



การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสมตติควาร์โดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่
POWER SYSTEM CONTROLLED BY STATIC VAR BASED ON FUZZY THEORY

โดย

นายกิตติ พจนสุวรรณชัย

นายพีรพล จิราพงศ์

นายรพีพงษ์ ลือโฮ้ง

นายวรรณชิต ขาวพุ่ม

วัน เดือน ปี..... 30.09.2541
เลขทะเบียน..... C38202
เลขเรียกหนังสือ..... 139292 ก67ก.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเอกสาร
C38202

ปีการศึกษา 2539

การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสแตติกวาร์โดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่

POWER SYSTEM CONTROLLED BY STATIC VAR BASED ON FUZZY THEORY



โดย

นายกิตติ พจนสุวรรณชัย

นายพีรพล จิราพงศ์

นายรพีพงษ์ ลือไธ้

นายวรรณชิต ขาวพุ่ม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

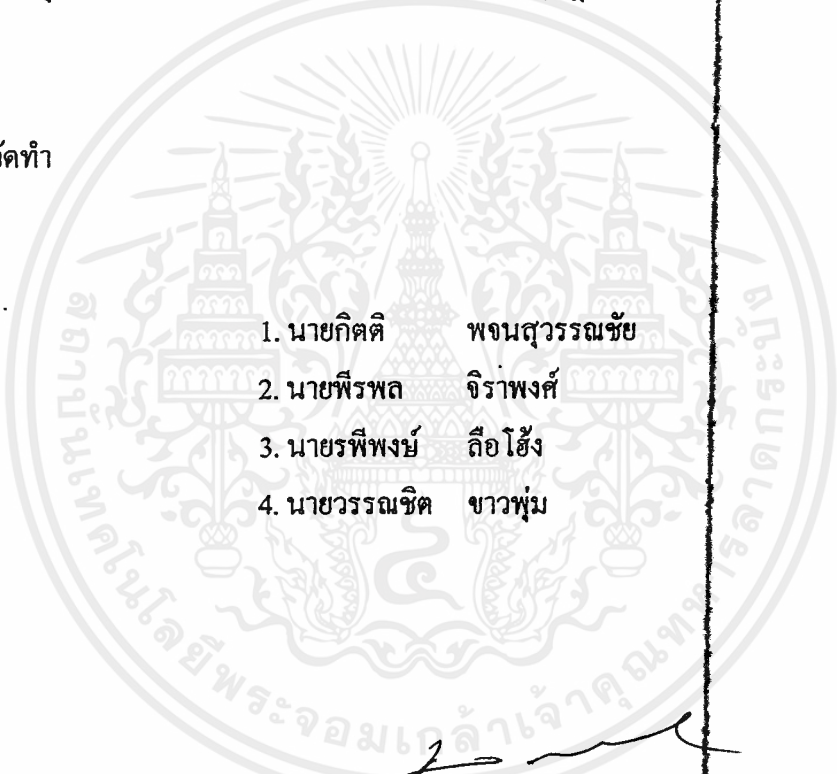
ปริญญาโท การศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสแตติกวาร์โดยใช้ทฤษฎีฟuzzy

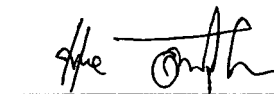
ผู้จัดทำ

- 
1. นายกิตติ พจนสุวรรณชัย
 2. นายพีรพล จิราพงศ์
 3. นายรพีพงษ์ ลือไฮ้
 4. นายวรรณชิต ขาวพุ่ม



(ผศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสแตติกวาร์โดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่

นายกิตติ พจนสุวรรณชัย

นายพิรพล จิราพงศ์

นายรพีพงษ์ ลือไธสง

นายวรรณชิต ขาวพุ่ม

ศศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาประยุกต์นำทฤษฎีฟัซซี่มาใช้หาสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ (Static Var Compensator: SVC) เพื่อใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะศึกษาจากแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Generator) 1 ตัว ต่ออยู่กับระบบอินฟินิทบัส (Infinite Bus) โดยผ่านระบบสายส่งคู่ (Double Transmission Lines) ในการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ ให้จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้น ปริมาณของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกคำนวณได้ จะขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อน และผลต่างของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output Power) ในแต่ละช่วงเวลาที่พิจารณา โดยสัญญาณควบคุมที่ถูกคำนวณได้จากฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซี่ (Fuzzy Membership Function) จะทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้

POWER SYSTEM CONTROLLED BY STATIC VAR BASED ON FUZZY THEORY

Kitti Pojanasuwanchai

Peerapol Jirapong

Rapeepong Luehong

Wannachit Khaopum

Assist. Prof. Monthon Leelajindakrailerk Advisor

Mr. Chai Chompoo-inwai Advisor

1997

ABSTRACT

This paper applies fuzzy theory to find static var compensator control signal to improve stability of power system. We start from power system model which has a synchronous generator connected with infinite bus via double transmission lines. In controlling static var compensator to supply or absorb reactive power. The quantity of reactive power is calculated depending on the error and the change of error of electrical power output at each sampling time. The control signal is calculated using fuzzy membership functions to make system enter the stability.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ข้อกำหนดพื้นฐานเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.1 รูปเฟเซอร์ไดอะแกรม	5
2.2 กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว	9
2.3 กำลังไฟฟ้าในรูปคอมเพล็กซ์	17
2.4 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า	19
บทที่ 3 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส	21
3.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส	21
3.2 ปฏิกริยาของอาร์เมเจอร์ในเครื่องจักรซิงโครนัส	22
3.3 โมเดลวงจรของเครื่องจักรซิงโครนัส	23
บทที่ 4 ตัวเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	26
4.1 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ	26
4.2 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ	28
4.3 ตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง	29
บทที่ 5 อุปกรณ์ขดลวดกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์	31
5.1 การทำงานที่ความถี่พื้นฐานของระบบสแตติกวาร์	31
5.2 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์	36
5.3 ไทริสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์	38
5.4 ระบบสแตติกวาร์ที่ใช้งานจริง	39
บทที่ 6 การศึกษาสถานะทรานเซียนท์ ภายใต้สภาวะฟอลต์	42
6.1 กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน	42

	หน้า
6.2 การประยุกต์ใช้กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากันในการศึกษาสภาวะทรานเซียนท์สแคบิลิตี้ ภายใต้สภาวะฟลอตท์	44
6.3 การขจัดฟลอตท์	47
บทที่ 7 ทฤษฎีพีชชี	49
7.1 พีชชีเซต	50
7.2 พีชชีลอจิก	51
7.3 การประยุกต์ใช้งานของพีชชีลอจิก	51
7.4 สรุปผลจากการใช้ทฤษฎีพีชชี	54
บทที่ 8 ระบบจำลอง	56
บทที่ 9 การหาสัญญาณควบคุมโดยใช้ทฤษฎีพีชชี	63
9.1 อุปกรณ์ควบคุมโดยพีชชี	64
9.2 การปรับค่าพารามิเตอร์	66
บทที่ 10 โปรแกรมและผลการทดลอง	68
10.1 อธิบายการทำงานของโปรแกรม	68
10.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม	72
10.3 ผลการทดลอง	74
บทที่ 11 สรุปผลและวิจารณ์	80
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญภาพ

	หน้า
รูป 2.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ	3
รูป 2.2 วงจรอนุกรม RLC	5
รูป 2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวความต้านทาน	6
รูป 2.4 เฟเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ	6
รูป 2.5 เฟเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	6
รูป 2.6 เฟเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RLC ในรูป 2.2	7
รูป 2.7 วงจรขนาน RL และเฟเซอร์ไดอะแกรม	10
รูป 2.8 กระแสไฟฟ้าอยู่บนมุมเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าในขณะนั้น แปรตามเวลา	10
รูป 2.9 กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้า 90 องศา และกำลังไฟฟ้าขณะนั้น แปรตามเวลา	11
รูป 2.10 กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม θ องศา และกำลังไฟฟ้าขณะนั้นแปรตามเวลา	12
รูป 2.11 วงจรตัวเก็บประจุ	13
รูป 2.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แกนอ้างอิงใดๆ	17
รูป 2.13 วงจรแทนสายส่งระยะใกล้ต่อเฟส	18
รูป 2.14 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า	19
รูป 2.15 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าเมื่อรวมโหลดทั้งหมด	20
รูป 3.1 เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส ที่ส่วนประกอบย่อยแสดงด้าน ปลายของโรเตอร์แบบทรงกระบอก 2 ขั้ว และส่วนพื้นที่หน้าตัดของสเตเตอร์	21
รูป 3.2 การกระจายรอบอาร์เมเจอร์ของค่าแรงขับเคลื่อนแม่เหล็กที่ผลิตจากกระแสในเฟส a ของคลื่นไฟฟ้าตามรูป 3.1 โดยให้ค่าเปลี่ยนแปลงของ ωt	22
รูป 3.3 แผนภาพเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของเวลา	23
รูป 3.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	24
รูป 3.5 แผนภาพเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r และ E_m เมื่อกระแสถูกส่งผ่าน เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า ตามหลัง E_r เป็นมุม 90 องศา และนำหน้า E_r เป็นมุม 90 องศา	25
รูป 3.6 แผนภาพวงจรสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ โดยที่ I_r เป็นกระแส ที่ส่งจากเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าและรับจากมอเตอร์	25

รูป 4.1	การควบคุมเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า	26
รูป 4.2	แบบจำลองอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า	27
รูป 4.3	ผลของการควบคุมขดลวดกระตุ้น	28
รูป 4.4	บล็อกไดอะแกรมของตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง	30
รูป 5.1	ระบบสแตติกวารีนในอุดมคติ	32
รูป 5.2	คุณลักษณะ V/I ของการชดเชยในอุดมคติ	32
รูป 5.3	คุณลักษณะรวมของระบบสแตติกวารีน	33
รูป 5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของโหลดรีแอกทีฟ	34
รูป 5.5	แสดงจุดทำงานของระบบสแตติกวารีน	35
รูป 5.6	ไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์	36
รูป 5.7	คุณลักษณะพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ของไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์	38
รูป 5.8	ไทรสเตอร์สวิทช์ คาปาซิเตอร์	38
รูป 5.9	แสดงการทำงานของสวิทช์ของไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ	39
รูป 5.10	ระบบจริงของสแตติกวารีน	40
รูป 5.11	คุณลักษณะของระบบสแตติกวารีนที่สภาวะปกติ	41
รูป 6.1	วิธีการพื้นที่เท่ากันของการศึกษาสแตบิลิตี้	44
รูป 6.2	เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าต่อกับอินฟินิตบัสผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 และวงจรสายส่งคู่ TL	44
รูป 6.3	กราฟมุมกำลังไฟฟ้า (1) และ (2) ก่อนเกิดฟลลท์และขณะเกิดฟลลท์	45
รูป 6.4	ฟลลท์ที่ไม่ถูกขจัดเมื่อกำลังไฟฟ้าอินพุตที่น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าขณะเกิดฟลลท์	45
รูป 6.5	กราฟก่อนฟลลท์ ขณะฟลลท์ และหลังฟลลท์สำหรับกรณีฟลลท์ถูกขจัด	47
รูป 6.6	การปิดกลับลงมาของสายส่งวงจรคู่	48
รูป 7.1	กระบวนการควบคุมด้วยพีซซี	49
รูป 7.2	แสดงการวินิจฉัย	52
รูป 7.3	ขั้นตอนการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง	54
รูป 8.1	แบบจำลองระบบ	56
รูป 8.2	บล็อกไดอะแกรมของ AVR	56
รูป 8.3	บล็อกไดอะแกรมของ GOV	57
รูป 8.4	บล็อกไดอะแกรมของ SVC	58

	หน้า
รูป 8.5 แบบจำลองระบบ	59
รูป 8.6 วงจรสมมูลระบบสายส่งคู่	59
รูป 9.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมด้วยพีซี	63
รูป 9.2 เฟสเพลน	65
รูป 9.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ θ	65
รูป 9.4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ D_c	66
รูป 9.5 การรบกวนเล็กน้อย	66
รูป 10.1 แสดงแผนการไหลของโปรแกรมจำลองระบบ	70
รูป 10.2 ระบบที่ไม่มีการควบคุม (การรบกวนแบบเล็กน้อย)	74
รูป 10.3 ระบบที่ไม่มีการควบคุม (การรบกวนแบบรุนแรง)	75
รูป 10.4 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธี PD (การรบกวนแบบเล็กน้อย)	76
รูป 10.5 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธี PD (การรบกวนแบบรุนแรง)	77
รูป 10.6 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธีพีซี (การรบกวนแบบเล็กน้อย)	78
รูป 10.7 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธีพีซี (การรบกวนแบบรุนแรง)	79

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ	8
ตาราง 2.2 กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด	15
ตาราง 2.3 ความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดชนิดต่างๆ	16



บทที่ 1

บทนำ

การนำทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy Theory) มาประยุกต์หาสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ (Static Var Compensator : SVC) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ในส่วนของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ที่ถูกจ่ายหรือรับโดยอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ จะถูกคำนวณจากค่าความคลาดเคลื่อน (Error) และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output Power) ในแต่ละช่วงเวลาที่ยิงการวัด (Sampling Time) สัญญาณควบคุมจะถูกคำนวณจากฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซี (Fuzzy Membership Function)

จุดประสงค์การควบคุม จะพิจารณาจากกรณีที่เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Generator) 1 ตัว ต่ออยู่กับอินฟินิตี้บัส (Infinite Bus) ตัวเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizers : PSS) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างไรก็ตามการควบคุมระบบสายส่งระยะไกลมาก ๆ มักจะเกิดการหน่วง (Damping) ดังนั้นการควบคุมโดยใช้ตัวเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง มักจะมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ แต่ในกรณีที่ประยุกต์ใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ ติดตั้งที่จุดกึ่งกลางของสายส่งมาควบคุมร่วมด้วย จะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความหน่วงของระบบได้

วิธีการควบคุมหลายวิธี ที่อ้างอิงทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่ สามารถใช้ควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของระบบขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานของระบบ และจากการที่ระบบไม่เป็นเชิงเส้น เราจึงสมควรให้สัญญาณควบคุมเป็นตัวแปรที่มีค่าคงที่ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ แต่ในความจริงแล้วจะเกิดปัญหาในการหาสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นการนำเอาทฤษฎีฟัซซีมาประยุกต์ใช้ ทำให้สามารถแก้ปัญหานี้ได้ เนื่องจากทฤษฎีนี้ใช้ควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ และสามารถศึกษาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นรวมทั้งทำการคำนวณระบบที่ซับซ้อนได้ในเวลาอันรวดเร็ว

สำหรับรายงานฉบับนี้ เป็นการหาสัญญาณที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ โดยอาศัยการควบคุมด้วยทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy Control Theory) โดยค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สามารถวัดได้ง่ายและไม่มีสัญญาณรบกวน จะถูกอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์นำมาใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้าของการควบคุม ปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะถูกจ่ายหรือรับ โดยอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ จะถูกนำมาคำนวณ

จากสถานะของระบบที่เปลี่ยนไปซึ่งถูกแทนด้วยค่าความคลาดเคลื่อน และนำการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทมาลงบนเฟสเพลน (Phase Plane) ในแต่ละช่วงเวลาที่พิจารณา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ข้อกำหนดพื้นฐานเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลัง (BASIC CONCEPTS)

ในส่วนนี้ จะเป็นเรื่องการศึกษาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับที่สม่ำเสมอค่าคงที่ (Steady State AC Circuit) โดยเริ่มจากโครงสร้างวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับและกำลังไฟฟ้าสามเฟส ดังนั้นรูปร่างของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์อย่างแท้จริง (Purely Sinusoidal) โดยมีความถี่คงที่

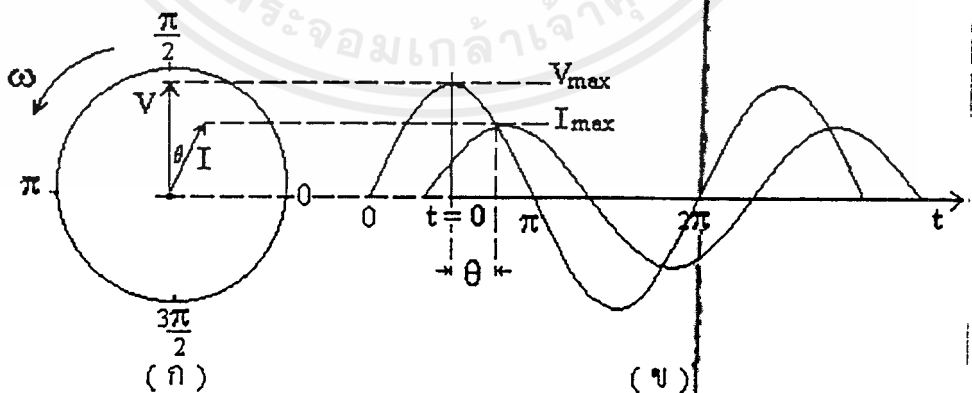
ค่าที่ใช้บอกแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของเฟเซอร์ (Phasor) ที่บอกทั้งขนาดและมุม มีสัญลักษณ์เป็น V และ I โดยที่มีสัญลักษณ์ $|V|$ และ $|I|$ เป็นตัวบอกขนาด (Magnitude) ของสัญญาณ และ E แทนแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive Force : emf)

ถ้าให้ v และ i เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะนั้น (Instantaneous) ซึ่งแปรเปลี่ยนตามเวลา โดยที่ฟังก์ชันจะอยู่ในเทอมของ \sin หรือ \cos ก็ขึ้นอยู่กับจุดของสัญญาณที่พิจารณา ในที่นี้เมื่อเริ่มพิจารณาสัญญาณดังแสดงในรูป 2.1 จะได้ฟังก์ชันเป็น

$$v = V_{\max} \cos \omega t \quad (2.1)$$

$$i = I_{\max} \cos (\omega t - \theta) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f$



รูป 2.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า กระแสสลับ

(ก) แปรตามความเร็วเชิงมุม

(ข) แปรตามเวลา

เอกสารนี้เป็นส่วนการหาขนาดในรูปของค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root-Mean-Square : rms) จะได้นับด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|v| = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

$$|I| = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

ซึ่งค่า $|v|$ และ $|I|$ ที่เป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสองนี้จะสามารถอ่านได้จากการวัดด้วยมิเตอร์ บางครั้งก็เรียกว่าค่าประสิทธิภาพ (Effective Value)

ถ้าจะทำให้ค่าเหล่านี้อยู่ในรูปของค่าเฟเซอร์ที่บอกทั้งขนาดและมุม จะต้องกำหนดค่าอ้างอิง (Reference) ให้

เราสามารถเลือกเอาแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวอ้างอิงได้ แต่ต้องทำความเข้าใจในเรื่องของมุมที่กระทำกันอยู่ ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ คลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามักจะไม่เป็นศูนย์ หรือเป็นค่าสูงสุดในเวลาเดียวกัน โดยทั่วไปแล้วจะคลาดเคลื่อนกันออกไปเป็นมุมค่าหนึ่ง เรียกว่ามุมเฟส (Phase Angle : θ) ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าเป็นตัวอ้างอิง เมื่อคลื่นสูงสุดของกระแสไฟฟ้ามาถึงช้ากว่าคลื่นสูงสุดของแรงดันไฟฟ้า ก็เรียกว่ากระแสไฟฟ้าตามหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้าอยู่เป็นมุม θ และเมื่อคลื่นสูงสุดของกระแสไฟฟ้ามาถึงก่อนคลื่นสูงสุดของแรงดันไฟฟ้า ก็เรียกว่ากระแสไฟฟ้านำหน้า (Lead) แรงดันไฟฟ้าอยู่เป็นมุม θ

จากสัญญาณรูปไซน์ที่แปรตามเวลา ไปอยู่ในรูปของเฟเซอร์ที่บอกทั้งขนาดและมุมที่เทียบกับแกนอ้างอิงใดๆ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าแต่ละจุดจะมีมุมคลาดเคลื่อน (Phase Shift) ไปจากมุมของแรงดันไฟฟ้าจุดเริ่มต้น หรือแกนอ้างอิงใดๆ เนื่องจากผลของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของระบบสายส่งและโหลด (Load) ถ้าให้

$$v = V_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.5)$$

ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้ เทียบกับแกนอ้างอิงใดๆ มีมุมคลาดเคลื่อนไปเป็นมุม α และจะเห็นได้ว่า แท้ที่จริงแล้ว ทั้งมุม ωt และมุม α จะอยู่ในรูปของเรเดียน (Radian) ไม่ใช่องศา (Degree)

ดังนั้นลักษณะของค่าเฟเซอร์โดยทั่วไป จะเป็น $v = |v| \angle \alpha$

1. สัญลักษณ์ที่ใช้ จะใช้แทนด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ V

2. ค่าเฟเซอร์จะมีค่าขนาดเป็น $|v| = V_{\max} / \sqrt{2}$ ซึ่งจะเท่ากับค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง ในเทอมที่แปรตามเวลานั่นเอง

3. ค่ามุมเฟสของเฟเซอร์เป็น $\angle v = \alpha$ ซึ่งจะเท่ากับมุมเฟสของเทอมที่แปรตามเวลา และมุม α นี้ เป็นมุมเรเดียน ต้องทำให้เป็นองศา เวลาจะนำมาใช้ในการคำนวณ

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2\pi} \times \alpha_{rad} \quad (2.6)$$

2.1 รูปเฟเซอร์ไดอะแกรม (Phasor Diagrams)

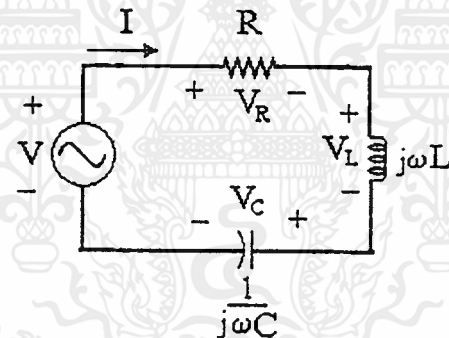
ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ จะเป็นการต่อรวมของอุปกรณ์ ที่มีทั้งตัวความต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (R,L,C) ซึ่งเป็นผลให้เวลาของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า คลาดเคลื่อนออกไปจากกันในแต่ละตำแหน่ง ดังนั้นในการเขียนรูปเวกเตอร์ (Vector) ของปริมาณต่างๆ เหล่านี้ จะเขียนในรูปของแผนผังที่บอกทั้งขนาดและทิศทาง เรียกว่า เฟเซอร์ไดอะแกรม (Phasor Diagram) โดยมีเส้นลูกศรตรงที่แทนขนาดและมุมที่ทำกับแกนอ้างอิง

