมในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น ตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ(AVR)เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความสามารถในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพภายหลังจากเกิดการแกว่งไกวอันเนื่องมาจากการรบกวนบางอย่างได้รวดเร็วขึ้น ตัวควบคุมฟuzzy จะมีบทบาทคล้ายกับตัวควบคุมเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง(PSS) แต่จะมีกระบวนการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมที่แตกต่างกัน โดยPSSอาจใช้การควบคุมแบบพีไอดี หรือแบบเกนปรับค่าได้ซึ่งจะยุ่งยากโดยเฉพาะในกรณีของระบบที่มีความซับซ้อน ส่วนฟuzzy จะเป็นการควบคุมด้วยกฎอย่างง่ายเพียงไม่กี่กฎซึ่งได้มาจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญแต่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังไม่ต้องอาศัยการคำนวณที่ยุ่งยากจึงใช้เวลาน้อยในการสร้างสัญญาณควบคุมจึงเหมาะกับการควบคุมแบบเรียลไทม์

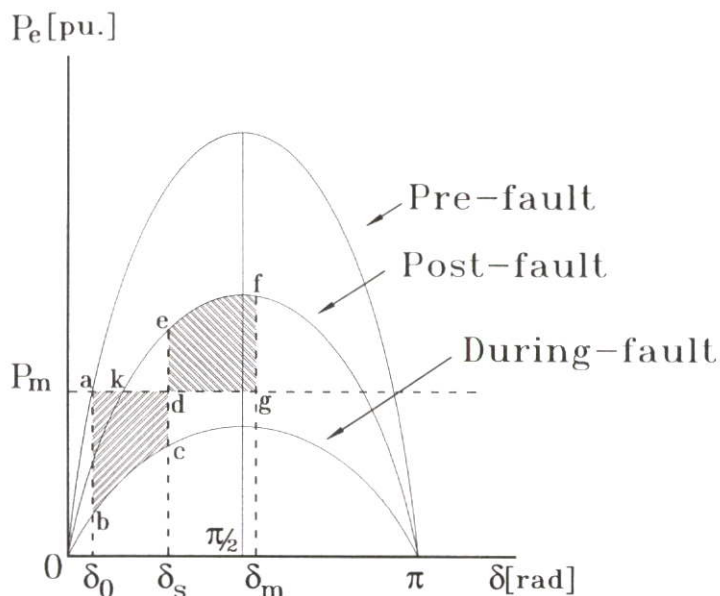
### 2.3.1 พื้นฐานของกฎฟuzzy สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง

การสร้างกฎของฟuzzy สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังจะเริ่มต้นจากการพิจารณาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเครื่องจักรที่ถูกต้องเข้ากับอินฟินิตี้บัสดังรูปที่ 2.17 ระบบจะถูกควบคุมด้วย AVR และ GOV โดยมี  $U_a$  และ  $U_g$  เป็นสัญญาณควบคุมเสริมสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัว



รูปที่ 2.17 -แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเครื่องจักร

โดยทั่วไปกฎพีชซึ่งจะถูกสร้างขึ้นจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญในสาขาต่างๆ ดังนั้นสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง กฎพีชซึ่งจะถูกสร้างโดยอาศัยพื้นฐานจากกฎพื้นที่เท่ากัน(Equal-Area Criteria) [38] ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพทรานเซียนส์ ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยอธิบายด้วยกราฟ P- $\delta$  ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กราฟ P- $\delta$

จากรูปแสดงถึงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต:  $P_e$  ซึ่งถูกส่งให้กับระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆคือ ก่อนเกิดการลัดวงจร, ระหว่างเกิดการลัดวงจร และ ภายหลังจากเกิดการลัดวงจร จุด “a” คือจุดสมดุลของระบบในช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นจุดทำงานก็จะเคลื่อนที่มายังจุด “b” อย่างทันทีทันใด และจากการที่กำลังอินพุตทางกลมีมากกว่ากำลังเอาต์พุตทางไฟฟ้าจะทำให้โรเตอร์เกิดความเร่ง จุดทำงานจึงเคลื่อนจากจุด “b” ไปยังจุด “c” จากนั้นเมื่อการลัดวงจรถูกกำจัดจุดทำงานก็จะเปลี่ยนจากจุด “c” ไปยังจุด “e” อย่างทันทีทันใดอีกครั้งหนึ่ง ขณะนี้ระบบจะถูกหน่วงและจากการที่ระบบไม่มีการควบคุมใดๆเลยทำให้จุดทำงานเคลื่อนที่ต่อไปจากจุด “e” ไปหยุดที่จุด “f” ซึ่งในช่วงเวลาที่กล่าวมานี้ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์จะมีค่าเป็นบวก ( $\Delta\omega > 0$ ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์จะเท่ากับศูนย์ ( $\Delta\omega = 0$ ) เมื่อจุดทำงานเคลื่อนที่มายังจุด “f” พื้นที่ abcd จะแสดงส่วนของพลังงานเร่ง และพื้นที่ defg จะแสดงส่วนของพลังงานหน่วง จุดทำงานจะเคลื่อนที่จากจุด “f” กลับไปยังจุด “e” และ “k” ซึ่งในตอนนี้ พื้นที่ kfg จะกลายเป็นพลังงานเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์จะน้อยกว่าศูนย์ ( $\Delta\omega < 0$ ) โดยจุดทำงานจะ

เคลื่อนที่ไปรอบๆจุด “k” ด้วยความถี่ธรรมชาติของระบบ แต่ในกรณีที่ระบบมีความหน่วงจุดทำงานก็จะกลับมาหยุดที่จุด “k”

เราจะเริ่มใช้ตัวควบคุมพีชซึ่งภายหลังจากการลัดวงจรถูกกำจัดโดยที่ AVR จะควบคุม  $P_e$  ส่วน GOV จะควบคุม  $P_m$  จากกฎพื้นที่เท่ากันที่กล่าวมาจะได้กฎการควบคุมดังนี้

กฎที่1 ถ้า  $\Delta\omega > 0$  จะต้องเพิ่ม  $P_e$  โดยเพิ่มเอ็กไซเตชัน หรือลด  $P_m$  โดยการปิดวาล์วไอน้ำเพื่อให้เกิดการควบคุมแบบ หน่วง

กฎที่2 ถ้า  $\Delta\omega < 0$  จะต้องลด  $P_e$  โดยลดเอ็กไซเตชัน หรือเพิ่ม  $P_m$  โดยการเปิดวาล์วไอน้ำเพื่อให้เกิดการควบคุมแบบ เร่ง

ซึ่งการควบคุมโดยใช้กฎแบบนี้ก็เพื่อให้พื้นที่เร่ง ถูกทำให้เสถียรลง ในขณะที่พื้นที่หน่วงถูกทำให้ใหญ่ขึ้น ระบบจึงจะกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วที่สุด

นอกจากการใช้  $\Delta\omega$  เป็นตัวแปรในการพิจารณาแล้วยังได้นำความเร่งของโรเตอร์:  $\Delta\omega'$  มา ร่วมในการพิจารณาด้วยทั้งนี้เพื่อชดเชยดีเลย์ใหม่ของระบบ จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสร้างกฎของพีชซึ่งสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 2.18 ได้ดังนี้

กฎที่1 ถ้า  $\Delta\omega$  คือ PB แล้ว  $U_a^1 = U_a \max,$   $U_g^1 = U_g \min$

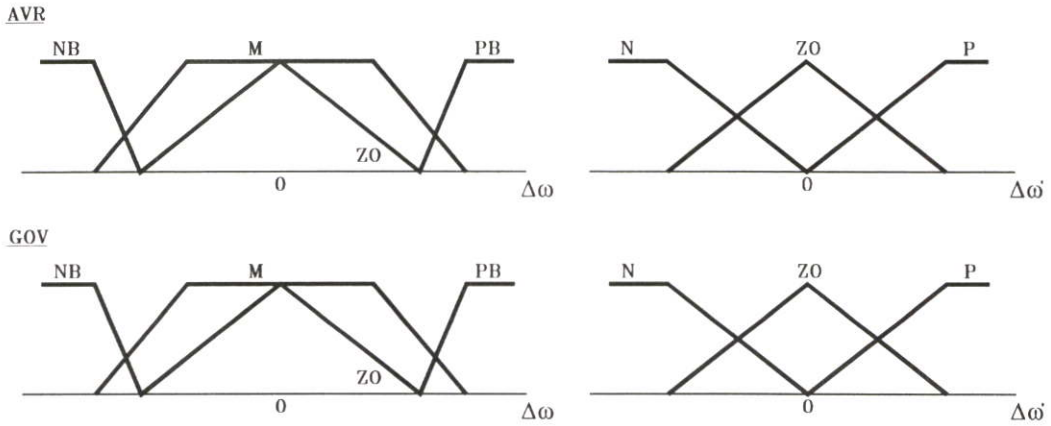
กฎที่2 ถ้า  $\Delta\omega$  คือ NB แล้ว  $U_a^2 = U_a \min,$   $U_g^2 = U_g \max$

กฎที่3 ถ้า  $\Delta\omega$  คือ M และ  $\Delta\omega'$  คือ N แล้ว  $U_a^3 = U_a \min/2,$   $U_g^3 = U_g \max/2$

กฎที่4 ถ้า  $\Delta\omega$  คือ M และ  $\Delta\omega'$  คือ P แล้ว  $U_a^4 = U_a \max/2,$   $U_g^4 = U_g \min/2$

กฎที่5 ถ้า  $\Delta\omega$  คือ Z0 และ  $\Delta\omega'$  คือ Z0 แล้ว  $U_a^5 = 0,$   $U_g^5 = 0$

โดยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจะถูกใช้ในส่วนของเงื่อนไขเท่านั้นและมีลักษณะดังรูป 2.19



รูปที่ 2.19 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\Delta\omega$  และ  $\Delta\omega'$

สัญญาณควบคุมเสริม  $U_a$  และ  $U_g$  จะหาได้จากการเฉลี่ยน้ำหนักคือ

$$U_a = (\sum \lambda^i U_a^i) / \sum \lambda^i \tag{2.20}$$

$$U_g = (\sum \mu^i U_g^i) / \sum \mu^i \tag{2.21}$$

โดย  $\lambda^i$  และ  $\mu^i$  คือค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรสำหรับกฎแต่ละข้อ

กฎทั้ง 5 ข้อที่กล่าวมาพบข้อสังเกตคือ กฎข้อที่ 1 และ 2 จะมีพื้นฐานมาจากกฎพื้นที่เท่ากัน โดยเครื่องหมายของ  $U_a$  หรือ  $U_g$  จะสัมพันธ์กับ  $\Delta\omega$  ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มหรือลดขนาดของพื้นที่เร่ง กฎข้อที่ 3 และ 4 จะเป็นการพิจารณาโดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของ  $\Delta\omega'$  ร่วมด้วย ส่วนกฎข้อ 5 จะเป็นกฎสำหรับกรณีที่จุดทำงานอยู่ใกล้ๆ กับจุดสมดุล พบว่าเป็นการยากที่จะสร้างกฎควบคุมทั้ง 5 ให้เหมาะสมกับระบบต่างๆ ด้วยการลองผิดลองถูกโดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้นตอนของการรวมฟังก์ชัน การเป็นสมาชิกของ  $\Delta\omega$  และ  $\Delta\omega'$  ก็ค่อนข้างซับซ้อน จึงได้มีการสร้างเฟสเพลน [16,17,39,40] ของ  $\Delta\omega$  และ  $\Delta\omega'$  สำหรับการควบคุมขึ้น โดยให้  $\Delta\omega$  เป็นแกนอนและอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของ  $\Delta\omega$  ซึ่งได้แก่  $\Delta\omega'$  เป็นแกนตั้ง ซึ่งเฟสเพลนนี้จะถูกแบ่งพื้นที่ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการควบคุมแบบเร่ง และส่วนของการควบคุมแบบหน่วง พบว่าการควบคุมโดยใช้มุม  $\theta$  ในการกำหนดตำแหน่งของจุดทำงานบนเฟสเพลนจะง่ายกว่าการควบคุมด้วยกฎข้อ 3 และข้อ 4 นอกจากนี้ ยังทำให้จำนวนของกฎลดลงเหลือแค่ 2 กฎคือ

กฎที่1 ถ้า  $\theta$  คือ N แล้ว  $U_a^1 = U_a \max$ ,  $U_g^1 = U_g \min$

กฎที่2 ถ้า  $\theta$  คือ P แล้ว  $U_a^2 = U_a \min$ ,  $U_g^2 = U_g \max$

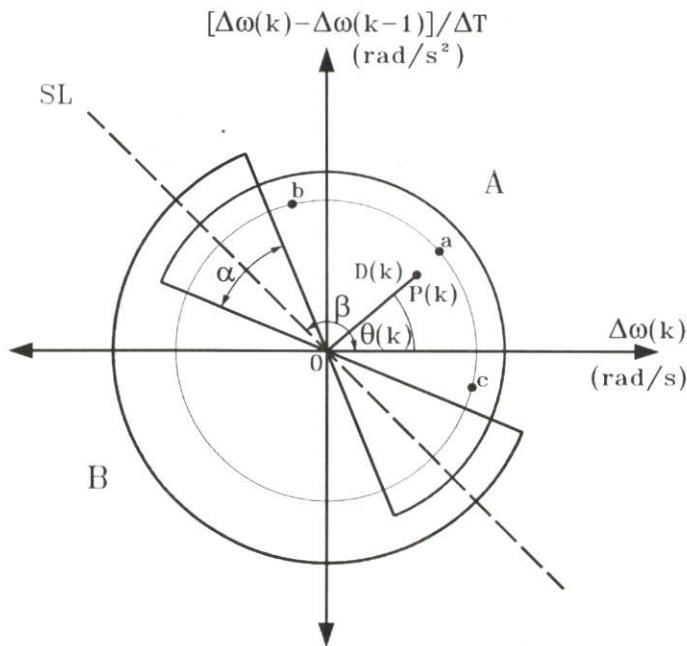
และ

$$U_a = (\sum \lambda^i U_a^i) / \sum \lambda^i \quad (2.22)$$

$$U_g = (\sum \mu^i U_g^i) / \sum \mu^i \quad (2.23)$$

### 2.3.2 เฟสเฟลน

เฟสเฟลนถูกสร้างขึ้นเพื่อลดความซับซ้อนของกฎฟuzzy โดยจะพิจารณาเฟสเฟลนสำหรับ PSS ได้จากรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 เฟสเฟลนสำหรับ PSS

โดยทั่วไปสัญญาณอินพุทของตัวควบคุมฟuzzy ชนิดเฟสเฟลน คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตัวหนึ่งในระบบไฟฟ้า และความเร่งหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั้นๆ ดังนั้นสำหรับกรณีของ PSS ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดการแกว่งไกวของความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าให้เท่ากับศูนย์นั้น จะเลือกสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า :  $\Delta\omega$  และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\Delta\omega$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า :  $\Delta\omega'$  ส่วนสัญญาณเอาต์พุตซึ่งก็คือ สัญญาณควบคุมเสถียรภาพเสริมที่จะป้อนให้กับลูปควบคุมเดิมของ AVR นั้นจะมีลักษณะเป็น สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง และกำหนดโดยสมการ

$$u(t) = U(k) \quad \text{for } k\Delta T \leq t < (k+1)\Delta T \quad (2.24)$$

โดยที่  $k$  คือเลขจำนวนเต็ม และ  $\Delta T$  คือช่วงเวลาในการสุ่ม (Sampling Time) ซึ่งสัญญาณ  $U(k)$  จะถูกสร้างขึ้นใหม่ในทุกๆ ช่วงเวลาสุ่ม

สำหรับสัญญาณแรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า:  $\Delta\omega'$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25 โดยจะนำสถานะของระบบในช่วงเวลาก่อนหน้ามาใช้ในการคำนวณด้วย

$$\Delta\omega'(k) = \Delta\omega(k) - \Delta\omega(k-1) / \Delta T \quad (2.25)$$

สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเวลา  $t = k\Delta T$  ใดๆ จะถูกนำมาพล็อตเป็นจุด  $p(k)$  บนเฟสเพลน โดยจุด  $p(k)$  นี้จะถูกกำหนดด้วยคู่ลำดับของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความเร็ว:  $\Delta\omega$  และ ความเร่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า:  $\Delta\omega'$  ในขณะนั้นๆ ดังนี้

$$p(k) = [\Delta\omega(k), \Delta\omega'(k)] \quad (2.26)$$

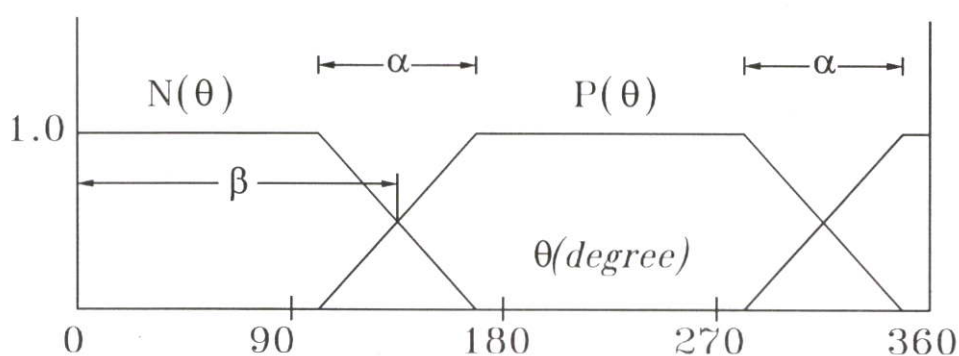
ตำแหน่งต่างๆ บนเฟสเพลน จะมีความหมายที่แตกต่างกันไป เช่น พื้นที่ในช่วงครึ่งบนของเฟสเพลนจะแสดงถึงความเร่งที่เป็นบวก ส่วนครึ่งล่างจะแสดงถึงความเร่งที่เป็นลบ ซึ่งก็คือ ความหน่วง พื้นที่ทางขวามือแสดงถึงความเร็วที่มากกว่าความเร็วเชิงโรตัส ส่วนพื้นที่ทางซ้ายจะแสดงถึงความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเชิงโรตัส จุดกำเนิดของเฟสเพลนจะแสดงถึงจุดสมดุลย์ ซึ่งจุดประสงค์ของการควบคุมก็คือ ทำให้จุด  $p(k)$  เคลื่อนเข้าสู่จุดกำเนิดให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พื้นที่บนเฟสเพลนจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของพื้นที่ A ซึ่งระบบมีความเร่งจึงต้องการการควบคุมแบบหน่วง และส่วนของพื้นที่ B ซึ่งระบบมีความหน่วงจึงต้องการการควบคุมแบบเร่งโดยจะขอยกตัวอย่างกฎการควบคุมที่ต้องการจุด  $a$ ,  $b$  และ  $c$  บนเฟสเพลนดังนี้

- จุด  $a$  เป็นสถานะที่ระบบต้องการการควบคุมแบบหน่วงอย่างมาก
- จุด  $b$  เป็นสถานะที่ระบบต้องการการควบคุมแบบหน่วงเพียงเล็กน้อย
- จุด  $c$  เป็นสถานะที่ระบบต้องการการควบคุมแบบหน่วงเพียงเล็กน้อย

พื้นที่ A และ B บนเฟสเพลนสามารถแทนด้วยฟังก์ชันการเป็นสมาชิก  $N(\theta(k))$  และ  $P(\theta(k))$  ของมุม  $\theta$  ดังรูปที่ 2.21 และสามารถเขียนกฎฟัซซี่ได้ดังนี้

กฎที่ 1 ถ้า ระบบมีความเร็ว ( $\theta$  คือ N) แล้ว ควบคุมความหน่วง

กฎที่ 2 ถ้า ระบบมีความหน่วง ( $\theta$  คือ P) แล้ว ควบคุมความเร็ว



รูปที่ 2.21 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม  $\theta$

$\theta(k)$  คือมุมเวกเตอร์ของ  $p(k)$  บนเฟสเพลน และจากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกทั้ง 2 นี้จะสามารถหาสัญญาณเอาต์พุต ได้จากการเฉลี่ยน้ำหนักดังนี้

$$U(k) = \frac{G(k)[N(\theta(k))U_{\max} - P(\theta(k))U_{\max}]}{N(\theta(k)) + P(\theta(k))} \quad (2.27)$$

$$U(k) = G(k)[2N(\theta(k)) - 1]U_{\max} \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$N(\theta(k)) + P(\theta(k)) = 1 \quad (2.29)$$

$$G(k) = D(k) / D_r \text{ when } D(k) \leq D_r \quad (2.30)$$

$$G(k) = 1.0 \text{ when } D(k) > D_r \quad (2.31)$$

และ

$$D(k) = |p(k)| \quad (2.32)$$

โดย  $G(k)$  คือเกนเฟดเตอร์ในแต่ละช่วงเวลา  $t=k\Delta T$  ใดๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ  $D_r$  คือค่าคงที่ใดๆ ,  $U_{max}$  คือค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุม และสัญญาณ  $U(k)$  ที่ได้นี้ก็ คือ สัญญาณควบคุมเสถียรภาพเสริมที่จะเพิ่มเข้าไปในรูปควบคุมเดิมของ AVR เพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบนั่นเอง

## บทที่ 3

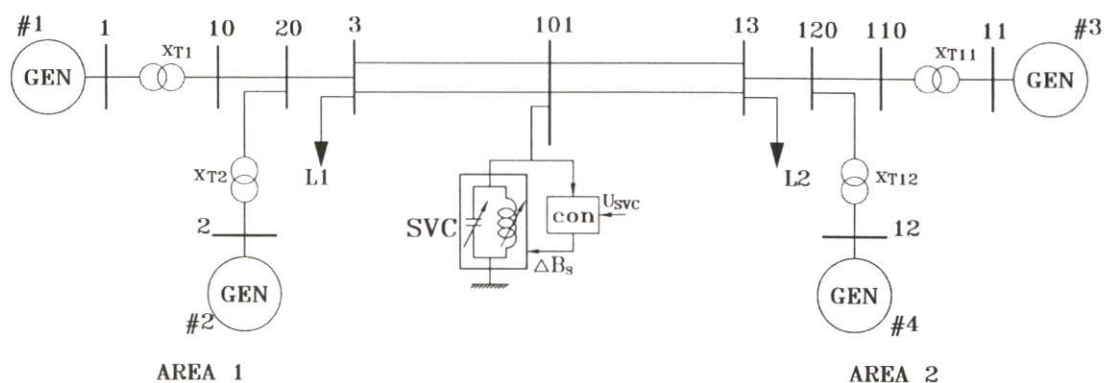
# วิเคราะห์ระบบจำลอง

การศึกษาผลตอบสนองของระบบไฟฟ้ากำลังต่อสิ่งรบกวนจะกระทำโดยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ โดยจะต้องมีการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, SVC, ตัวควบคุมฟิชซี รวมทั้งแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร สำหรับแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นแบบจำลองที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 ยูนิต และมีบัสทั้งหมด 10 บัส โดยบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ต่างๆ จะเป็นบล็อกมาตรฐาน ซึ่งมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในบทความของ IEEE ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึง สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งบล็อกไดอะแกรมต่างๆ เพื่อจะนำมาสร้างแบบจำลองทั้งหมดของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร และนำไปใช้ในการสร้างเป็นโปรแกรมเพื่อทดสอบวิธีการควบคุมแบบต่างๆต่อไป

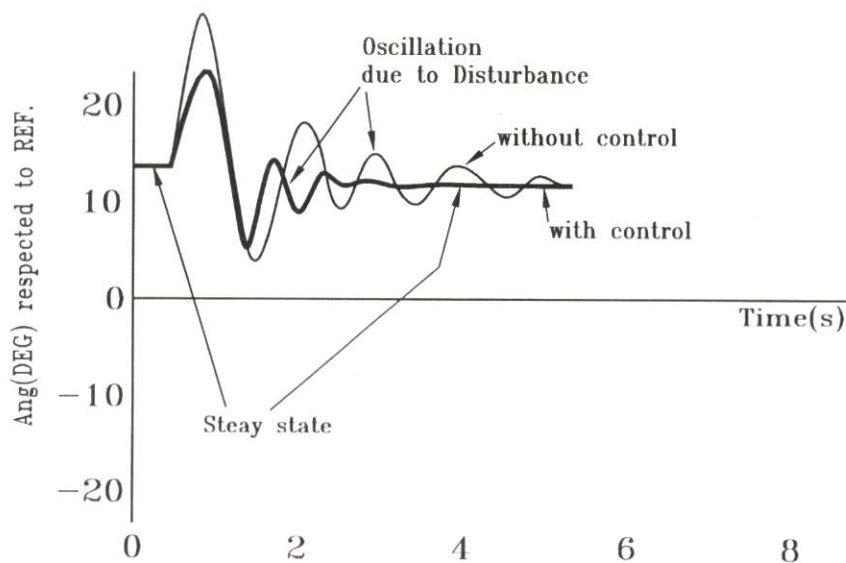
### 3.1 แบบจำลองระบบ

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่มีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อจะสามารถพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการแกว่งไกวได้สะดวกมากขึ้น จึงได้มีการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายขึ้นมา โดยแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรนี้ได้พัฒนาขึ้น โดยคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัย โตรอนโต ประเทศแคนาดา ( The University of Toronto) และได้ถูกแนะนำ รับรองจากคณะกรรมการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังของ IEEE ในการประชุมที่นิวยอร์ก ในปี 1991 โดยสามารถพิจารณาแบบจำลองได้จากรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

ระบบไฟฟ้ากำลังนี้ เป็นระบบแบบ 4 เครื่องจักร 10 บัส [22,23,41,42,43] โดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ และถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันด้วยสายส่งระยะไกล โดยเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการแกว่งไกวระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหลือดังรูปที่ 3.2 ซึ่งการแกว่งไกวที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการ ใช้อุปกรณ์ควบคุมเสถียรภาพต่างๆซึ่งได้แก่ PSSหรือ SVCที่มีสัญญาณควบคุมเสริม [7,44] ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์เหล่านี้ในหัวข้อถัดไป สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 การแกว่งไกวเนื่องจากการรบกวน

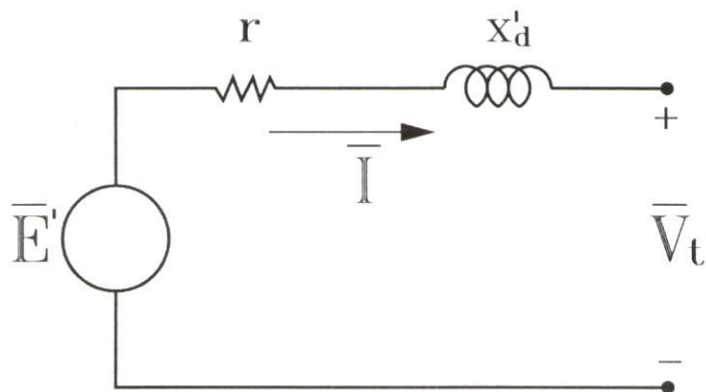
**ตารางที่ 3.1** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

MVAbase = 100		
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง $X_{T1}$	=	$0+j0.0167$ pu.
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง $X_{T2}$	=	$0+j0.0167$ pu.
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง $X_{T3}$	=	$0+j0.0167$ pu.
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง $X_{T4}$	=	$0+j0.0167$ pu.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง	=	$0.0001+j0.001$ pu./km
ชัศเชิงแดนซ์ของสายส่ง	=	$0.00175$ pu./km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส(10,20)	=	25 km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส(3,20)	=	10 km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส(3,101)	=	110 km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส(13,101)	=	110 km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส(110,120)	=	25 km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส(13,120)	=	10 km

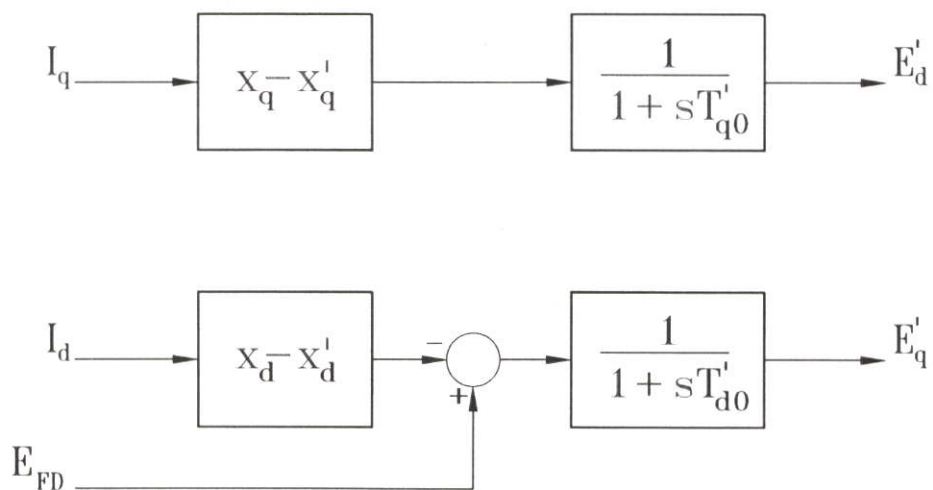
### 3.2 สมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะใช้ในการศึกษาเสถียรภาพ ส่วนทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนั้นจะสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [45,46] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละตัวในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกแทนด้วยชุดของสมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบไม่เป็นเชิงเส้น [47] ซึ่งประกอบด้วยส่วนของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 สมการ และส่วนของสมการสวิงจำนวน 2 สมการ นอกจากนี้ยังมีสมการพีชคณิตอื่นๆ ที่ช่วยให้การคำนวณมีความสมบูรณ์ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าในกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จะมีชุดของสมการที่ต้องใช้ในการคำนวณหลายสมการ เพราะนอกจากมีสมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวแล้วยังต้องมีสมการของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ด้วย ทำให้ต้องมีการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลามาก จึงจำเป็นต้องมีการลดทอนจำนวนของสมการลงเพื่อลดความซับซ้อนและทำให้เวลาในการจำลองเร็วขึ้น [33] จึงทำให้เกิดแบบจำลองมาตรฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น โดยในแต่ละแบบจำลองจะใช้จำนวนของสมการสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่แบบจำลองคลาสสิก (Classical), แบบจำลองหนึ่งแกน (One Axis), แบบจำลองสองแกน (Two Axis) และแบบจำลองซบทรานส์เซียน โดยจะมีความซับซ้อนเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับสำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยแบบจำลองสองแกน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการศึกษาสภาวะไดนามิกส์ทางไฟฟ้า-กล โดยเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทรานส์เซียนดังรูปที่ 3.3 และบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองแบบสองแกนแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 แบบจำลองสองแกน

จากรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการของแรงดันเหนี่ยวนำในแนวแกน d และ q ได้ดังนี้

$$T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} = -E_d' + (x_q - x_q') I_q \quad (3.1)$$

$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{FD} - E_q' - (x_d - x_d') I_d \quad (3.2)$$

สำหรับสมการพีชคณิตที่เกี่ยวข้องได้แก่

$$[I_{qi}] = [M][V_{qi}] - [N][V_{di}] \quad (3.3)$$

$$[I_{di}] = [N][V_{qi}] - [M][V_{di}] \quad (3.4)$$

โดย

$$M_{ii} = G_{ii} \quad (3.5)$$

$$M_{ik} = G_{ik} (\cos \delta_{ik}) + B_{ik} (\sin \delta_{ik}) \quad (3.6)$$

$$N_{ii} = B_{ii} \quad (3.7)$$

$$N_{ik} = B_{ik} (\cos \delta_{ik}) + G_{ik} (\sin \delta_{ik}) \quad (3.8)$$

โดย  $G+jB = Y =$  บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกแบบลดรูป

$$V_d = E_d' - r_a i_d + x_d' i_q \quad (3.9)$$

$$V_q = E_q' - r_a i_q + x_d' i_d \quad (3.10)$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (3.11)$$

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3.12)$$

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (3.13)$$

สำหรับส่วนของสมการสวิง ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังงานกลอินพุต, กำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (3.14)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = (P_m - P_e) \times \frac{\pi f}{H} \quad (3.15)$$

ส่วนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงในตารางที่ 3.2

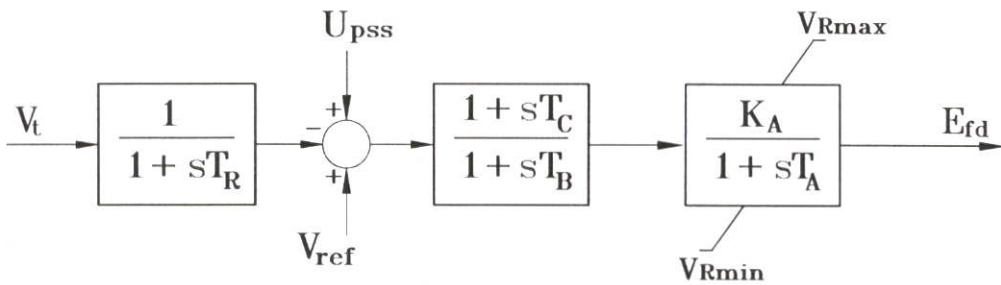
**ตารางที่ 3.2** พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [22]

GEN1:	$x_d = 1.8, x_d' = 0.3, x_q = 1.7, x_q' = 0.55, r_a = 0.0025, x_l = 0.2, T_{do}' = 8, T_{qo}' = 0.4,$ $H = 6.5, 900\text{MVA}$
GEN1:	$x_d = 1.8, x_d' = 0.3, x_q = 1.7, x_q' = 0.55, r_a = 0.0025, x_l = 0.2, T_{do}' = 8, T_{qo}' = 0.4,$ $H = 6.5, 900\text{MVA}$
GEN3:	$x_d = 1.8, x_d' = 0.3, x_q = 1.7, x_q' = 0.55, r_a = 0.0025, x_l = 0.2, T_{do}' = 8, T_{qo}' = 0.4,$ $H = 6.5, 900\text{MVA}$
GEN4:	$x_d = 1.8, x_d' = 0.3, x_q = 1.7, x_q' = 0.55, r_a = 0.0025, x_l = 0.2, T_{do}' = 8, T_{qo}' = 0.4,$ $H = 6.5, 900\text{MVA}$

### 3.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ AVR และ PSS โดยอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator; AVR) นั้นจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการควบคุมปริมาณของกระแสเอ็กไซเตอร์ที่จ่ายให้กับขดลวดฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการทำงานคือ วัดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วนำมาเปรียบ

เทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าระดับแรงดันที่ต้องการ ซึ่งจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันออกมา ค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะถูกนำไปผ่านวงจรถยายแล้วนำไปเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสของขดลวดฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ถูกกำจัดออกไป ผลก็คือทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองของ AVR ตามมาตรฐาน IEEE ซึ่งเป็นแบบสเตติกเอ็กไซต์ [30,43] และมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.5 โดยบล็อกไดอะแกรมของ AVR จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ ส่วนของทรานส์ดิวเซอร์, ส่วนของฟังก์ชันนำตาม และส่วนของวงจรถยาย



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของ AVR

จากบล็อกไดอะแกรมจะมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

$$\frac{dV_{tr}}{dt} = \frac{V_t - V_{tr}}{T_R} \quad (3.16)$$

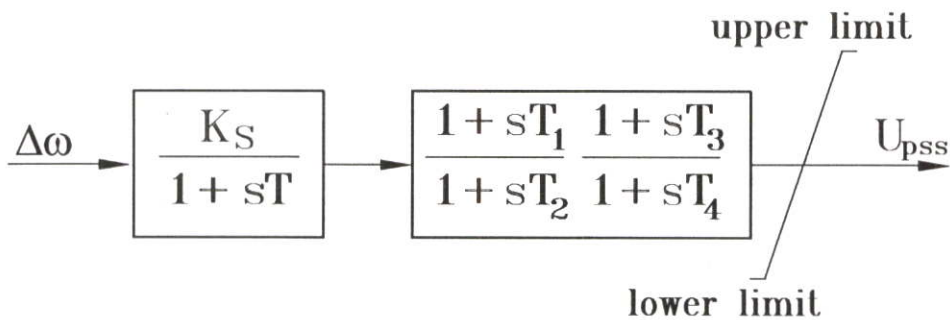
$$\frac{dV_{as}}{dt} = \frac{V_{ref} - V_{tr} + U_{PSS} - V_{as}}{T_B} \quad (3.17)$$

$$V_{aa} = \frac{T_C}{T_B} (V_{ref} - V_{tr} + U_{PSS}) + \left(1 - \frac{T_C}{T_B}\right) V_{as} \quad (3.18)$$

$$\frac{dE_{FD}}{dt} = \frac{V_{aa} k_A - E_{FD}}{T_A} \quad (3.19)$$

จากรูปที่ 3.5 จะสังเกตเห็นสัญญาณ  $U_{PSS}$  ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมเสริมที่ออกจาก PSS โดยสัญญาณนี้จะถูกรวมเข้ากับค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าแรงอ้างอิงและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PSS จะถูกนำมาใช้ร่วมกับ AVR ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะช่วยในการสร้างความหน่วงของการแกว่งไกว ในระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก AVR จะสร้างการหน่วงแบบลบขึ้น โดยจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสของขดลวดหน่วง ทำให้การหน่วงที่เกิดจากขดลวดหน่วงมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของระบบสายส่งระยะไกลหรือกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายโหลดมากๆ ซึ่งจำเป็นที่ต้องใช้ AVR ที่มีค่าเกนสูงเพื่อรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามต้องการ ก็ยังทำให้เกิดการหน่วงแบบลบมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ความสามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพลดลงจนอาจจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสูญเสียเสถียรภาพไปเลยก็ได้ วิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหานี้ก็คือการชดเชยด้วยรูปควบคุมเสริม โดยการใช้ PSS นั่นเอง

PSS จะไม่ทำงานในกรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัว คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมมีค่าเป็นศูนย์ โดยจะปล่อยให้ AVR ทำหน้าที่ในการรักษาระดับแรงดันไปตามปกติ แต่เมื่อระบบอยู่ในสภาวะทรานส์เซียน หรือความเร็วโรเตอร์ไม่คงที่ จะส่งผลให้ PSS ส่งสัญญาณเสริมให้กับ AVR เพื่อลดการแกว่งไกวของแรงดันและเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ โดยทั่วไปสามารถนำสัญญาณความเร็วเชิงมุม ความถี่ หรือกำลังไฟฟ้า มาเป็นสัญญาณอินพุทของ PSS ได้ แต่ในที่นี้จะเลือกใช้สัญญาณความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น โดยบล็อกไดอะแกรมของ PSS จะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของ PSS

บล็อกไดอะแกรมของPSSจะประกอบด้วยส่วนของวงจรวอชเอาท์ และส่วนของวงจรชดเชยเฟส โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

$$Z_1 = \frac{(\omega - PSS1)}{T} \quad (3.20)$$

$$\frac{dPSS1}{dt} = Z_1 \quad (3.21)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1KT_1}{T_2} + PSS2 \quad (3.22)$$

$$\frac{dPSS2}{dt} = \left[1 - \frac{T_1}{T_2}\right]KZ_1 - \frac{PSS2}{T_2} \quad (3.23)$$