เมื่อพิจารณาจากรูป 2.2 เป็นวงจรอนุกรม RLC โดยการใช้ Kirchhoff's Voltage Law จะได้สมการ

$$V = V_R + V_L + V_C \quad (2.7)$$

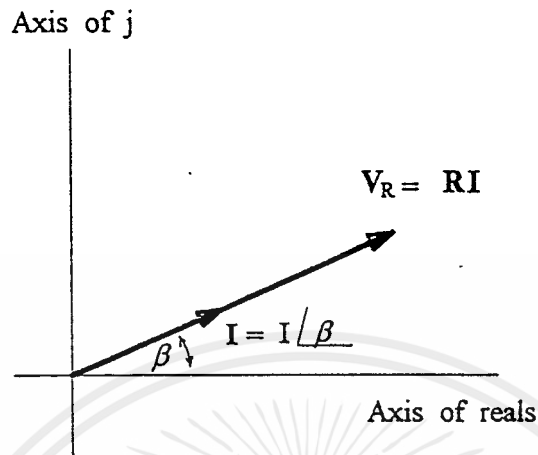
หรือ

$$V = RI + j\omega LI + \frac{1}{j\omega C} I \quad (2.8)$$

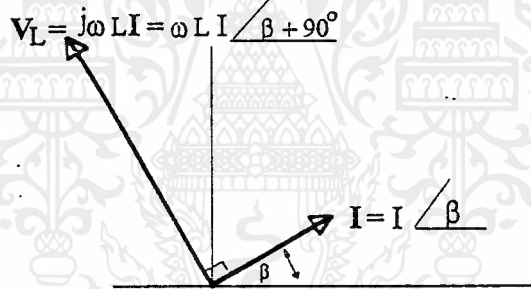


รูป 2.2 วงจรอนุกรม RLC

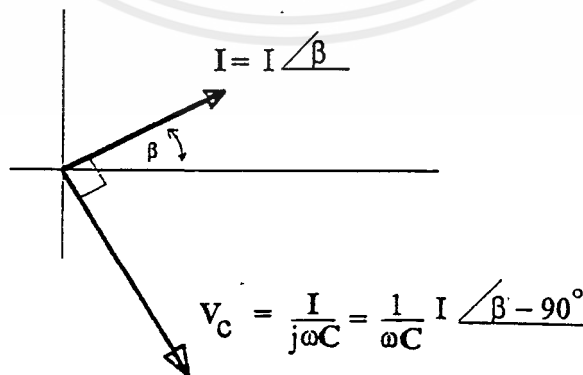
เมื่อทำการแยกพิจารณาในแต่ละส่วนที่กระแสไฟฟ้า I เดียวกันไหลผ่าน โดยให้กระแสไฟฟ้ามีมุมคลาดเคลื่อนหน้าไปจากแกนอ้างอิงใดๆ เป็นมุม β องศา จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้า V_R จะเท่ากับกระแสไฟฟ้า I คูณกับความต้านทาน R ซึ่งจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามรูปคลื่น และ V_R มีมุมเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าดังรูป 2.3



รูป 2.3 เฟเซอร์ไคอะแกรมแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวความต้านทาน



รูป 2.4 เฟเซอร์ไคอะแกรมแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ



รูป 2.5 เฟเซอร์ไคอะแกรมแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

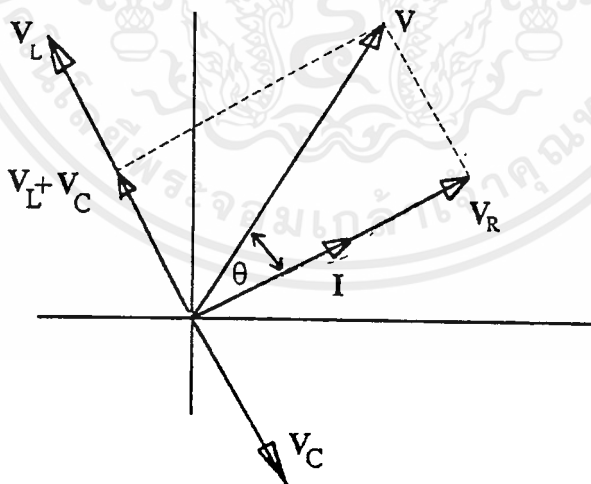
ส่วนแรงดันไฟฟ้า V_L ที่คร่อมตัวเหนี่ยวนำจะเป็น $j\omega LI$ โดยที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามค่า ωL และมีทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามผลของ j ซึ่งมีทิศทางหมุนไปทางบวก (ทวนเข็มนาฬิกา) ไปเป็นมุม 90 องศา ซึ่งแสดงผลไว้ในรูป 2.4 ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า V_C ที่คร่อมตัวเก็บประจุมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตาม $1/\omega C$ และมีทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามผลของ $1/j = -j$ ดังนั้นจะมีทิศทางหมุนไปทางลบ (ตามเข็มนาฬิกา) เป็นมุม 90° ดังแสดงไว้ในรูป 2.5

ดังนั้นจากวงจรในรูป 2.2 โดยสมการที่ (2.7) ที่แรงดันไฟฟ้า V จะเท่ากับผลบวก ในรูปเฟเซอร์ของแต่ละแรงดันไฟฟ้าย่อย สามารถรวมผลได้จากรูป 2.3 ถึง 2.5 และดังแสดงไว้ในรูป 2.6 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์นี้สามารถพิจารณาได้ว่า

1. กระแสไฟฟ้าในความต้านทาน จะมีมุมเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อม (V_R)
2. กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะตามหลังแรงดันไฟฟ้าที่คร่อม (V_L) ไปเป็นมุม 90 องศา
3. กระแสในตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อม (V_C) ไปเป็นมุม 90 องศา
4. แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรสามารถวิเคราะห์ได้จาก Kirchhoff's Voltage Law โดยวิธีการใช้เฟเซอร์ไดอะแกรม

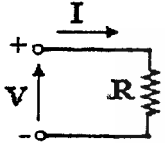
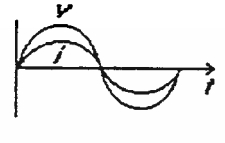
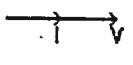
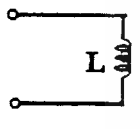
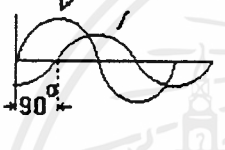

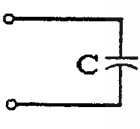
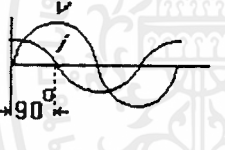

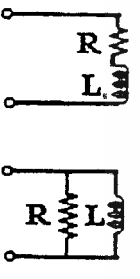
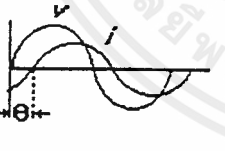
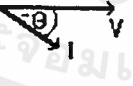
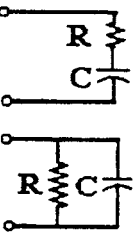
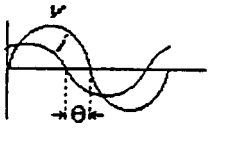
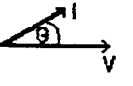
โดยวิธีการใช้เฟเซอร์ไดอะแกรม

จากรูป 2.6 จะเห็นได้ว่าผลของวงจรจะทำให้กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้าอยู่เป็นมุม θ องศา



รูป 2.6 เฟเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RLC ในรูป 2.2

จากที่ได้อธิบายและได้พิจารณา จะเห็นได้ว่าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ผลของตัวความต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ จะทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีมุมที่แตกต่างกันออกไปซึ่งได้แสดงไว้ในตาราง 2.1

LOAD	SINUSOIDAL	PHASOR	VOLTAGE	CURRENT	RELATION
			$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle 0^\circ$	I inphase V
			$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle -90^\circ$	I lag V
			$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle 90^\circ$	I lead V
			$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle -\theta$	I lag V
			$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle \theta$	I lead V

ตาราง 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

(Power in Single Phase AC Circuits)

การค้นคว้าเกี่ยวกับระบบการส่งถ่ายพลังงานในวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง จะต้องพิจารณาถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลา ในรูปความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า เรียกว่า กำลังไฟฟ้า (Power) กำลังไฟฟ้าในหน่วยของวัตต์ (Watt) จะถูกคดกลืนเข้าไปในโหลด ซึ่งเป็นผลจากการที่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous Voltage) คร่อมโหลดในหน่วยของโวลท์ (Volt) และกระแสไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous Current) ไหลผ่านโหลดในหน่วยแอมป์ (Ampere) ถ้ากำหนดให้ a และ b เป็นสัญลักษณ์แทนขั้วของโหลด (Load Terminal) และ

$$v_{ab} = V_{\max} \cos \omega t \quad (2.9)$$

$$i_{ab} = I_{\max} \cos (\omega t - \theta) \quad (2.10)$$

จะได้ p : กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous Power) เป็น

$$p = v_{ab} i_{ab} = V_{\max} I_{\max} \cos \omega t \cos (\omega t - \theta) \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.11) แทนค่ามุม θ เป็นค่าบวกเมื่อกระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้า และมุม θ เป็นค่าลบเมื่อกระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังไฟฟ้า : p เป็นบวกหมายความว่ากำลังไฟฟ้าถูกคดกลืนโดยโหลดที่อยู่ระหว่างขั้ว a และ n กำลังไฟฟ้าในเวลาหนึ่งจะเป็นบวกเมื่อในขณะนั้นทั้ง v_{ab} และ i_{ab} อยู่ในช่วง (+) หรือ (-) เดียวกัน และจะเริ่มเป็นลบเมื่อ v_{ab} และ i_{ab} อยู่ในช่วง (+) หรือ (-) ต่างกัน ซึ่งจะได้พิจารณาต่อไป

จากสมการ (2.11) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของ กำลังไฟฟารวมในขณะนั้นที่แปรตามเวลา ในเทอมของค่ารากเฉลี่ยกำลังสองเป็น

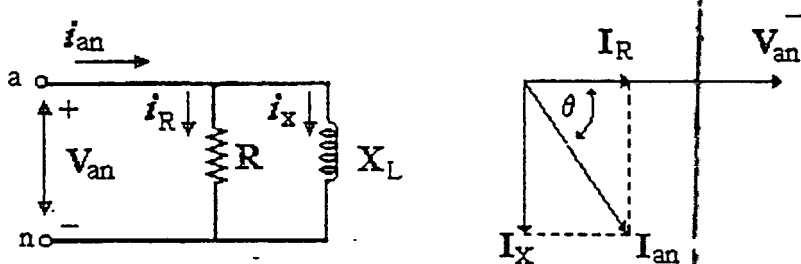
$$p = |V| |I| \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + |V| |I| \sin \theta \sin 2\omega t \quad (2.12)$$

$$\text{เทอม I คือ } |V| |I| \cos \theta (1 + \cos 2\omega t)$$

$$\text{เทอม II คือ } |V| |I| \sin \theta \sin 2\omega t$$

จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าประกอบด้วยสองเทอม (I, II) รวมกัน โดยมีความถี่เป็นสองเท่า (2ω) ของแรงดันไฟฟ้าปกติ

ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในการพิจารณาหากำลังไฟฟ้าในเวลาใดเวลาหนึ่งของวงจรนั้นจะสามารถทำการแยกพิจารณา จากทิศทางของกระแสไฟฟ้าส่วนที่ทำมุมเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าในโหลดในส่วนที่มีความต้านทานอย่างเดียว (Purely Resistive Load) และกระแสไฟฟ้าส่วนที่ทำมุม 90 องศา กับแรงดันไฟฟ้าในโหลดส่วนที่มีตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียว (Purely Inductive Load) หรือมีตัวเก็บประจุอย่างเดียว (Purely Capacitive Load) ได้ในแต่ละกรณี

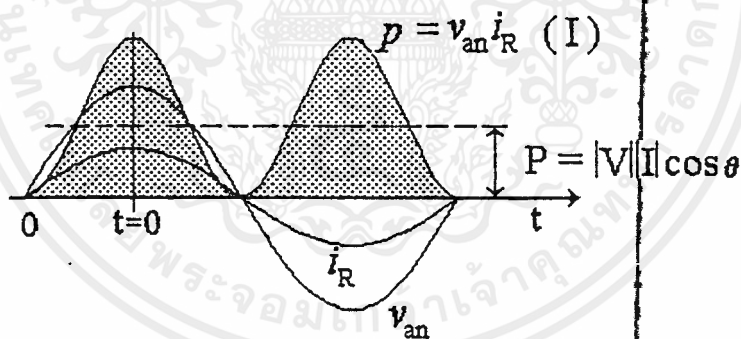


รูป 2.7 วงจรขนาน RL และเฟเซอร์ไออะแกรม

จากรูป 2.7 เป็นวงจรขนานโหลด R และ L จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้า i_m จะประกอบด้วยสองส่วนโดย i_R เป็นส่วนกระแสที่ทำมุมเดียวกับแรงดันไฟฟ้า v_m และ i_X เป็นส่วนกระแสไฟฟ้าที่ตามหลังแรงดันไฟฟ้าอยู่ 90 องศา โดยที่ค่าสูงสุดของ i_m คือ I_{max}

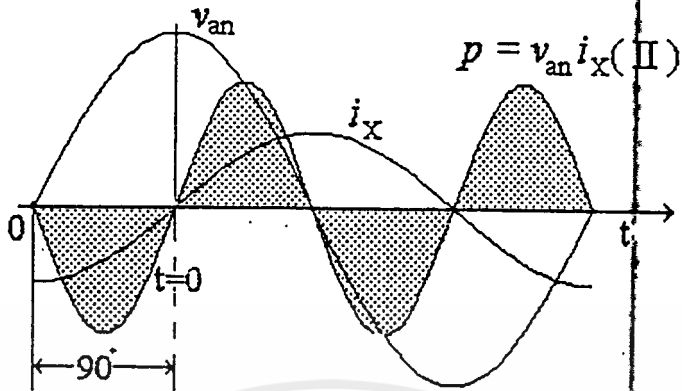
$$v_{an}i_R = \frac{V_{max}I_{max}}{2} \cos\theta(1 + \cos 2\omega t) \tag{2.13}$$

$$v_{an}i_X = \frac{V_{max}I_{max}}{2} \sin\theta \sin 2\omega t \tag{2.14}$$



รูป 2.8 กระแสไฟฟ้าอยู่บนมุมเดียวกับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าในขณะนั้น แปรตามเวลา

จากสมการ (2.13) จะเห็นได้ว่าค่า $v_{an}i_R$ เป็นกำลังไฟฟ้าในขณะนั้น ส่วนที่อยู่ในโหลดความต้านทานอย่างเดียวกและกระแสไฟฟ้าจะอยู่บนมุมเดียวกับแรงดันไฟฟ้านั้น เป็นส่วนของกำลังไฟฟ้าในเทอม I ของสมการ (2.12) เมื่อนำมาสร้างเป็นรูปที่แปรไปตามเวลาดังรูป 2.8 จะพบว่ารูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะอยู่ในช่วง (+) และ (-) พร้อมกันตลอดเวลา ดังนั้นกำลังไฟฟ้าในขณะนั้น ในกรณีนี้จะมีค่าเป็นบวกเสมอ และจะมีความถี่เป็น 2ω



รูป 2.9 กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้า 90 องศา และกำลังไฟฟ้าขณะนั้นแปรตามเวลา

จากสมการ (2.14) จะเห็นได้ว่าค่า $v_{an} i_x$ เป็นกำลังไฟฟ้าในขณะนั้นส่วนที่อยู่ในโหนดตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวก และกระแสไฟฟ้าจะตามหลังแรงดันไฟฟ้าอยู่ 90 องศา เป็นเทอม II ของสมการ (2.12) เมื่อนำมาสร้างเป็นรูปที่แปรตามเวลาดังรูป 2.9 ก็จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าจะเป็นบวกเมื่อทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง (+) หรือ (-) เดียวกัน แต่กำลังไฟฟ้าจะเป็นลบเมื่อทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง (+) หรือ (-) ต่างกัน เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าที่อยู่ในโหนดตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวนี้จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Power) เป็นศูนย์เสมอ และมีความถี่เป็น 2 ω เช่นกัน

ดังนั้นในวงจรขนาน RL กำลังไฟฟ้าในขณะนั้นจะเป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้าส่วนที่อยู่ใน R กับส่วนที่อยู่ใน L ดังสมการ (2.12) โดยที่กระแส i_x จะตามหลังแรงดันไฟฟ้า v_{an} เป็นมุม θ แต่ไม่ถึง 90 องศา เมื่อนำมาสร้างเป็นรูปที่แปรตามเวลาในรูป 2.10 จะพบว่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ในช่วง (+) หรือ (-) เดียวกันกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นกำลังไฟฟ้าส่วนที่ส่งผ่านจากระบบไปสู่โหนด และกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ในช่วง (+) หรือ (-) ตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้า หมายความว่า เป็นส่วนกำลังไฟฟ้าส่วนที่ส่งผ่านจากโหนดเข้าสู่ระบบที่โหนดต่ออยู่

จะเห็นได้ว่าเทอม I ในสมการ (2.12) เป็นเทอมที่ กำลังไฟฟ้ามี่ค่าเป็นบวกเสมอและมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่แรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง โดยมีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น

$$P = |V| |I| \cos \theta \tag{2.15}$$

เมื่อ P : เป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย เรียกว่า กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (watt : W)

θ : มุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่ามุมกำลัง (Power Angle)

$\cos \theta$: ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

โดย ในวงจรความต้านทาน : กระแสไฟฟ้าจะอยู่บนมุมเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน โยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

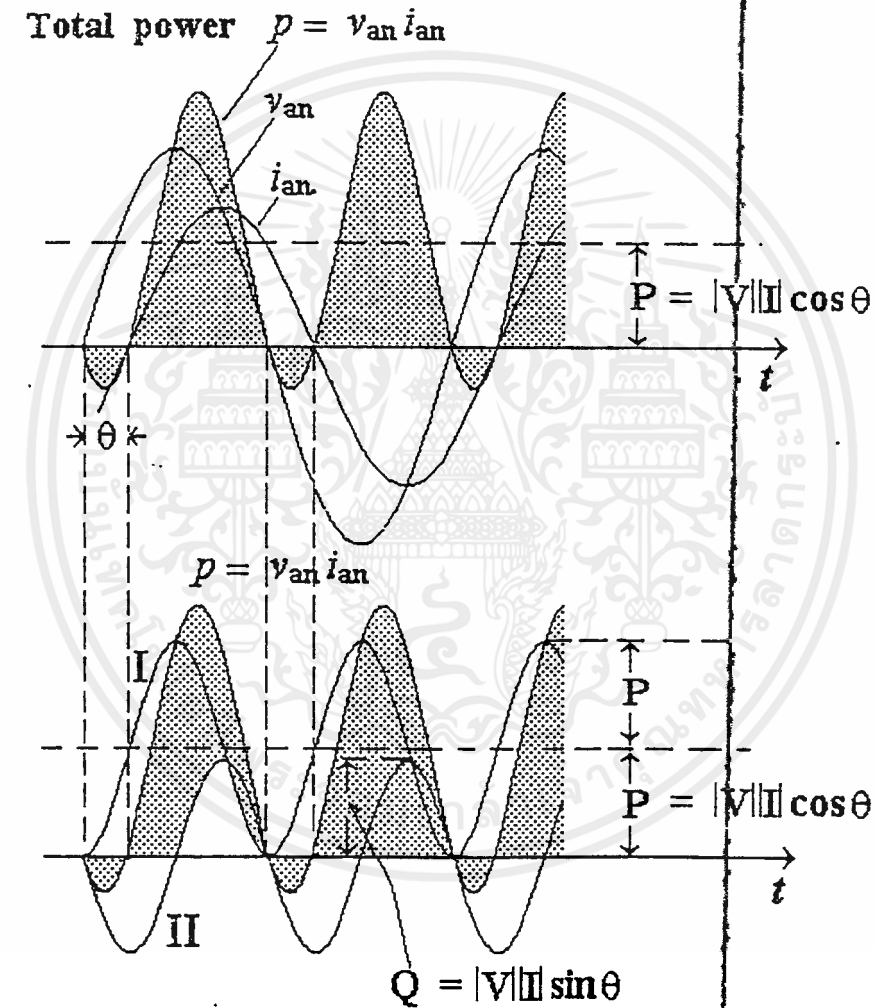
เป็น unity power factor

ในวงจรตัวเหนี่ยวนำ : กระแสไฟฟ้าจะตามหลังแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

เป็น lagging power factor

ในวงจรตัวเก็บประจุ : กระแสไฟฟ้าจะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

เป็น leading power factor



รูป 2.10 กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม θ องศาและกำลังไฟฟ้าขณะนั้นแปรตามเวลา

เทอม II ของสมการ (2.12) ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นศูนย์ โดยสัมพันธ์กันระหว่างรับกำลังไฟฟ้าเข้าสู่โหลดและจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากโหลด เปรียบเสมือนไม่ได้ใช้ประโยชน์ โดยที่ค่าขนาดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าแทนด้วย Q เรียกว่า กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) มีหน่วยเป็น วาร์ (Voltampere Reactive : var)

$$Q = |V| |I| \sin \theta \quad (2.16)$$

ถ้าให้ S : เป็นกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมด (v_{min}) มีหน่วยเป็น โวลท์แอมป์ (Volt Ampere : VA) จะได้ว่า

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.17)$$

$$S = |V| |I| \quad (2.18)$$

สำหรับในวงจรอนุกรม R, L จะได้ว่า เมื่อ

$$Z = R + jX_L \quad (2.19)$$

และ

$$|V| = |I| |Z| \quad (2.20)$$

จะได้ว่า

$$P = |I|^2 R \quad (2.21)$$

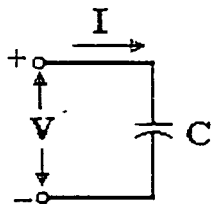
$$Q = |I|^2 X_L \quad (2.22)$$

$$\tan \theta = \frac{Q}{P} \quad (2.23)$$

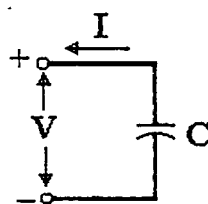
$$\cos \theta = \cos \left(\tan^{-1} \frac{Q}{P} \right) \quad (2.24)$$

ในสมการ (2.12) ถ้าเป็นวงจรรวมตัวเก็บประจุ (Capacitive Circuit) ค่ามุม θ ที่แทนลงไป ในสมการจะมีค่าลบ (-) ทำให้ค่า $\sin \theta$ และค่า Q เป็นลบ ดังนั้นในวงจรขนาน RC กำลังไฟฟ้ารวมที่โหลดเป็น

$$p = |V| |I| \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) - |V| |I| \sin \theta \sin 2\omega t \quad (2.25)$$



(ก)



(ข)

รูป 2.11 วงจรตัวเก็บประจุ (ก) เมื่อเป็นโหลด (ข) เมื่อเป็นแหล่งจ่าย

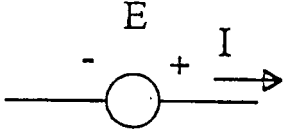
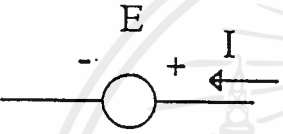
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน Q ที่พิจารณาผ่านมาแล้วนั้นจะพบว่าเมื่อเป็นโหลดตัวเหนี่ยวนำจะมีค่า Q เป็นบวก แสดงให้เห็นว่าโหลด L มีการดูดกลืนกำลังงานส่วนนี้ไว้ ในทางกลับกันเมื่อเป็นโหลดตัวเก็บประจุจะมีค่า Q เป็นลบ ซึ่งเปรียบเสมือนว่าโหลด C สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ ดังแสดงไว้ในตาราง 2.2 ดังนั้นในวงจรขนานที่มีทั้ง L และ C จะทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือน Q ของวงจร RL ในขณะนั้นต่างเฟสไป 180 องศา กับกำลังไฟฟ้าเสมือน Q ของวงจร RC เป็นผลให้ค่า Q รวมของระบบโหลดจะเป็นผลต่างของค่า Q ในส่วน RL กับค่า Q ในส่วน RC

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของตัวเก็บประจุนั้น ถ้าพิจารณาในกรณีของการเป็นแหล่งจ่ายจะได้กำลังไฟฟ้าเสมือนที่เป็นบวก แต่ถ้าพิจารณาในกรณีของการเป็นโหลดจะต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เป็นลบดังรูป 2.11 และตาราง 2.2 นั่นคือ

- ในโหลดตัวเหนี่ยวนำ พลังงานในส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนทางไฟฟ้านี้ จะถูกนำไปเก็บไว้และปล่อยคืนออกในรูปพลังงานสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Energy) ที่ขดลวดเหนี่ยวนำ
- ในโหลดตัวเก็บประจุ พลังงานในส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนทางไฟฟ้านี้จะถูกเก็บไว้และปล่อยออกมาในรูปของพลังงานสนามไฟฟ้า (Electric Field Energy) ที่ตัวเก็บประจุ

ดังนั้นในระบบโหลดวงจรขนาน RLC จะพบว่าตัวเก็บประจุจะเป็นตัวลดกำลังไฟฟ้าเสมือนที่แหล่งจ่ายจะต้องจ่ายให้กับระบบ โหลดลงมา เปรียบเสมือนว่าโหลดตัวเก็บประจุช่วยจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน Q ให้กับความต้องการของโหลดตัวเหนี่ยวนำนั้น จุดประสงค์ของการใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร ไม่ได้ต้องการให้กระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้า แต่ต้องการลดมุมที่กระแสต้องตามหลังแรงดัน ไฟฟ้าลงมาให้มันน้อยลง เพื่อพยายามให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปอยู่ใกล้มุมเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าให้มากที่สุดทำให้สามารถลดค่า Q ของระบบลงมากใกล้ศูนย์ ings ที่ โหลดตัวเหนี่ยวนำก็ยังคงต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเท่าเดิม

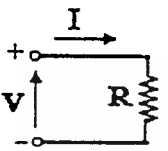
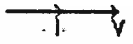
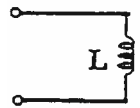

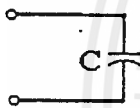

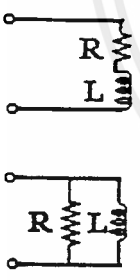

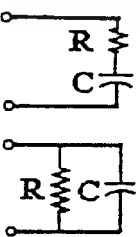
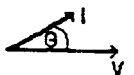
วงจร	กำลังไฟฟ้า
 <p>แหล่งจ่าย(เจนเนอเรเตอร์)</p>	<p>เมื่อ P เป็น + ; emf จ่ายกำลังไฟฟ้าจริง P เป็น - ; emf รับกำลังไฟฟ้าจริง Q เป็น + ; emf จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (I lag E) Q เป็น - ; emf รับกำลังไฟฟ้าเสมือน (I leads E)</p>
 <p>แหล่งรับ(มอเตอร์)</p>	<p>เมื่อ P เป็น + ; emf รับกำลังไฟฟ้าจริง P เป็น - ; emf จ่ายกำลังไฟฟ้าจริง Q เป็น + ; emf รับกำลังไฟฟ้าเสมือน (I lag E) Q เป็น - ; emf จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (I leads E)</p>

ตาราง 2.2 กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายกับ โหลด

จากตาราง 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของ โหลดชนิดต่างๆโดยที่ค่า θ ในตารางเป็นค่าที่ใช้ในการแทนค่าลงในสมการ (2.12) ดังนั้นพอจะสรุปเรื่องกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ว่า

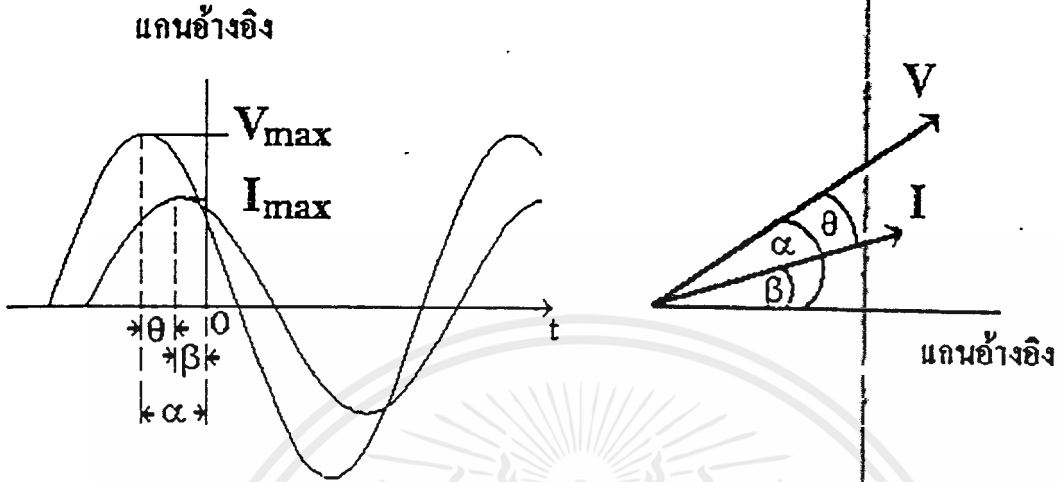
โหลดตัวเหนี่ยวนำ : คึงคุด $+Q$, หรือต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือน

โหลดตัวเก็บประจุ : คึงคุด $-Q$, หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

Load Type	Phasor relation	Phase angle (for power eqn.)	Power absorbed by load	
			P	Q
		$\theta = 0$	$P > 0$	$Q = 0$
		$\theta = +90^\circ$	$P = 0$	$Q > 0$
		$\theta = -90^\circ$	$P = 0$	$Q < 0$
		$0 < \theta < +90^\circ$	$P > 0$	$Q > 0$
		$-90^\circ < \theta < 0$	$P > 0$	$Q < 0$

เอกสารร่าง 2.3 ความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดชนิดต่างๆ นั้น ไม่นอญญา ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กำลังไฟฟ้าในรูปคอมเพล็กซ์ (Complex Power)



รูป 2.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แกนอ้างอิงใดๆ

ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในรูปเฟเซอร์ ที่บอกทั้งขนาดและมุมของปริมาณของวงจรมุ่งๆ เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงใดๆเป็น

$$V = |V| \angle \alpha \text{ และ } I = |I| \angle \beta$$

ทำให้สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟารวมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนรวมกันในรูปของค่ากำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ (Complex Power : S) ได้ จากผลคูณของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าคอนจูเกต (Conjugate of the Current) จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ ที่มีหน่วยเป็น โวลท์-แอมป์ (Volt Ampere : VA) เมื่อ

I^* : conjugate of the current

$$I^* = |I| \angle -\beta$$

$$S = VI^*$$

$$= |V| |I| \angle \alpha - \beta$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปเรคแทนกูล่าฟอร์ม (Rectangular Form)

$$S = |V| |I| \cos(\alpha - \beta) + j |V| |I| \sin(\alpha - \beta) \tag{2.26}$$

ค่ามุม $(\alpha - \beta)$ ก็คือค่ามุมเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor Angle : θ) ที่ทำกันระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้านั่นเอง นั่นคือ

$$S = P + jQ \tag{2.27}$$

power factor $\cos \theta = \frac{P}{|S|} \tag{2.28}$

โหลดค้ำเหนี่ยวนำ : $\alpha > \beta$: กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้า

$\theta = (\alpha - \beta)$ จะมีค่าเป็นบวก ทำให้ค่า Q เป็นบวก

โหลดค้ำเก็บประจุ : $\alpha < \beta$: กระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้า

$\theta = (\alpha - \beta)$ จะมีค่าเป็นลบ ทำให้ค่า Q เป็นลบ

และ

$$P = |S| \cos \theta \tag{2.29}$$

$$Q = |S| \sin \theta \tag{2.30}$$

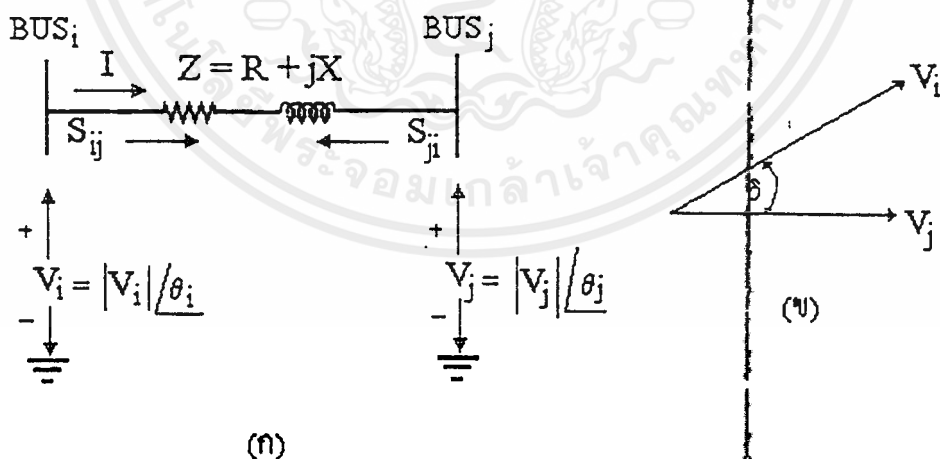
ค่าของกำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ ยังสามารถหาในรูปของอิมพีแดนซ์ (Impedance) และ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) ได้จาก

$$S = P + jQ = VI^* = Z |I|^2 = Y^* |V|^2 \tag{2.31}$$

และขนาดของกำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ ในหน่วยโวลท์แอมแปร์ จะเป็น

$$|S| = |VI^*| = |V||I| = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{2.32}$$

ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line) การวิเคราะห์ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และการกำหนดจุดส่งจุดรับของระบบ มีผลต่อการคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังพิจารณาได้จากรูป 2.13 เป็นวันไลน์ไดอะแกรม (One Line Diagram) แทนระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส (Bus) i กับบัส j และมีค่าความต้านทานของสายส่งเป็น $R + jX$ ต่อเฟส โดยมีทิศทางการส่งผ่านกระแสไฟฟ้างดรูป ดังนั้นการหาค่ากำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ : S_{ij} จะไม่เหมือนกับ S_{ji}



รูป 2.13 วงจรแทนสายส่งระยะใกล้ต่อเฟส

S_{ij} : กำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ต่อเฟส ที่ส่งผ่านจากบัส i ไปบัส j จะเป็น

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I^* \tag{2.33}$$

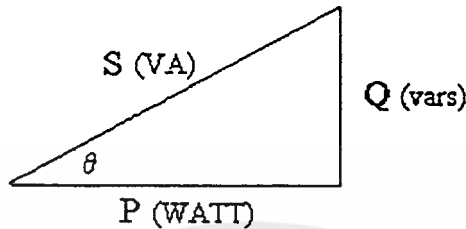
S_{ji} : กำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์ต่อเฟส ที่ส่งผ่านจากบัส j ไปบัส i

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = V_j (-I^*) \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.4 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า (Power Triangle)



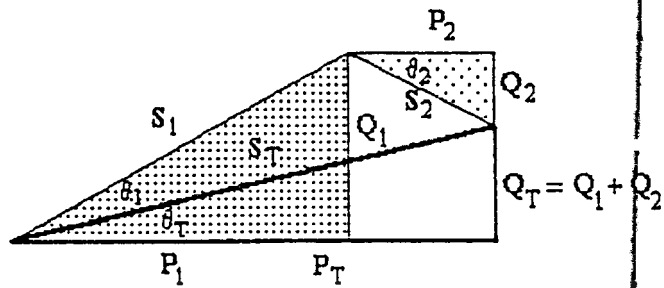
รูป 2.14 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า

รูป 2.14 เป็นการสร้างภาพสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า ของโหลดที่มีตัวเหนี่ยวนำร่วม ตามสมการ (2.27) ถึง (2.30) ซึ่งในวงจรขนาน RL นั้นจะได้กำลังไฟฟ้าจริง (P) จะอยู่บนแกนนอน ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ของโหลดตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าเป็นบวก จะอยู่ในแกนตั้งด้านบวก ซึ่งถ้าเป็นโหลดที่เป็นตัวเก็บประจุจะมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) เป็นลบ ก็จะอยู่บนแกนตั้งด้านลบตรงข้ามกับทิศทางการกำลังไฟฟ้าเสมือนของโหลดตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปร่างของสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าแล้ว จะเห็นว่า

$$Q = P \tan \theta \quad (2.35)$$

ดังนั้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดขนานอยู่ร่วมกัน ทั้งโหลดผสมตัวเหนี่ยวนำ RL และโหลดผสมตัวเก็บประจุ RC จะเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าจริงรวม (P_T) เป็นผลบวกของโหลดรวมกัน ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือนรวม (Q_T) จะเป็นผลต่างของโหลดทั้งสองชนิด ซึ่งพิจารณาได้จากรูป (2.15) เมื่อ P_1 , Q_1 และ S_1 เป็นกำลังไฟฟ้าของโหลดที่มีตัวเหนี่ยวนำ (Lagging Load) มีมุมเฟาเวอร์เพกเตอร์ θ_1 ต่อรวมกันกับโหลดที่มีตัวเก็บประจุ (Leading Load) ที่มีกำลังไฟฟ้า P_2 , Q_2 และ S_2 โดยที่ Q_2 จะเป็นลบ และมีมุมเฟาเวอร์เพกเตอร์ θ_2

ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจะเป็น P_1+P_2 และ Q_1+Q_2 ตามเวกเตอร์ โดยจะได้กำลังไฟฟารวมเป็น S_T ทำให้ได้มุมที่ทำกันระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟารวมใหม่เป็น θ_T ดังรูป



รูป 2.15 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าเมื่อรวมโหลดทั้งหมด

ในการใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันได้นำเอาผลการรวมกันทางเวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ต่อใช้ร่วมกันนี้ เข้ามาเป็นเทคนิควิธีการแก้ไข ให้การใช้ไฟฟ้าของระบบโหลดรวม มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากโหลดส่วนใหญ่จะเป็นวงจรผสมระหว่าง RL ทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมส่วนหนึ่งไปในรูปของกำลังไฟฟ้าเสมือน Q ของโหลดตัวหนึ่งเข้ามา จึงได้นำเอาโหลดตัวเก็บประจุเข้ามาใส่ขนานกับระบบโหลดเดิม เพื่อให้ผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือน มีค่าลดลง ดังนั้นที่ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าจริงเดิมของโหลด กำลังไฟฟ้าใช้งานรวม จะมีค่าลดลง นั่นคือระบบจะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ดีมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3

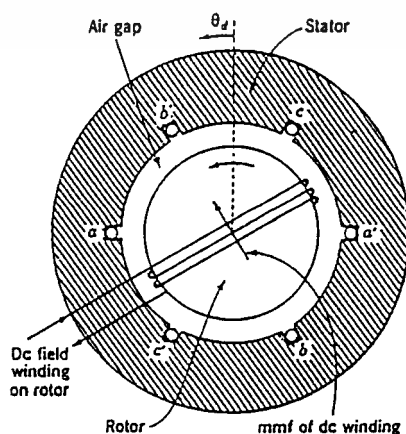
โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (SYNCHRONOUS MACHINE)

3.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส มี 2 ส่วนที่สำคัญคือ

1. โครงสร้างของสารแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetic Structures) ส่วนที่อยู่กับที่ที่อยู่ในรูปทรงกระบอกกลวงหลัก เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) หรืออาร์เมเจอร์ (Armature) และมีร่องแนวตั้ง (Longitudinal Slots) เป็นคอยล์ (Coil) ของขดลวดอาร์เมเจอร์ จะส่งกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่โหลด หรือระบบ โดยเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัส หรือได้รับจากตัวจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากมอเตอร์

2. โรเตอร์ (Rotor) อยู่บนเพลลา และหมุนภายในสเตเตอร์กลวง ขดลวดบนโรเตอร์นี้เรียกว่า ขดลวดสนาม (Field Winding) จะนำจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ ค่าแรงขับเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) ที่สูงมากจะรวมกับค่าแรงขับเคลื่อนแม่เหล็กที่ผลิตโดยกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ ฟลักซ์ผลลัพธ์ผลิตแรงดันไฟฟ้าในคอยล์ของขดลวดอาร์เมเจอร์ และให้แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์

กระแสไฟฟ้าตรงนำจ่ายสู่ขดลวดสนามโดยตัวกระตุ้น (Exciter) อาจเป็นเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่ประกอบอยู่บนเพลลา หรือแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกส่วนที่เชื่อมต่อกับขดลวดสนามผ่านแปรงถ่านบนวงแหวนลื่น หรือสลีปริง (Slip Ring) เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่จะมีตัวกระตุ้นที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับกับเร็คติไฟเออร์แบบโซลิดสเตต (Solid-State Rectifiers)



รูป 3.1 เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส ที่ส่วนประกอบย่อย
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัยในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถ
นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ
แสดงด้านปลายของ โรเตอร์แบบทรงกระบอก 2 ขั้ว และส่วนพื้นที่หน้าตัดของสเตเตอร์

3.2 ปฏิกริยาของอาร์เมเจอร์ในเครื่องจักรซิงโครนัส

ถ้าโหลด 3 เฟสสมดุลย์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า 3 เฟสแล้ว กระแสไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลจะไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ด้วย จากเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วตามรูป 3.1

เมื่อกำหนดให้ $t=0$ เมื่อ i_a เป็นค่าสูงสุด

$$i_a = I_{max} \cos \omega t \tag{3.1}$$

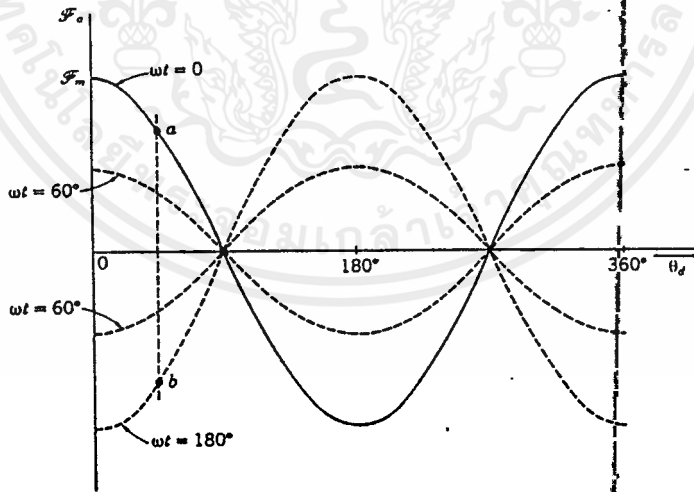
$$i_b = I_{max} \cos (\omega t - 120^\circ) \tag{3.2}$$

$$i_c = I_{max} \cos (\omega t - 240^\circ) \tag{3.3}$$

ตำแหน่งรอบขดลวดอาร์เมเจอร์ แทนด้วยมุม θ_d ซึ่งวัดจากเส้นแกนเหล็ก a ตามรูป 3.1 ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบอาร์เมเจอร์ที่ผลิตจากกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ต้องเป็นฟังก์ชัน การแทนที่ของ θ_d ทั้งสอง และเวลา t เมื่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นกระแสที่อยู่ในเฟส a ซึ่งแสดงด้วย $\mathcal{F}_a(\theta_d, t)$ แล้วค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ผลิตจาก i_a ต้องเป็นฟังก์ชันคาบเวลาในเฟสกับ i_a รูป 3.2 แสดงค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของเฟส a ของอาร์เมเจอร์ตามฟังก์ชัน θ_d ที่ $t=0$ การกระจายของ \mathcal{F}_a รอบอาร์เมเจอร์แสดงด้วย

$$\mathcal{F}_a(\theta_d, 0) = \mathcal{F}_m \cos \theta_d \tag{3.4}$$

เมื่อ \mathcal{F}_m เป็นค่าสูงสุดของ \mathcal{F}_a



รูป 3.2 การกระจายรอบอาร์เมเจอร์ของค่าแรงขับเคลื่อนแม่เหล็กที่ผลิตจากกระแสในเฟส a ของคลื่นไฟฟ้าตามรูป 3.1 โดยให้ค่าเปลี่ยนแปลงของ ωt เมื่อ i_a แสดงตามสมการ

เส้นประตามรูป 3.2 ได้แสดงการกระจายของ \mathcal{F}_a รอบอาร์เมเจอร์ โดยที่เราให้ค่าสูงสุด

\mathcal{F}_a เป็น $0.5 \mathcal{F}_m$ เมื่อ ωt เป็นมุม 60° เพราะค่าคงที่ของเวลา i_a เท่ากับ $0.5 \mathcal{F}_m$ จากสมการ(3.1) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งคงที่ $\theta_d = 45^\circ$ \mathcal{V}_a เป็นความเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นขายนระหว่างค่าตามจุด a และ b ตามรูป 3.2 หาก $\theta_d = 90^\circ$ แล้ว \mathcal{V}_a ย่อมเป็นศูนย์เสมอ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงไปของเวลากับการเปลี่ยนแปลงไปแบบสเปซเรียล (Spatial Variation) ของ \mathcal{V}_a เมื่อ \mathcal{V}_a อยู่ในเฟสกับ i_a แล้ว

$$\mathcal{V}_a(\theta_d, t) = \mathcal{V}_m \times \cos \theta_d \times \cos \omega t \quad (3.5)$$

$$\mathcal{V}_b(\theta_d, t) = \mathcal{V}_m \times \cos(\theta_d - 120^\circ) \times \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (3.6)$$

$$\mathcal{V}_c(\theta_d, t) = \mathcal{V}_m \times \cos(\theta_d - 240^\circ) \times \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (3.7)$$

ผลรวมของ 3 ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหล่านี้ เป็นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กผลลัพธ์ \mathcal{V}_{ar} ที่เรียกว่าค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ โดยใช้สมการตรีโกณมิติจะได้

$$\mathcal{V}_{ar} = \mathcal{V}_a + \mathcal{V}_b + \mathcal{V}_c = \frac{3}{2} \mathcal{V}_m \cos(\theta_d - \omega t) \quad (3.8)$$

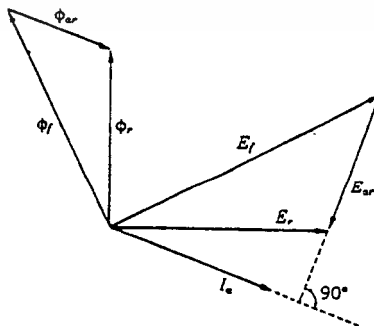
สมการ (3.8) แสดงคลื่นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เดินทางรอบอาร์เมเจอร์ในทิศทางการเพิ่ม θ_d โดยที่ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นค่าคงที่และ

$$\theta_d - \omega t = \text{constant} \quad (3.9)$$

ซึ่งจะได้ $\frac{d\theta_d}{dt} = \omega$ (3.10)

สมการ (3.10) ทำให้เราทราบว่าค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์หมุนรอบอาร์เมเจอร์ด้วยความเร็วเชิงมุม ω เท่ากับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ดังนั้นค่าแรงขับเคลื่อนแม่เหล็กนี้จะอยู่กับที่เมื่อเทียบกับค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ผลิตจากขอลวดกระแสตรงของโรเตอร์ ฟลักซ์รวมจะคกคร่อมช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จะผลิตจากผลลัพธ์ของค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองนี้

3.3 โมเดลวงจรของเครื่องจักรซิงโครนัส



รูป 3.3 แผนภาพเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของฟลักซ์ที่เส้นคอยล์ a ($\theta_a = 0$) และแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเฟส a ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามรูป 6.2 ซึ่งแผนภาพนี้สามารถเขียนให้เฟส b,c และประยุกต์สู่เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่มีโรเตอร์รูปทรงกระบอกได้ทั้งหมด

ในรูป 3.3 ให้ E_{sr} ตามหลัง I_a เป็นมุม 90°

$$E_{sr} = -jI_a X_{sr} \tag{3.11}$$

$$E_r = E_f + E_{sr} = E_f - jI_a X_{sr} \tag{3.12}$$

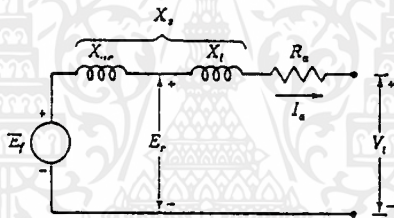
ถ้า แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเป็น V_t

$$V_t = E_r - jI_a X_s \tag{3.13}$$

จะได้

$$V_t = E_f - I_a(R_s + jX_s) \tag{3.14}$$

โดยทั่วไป R_s จะน้อยกว่า X_s มาก



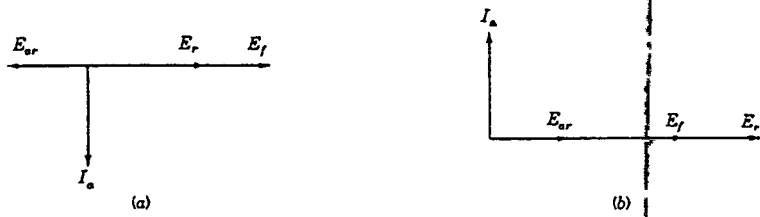
รูป 3.4 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ความสัมพันธ์ระหว่าง E_r , E_{sr} และ E_f แสดงตามรูป 3.5 ถ้า โหลดเหนี่ยวนำสูง สามารถนำมาใช้กับเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า แล้วแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่มีภาวะไร้โหลด หรืออีกนัยหนึ่ง โหลดที่มีความจุไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสูงกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าภาวะไร้โหลดนั้น หลักการดังกล่าวสามารถนำมาดัดแปลงกับมอเตอร์ซิงโครนัสได้ วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์กับเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีทิศทางกระแสไฟฟ้า I_a ที่ย้อนกลับเหมือนกัน แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าและมอเตอร์มีการเรียกชื่อขั้วสคริป (Subscript) เดียวกันเสมอ เช่น E_g และ E_m แทนที่ E_f โดยเฉพาะเมื่อทั้งสองเป็นวงจรเดียวกัน ตามรูป 3.6 จะ ได้สมการ