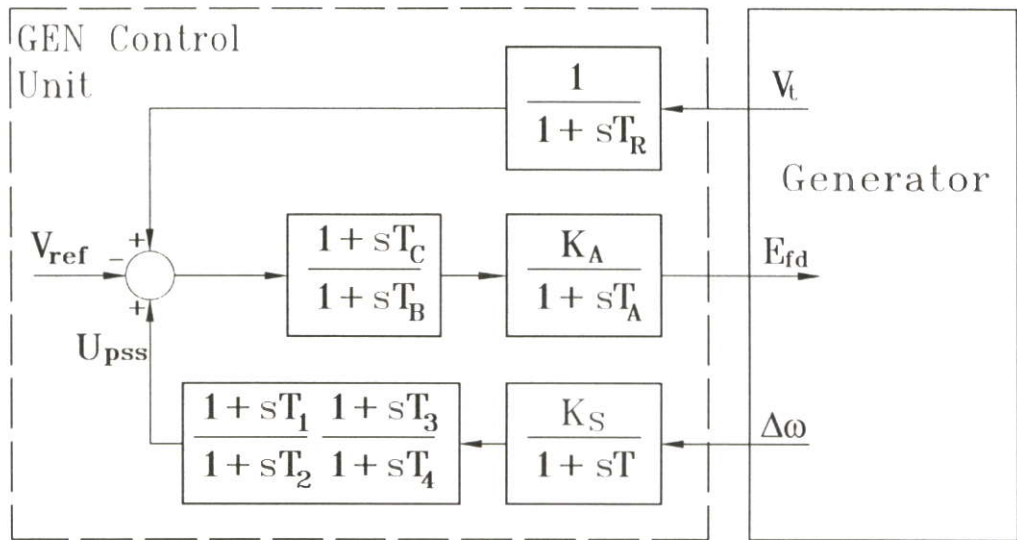
$$\frac{dPSS3}{dt} = \left[1 - \frac{T_3}{T_4}\right]Z_2 - \frac{PSS3}{T_4} \quad (3.24)$$

$$U_{PSS} = \frac{Z_2T_3}{T_4} + PSS3 \quad (3.25)$$

สำหรับค่าคงที่ต่างๆ ของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงในตารางที่3.3 และภาพรวมของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่3.7

**ตารางที่ 3.3** ค่าคงที่ของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [22,52]

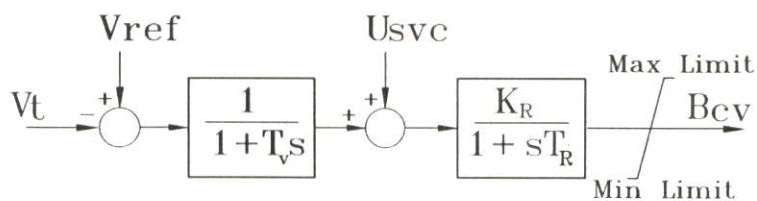
AVR :	$K_A = 200$ , $T_A = 0$ , $T_R = 0.01$ , $T_C = 0$ (No TGR) , $T_B = 0$ (No TGR)
PSS:	$T = 20$ , $K = 300$ , $T_1 = 0.06$ , $T_2 = 0.04$ , $T_3 = 0.08$ , $T_4 = 0.04$



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 3.4 แบบจำลอง SVC และตัวควบคุมฟลักซ์ของ SVC

SVC มีความสามารถในการปรับปรุงผลตอบสนองทางไดนามิกส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีของ SVC มีความรุดหน้าเป็นอย่างมาก จนสามารถออกแบบให้ SVC สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติแล้วหน้าที่หลักของ SVC คือ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ ซึ่งบล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันจะแสดงดังรูป 3.8 [30,43,48]



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมของ SVC

บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันจะมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

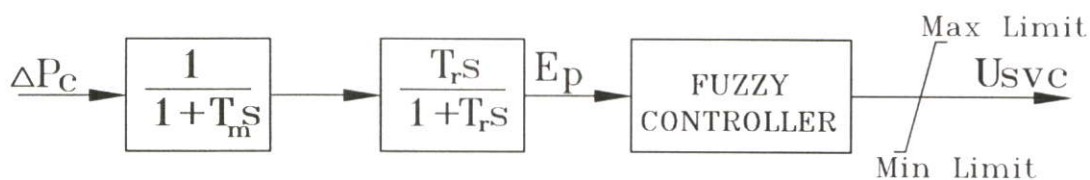
$$Err = V_{ref} - V_t \quad (3.26)$$

$$\frac{dW_1}{dt} = \frac{Err - W_1}{T_V} \quad (3.27)$$

$$W_2 = W_1 + U_{SVC} \quad (3.28)$$

$$\frac{dB_{CV}}{dt} = \frac{W_2 K_R - B_{CV}}{T_R} \quad (3.29)$$

การควบคุมในรูปแบบนี้จะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า และเสถียรภาพทรานส์เซียนของระบบไฟฟ้ากำลังให้ดีขึ้น แต่ในกรณีที่ต้องการเพิ่มการหน่วงของการแกว่งไกวในระบบไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับSVCซึ่งก็คือสัญญาณ $U_{SVC}$  ในรูปที่3.8 นั่นเอง โดยสำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างสัญญาณ $U_{SVC}$  จากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต [19] ดังที่จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 โดยบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟuzzyจะแสดงดังรูป3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟuzzy

บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีชชี จะประกอบด้วยวงจรวัด วงจรรีเซ็ต และส่วนของพีชชี โดยมีสัญญาณส่วนเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเป็นสัญญาณอินพุท สำหรับสมการที่เกี่ยวข้องจะแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dZ_1}{dt} = \frac{\Delta P_C - Z_1}{T_m} \quad (3.30)$$

$$\frac{dE_P}{dt} = \frac{\Delta P_C - Z_1}{T_m} - \frac{E_P}{T_r} \quad (3.31)$$

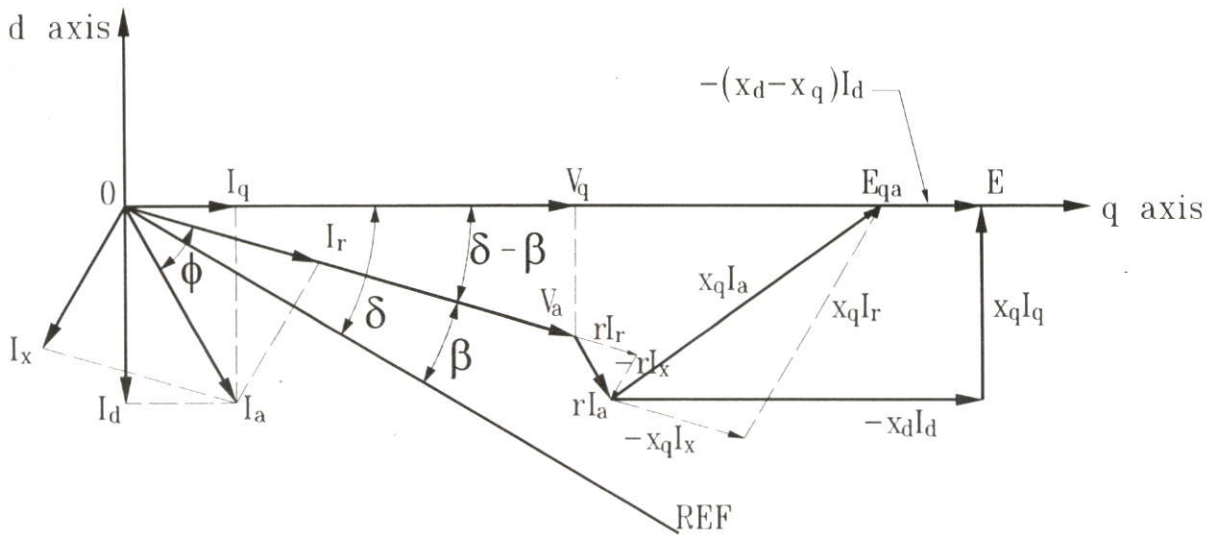
สำหรับค่าคงที่ต่างๆ ของ SVC และตัวควบคุมพีชชีจะแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่ของ SVC และ ตัวควบคุมพีชชี [52]

SVC :	$K_R = 10$ , $T_R = 0.05$ , $T_V = 0.01$
พีชชี :	$T_m = 0.01$ , $T_r = 0.5$

### 3.5 สถานะเริ่มต้นของระบบไฟฟ้า

ในการศึกษาพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของระบบนั้น จำเป็นต้องทราบสถานะของระบบในช่วงเริ่มต้นก่อนที่จะเกิดสถานะทรานส์เซียนขึ้นซึ่งก็คือสถานะของระบบก่อนเกิดการรบกวนนั่นเอง สำหรับสถานะเริ่มต้นของระบบไฟฟ้ากำลังเริ่มจากการคำนวณโหลดโพลว์ [42,47] ทำให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นคือ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $V_d$ ) กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) และเพาเวอร์แฟกเตอร์ จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากโหลดโพลว์เหล่านี้ไปพิจารณาค่าเริ่มต้นของ  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $E_d'$  และ  $E_q'$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากเฟสเซอร์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เฟสเซอร์ไวดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เฟสเซอร์ในรูปที่ 3.10 จะแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\phi = \cos^{-1} pf \quad (3.32)$$

$$I_a = (P - jQ) / V_a^* \quad (3.33)$$

$$I_r = I_a \cos \phi \quad (3.34)$$

$$I_x = I_a \sin \phi \quad (3.35)$$

$$E_{qa} \angle \delta = (V_a - x_q I_x + r I_r) + j(x_q I_r + r I_x) \quad (3.36)$$

$$\delta - \beta = \tan^{-1} [(x_q I_r + r I_x) / (V_a + r I_r - x_q I_x)] \quad (3.37)$$

$$V_d = -V_a \sin(\delta - \beta) \quad (3.38)$$

$$V_q = V_a \cos(\delta - \beta) \quad (3.39)$$

$$I_d = -I_a \sin(\delta - \beta - \phi) \quad (3.40)$$

$$I_q = I_a \cos(\delta - \beta - \phi) \quad (3.41)$$

$$E'_q = V_q - I_d x'_d \quad (3.42)$$

$$E'_d = V_d - I_q x'_d \quad (3.43)$$

เมื่อได้ค่าต่างๆ จากสมการข้างต้นแล้ว จะสามารถหาค่าเริ่มต้นอื่นๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการ รวมทั้งค่าเริ่มต้นของ AVR โดยจะต้องกำหนดให้ส่วนที่เป็นอนุพันธ์มีค่าเป็นศูนย์เสียก่อน [42] ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega = \omega_s \quad (3.44)$$

$$\Delta\omega = 0 \quad (3.45)$$

$$P_e = V_q I_q + V_d I_d \quad (3.46)$$

$$P_m = P_e + I_a^2 r_a \quad (3.47)$$

$$E_{FD} = E'_q + (x_d - x'_d) I_d \quad (3.48)$$

$$V_{aa} = E_{FD} / K_A \quad (3.49)$$

$$V_{as} = V_{aa} \quad (3.50)$$

$$V_{tr} = V_t \quad (3.51)$$

$$V_{ref} = V_t + V_{aa} \quad (3.52)$$

สำหรับค่าในสถานะเริ่มต้นของ PSS, SVC และ ตัวควบคุมฟิซซี่ ก็สามารถหาได้โดย กำหนดให้ส่วนที่เป็นอนุพันธ์มีค่าเป็นศูนย์เสียก่อน [42] ซึ่งจะพิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้ ค่าเริ่มต้นของ PSS

$$PSS1 = \omega \quad (3.53)$$

$$PSS2 = 0 \quad (3.54)$$

$$PSS3 = 0 \quad (3.55)$$

$$U_{PSS} = 0 \quad (3.56)$$

ค่าเริ่มต้นของ SVC และตัวควบคุมฟิซซี่

$$B_{cv} = Q_{GEN} / V_t^2 \quad (3.57)$$

$$W1 = 0 \quad (3.58)$$

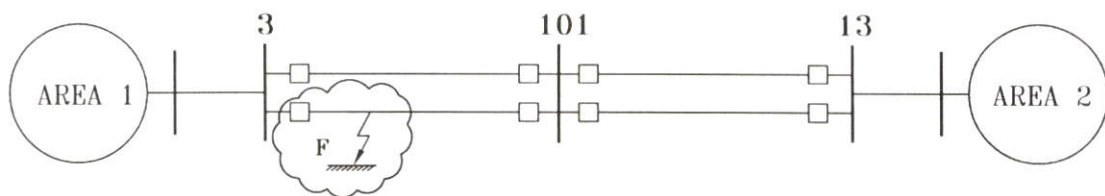
$$Z1 = 0 \quad (3.59)$$

$$E_P = 0 \quad (3.60)$$

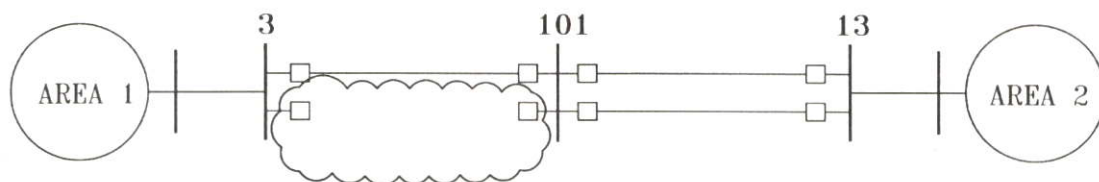
$$P_0 = \text{Power flowing in the Line} \quad (3.61)$$

### 3.6 สถานะการรบกวน

สถานะการรบกวนที่ใช้ในการทดลองสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการรบกวนแบบรุนแรง ซึ่งได้แก่ การเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงดินขึ้นที่สายส่งระยะไกล เส้นใดเส้นหนึ่ง ณ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับบัส และการลัดวงจรจะถูกกำจัด โดยการปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรออกจากระบบภายในเวลา 0.1 วินาที ซึ่งเป็นผลรวมของเวลาระหว่างการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 มิลลิวินาทีและการทำงานแบบทันทีทันใดของรีเลย์ระยะทาง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 40 มิลลิวินาที [49] โดยจะพิจารณาสถานะการรบกวน ได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11(a) เกิดการลัดวงจร ขึ้นที่สายส่ง ณ ตำแหน่งใกล้บัส 3



รูปที่ 3.11(b) ปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรซึ่งอยู่ระหว่างบัส 3 และบัส 101

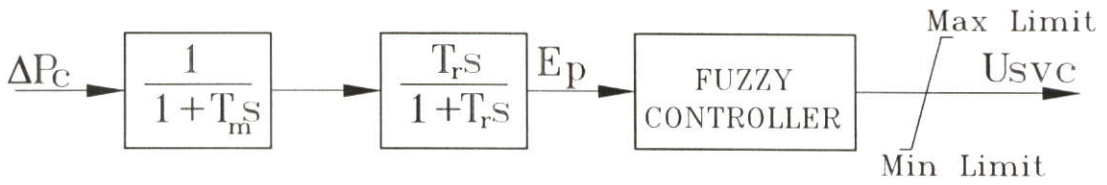
## บทที่ 4

# การออกแบบตัวควบคุมพีชซีซึ่งอาศัยข้อมูลจากเฟสเฟลน สำหรับ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์(SVC)

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึง การนำพีชซีมาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง และได้ปรับปรุงกฎ IF-THEN ของพีชซีให้อยู่ในรูปของเฟสเฟลนทำให้ตัวควบคุมมีความซับซ้อนน้อยลง สำหรับบทนี้จะได้กล่าวถึงการนำพีชซีมาใช้ในการควบคุม SVC [19,51] โดยตัวควบคุมพีชซีจะอยู่ในส่วนของลูปการหน่วง (Damping Loop) ซึ่งถูกติดตั้งเพิ่มเข้าไปโดยทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับลูปควบคุมแรงดันเดิมของ SVC ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีการหน่วงเพิ่มขึ้น การทำงานของตัวควบคุมพีชซีนี้จะอาศัยข้อมูลจากเฟสเฟลนในการคำนวณสัญญาณเอาต์พุต ทำให้วิธีนี้ไม่ต้องใช้การคำนวณที่ยุ่งยาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้กับการควบคุมแบบเรียลไทม์

### 4.1 การแปลงความหมายข้อมูลจากเฟสเฟลน

การใช้งาน SVC กับระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจัดเป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟประเภทหนึ่ง โดยตัวควบคุมพีชซีที่ติดตั้งเพิ่มให้กับลูปควบคุมแรงดันเดิมของ SVC นั้น จะทำหน้าที่ในการคำนวณหาปริมาณของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ SVC จะต้องจ่ายหรือรับจากระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะขึ้นอยู่กับสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังในขณะนั้นๆ พารามิเตอร์ที่ถูกเลือกใช้เพื่อแสดงสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า :  $\Delta P$  ซึ่งไหลในสายส่งที่เชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้ง SVC โดยจะนำสัญญาณนี้มาเป็นสัญญาณอินพุตให้กับลูปการหน่วงของ SVC สัญญาณนี้จะผ่านบล็อกของวงจรวัดและบล็อกของวงจรรีเซ็ตซึ่งจะได้สัญญาณ  $E_p$  ที่เป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีชซี และจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟัซซี่

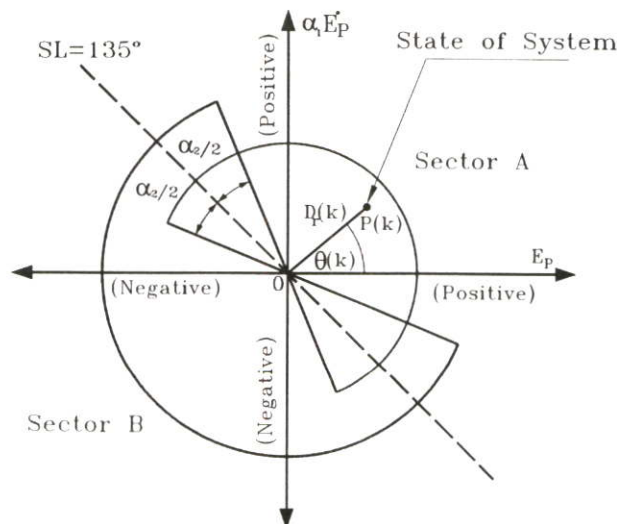
ภายในตัวควบคุมฟัซซี่ จะมีการคำนวณหา  $E_p'$  ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ  $E_p$

$$E_p'(k) = \frac{E_p(k) - E_p(k-1)}{T} \tag{4.1}$$

โดย  $k = 1, 2, 3, \dots, N$   $T$  คือ เวลาสุ่ม  $N$  คือ จำนวนข้อมูล

$E_p'$  ที่คำนวณได้จะถูกคูณกับเฟกเตอร์ปรับสเกล  $\alpha_1$  เป็น  $\alpha_1 E_p'$  โดยสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงเวลาสุ่มใดๆ จะถูกกำหนดจาก  $E_p$  และ  $\alpha_1 E_p'$  ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้จะเป็นคู่ลำดับของจุด  $p(k)$  บนเฟสเพลน ณ เวลาสุ่มใดๆ นั้นเอง

$$p(k) = [E_p(k), \alpha_1 E_p'(k)] \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.2 เฟสเพลนสำหรับ SVC

เฟสเพลนในรูปที่ 4.2 จะมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

- $E_p(k)$  = แขนงอนของเฟสเพลน คือ สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า
- $\alpha_1 E_p'(k)$  = แขนงตั้งของเฟสเพลน คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงหรือความเร่งของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า
- $O$  = จุดกำเนิดของเฟสเพลนซึ่งก็คือจุดสมมูลของระบบ
- $p(k)$  = จุดที่แสดงสถานะของระบบในช่วงเวลาใดๆ

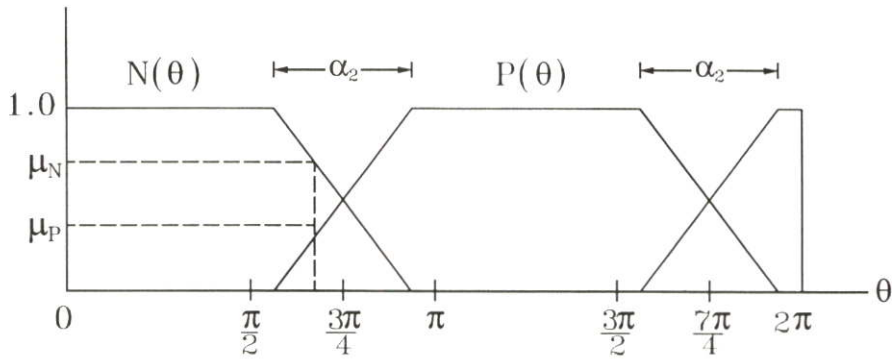
จากข้อมูลอินพุทเบื้องต้นสามารถแปลงความหมายจากเฟสเพลนได้ดังนี้

$$p(k) = Dr(k) \angle \theta(k) \quad (4.3)$$

$$Dr(k) = \sqrt{E_p^2(k) + (\alpha_1 E_p'(k))^2} \quad (4.4)$$

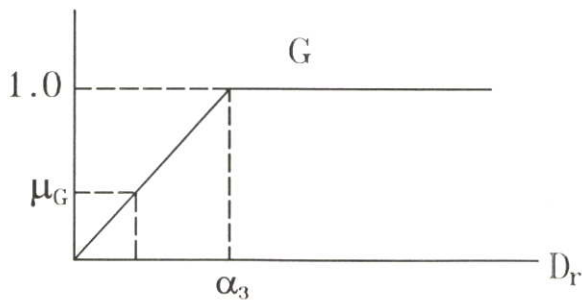
$$\theta(k) = \tan^{-1}(\alpha_1 E_p'(k) / E_p(k)) \quad (4.5)$$

จุด  $O$  เป็นจุดที่ระบบสมดุล ดังนั้นจุดประสงค์ของการควบคุมวิธีนี้ก็เพื่อ พยายามเลื่อนตำแหน่งของจุด  $p(k)$  ให้เข้าสู่จุดกำเนิด  $O$  ให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พื้นที่บนเฟสเพลนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่  $A$  และพื้นที่  $B$  โดยถ้าจุด  $p(k)$  อยู่ในบริเวณของพื้นที่  $A$  แล้ว SVC จะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ(แสดงพฤติกรรมเป็นโหลดคาปาซิทีฟ) แต่ถ้าจุด  $p(k)$  อยู่ในบริเวณพื้นที่  $B$  แล้ว SVC จะรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ(แสดงพฤติกรรมเป็นโหลดอินดักทีฟ) สำหรับบริเวณที่มีการซ้อนทับกันของพื้นที่ทั้ง 2 ซึ่งอยู่ในบริเวณของจตุภาคที่ 2 และ 4 และถูกกำหนดด้วย  $\alpha_2$  นั้นจะเรียกว่าบริเวณของพีชชี โดยมี SL เป็นสวิทช์ไลน์ซึ่งทำมุม  $45^\circ$  ทวนเข็มนาฬิกากับแกนตั้ง จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์  $\theta(k)$  จะเป็นตัวที่กำหนดว่าจุด  $p(k)$  จะอยู่ในส่วนของพื้นที่ใด โดยจะเขียนฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม  $\theta(k)$  ได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม  $\theta$

$\mu_N(\theta)$  และ  $\mu_P(\theta)$  คือฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\theta$  ถ้ามุม  $\theta$  อยู่ในบริเวณ N หมายความว่า SVC ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบเพื่อให้เกิดการควบคุมแบบหน่วง แต่ถ้ามุม  $\theta$  อยู่ในบริเวณ P หมายความว่า SVC จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบเพื่อให้เกิดการควบคุมแบบเร่ง สำหรับปริมาณของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จะจ่ายหรือรับจากระบบนั้นจะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์  $D_r$  ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวน กล่าวคือ ถ้า  $D_r$  อยู่ห่างจากจุด 0 มาก การรบกวนก็จะรุนแรง ดังนั้นการเลื่อนจุด  $p(k)$  กลับมายังจุด 0 นั้น ก็ต้องใช้สัญญาณควบคุมเสริมที่มีความแรงมากขึ้นด้วย โดยจะมีค่าได้มากเท่าใดจะขึ้นอยู่กับขนาดของ SVC ความแรงของสัญญาณควบคุมเสริมนี้จะถูกกำหนดโดยค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $D_r$  ซึ่งก็คือ  $\mu_G$  ในรูปที่ 4.4 โดยมี  $\alpha_3$  เป็นแฟกเตอร์ปรับสเกล



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของระยะ  $D_r$

ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดจะสามารถเขียนกฎการควบคุมของฟิชซีได้ดังนี้

กฎข้อ1 ถ้า  $\theta(k)$  คือ N แล้ว SVC จะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

กฎข้อ2 ถ้า  $\theta(k)$  คือ P แล้ว SVC จะรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

กฎข้อ3 ถ้า  $Dr(k)$  มีค่ามาก แล้ว แล้วปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะมีค่ามาก

## 4.2 การคำนวณสัญญาณควบคุม

สัญญาณควบคุมเสริมซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมฟิชซีนั้นจะถูกกำหนดโดย

1). ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม  $\theta$  คือ  $\mu_N(\theta)$  และ  $\mu_P(\theta)$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือตำแหน่งของจุด  $p(k)$  บนเฟสเพลนซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่าสัญญาณควบคุมเสริมที่สร้างขึ้นจะควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ SVC

2). ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $Dr(k)$  คือ  $\mu_G(Dr)$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือระยะทางระหว่างจุด  $p(k)$  และจุด  $O$  ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกความแรงของสัญญาณที่จะถูกสร้างขึ้นว่า การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะมีปริมาณมากน้อยเพียงใด

จากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่กล่าวมาจะสามารถหาสัญญาณควบคุมเสริม  $U_{SVC}$  ได้โดยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง

$$U_{SVC}(k) = \frac{[\mu_N(k) - \mu_P(k)]\mu_G(k)U_{max}}{\mu_N(k) + \mu_P(k)} \quad (4.6)$$

โดย  $U_{max}$  คือ ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด

และจากความสัมพันธ์

$$\mu_P(k) = 1 - \mu_N(k) \quad (4.7)$$

จะได้

$$U_{SVC}(k) = [2\mu_N(k) - 1]\mu_G(k)U_{max} \quad (4.8)$$

โดย

$$\mu_G(k) = Dr / \alpha_3 \text{ when } Dr \leq \alpha_3 \quad (4.9)$$

$$\mu_G(k) = 1 \text{ when } Dr > \alpha_3 \quad (4.10)$$

$\mu_G(k)$  จะเปรียบเสมือนแกนเฟกเตอร์ทำให้ได้การควบคุมที่สามารถปรับค่าเกินได้ โดยจะขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของการรบกวน ซึ่งก็คือ ระยะ  $Dr(k)$  นั่นเอง

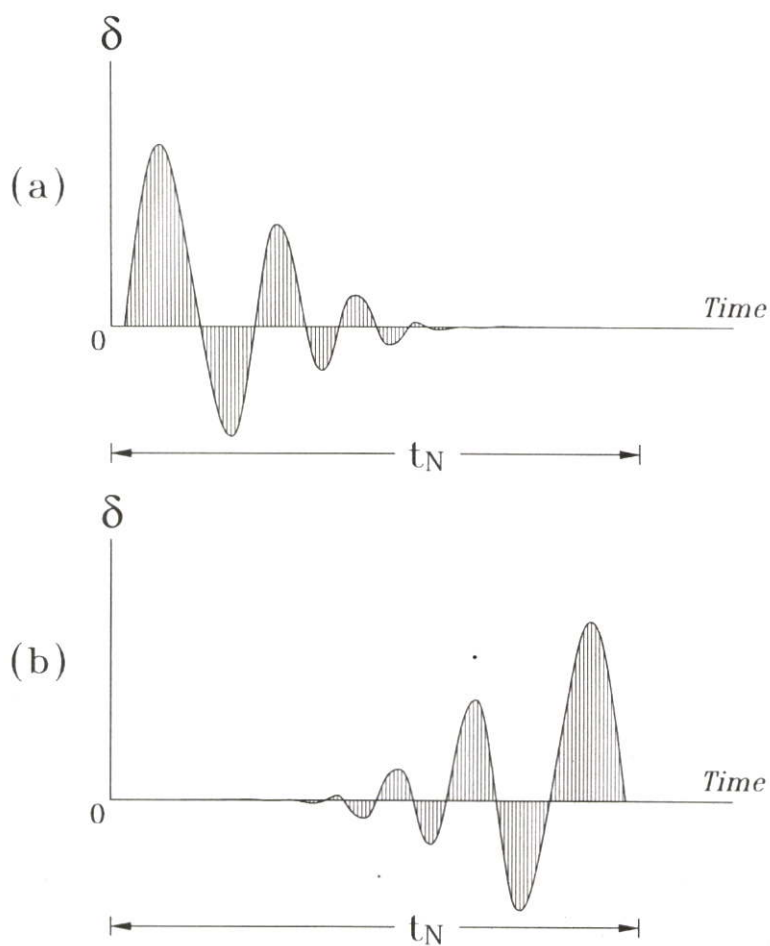
### 4.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมพีชชี

จากที่กล่าวมาพบว่าตัวควบคุมพีชชีจะมีพารามิเตอร์ปรับค่าได้อยู่ 3 ตัว คือ  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  และ  $\alpha_3$  โดยแต่ละตัวจะมีบทบาทคือ  $\alpha_1$  จะเป็นสเกลเฟกเตอร์ที่กำหนดขนาดของความเร่งของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า  $\alpha_2$  จะเป็นสเกลเฟกเตอร์ที่กำหนดขนาดของพื้นที่ของพีชชี กล่าวคือเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\theta$  ส่วน  $\alpha_3$  จะเป็นสเกลเฟกเตอร์ที่กำหนดความรุนแรงของสัญญาณรบกวน กล่าวคือเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $Dr$  ซึ่งการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาจาก สมการดัชนีการทำงาน (Performance Index : J)

$$J = \sum_{k=1}^N (|\delta(k)| t_k) \quad (4.11)$$

โดย J จะถูกคำนวณจากผลตอบสนองของระบบเมื่อเกิดการรบกวนคือ การลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ซึ่งถือว่าการรบกวนแบบรุนแรง

ดัชนีการทำงาน J จะเป็นค่าที่ใช้เป็นตัวตัดสินผลตอบสนองที่ดีที่สุด โดยผลตอบสนองที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ทั้ง 3 ทำให้ได้ J ที่มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเสถียรภาพจากผลตอบสนองของมอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส :  $\delta$  คูณกับเวลาในขณะนั้นๆ ซึ่งเป็นการให้น้ำหนักของเวลาไม่เท่ากัน โดยจะเป็นการให้น้ำหนักในช่วงแรกต่ำกว่าช่วงหลัง (ค่าของเวลา  $t_k$  ที่นำมาคูณกับ  $\delta(k)$  ในช่วงแรกจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงหลัง) เพื่อเลือกผลตอบสนองที่มีการแกว่งไกวในช่วงแรกและกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในตอนท้าย

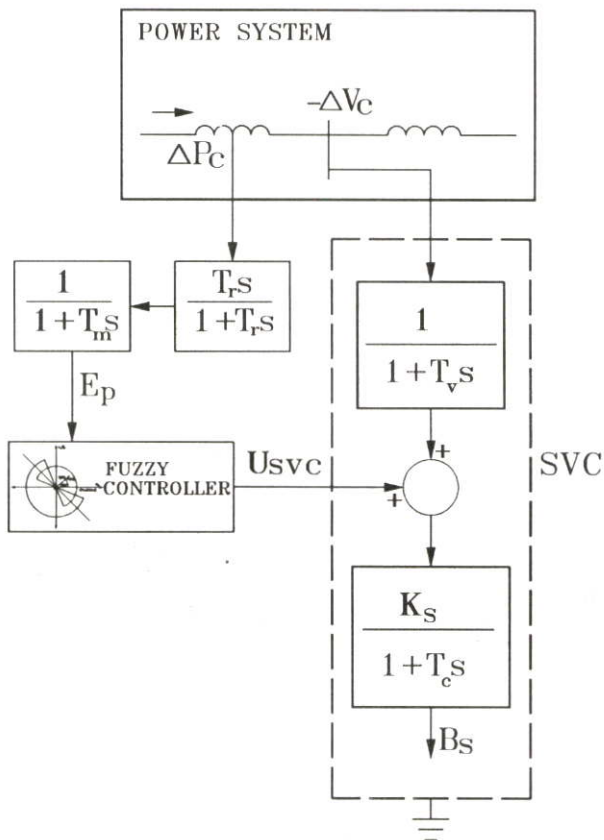


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลตอบสนอง 2 กรณีที่มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองที่มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน แต่ด้วยการคิดแบบถ่วงน้ำหนักทำให้รูปที่ 4.5(a) มีดัชนีการทำงานต่ำกว่ารูปที่ 4.5(b) แสดงให้เห็นว่าสมการดัชนีการทำงานสามารถเลือก พารามิเตอร์ ที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดได้

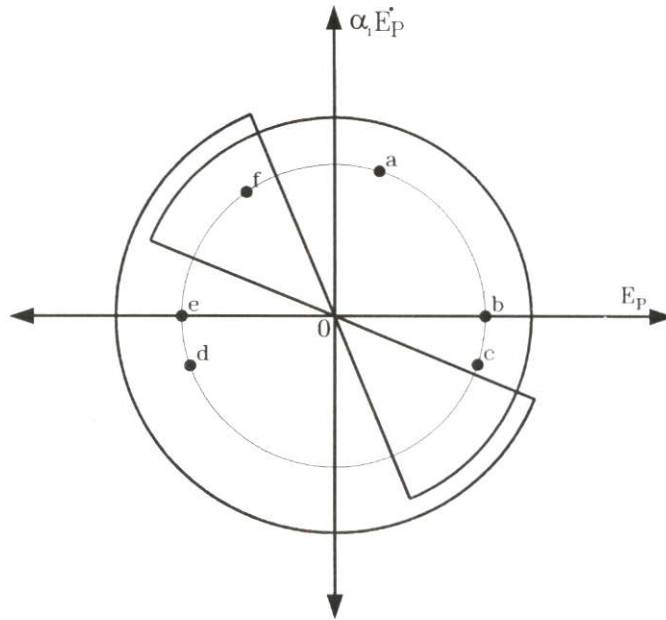
#### 4.4 การปรับการควบคุม SVC โดยใช้ข้อมูลจากเฟสเฟลน

รูปที่ 4.6 แสดงส่วนของรูปควบคุมแรงดันของ SVC และรูปการหน่วงที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC โดยสัญญาณอินพุทของ SVC คือแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง SVC ส่วนอินพุทของตัวควบคุมฟัซซี่ คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งซึ่งเชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้ง SVC



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการเชื่อมต่อ SVC และตัวควบคุมฟัซซี่เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

กระบวนการปรับการควบคุมจะขึ้นอยู่กับสถานะของระบบซึ่งถูกแทนด้วยจุด  $p(k)$  บนเฟสเพลน ซึ่งตัวอย่างของแต่ละตำแหน่งบนเฟสเพลนต่อไปนี้จะแสดงผลต่อการปรับ SVC ดังนี้



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการปรับการควบคุมของ SVC

ตารางที่ 4.1 การปรับการควบคุมและผลจากการปรับ SVC

ตำแหน่ง	เงื่อนไข	การปรับ SVC	ผล
จุด a	$\Delta P > 0, \Delta P' > 0$	จ่าย Q มาก	$\omega$ ถูกหน่วงมาก
จุด b	$\Delta P > 0, \Delta P' = 0$	จ่าย Q เล็กน้อย	$\omega$ ถูกหน่วงเล็กน้อย
จุด c	$\Delta P > 0, \Delta P' < 0$	จ่าย Q เล็กน้อย	$\omega$ ถูกหน่วงเล็กน้อย
จุด d	$\Delta P < 0, \Delta P' < 0$	รับ Q มาก	$\omega$ ถูกเร่งมาก
จุด e	$\Delta P < 0, \Delta P' = 0$	รับ Q เล็กน้อย	$\omega$ ถูกเร่งเล็กน้อย
จุด f	$\Delta P < 0, \Delta P' > 0$	รับ Q เล็กน้อย	$\omega$ ถูกเร่งเล็กน้อย

#### 4.5 ข้อสรุปเกี่ยวกับฟuzzyเซตชนิดเฟสเพลนและตัวอย่างการคำนวณ

วิธีฟuzzyเซตชนิดเฟสเพลนที่นำมาประยุกต์ใช้กับ SVC ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากฟuzzyเซตชนิดเฟสเพลนซึ่งใช้กับ PSS โดยมีวิธีการดังนี้

- 1). จุด  $p(k)$  ใดๆบนเฟสเพลนในรูปที่ 4.2 จะถูกกำหนดโดยคู่ลำดับ  $x, y$  ดังสมการที่ 4.2 โดย  $\alpha_1$  คือ แฟกเตอร์ปรับสเกล
- 2). จุด  $p(k)$  บนเฟสเพลนจะถูกแปรความหมายเป็นขนาด  $Dr(k)$  และ มุม  $\theta(k)$  ดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ
- 3). พื้นที่ส่วน A และ B บนเฟสเพลน จะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\theta(k)$  ดังรูปที่ 4.3 โดย  $N(\theta(k))$  สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และ  $P(\theta(k))$  สำหรับการรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดย  $\alpha_2$  คือแฟกเตอร์ปรับสเกล
- 4). ระยะทางจากจุด  $p(k)$  ถึงจุดกำเนิดของเฟสเพลน จะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $Dr(k)$  ดังรูปที่ 4.4 โดย  $\alpha_3$  คือแฟกเตอร์ปรับสเกล
- 5). เขียนกฎควบคุมฟuzzyได้ดังนี้

*Rule1 : IF ( $\theta(k)$  คือ N) Then  $U_{SVC}(k) = U_c(k)$*

*Rule2 : IF ( $\theta(k)$  คือ P) Then  $U_{SVC}(k) = U_L(k)$*

*Rule3 : IF ( $Dr(k)$  คือ Large) Then  $U_c(k) = U_{max}$*

โดยที่  $U_{SVC}(k)$  = สัญญาณควบคุม SVC  
 $U_c(k)$  = สัญญาณควบคุมเพื่อปรับให้ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  
 $U_L(k)$  = สัญญาณควบคุมเพื่อปรับให้ SVC รับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  
 $U_{max}$  = สัญญาณควบคุมสูงสุด

- 6). ใช้การเฉลี่ยน้ำหนักหาค่าสัญญาณ  $U_{SVC}$  ได้ดังนี้

$$U_{SVC}(k) = \frac{[\mu_N(k)U_C + \mu_P(k)U_L]}{\mu_N(k) + \mu_P(k)} \quad (4.12)$$

โดยที่  $\mu_N$  = ระดับความเป็นสมาชิกของ N  
 $\mu_P$  = ระดับความเป็นสมาชิกของ P

ถ้า  $U_C = -U_L$  จะได้

$$U_{SVC}(k) = \frac{[\mu_N - \mu_P]U_C(k)}{\mu_N + \mu_P} \quad (4.13)$$

จากกฎฟิซซึ่ข้อ 3 จะได้

$$\mu_C(k) = 1 - \mu_G U_{\max} \quad (4.14)$$

แทนค่าสมการที่ 4.14 ลงในสมการที่ 4.13 จะได้

$$U_{SVC}(k) = \frac{[\mu_N - \mu_P]\mu_G U_{\max}}{\mu_N + \mu_P} \quad (4.15)$$

และเนื่องจาก  $\mu_N + \mu_P = 1$  ดังนั้น

$$U_{SVC}(k) = [2\mu_N(k) - 1]\mu_G(k)U_{\max} \quad (4.16)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 4.16 จะ ตรงกับสมการที่ 4.8 และจะใช้สัญญาณ  $U_{SVC}$  ที่ได้นี้ เป็นสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC

จากขั้นตอนข้างต้นจะขอยกตัวอย่างการคำนวณของฟิซซึ่ชนิดเฟสเพลนดังต่อไปนี้

- 1). สมมติให้ สัญญาณอินพุต  $E_p(k)$  ของตัวควบคุมฟิซซึ่ = 0.2 pu. ,  $E_p(k-1) = 0.1$  pu. ,  $\alpha_1 = 0.012$  ,  $\alpha_2 = 90^\circ$  ,  $\alpha_3 = 0.24$  ,  $T = 0.01$ s และ  $U_{\max} = 0.2$  pu.
- 2). คำนวณหาค่า  $E_p'(k)$  จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$E_p'(k) = (0.2 - 0.1)/0.01 = 10 \text{ pu/s}$$

- 3). จากสมการที่ 4.2 สามารถหาคู่ลำดับ x,y ได้คือ [ (0.2) , (0.012 x 0.1) ] และสามารถหา Dr และ  $\theta$  ได้จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 ดังนี้

$$Dr(k) = \sqrt{(0.2)^2 + (0.012 \times 10)^2} = 0.233 \text{ pu.}$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}(0.012 \times 10)/(0.2) = 30.963^\circ$$

- 4). นำ  $\theta(k)$  และ  $D_r(k)$  ไปหาค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งจะได้  $\mu_N(k) = 1.0$  และ  $\mu_G(k) = 0.233/0.24 = 0.971$
- 5). คำนวณหา  $U_{SVC}(k)$  จากสมการที่ 4.8 จะได้

$$U_{SVC}(k) = [2 \times 1.0 - 1] \times 0.971 \times 0.2 = 0.1942 \text{ pu.}$$

## บทที่ 5

### การออกแบบโปรแกรม

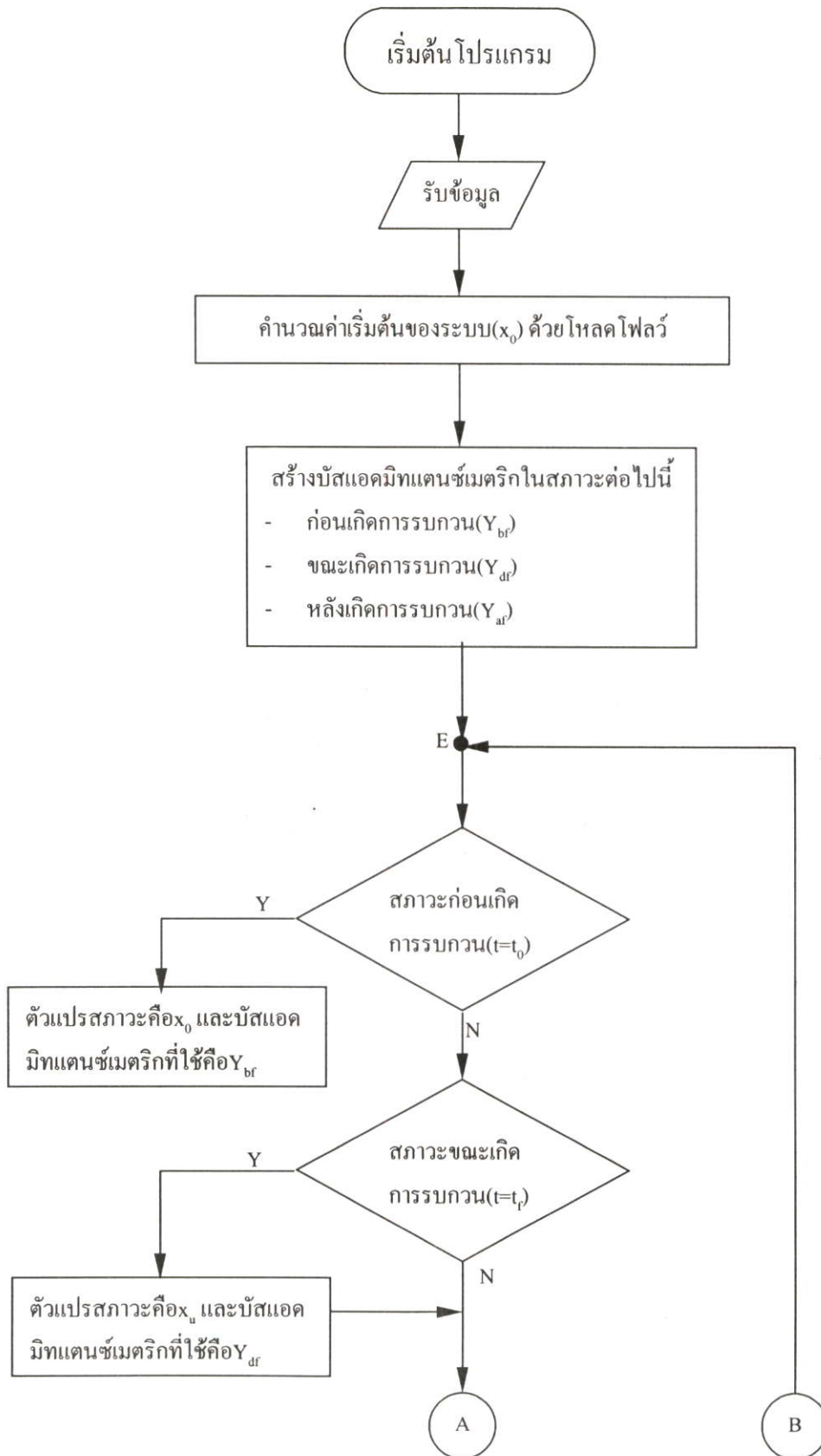
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ โดยโปรแกรมจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆคือ ระบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งส่วนนี้จะเป็นโปรแกรมหลัก , ส่วนของPSS และส่วนของSVC นอกจากนี้จะได้กล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการหาดัชนีการทำงานเพื่อนำไปกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีชชีด้วย

#### 5.1 การออกแบบโปรแกรมสำหรับจำลองระบบ

ส่วนนี้จะเป็โปรแกรมหลักซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองทรานเซียนส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และ AVR โดยจะทำงานในลักษณะของการวนรอบแก้สมการอนุพันธ์ไปเรื่อยๆจนกว่าจะครบเวลาตามที่กำหนด โดยเอาที่พู่ทที่ได้คือ ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ โดยมีขั้นตอนการทำงานคือ

1. ป้อนข้อมูลเริ่มต้นให้กับโปรแกรม ซึ่งได้แก่ข้อมูลของบัส , ข้อมูลของสายส่ง , ข้อมูลทรานเซียนส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ; เวลาที่เกิดการรบกวน(tf) , เวลาที่มีการกำจัดสิ่งรบกวน(tc) , ช่วงเวลาในการสุ่ม( $\Delta t$ ) และช่วงเวลาทั้งหมดในการจำลอง เป็นต้น
2. ทำการหาสภาวะเริ่มต้นของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีในหัวข้อ3.5
3. หาบัสมิตแดนซ์เมตริกของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะต่างๆคือ ก่อนเกิดการรบกวน ,ขณะเกิดการรบกวน และหลังจากเกิดการรบกวน
4. แก้สมการอนุพันธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีการเชิงตัวเลข และบันทึกค่าที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาสุ่มเอาไว้
5. แสดงผล

จากขั้นตอนที่กล่าวมาสามารถนำมาเขียนโพลีชาร์ตของโปรแกรมจำลองระบบได้ดังนี้

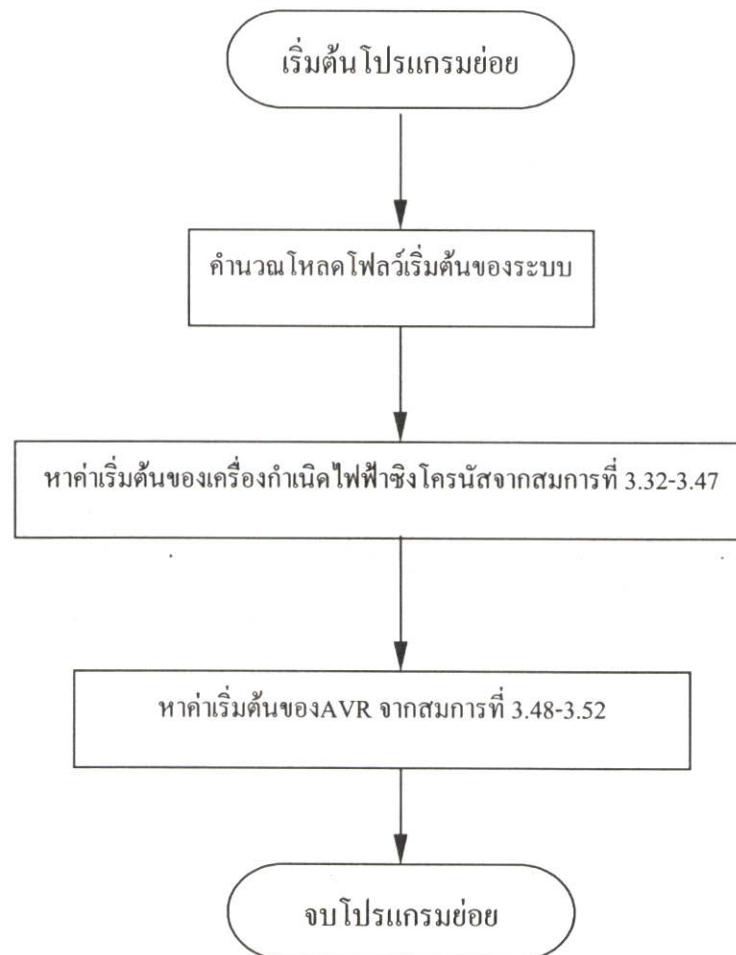


รูปที่ 5.1 โพลว์ชาร์ตของโปรแกรมระบบจำลอง



### 5.1.1 การหาค่าเริ่มต้นของระบบ

โปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นการเตรียมข้อมูลเริ่มต้นที่จะใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ โดยจะเริ่มจากการนำข้อมูลของบัส และ สายส่ง มาคำนวณหาโหลดโพล์ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าของแรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆภายใต้สภาวะการทำงานปกติ ซึ่งถือว่าเป็นจุดสมดุลย์ของระบบจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาใช้ร่วมกับข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ AVR เพื่อหาค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์เหล่านี้ต่อไป



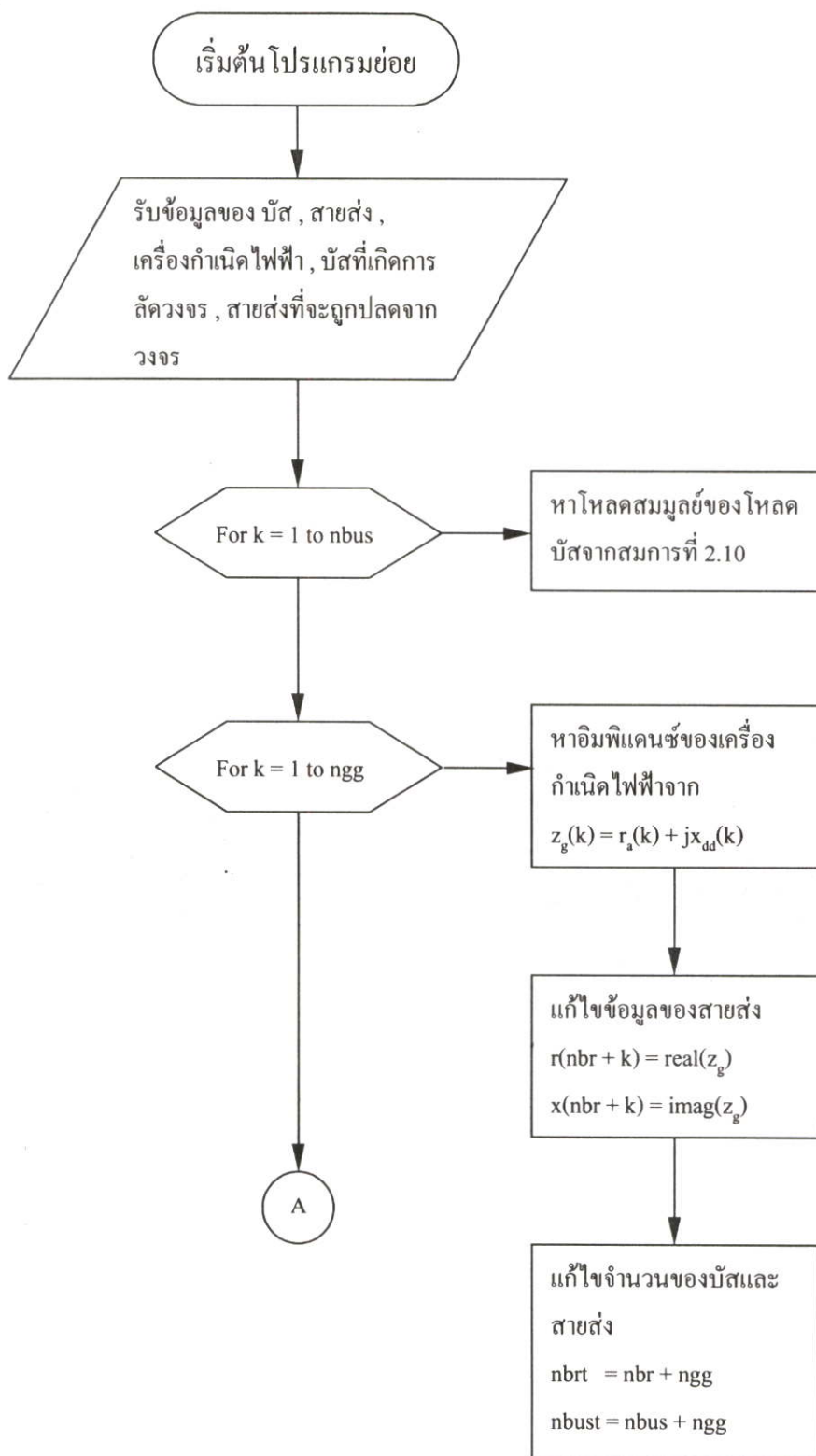
รูปที่ 5.2 โพล์ซาร์ตการหาค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและAVR

### 5.1.2 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกในสถานะต่างๆ

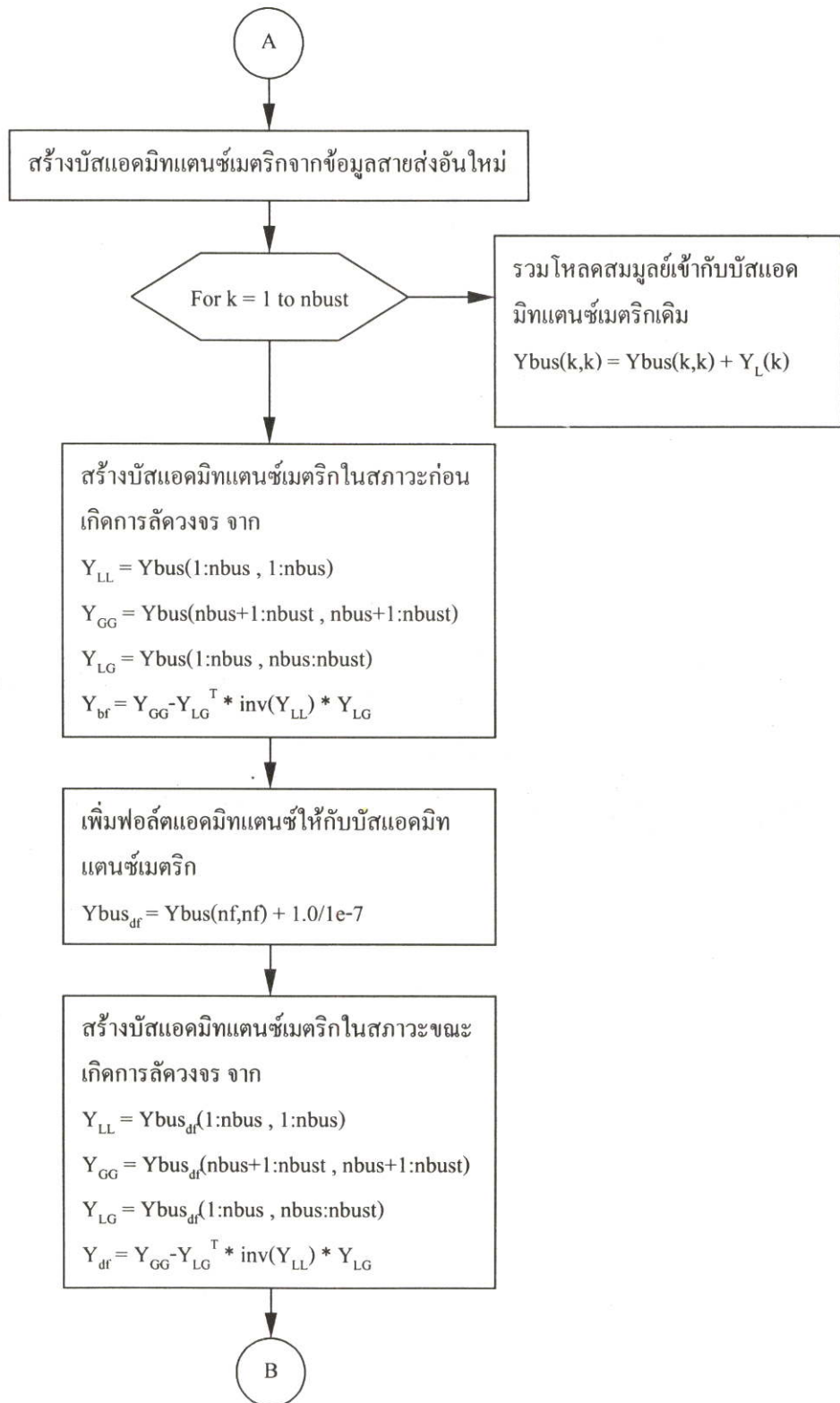
โปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริก ซึ่งจะถูกลดรูปให้เหลือเฉพาะบัสที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น เพื่อที่จะนำไปใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ในส่วนของสมการสวิง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าโหลดสมมูลย์ของโหลดบัส
2. รวมบัสและแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกเดิมของระบบ
3. รวมค่าโหลดสมมูลย์เข้ากับบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกในข้อ2
4. จำลองฟลัดต์แอดมิตแตนซ์เข้าไปในระบบในกรณีที่เกิดการลัดวงจร
5. หาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกสำหรับระบบในแต่ละช่วงเวลา

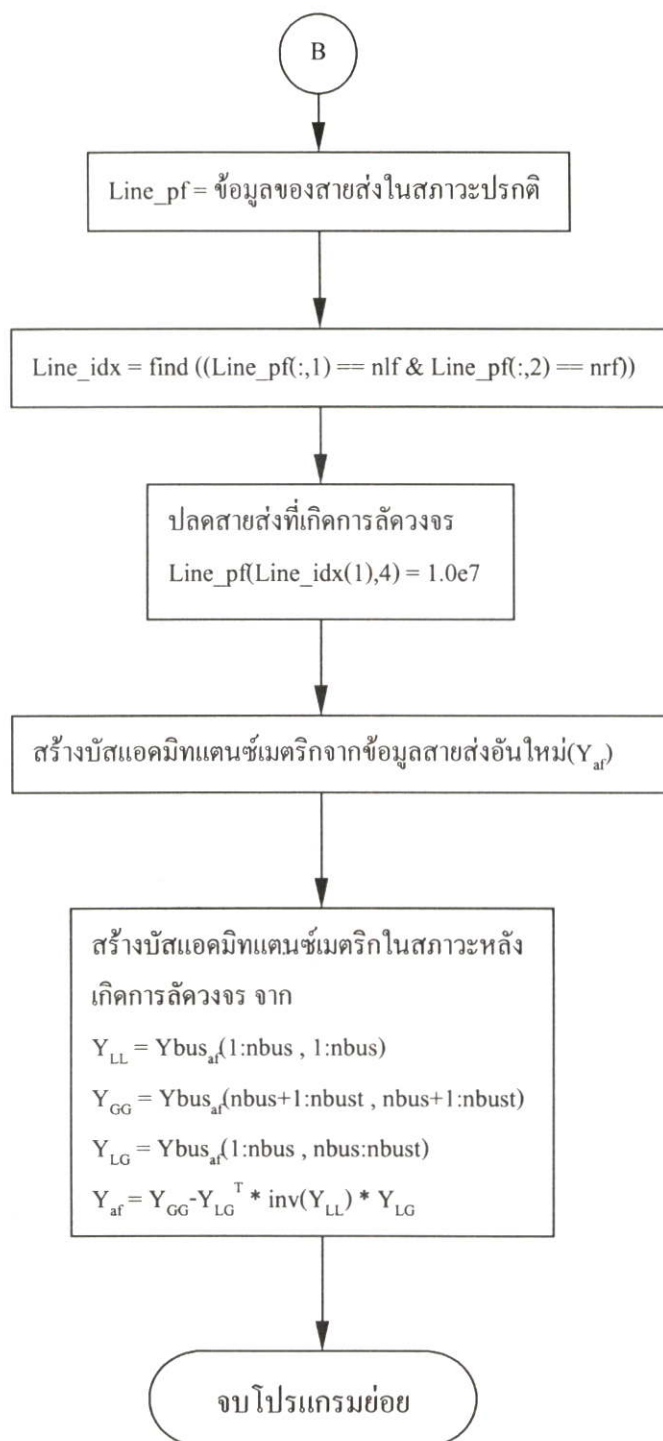
จากขั้นตอนที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นโฟลว์ชาร์ตได้ดังนี้



รูปที่ 5.3 โพลีชาร์ตการสร้างบัสแอดมิทแตนซ์เมตริก



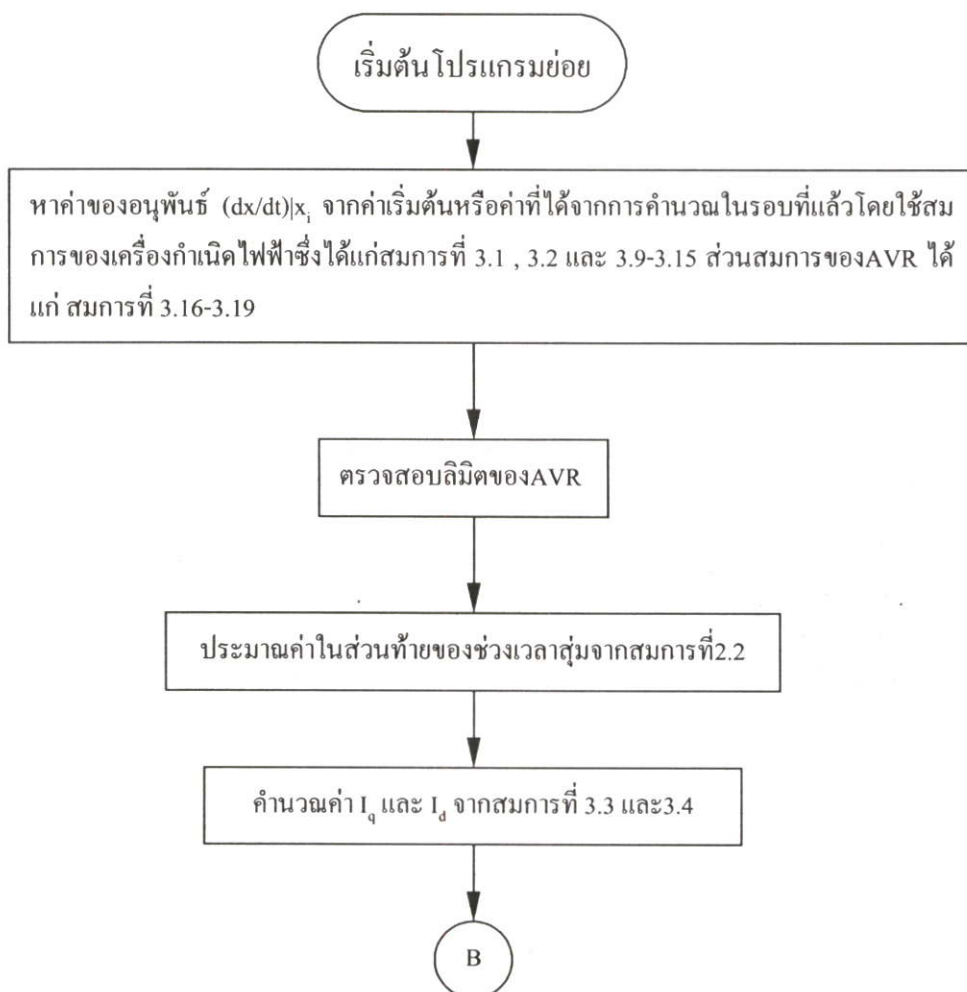
รูปที่ 5.3 (ต่อ)



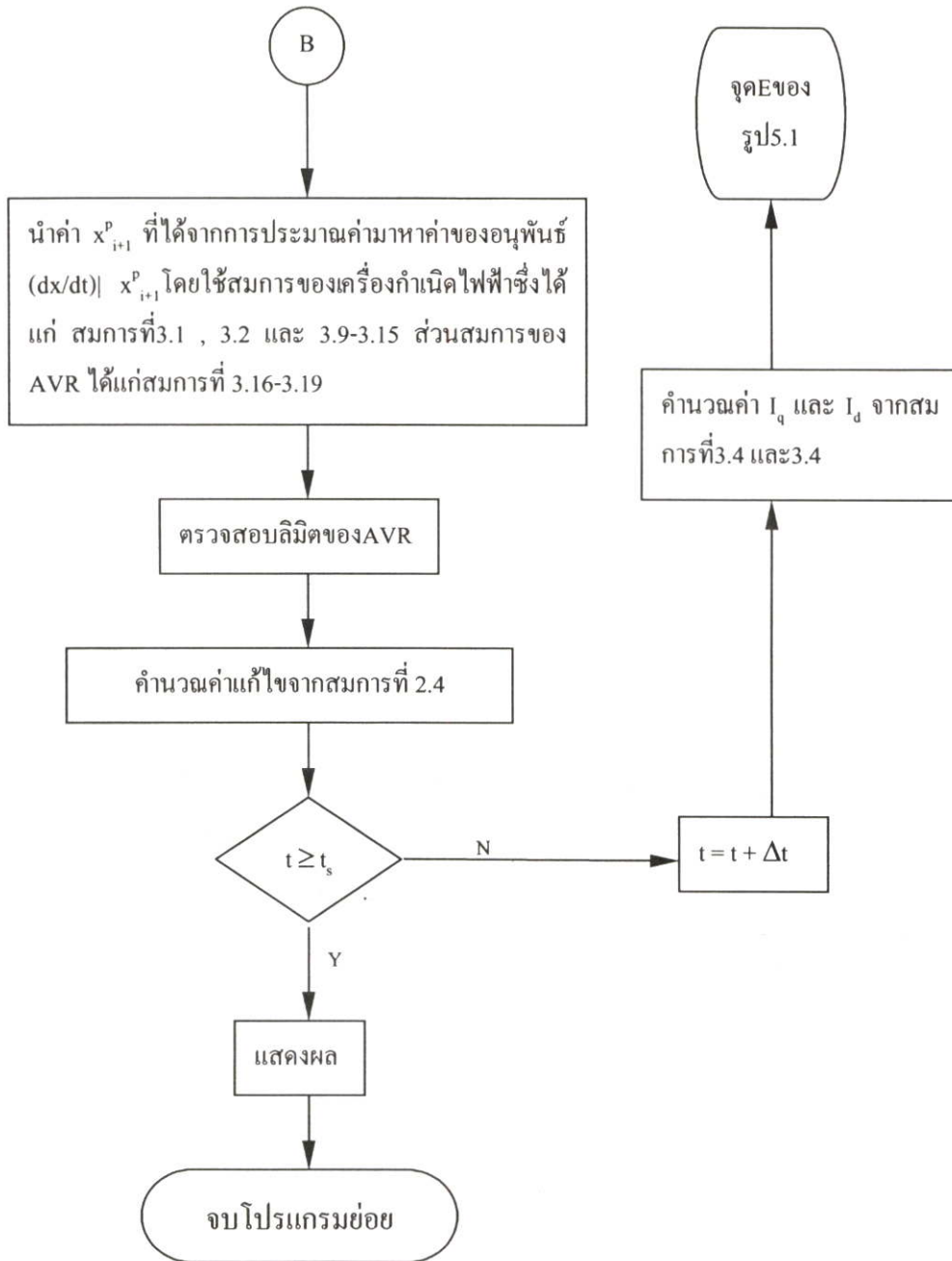
รูปที่ 5.3 (ต่อ)

### 5.1.3 การแก้สมการอนุพันธ์

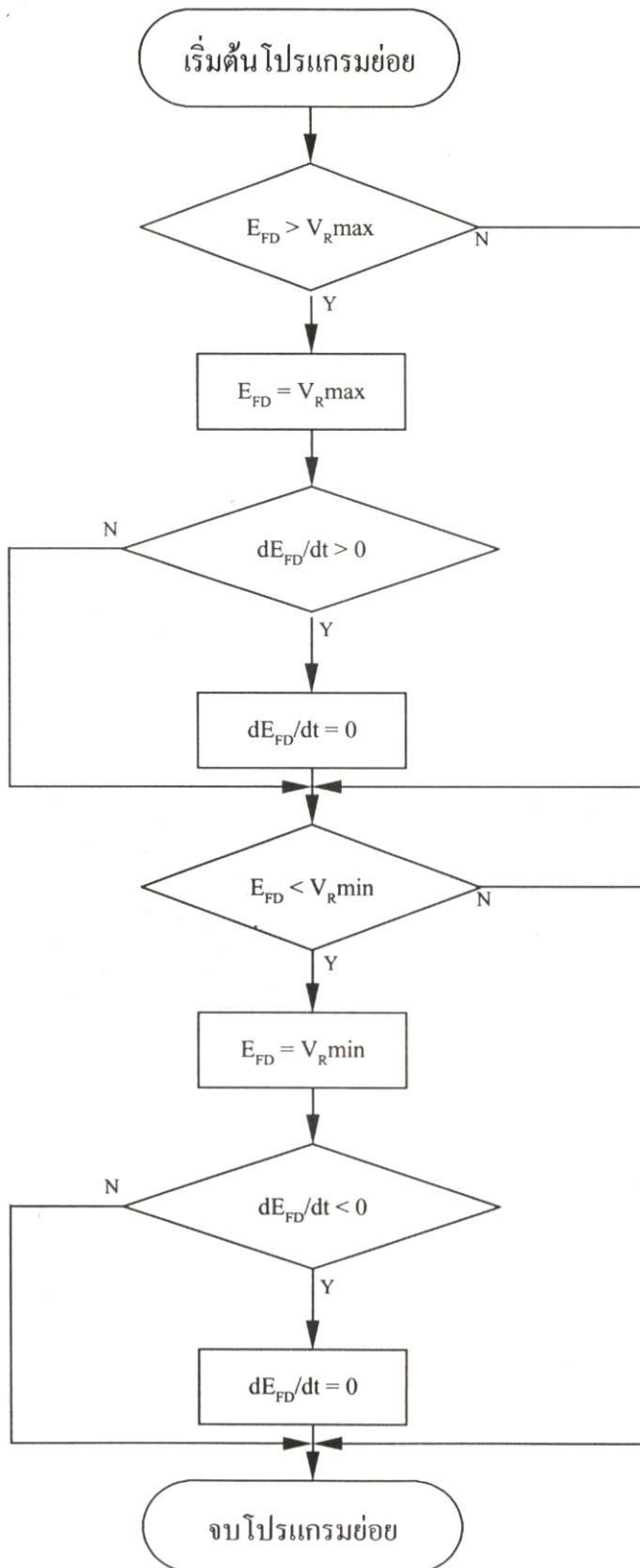
โปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นการใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการแก้สมการอนุพันธ์ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของตัวแปรสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ AVR ในช่วงเวลาต่างๆเพื่อที่จะนำไปแสดงผลในรูปแบบของกราฟต่อไป วิธีการเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ได้แก่ วิธีของออยเลอร์แบบแก้ไข(Modified Euler's) และมีโฟลว์ชาร์ตดังนี้



รูปที่ 5.4 โฟลว์ชาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์



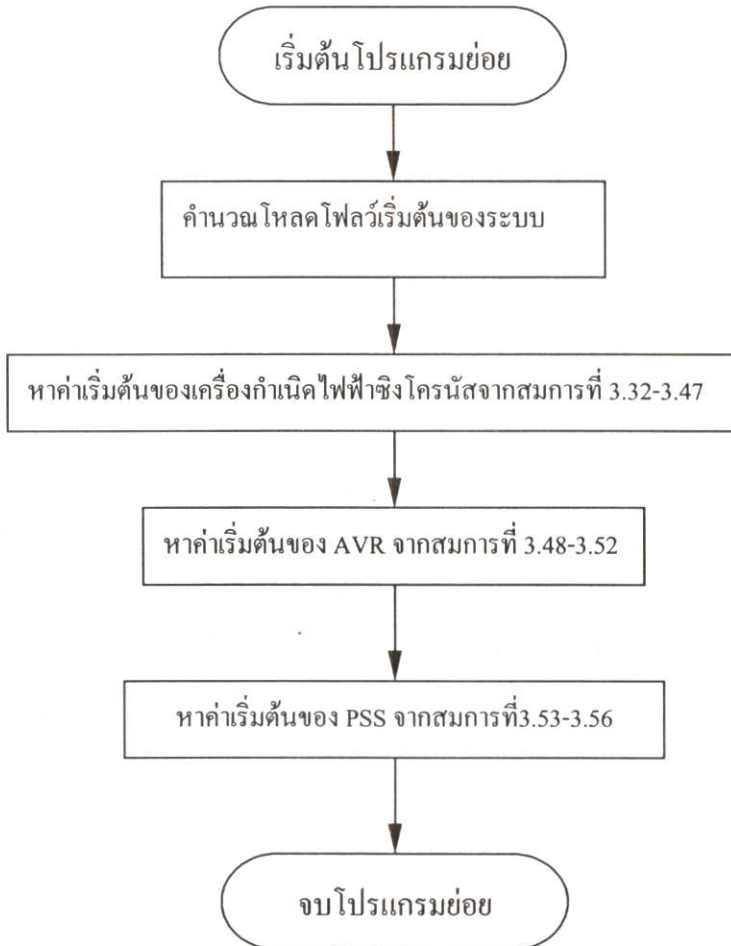
รูปที่ 5.4 (ต่อ)



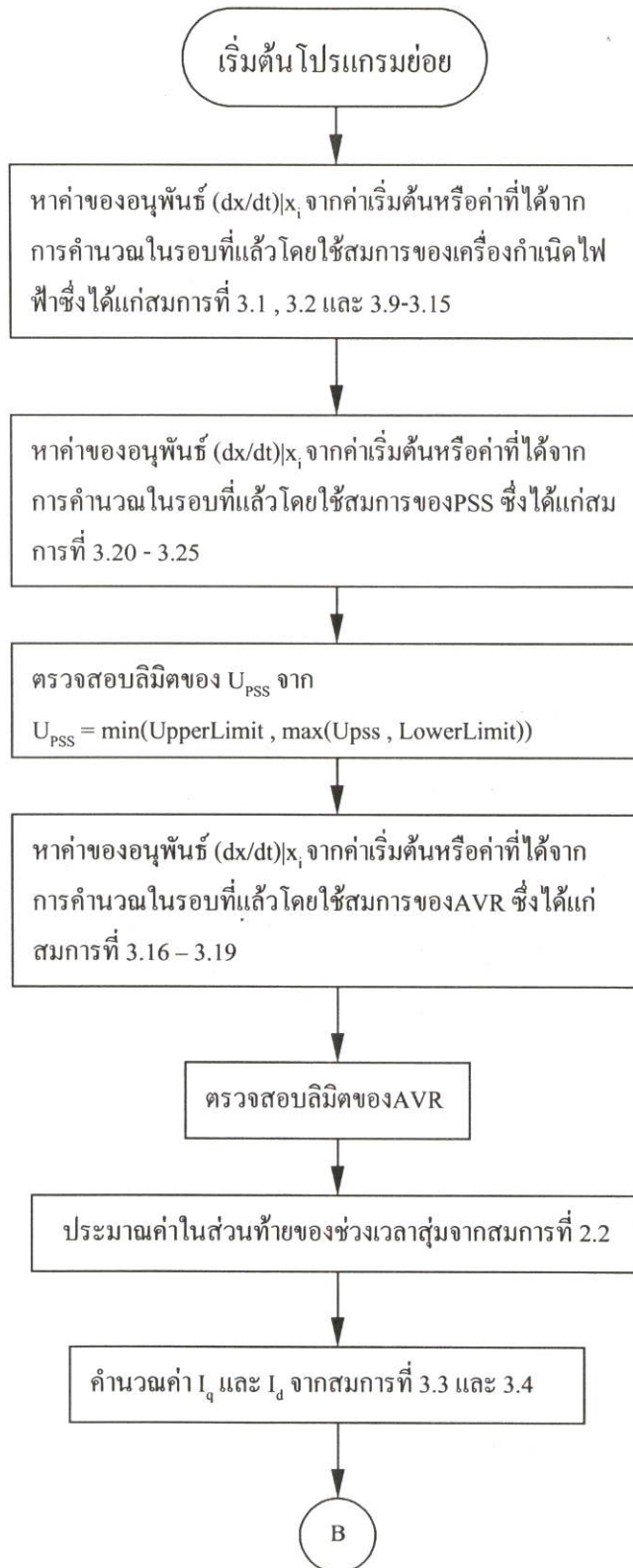
รูปที่ 5.5 โพลัวซาร์ตการตรวจสอบลิมิตของAVR