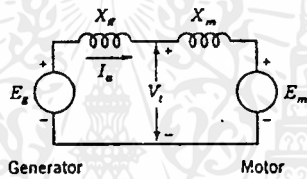
$$V_t = E_g - jI_a X_g \tag{3.15}$$

$$V_t = E_m + jI_a X_m \tag{3.16}$$

รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าและมอเตอร์เป็น X_g และ X_m โดยละรีแอกแตนซ์อาร์เมเจอร์ไว้



รูป 3.5 แผนภาพเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r และ E_{ar} เมื่อกระแสถูกส่งผ่านเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า ตามหลัง E_r เป็นมุม 90 องศาและนำหน้า E_r เป็นมุม 90 องศา



รูป 3.6 แผนภาพวงจรสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ โดยที่ I_a เป็นกระแสที่ส่งจากเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าและรับจากมอเตอร์

จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าทันทีที่ทันใดที่ไหลหลังจากเกิดฟลัดจ์จะแตกต่างจากค่าเสถียร เราจึงใช้รีแอกแตนซ์ลัทธิทรานเซียนท์ X'' หรือรีแอกแตนซ์ทรานเซียนท์ X' แทนรีแอกแตนซ์ซิงโครไนต์ X_s ในโมเดลเครื่องจักรซิงโครไนต์สำหรับการคำนวณฟลัดจ์

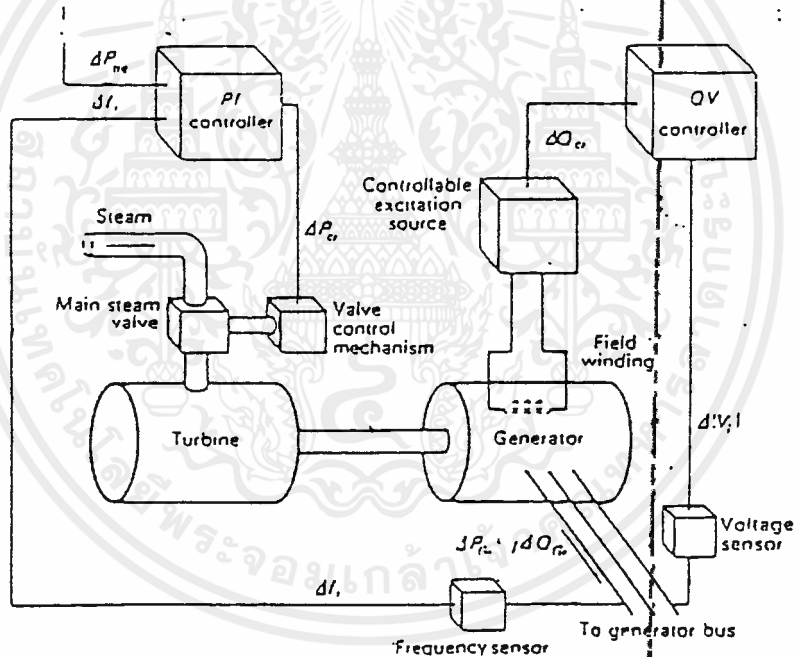
ถ้าเราพิจารณาเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบขั้วอื่นให้มีความแตกต่างระหว่างทางฟลักซ์โดยตรงเข้าสู่หน้าขั้วเรียกว่า แกนตรง (The direct axis) และทางระหว่างขั้วเรียกว่า แกนแนวระดับ (The quadrature axis) ดังนั้นการทำกระแสอาร์เมเจอร์ต้องแบ่งเป็น 2 องค์ประกอบ โดยที่องค์ประกอบหนึ่งเป็นมุม 90 องศา จากเฟสกับแรงดันไฟฟ้าภาวะไร้โหลด E_r และอีกองค์ประกอบหนึ่งอยู่ในเฟสกับ E_r ทั้งนี้องค์ประกอบแรกเป็นสาเหตุให้แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage Drop) โดยผลคูณของกระแสไฟฟ้าและส่วนที่เป็น รีแอกแตนซ์ซิงโครไนต์แกนตรง X_d อีกองค์ประกอบหนึ่งจะอยู่ในเฟสเดียวกับ E_r ทำให้แรงดันไฟฟ้าตก โดยผลคูณขององค์ประกอบของกระแสไฟฟ้านั้นและรีแอกแตนซ์ซิงโครไนต์ตามแกนแนวระดับ X_q

บทที่ 4

ตัวเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง (STABILIZER FOR MACHINE IN POWER SYSTEM)

4.1 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator)

ในการทำงานของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีมุมของภาระสูงๆ (Load Angle) และในสภาวะทรานเซียนท์ (Transient Condition) จะขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่ทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดกระตุ้นของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า



รูป 4.1 การควบคุมเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า

การควบคุม (Regulation) จะเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่เทอร์มินอล (Terminal Voltage) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระบบการปฏิบัติการ การเปลี่ยนแปลงของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะของโหลด (Load) ซึ่งต้องการแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดกระตุ้นที่มีค่าแตกต่างกันออกไป

ในเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าพื้นฐาน จะมีการทำงานโดยใช้การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่มีการปรับเป็นกระแสตรงแล้ว (Rectifier) จากแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลของเครื่องกำเนิดกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย การนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไฟฟ้า : V_f กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง : V_r ค่าความผิดพลาดจะถูกขยายโดยเครื่องขยาย และป้อนเข้าสู่ขดลวดกระตุ้น เครื่องขยายอาจประกอบด้วยเครื่องขยายแม่เหล็ก , เครื่องขยายทรานซิสเตอร์ หรือตัวกระตุ้นกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีการกระตุ้นในสภาวะคงที่ดังนี้

$$V_f = \mu(V_r - V_f) \quad (4.1)$$

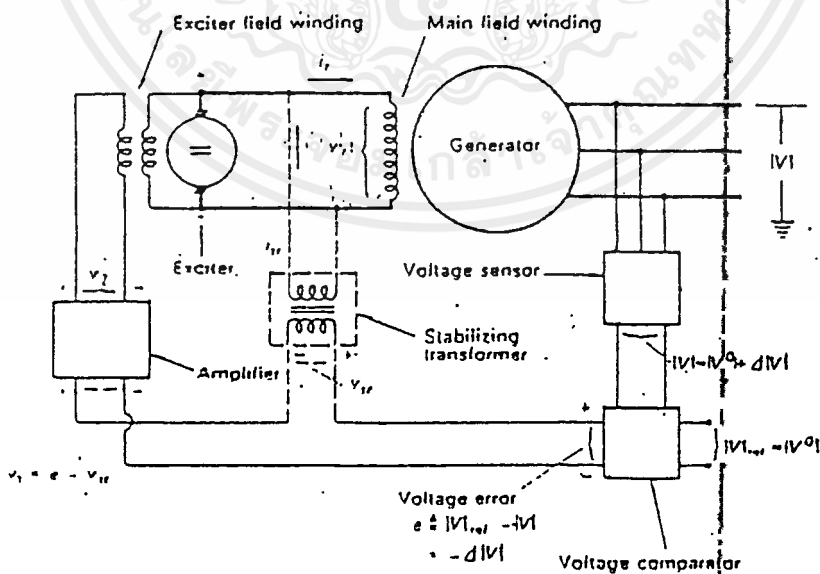
เมื่อ V_r เป็นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดกระตุ้นที่โรเตอร์ และเป็นตัวขยายทั้งหมดของระบบกระตุ้น ในรูป 4.2 จะแสดงถึงระบบจำลองที่ใช้ในระบบนี้ ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักๆ ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติดังต่อไปนี้

อุปกรณ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (Voltage Comparator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ที่มีค่าที่ตั้งค่าให้เท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดไว้

อุปกรณ์ขยายค่า (Amplifier) อุปกรณ์นี้ถูกกำหนดคุณสมบัติโดยอัตราขยาย : K_s และมีค่าคงที่ของเวลา : T_s ซึ่งค่านี้โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่า 100 ms ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของอุปกรณ์ขยายนี้จะเท่ากับ

$$V_2(s) / V_1(s) = K_s / (1 + sT_s) \quad (4.2)$$

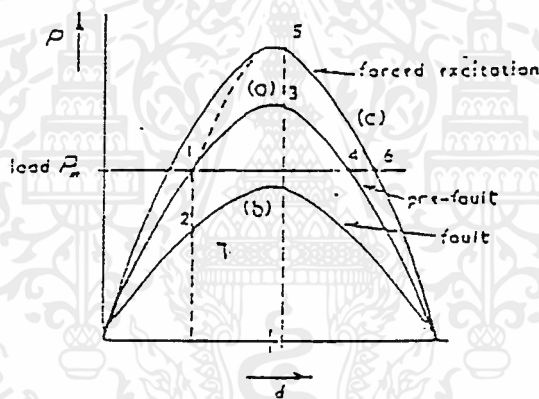
ตัวกระตุ้น (Exciter) เป็นอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์ขยาย โดยมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่เหมือนกันกับอุปกรณ์ขยายค่า



รูป 4.2 แบบจำลองอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพภายใต้สภาวะทรานเซียนท์ (Transient Stabilizer) ของการเกิดการผิดปกติ จะมีความต้องการให้เพิ่มค่ากระตุ้นขึ้น เพื่อที่ค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเหลืออยู่หลังจากการจัดการสภาวะผิดปกติ เพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียสภาวะซิงโครนิสม์ (Synchronism) ยกตัวอย่างดังกราฟในกราฟ (a) ในรูป 4.3 ก่อนจะมีการเกิดสภาวะผิดปกติ เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะมีการทำงานอยู่ที่จุด 1 เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติ ดังกราฟ (b) โรเตอร์จะเกิดการเร่งและไม่มี การควบคุมการกระตุ้น หลังจากที่เกิดสภาวะผิดปกติได้ถูกขจัดไปหมดแล้ว การทำงานของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะกลับเข้าสู่กราฟ (a) ที่จุด 3 โดยคิดว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) การทำงานในช่วงนี้จะมีการหน่วงเกิดขึ้น ซึ่งจะมีการทำงานอยู่ที่จุด 4 ที่จุดนี้ โรเตอร์จะเกิดการเร่งอีกครั้งหนึ่ง และจะทำให้เกิดการสูญเสียสภาวะซิงโครนิสม์ แต่เมื่อมีการควบคุมโดยการกระตุ้น จะเข้าสู่การทำงานที่จุด 5 ของกราฟ (c) ในรูป 4.3



รูป 4.3 ผลของการควบคุมขดลวดกระตุ้น

4.2 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (Governor)

ในอดีตอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ จะใช้ในการรักษาเสถียรภาพในสภาวะคงที่ของระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาวะของโหลด และใช้ป้องกันการทำงานที่ความเร็วรอบสูงเกิน จนทำให้เกิดการทริป (Trip) อย่างฉุกเฉิน ทำให้เกิดการไม่ยอมรับทางไฟฟ้า (Load Rejection)

การเปลี่ยนแปลงสภาวะของโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะจำกัดโดยการเปลี่ยนแปลงของการผลิตไฟฟ้าที่คู่อยู่กับระบบ ในกรณีที่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความถี่จะตกลง จะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียสภาวะคงที่ และเกิดความล้มเหลวของระบบ ดังนั้นตัวควบคุมของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะต้องมีคุณสมบัติที่

สามารถปรับกำลังผลิตอย่างอัตโนมัติ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไป นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_g = P_s - (2SP_r(F-F_0))/F_0 \quad (4.3)$$

- เมื่อ P_g : กำลังไฟฟ้าด้านอินพุท
 P_r : กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาที่พิกัด
 P_s : การปรับเกียร์ที่ควบคุมความเร็วรอบ
 F : ค่าความถี่ขณะนั้น
 F_0 : ค่าความถี่พื้นฐานของระบบ

หลักการดำเนินงานโดยทั่วไปของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ

จุดประสงค์ก็เพื่อที่จะควบคุมความถี่และกำลังไฟฟ้า ในขณะที่มีการจ่ายโหลดทางไฟฟ้า จะทำให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าตกลง และเนื่องจากกำลังของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ เมื่อกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงก็มีผลทำให้ความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งเราสามารถใช้เครื่องตรวจจับความถี่ตรวจจับสัญญาณดังกล่าว เพื่อที่จะส่งเข้าไปที่อุปกรณ์ควบคุมกำลังและความถี่ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะถูกขยายและเปลี่ยนรูปไปเป็นสัญญาณควบคุมแรงบิดและ กำลังของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับ โหลด

กลไกการควบคุมความเร็วรอบ

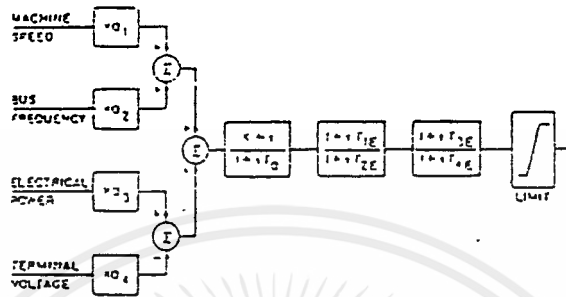
จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

1. ตัวควบคุมความเร็วรอบ (Speed Governor) เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบความผิดพลาดในการควบคุมความถี่ของโหลด ซึ่งจะรวมไปถึงส่วนประกอบทั้งหมดที่ตอบสนองกับความถี่รอบและมีอิทธิพลกับส่วนประกอบอื่นๆของระบบ
2. วาล์วซึ่งถูกควบคุม โดยตัวบังคับ (Governor Controller Valve) เป็นตัวควบคุมสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้าสู่ใบพัด ซึ่งจะถูกระงับโดยกลไกที่ควบคุมความเร็วรอบ
3. ตัวเปลี่ยนความเร็วรอบ (Speed Changer) จะเป็นการที่ระบบสามารถบังคับความเร็วรอบของหน่วยควบคุมเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า (Turbo Generator Unit) ได้ ในขณะที่ทำงานอยู่
4. อุปกรณ์อื่นๆ เช่น คันโยก อุปกรณ์ในการขยาย ตัวส่งผ่าน เซอร์โวมอเตอร์และรีเลย์ ซึ่งเป็นตัวกลางระหว่างตัวควบคุมความเร็วรอบและวาล์วที่ควบคุมโดยตัวบังคับ

4.3 ตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer)

ตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง หรือเรียกย่อว่า PSS จะเป็นอุปกรณ์ในการปรับปรุงเสถียรภาพทางไดนามิกส์ (Dynamics) ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสัญญาณที่ได้จากตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จะถูกเพิ่มเข้าไปในระบบกระตุ้น เพื่อที่จะเพิ่มขีดความสามารถในการหน่วง (Damping) ของระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงที่เกิดการถ่วง (Oscillation) ของความถี่ ปริมาณที่จะใช้

(Shaft) และความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งนำไปทำการหาสัญญาณควบคุมตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อส่งไปยังระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า



รูป 4.4 บล็อกไดอะแกรมของตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไปแล้ว ตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมนั้น จะทำงานเป็นโครงข่ายแบบม้วนนำหน้า-ตามหลัง (Lead - Lag Network) ซึ่งใช้ความเร็วรอบเป็นอินพุท โดยแนวความคิดพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง จะเป็นการชดเชยมุมเฟสล่าช้า ซึ่งเป็นผลจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ ตัวกระตุ้นและเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จะทำให้สามารถควบคุมแรงบิดหน่วงได้ และเป็นผลให้สามารถเพิ่มขีดความสามารถของเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังได้อีกด้วย

บทที่ 5

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ (STATIC VAR COMPENSATOR : SVC)

ระบบที่มีสายส่งยาวมากๆ การใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ในการควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังมีประสิทธิภาพไม่ดีพอ จึงได้มีการนำอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์มาประยุกต์ใช้ โดยติดตั้งที่จุดกึ่งกลางของสายส่ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความหน่วงของระบบให้ดีขึ้น

การพิจารณาหลักการทั่วไปในการทำงานของระบบสแตติกวาร์ (Static Var System : SVS) เราใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ ต่อเข้ากับระบบสายส่งแรงสูง (High Volt AC) หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบคุณลักษณะที่แสดงออกมา

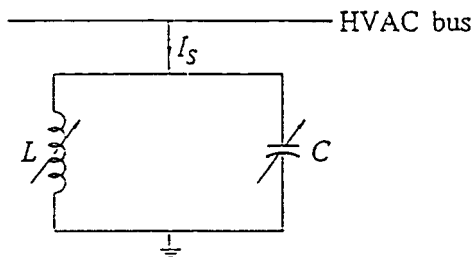
5.1 การทำงานที่ความถี่พื้นฐานของระบบสแตติกวาร์

(Fundamental Frequency Performance of an SVS)

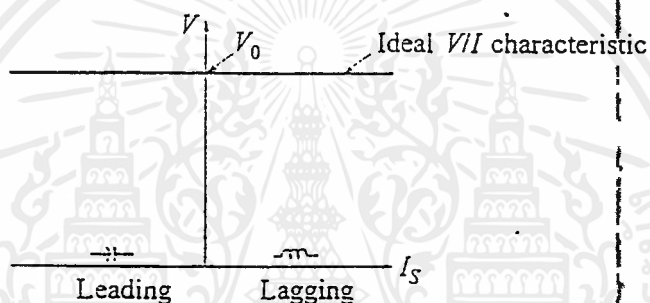
การศึกษาการทำงานที่ความถี่พื้นฐานของระบบสแตติกวาร์ จะทำการศึกษาเรื่องต่างๆดังนี้

5.1.1 คุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์ในอุดมคติ

ระบบสแตติกวาร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor : C) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor : L) ซึ่งต่อขนานกันอยู่และต่ออยู่กับบัส (Bus) ของระบบสายส่งแรงสูง โดยทั้งตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าได้เพื่อทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้า และควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังรูป 5.1 ดังนั้นระบบสแตติกวาร์ ควรจะมีแรงดันไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งสามารถควบคุมการจ่ายหรือการรับกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ไม่จำกัด โดยไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน และยังสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว การทำงานของระบบสแตติกวาร์สามารถแสดงให้เห็นดังรูป 5.2



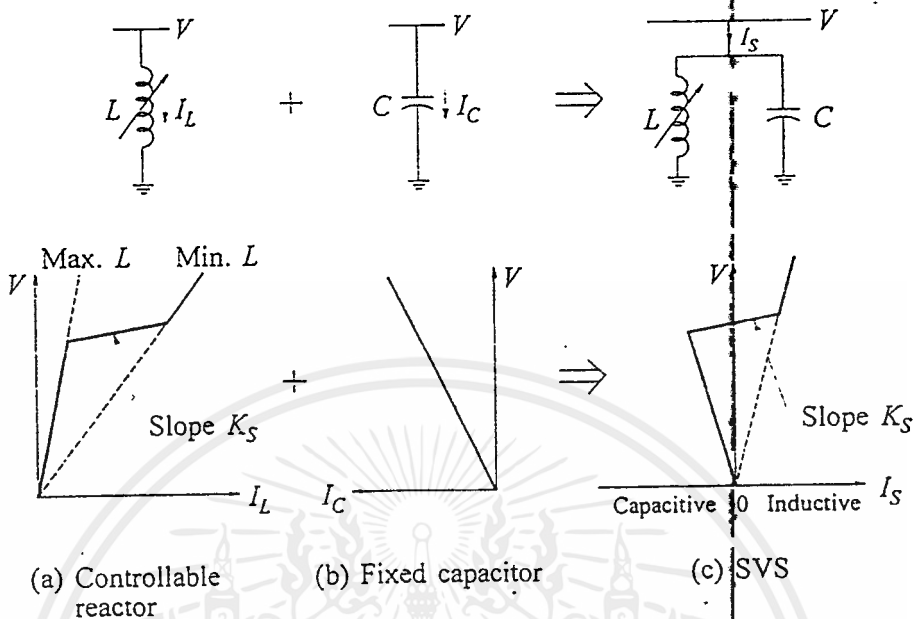
รูป 5.1 ระบบสแตติกวารี่ในอุดมคติ



รูป 5.2 คุณลักษณะ V/I ของการชดเชยในอุดมคติ

5.1.2 คุณลักษณะของระบบสแตติกวารี่ในความเป็นจริง

ที่มาของคุณลักษณะของระบบสแตติกวารี่ประกอบด้วย ค่าความเหนี่ยวนำที่สามารถควบคุมได้ และตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ โดยคุณลักษณะรวมของระบบสแตติกวารี่ เกิดจากการนำคุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมารวมเข้าด้วยกันดังรูป 5.3

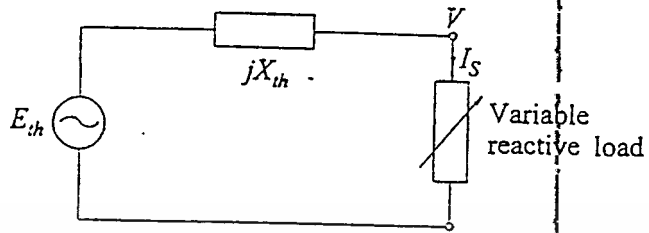


รูป 5.3 คุณลักษณะรวมของระบบสแตติกวาร์

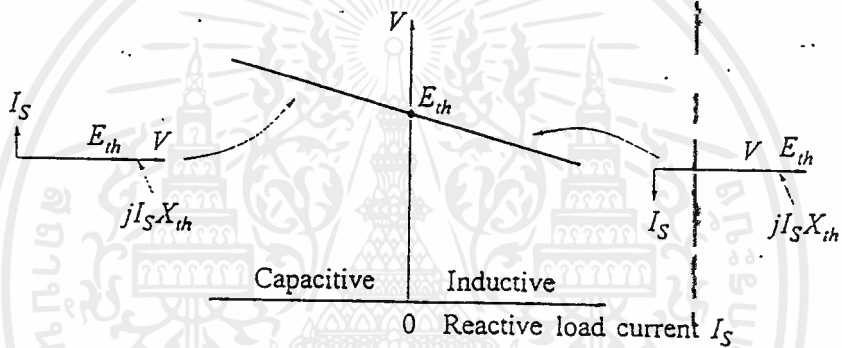
- (a) คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำที่สามารถควบคุมได้
- (b) คุณลักษณะของตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่
- (c) คุณลักษณะรวมของระบบสแตติกวาร์

5.1.3 คุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Characteristic)

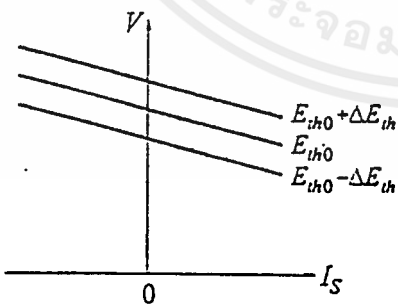
พิจารณาคูณลักษณะ V/I ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการพิจารณาวงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit) ซึ่งแสดงดังรูป 5.4 (a) เราจะพบว่าแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับกระแสจากโหลดตัวเก็บประจุ (Capacitive Load) และลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับกระแสจากโหลดตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Load) รูป 5.4 (b) ส่วนรูป 5.4 (c) และรูป 5.4 (d) แสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของ V/I ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อแหล่งจ่ายกระแส (E_s) และค่ารีแอกแตนซ์ (X_{bus}) ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ตามลำดับ