## 5.2 โปรแกรมจำลองระบบกรณีควบคุมด้วยPSS

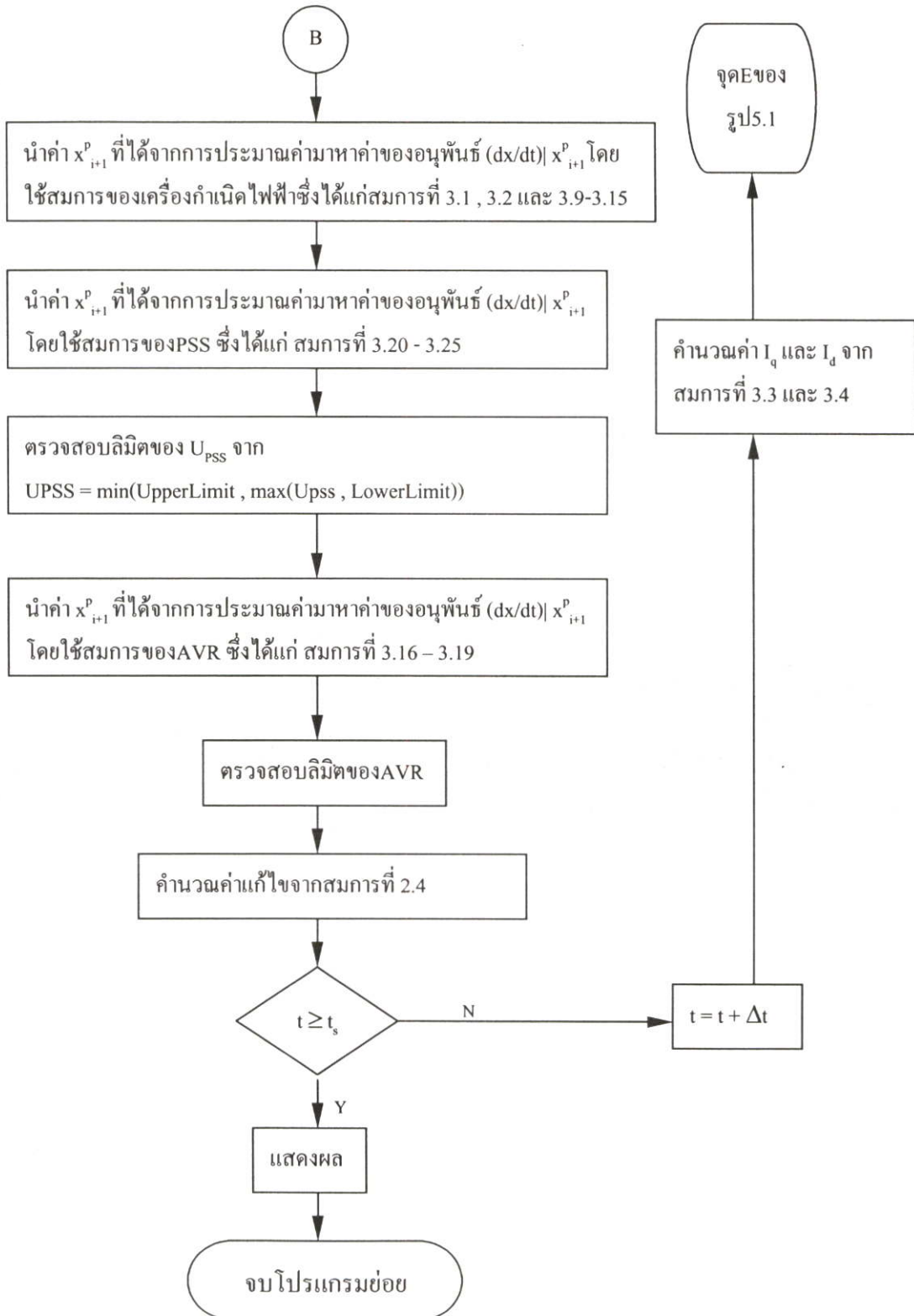
PSSจะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณเสถียรภาพให้กับAVR สำหรับระบบที่ควบคุมด้วย PSS นั้น จะมีโพล์ซาร์ตบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปจากระบบเดิมดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.6 โพล์ซาร์ตการกำหนดค่าเริ่มต้นกรณีควบคุมด้วยPSS



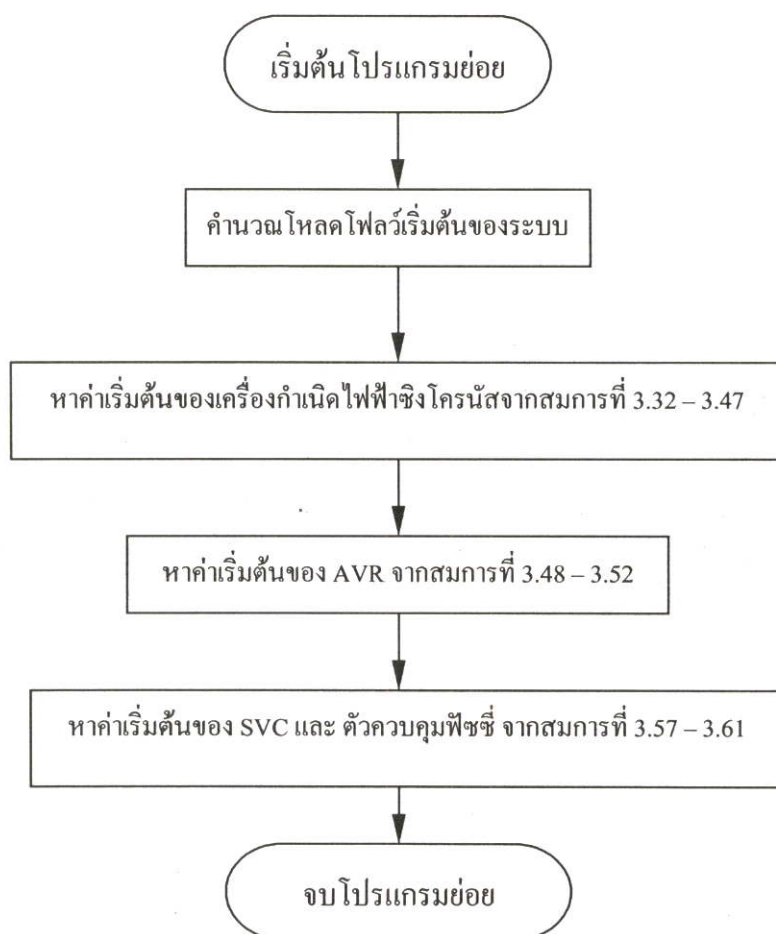
รูปที่ 5.7 โฟลว์ชาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์กรณีควบคุมด้วยPSS



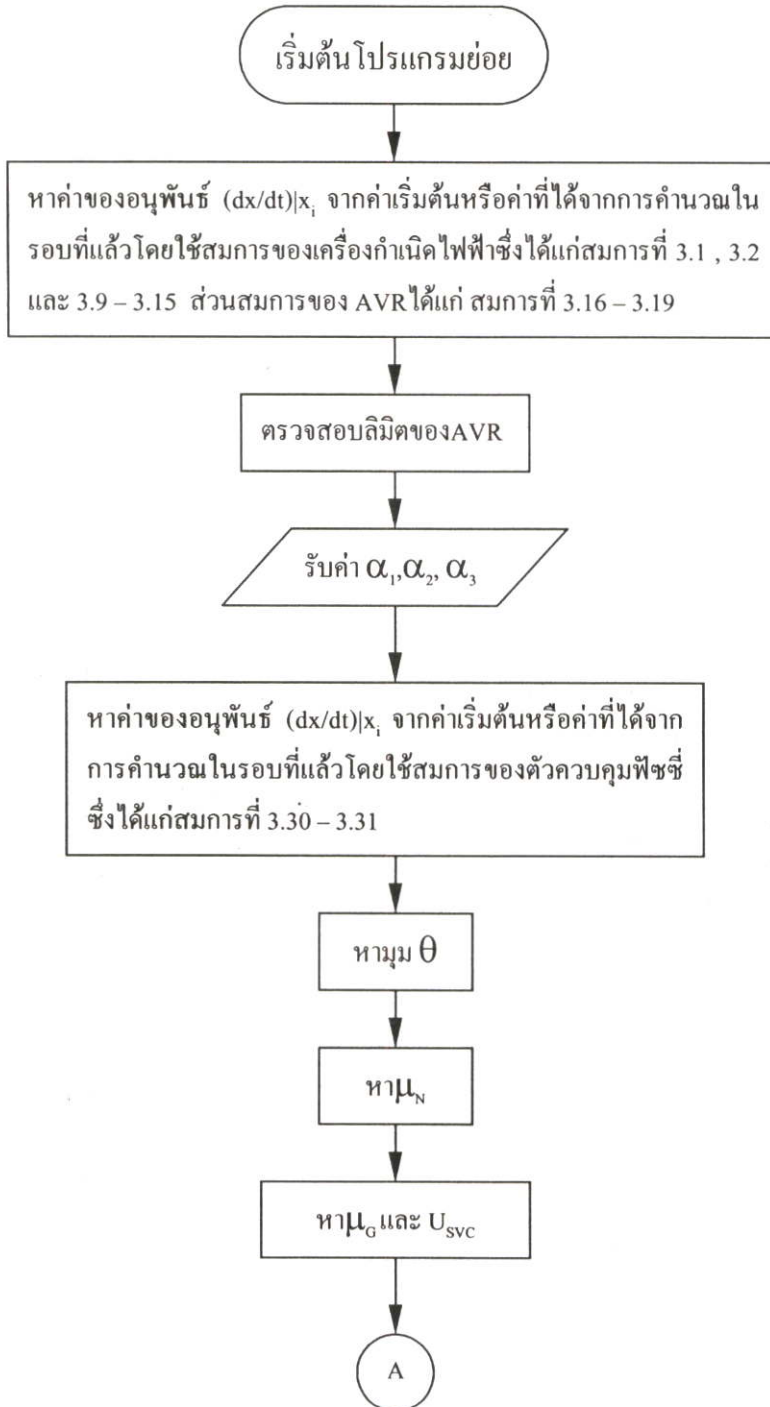
รูปที่ 5.7 (ต่อ)

### 5.3 โปรแกรมจำลองระบบกรณีควบคุมด้วย SVC ชนิดฟิชซี

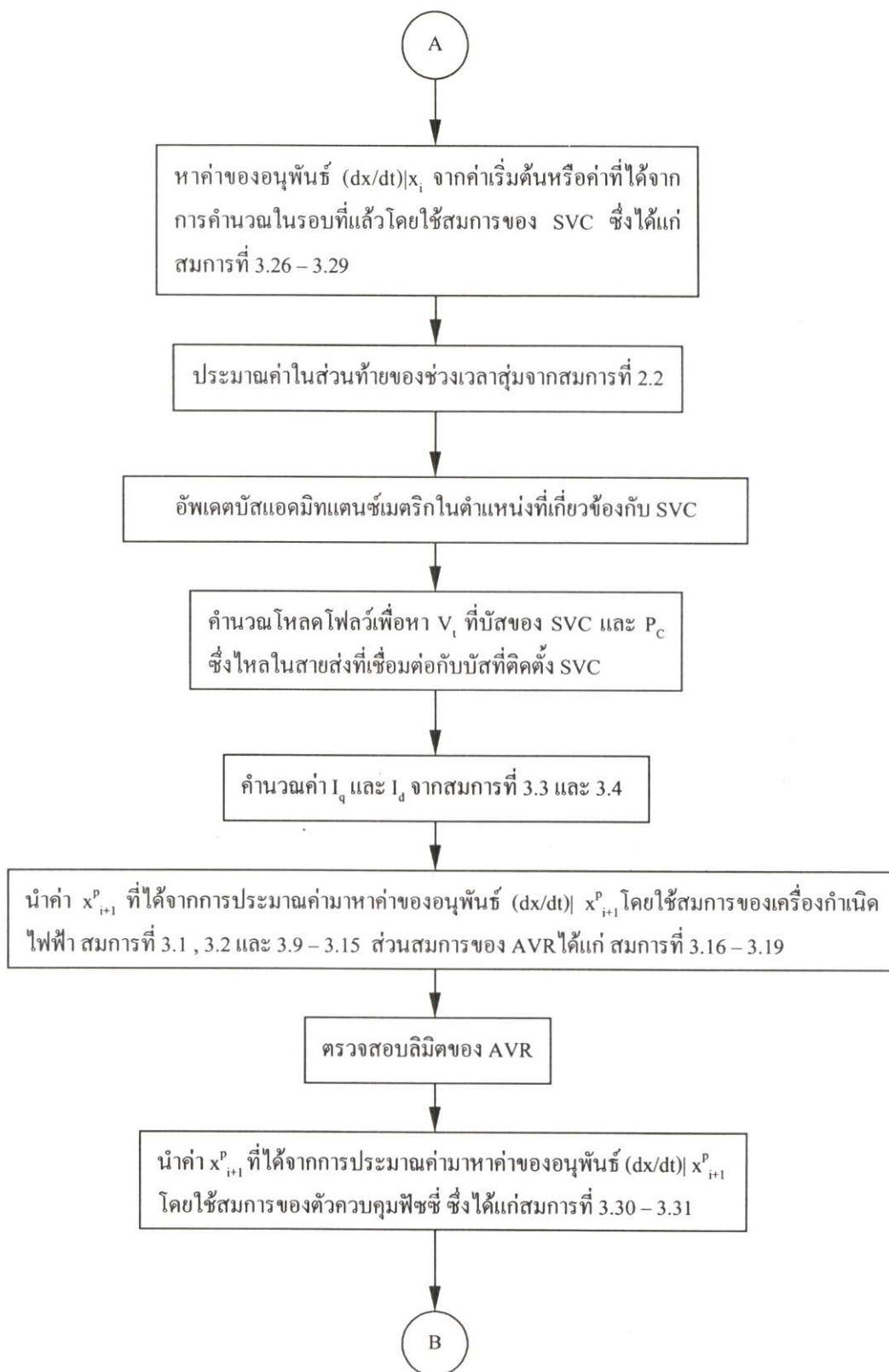
โปรแกรมในส่วนนี้จะกล่าวถึงการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังด้วย SVC ซึ่งทำให้สามารถปรับเปลี่ยนแอดมิตแตนซ์ของระบบได้ สำหรับโพลีชาร์ตการทำงานนั้นจะประกอบด้วยรูปควบคุมแรงดันของ SVC และส่วนของฟิชซีซึ่งจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC โดยจะมีรายละเอียดดังนี้



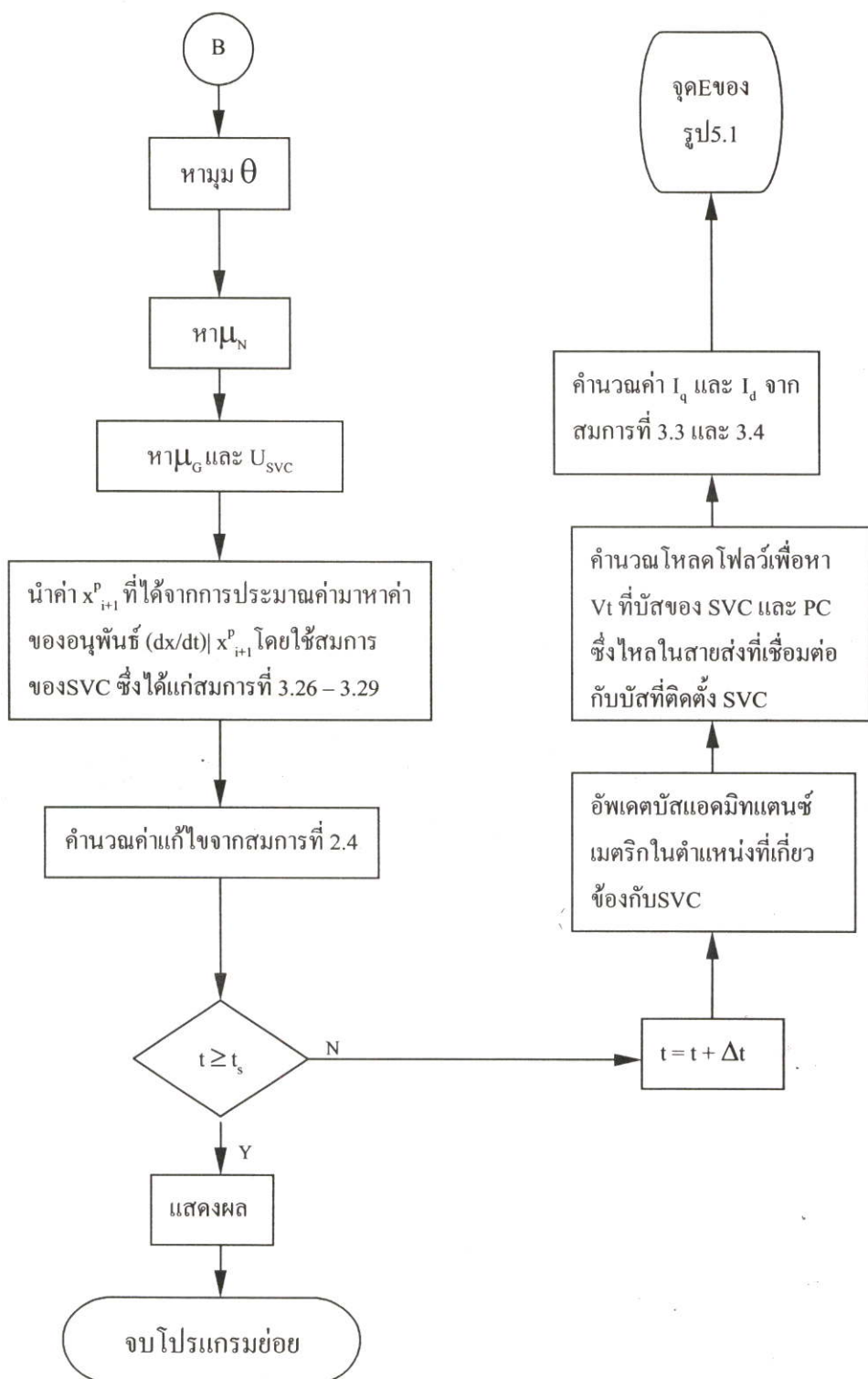
รูปที่ 5.8 โพลีชาร์ตการกำหนดค่าเริ่มต้นกรณีควบคุมด้วย SVC ชนิดฟิชซี



รูปที่ 5.9 โพลัวซาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์กรณีควบคุมด้วย SVC ชนิดฟิซซี



รูปที่ 5.9 (ต่อ)



รูปที่ 5.9 (ต่อ)

### 5.3.1 การหาค่าของมุม $\theta$

โปรแกรมส่วนนี้จะกล่าวถึงการทำงานของตัวควบคุมพีชชีในส่วนแรก ซึ่งได้แก่การกำหนดค่าของมุม $\theta$ สำหรับจุดP(k)ใดๆบนเฟสเพลน โดยค่าของมุม $\theta$ สามารถกำหนดได้จากสมการหนึ่งสมการใดต่อไปนี้

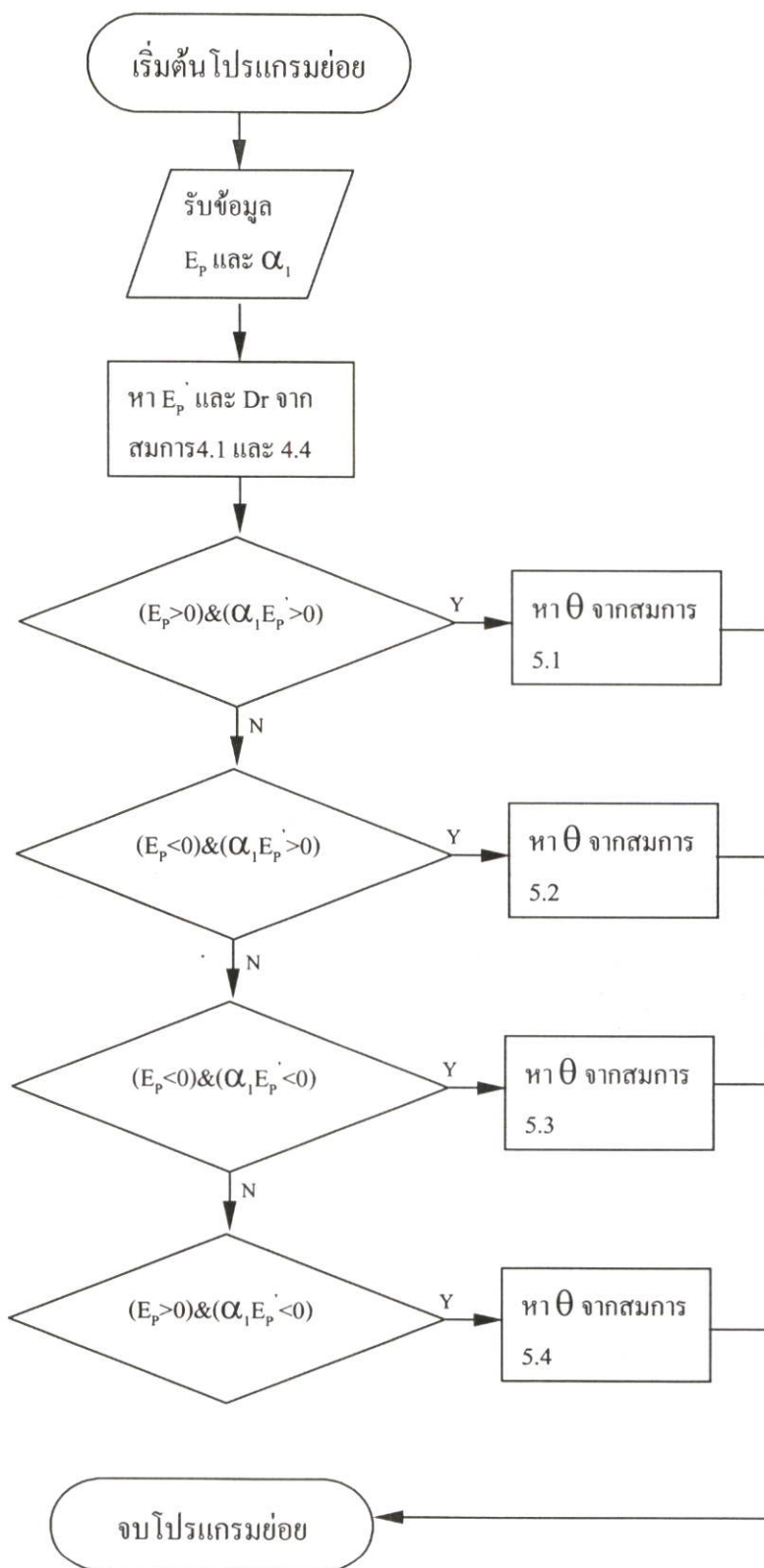
$$\theta = \sin^{-1}(\alpha_1 E_p') / Dr \times 180 / \pi \quad (5.1)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(\alpha_1 E_p') / Dr \times 180 / \pi + 180 \quad (5.2)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(\alpha_1 E_p') / Dr \times 180 / \pi + 180 \quad (5.3)$$

$$\theta = \sin^{-1}(\alpha_1 E_p') / Dr \times 180 / \pi + 360 \quad (5.4)$$

โดยโพล์ซาร์ตสำหรับการหาค่าของมุม $\theta$  สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.10 โฟลว์ชาร์ตการหาค่าของมุม  $\theta$

### 5.3.2 การหาค่าของ $\mu_N$

การทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่ในส่วนถัดมา คือการหาค่าของ  $\mu_N$  ซึ่งก็คือฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมูม  $\theta$  นั้นเอง และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 พบว่า  $\mu_N$  จะมีค่าโดยขึ้นกับกรณีต่างๆต่อไปนี้

กรณีที่ 1  $0 \leq \theta < (SL - \alpha_2/2)$

$$\mu_N = 1 \quad (5.5)$$

กรณีที่ 2  $(SL - \alpha_2/2) \leq \theta < (SL + \alpha_2/2)$

$$\mu_N = ((SL - \theta) / \alpha_2) + 0.5 \quad (5.6)$$

กรณีที่ 3  $(SL + \alpha_2/2) \leq \theta < (SL + 180 - \alpha_2/2)$

$$\mu_N = 0 \quad (5.7)$$

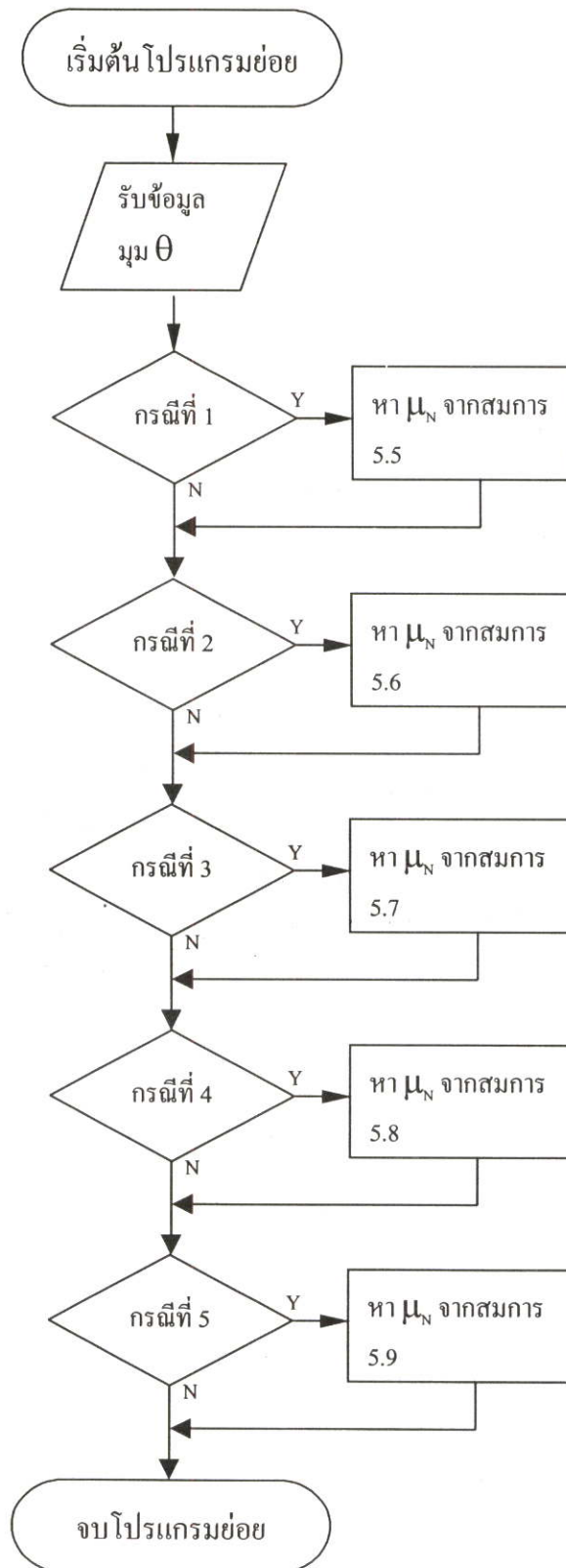
กรณีที่ 4  $(SL + 180 - \alpha_2/2) \leq \theta < (SL + 180 + \alpha_2/2)$

$$\mu_N = ((SL + 180 - \theta) / \alpha_2) + 0.5 \quad (5.8)$$

กรณีที่ 5  $(SL + 180 + \alpha_2/2) \leq \theta < 360$

$$\mu_N = 1 \quad (5.9)$$

โดยสามารถเขียน โฟลว์ชาร์ต ได้ดังนี้



รูปที่ 5.11 โฟลว์ชาร์ตการหาค่าของ  $\mu_N$

### 5.3.3 การหาค่าของ $\mu_G$ และ $U_{SVC}$

การทำงานของตัวควบคุมพีชชีในส่วนสุดท้ายคือ การหาค่าของ  $\mu_G$  และ  $U_{SVC}$  ซึ่งได้แก่ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $Dr$  และสัญญาณควบคุมเสริมสำหรับ SVC ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 พบว่าการหาค่า  $\mu_G$  สามารถพิจารณาได้จาก 2 กรณีต่อไปนี้

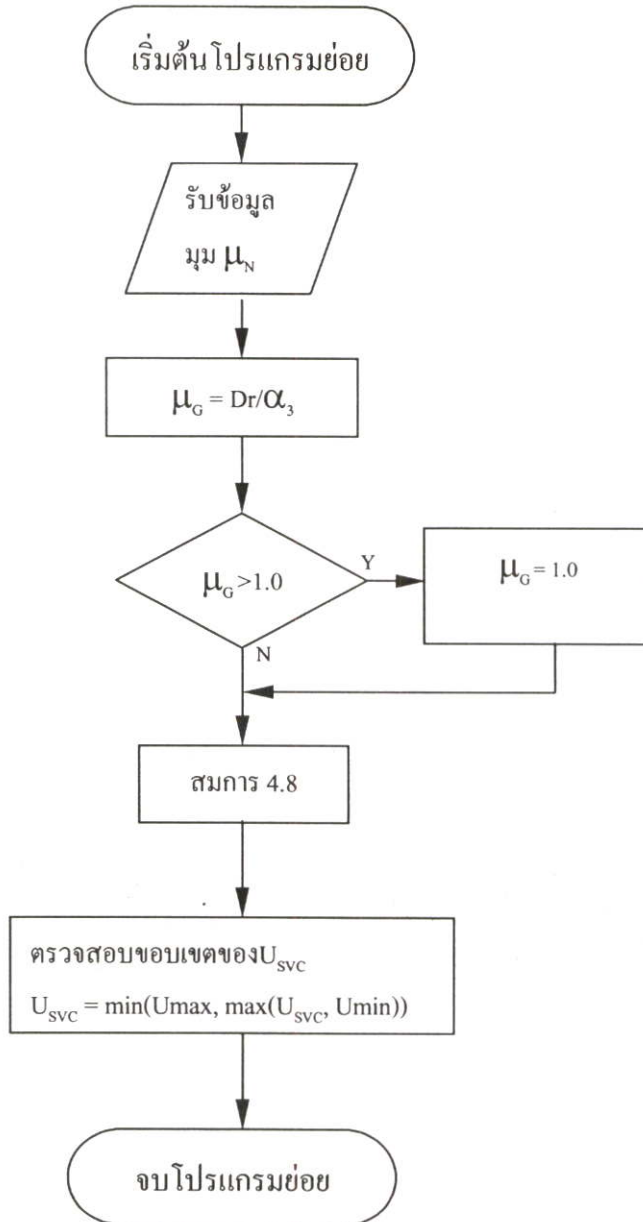
กรณีที่ 1  $0 \leq Dr \leq \alpha_3$

$$\mu_G = Dr / \alpha_3 \quad (5.10)$$

กรณีที่ 2  $Dr > \alpha_3$

$$\mu_G = 1 \quad (5.11)$$

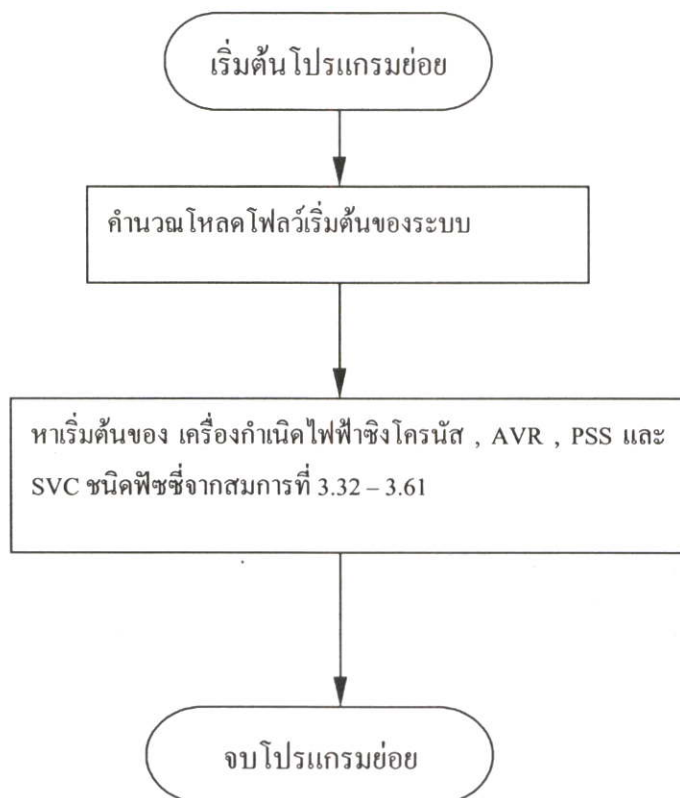
สามารถเขียนโพลีชาร์ตสำหรับการหาค่าของ  $U_{SVC}$  ได้ดังนี้



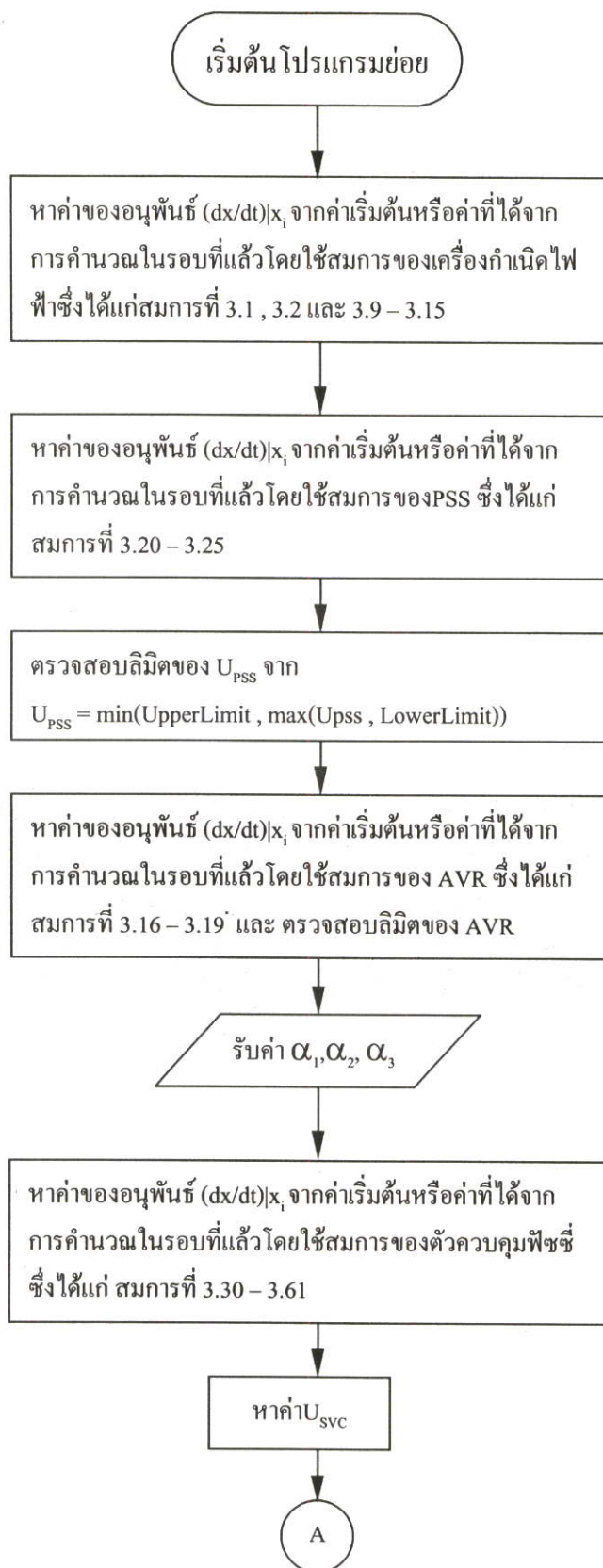
รูปที่ 5.12 โฟลว์ชาร์ตการหาค่าของ  $U_{svc}$

#### 5.4 โปรแกรมจำลองระบบกรณีควบคุมแบบผสมผสาน

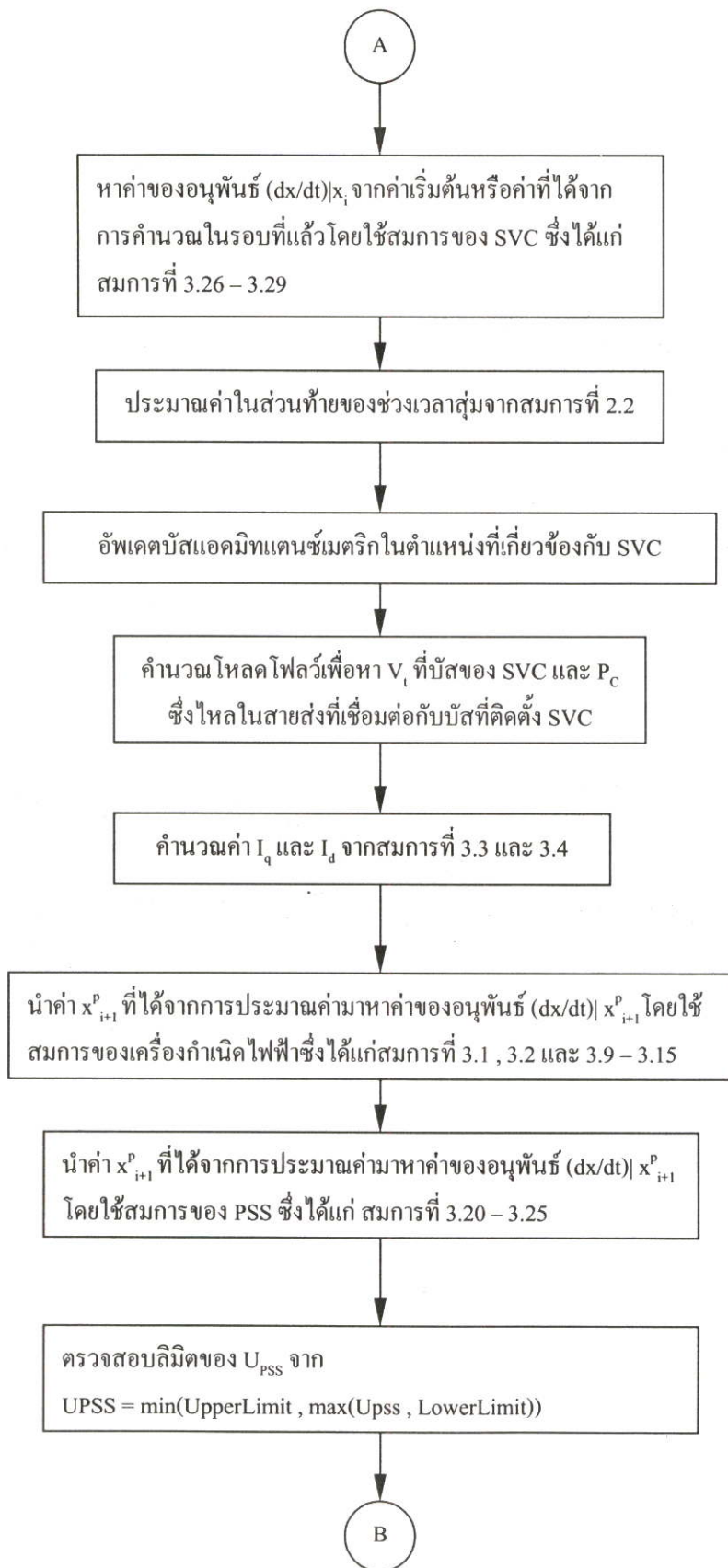
โปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังกรณีที่ถูกควบคุมด้วยPSS ซึ่งถูกติดตั้งที่AVR ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ SVCชนิดพีชชีซึ่งติดตั้งเข้ากับสายส่ง โดยจะเป็นการรวมโปรแกรมในหัวข้อ5.2 และ 5.3 เข้าไว้ด้วยกัน และสามารถแสดงโพล์ชาร์ตโดยสังเขปได้ดังนี้



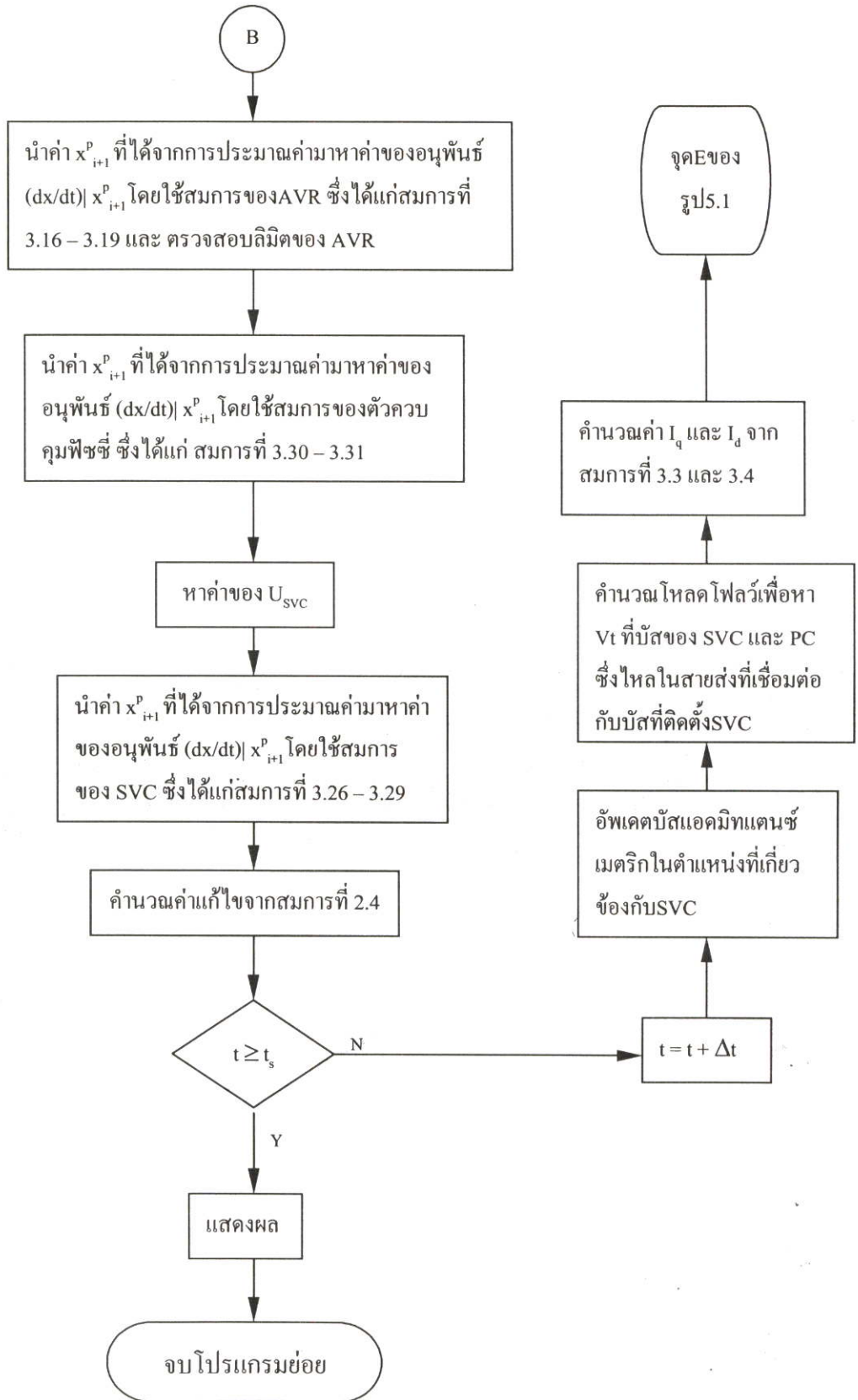
รูปที่ 5.13 โพล์ชาร์ตการกำหนดค่าเริ่มต้นกรณีควบคุมแบบผสมผสาน



รูปที่ 5.14 โฟลว์ชาร์ตการแก้สมการอนุพันธ์กรณีควบคุมแบบผสมผสาน



รูปที่ 5.14 (ต่อ)



รูปที่ 5.14 (ต่อ)

## 5.5 โปรแกรมออกแบบตัวควบคุมฟuzzyของSVC

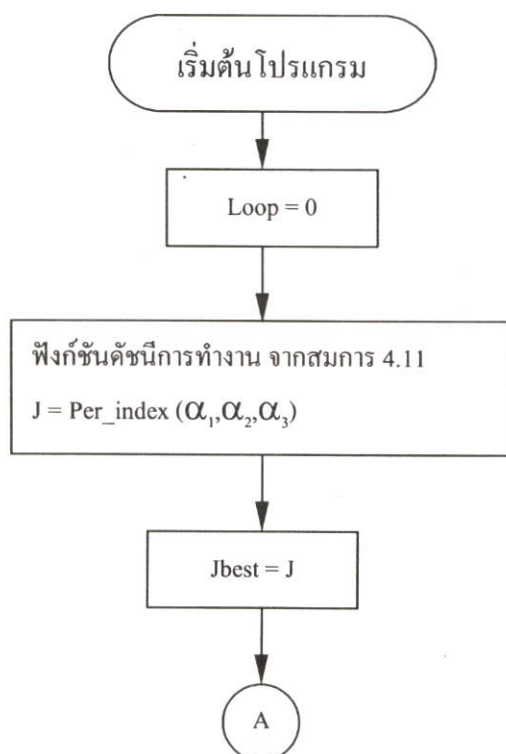
โปรแกรมในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ โดยจะพิจารณาค่าของ  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ที่เหมาะสมได้จากสมการดัชนีการทำงานซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่4.3 โดยในขั้นแรกจะต้องดัดแปลงโปรแกรมจำลองระบบกรณีที่ควบคุมด้วยSVCชนิดฟuzzyให้เป็นฟังก์ชันที่คืนค่าออกมาเป็นดัชนีการทำงานเสียก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีการวนลูปหรือที่เรียกว่าวิธีไอเทอร์เรชันในการหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยวิธีการนี้จะตรวจสอบค่าของข้อมูลทุกๆค่าเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยจะกำหนดช่วงของการเพิ่มของข้อมูลสำหรับพารามิเตอร์แต่ละตัวดังนี้

$\alpha_1$  มีค่าอยู่ในช่วง [0.0-1.0] และข้อมูลเพิ่มครั้งละ 0.05

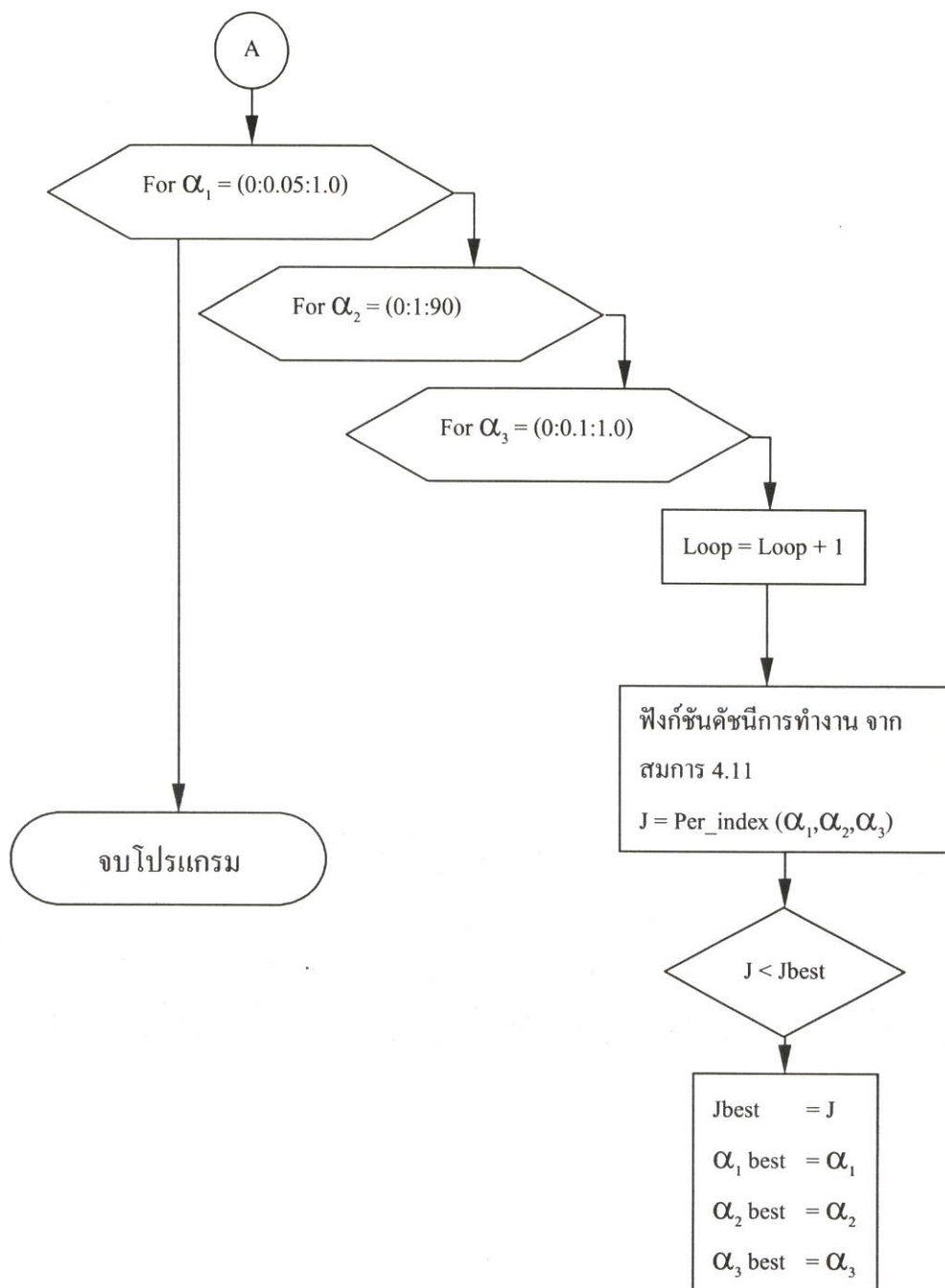
$\alpha_2$  มีค่าอยู่ในช่วง [0-90] และข้อมูลเพิ่มครั้งละ 1

$\alpha_3$  มีค่าอยู่ในช่วง [0.0-1.0] และข้อมูลเพิ่มครั้งละ 0.1

วิธีการไอเทอร์เรชันที่กล่าวมาสามารถเขียนโฟลว์ชาร์ตได้ดังนี้



รูปที่ 5.15 โฟลว์ชาร์ตการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy



รูปที่ 5.15 (ต่อ)

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบความสามารถของSVCซึ่งได้รับสัญญาณเสริมจากตัวควบคุมพีชชีชนิดเฟสเฟลน ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร ซึ่งจะทำการศึกษาบนคอมพิวเตอร์ โดยจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการควบคุมเสถียรภาพแบบต่างๆ ต่อไปนี้

1. ใช้ PSS ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสถียรภาพเสริมให้กับAVRของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส
2. ใช้ SVC ซึ่งมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียว
3. ใช้ตัวควบคุมพีชชี ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับรูปควบคุมแรงดันของSVCซึ่งเรียกการควบคุมลักษณะนี้ว่าFPSVC
4. ให้มีการทำงานแบบผสมผสานระหว่างPSS และ FPSVC

ความถี่เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรนั้น จะถูกพิจารณาจากผลตอบสนองของผลต่างของมุมโรเตอร์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ยูนิตซึ่งจะเกิดการแกว่งไกว (Oscillation)เมื่อระบบถูกรบกวน ถ้าระบบมีเสถียรภาพและมีความหน่วงที่มากพอ ขนาดของการแกว่งไกวจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งหยุดนิ่งที่ค่าๆหนึ่งในที่สุด โดยอุปกรณ์ควบคุมเสถียรภาพต่างๆที่ติดตั้งให้กับระบบจะมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความหน่วงของการแกว่งไกวที่เกิดขึ้น เพื่อทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถของFPSVCในการสร้างความหน่วงของการแกว่งไกวที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรที่มีการเชื่อมต่อบนด้วยสายส่งระยะไกล และเมื่อพิจารณาจากรูปที่3.1 จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่3 ตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ห่างไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่1มากที่สุด (เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่1 ถูกกำหนดให้เป็นจุดอ้างอิงของการทดสอบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่3อยู่ห่างออกไปจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่1 ประมาณ 290 กิโลเมตร) ดังนั้นการทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสายส่งระยะไกลจะพิจารณาจากผลตอบสนองของการแกว่งไกวของผลต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่3 เทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่1 เป็นหลัก [30]

สำหรับการรบกวนที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ การเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน โดยจะสมมุติให้เกิดขึ้นเมื่อเวลาในการจำลองผ่านไป0.1วินาที และถูกกำจัดในเวลา100มิลลิวินาทีต่อมาด้วยการปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรออกไปจากระบบ โดยจะจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆต่อไปนี้

1. สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัสที่3)
2. ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่101)
3. สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัสที่13)

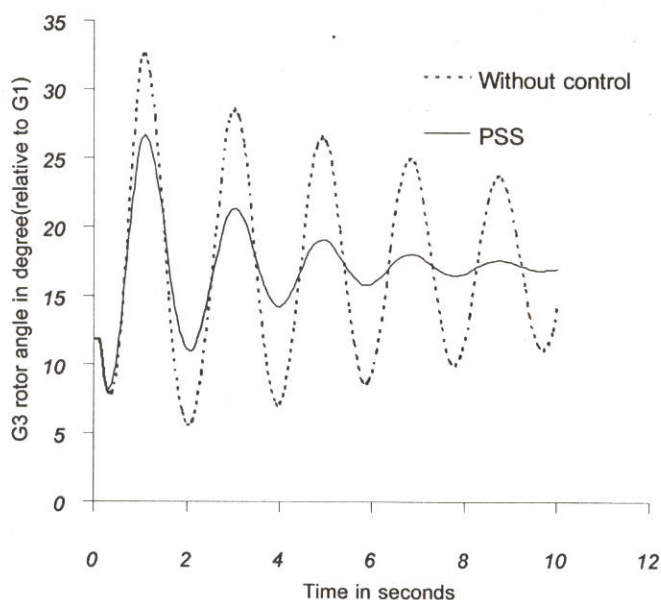
นอกจากนี้ในการทดสอบจะแบ่งสภาวะการทำงานของระบบออกเป็นอีก2กรณีคือ

1. ระบบมีการจ่ายโหลดปกติ (Normal Loading) คือ 2187MW
2. ระบบมีการจ่ายโหลด 120%ของโหลดปกติ (Heavy Loading) คือ 2734MW

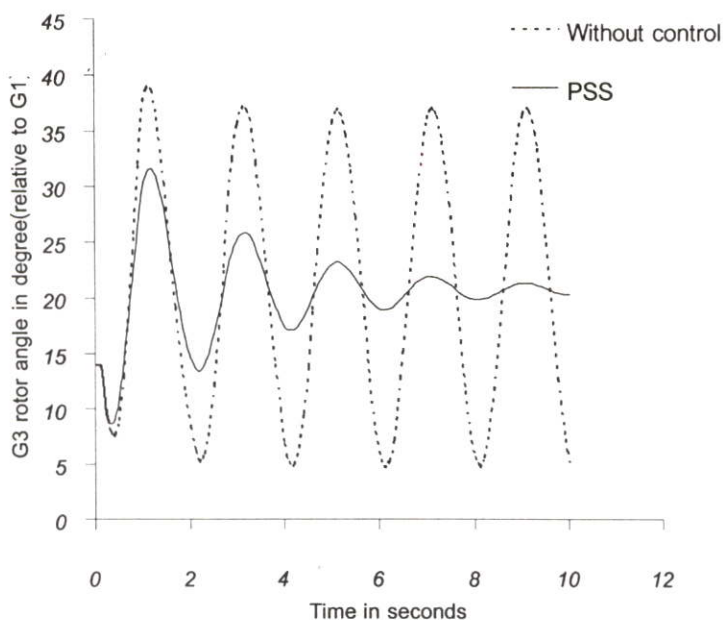
โดยมีผลของโหลดโพลาร์สำหรับแต่ละกรณีจะแสดงในภาคผนวก ก. ส่วนค่าคงที่ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส , AVR , PSS , SVC และตัวควบคุมฟิซซี่จะได้จากข้อมูลในตารางที่ 3.2 , 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

## 6.1 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วย PSS

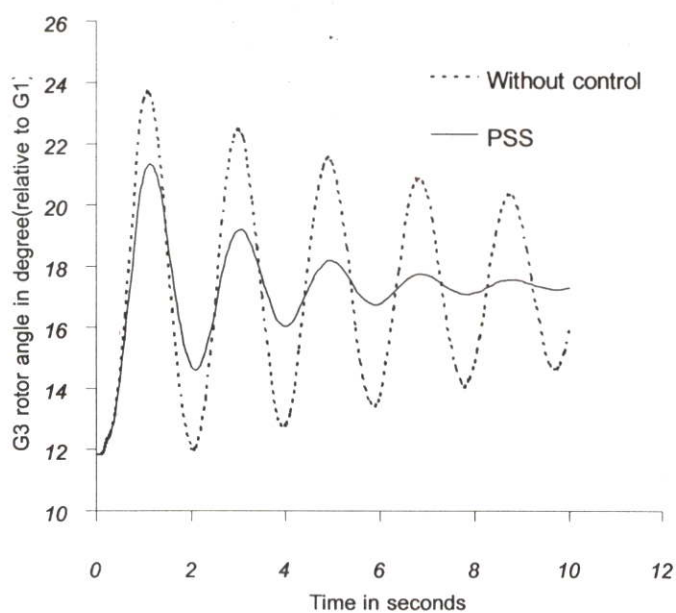
PSS จะถูกติดตั้งที่ AVR ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่3 โดย PSS จะสร้างสัญญาณควบคุมเสถียรภาพเสริมให้กับ AVR เพื่อเพิ่มความหน่วงให้กับระบบ โดยจะใช้ สัญญาณความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ และ สัญญาณแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นสัญญาณอินพุทของ PSS และ AVR ตามลำดับ



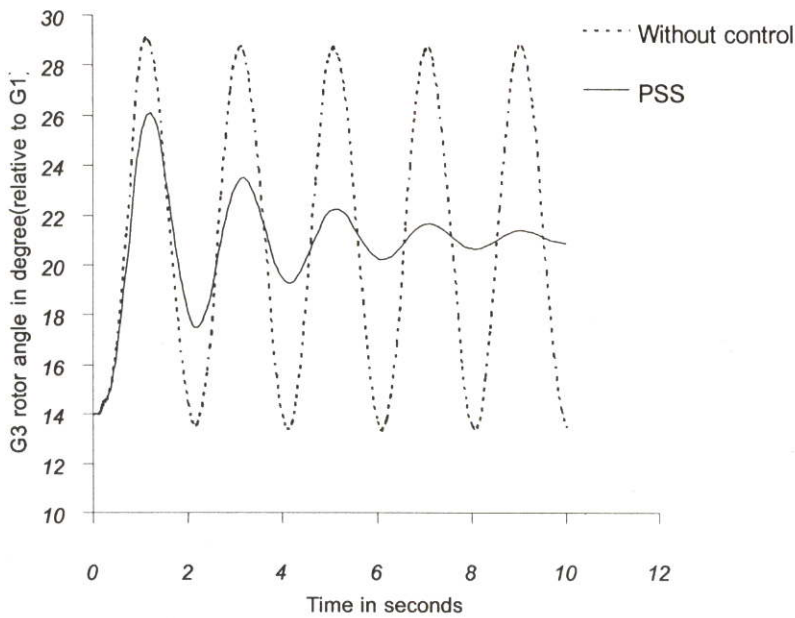
รูปที่6.1 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



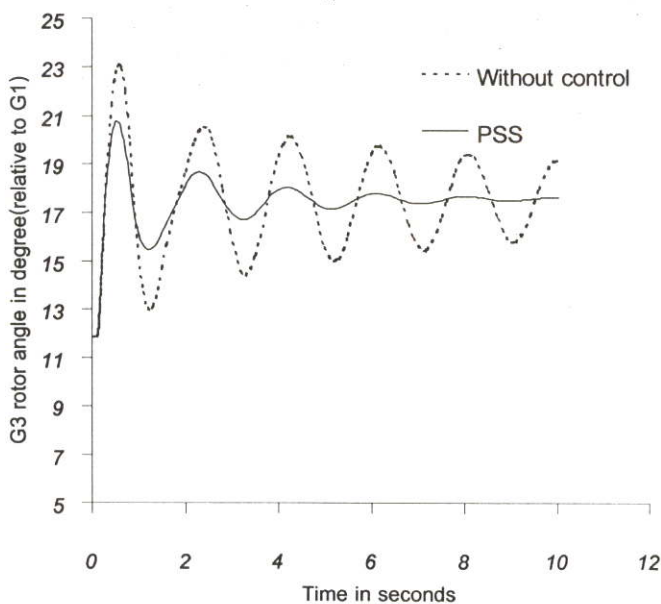
รูปที่6.2 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



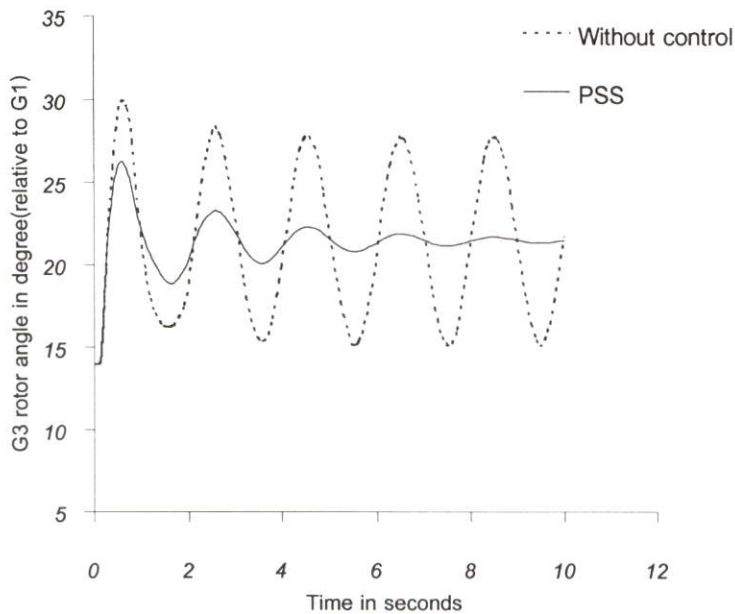
รูปที่6.3 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ

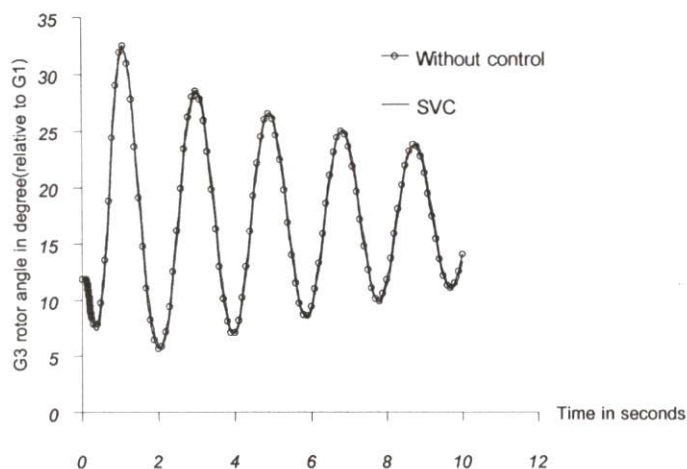


รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ

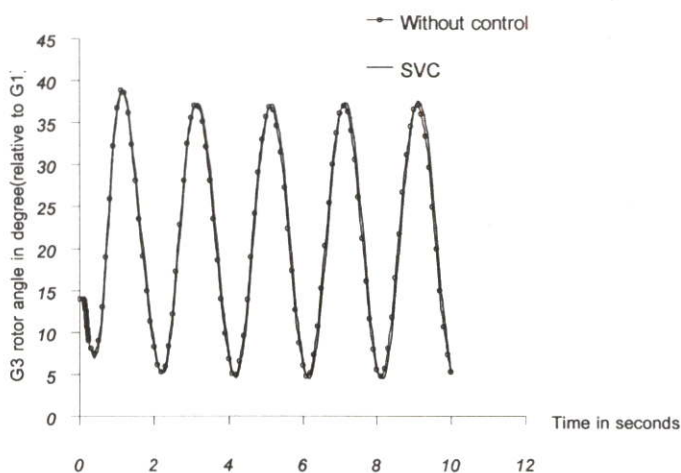
รูปที่ 6.1-6.6 แสดงผลตอบสนองของการใช้ PSS ในการเพิ่มความหน่วงให้กับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรที่มีสายส่งระยะไกล พบว่าการใช้ PSS โดยการติดตั้งไว้ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ( กราฟ PSS ) นั้น จะสร้างความหน่วงของการแกว่งไกวได้ดีกว่ากรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี AVR เพียงอย่างเดียว ( กราฟในกรณีที่ไม่มี การควบคุมเสถียรภาพ : without control ) แต่จะยังไม่สามารถสร้างความหน่วงได้มากนัก โดยจะเป็นเพียงแค่ลดขนาดของการแกว่งไกวให้น้อยลงเท่านั้น.

## 6.2 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วย SVC

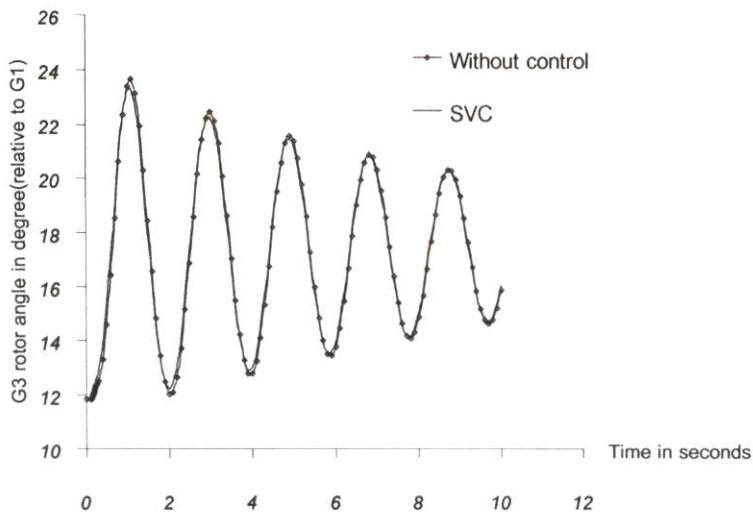
SVC จะถูกติดตั้งเข้ากับสายส่งซึ่งเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 บริเวณ โดย SVC จะมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียว โดยมีสัญญาณแรงดันที่บัสของ SVC เป็นสัญญาณอินพุทของรูปควบคุม



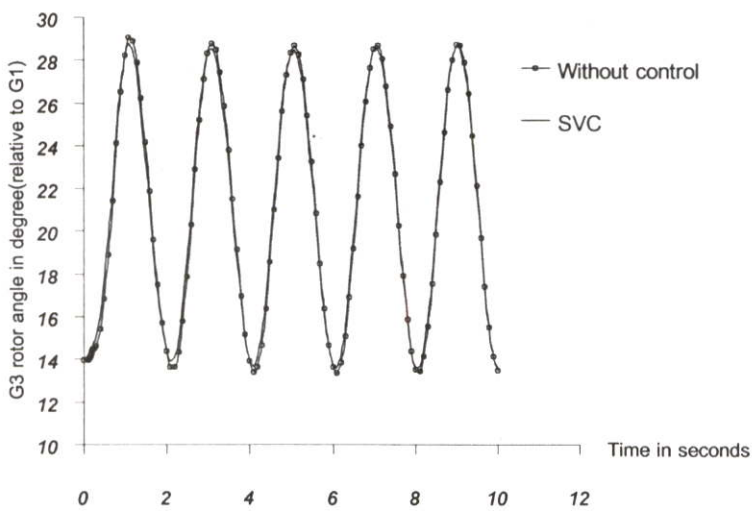
รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



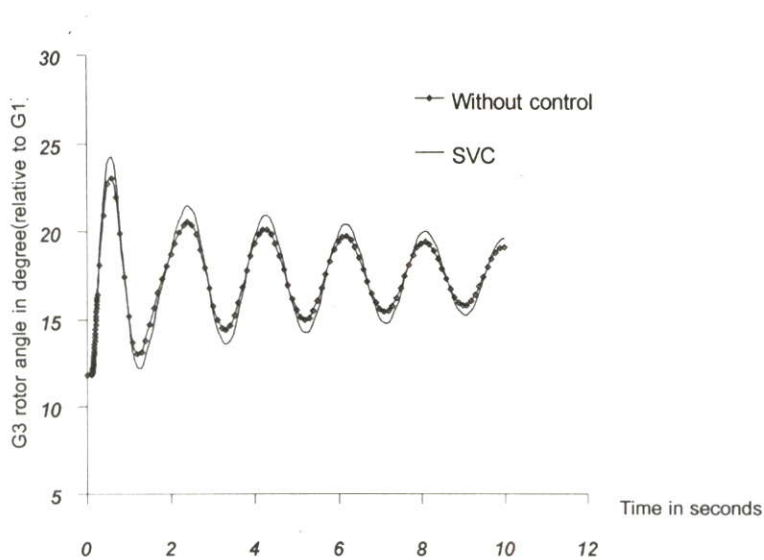
รูปที่ 6.8 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



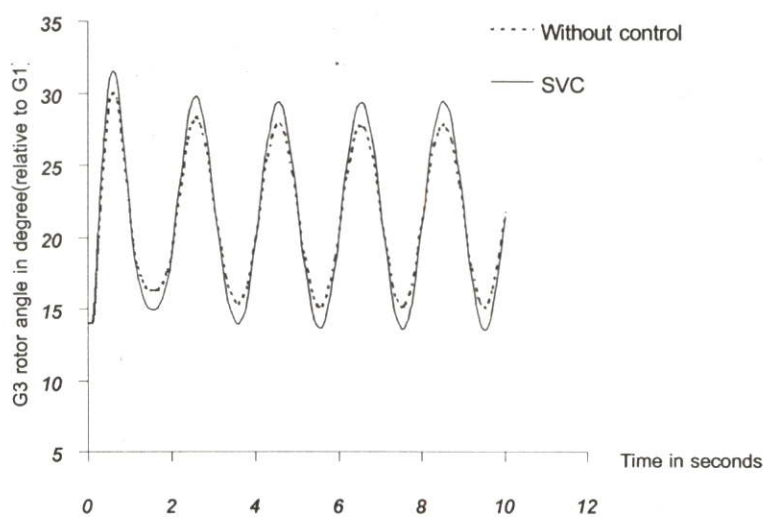
รูปที่ 6.9 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



รูปที่ 6.10 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



รูปที่6.11 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ

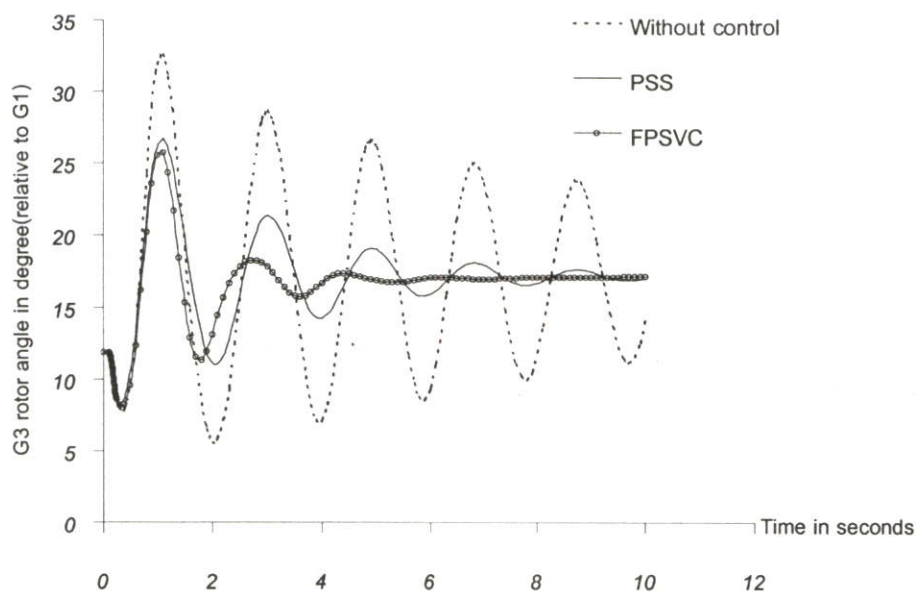


รูปที่6.12 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของ โหลดปกติ

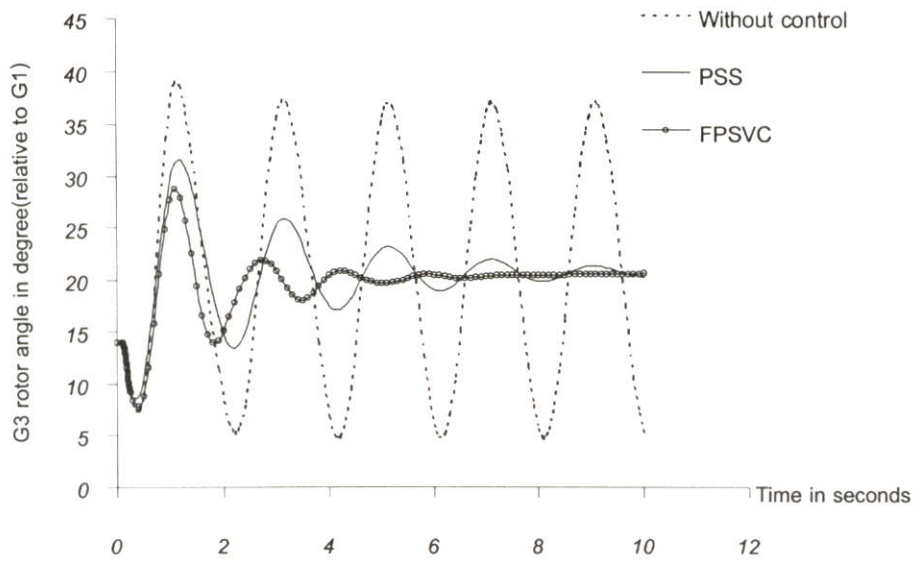
รูปที่ 6.7-6.12 แสดงผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 เทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 1 ในกรณีที่ติดตั้ง SVC ซึ่งมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียวพบว่า ไม่สามารถสร้างความหน่วงให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้เลย

### 6.3 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วย FPSVC

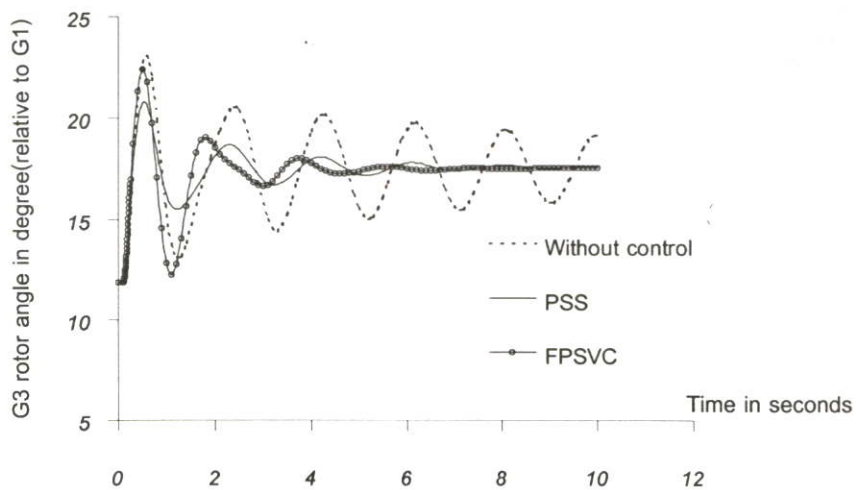
การใช้ SVC ให้สามารถเพิ่มความหน่วงให้กับระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจำเป็นต้องมีการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับรูปควบคุมแรงดันของ SVC ด้วย โดยจะใช้ตัวควบคุมพีชชีชนิดเฟสเพสในการสร้างสัญญาณเสริมนี้ โดยจะติดตั้งตัวควบคุมพีชชีเข้ากับ SVC และรับสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเป็นสัญญาณอินพุทของตัวควบคุม



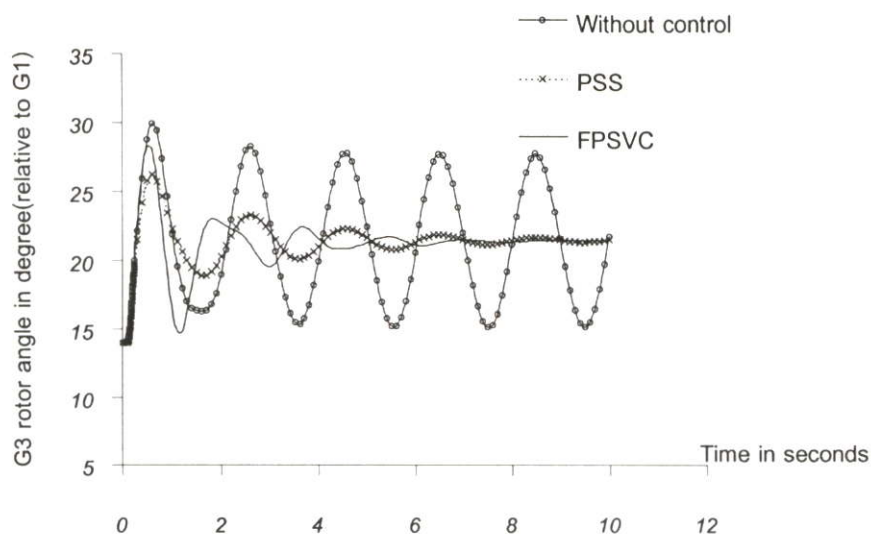
รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



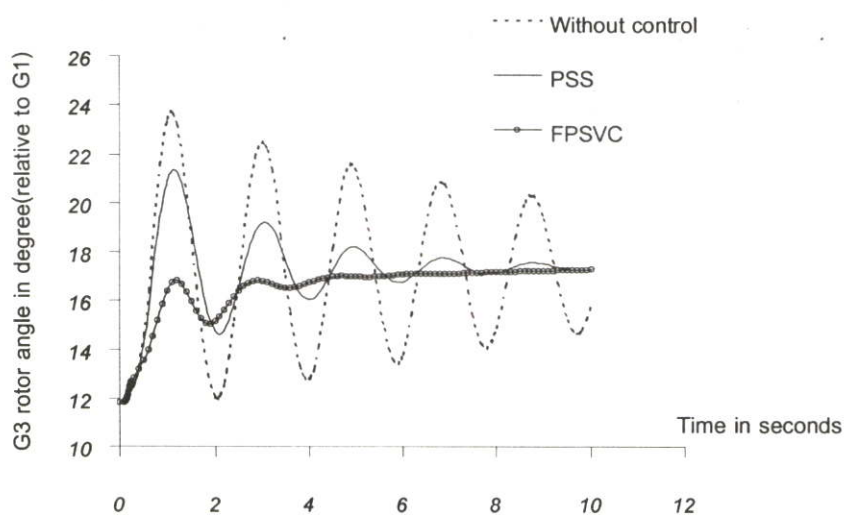
รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



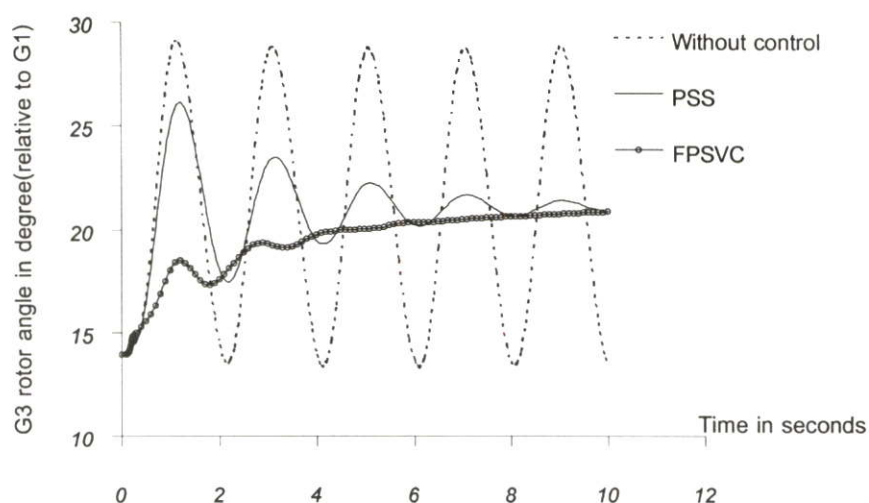
รูปที่ 6.15 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