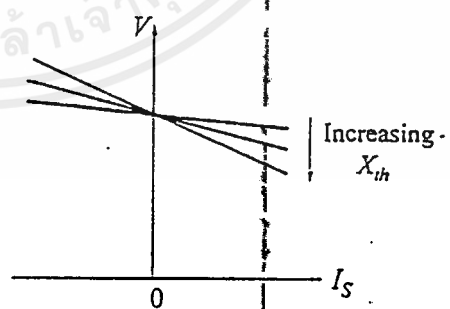
(a) Thevenin equivalent circuit of HVAC network



(b) Voltage-reactive current characteristic



(c) Effect of varying source voltage E_{th}



(d) Effect of varying system reactance X_{th}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

รูป 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของโหลดรีแอคทีฟ

นด้านการค้า

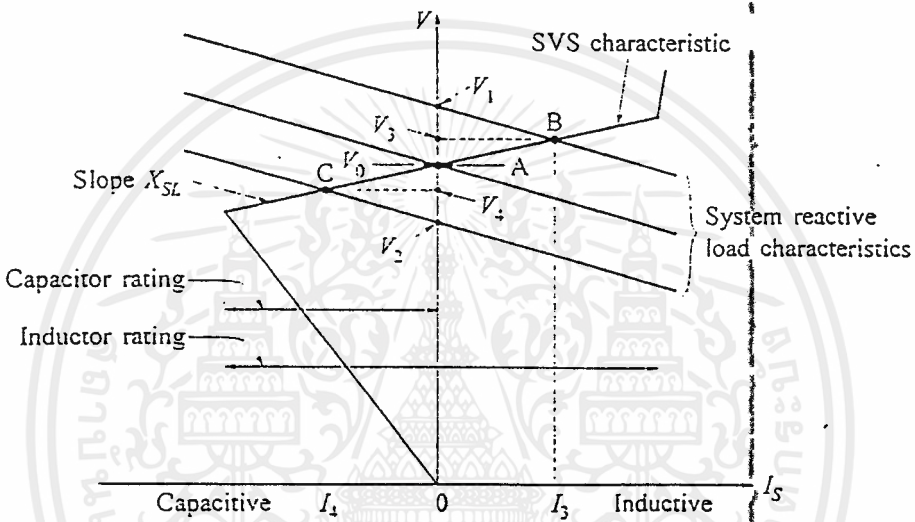
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 คุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อประกอบเข้ากับระบบสแตติกวาร์

ผลจากคุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์ และคุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นไปดัง
สมการ

$$V = V_0 + X_{SL} I_s \tag{5.1}$$

และสามารถแสดงเป็นรูปกราฟดังรูป 5.5



รูป 5.5 แสดงจุดทำงานของระบบสแตติกวาร์

จากรูป 5.5 เราจะเริ่มพิจารณาจากคุณลักษณะค่ากลาง (Middle Characteristic) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของระบบ และถูกสมมติให้มีคุณลักษณะเดียวกับคุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์ (จุด A ในกราฟ) ที่จุดนี้ $V = V_0$ และ $I = I_0$ และหลังจากนั้นเราจะมาพิจารณาการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงดันไฟฟ้าโดย ΔE_{sv} และแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ กรณีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และกรณีแรงดันไฟฟ้าลดลง

(1). กรณีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูป 5.5 จะเห็นได้ว่า ค่า V เพิ่มขึ้นจาก $V = V_0$ เป็น $V = V_1$ (ในกรณีไม่มีผลจากคุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์) แต่ถ้ามีผลจากคุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์ ค่า V ที่เพิ่มขึ้นจาก $V = V_0$ เป็น $V = V_1$ จะเปลี่ยนแปลงค่าจาก $V = V_1$ เป็น $V = V_3$ (จุด B ในกราฟ) ซึ่งที่จุดนี้ $I_s = I_3$

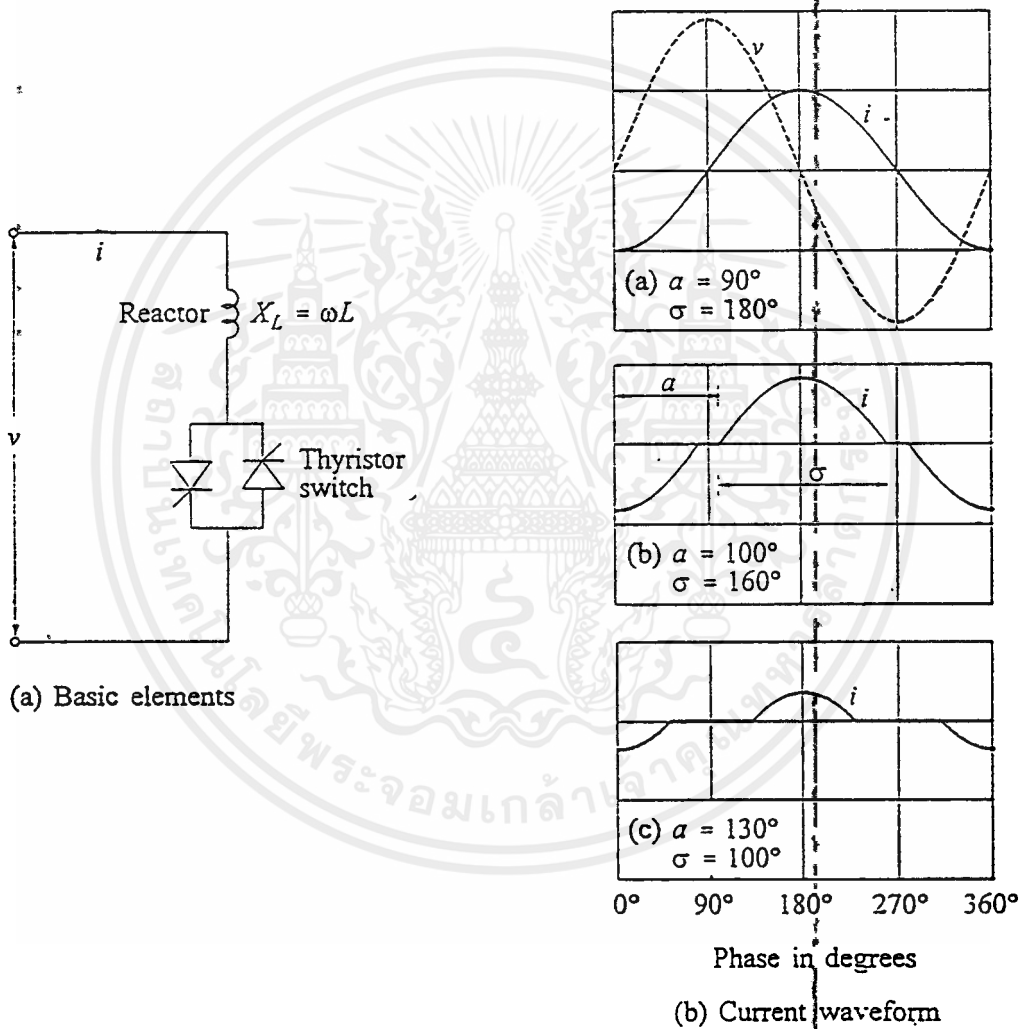
(2). กรณีแรงดันไฟฟ้าลดลง จากรูป 5.5 จะเห็นได้ว่า ค่า V ลดลงจาก $V = V_0$ เป็น $V = V_2$ (ในกรณีไม่มีผลจากคุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์) แต่ถ้ามีผลจากคุณลักษณะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น หากมีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสแตติกวาร์ ค่า V ที่ลดลงจาก $V = V_0$ เป็น $V = V_2$ จะเปลี่ยนแปลงค่าจาก $V = V_2$ เป็น $V = V_4$ (จุด C ในกราฟ) ซึ่งที่จุดนี้ $I_s = I_4$

5.2 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor- TCR)

พื้นฐานของไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ คือตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับ ไทริสเตอร์ที่มี สวิตช์สองทิศทางดังรูป 5.6 (a)



รูป 5.6 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์

การนำกระแสของไทริสเตอร์ขึ้นอยู่กับมุมทริก (Firing Angle : α) โดยไทริสเตอร์นำกระแสไฟฟ้าเต็มที่ที่มุมทริกเท่ากับ 90 องศา โดยกระแสไฟฟ้าเป็นกระแสรีแอกทีฟและมีลักษณะเป็นสัญญาณคลื่นรูปซายน์ เมื่อนำกระแสไฟฟ้าบางส่วนมีค่ามุมทริกอยู่ระหว่าง 90 องศา ถึง 180 องศา เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศา ดังรูป 5.6 ส่วนในช่วงที่มุมทริกอยู่ระหว่าง 0 องศา และ 90 องศาจะไม่ใช่เนื่องจาก ให้กระแสซึ่งมีองค์ประกอบเป็นกระแสตรง

ให้ σ คือมุมในการนำกระแสซึ่งสัมพันธ์กับ α คือ

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (5.2)$$

กระแส i ที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด คือ

$$\begin{aligned} i &= \sqrt{2} V / X_L (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \text{for } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ &= 0 \quad \text{for } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi, \end{aligned} \quad (5.3)$$

เมื่อใช้อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) วิเคราะห์รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า จะได้องค์ประกอบพื้นฐาน

$$I_1 = (V / \pi X_L) (\sigma - \sin \sigma) \quad (5.4)$$

เมื่อ I_1 และ V เป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง

X_L คือ รีแอกแตนซ์ ของตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่พื้นฐาน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของความถี่พื้นฐาน จะเห็นว่า TCR ก็คือค่าความนำ (Susceptance) ที่สามารถควบคุมได้นั่นเอง โดยผลของค่าความนำในรูปฟังก์ชันของมุมทริก

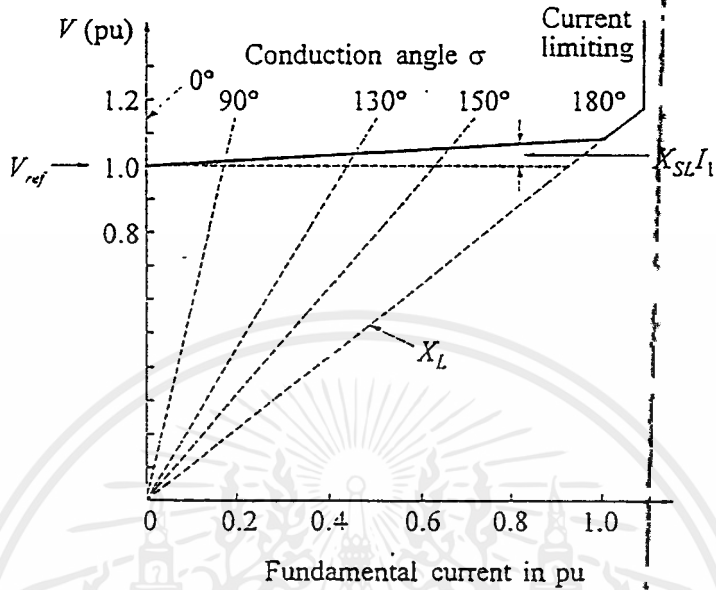
$$\begin{aligned} B(\alpha) &= I_1 / V = (\sigma - \sin \sigma) / \pi X_L \\ &= [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] / \pi X_L \end{aligned} \quad (5.5)$$

ค่าสูงสุดเนื่องจากผลของค่าความนำ ที่การนำเต็มที่ ($\alpha = 90$ องศา) มีค่าเท่ากับ $1/X_L$ และค่าต่ำสุดเนื่องจากผลของค่าความนำ มีค่าเท่ากับ 0 โดย $\alpha = 180$ องศา

คุณลักษณะ V/I ของไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ แสดงในรูป 5.7 และสามารถอธิบายได้โดย สมการ

$$V = V_{ref} + X_{sl} I_1 \quad (5.6)$$

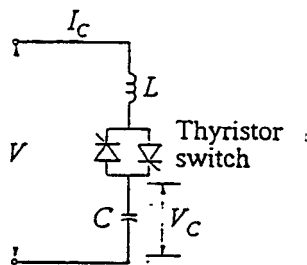
เมื่อ X คือ ความชันของรีแอกแตนซ์ ซึ่งถูกกำหนดโดยอัตราขยาย (Gain) ของระบบควบคุม



รูป 5.7 คุณลักษณะพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์

5.3 ไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ (Thyristor Switched Capacitor : TSC)

ไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับไทรสเตอร์ที่มีสวิตช์สองทิศทางและตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก แสดงดังรูป 5.8 โดยตัวเหนี่ยวนำถูกใช้เพื่อจำกัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และช่วยลดกระแสไฟฟ้าให้น้อยลง

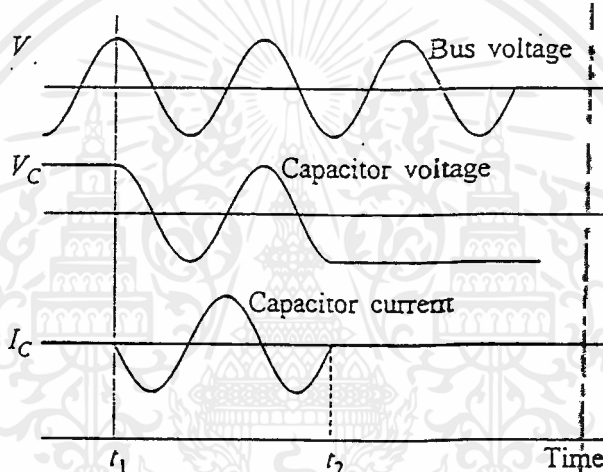


รูป 5.8 ไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.9 แสดงการทำงานของสวิตช์ของไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ เมื่อเวลา T เท่ากับ t_1 สวิตช์เปิดวงจร บัสโวลต์เดจ (V) จะมีค่าสูงสุดและมีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (V_C) เมื่อเวลา $T = T_2$ สวิตช์ปิดวงจร กระแสไฟฟ้าขณะนี้จะมามีค่าเท่ากับ 0 และตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดโดยทันทีเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเปิดสวิตช์ครั้งต่อไป

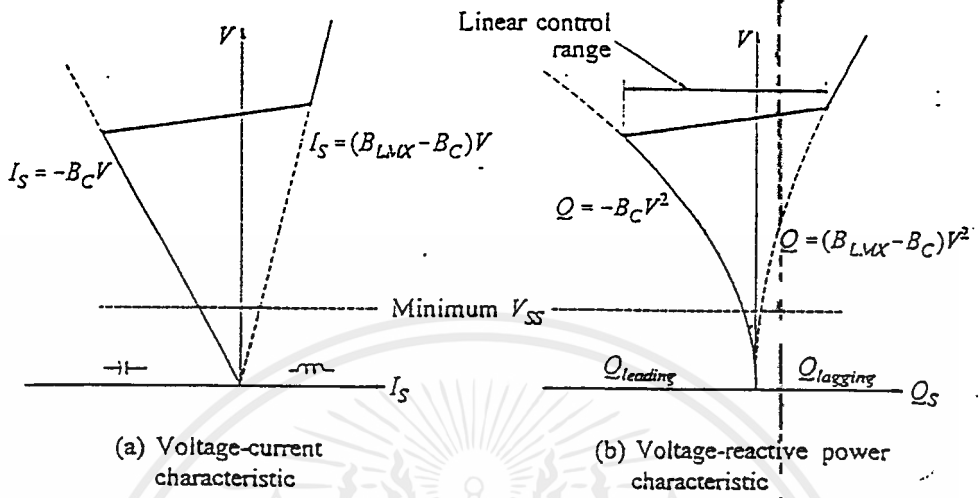
หลักการควบคุมค่าความนำโดยใช้ไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุหรือ “ อินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล (Integral Cycle Control) ” โดยค่าความนำจะถูกแบ่งออกเป็นแต่ละชุดขงนาน การเปลี่ยนแปลงค่าความนำทำได้โดยควบคุมจำนวนหน่วยการนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะถูกระงับทุกครั้งไซเคิล และการควบคุมแบบนี้ไม่มีฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) เกิดขึ้น



รูป 5.9 แสดงการทำงานของสวิตช์ของไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ

5.4 ระบบสแตติกวาร์ที่ใช้งานจริง (Practical Static Var System)

รูป 5.11 แสดงระบบสแตติกวาร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย ไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์และไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ จำนวน 3 หน่วย และตัวกรองฮาร์โมนิก (สำหรับใช้กรองฮาร์โมนิกที่เกิดจากไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์)



รูป 5.11 คุณลักษณะของระบบสแตติกวาร์ที่สภาวะปกติ

บทที่ 6

การศึกษาสภาวะทรานเซียนท์ภายใต้สภาวะฟอลท์

- ในการศึกษาสภาวะทรานเซียนท์ภายใต้สภาวะฟอลท์ จะต้องทำการศึกษาหัวข้อต่างๆ ดังนี้
- กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน
 - การประยุกต์ใช้กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากันในการศึกษาสภาวะทรานเซียนท์ภายใต้สภาวะฟอลท์
 - การขจัดฟอลท์

6.1 กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน

วิธีการทางกราฟซึ่งใช้ในการศึกษาสภาวะทรานเซียนท์คือ “ กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน ” โดยมีสมมุติฐานต่างๆ ดังนี้

(i) อินพุตคงที่ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา เนื่องจากผลของอินพุตของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะไม่มีผลสำคัญ จนกระทั่งหลังจากการสวิงครั้งแรกมันจะกลับมาสู่เสถียรภาพอีกครั้ง

(ii) ผลของการหน่วง ไม่นำมาคิด เนื่องจากมีผลน้อยมาก ในการลดขนาดในการสวิงครั้งแรก และจะค่อยๆ หายไป ไม่มีผลต่อขนาดของการสวิงครั้งต่อมา

(iii) ถือว่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ภายหลังจากการกระตุ้นทรานเซียนท์ เนื่องจากในการเกิดฟอลท์นั้น กระแสฟอลท์จะทำให้สนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการตอบสนองของอามเจอร์ลดลง และเพื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กนี้ ให้มีค่าดั้งเดิม ต้องเก็บฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับของวงจรมแม่เหล็กไว้ ถ้าเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าไม่มีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติอยู่ด้วยแล้ว กระแสไฟฟ้าของขดลวดสนามแม่เหล็กรวมทั้งฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับจะลดลงจนถึงค่าเดิมของมัน อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติจะไม่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับ ระหว่างการสวิงครั้งแรกเนื่องจากใช้เวลาเพียง 2-3 วินาที แต่อุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติจะช่วยให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพในการสวิงครั้งต่อไป

พิจารณาการสวิงในเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัสต่อกับอินฟินิตี้บัส สมการสวิงของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าเป็น

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= P_i - P_e \\ &= P_e \end{aligned} \quad (6.1)$$

โดยที่

M = ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยพลังงานจันทบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

δ = มุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าเทียบกับอินฟินิทัส

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_a}{M}$$

คูณทั้งสองข้างด้วย $\frac{2d\delta}{dt}$ จะได้

$$\frac{2d\delta}{dt} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 2 \frac{P_a}{M} \cdot \frac{d\delta}{dt}$$

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \frac{P_a}{M} \cdot d\delta$$

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a \cdot d\delta$$

ถ้า ω เป็นอัตราเร็วของมุมกำลังไฟฟ้าเทียบกับอินฟินิทัส

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta} \quad (6.2)$$

ซึ่งไม่เท่ากับศูนย์ ถ้าการสวริงนั้นต่อเนื่อง และจะเสถียรถ้า ω เป็นศูนย์ นั่นคือส่วนอินทิเกรตเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \int P_a d\delta &= 0 \\ &= (P_i - P_u) d\delta \end{aligned} \quad (6.3)$$

จากสมการ (6.3) สภาวะสแตบิลิตีคือเป็น

$$\int P_i d\delta - \int P_u d\delta = 0 \quad (6.4)$$

ภายใต้สภาวะการทำงานคงที่ $P_i = P_u$ นั่นคือเส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ ของกราฟมุมกำลังไฟฟ้า (Power-Angle : P_u กับ δ) ดังรูป 6.1 ให้สมมุติว่ามุมกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นเป็น δ_0 แล้วค่า P_u จะเป็นส่วน bcf ดังรูป ในสมการ (6.4) สำหรับกฎเกณฑ์สแตบิลิตีคือเป็น

$$\int P_i d\delta = \int P_u d\delta \quad (6.5)$$

ซึ่งเป็นการเท่ากันของพื้นที่สี่เหลี่ยม afgd และ พื้นที่ bcegf

$$\text{พื้นที่ afgda} = \text{พื้นที่ bcegfcb}$$

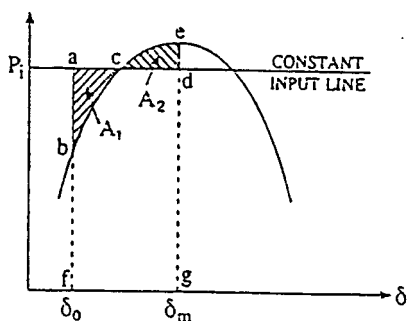
$$\text{พื้นที่ (abc + bcdgfb)} = \text{พื้นที่ (ced + bcdgfb)}$$

ดังนั้น

$$\text{พื้นที่ abc} = \text{พื้นที่ ced}$$

$$A_1 = A_2$$

ดังในพื้นที่แรงแเงาในรูป 6.1



รูป 6.1 วิธีการพื้นที่เท่ากันของการศึกษาสแตบิลิตี

พื้นที่ A_1 ได้เส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ เท่ากับพื้นที่ A_2 เหนือเส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ ดังนั้นวิธีการนี้จึงเรียกว่า “ วิธีการพื้นที่เท่ากัน ” สำหรับการศึกษาระบบเสถียรภาพ โดย ab แทน $P_i - P_e$ ซึ่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าเร่ง สัมพันธ์กับมุมกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น δ_0 และ de แทน $P_e - P_i$ ซึ่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าลดถอย (Decelerating Power) คือกำลังไฟฟ้าลดลงและเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะกลับสู่สภาวะเดิม ถ้ามีความสมดุลระหว่างพื้นที่ทั้งสองที่มุม ไฟฟ้ากำลังวิกฤติ $\delta = \delta_m$

6.2 การประยุกต์ใช้กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากันในการศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ภายใต้สภาวะฟอลท์

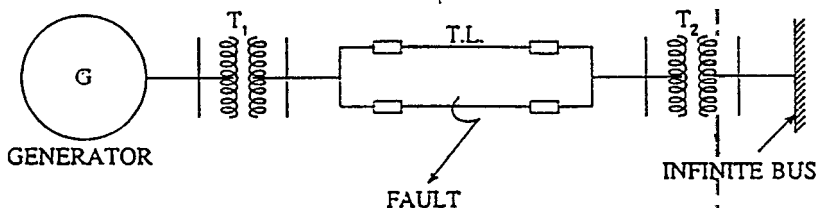
การศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ภายใต้สภาวะฟอลท์ โดยใช้กฎเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน แยกเป็น 2 กรณี คือ

6.2.1 ฟอลท์ซึ่งยังไม่ถูกขจัด

6.2.2 ฟอลท์ซึ่งถูกขจัด

6.2.1 ฟอลท์ซึ่งยังไม่ถูกขจัด

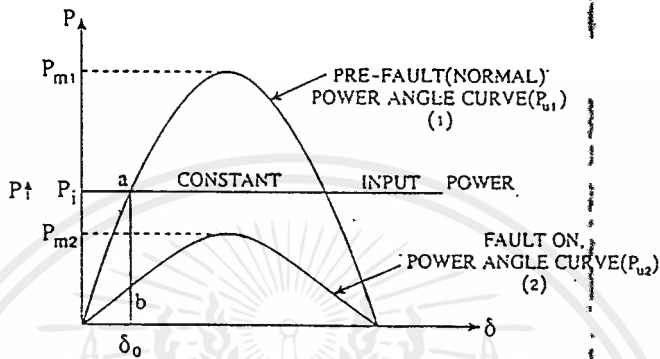
เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าต่อกับอินฟินิตบัส ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 วงจรสายส่งคู่ T.L. และหม้อแปลงไฟฟ้า T_2 ดังรูป