รูปที่ 6.16 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



รูปที่ 6.17 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ

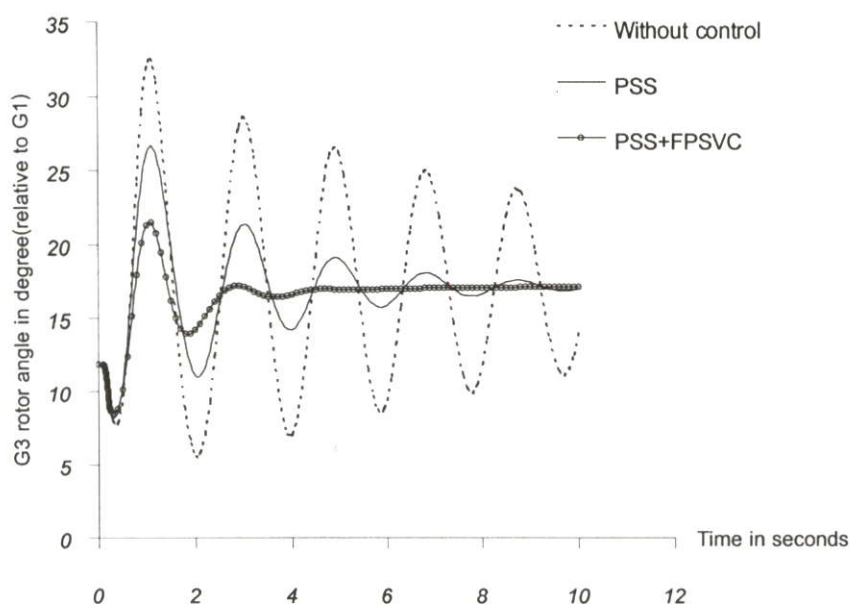


รูปที่ 6.18 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของ โหลดปกติ

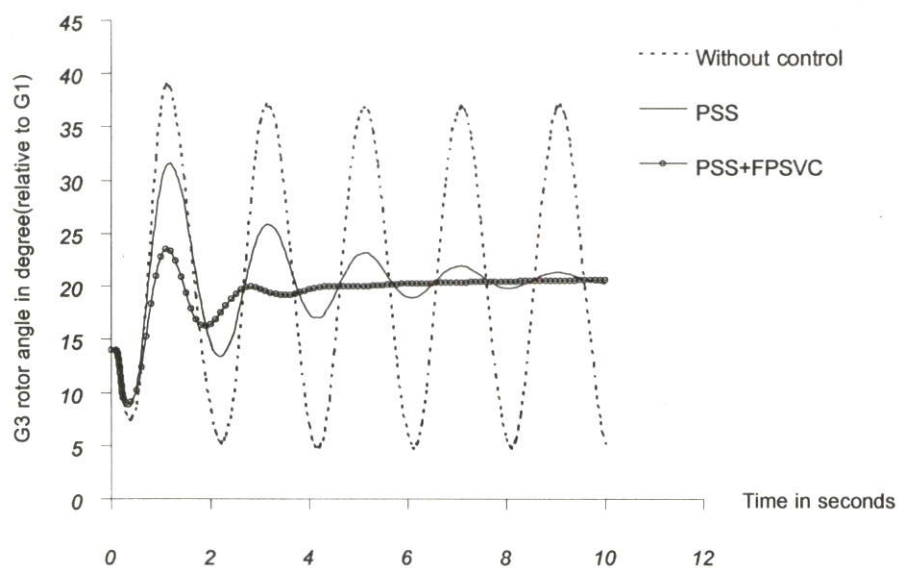
รูปที่ 6.13 - 6.18 แสดงผลตอบสนองในกรณีที่ใช้ FPSVC ซึ่งมีตัวควบคุมพีซีซีทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC พบว่าการใช้ FPSVC จะสามารถสร้างความหวังให้กับระบบไฟฟ้ากำลังอย่างเห็นได้ชัด โดยระบบจะเริ่มกลับเข้าสู่เสถียรภาพเมื่อเวลาผ่านไป 6 วินาที ภายหลังจากระบบถูกรบกวน

#### 6.4 ผลการทดสอบในกรณีเพิ่มเสถียรภาพด้วยการควบคุมแบบผสมผสาน

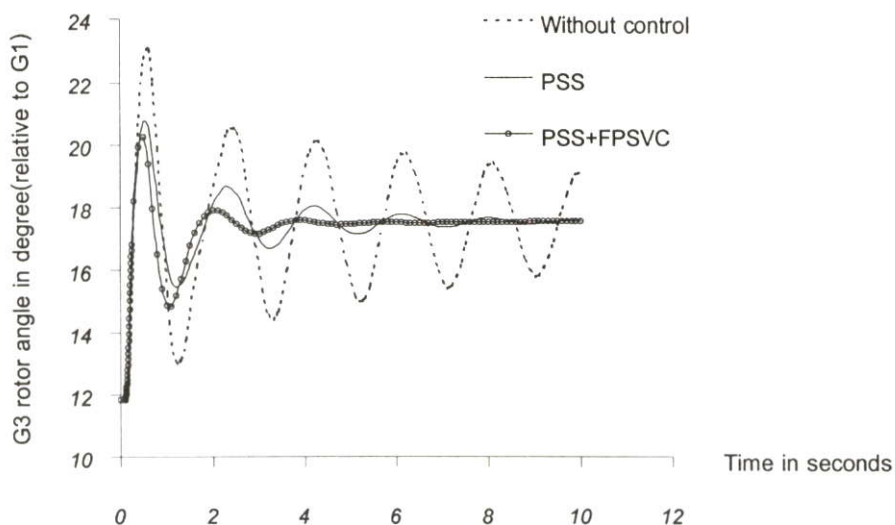
ในหัวข้อนี้จะตรวจสอบความสามารถในการสร้างความหวังของการควบคุมแบบผสมผสานระหว่าง PSS ซึ่งติดตั้งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณเสถียรภาพเสริมให้กับ AVR และ FPSVC ซึ่งใช้ตัวควบคุมพีซีซีในการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC



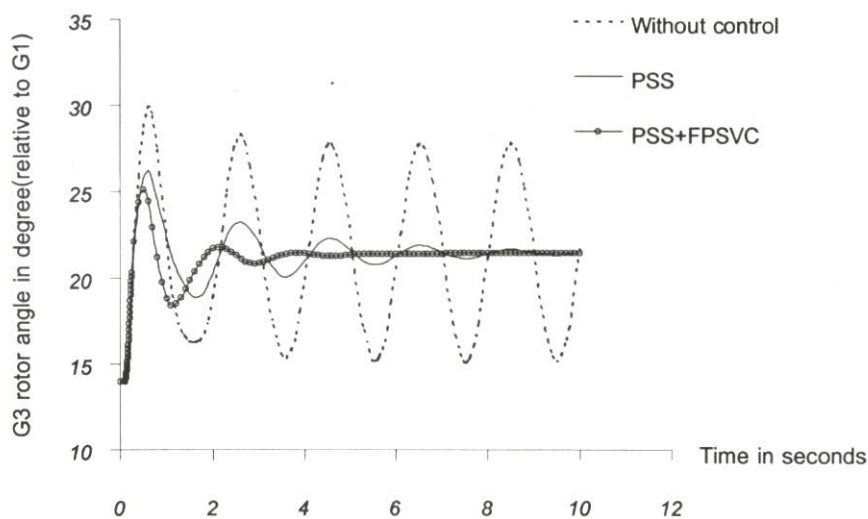
รูปที่ 6.19 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



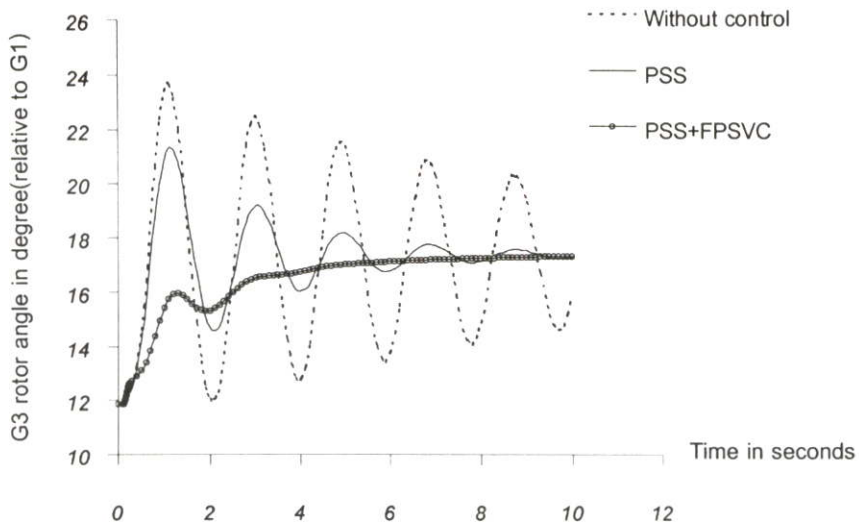
รูปที่ 6.20 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของ โหลดปกติ



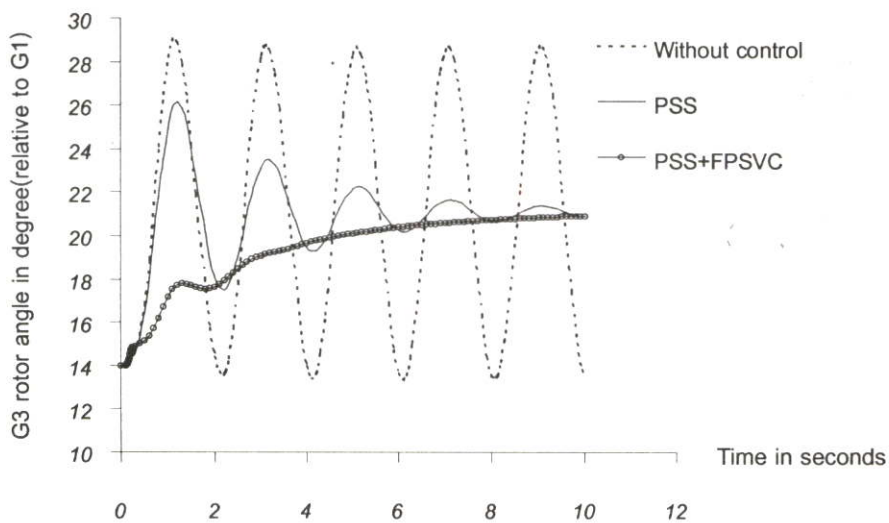
รูปที่ 6.21 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



รูปที่ 6.22 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 13 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



รูปที่ 6.23 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



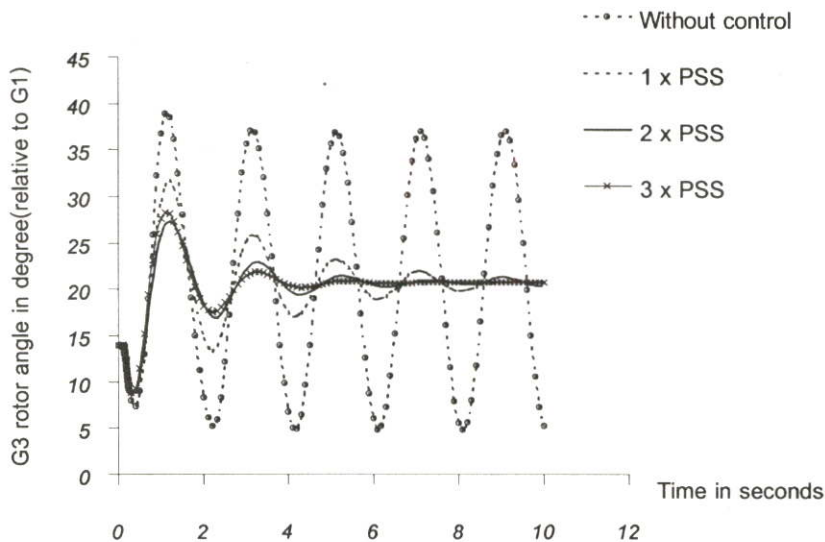
รูปที่ 6.24 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงดินที่บัส 101 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ

รูปที่ 6.19 – 6.24 แสดงผลการทดสอบของการควบคุมแบบผสมผสานระหว่าง PSS และ FPSVC พบว่าจะสร้างความหวังให้กับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรได้ดี โดยระบบจะเริ่มกลับเข้าสู่เสถียรภาพภายในเวลาประมาณ 4.5 วินาที ภายหลังจากระบบถูกรบกวน และยังคงลดขนาดของการแกว่งไกวได้ดีกว่ากรณีที่ใช้ FPSVC เพียงอย่างเดียว

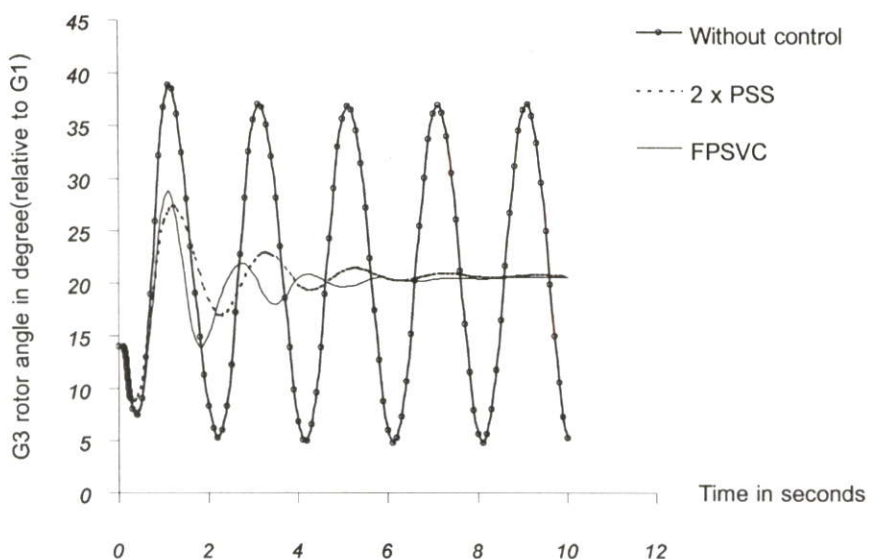
## 6.5 การทดสอบกรณีอื่นๆ

### 6.5.1 ผลการทดสอบในกรณีที่มีการติดตั้ง PSS ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่า 1 ยูนิต

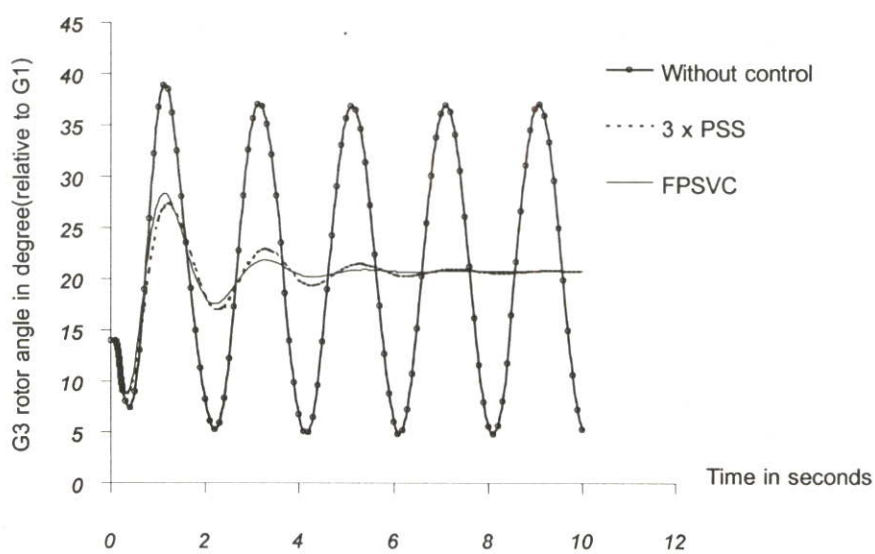
ในกรณีนี้จะเป็นการทดสอบ เปรียบเทียบความสามารถในกรณีที่ระบบมี PSS หลายยูนิต กับ FPSVC โดย ขั้นแรกจะตรวจสอบในกรณีที่ระบบมี PSS จำนวน 2 ยูนิต ซึ่งยูนิตหนึ่งถูกติดตั้งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 3 เช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อ 6.1-6.4 และอีกยูนิตหนึ่งถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 4 จากนั้นจะตรวจสอบในกรณีที่มี PSS ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 2, 3 และ 4 โดยทั้งหมดจะทดสอบในกรณีที่ระบบจ่ายโหลด 120% และมีการลัดวงจรเกิดขึ้นที่บัส 3



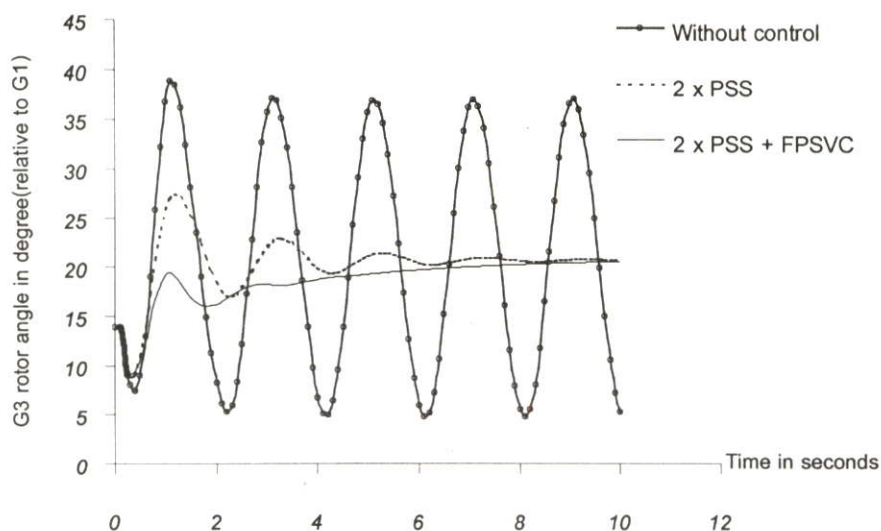
รูปที่ 6.25 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 1, 2 และ 3 ยูนิตตามลำดับ เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



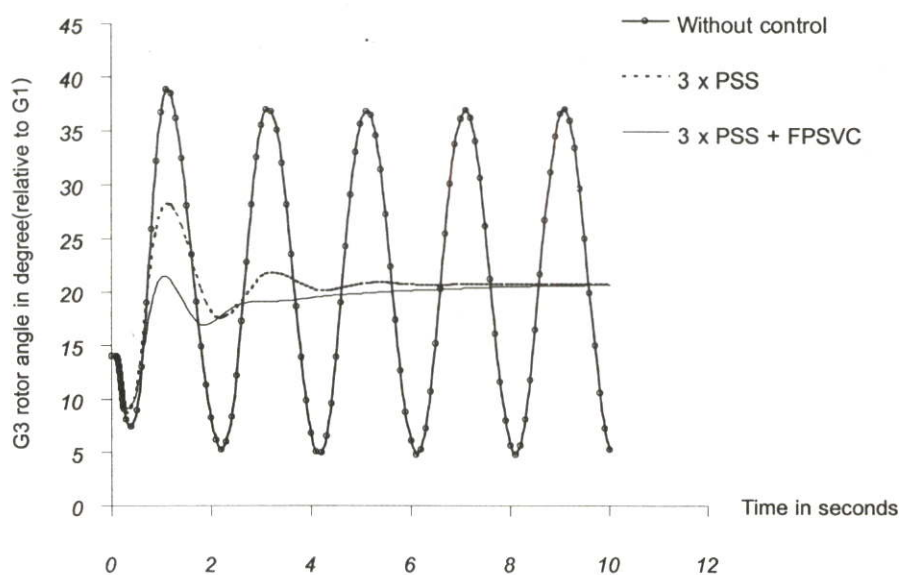
รูปที่ 6.26 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 2 ยูนิต เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



รูปที่ 6.27 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 3 ยูนิต เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



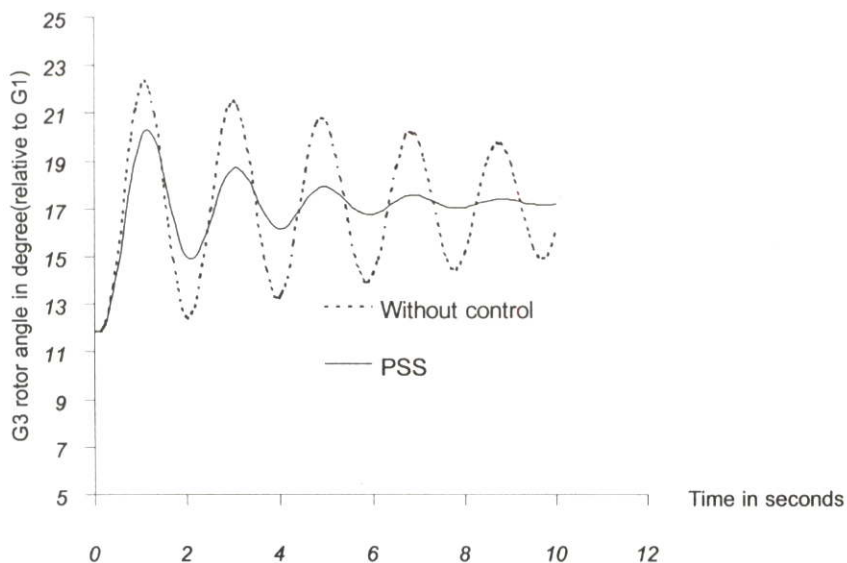
รูปที่ 6.28 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 2 ยูนิต เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ



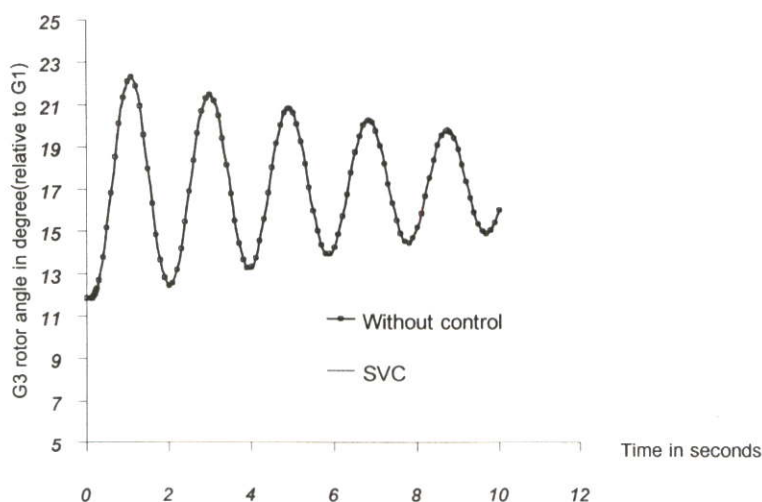
รูปที่ 6.29 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบควบคุมด้วย PSS จำนวน 3 ยูนิต เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ

### 6.5.2 การแกว่งไกวอันเนื่องมาจากการเปิดวงจรในระบบส่งอย่างทันทีทันใด

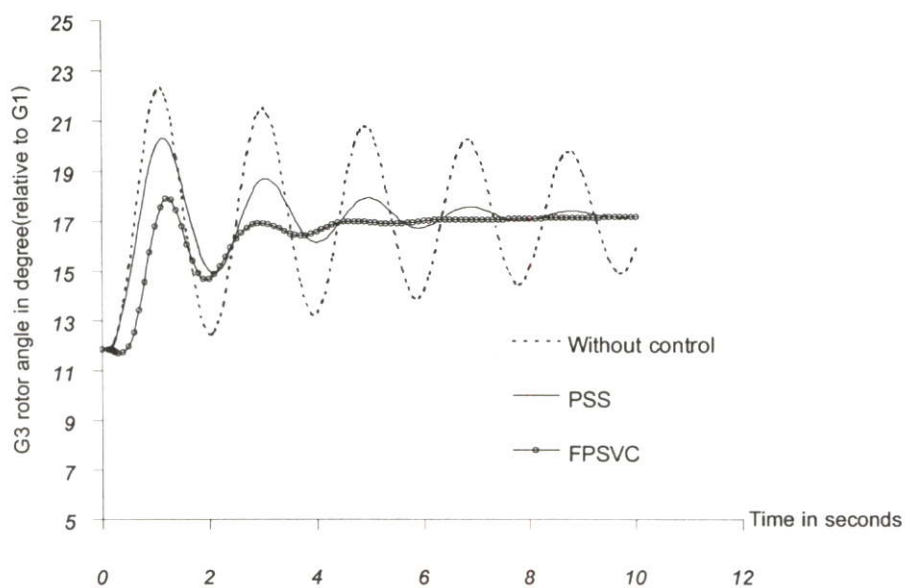
การเปิดวงจรอย่างทันทีทันใดอาจมีสาเหตุจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานเอง หรืออาจเกิดจากการปรับตั้งค่าของอุปกรณ์ป้องกันที่ไม่เหมาะสม ทำให้อุปกรณ์ป้องกันส่งปลดวงจรต่างๆที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ นอกจากนี้ยังอาจมีสาเหตุมาจากการที่แหล่งจ่ายกระแสตรงของเซอรักิตเบรกเกอร์มีค่าแรงดันต่ำกว่าปกติ ซึ่งเซอรักิตเบรกเกอร์บางตัวจะถูกกำหนดให้เปิดวงจรทันที



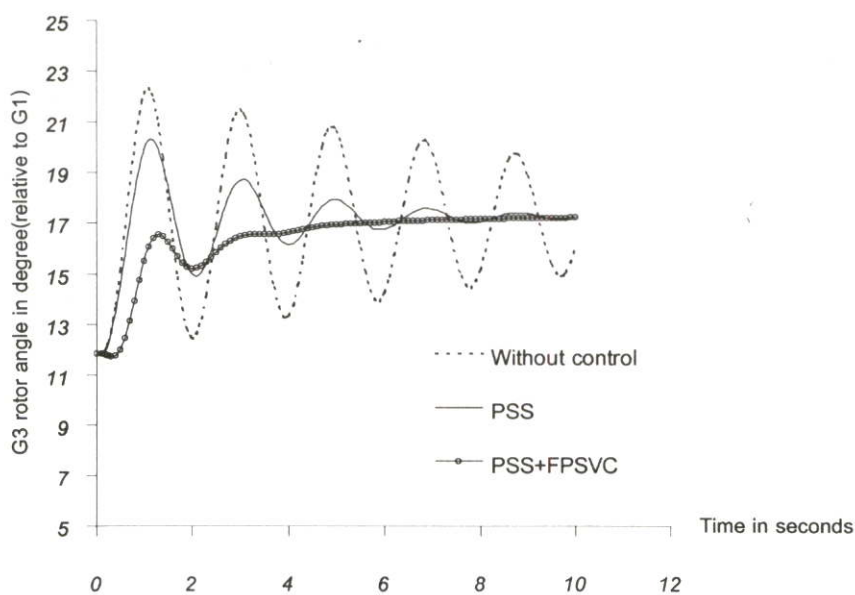
รูปที่ 6.30 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PSS และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



รูปที่ 6.31 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย SVC และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



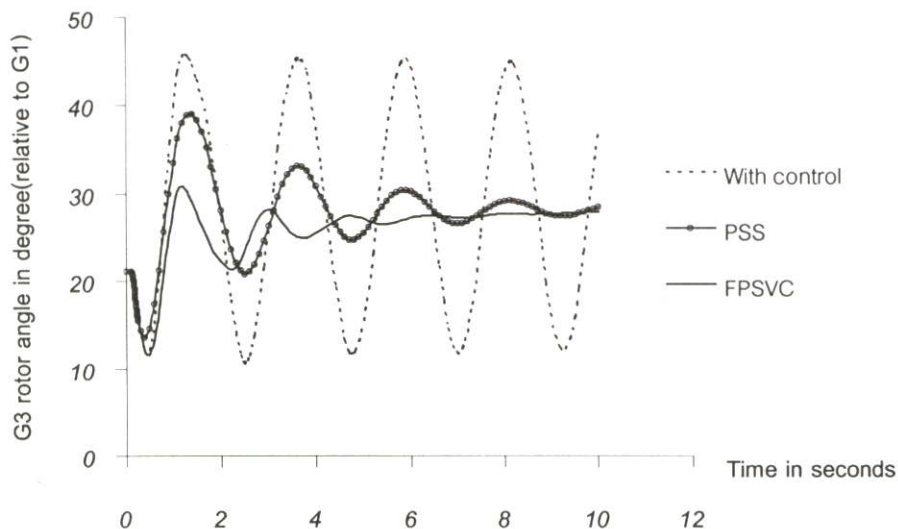
รูปที่ 6.32 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ



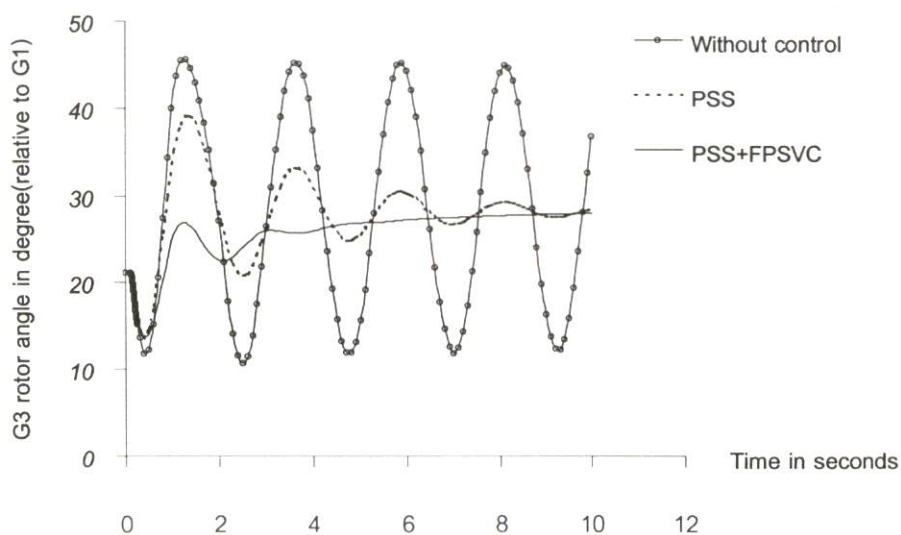
รูปที่ 6.33 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดปกติ

### 6.5.3 อิมพีแดนซ์ของสายส่งเพิ่มขึ้น

ในบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องปลดสายส่งบางส่วนออกจากวงจรเพื่อทำการบำรุงรักษา ซึ่งจะทำให้เหลือสายส่งที่ยังคงส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้เพียงเส้นเดียวส่งผลให้ระบบมีอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น



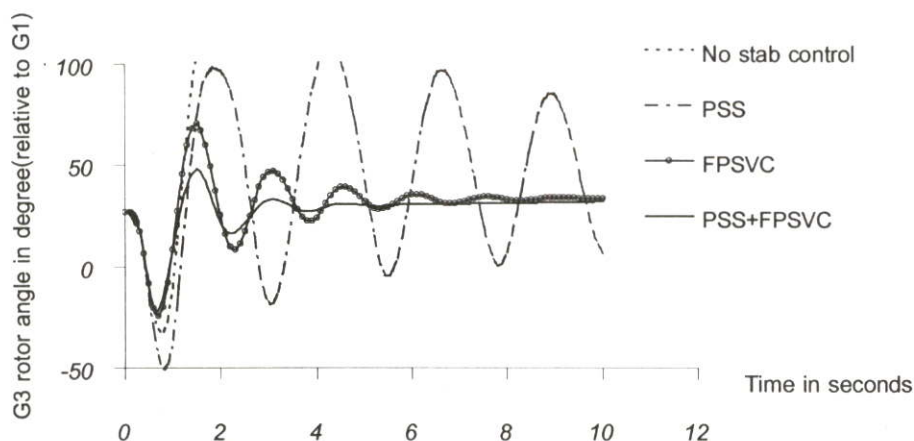
รูปที่ 6.34 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมด้วย FPSVC เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง ดินที่บัส 3 โดยมีกำลังงานไฟฟ้า 200MW ส่งผ่านสายส่ง 1 เส้น



รูปที่ 6.35 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ เปรียบเทียบในกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ , การควบคุมด้วย PSS และ การควบคุมแบบผสมผสาน เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 โดยมีกำลังงานไฟฟ้า 200MW ส่งผ่านสายส่ง 1 เส้น

#### 6.5.4 ช่วงเวลาในการกำจัดฟลัดยวามานจนเกินเวลาวิกฤติ

การที่ช่วงเวลาในการกำจัดฟลัดยวามานขึ้นนั้น อาจมีสาเหตุมาจากการที่รีเลย์ตัวหลักเกิดความผิดพลาดในการทำงาน หรือจากการที่สายสัญญาณจากรีเลย์ไปยังเซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกเปิดวงจร เป็นต้น ซึ่งจะทำให้รีเลย์ตัวอื่นๆในระบบเช่น รีเลย์กระแสเกินทำหน้าที่ในการกำจัดฟลัดแทน ซึ่งการทำงานของรีเลย์เหล่านี้จะช้ากว่ารีเลย์ตัวหลัก การที่ปล่อยให้ฟลัดยังคงอยู่ในระบบนานเกินกว่าเวลาวิกฤติจะทำให้ระบบไม่สามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้



รูปที่ 6.36 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมกรณีต่างๆเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินที่บัส 3 และ ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลด 120% ของโหลดปกติ

จากรูปที่ 6.25 พบว่า การติดตั้ง PSS เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความหน่วงให้กับระบบได้ โดยจะเห็นว่าความหน่วงจะเพิ่มขึ้นไปตามจำนวนของ PSS ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความสามารถของ PSS และ FPSVC (ในกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรที่มีสายส่งระยะไกล) ดังรูปที่ 6.26 และ รูปที่ 6.27 แล้วจะเห็นได้ว่าการใช้ FPSVC เพิ่มความหน่วงให้กับระบบได้ดีกว่าโดยระบบจะกลับเข้าสู่เสถียรภาพภายในเวลาประมาณ 6 วินาทีหลังจากระบบถูกรบกวน ในขณะที่การใช้ PSS จะใช้เวลานานกว่าในการทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพ รูปที่ 6.28 และ รูปที่ 6.29 จะแสดงการทำงานแบบผสมผสานซึ่งจะสร้างความหน่วงได้ดีที่สุดโดยระบบจะแกว่งไกวอย่างรุนแรงเพียงแค่ครั้งเดียวจากนั้นจะกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 6.30 – 6.33 พบว่าในกรณีของการรบกวนแบบอื่นๆ การใช้ PSS , FPSVC และการควบคุมแบบผสมผสาน จะยังคงสร้างความหน่วงให้กับระบบได้ โดยการควบคุมแบบผสมผสานจะสร้างความหน่วงได้ดีที่สุด ในขณะที่การใช้ SVC ซึ่งมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียวก็ยังคงไม่สามารถสร้างความหน่วงให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้เลย

จากรูปที่ 6.34–6.35 พบว่าการที่อิมพีแดนซ์ของสายส่งเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของการแกว่งไกวเพิ่มขึ้น (โดยจะเห็นว่าค่ายอดของการแกว่งไกวจะเพิ่มจาก  $40^\circ$  ดังรูปที่ 6.2 ไปเป็น  $48^\circ$  ดังรูปที่ 6.34) การติดตั้ง PSS และ FPSVC จะช่วยเพิ่มความหน่วงให้กับระบบได้ดังในรูปที่ 6.34 แต่ FPSVC จะสร้างความหน่วงได้ดีกว่า PSS โดยระบบจะเริ่มกลับเข้าสู่เสถียรภาพเมื่อเวลาผ่านไป 7 วินาที ซึ่งเร็วกว่าการใช้ PSS อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบผสมผสานระหว่าง PSS และ FPSVC จะสร้างความหน่วงได้ดีที่สุดโดยระบบจะแกว่งไกวเพียงแค่ 2 ครั้งแล้วกลับเข้าสู่เสถียรภาพเมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาทีดังรูปที่ 6.35

จากรูปที่ 6.36 พบว่าการปล่อยให้การรบกวนยังคงอยู่ในระบบต่อไป จะทำให้ระยะเวลาที่ระบบขาดความสมดุลยาวนานขึ้นซึ่งอาจทำให้ระบบไม่สามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้อีกภายหลังจากถูกรบกวน และถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้ง PSS ก็ยังไม่สามารถสร้างความหน่วงที่ดีได้ แต่สำหรับการใช้ FPSVC หรือ การควบคุมแบบผสมผสานจะสามารถสร้างความหน่วงและทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น โดยการควบคุมแบบผสมผสานนั้นจะทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพเมื่อเวลาผ่านไป 6 วินาที

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลของการควบคุมเสถียรภาพในกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

1. PSS สามารถสร้างความหน่วงให้กับระบบที่ทำการทดสอบได้ไม่มากนัก
2. SVC ซึ่งมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสร้างความหน่วงให้กับระบบที่ทำการทดสอบได้เลย
3. FPSVC สามารถสร้างความหน่วงให้กับระบบที่ทำการทดสอบได้อย่างชัดเจน
4. การควบคุมแบบผสมผสานสามารถสร้างความหน่วงให้กับระบบที่ทำการทดสอบได้ดีที่สุด
5. การที่โหลดมีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้การแกว่งไกวอันเนื่องจากการรบกวนมีขนาดที่รุนแรงขึ้น
6. การที่ระบบสายส่งมีอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นจะทำให้การแกว่งไกวอันเนื่องจากการรบกวนมีขนาดที่รุนแรงขึ้น
7. การเพิ่มจำนวนของ PSS ในระบบที่ทำการทดสอบจะทำให้ความสามารถในการสร้างความหน่วงเพิ่มขึ้น
8. การที่ช่วงเวลาในการกำจัดสิ่งรบกวนนานเกินกว่าเวลาวิกฤตจะทำให้ระบบที่ไม่มีควบคุมเสถียรภาพไม่สามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้

## บทที่ 7

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุป

การดำเนินงานอย่างมีประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง คือ สถานะการทำงานที่มีความสมดุลย์กันระหว่างกำลังงานอินพุตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ กำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตที่จ่ายให้กับโหลด ในกรณีเช่นนี้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสโดยมีมุมโรเตอร์คงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง เมื่อเกิดการรบกวน เช่น การลัดวงจรขึ้นในระบบจะส่งผลให้ระบบขาดความสมดุลย์และเกิดความเร่งหรือความหน่วงขึ้นที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัสและเกิดการแกว่งไกวขึ้นที่โรเตอร์ ซึ่งถ้าการแกว่งไกวมีขนาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าปรับตั้งของรีเลย์ป้องกันก็จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนั้นถูกทริปออกไปจากระบบ แต่โดยทั่วไปแล้วระบบไฟฟ้ากำลังจะมีความหน่วงและทำให้การแกว่งไกวมีขนาดลดลงจนทำให้มุมโรเตอร์กลับมาจากที่ และโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสอีกครั้งหนึ่ง แต่ในบางกรณี ความหน่วงซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของระบบไฟฟ้ากำลังนี้ จะไม่สามารถทำให้ขนาดของการแกว่งไกวลดลงอย่างรวดเร็ว เช่นในกรณีของการแกว่งไกวที่เกิดจากการลัดวงจรซึ่งถือเป็นการรบกวนแบบรุนแรง การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเสถียรภาพต่างๆจึงมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความหน่วงและทำให้การแกว่งไกวลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้ความสามารถในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพเพิ่มขึ้น

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิดเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังงานให้กับโหลด ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปจะเรียกว่าระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังอาจทำได้โดยการติดตั้ง PSS เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความหน่วงเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสายส่งระยะไกลพบว่า PSS จะไม่สามารถสร้างความหน่วงที่ดีได้ซึ่งในกรณีนี้การใช้ SVC จะเหมาะสมกว่า เพียงแต่การใช้ SVC ซึ่งมีเพียงรูปควบคุมแรงดันนั้นจะไม่สามารถสร้างความหน่วงได้ จำเป็นต้องสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับรูปควบคุมแรงดันเพื่อเพิ่มความหน่วงให้กับระบบโดยจะนำหลักการของฟิชชีมาใช้ และสัญญาณควบคุมเสริมจะถูกคำนวณจากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\theta$  และ  $Dr$