รูป 6.2 เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าต่อกับอินฟินิตบัสผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 และ T_2 และวงจรสายส่งคู่ T.L.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

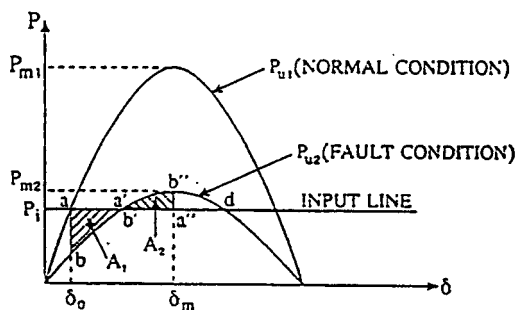
พิจารณากราฟของมุมกำลังไฟฟ้า ในกรณีฟอลต์ยังไม่ถูกขจัด ก่อนเกิดฟอลต์ กราฟมุมกำลังไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นค่า “ สเตตีสเตท สเตบิลิตีลิมิต (Steady State Stability Limit : P_m) ” และเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่งเส้นหนึ่ง ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงจาก P_{m1} ไปยัง P_{m2} โดยกราฟของมุมกำลังไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ และขณะเกิดฟอลต์แสดงไว้ในรูป 6.3



รูป 6.3 กราฟมุมกำลังไฟฟ้า (1) และ (2) ก่อนเกิดฟอลต์และขณะเกิดฟอลต์

จากรูป 6.3 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ (P_i) มีค่ามากกว่าแอมพลิจูด ของกราฟเส้นที่ (2) ซึ่งเป็นกราฟกำลังไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ จุด a เป็นจุดทำงานเริ่มต้น ซึ่งมีมุมกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นเป็น δ_0 จุดทำงานจะเลื่อนจาก a ไป b ซึ่งอยู่บนกราฟที่ (2) และมีกำลังไฟฟ้าแรง $P_s = P_i - P_{u2}$ ซึ่งมีขนาดเท่ากับความยาวของ ba ในรูป 6.3 เป็นผลให้เกิดความเร่งในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า ขบวนการนี้ดำเนินต่อไปเรื่อยๆ หากกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ที่ยังมากกว่ากำลังไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ ซึ่งถ้าเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า ยังสวิงต่อไปและไม่มีกำลังไฟฟ้าถอดออกขนาดค่ามุมกำลังไฟฟ้าแล้ว ระบบจะไม่มีเสถียรภาพและเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะพัง

ในกรณีของกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ ดังในรูป 6.4



เอกสารนี้ รูป 6.4 ฟอลต์ที่ยังไม่ถูกขจัดเมื่อกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้กำลังไฟฟ้าเริ่มคืบเป็นบวก เพราะ $P_2 = P_1 - P_{m2}$ โดยที่ P_{m2} น้อยกว่า P_1 เกิดความเร่งในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับในกรณีแรก แต่มีค่าน้อยกว่า จุดการทำงาน b เคลื่อนไปตามกราฟ P_{m2} ตรงไปยังจุด b' ที่จุดนี้กำลังไฟฟ้าเร่งเป็นศูนย์ เพราะว่า $P_1 = P_{m2}$ และ a' กับ b' เป็นจุดเดียวกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าเร่งมาก่อนหน้านี้แล้วทำให้ความเร็วของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้ามากกว่า อะซิงโครนัส (Asynchronous Bus) ผลที่ตามมาคือ δ ยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป และจุดการทำงานเคลื่อนผ่าน b' และไปถึงจุดที่ P_{m2} มากกว่า P_1 ดังนั้น กำลังไฟฟ้าเร่งจึงกลายเป็นลบ และทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าถดถอยซึ่งผลก็คือความเร็วลดลงจนกระทั่งมาถึงจุด b'' ซึ่งพื้นที่ $A_2 = b'b''a''$ เท่ากับพื้นที่ $A_1 = abb'$ ความเร็วจึงกลับเป็นศูนย์ เพราะว่าผลของกำลังไฟฟ้าเร่งถูกหักล้างด้วยกำลังไฟฟ้าถดถอย ณ จุดนี้ มุมกำลังไฟฟ้าได้มาถึงค่าสูงสุด δ_m แล้ว แต่เนื่องจากยังมีแรงบิดหน่วง (Retarding Torque) เหลืออยู่ เพราะ $P_1 < P_{m2}$ ดังนั้นความเร็วของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจึงลดลงต่อไป และจุดการทำงานจะเคลื่อนที่จาก b'' ไปยัง b โดยผ่าน b' ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

ถ้ากำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ สามารถเพิ่มขึ้นจนพื้นที่ A_2 เหนือเส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่เท่ากับพื้นที่ A_1 ได้เส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่แล้ว ค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ จะเป็นสถานะที่เรียกว่าทรานเซียนท์สเตต สแตบิลิตีลิมิต (Transient State Stability Limit) ภายใต้สถานะฟอลท์ที่ยังไม่ถูกขจัด ในทางปฏิบัติระบบจะยังคงมีเสถียรภาพ ถ้ากำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ อยู่ในขอบเขตของทรานเซียนท์สเตต สแตบิลิตีลิมิต

6.2.2 ฟอลท์ถูกขจัด

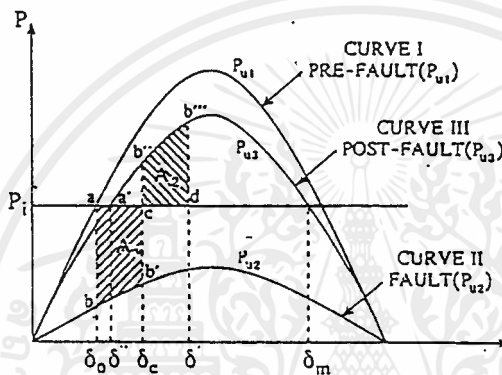
พิจารณารูป 6.2 เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ปลายทั้งสองของสายส่งเปิดออก ดังนั้นระบบจึงสามารถทำงานในสถานะปกติได้ ความเป็นไปได้ที่ระบบสามารถคงเสถียรภาพอยู่ได้ หลังจากเกิดฟอลท์ในสายส่ง ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการเปิดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลท์ ในการขจัดฟอลท์ แอมพลิจูดของกราฟมุมกำลังหลังฟอลท์ถูกขจัด (P_{m3}) มีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดก่อนเกิดฟอลท์ (P_{m1}) แต่มากกว่าขณะเกิดฟอลท์ (P_{m2}) ดังในรูป 6.5

เส้นกราฟ I เป็นกราฟก่อนเกิดฟอลท์ คัดกับเส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ ที่มุมกำลังไฟฟ้าเริ่มคืบ δ_0 เส้นกราฟ II เป็นกราฟขณะฟอลท์ และเส้นกราฟ III เป็นสถานะหลังฟอลท์ที่คัดกับเส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่มุมกำลังไฟฟ้า δ'' เมื่อเกิดฟอลท์ขึ้น กำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่มากกว่ากำลังไฟฟ้าขณะเกิดฟอลท์ ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าเร่ง ซึ่งจะไปเร่งความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า เป็นที่คาดว่าในกรณีของฟอลท์รุนแรงมากๆ ระบบจะสวิงอย่างมากที่ $\delta = \delta_c$ หรือมุมกำลังไฟฟ้าวิกฤติ หลังจากการขจัดฟอลท์ จุดการทำงานจะเปลี่ยนจากจุด b' บนกราฟ II ไปยัง b'' บนกราฟ III กำลังไฟฟ้าหลังฟอลท์ถูกขจัดมากกว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ จึงเป็นผลให้โรเตอร์ของ

เอกสารเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าลดความเร็วลง ขณะนี้โรเตอร์จะมีพลังงานจำนวนหนึ่งสะสมไว้ ระบบจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น δ' ซึ่งพื้นที่ $A_2 = cb''b'''d$ เนื้อเส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ จะเท่ากับพื้นที่ $A_1 = abb'c$ ได้เส้นกำลังไฟฟ้าอินพุตคงที่ โดยที่ δ' เป็นค่ามากที่สุดของ δ ในการออสซิลเลท (Oscillate) ของระบบ

ถ้าฟอลท์รุนแรงมาก ซึ่งทำให้แอมพลิจูดของกราฟ II เล็กลง หรือถ้าฟอลท์ยังคงอยู่เป็นเวลานาน หรือถูกขจัดที่มุม δ มากกว่า δ_c แล้ว ค่ามากที่สุดของ δ จะอยู่เลย δ' ออกไป ค่ามากที่สุดของมันอาจจะเป็น δ_m ซึ่งเป็นมุมวิกฤติ (Critical Angle) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะหลังฟอลท์ถูกขจัด



รูป 6.5 กราฟก่อนฟอลท์ ขณะฟอลท์ และหลังฟอลท์สำหรับกรณีฟอลท์ถูกขจัด

6.3 การขจัดฟอลท์

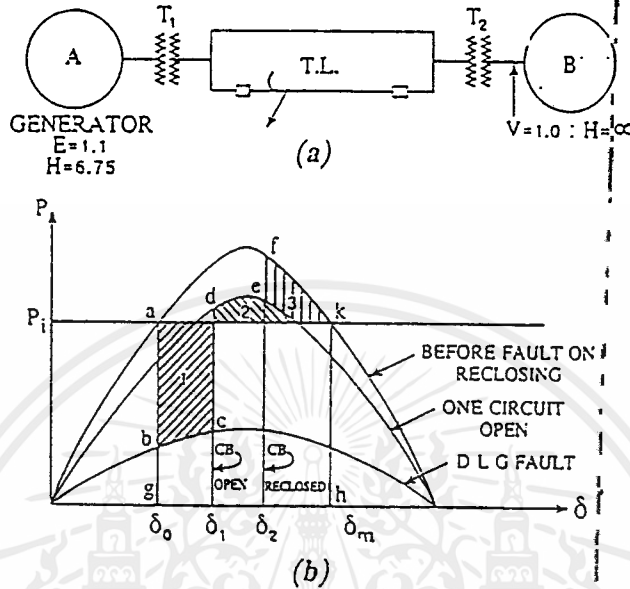
วิธีการหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพ ในการปรับปรุงทรานเซียนท์สแตบิลิตี คือการขจัดฟอลท์อย่างรวดเร็ว เนื่องจากถ้าฟอลท์ถูกขจัดอย่างรวดเร็วแล้ว สายส่งอาจจะกลับมาใช้งานได้อีกโดยไม่มี การสูญเสียกำลังไฟฟ้า ในทางปฏิบัติ ฟอลท์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก คือฟอลท์แบบสายส่งสั้นเฉี่ยวต่อดิน

การขจัดอย่างรวดเร็วช่วยลดผลกระทบในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง อันเป็นผลมาจากการเกิดฟอลท์ การขจัดอย่างรวดเร็วนี้ จะทำให้โอกาสในการเกิดฟอลท์ที่จะนำไปสู่ฟอลท์อีกหลายชนิด เช่น สายส่งคู่ต่อดิน และฟอลท์ 3 เฟส น้อยลง เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เชื่อถือได้ ทำหน้าที่ขจัดฟอลท์ออก โดยเกิดผลกระทบน้อยที่สุดต่อการใช้งานของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นหลักสำคัญของการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

หลังจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกเปิดออก แล้วจะต้องมีการปิดกลับลงมา เพื่อให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติ

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยสายส่งคู่ เมื่อเกิดฟอลท์ขึ้นที่สายส่งทั้งคู่ ควรจะมีสายส่ง แยกเส้นใดเส้นหนึ่งปิดกลับลงมาอย่างรวดเร็วเพื่อใช้งานตามปกติ นั้น ไม่นอญญา! ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังของรูป 6.6 (a) เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า A ต่ออยู่กับบัสอ้างอิง B ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าและสายส่งแรงจูง



รูป 6.6 การปิดกลับลงมาของสายส่งแรงจูง

รูป 6.6 (b) เป็นกราฟมุมกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 สถานะ คือ ฟอลท์สายส่งคู่ต่อดิน (DLG) เกิดในทันทีที่ $\delta = \delta_0$ จุดการทำงานเริ่มต้น (จุด b บนกราฟมุมกำลังเอาร์ทพุทฟอลท์) เคลื่อนไปยัง c และเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดออก จุดการทำงานจะขึ้นไปยัง d บนกราฟก่อนฟอลท์ (วงจรเดี่ยวเปิด) และเคลื่อนไปยัง e ซึ่งเป็นจุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดกลับลงมาอีกครั้ง หลังจากนั้นจุดการทำงานจะกลับไปยังกราฟของมุมกำลังก่อนเกิดฟอลท์ที่จุด f จากรูปแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทคงที่สูงสุด (จะยอมรับได้เมื่อ เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดกลับลงมาในเวลาที่กำหนด) ซึ่งอยู่ในขอบเขตของค่าทรานเซียนท์สแตบิลิตีลิมิต

โดย $A_1 = A_2 + A_3$ โดยที่ A_1, A_2, A_3 เป็นพื้นที่แรเงา 1,2,3 ตามลำดับในรูป 6.6 (b) ที่สถานะปกติ ตามหลักการของสแตบิลิตี ผลรวมของพื้นที่ A_2 และ A_3 จะมากกว่าพื้นที่ A_1

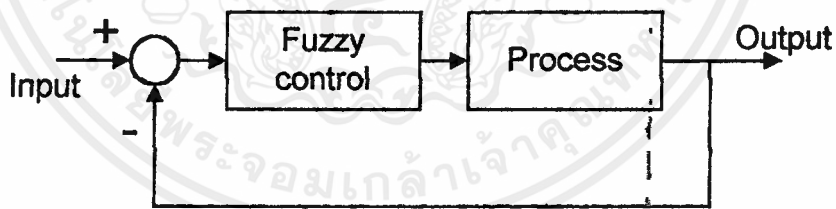
บทที่ 7

ทฤษฎีฟัซซี่

(Fuzzy Theory)

การควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) เป็นวิธีหนึ่งในหลายๆวิธีที่นำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้ เพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยอินพุตของฟัซซี่จะได้ค่า ΔP ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัส แล้วนำไปหาสัญญาณโดยวิธีของฟัซซี่เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด แล้วแสดงลงในเฟสเพลน (Phase Plane) เพื่อใช้ในการปรับปรุงให้มีผลตอบสนองไดนามิกส์ (Dynamic Response) ที่มีเสถียรภาพออกมาซึ่งผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการรบกวนของระบบ;

ในโครงการนี้ใช้ทฤษฎีฟัซซี่เข้าไปควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยหลักการของฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) มาใช้ในการออกแบบการควบคุม โดยเราจะจำลองส่วนนี้ด้วยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ดังรูป



รูป 7.1 กระบวนการควบคุมด้วยฟัซซี่ (Fuzzy Controller)

ระบบการควบคุมด้วยฟัซซี่มีพื้นฐานแนวความคิดมาจากทฤษฎีฟัซซี่ลอจิกและทฤษฎีฟัซซี่เซตที่จะกล่าวต่อไปนี้

7.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัซซีเซตเป็นการรวมสมาชิกหลายๆคิลิปเซต (Crisp Set) ที่มีอยู่จริงและพอจะเข้ากลุ่มได้ โดยฟัซซีเซตคือ การยอมรับการเป็นสมาชิกที่มีลักษณะตามเซตเพียงบางส่วน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยระหว่างการมีคุณสมบัติการเป็นสมาชิกอย่างครบถ้วน กับ ไม่มีคุณสมบัติการเป็นสมาชิกเลยแม้จะไม่พร้อมก็ตาม

7.1.1. การเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตจะยอมรับสมาชิกที่มีคุณลักษณะถูกเพียงบางส่วนและผิดบางส่วน ไม่มีขอบเขตที่แน่นอน การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีเซตจะต้องแสดงค่าระดับ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะเป็นสมาชิกของเซต หรือฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก (Membership Function) โดยเราใช้สัญลักษณ์แทนค่าระดับการเป็นสมาชิกที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงดังนี้

$$A(X) \rightarrow [0, 1]$$

หมายความว่าระดับการเป็นสมาชิกของ X ในฟัซซีเซต A อยู่ในช่วงทั้งหมดจาก 0 ถึง 1 เพื่อประยุกต์เข้ากับฟัซซีลอจิกค่าจะถูกเรียกว่าค่าความจริงที่แสดงค่าระดับขอบเขตของเซตคือ

$$0 \leq X \leq 1$$

โดยถ้าค่าสูงแสดงว่ามีความเป็นสมาชิกมาก ถ้าค่าต่ำแสดงว่ามีความเป็นสมานิชน้อย ค่า 0 จะหมายถึงไม่มีความเป็นสมาชิกเลย และค่า 1 จะหมายถึงเป็นสมาชิกอย่างสมบูรณ์

7.1.2. นิยามของฟัซซีเซต

1. ฟัซซีเซตจะว่างก็ต่อเมื่อระดับฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็น 0 ตลอดทั้ง X
2. ฟัซซีเซต A และ B เท่ากันเมื่อ $\mu_A(X) = \mu_B(X)$ สำหรับทุกๆ X ใน X เขียนแทนด้วย $A = B$

3. สับเซต (Subset)

$$A \subset B \leftrightarrow \mu_A(X) \leq \mu_B(X)$$

4. คอมพลีเมนต์ (Complement) ของ A

$$\mu'_A(X) = 1 - \mu_A(X)$$

5. ยูเนียน (Union)

$$\mu_C = \text{Max} [\mu_A(X), \mu_B(X)] \text{ หรือ}$$

$$\mu_C = \mu_A(X) \vee \mu_B(X)$$

6. อินเตอร์เซกชัน (Intersection)

$$\mu_C = \text{Min} [\mu_A(X), \mu_B(X)] \text{ หรือ}$$

$$\mu_C = \mu_A(X) \wedge \mu_B(X)$$

7.2 ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic)

ฟัซซี่ลอจิกจะมีการกระทำทางลอจิกเพื่อรวมค่าลอจิกต่างๆ ให้เป็นค่าฟัซซี่ลอจิกคล้ายตัวแปรในระบบลอจิก 2 ระดับ โดยจะต้องมีการกำหนดลักษณะความหมายให้แตกต่างกัน แต่คำสั่งทางลอจิกที่เหมือนกัน คือ AND , OR และ NOT ดังนี้

- 1 . การ AND ของฟัซซี่ลอจิก คือ ค่าความจริงที่น้อยที่สุด

$$\mu (A \text{ AND } B) = \min (\mu_A , \mu_B)$$

- 2 . การ OR ของฟัซซี่ลอจิก คือ ค่าความจริงที่มากที่สุด

$$\mu (A \text{ OR } B) = \max (\mu_A , \mu_B)$$

- 3 . การ NOT ของฟัซซี่ลอจิก

$$\mu (\text{NOT } A) = 1 - \mu_A$$

ซึ่งการกระทำทั้ง 3 นี้เป็นสมมูลของการกระทำในลอจิก 2 ระดับสำหรับค่า μ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

7.3 การประยุกต์ใช้งานของฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Application)

โดยทั่วไปจะมีลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานแบ่งได้ 3 ส่วนหลักคือ

- การเปลี่ยนคลิบเซตเป็นฟัซซี่เซตซึ่งได้กล่าวไปในหัวข้อฟัซซี่เซตข้างต้นแล้ว
- กฎการวินิจฉัย (Inference)
- การเปลี่ยนฟัซซี่เป็นคลิบ (Defuzzifier)

7.3.1 การวินิจฉัย (Inference)

โดยการสุ่มค่าอินพุตและนำมาวินิจฉัยค่าเพื่อให้ได้ผลออกมาทางเอาต์พุตของระบบ ตามทฤษฎีของระบบ ระบบจะรวมค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของอินพุตเพื่อนำมาวินิจฉัยและประมวลผล

กฎการวินิจฉัยได้มาจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตขึ้นมา เพื่อนำไปสู่เอาต์พุตที่ต้องการ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตก็คือ Rule นั้นเอง เช่น เมื่อให้อินพุตของตัวควบคุมคือ Error (er) และ Change of Error (ce) ของระบบป้อนกลับและให้อาต์พุตของตัวควบคุมเป็นอินพุตของขบวนการหรือ Control Input (ci) เราจะสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$\text{IF } er = \text{LN AND } ce = \text{LN THEN } ci = \text{LP}$$

OR

$$\text{IF } er = \text{SN AND } ce = \text{SN THEN } ci = \text{SP}$$

OR

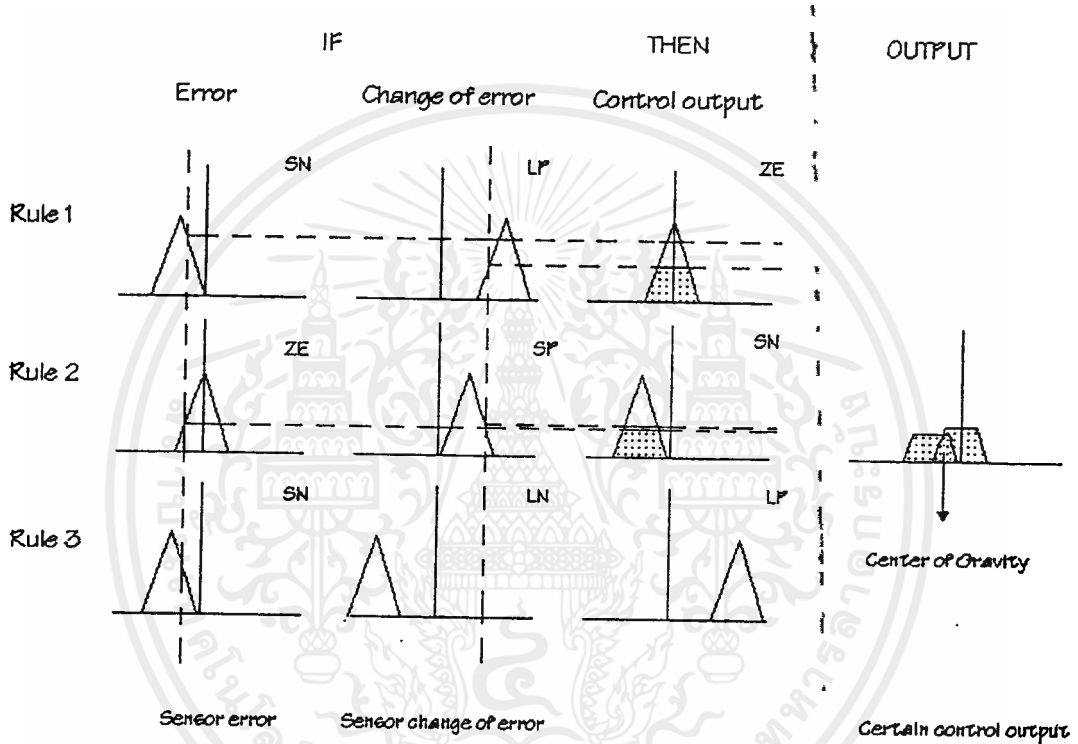
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายความว่ากรณใดๆ ฟังสน ยกฟังห้ามมิให้ตีตีแบบสงเอนหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN = Small Negative

LP = Large Positive

SP = Small Positive

จากความสัมพันธ์ข้างบน นำมาแสดง ได้ดังรูปข้างล่าง



รูป 7.2 แสดงการวินิจฉัย

ซึ่งเมื่อนำ Rule ทั้งหมดมารวมเข้าด้วยกันก็จะได้รูปฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกของ Control Input โดยจะนำไปหาค่าของ Control Input ที่ต้องการได้ต่อไป

7.3.2 วิธีการเปลี่ยนฟัซซีเป็นคลิบ มีหลักการดังนี้

Fuzzification จะนำเอาสัญญาณอินพุตที่เป็นเวลาจริง (Real time) เปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก จะได้ค่าอินพุตของฟัซซี (Fuzzy Input) โดยมีสมาชิกของกลุ่มแต่ละกลุ่ม โดยแต่ละฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกจะไม่ได้กำหนดค่าของช่วงอินพุตเจาะจงลงไป ซึ่งจะต่างกับบูลีนลอจิก (Boolean Logic) ส่วนการคำนวณค่าผลลัพธ์รวมโดยใช้กฎต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐาน

ของระบบ ค่าที่ออกมาเรียกว่าเอาท์พุตของฟัซซี (Fuzzy Output) ซึ่งกฎแต่ละอย่างจะมีผลตอบ

ค้ำ ไม่ว่าจะเป็นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนองต่อค่าอินพุตของฟังก์ชันไม่เหมือนกัน ผลลัพธ์จะได้จากกฎแต่ละข้อรวมกัน แล้วลดรูปกลายเป็นตัวชี้ตำแหน่งของเอาต์พุตของฟังก์ชัน ซึ่งค่าเหล่านี้เกิดขึ้นโดยการเปรียบเทียบกับกลุ่มของเอาต์พุต ส่วนการสร้างขอบเขตล้อมรอบทำได้โดยการกำหนดขอบเขตโดยใช้รูปสี่เหลี่ยมของฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของฟังก์ชันเชิงเส้น ค่าต้องประมาณขึ้นมาโดยไม่มีเหตุผลทั้งสิ้น กำหนดขึ้นตามความพอใจและความเหมาะสม กำหนดให้ฟังก์ชันการประมาณคือ f และมีขอบเขต $[a, b]$ และเทคนิคในการเปลี่ยนฟังก์ชันเป็นคลิป์ มีหลายวิธีดังนี้

1. เทคนิค Maximizer เลือกค่าสูงสุดจากหลายๆแบบมาเพียงหนึ่ง

เป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆแบบ แล้วเลือกกระทำเพียงหนึ่งรูปแบบ ถ้าหากเกิดการกระทำที่มีค่าสูงสุดเท่ากัน 2 อย่างจะต้องใช้รูปแบบการแก้ปัญหาอีกลักษณะหนึ่ง เช่น ใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุต

2. ทฤษฎีค่าน้ำหนักเฉลี่ย

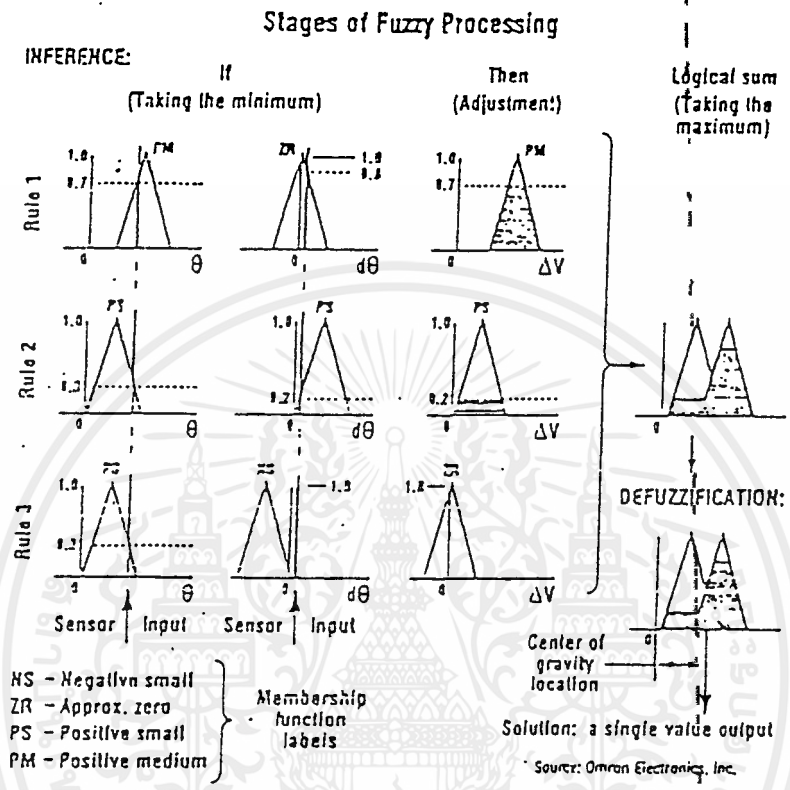
จะใช้ค่าเฉลี่ยของการกระทำหลังจากกำหนดค่าระดับของระดับการเป็นสมาชิกไว้ล่วงหน้าแล้ว แต่ค่าก็ยังไม่ใช่ชัดเจน เพราะค่าเอาต์พุตของฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก มีมากกว่าหนึ่งค่าต่อค่าที่กำหนดให้ โดยที่ค่าเอาต์พุตของฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกมีลักษณะคล้ายกับพีรามิด หรือพีรามิดคัตยอด

3. กรรมวิธีค่าศูนย์กลาง

เป็นการแสดงค่าเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับค่าจุดศูนย์กลางมวลของเอาต์พุตในระดับที่ทำงาน ซึ่งเป็นการคำนวณที่แน่นอน และเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในวิธีอื่นๆ วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นการกระทำอย่างหยาบๆภายในช่วงของเอาต์พุต ในกรณีที่ต้องทำพร้อมๆกันหลายๆกฎ ในการกระทำหนึ่งครั้งจะต้องเกิดทฤษฎีทับซ้อน (Overlap) ของค่าอินพุต ของการรวมค่าเอาต์พุตของการกระทำหลายๆค่าเป็นค่าเดียวสำหรับใช้ในระบบ ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักเฉลี่ยของศูนย์กลางแต่ละกราฟรูปสามเหลี่ยม ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่ากลางหรือค่าศูนย์กลาง} = \frac{[\text{ผลรวมของพื้นที่ } P] \times [\text{ค่ากลางของ } P]}{\text{ผลรวมของพื้นที่ } P}$$

โดย P คือ ขอบเขตทั้งหมดของรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูป 7.3 ขั้นตอนการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง

4. กรรมวิธีซิงเกิลตัน : สังเคราะห์เอาเอาท์พุทเดียว

เป็นการนำค่าเอาท์พุทของฟัซซี่เซตมาใหม่ เป็นค่าเอาท์พุทค่าเดียว โดยใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยจากการกระทำรวมกันหลายๆอย่าง วิธีนี้ได้ค่าความถูกต้องน้อยกว่าวิธีค่าศูนย์กลางและยังคงต้องการการทับซ้อนเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่ต่อเนื่องของเอาท์พุท

7.4 สรุปผลจากการใช้การควบคุมโดยวิธีฟัซซี่

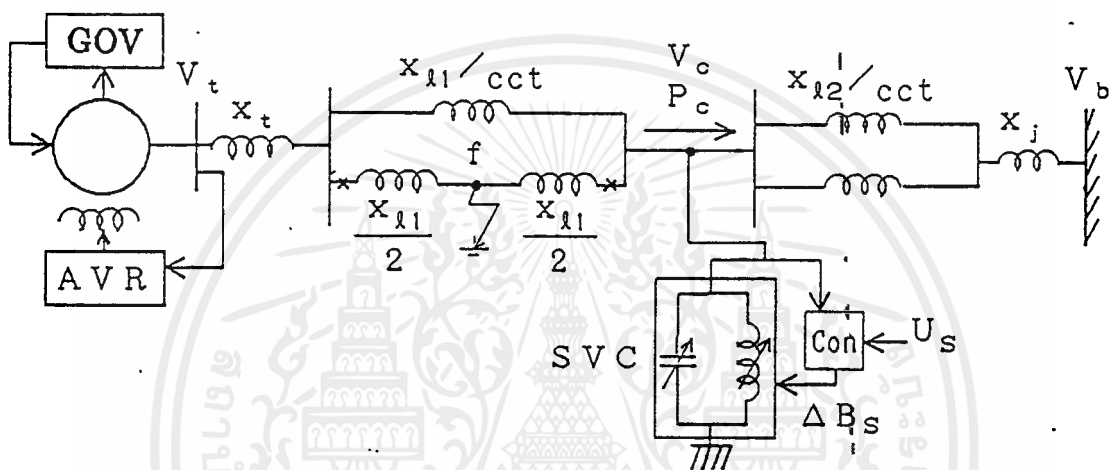
1. การเลือกกฎการคอนโทรล (Control Rule) ที่เหมาะสมที่สุดนั้นก็ต้องทำการลองผิดลองถูกจนกว่าจะได้กฎการคอนโทรลที่ดีที่สุดนั่นเอง และจำนวนกฎการคอนโทรล ควรเริ่มจากการใช้คอนโทรลน้อยๆก่อน แล้วจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นเท่าที่จำเป็นต้องใช้เท่านั้น

นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อเสียของกฎการคอนโทรลที่เลือกไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมด้วยพีชชีส่วนใหญ่จะพบที่สแตตัสเสจ (Steady State) จะไม่เรียบเลขที่เดียว แต่จะมีการแกว่งเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะตัวควบคุมพยายามที่จะปรับให้ผลตอบสนองอยู่ที่เซตพอยน์ (Setpoint) ให้ได้นั่นเอง
3. ไม่ต้องการรายละเอียดที่ซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุม ทำให้สามารถใช้งานกับระบบที่มีระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้ดีกว่า
4. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับระบบอย่างกระทันหัน โดยไม่ได้คาดหมาย ตัวควบคุมก็จะสามารถจัดการได้
5. ไม่มีทฤษฎีที่ชัดเจนในการกำหนดกฎการควบคุมและฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก ทำให้การออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ต้องใช้เวลามากในการออกแบบเพราะต้องใช้วิธีลองผิดลองถูกเนื่องจากกฎการควบคุมและฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกหนึ่ง ก็จะสามารถกับระบบหนึ่งๆเท่านั้น

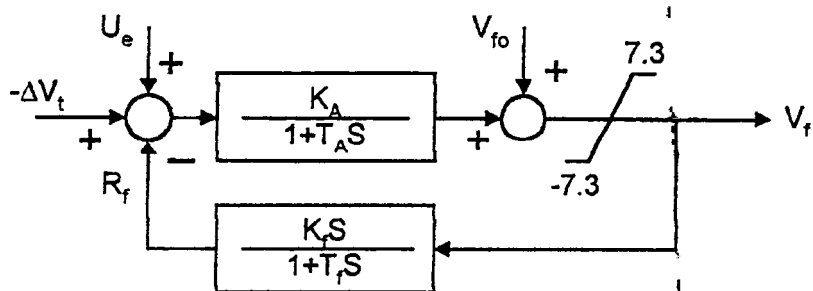
บทที่ 8 ระบบจำลอง

ในการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเราจะศึกษาระบบที่ง่ายๆ ดังแสดงในรูป 8.1 โดยมีเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 1 ตัว ต่ออยู่กับอินฟินิตี้บัส โดยใช้สายส่งคู่



รูป 8.1 แบบจำลองระบบ (Configuration of Model System)

ในระบบจำลองจะประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) และอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว (Governor : GOV) โดยมีบล็อกไดอะแกรมดังรูป 8.2 และ 8.3 ตามลำดับ



รูป 8.2 บล็อกไดอะแกรมของ AVR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมของ AVR ได้สมการดังนี้

$$R_f = \frac{K_f S}{1 + T_f S} V_i$$

$$S R_f = \frac{K_f}{T_f} \cdot S V_f - \frac{R_f}{T_f}$$

จะได้

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{K_f}{T_f} \frac{dV_f}{dt} - \frac{R_f}{T_f} \tag{8.1}$$

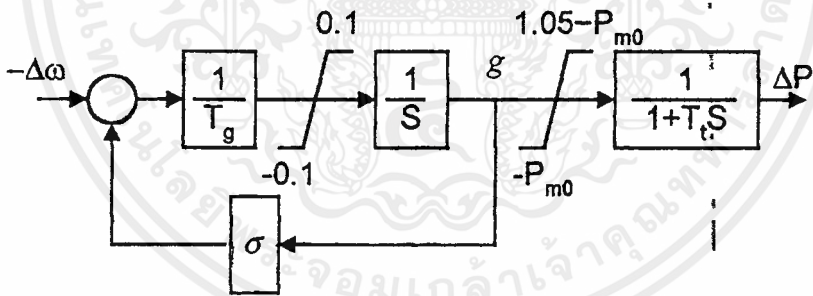
และ

$$V_f = V_{f0} + (U_e + R_f - \Delta V_i) \frac{K_A}{1 + T_A S}$$

$$S V_f = S V_{f0} + \frac{K_A}{T_A} (U_e + R_f - \Delta V_i) - \frac{V_f - V_{f0}}{T_A}$$

จะได้

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{dV_{f0}}{dt} + \frac{K_A}{T_A} (U_e + R_f - \Delta V_i) - \frac{V_f - V_{f0}}{T_A} \tag{8.2}$$



รูป 8.3 บล็อกไดอะแกรมของ GOV

จากบล็อกไดอะแกรมของ GOV ได้สมการดังนี้

$$g = \frac{1}{\delta + T_g S} \cdot -\Delta \omega$$

$$S g = \frac{-\Delta \omega - g \sigma}{T_g}$$

จะได้

$$\frac{dg}{dt} = \frac{-\Delta \omega - g \sigma}{T_g} \tag{8.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

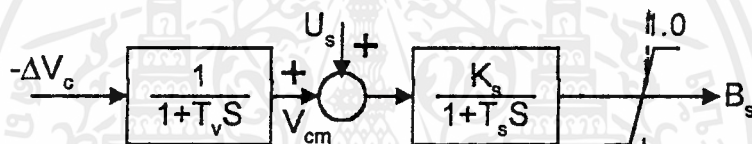
$$\Delta P_i = \frac{g}{1 + T_i S}$$

$$S \Delta P_i = \frac{1}{T_i} (g - \Delta P_i)$$

จะได้

$$\frac{d\Delta P_i}{dt} = \frac{1}{T_i} (g - \Delta P_i) \quad (8.4)$$

และมีอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ ต่ออยู่ที่จุดกึ่งกลางของสายส่งคู่ ซึ่งจะ
ทำหน้าที่ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังให้มีเสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีฟิซซึ่งมาช่วยเลือกค่าสัญญาณควบคุม
แสดงดัง บล็อกไดอะแกรมของ SVC ในรูป 8.4



รูป 8.4 บล็อกไดอะแกรมของ SVC

จากบล็อกไดอะแกรมของ SVC ได้สมการดังนี้

$$V_{cm} = \frac{-\Delta V_c}{1 + T_v S}$$

$$S V_{cm} = \frac{1}{T_v} (-\Delta V_c - V_{cm})$$

จะได้

$$\frac{dV_{cm}}{dt} = \frac{1}{T_v} (-\Delta V_c - V_{cm}) \quad (8.5)$$

และ

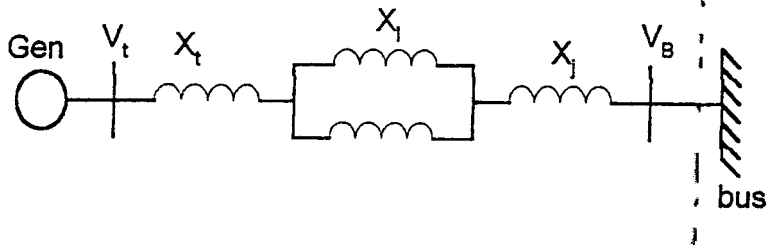
$$\Delta B_s = (V_{cm} + U_{svc}) \frac{K_s}{1 + T_s S}$$

$$S \Delta B_s = \frac{K_s}{T_s} (V_{cm} + U_{svc}) - \frac{\Delta B_s}{T_s}$$

จะได้

$$\frac{d\Delta B_s}{dt} = \frac{K_s}{T_s} (V_{cm} + U_{svc}) - \frac{\Delta B_s}{T_s} \quad (8.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 8.5 แบบจำลองระบบ

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครไนต์เมื่อทำการวิเคราะห์ระบบ จะได้สมการดังนี้

$$V_d = -\omega\phi_q \tag{8.7}$$

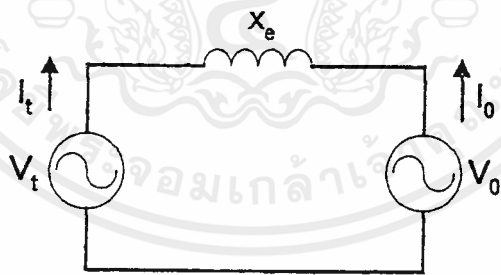
$$V_q = \omega\phi_d \tag{8.8}$$

$$V_f = \frac{d\phi_f}{dt} + V_{fr} \tag{8.9}$$

$$\omega\phi_q = -x_q i_d \tag{8.10}$$

$$\omega\phi_d = V_{fr} - x_d i_d \tag{8.11}$$

$$\phi_f = T_{d0}' [V_{fr} - (x_d - x_d') i_d] \tag{8.12}$$



รูป 8.6 วงจรสมมูลระบบสายส่งคู่

จากรูปได้สมการดังนี้

$$I_t = \frac{V_t - V_0}{x_e} \tag{8.13}$$

$$V_t = V_d + jV_q \tag{8.14}$$

$$I_t = i_d + j i_q \tag{8.15}$$

$$V_0 = V_0 \sin \delta = jV_0 \cos \delta \tag{8.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แทนค่าสมการ (8.14), (8.15), (8.16) ลงในสมการ (8.13) จะได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{(V_d + jV_q) - (V_0 \sin \delta + jV_0 \cos \delta)}{jx_e} = i_d + ji_q \quad (8.17)$$

$$i_d = \frac{V_q - V_0 \cos \delta}{x_e} \quad (8.18)$$

$$i_q = \frac{-V_d + V_0 \sin \delta}{x_e} \quad (8.19)$$

จากสมการ (8.7) และ (8.10) จะได้

$$V_d = -\omega \phi_q = x_q i_q \quad (8.20)$$

แทนสมการ (8.20) ในสมการ (8.19) จะได้

$$i_q = \frac{-x_q i_q + V_0 \sin \delta}{x_e}$$

$$i_q = \frac{V_0 \sin \delta}{x_e + x_q}$$

ให้ $X_q = x_e + x_q$

$$i_q = \frac{V_0 \sin \delta}{X_q} \quad (8.21)$$

แทนสมการ (8.21) ในสมการ (8.20) จะได้

$$V_d = \frac{x_q V_0 \sin \delta}{X_q} \quad (8.22)$$

จากสมการ (8.8) และ (8.11) จะได้

$$V_q = \omega \phi_q = V_{fr} - x_d i_d \quad (8.23)$$

จากสมการ (8.12) จะได้

$$V_{fr} = \frac{\phi_f}{T'_{d0}} - (x_d + x'_d) i_d \quad (8.24)$$

จากสมการ (8.23) และ (8.24) จะได้

$$V_q = \frac{\phi_f}{T'_{d0}} - x'_d i_q \quad (8.25)$$

แทนสมการ (8.25) ในสมการ (8.18) จะได้

$$i_d = \frac{\frac{\phi_f}{T'_{d0}} - x'_d i_d}{x_e} - \frac{V_0 \cos \delta}{x_e}$$

ให้ $X'_d = x_e + x'_d$

$$i_d = \frac{\phi_f}{X'_d T'_{d0}} - \frac{V_0 \cos \delta}{X'_d} \quad (8.26)$$

เอกสารนี้ (8.26) ในสมการ (8.25) จะใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_q = \frac{\phi_f}{T'_{d0}} - x'_d \left(\frac{\phi_f}{X'_d T'_{d0}} - \frac{V_0 \cos \delta}{X'_d} \right)$$

$$V_q = \frac{x_e \phi_f}{X'_d T'_{d0}} + \frac{x'_d V_0 \cos \delta}{X'_d} \quad (8.27)$$

สรุปสมการของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า

$$V_d = \frac{x_q V_0 \sin \delta}{X_q} \quad (8.28)$$

$$V_q = \frac{x_e \phi_f}{X'_d T'_{d0}} + \frac{x'_d V_0 \cos \delta}{X'_d} \quad (8.29)$$

$$i_d = \frac{\phi_f}{X'_d T'_{d0}} - \frac{V_0 \cos \delta}{X'_d} \quad (8.30)$$

$$i_q = \frac{V_0 \sin \delta}{X_q} \quad (8.31)$$

โดยที่

$$X_q = x_q + x_e \quad (8.32)$$

$$X'_d = x'_d + x_e \quad (8.33)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_o + \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_o + \Delta\omega \quad (8.34)$$

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (8.35)$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P_i - P_e \quad (8.36)$$

แทนสมการ (8.35) ในสมการ (8.36) จะได้

$$M \frac{d\omega}{dt} + D\Delta\omega = P_i - P_e \quad (8.37)$$

จาก

$$\begin{aligned} P_i - P_e &= (P_o + \Delta P_i) - (P_o + \Delta P_e) \\ P_i - P_e &= \Delta P_i - \Delta P_e \end{aligned} \quad (8.38)$$

แทนสมการ (8.38) ในสมการ (8.37) จะได้

$$M \frac{d\omega}{dt} + D\Delta\omega = \Delta P_i - \Delta P_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}(\Delta P_i - D\Delta\omega - \Delta P_e) \quad (8.39)$$

จาก

$$P_e = i_d V_d + i_q V_q \quad (8.40)$$

แทนสมการ (8.30) ในสมการ (8.24) จะได้

$$V_{fr} = \frac{\phi_f}{T'_{d0}} + (x_d - x'_d) \left(\frac{\phi_f}{X'_d T'_{d0}} - \frac{V_0 \cos \delta}{X'_d} \right)$$

$$V_{fr} = \frac{X_d \phi_f}{X'_d T'_{d0}} - \frac{(x_d - x'_d) V_0 \cos \delta}{X'_d} \quad (8.41)$$

แทนสมการ (8.41) ในสมการ (8.9) จะได้

$$\frac{d\phi_f}{dt} = V_f - \frac{X_d \phi_f}{X'_d T'_{d0}} - \frac{(x_d - x'_d) V_0 \cos \delta}{X'_d} \quad (8.42)$$

โดย

$$X_d = x_d + x_e \quad (8.43)$$

จาก

$$V_t = (V_d + V_q)^{\frac{1}{2}}$$

$$V_t = \left[\left(\frac{x_q V_0 \sin \delta}{X_d} \right)^2 + \left(\frac{x_e \phi_f}{X'_d T'_{d0}} + \frac{x'_d V_0^2 \sin 2\delta}{X'_d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.44)$$

แทนสมการ (8.28) , (8.29) , (8.30) , (8.31) ในสมการ (8.40) จะได้

$$P_e = \frac{V_0 \phi_f \sin \delta}{X'_d T'_{d0}} + \frac{(x'_d - x_q) V_0^2 \sin 2\delta}{2X_q X'_d} \quad (8.45)$$

$$\omega = \Delta\omega + \omega_0 \quad (8.46)$$

บทที่ 9

การหาสัญญาณควบคุมโดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่ (Proposed Fuzzy Control Based SVC)

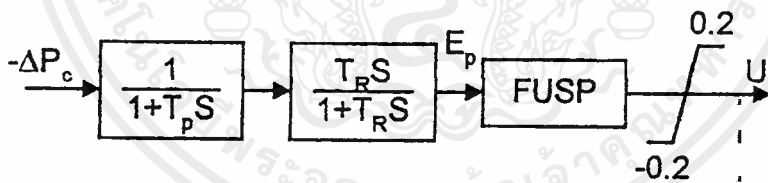
ในโครงการนี้ใช้ทฤษฎีฟัซซี่เข้ามาช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสามารถแสดงได้ดังรูปข้างล่าง โดยที่ตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์จะอยู่ตรงกลางของสายส่งและจะมีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเอาต์พุต (ΔP_c) ณ จุดนี้เป็นสัญญาณอินพุตที่เวลา T (เป็นค่าคงที่) และใช้ ทฤษฎีฟัซซี่คำนวณค่าสัญญาณเอาต์พุตที่จะนำไปปรับค่า LC ของวงจรชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ เพื่อชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังให้ดีขึ้น โดยสัญญาณนี้มีค่าดังสมการ

$$U_{svc}(t) = U_r(k) : kT \leq t < (k+1)T \quad (9.1)$$

เมื่อ T คือค่าเวลาร่วม (Sampling Time)

k คือค่าจำนวนนับ

$U_r(k)$ คือค่าสัญญาณฟัซซี่



รูป 9.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมด้วยฟัซซี่ (Block Diagram of Propose Control)