การทดสอบเสถียรภาพในงานวิจัยนี้จะเป็นการจำลองบนคอมพิวเตอร์ โดยจะใช้แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 พื้นที่ และถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยสายส่งระยะไกลดังรูปที่ 3.1 โดยในแต่ละพื้นที่จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 2 ชนิดซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดในพื้นที่ของตัวเอง และจะมีกำลังงานไฟฟ้า

บางส่วนไหลผ่านสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ทั้ง 2 ด้วย การรบกวนจะเกิดขึ้นโดยการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ณ เวลา 0.1 วินาทีของการจำลอง และการรบกวนจะถูกกำจัดภายในเวลา 100 มิลลิวินาทีต่อมา โดยการปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรออกไปจากระบบ เสดียรภาพจะพิจารณาจากการแกว่งไกวของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 เทียบกับชนิดที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบของชนิดที่ 1 ด้วยสายส่งระยะไกลและอยู่ห่างออกไปจากชนิดที่ 1 มากที่สุดนั่นเอง ผลการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพ ระหว่างเงื่อนไขการควบคุมในแบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

การควบคุมด้วย PSS จะสามารถสร้างความหวังให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้ โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบในหัวข้อ 6.1 พบว่าในตอนเริ่มต้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยมีมุมโรเตอร์คงที่ค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงการทำงานที่สมดุลย์ของระบบ เมื่อเวลาผ่านไป 0.1 วินาทีเกิดการรบกวนขึ้นทำให้ระบบเสียความสมดุลย์ และมุมโรเตอร์ก็จะเกิดการแกว่งไกวขึ้น ขนาดของการแกว่งไกวจะแตกต่างกันไปตามสภาวะการทำงานของระบบ เช่น ระบบที่ต้องจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมากกว่าก็จะเกิดการแกว่งไกวที่รุนแรงกว่า ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลตอบสนองกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพในรูปที่ 6.1 และ 6.2 รวมทั้งค่าดัชนีการทำงาน(ภาคผนวก ค.) ซึ่งจะเห็นว่า การเพิ่ม โหลดจะทำให้ดัชนีการทำงานเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 360% เป็นต้น PSS จะช่วยให้ความสามารถในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพของระบบเพิ่มขึ้น แต่ PSS จะสร้างความหวังได้ไม่มากนัก โดยการแกว่งไกวจะถูกทำให้มีขนาดลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งหยุดลงที่เวลามากกว่า 10 วินาทีขึ้นไป และการใช้ PSS จะทำให้ค่าดัชนีการทำงานของระบบลดลงไปจากกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพประมาณ 73-81% และ 86-91% สำหรับกรณีของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบปกติ และการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบ 120% ตามลำดับ

การควบคุมด้วย SVC ซึ่งมีรูปควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถสร้างความหวังให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้เลย โดยระบบจะกลับเข้าสู่เสถียรภาพเมื่อเวลาผ่านไปหลายสิบลวินาทีด้วยความหวังซึ่งเป็นคุณลักษณะภายในของระบบเองเท่านั้น(รูปที่ 6.7 , 6.9 และ 6.11) แต่ในกรณีของการรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบที่ต้องมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดมากขึ้นนั้น การแกว่งไกวก็จะยังคงอยู่โดยไม่มีขนาดลดลงเลย(รูปที่ 6.8 , 6.10 และ 6.12) จึงจำเป็นต้องสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับ SVC (เรียกกรณีนี้ว่า FPSVC) การใช้ FPSVC จะสามารถสร้างความหวังให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างชัดเจน โดยจะพิจารณาได้จากผลการทดสอบในหัวข้อ 6.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแกว่งไกวจะเริ่มหยุดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 6 วินาที และระบบก็จะเริ่มกลับเข้าสู่จุดทำงานใหม่ โดยมีมุมโรเตอร์ค่าใหม่ การใช้ FPSVC จะทำให้ค่าดัชนีการทำงานของระบบลดลงไปจากกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพประมาณ 93-96% และ 97-99% สำหรับกรณีของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบปกติ และการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบ 120% ตามลำดับซึ่งถือว่าดีกว่ากรณีของ PSS

การควบคุมแบบผสมผสานระหว่าง PSS และ FPSVC จะสามารถสร้างความหวังให้กับระบบได้ โดยพิจารณาได้จากรูปในหัวข้อ 6.4 มุมของโรเตอร์จะเริ่มหยุดเมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาที และ ขนาดของการแกว่งไกวก็จะรุนแรงน้อยกว่าการใช้ FPSVC เพียงอย่างเดียวอีกด้วย โดยจะทำให้ค่าดัชนีการทำงาน ของระบบลดลงไปจากกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพประมาณ 97-98% และ 99% สำหรับกรณีของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลดแบบปกติ และ การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลดแบบ120%

การทดสอบในกรณีอื่นๆในหัวข้อ 6.5 พบว่าการใช้ PSS มากกว่า 1 ยูนิท สามารถปรับปรุงความหวังของระบบให้ดีขึ้นได้ , ความรุนแรงของการแกว่งไกวจะเพิ่มขึ้นถ้าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเพิ่มขึ้นซึ่งการใช้ FPSVC หรือ การควบคุมแบบผสมผสาน ก็จะสามารถสร้างความหวังในกรณีนี้ได้ดี นอกจากนี้การปล่อยให้การ ลัดวงจรยังคงอยู่ในระบบนานกว่าเวลาวิกฤติอาจจะทำให้ระบบเกิดการแกว่งไกวจนไม่สามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้อีก การใช้ PSS จะสามารถสร้างความหวังได้แต่ต้องใช้เวลาในการทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพ แต่ในกรณีของ FPSVC และการควบคุมแบบผสมผสานจะยังคงสร้างความหวังได้ดี อย่างไรก็ตามการลัดวงจรควรจะถูกกำจัดออกไปจากระบบให้เร็วที่สุด เพราะถึงแม้ว่าจะควบคุมให้เกิดความหวังเพื่อให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้ แต่ความร้อนและแรงทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลให้อุปกรณ์ต่างๆเกิดความเสียหายได้

จากผลการทดสอบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า PSS และ FPSVC สามารถสร้างความหวังให้กับระบบได้ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณอินพุตของอุปกรณ์ทั้ง 2 ซึ่งได้แก่ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ และ กำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้นจัดเป็นรูปแบบหนึ่งของการควบคุมแบบ  $\Delta\omega$  ซึ่งการควบคุมแบบนี้สามารถสร้างความหวังให้กับระบบได้ แต่สำหรับกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรที่มีสายส่งระยะไกลนั้น การใช้ FPSVC จะสามารถสร้างความหวังได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก SVC จัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยค่ารีแอกทีฟได้ จึงเหมาะกับระบบที่มีสายส่งระยะไกลซึ่งมีค่ารีแอกแตนซ์ค่อนข้างสูงกว่าระบบอื่นๆ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่มีความสนใจเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งอาจจะใช้ข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยของตนเอง มีดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นระบบที่มีมาตรฐานถูกต้องเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งระยะไกล ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการศึกษาเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้ถูกรวบรวมไว้ในวิทยานิพนธ์นี้แล้ว ผู้ที่สนใจสามารถใช้ข้อมูลค่าคงที่ของอุปกรณ์เหล่านี้ ศึกษาเสถียรภาพ ภายใต้งื่อนไขของการควบคุมแบบอื่นๆกับระบบที่ใช้ในการทดสอบได้อีก เช่น
  - 1.1. ตรวจสอบผลตอบสนองในกรณีที่ใช้เอกไซเตอร์ชนิดต่างๆ
  - 1.2. ตรวจสอบผลตอบสนองในกรณีที่มีการเพิ่มส่วนของ วงจรเชื่อมต่อกระแสตรง( DC Linked)เข้าไปในระบบ โดยอาจจะเป็นการต่อขนานกับสายส่งเดิม หรืออาจจะเป็นการเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งอยู่ในบริเวณอื่นๆ ที่ไกลออกไป
  - 1.3. ตรวจสอบผลของอุปกรณ์ FACTS ชนิดอื่นๆ เช่น TCSC, STATCOM, SMES หรือ UPFC เป็นต้น
  - 1.4. ตรวจสอบผลตอบสนองในกรณีของโหลดชนิดอื่นๆ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือ ซิงโครนัสมอเตอร์ เป็นต้น

เพียงแต่มีสิ่งที่จะต้องพึงระวังสำหรับผู้ที่จะนำข้อมูลไปใช้ คือ ข้อมูลนี้จะใช้ได้เฉพาะกับระบบแบบ 2 บริเวณซึ่งใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น และสายส่งระยะไกลซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบริเวณทั้ง 2 จะถูกจำกัดความยาวไว้ที่ 220 กิโลเมตรเท่านั้น ในกรณีที่ต้องการทดสอบกับระบบสายส่งที่มีความยาวมากกว่านี้จะต้องทำการทดสอบด้วยโปรแกรมโหลดโพล์ก่อน
2. การควบคุมด้วยวิธีพีชชีที่นำเสนอ เป็นวิธีง่ายแต่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจจึงมีความเป็นไปได้ที่ อาจทดลองใช้วิธีการนี้กับตัวควบคุมอื่นๆ ในระบบบ้างเช่น ใช้ในกรณีของ PSS
3. วิธีพีชชีแบบใช้เฟสเพลนที่นำเสนอนี้ ยังคงมีแกนของเฟสเพลนคงที่การปรับให้แกนในแนวตั้งและแนวนอนของเฟสเพลนให้เคลื่อนที่ได้ได้อย่างเหมาะสม อาจจะช่วยให้ได้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น
4. จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถใช้สนับสนุนได้ว่า FPSVC สามารถปรับปรุงเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้ แต่ไม่ได้หมายความว่า FPSVC จะเหมาะสมกับทุกๆระบบ เพราะในทางปฏิบัติ นอกจากจะพิจารณาจากผลตอบสนองที่ดีแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงงบประมาณด้วย ดังนั้นจึงอาจจะทำการทดลองกับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรรูปแบบอื่นๆ บ้าง เช่น ระบบ 3 เครื่องจักร 9 บัส ซึ่งข้อมูลของระบบเหล่านี้สามารถหาได้จากเอกสารของIEEEหรือจาก

อินเทอร์เน็ต จากนั้นจึงทำการสรุปและเปรียบเทียบว่าวิธีการใดเหมาะสมกับระบบรูปแบบใดมากที่สุด เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ ได้อย่างถูกต้อง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Chandra A., Malik O.P., Hope G.S. "A Self-Tuning Controller for the control of Multi-Machine Power Systems." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 3, no. 3, Aug 1998. pp. 1065-1071.
- [2] Zhang Y., Malik O.P., Chen G.P. "Artificial Neural Network Power System Stabilizers in Multi-Machine Power System Environment." IEEE Trans. on Energy Conversion., vol. 10, no. 1, Mar 1995. pp. 147-155.
- [3] Cheng C.H., Hsu Y.Y. "Application of a Power System Stabilizer and a Static Var Controller to a Multi-Machine Power Systems." IEE Proceeding., vol. 137, no. 1, Jan 1990. pp. 8-12.
- [4] Hiyama T. "Rule-Based Stabilizer for Multi-Machine Power Systems." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 5, no. 2, May 1990. pp. 403-411.
- [5] Horwill C., Baker M.H. "Static Var Compensator Design and Application for UK Transmission System Regulation." IEEE Con. on Advance in Power System Control., Hongkong, Nov 1991. pp. 129-134.
- [6] Lerch E., Povh D., Xu L. "Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillation." IEEE Trans. on Power System., vol. 6, no. 2, May 1991. pp. 524-535.
- [7] Zhou E.Z. "Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping." IEEE Trans. on Power System., vol. 8, no. 2, May 1993. pp. 655-661.
- [8] Taranto G.N., Falcao D.M. "A Genetic-Based Control Design for Damping Power System Inter-Area Oscillations." IEEE Con. on Decision and Control., Kobe, Dec 1996. pp. 4389-4394.
- [9] Noroozian M. "Damping of Inter-Area and Local Modes by use of Controllable Components." IEEE Trans. on Power Delivery., vol. 10, no. 4, Oct 1995. pp. 2007-2012.
- [10] Wang H.F. "Capability of the Static Var Compensator in Damping Power System Oscillations." IEE Proc-Gener. Transm Distrib., vol. 143, no. 4, Jul 1996. pp. 353-358.
- [11] Ramar K., Srinivas A. "Design of SVC Stabilizers for Multimachine Power System." IEEE Con. on Advance in power system control., Hong Kong, Nov 1991. pp. 112-118.

- [12] Chang C.S., Yu Q.Z., Liew A.C. "Genetic Algorithm Tuning of Fuzzy SVC for Damping Power System Inter-Area Oscillations." IEEE Con. on Advance in Power System Control., Hongkong, Nov 1997. pp. 509-514.
- [13] Smith J.R., Pierre D.A., Sadighi I. "A Supplementary Adaptive Var Unit Controller for Power System Damping." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 4, no. 3, Aug 1989. pp. 1017-1023.
- [14] Zhao Q., Jiang J. "Robust SVC Controller Design for Improving Power System Damping." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 10, no. 4, Nov 1995. pp. 1927-1932.
- [15] Shi J., Herron L.H. "Design and Implementation of a Fuzzy Logic Controller for Power System Stabilization." IEEE Con. on Control Application., Vancouver, B.C., Sep 1993. pp. 61-67.
- [16] Hiyama T. "Robustness of Fuzzy Logic Power System Stabilizers Applied to Multimachine Power System." IEEE Trans. on Energy Conversion., vol. 9, no. 3, Sep 1994. pp. 451-459.
- [17] Hiyama T., Yoshiteru U. "Integrated Fuzzy Logic Generator Controller for Stability Enhancement." IEEE Trans. on Energy Conversion., vol. 12, no. 4, Dec 1997. pp. 400-406.
- [18] Momoh J.A., Tomsovic K. "Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems." IEEE Trans. on Power System., vol. 10, no. 3, Aug 1995. pp. 1676-1690.
- [19] Marzan A.I., Masashi S., Yasuyuki O "On Fuzzy Control Based Static Var Compensator for Power System Stability Control." ANNPS'93, Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Forum on Applications of Neural Networks to Power System., Apr 1993. pp. 201-205.
- [20] Senjyu T., Molinas M. "Multi-Machine Power System Stabilization with FACTS Equipment Applying Fuzzy Control." IEEE Con. on Decision Control., Kobe, Dec 1996. pp. 2202-2207.
- [21] Dandeno P.L. "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analysis." IEEE Std 1110-1991, Mar 1991
- [22] Klein M., Rogers G.J., Kundur P. "A Fundamental Study of Inter-area Oscillation in Power System." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 6, no. 3, Aug 1991. pp. 914-921.
- [23] Graham J., Feliachi A. "Power Systems Transient Stability Enhancement Using Static Var Compensator." IEEE Trans. on Power Systems., 1998. pp. 233-237.

- [24] Lee D.C. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Study." IEEE Std 421.5-1992, Aug 1992
- [25] The Mathworks. "Matlab and Simulick." [Online]. Available : <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.shtml>. 2001.
- [26] Stevenson W.D. **Element of Power System Analysis**. Singapore : McGraw-Hill. 1982.
- [27] Vadhera S.S. **Power System Analysis and Stability**. Delhi : Khanna Publishers. 1994.
- [28] GEC Measurements. **Protective Relays Application Guide**. Stafford : St.Leonard's works. 1985.
- [29] Mason C.R. **The Art and Science of Protective Relaying**. Chichester : John Wiley & Sons. 1956.
- [30] Kundur P. **Power System Stability and Control**. Toronto : McGraw-Hill. 1994.
- [31] Gangadhar K.A. **Electric Power System Analysis, Stability and Protection**. Delhi : Khanna Publication. 1996.
- [32] Saadat H. **Power System Analysis**. Singapore : MaGraw-Hill. 1999.
- [33] Machowski J. **Power System Dynamic and Stability**. Chichester : John Wiley & Sons. 1997.
- [34] Olivera E.M. "Synchronizing and Damping Torque Coefficients and Power System Steady-State Stability as affected by static Var Compensator." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 9, no. 1, Feb 1994. pp. 109-119.
- [35] Cheng C.H., Hsu Y.Y. "Damping of Generator Oscillations using an Adaptive Static Var Compensator." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 7, no. 2, May 1992. pp. 718-725.
- [36] Indulkar C.S., Balder R. "Application of Fuzzy Controller to Automatic Generation Control." Electric Machine and Power System., 1995. pp. 209-220.
- [37] Sherbiny M.K., Saady G. "Efficient Incremental Fuzzy Logic Controller for Power System Stabilization." Electric Machine and Power System., 1997. pp. 429-441.
- [38] Ishigame A., Tomoyuki U. "Design of Electric Power System Stabilizer Based on Fuzzy Control Theory." IEEE Con. on Decision Control., Kobe, Dec 1992. pp. 973-980.
- [39] Hiyama T., Miyazaki K. "A Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power System with Multi-Mode Oscillations." IEEE Trans. on Energy conversion., vol. 11, no. 2, Jun 1996. pp. 449-454.

- [40] Ortmyer T.H., Hiyama T. "Frequency Response Characteristics of the Fuzzy Polar Power System Stabilizer." IEEE Trans. on Energy conversion., vol. 10, no. 2, Jun 1995. pp. 333-338.
- [41] Starrett S. "Welcome to the Flexible Control of Transmission System Home Page." [Online]. Available : <http://www.eece.ksu.edu/~starret/Flex/main2.htm>. 2001.
- [42] Sauer P.W. **Power System Dynamic and Stability**. New Jersey : PrenticeHall. 1998.
- [43] Padiyar K.R. **Power System Dynamics Stability and Control**. Singapore : Interline Publishing. 1995.
- [44] Basler M. "Power System Stability and the Role of Protective versus Excitation Control." 54<sup>th</sup> Annual Con. on Protective Relaying., Georgia Tech, Atlanta, May 2000. pp. 1-23.
- [45] Ong C.M. **Dynamic Simulation of Electrical Machinery**. New Jersey : PrenticeHall. 1997.
- [46] Smith J.R. **Three-Phase Electrical Machine Systems**. Great Britain : SRP Ltd. 1993.
- [47] Anderson P.M., Fouad A. **Power System Control and Stability**. Iowa : Galgotia Publications. 1981.
- [48] IEEE special stability controls working group. "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 9, no. 1, Feb 1994. pp. 229-240.
- [49] Taweechok P. "The Protection of Feeder and Distribution Systems." IEEE(Thailand section) Con. on Relay Protection., Bangkok, Aug 2001. pp. 5.1-5.24.
- [50] Rustebakke H.M. **Electric Utility System and Practices**. USA : Wiley-Interscience publication. 1982.
- [51] Hiyama T., Hubbi W. "Fuzzy Logic Control Scheme with Variable Gain for Static Var Compensator to Enhance Power System Stability." IEEE Trans. on Power Systems., vol. 14, no. 1, Feb 1999. pp. 186-191.
- [52] Rogers G. **Power System Oscillations**. USA : Kluwer Academic Publishers. 2000.

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## ผลการคำนวณโหลดโพล์

ตารางที่ ผ.1 โหลดโพล์กรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบปกติ ( Normal Loading)

Bus No.	Voltage		Load		Generation	
	Mag	Ang	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.030	0.0	0.0	0.0	549	86.9
2	1.010	-7.3	0.0	0.0	560	57.8
11	1.030	10.9	0.0	0.0	560	86.7
12	1.010	3.3	0.0	0.0	560	52.8
10	1.020	-5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	1.005	-12.6	0.0	0.0	0.0	0.0
110	1.020	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0
120	1.005	-1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.002	-18.9	1260	230	0.0	0.0
101	1.020	-13.7	0.0	0.0	0.0	0.0
13	1.003	-8.2	927	169	0.0	0.0

ตารางที่ ผ.2 โหลดโพล์กรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด 120%ของปกติ ( Heavy Loading)

Bus No.	Voltage		Load		Generation	
	Mag	Ang	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.030	0.0	0.0	0.0	702	158.3
2	1.010	-9.7	0.0	0.0	700	171.9
11	1.030	13.3	0.0	0.0	700	146.4
12	1.010	3.6	0.0	0.0	700	160.2
10	1.011	-6.4	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.988	-16.4	0.0	0.0	0.0	0.0
110	1.012	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0
120	0.990	-3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.979	-24.7	1575	288	0.0	0.0
101	0.995	-18.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.982	-11.2	1159	212	0.0	0.0

ตารางที่ ผ.3 ข้อมูลิมพีแดนซ์ที่ฐานกำลัง100MVA

Bus from	Bus to	R(pu.)	X(pu.)	B(pu.)
1	10	0.0	0.0167	0.0
2	20	0.0	0.0167	0.0
3	20	0.001	0.01	0.0175
3	101	0.011	0.11	0.1925
3	101	0.011	0.11	0.1925
10	20	0.0025	0.025	0.0437
11	110	0.0	1.0167	0.0
12	120	0.0	0.0167	0.0
13	101	0.011	0.11	0.1925
13	101	0.011	0.11	0.1925
13	120	0.001	0.01	0.0175
110	120	0.0025	0.025	0.0437

## ภาคผนวก ข.

## โปรแกรม

**% Transient stability program for 2-areas multi-machine power system**

```

ra=gendata(:, 5);xd=gendata(:,6);
xdd=gendata(:,7);Tdod=gendata(:,9);
xq=gendata(:, 11);xqd=gendata(:,12);
Tqod=gendata(:,14);H=gendata(:,16);
K=pssdata(:,3);T=pssdata(:,4);T1=pssdata(:,5);
T2=pssdata(:,6);T3=pssdata(:,7);T4=pssdata(:,8);
Tr=exdata(:,3);Ka=exdata(:,4);Ta=exdata(:,5);
Tb=exdata(:,6);Tc=exdata(:,7);
nf=7;
lfnewton %calculate load flow of the system
f=50;
ngr=gendata(:,1);
ngg=length(gendata(:,1));
for k=1:ngg
zdd(ngr(k))=gendata(k, 5)+j*gendata(k,7);
H(k)=gendata(k,16);
end
for k=1:ngg
phi(k)=atan(q(k)/p(k));
I(k)=conj(S(ngr(k)))/conj(V(ngr(k)));
ir(k)=I(k)*cos(phi(k));
ix(k)=I(k)*sin(phi(k));
Eqq(k)=(Vm(k)-xq(k)*ix(k)+ra(k)*ix(k))+j*(Vm(k)+ra(k)*ir(k)-xq(k)*ix(k));
Del_Bet(k)=atan((xq(k)*ir(k)+ra(k)*ix(k))/(Vm(k)+ra(k)*ir(k)-xq(k)*ix(k)));
vd(k)=-Vm(k)*sin(Del_Bet(k));
vq(k)=Vm(k)*cos(Del_Bet(k));

```

```

id(k)=-I(k)*sin(Del_Bet(k)-phi(k));
iq(k)=I*cos(Del_Bet(k)-phi(k));
Eqd(k)=vq(k)-id(k)*xdd(k);
Edd(k)=vd(k)-iq(k)*xdd(k);
pe(k)=vq(k)iq(k)+vd(k)*id(k);
pm(k)=pe(k)+I(k)^2*ra(k);
Dw(k)=0;
efd(k)=Eqd(k)+(xd(k)-xdd(k))*id(k);
vaa(k)=efd(k)/ka;
vas(k)=vaa(k);
vtr(k)=Vm(k);
vref(k)=Vm(k)+vaa(k);
pss1(k)=1; % machine speed at steady state
pss2(k)=0;
pss3(k)=0;
upss(k)=0;
end
del=angle(Eqa);
for k=1:ngg
nl(nbr+k) = nbus+k;
nr(nbr+k) = gendata(k, 1);
R(nbr+k) = real(zdd(ngr(k)));
X(nbr+k) = imag(zdd(ngr(k)));
Bc(nbr+k) = 0;
a(nbr+k) = 1.0;
yload(nbus+k)=0;
end
nbr1=nbr; nbus1=nbus;
nbrt=nbr+ngg;
nbust=nbus+ngg;
linedata=[nl, nr, R, X, -j*Bc, a];
[Ybus, Ybf]=ybusbf(linedata, yload, nbus1,nbust);

```

```

Ybusbf = Ybus;
Y=abs(Ybf); th=angle(Ybf);
Ydf=ybusdf(Ybus, nbus1, nbust, nf)
Yaf=ybusaf1(linedata, yload, nbus1,nbust, nf);
bcv=Qg(11)/(Vm(11)^2);
vref_s=Vm(11)+bcv/kr;
w1=0;z1=0;ep=0;usvc=0;
[s1,s2]=line_pq(Vm(7),Vm(11),R(7,3),x(7,4))%find power flow in the line.
p0=real(s1);
sbp=0.01;sap=90;sdrp=0.23;
step=0.005;sl=135;umfp=0.2;
tf=0.1;
tc=0.2;
ts=10;
%----- before fault -----
Y=Ybf;
for i=0:step:20
t(i)=i*step;
f=dfpek(Y);%predictive
%-----
dEdd_pr=dEdd(:,i);
dEqd_pr=dEqd(:,i);
ddel_pr=ddel(:,i);
dDw_pr=dDw(:,i);
dvtr_pr=dvtr(:,i);
dvas_pr=dvas(:,i);
defd_pr=defd(:,i);
dpss1_pr=dpss1(:,i);
dpss2_pr=dpss2(:,i);
dpss3_pr=dpss3(:,i);
dsupp2_pr=dsupp2(:,i);
dsupp3_pr=dsupp3(:,i);

```

```

dw1_pr=dw1(:,i);
dbcv_pr=dbcv(:,i);
%-----
Edd_pr=Edd(:,i);
Eqd_pr=Eqd(:,i);
del_pr=del(:,i);
Dw_pr=Dw(:,i);
vtr_pr=vtr(:,i);
vas_pr=vas(:,i);
efd_pr=efd(:,i);
pss1_pr=pss1(:,i);
pss2_pr=pss2(:,i);
pss3_pr=pss3(:,i);
supp2_pr=supp2(:,i);
supp3_pr=supp3(:,i);
w1_pr=w1(:,i);
bcv_pr=bcv(:,i);
%-----
Edd=Edd(:,i)+dEdd(:,i)*step;
Eqd=Eqd(:,i)+dEqd(:,i)*step;
del=del(:,i)+ddel(:,i)*step;
Dw=Dw(:,i)+dDw(:,i)*step;
vtr=vtr(:,i)+dvtr(:,i)*step;
vas=vas(:,i)+dvas(:,i)*step;
efd=efd(:,i)+defd(:,i)*step;
pss1=pss1(:,i)+dpss1(:,i)*step;
pss2=pss2(:,i)+dpss2(:,i)*step;
pss3=pss3(:,i)+dpss3(:,i)*step;
supp2=supp2(:,i)+dsupp2(:,i)*step;
supp3=supp3(:,i)+dsupp3(:,i)*step;
w1=w1(:,i)+dw1(:,i)*step;
bcv=bcv(:,i)+dbcv(:,i)*step;

```

```

%-----
f=dfpek(Y);%corrective
Edd(:,i)=Edd_pr(:,i)+(dEdd_pr+dEdd(:,i))*step/2;
Eqd(:,i)=Eqd_pr(:,i)+(dEqd_pr+dEqd(:,i))*step/2;
del(:,i)=del_pr(:,i)+(ddel_pr+ddel(:,i))*step/2;
Dw(:,i)=Dw_pr(:,i)+(dDw_pr+dDw(:,i))*step/2;
vtr(:,i)=vtr_pr(:,i)+(dvtr_pr+dvtr(:,i))*step/2;
vas(:,i)=vas_pr(:,i)+(dvas_pr+dvas(:,i))*step/2;
efd(:,i)=efd_pr(:,i)+(defd_pr+defd(:,i))*step/2;
pss1(:,i)=pss1_pr(:,i)+(dpss1_pr+dpss1(:,i))*step/2;
pss2(:,i)=pss2_pr(:,i)+(dpss2_pr+dpss2(:,i))*step/2;
pss3(:,i)=pss3_pr(:,i)+(dpss3_pr+dpss3(:,i))*step/2;
supp2(:,i)=supp2_pr(:,i)+(dsupp2_pr+dsupp2(:,i))*step/2;
supp3(:,i)=supp3_pr(:,i)+(dsupp3_pr+dsupp3(:,i))*step/2;
w1(:,i)=w1_pr(:,i)+(dw1_pr+dw1(:,i))*step/2;
bcv(:,i)=bcv_pr(:,i)+(dbcv_pr+dbcv(:,i))*step/2;
%-----
end
%----- during fault -----
Y=Ydf;
for i=21:step:40
t(i)=i*step;
f=dfpek(Y);%predictive
%-----
dEdd_pr=dEdd(:,i);
dEqd_pr=dEqd(:,i);
ddel_pr=ddel(:,i);
dDw_pr=dDw(:,i);
dvtr_pr=dvtr(:,i);
dvas_pr=dvas(:,i);
defd_pr=defd(:,i);
dpss1_pr=dpss1(:,i);

```

```

dpss2_pr=dpss2(:,i);
dpss3_pr=dpss3(:,i);
dsupp2_pr=dsupp2(:,i);
dsupp3_pr=dsupp3(:,i);
dw1_pr=dw1(:,i);
dbcv_pr=dbcv(:,i);
%-----
Edd_pr=Edd(:,i);
Eqd_pr=Eqd(:,i);
del_pr=del(:,i);
Dw_pr=Dw(:,i);
vtr_pr=vtr(:,i);
vas_pr=vas(:,i);
efd_pr=efd(:,i);
pss1_pr=pss1(:,i);
pss2_pr=pss2(:,i);
pss3_pr=pss3(:,i);
supp2_pr=supp2(:,i);
supp3_pr=supp3(:,i);
w1_pr=w1(:,i);
bcv_pr=bcv(:,i);
%-----
Edd=Edd(:,i)+dEdd(:,i)*step;
Eqd=Eqd(:,i)+dEqd(:,i)*step;
del=del(:,i)+ddel(:,i)*step;
Dw=Dw(:,i)+dDw(:,i)*step;
vtr=vtr(:,i)+dvtr(:,i)*step;
vas=vas(:,i)+dvas(:,i)*step;
efd=efd(:,i)+defd(:,i)*step;
pss1=pss1(:,i)+dpss1(:,i)*step;
pss2=pss2(:,i)+dpss2(:,i)*step;
pss3=pss3(:,i)+dpss3(:,i)*step;

```

```

supp2=supp2(:,i)+dsupp2(:,i)*step;
supp3=supp3(:,i)+dsupp3(:,i)*step;
w1=w1(:,i)+dw1(:,i)*step;
bcv=bcv(:,i)+dbcv(:,i)*step;
%-----
Ybus(11,11)=Ybus(11,11)+bcv(i);
lfnewton;
Ydf=ybusdf(Ybus, nbus1, nbust, nf);
Y=Ydf;
f=dfpek(Y);%corrective
Edd(:,i)=Edd_pr(:,i)+(dEdd_pr+dEdd(:,i))*step/2;
Eqd(:,i)=Eqd_pr(:,i)+(dEqd_pr+dEqd(:,i))*step/2;
del(:,i)=del_pr(:,i)+(ddel_pr+ddel(:,i))*step/2;
Dw(:,i)=Dw_pr(:,i)+(dDw_pr+dDw(:,i))*step/2;
vtr(:,i)=vtr_pr(:,i)+(dvtr_pr+dvtr(:,i))*step/2;
vas(:,i)=vas_pr(:,i)+(dvas_pr+dvas(:,i))*step/2;
efd(:,i)=efd_pr(:,i)+(defd_pr+defd(:,i))*step/2;
pss1(:,i)=pss1_pr(:,i)+(dpss1_pr+dpss1(:,i))*step/2;
pss2(:,i)=pss2_pr(:,i)+(dpss2_pr+dpss2(:,i))*step/2;
pss3(:,i)=pss3_pr(:,i)+(dpss3_pr+dpss3(:,i))*step/2;
supp2(:,i)=supp2_pr(:,i)+(dsupp2_pr+dsupp2(:,i))*step/2;
supp3(:,i)=supp3_pr(:,i)+(dsupp3_pr+dsupp3(:,i))*step/2;
w1(:,i)=w1_pr(:,i)+(dw1_pr+dw1(:,i))*step/2;
bcv(:,i)=bcv_pr(:,i)+(dbcv_pr+dbcv(:,i))*step/2;
%-----
Ybus(11,11)=Ybus(11,11)+bcv(i);
lfnewton;
Ydf=ybusdf(Ybus, nbus1, nbust, nf);
Y=Ydf;
end
%----- after fault -----
Y=Yaf;

```

```

for i=41:step:2000
t(i)=i*step;
f=dfpek(Y);%predictive
%-----
dEdd_pr=dEdd(:,i);
dEqd_pr=dEqd(:,i);
ddel_pr=ddel(:,i);
dDw_pr=dDw(:,i);
dvtr_pr=dvtr(:,i);
dvas_pr=dvas(:,i);
defd_pr=defd(:,i);
dpss1_pr=dpss1(:,i);
dpss2_pr=dpss2(:,i);
dpss3_pr=dpss3(:,i);
dsupp2_pr=dsupp2(:,i);
dsupp3_pr=dsupp3(:,i);
dw1_pr=dw1(:,i);
dbcv_pr=dbcv(:,i);
%-----
Edd_pr=Edd(:,i);
Eqd_pr=Eqd(:,i);
del_pr=del(:,i);
Dw_pr=Dw(:,i);
vtr_pr=vtr(:,i);
vas_pr=vas(:,i);
efd_pr=efd(:,i);
pss1_pr=pss1(:,i);
pss2_pr=pss2(:,i);
pss3_pr=pss3(:,i);
supp2_pr=supp2(:,i);
supp3_pr=supp3(:,i);
w1_pr=w1(:,i);

```

```

bcv_pr=bcv(:,i);
%-----
Edd=Edd(:,i)+dEdd(:,i)*step;
Eqd=Eqd(:,i)+dEqd(:,i)*step;
del=del(:,i)+ddel(:,i)*step;
Dw=Dw(:,i)+dDw(:,i)*step;
vtr=vtr(:,i)+dvtr(:,i)*step;
vas=vas(:,i)+dvas(:,i)*step;
efd=efd(:,i)+defd(:,i)*step;
pss1=pss1(:,i)+dpss1(:,i)*step;
pss2=pss2(:,i)+dpss2(:,i)*step;
pss3=pss3(:,i)+dpss3(:,i)*step;
supp2=supp2(:,i)+dsupp2(:,i)*step;
supp3=supp3(:,i)+dsupp3(:,i)*step;
w1=w1(:,i)+dw1(:,i)*step;
bcv=bcv(:,i)+dbcv(:,i)*step;
%-----
linedata(nf,4)=1.0e7;
Ifybus %calculate Ybus for loadflow
Ybus(11,11)=Ybus(11,11)+bcv(i);
lfnewton;
Yaf=ybusaf2(Ybus, nbus1, nbust, nf);
Y=Yaf;
f=dfpek(Y);%corrective
Edd(:,i)=Edd_pr(:,i)+(dEdd_pr+dEdd(:,i))*step/2;
Eqd(:,i)=Eqd_pr(:,i)+(dEqd_pr+dEqd(:,i))*step/2;
del(:,i)=del_pr(:,i)+(ddel_pr+ddel(:,i))*step/2;
Dw(:,i)=Dw_pr(:,i)+(dDw_pr+dDw(:,i))*step/2;
vtr(:,i)=vtr_pr(:,i)+(dvtr_pr+dvtr(:,i))*step/2;
vas(:,i)=vas_pr(:,i)+(dvas_pr+dvas(:,i))*step/2;
efd(:,i)=efd_pr(:,i)+(defd_pr+defd(:,i))*step/2;
pss1(:,i)=pss1_pr(:,i)+(dpss1_pr+dpss1(:,i))*step/2;

```

```

pss2(:,i)=pss2_pr(:,i)+(dpss2_pr+dpss2(:,i))*step/2;
pss3(:,i)=pss3_pr(:,i)+(dpss3_pr+dpss3(:,i))*step/2;
supp2(:,i)=supp2_pr(:,i)+(dsupp2_pr+dsupp2(:,i))*step/2;
supp3(:,i)=supp3_pr(:,i)+(dsupp3_pr+dsupp3(:,i))*step/2;
w1(:,i)=w1_pr(:,i)+(dw1_pr+dw1(:,i))*step/2;
bcv(:,i)=bcv_pr(:,i)+(dbcv_pr+dbcv(:,i))*step/2;
%-----
linedata(nf,4)=1.0e7;
lfybus %calculate Ybus for loadflow
Ybus(11,11)=Ybus(11,11)+bcv(i);
lfnewton;
Yaf=ybusaf2(Ybus, nbus1, nbust);
Y=Yaf;
end
%-----
for k_111 = 1:nbus_111
if bustype_111(k_111) ==1;
ms_111 = k_111;
else, end
end
kk_111 = 0;
for k_111 = 1:ngg
if k_111 ~=ms_111
kk_111 = kk_111+1;
d_ang(kk_111,:)= 180/pi*(del(k_111,:)-del(ms_111,:));
else,end
end
h=figure; figure(h);
plot(t,d_ang(2,:));
grid on
%-----

```

**% Dynamic stage of the multimachine system**

```

function f = dfpek(Yrd)
global Pm f H E Y th ngg
GG=real(Yrd);
BB=imag(Yrd);
dEdd(:,i)=(-Edd(:,i)+(xq-xqd).*iq)./Tqod;
dEqd(:,i)=(efd(:,i)-Eqd(:,i)-(xd-xdd).*id)./Tdod;
for ii = 1:ngg
for kk = 1:ngg
if ii=kk
M(ii,kk)=GG(ii,kk);
N(ii,kk)=BB(ii,kk);
else
M(ii,kk)=GG(ii,kk)*cos(del(ii)-del(kk))+BB(ii,kk)*sin(del(ii)-del(kk));
N(ii,kk)=BB(ii,kk)*cos(del(ii)-del(kk))+GG(ii,kk)*sin(del(ii)-del(kk));
end
end, end
iq=M*vq-N*vd;
id=N*vq-M*vd;
vd=Edd(:,i)-ra.*id+xdd*iq;
vq=Eqd(:,i)-ra.*id+xdd*id;
vt=sqrt(vd.^2+vq.^2);
ia=sqrt(id.^2+iq.^2);
pe=vd.*id+vq.*iq;
ddel(:,i)=Dw(:,i);
dDw(:,i)=(pm-pe).*(pi*f./H);
z11=(Dw+1-pss1(:,i))./T; %Dw=w-1
z22=z11.*K.*T1./T2+pss2(:,i);
dpss1(:,i)=z11;
dpss2(:,i)=(1-(T1./T2)).*K.*z11-(pss2(:,i))./T2;
dpss3(:,i)=(1-(T3./T4)).*z22-(pss3(:,i))./T4;
upss(:,i)=z22.*T3./T4+pss3(:,i);

```

```

for k=1:ngg
upss(k,i)=min(pss_max,max(upss,-pss_min));
end
dvtr(:,i)=vt-vtr(:,i)/.Tr;
dvas(:,i)=vref-vtr(:,i)+upss(:,i)-vas(:,i)/Tb;
vaa=(Tc./Tb).*(vref-vtr(:,i)+upss(:,i)+(1-(Tc./Tb)).*vas(:,i));
defd(:,i)=vaa.*Ka-efd(:,i)/Ta;
for k=1:ngg
if efd(k,i)>ex_max
efd(k,i)=ex_max
if defd(k,i)>0
defd(k,i)=0
end,end
for k=1:ngg
if efd(k,i)<ex_min
efd(k,i)=ex_min
if defd(k,i)<0
defd(k,i)=0
end,end,end
if n_svc~=0
[s1,s2]=line_pq(Vm(7),Vm(11),R(7,3),x(7,4))%find power flow in the line.
p_flow = real(S1);
var1 = p_flow-p0;
dsupp2(:,i) = (var1-sup2(:,i))/ 0.01; % dz1 = (DeltaPc-z1)/Tm
dsupp3(:,i) = ((var1-sup2(:,i))/ 0.01)-(sup3(:,i)/0.5);% dEp = (DeltaPc-z1)/Tm - Ep/Tr
%=====
%===== Phase Plane type Fuzzy Logic Controller =====
for kk = 1:n_svc
ep(kk) = supp3(kk,k);
end
ep = ep';
epdat = (ep - ep_prev)/(steptime*2);

```

```

sdep = sbp.*epdat;

ep_prev = ep;

sdkp = sqrt((sdep.^2)+(ep.^2));

%===== Calculate angle of P(k) point =====

for kk = 1:n_svc

if (sdep(kk)>0 & ep(kk)>0)

stkp(kk) = (asin(sdep(kk)/sdkp(kk)))*(180/pi);

elseif (sdep(kk)>0 & ep(kk)<0)

stkp(kk) = -(asin(sdep(kk)/sdkp(kk)))*(180/pi)+180;

elseif (sdep(kk)<0 & ep(kk)<0)

stkp(kk) = -(asin(sdep(kk)/sdkp(kk)))*(180/pi)+180;

elseif (sdep(kk)<0 & ep(kk)>0)

stkp(kk) = (asin(sdep(kk)/sdkp(kk)))*(180/pi)+360;

else,end

%===== Calculate membership value: mN =====

if (stkp(kk)>=0 & stkp(kk) < (sl-(sap/2)))

snkp(kk) = 1.0;

elseif (stkp(kk)>=(sl-(sap/2)) & stkp(kk)<(sl+(sap/2)))

snkp(kk) = ((sl-stkp(kk))/sap) + 0.5;

elseif (stkp(kk)>=(sl+(sap/2)) & stkp(kk)<(sl+180-(sap/2)))

snkp(kk) = 0;

elseif (stkp(kk)>=(sl+180-(sap/2)) & stkp(kk)<(sl+180+(sap/2)))

snkp(kk) = ((stkp(kk)-(sl+180))/sap) + 0.5;

elseif (stkp(kk)>=(sl+180+(sap/2)) & stkp(kk)<=360)

snkp(kk) = 1.0;

else,end

%===== Calculate membership value: mG =====

sgkp(kk) = sdkp(kk)/sdrp;

if (sgkp(kk)>1)

sgkp(kk) = 1;

end

```

```

%===== Calculate Supplementarysignal:USVC=====
usvc1(kk) = ((2.0*snkp(kk))-1)*umfp*sgkp(kk);
if (usvc1(kk) < -umfp)
usvc1(kk) = -umfp;
elseif (usvc1(kk) > umfp)
usvc1(kk) = umfp;
else,end
end
usvc(:,i) = usvc1';
%=====
err=vref_s-Vm(11);
dw1(:,i)=(err-w1(:,i))/Tv;
w2=w1(:,i)+usvc(:,i);
dbcv(:,i)=(w2*kr-bcv(:,i))/Trr;
end
f=0;%dummy

```

**% This function forms the reduce bus admittance matrix including load admittances before**

**fault**

```

function [Ybus, Ybf] = ybusbf(linedata, yload, nbus1, nbust)
Ifybus % create Ybus of GEN combined network
for k=1:nbust
Ybus(k,k)=Ybus(k,k)+yload(k);
end
YLL=Ybus(1:nbus1, 1:nbus1);
YGG = Ybus(nbus1+1:nbust, nbus1+1:nbust);
YLG = Ybus(1:nbus1, nbus1+1:nbust);
Ybf=YGG-YLG.*inv(YLL)*YLG;

```

**% This function forms the reduce bus admittance matrix including load admittances during**

**fault**

```

function Ydf = ybusdf(Ybus,nbus1,nbust,nf)
Ybus(nf,nf)=1.0/1e-7; %fault
YLL=Ybus(1:nbus1, 1:nbus1);
YGG = Ybus(nbus1+1:nbust, nbus1+1:nbust);
YLG = Ybus(1:nbus1, nbus1+1:nbust);
Ydf=YGG-YLG.*inv(YLL)*YLG;

```

**% This function forms the reduce bus admittance matrix including load admittances after fault**

```

function Yaf = ybusaf1(linedata, yload, nbus1, nbust)
linedata(nf,4)=1.0e7;
lfybus % create Ybus of GEN combined network
for k=1:nbust
Ybus(k,k)=Ybus(k,k)+yload(k);
end
YLL=Ybus(1:nbus1, 1:nbus1);
YGG = Ybus(nbus1+1:nbust, nbus1+1:nbust);
YLG = Ybus(1:nbus1, nbus1+1:nbust);
Yaf=YGG-YLG.*inv(YLL)*YLG;

```

**% This function forms the reduce bus admittance matrix including load admittances after fault**

```

function Yaf = ybusaf2(Ybus,nbus1,nbust)
YLL=Ybus(1:nbus1, 1:nbus1);
YGG = Ybus(nbus1+1:nbust, nbus1+1:nbust);
YLG = Ybus(1:nbus1, nbus1+1:nbust);
Yaf=YGG-YLG.*inv(YLL)*YLG;

```

**% This program is for calculate performance index value**

```
j_ar=zeros(1,4);
for ap1 = 0:0.05:1.0
for ap2 = 0:5:90
for ap3 = 0:0.1:1.0
stab_cal % call stability program
g1=d_ang(2,:);
g=1;
n=0;
for k = 1600:2000
g=g*g1(k);
n=n+1;
end
gm=g^(1/n);%calculate geomean of data
g2=abs(g1-gm);
g3=g2.*t;
l=length(g3);
g4=0;
for k = 1:l
g4=g4+g3(k);%performance index
end
j=[g4 ap1 ap2 ap3];
j_ar=[j_ar;j];
end,end
end
```

## ภาคผนวก ค.

## ค่าดัชนีการทำงานของการควบคุมเสถียรภาพแบบต่างๆ

ตารางที่ ผ.4 ค่าดัชนีการทำงานที่ได้จากการทดสอบกรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบปกติ

คำอธิบาย	ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้ SVC	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้ FPSVC	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้ PSS	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้การควบคุมแบบผสมผสาน
เกิดการลัดวงจรที่บัส 3	150,457	142,159	10,676	32,901	3,501
เกิดการลัดวงจรที่บัส 101	67,967	63,948	2,682	12,902	1,417
เกิดการลัดวงจรที่บัส 13	40,469	54,480	2,682	10,977	1,408

ตารางที่ ผ.5 ค่าดัชนีการทำงานที่ได้จากการทดสอบกรณีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด 120% ของแบบปกติ

คำอธิบาย	ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพ	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้ SVC	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้ FPSVC	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้ PSS	ควบคุมเสถียรภาพโดยใช้การควบคุมแบบผสมผสาน
เกิดการลัดวงจรที่บัส 3	670,940	622,330	21,966	79,836	4,314
เกิดการลัดวงจรที่บัส 101	310,796	290,640	3,898	28,815	1,794
เกิดการลัดวงจรที่บัส 13	249,540	323,414	4,295	33,691	2,133

**ตารางที่ ผ.6** เปอร์เซ็นต์ของค่าดัชนีการทำงานที่ลดลง โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพกับการควบคุมแบบต่างๆ โดยระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบปกติ

คำอธิบาย	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้ PSS	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้ SVC	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้ FPSVC	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้การควบคุม แบบผสมผสาน
เกิดการลัดวงจรที่บัส3	78%	6%	93%	98%
เกิดการลัดวงจรที่บัส101	81%	6%	96%	98%
เกิดการลัดวงจรที่บัส13	73%	-35%	93%	97%

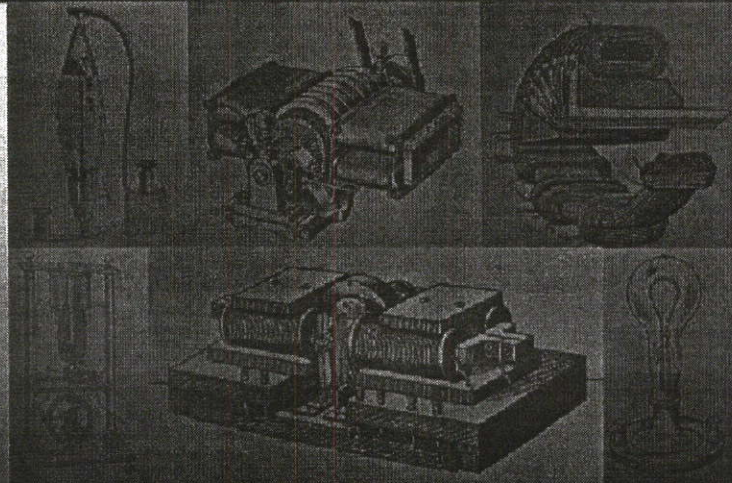
**ตารางที่ ผ.7** เปอร์เซ็นต์ของค่าดัชนีการทำงานที่ลดลง โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการควบคุมเสถียรภาพกับการควบคุมแบบต่างๆ โดยระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด120% ของแบบปกติ

คำอธิบาย	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้ PSS	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้ SVC	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้ FPSVC	ควบคุมเสถียรภาพ โดยใช้การควบคุม แบบผสมผสาน
เกิดการลัดวงจรที่บัส3	88%	7%	97%	99%
เกิดการลัดวงจรที่บัส101	91%	6%	99%	99%
เกิดการลัดวงจรที่บัส13	86%	-30%	98%	99%

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24  
24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



22 - 23 พฤศจิกายน 2544

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

PW39	การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางโดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน Vector Control Strategies for a Doubly-fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine พีเชษฐ นัศรพาน วิจิตร กิณเรศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	223
<b>PW-H</b>		
PW40	การพยากรณ์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าระยะปานกลางของระบบจำหน่ายโดยใช้เครือข่ายประสาท Medium term electric energy forecasting for distribution system using an artificial neural network วันชัย จันทร์ภมรด วิจิต เครือสุข มหาวิทยาลัยศรีปทุม	229
PW41	การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้การประมาณค่าพหุนาม Analysis of Optimum PV System by Using Polynomial Approximation แสนศักดิ์ สีสอน ศิริวัฒน์ ไพธเวชกุล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	234
PW42	การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบสำหรับทดสอบฉนวนไฟฟ้า 200 กิโลโวลต์ 250 กิโลเฮิร์ตซ์ Design and Construction of a Tesla Transformer for Testing Electrical Insulator 200 kV 250 kHz กนกพล นาคะวิวัฒน์ สุภาวดี กัมภีรานนท์ จงรักณ์ บุญแข็ง พร้อมศักดิ์ อภิรติคุณ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	240
PW43	การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับทรานสดูชั่นหม้อแปลงที่ไวทางกล Energy Transfer from PV Systems by Using a Combination of MPPT Converter and Mechanical PV Panel Tracking สุวิธา สุริยกานนท์ ณอนนชัย เป็ญจสมิต โยธิน ศิริวัฒน์ ไพธเวชกุล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	246
PW44	การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ควบคุมด้วยพีซีเชิงข้อจรนินคัลเฟสทอน The Stability Increasing of Multi-Machine Power System using Static Var Compensator controlled by the Phase Plane Type Fuzzy Logic กิตติ โพธิ์รัง มณฑล สีธารจินดาไกรฤกษ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	252

# การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ควบคุมด้วย ฟัซซี่ลอจิกชนิดเฟสเพลน

## The Stability Increasing of Multi-Machine Power System using Static Var Compensator controlled by the Phase Plane Type Fuzzy Logic.

กิตติ โพธิ์รัง และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. (02)324-0505 E-mail: kitti.phorang@th.abb.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอแนวความคิดในการประยุกต์ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดเฟสเพลน เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์(Static Var Compensator, SVC) โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบที่ใช้ทดสอบคือระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์จำนวน 4 เครื่อง โดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณและถูกเชื่อมต่อกันด้วยระบบสายส่งระยะไกล SVCจะถูกติดตั้งที่สายส่งซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างบริเวณทั้ง 2 นี้ สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี่คือ สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งซึ่งเชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้ง SVC การศึกษาด้วยระบบจำลองบนคอมพิวเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงผลของระบบควบคุมที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อมีการรบกวนซึ่งได้แก่ การเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดินขึ้นในระบบ โดยจะเปรียบเทียบผลของการควบคุมเสถียรภาพระหว่าง กรณีของการควบคุมด้วยตัวควบคุมเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง(PSS) เพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นวิธีการควบคุมตามปกติ กับกรณีที่มีการทำงานร่วมกันระหว่าง PSS และ SVC ซึ่งถูกควบคุมด้วยฟัซซี่

### Abstract

This paper presents the idea of applying phase plane type fuzzy logic controller for generating the supplementary control signal to the static var compensator (SVC) for the purpose of power system stability improvement. The test system is a two-area multi-machine power system consisting of 4 synchronous generators. The SVC is installed at the transmission line that is linked between two power system areas. The input signal of fuzzy controller is the power flowing in the transmission line connected to the SVC bus. The simulation results demonstrate the effect of the controller in power system stability

when a 3-phase to ground short circuit disturbance has occurred. Comparison results of stability control between the conventional method of power system stabilizer (PSS) and the PSS with SVC controlled by fuzzy are shown.

### 1. บทนำ

ปัจจุบัน ความต้องการทางด้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้สภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้ามีความกดดันมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องขยายและเชื่อมต่อบริเวณไฟฟ้ากำลังต่างๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆ เหล่านี้ ได้ทำงานผสมผสานกัน และช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดทั้งระบบอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูงและปัญหาเรื่องสภาพแวดล้อม ทำให้การขยายของระบบไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก ผลจากการที่ไม่สามารถขยายระบบผลิตพลังงานให้เพียงพอับความต้องการที่เพิ่มขึ้นก็คือปัญหาเรื่องเสถียรภาพ การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการติดตั้ง ตัวควบคุมเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง(PSS) เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกถกกันดี[1-2] แต่สำหรับระบบที่ต้องมีการส่งถ่ายพลังงานผ่านสายส่งระยะทางไกลๆ นั้น การควบคุมด้วย PSS จะให้ผลที่ไม่ดีนัก ซึ่งในกรณีนี้การใช้ SVC จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบได้ดีกว่า [3-5]

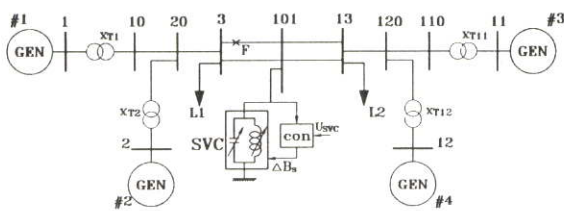
การใช้ SVC ในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ถือเป็นแนวความคิดหนึ่งที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งต่างจากสมัยก่อนที่ SVC จะถูกนำมาใช้ในการรักษาแรงดันที่บัส หรือใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังเท่านั้น แต่การติดตั้ง SVC เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังเพียงอย่างเดียว นั้น ไม่สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้ จำเป็นต้องมีการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมเพิ่มให้กับควบคุมแรงดันของ SVC ด้วย [6-7] ปัจจุบันได้มีการนำแนวคิดของฟัซซี่มาประยุกต์กับระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้น [8-11] ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมชนิดฟัซซี่มีความยืดหยุ่นที่ดี ต่อระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งยังไม่ต้องมีการคำนวณที่ซับซ้อน ซึ่งจะทำให้เวลาที่ใช้ในการ

คำนวณสัญญาณควบคุมลดลง และเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบเรียลไทม์

บทความนี้จะเสนอการนำหลักการของฟuzzyซึ่งมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับSVC โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบที่ใช้ทดสอบคือ ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรดังรูปที่1 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสจำนวน 4 เครื่อง โดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณและเชื่อมต่อกันด้วยระบบสายส่งระยะไกล SVCจะถูกติดตั้งที่จุดกึ่งกลางของสายส่ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความหน่วงของการแกว่งไกวอันมีสาเหตุเนื่องจากการรบกวน คือการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ณ จุด F ในรูปที่1 สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมฟuzzy คือ สัญญาณส่วนเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่เชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้งSVC ซึ่งได้แก่สายส่งระหว่างบัสหมายเลข3และบัสหมายเลข101 โดยจะทำการสุ่มสัญญาณในทุกๆช่วงเวลา เพื่อที่จะใช้กำหนดสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังบนเฟสเฟลน ปริมาณของกำลังงานไฟฟ้าที่รีแอกทีฟ ซึ่งจะถูกปรับหรือจ่ายโดยSVC จะถูกคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟuzzy ผลการศึกษาด้วยระบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรแสดงให้เห็นถึงผลของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ควบคุมด้วยฟuzzy ซี่ลอจิกชนิดเฟสเฟลน (Phase Plane Type Fuzzy Logic Static Var Compensator, FPSVC) ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบ โดยจะแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีระบบถูกควบคุมด้วย PSS เพียงอย่างเดียวกับกรณีที่มีการติดตั้ง FPSVC เพิ่มเข้าไปที่สายส่ง

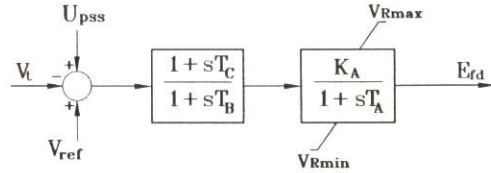
2. ระบบจำลอง

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบได้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร (Multi-Machine Power System) [12] ดังรูปที่1

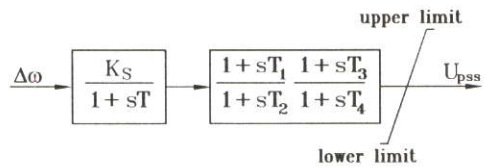


รูปที่1 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

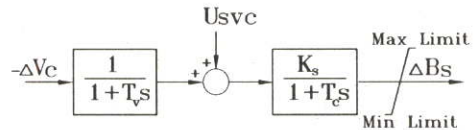
ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะติดตั้ง AVR โดยมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่2 ส่วนบล็อกไดอะแกรมของ PSS และ SVC แสดงดังรูป 3และ4 ตามลำดับ



รูปที่2 บล็อกไดอะแกรมของ AVR



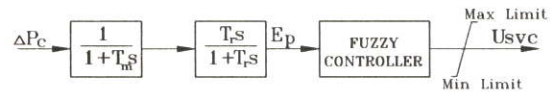
รูปที่3 บล็อกไดอะแกรมของ PSS



รูปที่4 บล็อกไดอะแกรมของ SVC

3. ตัวควบคุมฟuzzyชนิดเฟสเฟลน

บล็อกไดอะแกรมของ ตัวควบคุมฟuzzy แสดงดังในรูปที่ 5



รูปที่5 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟuzzy

สัญญาณ ΔP<sub>C</sub> ซึ่งเป็นส่วนเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่างบัสหมายเลข3 และบัสหมายเลข101ซึ่งเชื่อมต่อกับบัสที่ติดตั้ง SVC จะถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม สัญญาณนี้จะถูกนำไปผ่านบล็อกการวัด และ บล็อกวางจรรยาบรรณ โดยจะได้สัญญาณ E<sub>p</sub> ซึ่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่บล็อกของตัวควบคุมฟuzzyต่อไป

ภายในบล็อกของฟิซซี่จะมีการคำนวณหา อัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $E_p$  ซึ่งจะแทนด้วย  $E_p^*$  ดังสมการที่ 1

$$E_p^* = \frac{E_p(k) - E_p(k-1)}{T} \tag{1}$$

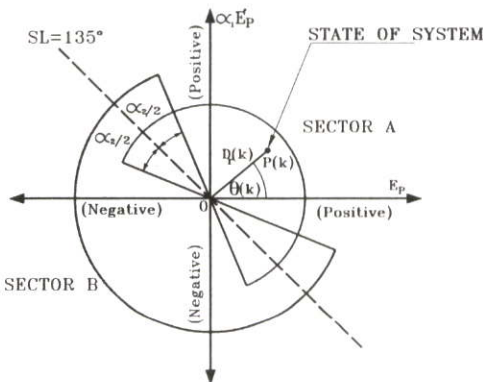
$E_p^*$  ที่คำนวณได้ จะถูกคูณเข้ากับ  $\alpha_1$  เป็น  $\alpha_1 E_p^*$  โดย  $\alpha_1$  คือแฟกเตอร์ปรับสเกล โดยจะใช้  $E_p$  และ  $\alpha_1 E_p^*$  ที่ได้นี้ เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุด  $P(k)$  บนเฟสเพลนโดย

$$P(k) = Dr(k) \angle \theta(k) \tag{2}$$

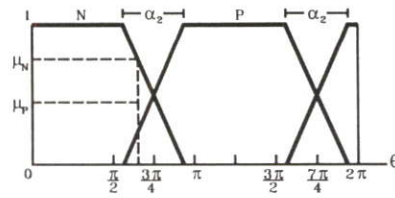
$$Dr(k) = \sqrt{E_p(k)^2 + (\alpha_1 E_p^*(k))^2} \tag{3}$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}(\alpha_1 E_p^*(k) / E_p(k)) \tag{4}$$

ตำแหน่งของ  $P(k)$  บนเฟสเพลนจะถูกใช้แทนสภาวะระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาใดๆ โดยจุดศูนย์กลางของระบบก็คือ จุดกำเนิดบนเฟสเพลน หลักการควบคุมก็คือการทำให้จุด  $P(k)$  เคลื่อนเข้าสู่จุดกำเนิดให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ค่าของมุม  $\theta$  จะเป็นตัวกำหนดว่า SVC จะจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยพื้นที่ในจตุภาคที่ 1 และ 3 ของเฟสเพลน จะเป็นตำแหน่งที่ SVC จ่ายและรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามลำดับ ส่วนจตุภาคที่ 2 และ 4 จะเป็นบริเวณของฟิซซี่ซึ่ง SVC จะมีทั้งการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\theta$  คือ  $\mu_N(\theta)$  และ  $\mu_P(\theta)$  แสดงดังรูปที่ 7 โดยมีพารามิเตอร์  $\alpha_2$  เป็นตัวกำหนดความกว้างของบริเวณของฟิซซี่

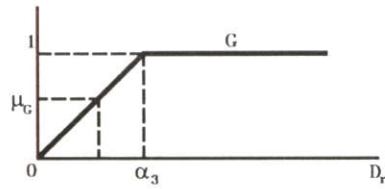


รูปที่ 6 เฟสเพลน



รูปที่ 7 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $\theta$

สำหรับปริมาณของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะถูกกำหนดด้วย  $Dr$  ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความรุนแรงของการรบกวนกล่าวคือ ถ้า  $Dr$  มีค่าสูงหมายความว่า การรบกวนมีความรุนแรงมาก และต้องมีการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในปริมาณมาก โดยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $Dr$  คือ  $\mu_G(k)$  ดังรูปที่ 8 โดยมีพารามิเตอร์  $\alpha_3$  เป็นตัวปรับสเกล



รูปที่ 8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $Dr$

จากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถหาสัญญาณควบคุมได้ดังนี้

$$U_f = (2\mu_N(k) - 1)\mu_G(k)U_{max} \tag{5}$$

โดย  $U_{max}$  คือ ค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุม

สัญญาณควบคุมเสริม  $U_{svc}$  ซึ่งเป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมฟิซซี่ จะถูกสร้างขึ้นในทุกๆช่วงเวลา โดย

$$U_{svc} = U_f(k) \text{ for } kT \leq t < (k+1)T \tag{6}$$

เมื่อ  $k = 1, 2, 3, \dots, n$  และ  $T =$  ช่วงเวลาสุ่ม(Sampling Time)

ซึ่งสัญญาณ  $U_{svc}$  นี้จะถูกเพิ่มเข้าไปในรูปการควบคุมแรงดันของ SVC เพื่อช่วยให้ความสามารถในการรักษาเสถียรภาพเพิ่มขึ้น

#### 4. การปรับตัวแปรควบคุมของฟิซซี

การหาพารามิเตอร์  $\alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ที่เหมาะสมของฟิซซี จะใช้สมการดัชนีการทำงาน[13]

$$J = \sum_{k=1}^n (|\Delta\omega(k)| t_k) \quad (7)$$

$\Delta\omega$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจากสมการพบว่า  $\Delta\omega$  จะถูกถ่วงน้ำหนักไปกับช่วงเวลา  $t_k$  โดยถ่วงน้ำหนักมาก  $\Delta\omega$  ก็จะถูกคูณด้วยค่าที่มากขึ้นด้วย โดย  $t_k = kT$  ค่าของ  $\alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  จะถูกสุ่มแทนลงไปนในสมการที่ 7 ไปเรื่อยๆเพื่อหา  $\alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ที่ทำให้  $J$  มีค่าต่ำที่สุด จากนั้นจึงเอาค่าของ  $\alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ที่ได้ไปใช้ในการควบคุมต่อไป

#### 5. การทดลอง

ประสิทธิภาพของ FPSVC จะถูกทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 เครื่อง โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข1เป็นตัวอ้างอิง การทดสอบจะพิจารณาจากผลตอบสนองของมุม  $\delta_{21}, \delta_{31}$  และ  $\delta_{41}$  ซึ่งเป็นมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข2,3และ4 ตามลำดับ โดยจะจำลองการเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงคืนที่จุดF โดยการลัดวงจรจะถูกกำจัดในเวลา 0.1 วินาที สำหรับค่าของพารามิเตอร์ต่างๆจะแสดงดังตารางที่1

การทดสอบจะแบ่งการควบคุมออกเป็น 3 กรณี คือ

- 5.1) ระบบไม่มีการควบคุมใดๆเลย
- 5.2) ระบบถูกควบคุมด้วยPSS จำนวน1และ2ตัว ดังรูปที่9และ10 ตามลำดับ
- 5.3) ระบบถูกควบคุมด้วย PSS ร่วมกับ FPSVC

ตารางที่1(a) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง(pu.)

1 ⇔ 10 :0.016j	, 3 ⇔ 20 :0.001+0.01j
2 ⇔ 20 :0.016j	, 3 ⇔ 101 :(0.01+0.1j)x2
11 ⇔ 110 :0.016j	, 10 ⇔ 20 :0.002+0.02j
12 ⇔ 120 :0.016j	, 13 ⇔ 101 :(0.01+0.1j)x2
13 ⇔ 120 :0.001+0.01j	, 110 ⇔ 120 :0.002+0.02j

ตารางที่1(b) ค่าเริ่มต้นของระบบ (100MVA Base)

G1: P = 7.01(pu.), Q = 2.16(pu.), Vt0 = 1.03(pu.)
G2: P = 7.00(pu.), Q = 3.08(pu.), Vt0 = 1.01(pu.)
G3: P = 7.00(pu.), Q = 1.96(pu.), Vt0 = 1.03(pu.)
G4: P = 7.00(pu.), Q = 2.62(pu.), Vt0 = 1.01(pu.)

ตารางที่1(c) ค่าคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, AVR, PSS และ FPSVC

G1 : H=6.5s, X <sub>d</sub> =1.8, X' <sub>d</sub> =0.25, T' <sub>do</sub> =8, X <sub>q</sub> =1.7, X' <sub>q</sub> =0.25 T' <sub>qo</sub> =8
G2 : H=6.175s, X <sub>d</sub> =1.8, X' <sub>d</sub> =0.25, T' <sub>do</sub> =8, X <sub>q</sub> =1.7, X' <sub>q</sub> =0.25 T' <sub>qo</sub> =8
G3 : H=6.5s, X <sub>d</sub> =1.8, X' <sub>d</sub> =0.25, T' <sub>do</sub> =8, X <sub>q</sub> =1.7, X' <sub>q</sub> =0.25 T' <sub>qo</sub> =8
G4 : H=6.175s, X <sub>d</sub> =1.8, X' <sub>d</sub> =0.25, T' <sub>do</sub> =8, X <sub>q</sub> =1.7, X' <sub>q</sub> =0.25 T' <sub>qo</sub> =8
AVR : K <sub>A</sub> =200, T <sub>C</sub> =0.01, T <sub>B</sub> =10, T <sub>A</sub> =1.0
PSS : K=300, T=20, T <sub>1</sub> =0.06, T <sub>2</sub> =0.04, T <sub>3</sub> =0.08, T <sub>4</sub> =0.04
FPSVC : K=10, T <sub>C</sub> =0.05, T <sub>V</sub> =0.01, $\alpha_1$ = 0.01, $\alpha_2$ =90, $\alpha_3$ =0.23, T <sub>m</sub> =0.01, T <sub>r</sub> =4.0

รูปที่9(a) และ 10(a) แสดงผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 2 ซึ่งอยู่ในบริเวณเดียวกัน(Local Area) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข1 พบว่าการติดตั้ง FPSVC เพิ่มเข้าไปในระบบจะไม่ทำให้ผลการตอบสนองเปลี่ยนแปลงไป จากกรณีที่ควบคุมด้วย PSS ตามปกติมากนัก

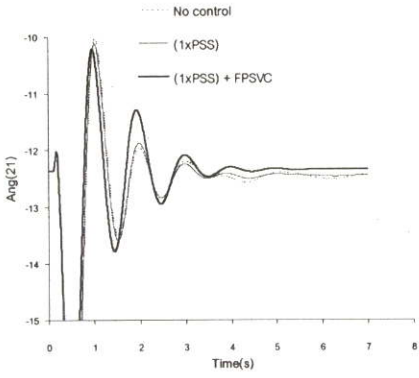
รูปที่ 9(b) และ 10(b) แสดงผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 3 ซึ่งอยู่ต่างบริเวณ (Inter Area) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 โดยบริเวณทั้ง2 ถูกเชื่อมโยงกันด้วยระบบสายส่งระยะไกล พบว่าการติดตั้ง PSS ตามปกติเพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถสร้างการหน่วงได้สัก แต่เมื่อติดตั้ง FPSVC เพิ่มเข้าไปในระบบจะทำให้ผลตอบสนองมีความหน่วงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

รูปที่ 9(c) และ 10(c) แสดงผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 4 ซึ่งอยู่ต่างบริเวณ (Inter Area) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 เช่นเดียวกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 3 พบว่าการติดตั้ง FPSVC เพิ่มเข้าไปในระบบจะทำให้ผลตอบสนองมีความหน่วงเพิ่มขึ้น และกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วกว่ากรณีที่ใช้ PSS เพียงอย่างเดียว ไม่ว่าจะใช้ PSS 1 ตัวดังรูป 9(c) หรือ 2 ตัวดังรูป 10(c) ก็ตาม

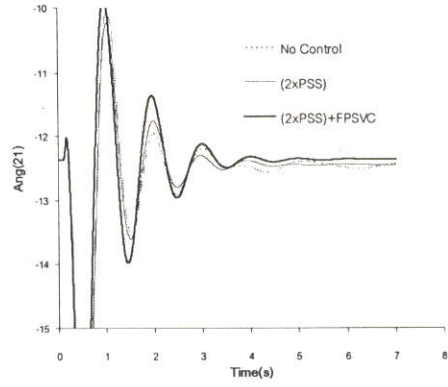
จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า กรณีของระบบที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน การควบคุมโดยใช้ PSS ตามปกติจะเพียงพอต่อการทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้ แต่ในกรณีของระบบที่อยู่ต่างบริเวณกัน โดยเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรซึ่งต้องใช้สายส่งระยะไกลเชื่อมต่อกับระบบเข้าด้วยกันนั้น การควบคุมโดยใช้ PSS จะไม่สามารถสร้างการหน่วงที่ดีได้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการติดตั้ง FPSVC เพิ่มเข้าไปที่สายส่ง โดยจะทำให้ระบบสามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพภายหลังจากถูกลี้นรบกวนได้อย่างรวดเร็ว

#### 6. สรุป

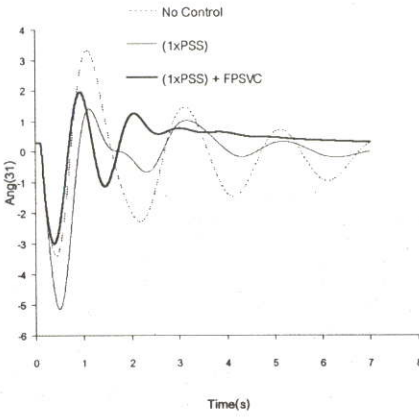
บทความนี้เป็นการนำเสนอแนวความคิดในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรด้วย SVC ที่รับสัญญาณควบคุมเสริมจากตัวควบคุมฟิซซีชนิดเฟสเพน การตรวจสอบความสามารถของตัวควบคุมฟิซซีของ SVC จะพิจารณาจากผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นกับระบบ



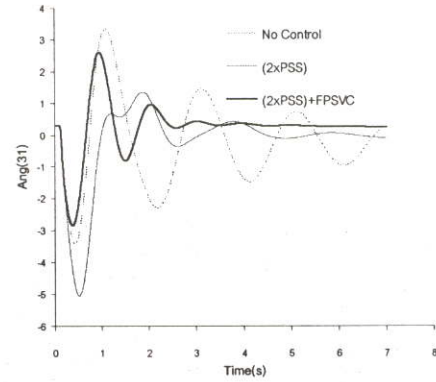
รูปที่ 9 (a) มุม  $\delta_{21}$  เมื่อระบบใช้ PSS 1 ตัว และ FPSVC



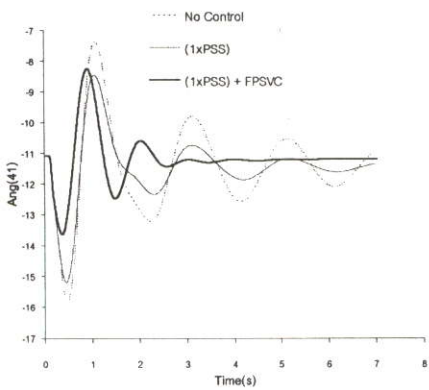
รูปที่ 10 (a) มุม  $\delta_{21}$  เมื่อระบบใช้ PSS 2 ตัว และ FPSVC



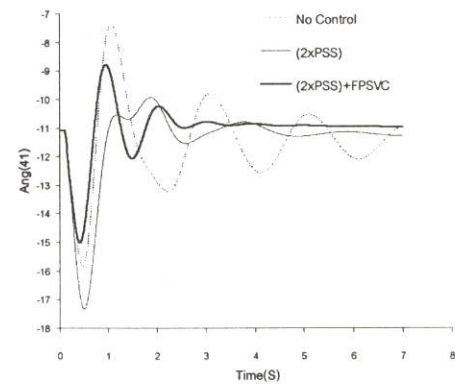
รูปที่ 9 (b) มุม  $\delta_{31}$  เมื่อระบบใช้ PSS 1 ตัว และ FPSVC



รูปที่ 10 (b) มุม  $\delta_{31}$  เมื่อระบบใช้ PSS 2 ตัว และ FPSVC



รูปที่ 9 (c) มุม  $\delta_{41}$  เมื่อระบบใช้ PSS 1 ตัว และ FPSVC



รูปที่ 10 (c) มุม  $\delta_{41}$  เมื่อระบบใช้ PSS 2 ตัว และ FPSVC

การจำลองทั้งหมดจะทำบนคอมพิวเตอร์ ผลจากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการควบคุมด้วย PSS จะให้ผลดีในกรณีที่มีระบบอยู่ในบริเวณเดียวกัน แต่สำหรับกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรซึ่งมีการเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งระยะไกลนั้นการใช้ FPSVC จะทำให้ผลตอบสนองของมุมของโรเตอร์มีแคมป์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเครื่องบ่งชี้ว่า อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรได้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chi-Jui WU, Yuan-Yih Hsu. "Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizer for Multimachine Power Systems." IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, No. 3, Aug 1988. pp. 1059-1064.
- [2] Takashi Hiyama. "Rule-Base Stbilizer for Multi-Machine Power System" IEEE Trans. on Power Systems, vol.5, No.2, May 1990.,pp.403-411
- [3] E.Lerch, D.Povh, L.Xu, "Advance SVC Control for Damping Power System Oscillations" IEEE Trans. on Power Systems, Vol.6, No.2 , May 1991, pp.524-535
- [4] E.Z.Zhou. "Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping." IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, No. 2, May 1993. pp. 655-661.
- [5] T.Sawa, Y.Shirai, T.Michigami, Y.Sakanaka, Y.Uemura. "A Field Test of Power Swing Damping by Static Var Compensator" IEEE Trans. On Power Systems ,Vol.4, No.3, August 1989.pp.1115-1121
- [6] M.A.Iskandar, M.Satoh, Y.Ohmori, S.Matoba, T.Okabe and Y.Mizutani, "On Fuzzy Control based Static Var Compensator for Power System Stability Control", IEEE Trans. on PAS, Vol.10, No.2 , 1993, pp.201-205
- [7] Yuan-Yih Hsu, Chi-Jui WU. "Design of PID Static Var Controllers for the Damping of Subsynchronous Oscillations." IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 3, No. 2, June 1988. pp. 210-216.
- [8] Takashi Hiyama, "Fuzzy Logic Stabilizing Controller for Power Systems." IEEE Proc of the 35<sup>th</sup> conference on Decision and Control ,Kobe, Japan, Dec 1996.pp2185-2190
- [9] Juan Shi, L.H.Herron, A. Kalam. "Design and Implementation of a Fuzzy Logic Controller for Power System Stabilization" Second IEEE Conference on Control Applications,Vancouver,B.C Sep 1993, pp61-67

- [10] Takashi Hiyama. "Robustness of Fuzzy Logic Power System Stabilizer" IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol9, No.3, Sep 1994, pp. 451-459
- [11] Takashi Hiyama, Yoshiteru Ueki, Hiroski Andou "Integrated Fuzzy Logic Generator Controller for Stability Enhancement" IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.12, No.4, Dec 1997, pp. 400-406
- [12] M.Klein, G.J Rogers, P.Kundur, "A Fundamental Study of Inter-area Oscillation in Power System." IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, No. 3, Aug 1991, pp. 914-921.
- [13] กิตติ โพธิ์รัง, คมสันต์ หงษ์สมบัติ และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, "การปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์โดยใช้กฎควบคุมพื้นฐาน."การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, ธันวาคม 2542. หน้า 212-215.

## 8. ประวัติผู้เขียนบทความ



กิตติ โพธิ์รัง เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2518 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี 2539 และ เข้าทำงานที่บริษัท เอบีบี จำกัดในตำแหน่งวิศวกรผู้ออกแบบในปีเดียวกัน ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2500 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี 2524 และได้ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ในปี 2539 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ผู้สอนประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ประวัติผู้เขียน

นายกิตติ โพธิ์รัง เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539

ปี 2539 เข้าทำงานที่บริษัท เอบีบี จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกรผู้ออกแบบ แผนกสวิตช์เกียร์ ต่อมาในปี 2541 ได้เข้ารับงานในตำแหน่งวิศวกรตรวจสอบระบบไฟฟ้ากำลัง แผนกวิศวกรบริการ บริษัท เอบีบี จำกัด ปัจจุบันรับงานในตำแหน่ง วิศวกรไฟฟ้า แผนกเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง บริษัท เอบีบี จำกัด