จากบล็อกไดอะแกรมของ Fuzzy ได้สมการดังนี้

$$E = \frac{-\Delta P_c}{1+T_p S} \quad (9.2)$$

$$SE = \frac{-\Delta P_c - E}{T_p} \quad (9.3)$$

จะได้

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-\Delta P_c - E}{T_p} \quad (9.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_p = \frac{T_r SE}{1 + T_r S} \quad (9.5)$$

$$SE_p = SE - \frac{E_p}{T_r} \quad (9.6)$$

จะได้

$$\frac{dE_p}{dt} = \frac{dE}{dt} - \frac{E_p}{T_r} \quad (9.7)$$

และ

$$U_f = FUSP \cdot E_p \quad (9.8)$$

9.1 อุปกรณ์ควบคุมโดยฟัซซี่ (Fuzzy Controller)

จากสัญญาณ ΔP_c สามารถเปลี่ยนเป็น E_p โดยใช้บล็อกไดอะแกรมคำนวณค่าดังรูป โดยมีค่าตัวแปรต่างๆเป็นเงื่อนไขแล้วนำ E_p มาหาสัญญาณของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้ ΔE_p จากสมการข้างล่าง

$$\Delta E_p(k) = \{E_p(k) - E_p(k-1)\} / T \quad (9.9)$$

ในการใช้ เฟสเพลนในการหาค่า จะต้องนำค่า $E_p(k)$ อยู่ในแกนอ่อนและค่า $\Delta E_p(k)$ อยู่ในแกนตั้งดังในรูป 9.2 โดยเราสามารถคำนวณได้ค่า $P_f(k)$ ของระบบจาก

$$P_f(k) = D_e(k) / \angle \theta(k) \quad (9.10)$$

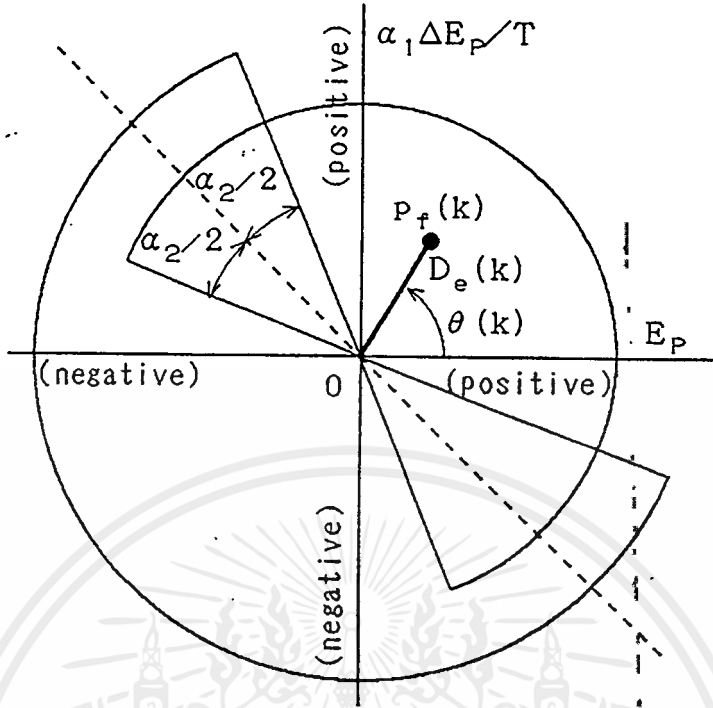
โดย $D_e(k) = \{E_p(k)^2 + (\alpha_1 * \Delta E_p(k))^2\}^{1/2}$

$$\theta(k) = \cos^{-1}\{E_p(k) / D_e(k)\}$$

เมื่อ $D_e(k)$ คือขนาด

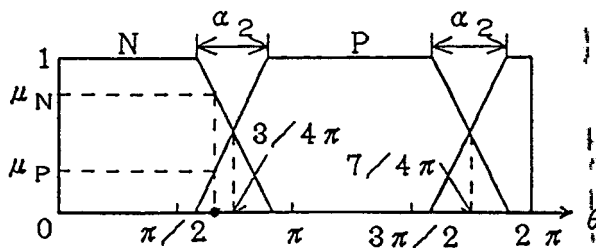
$\theta(k)$ คือมุมของจุด P_f

α_1 คือตัวแปรที่ปรับค่าได้

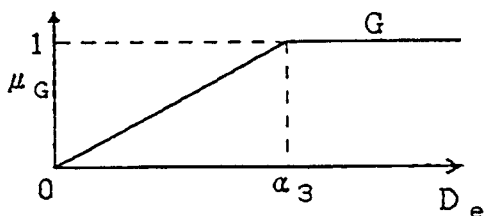


รูป 9.2 เฟสเพลน (Phase Plane)

ในการหาสัญญาณควบคุมจากค่าของ $\theta(k)$ เพื่อใช้ในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยวงจรของ SVC ถ้าเกิดค่ามุม $\theta(k)$ อยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 และ 3 ในเฟสเพลน จะทำให้ค่าสมมูล อยู่ที่จุด 0 แต่ถ้าเส้น SL (Swing Line) ทำมุม 135 โดยวัดทวนเข็มนาฬิกา ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ θ จะมีขอบเขตดังรูป 9.3 โดยมี N และ P เป็นสมาชิกของฟังก์ชันและมีค่า μ_N และ μ_P เป็นตัวแสดงระดับของ N และ P ตามลำดับ โดยจะปรับค่า α_2 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อ $\theta(k)$ อยู่ในช่วง $N(\mu_N)$ และจะรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อ $\theta(k)$ อยู่ใน ช่วง $P(\mu_P)$ และปริมาณของกำลังไฟฟ้าเสมือนจะขึ้นอยู่กับค่า D_e จะหาได้จากรูป 9.4 โดยที่ μ_0 เป็นระดับของการเป็นสมาชิกของฟังก์ชันที่ถูกปรับค่าโดย α_2 (ช่วง N คือช่วงที่มีการจ่ายกำลัง ไฟฟ้าเสมือนและช่วง P คือช่วงที่มีการรับกำลังไฟฟ้าเสมือน)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูป 9.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ θ (Membership Function of θ) ระโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 9.4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ D_e (Membership Function of D_e)

และค่าต่างๆเหล่านี้จะนำไปหาสัญญาณควบคุม U_r ดังนี้

$$U_r(k) = \frac{[\mu_N(k) - \mu_P(k)] \times [(\mu_G(k)) U_m]}{[\mu_P(k) + \mu_N(k)]} \quad (9.11)$$

U_m เป็นค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุม

และ

$$\mu_P(k) = 1 - \mu_N(k) \quad (9.12)$$

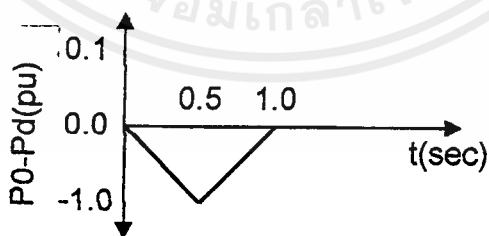
เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$U_r(k) = (2\mu_N(k) - 1) (\mu_G(k)) U_m \quad (9.13)$$

9.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameter Setting)

ในการปรับค่า α_1 , α_2 , α_3 ให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการรบกวนต่างๆดังนี้

1. การรบกวนแบบเล็กน้อย (Small Disturbance) โดยนิยามว่า คือการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ซึ่งกำหนดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดังรูป



รูป 9.5 การรบกวนแบบเล็กน้อย

2. การรบกวนแบบรุนแรง (Large Disturbance) โดยนิยามว่า คือการที่สายส่งกำลังไฟฟ้าเส้นหนึ่งของระบบสายส่งถูกตัดวงจรออกหลังจากเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินผ่านไปเป็นเวลา 0.1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าพารามิเตอร์ จะใช้ค่า J เป็นตัวชี้ ดังสมการ

$$J = \sum_{k=1}^m |\Delta\omega(k)| t_k + |\dot{U}(k)| \quad (9.14)$$

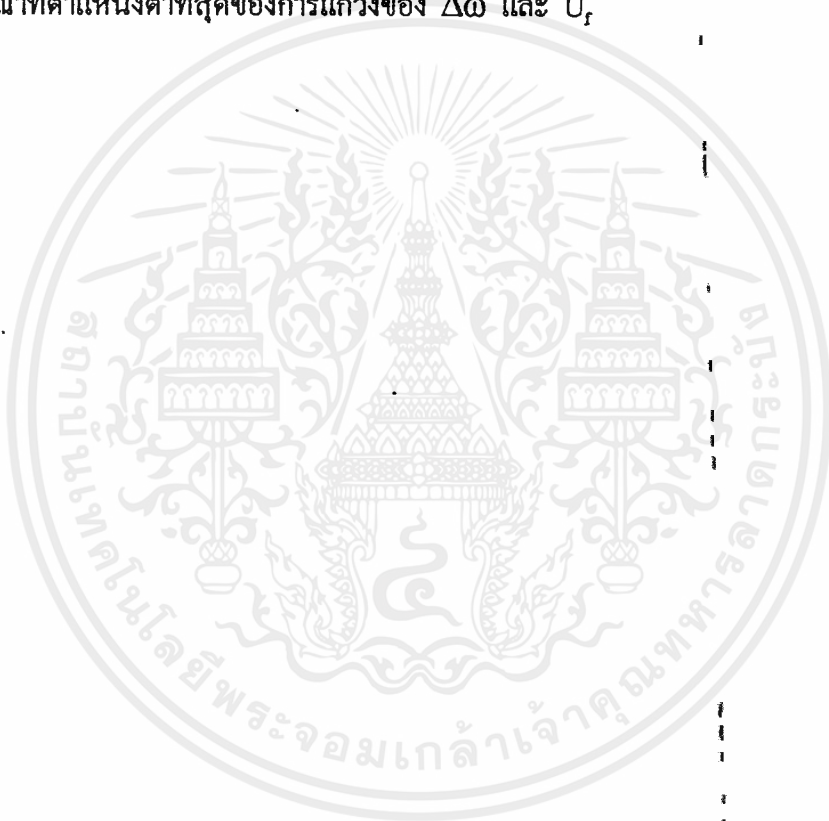
โดย $\Delta\omega$ คือ มุมของการเบี่ยงเบน

m คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่คำนวณ

$$t_k = kT$$

$$\dot{U}(k) = \{U_r(k) - U_r(k-1)\} / T$$

U จะพิจารณาที่ตำแหน่งค่าที่สุดของการแกว่งของ $\Delta\omega$ และ U_r



บทที่ 10

โปรแกรมและผลการทดลอง

10.1 อธิบายการทำงานของโปรแกรม

เป็นโปรแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งทำการจำลองขึ้นดังนี้ มีเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า 1 ตัวโดยมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าอัตโนมัติและอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว ควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าอยู่ ต่ออยู่กับอินฟินิตบัส โดยผ่านระบบสายส่งคู่ ซึ่งระบบจำลองทั้งหมดจะจำลองให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ อยู่ในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียล และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (จากการทดลอง) จากระบบจริง ระบบจำลองจึงมีความใกล้เคียงกับระบบจริง

ตัวโปรแกรม จะเป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะทำการป้อนสัญญาณรบกวนเข้าไปในระบบ คือสัญญาณรบกวนเล็กน้อยและสัญญาณรบกวนรุนแรง เพื่อให้ระบบเสถียรภาพไป โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ไว้ที่ตรงจุดกึ่งกลางของระบบสายส่ง เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอุปกรณ์นี้จะถูกควบคุมด้วยวิธีพีชชี เพื่อให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพอีกครั้ง ผลของการควบคุมด้วยวิธีต่างๆเมื่อระบบถูกรบกวน จะแสดงด้วยกราฟการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเชิงมุม , การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ กับเวลา

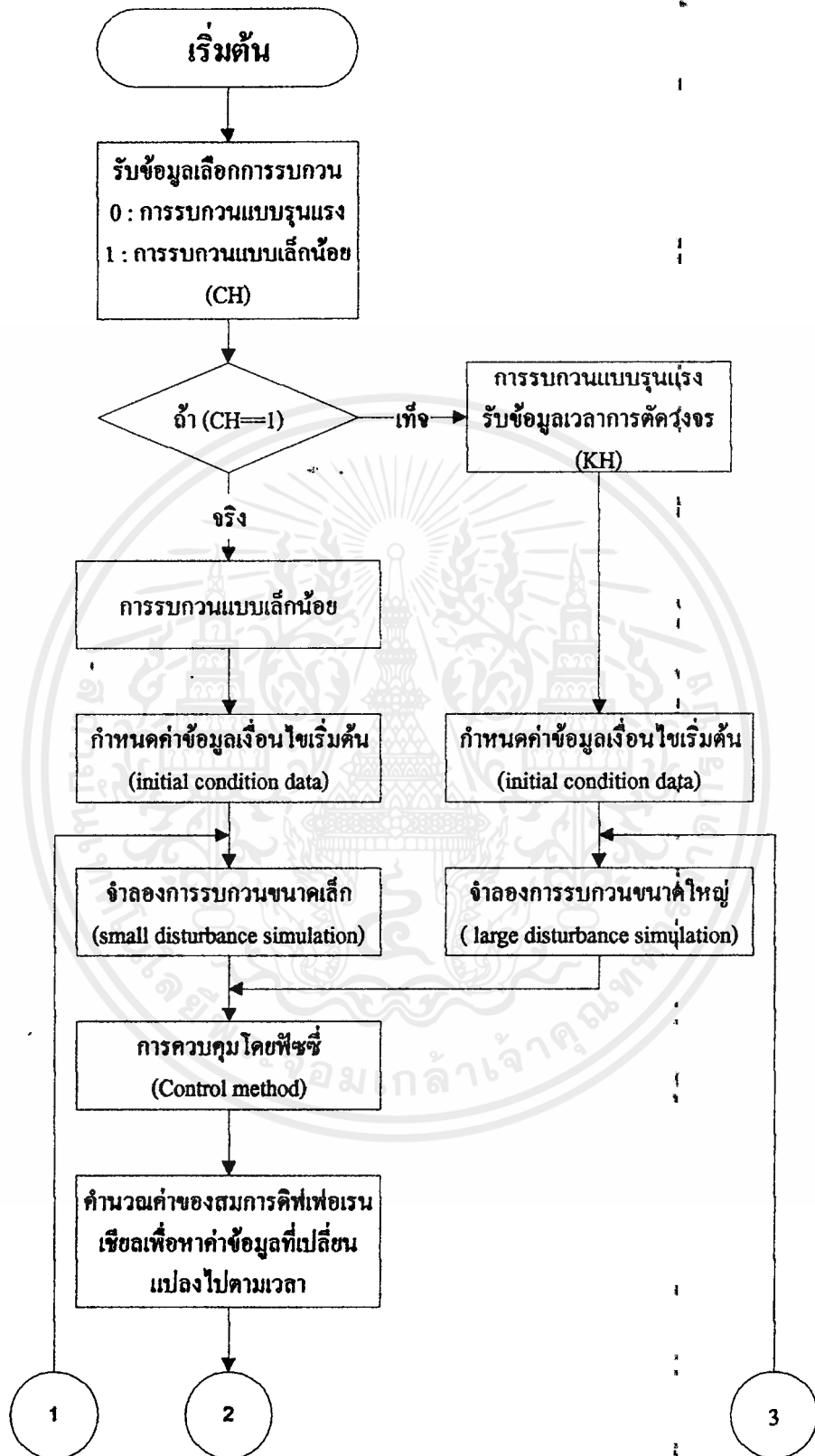
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

1. รับข้อมูลการเลือกว่าต้องการให้ระบบมีการจำลองการรบกวนแบบเล็กน้อยหรือการรบกวนแบบรุนแรง
2. กำหนดค่าเริ่มต้น เงื่อนไขของค่าตัวแปรและข้อมูลต่างๆ
3. ทำการจำลองค่าการรบกวนแบบเล็กน้อย หรือการรบกวนแบบรุนแรงตามที่เลือก
4. ทำการควบคุมระบบด้วยวิธีพีชชี เพื่อหาสัญญาณนำไปควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์
5. คำนวณค่าตัวแปร ในสมการดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อหาค่าข้อมูลของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
6. ตรวจสอบค่าขีดจำกัดของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ , อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ ของระบบ

7. คำนวณค่าสมการของสมการระบบจำลอง
8. คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเชิงมุม , การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ;
9. วาดกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเชิงมุม , การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ กับเวลา
10. ตรวจสอบว่าทำงานครบตามเวลาที่กำหนดไว้ ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำข้อ 4 อีกครั้ง ถ้าครบแล้วก็จบการทำงานของโปรแกรม

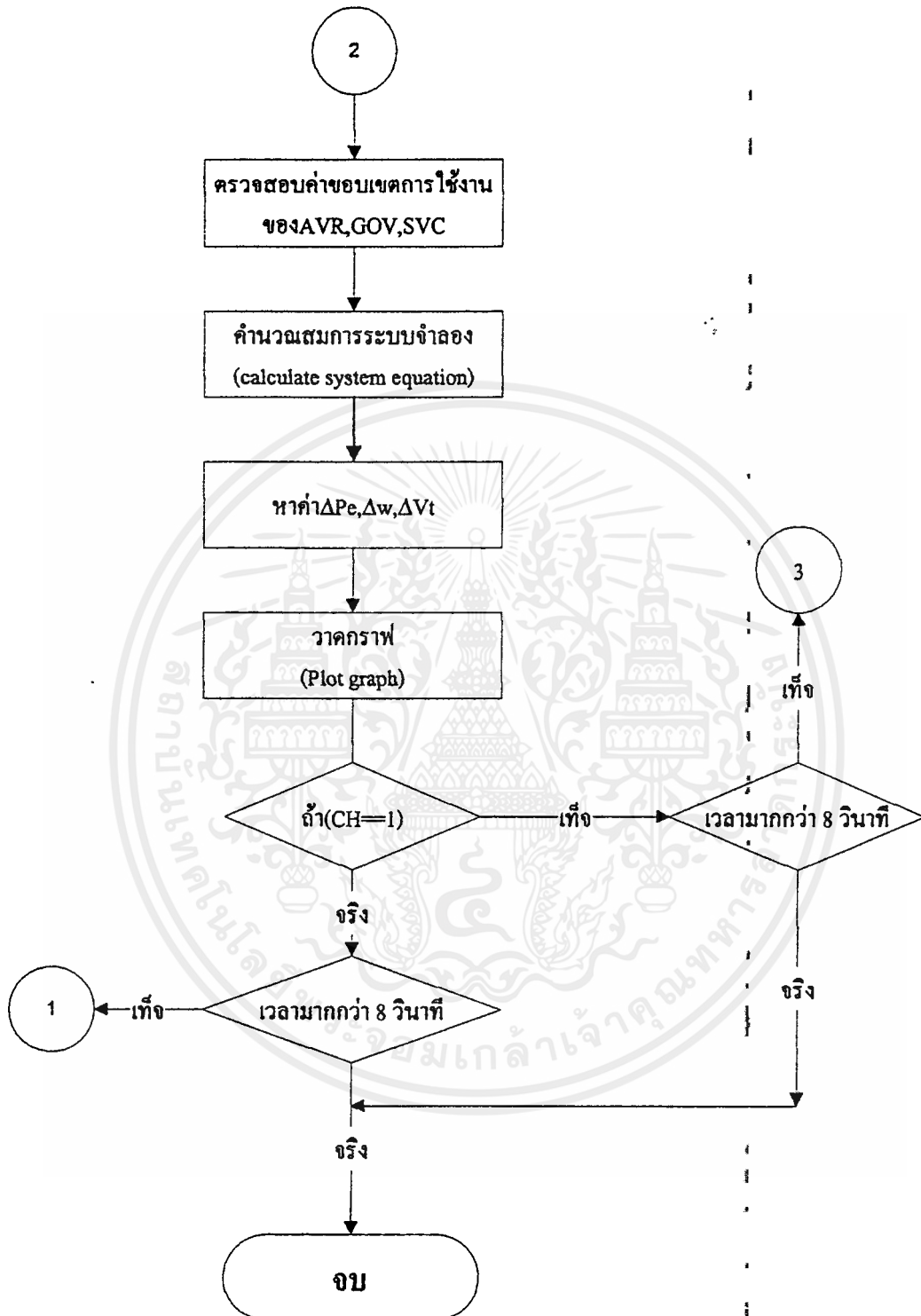
แผนภูมิการไหลของโปรแกรมจำลองระบบ (Flow Chart)





รูป 10.1 แสดงแผนภูมิการไหลของโปรแกรมจำลองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 10.1 (ต่อ) แสดงแผนภูมิการไหลของ โปรแกรมจำลองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขการรบกวนของระบบ

การรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลัง จะจำลองเป็นสัญญาณใส่เข้าไปในโปรแกรม แบ่งออกเป็น 2 แบบ

1. การรบกวนแบบเล็กน้อย (Small Disturbance) คือการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้า อินพุต ซึ่งเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ลดลงภายในเวลา 1.0 s ซึ่งแสดงได้ดังรูป 9.5 การรบกวนแบบเล็กน้อยนี้ ในระบบจริงอาจเกิดขึ้นได้เช่น กิ่งไม้เล็กๆหักลงมาพาดสายไฟแล้วหลุดออกไป เป็นต้น

2. การรบกวนแบบรุนแรง (Large Disturbance) คือการขาดของสายใดสายหนึ่งของระบบ สายส่งคู่ หลังการเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ผ่านไปแล้วเป็นเวลา 0.1 s ซึ่งพิสูจน์เป็นสมการ รีแอกแตนซ์หลังจากเกิดฟลัทได้ดังภาคผนวก ก การรบกวนแบบรุนแรงในระบบจริง เช่น คั้นไม้ ล้มพาดสายไฟฟ้าหรือเสาไฟฟ้าหัก โคนเป็นต้น

10.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม

เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า

x_d	= 1.620	(pu)	(d-axis Reactance)
$x_{d'} (x'_{d'})$	= 0.250	(pu)	(q-axis Transient Reactance)
x_q	= 1.600	(pu)	(q-axis Reactance)
$T_{dod} (T'_{do})$	= 5.600	(s)	(d-axis Open Circuit Time Constant)
M	= 0.0191	(s)	(Inertia Constant)
D	= 0.00531	(pu s)	(Damping)
P_o	= 1.0	(pu)	(Real Power)
V_o	= 1.0	(pu)	(Reactive Power)
$V_{to} (V_t)$	= 1.0	(pu)	(Terminal Voltage)
ω_o	= 377.0	(rad/s)	(Synchronous Speed)

อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ

$U_e (K_A)$	= 200.0		(Exciter Gain)
$T_e (T_A)$	= 0.05	(s)	(Exciter Time Constant)
K_r	= 0.07		(Hunting Parameter)
T_r	= 1.250	(s)	(Time Setting)

อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว

SIGM (σ)	= 0.05		(Permanent Drop)
T_g	= 0.02	(s)	(Gate Time Constant)
T_w	= 2.0	(s)	(Water Time Constant)

ระบบสายส่งคู่

X_l	= 0.14	(pu)
X_{l1}/cct	= 0.42	(pu)
X_{l2}/cct	= 0.6	(pu)
X_j	= 0.05	(pu)

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์

$V_{co} (V_c)$	= 1.0	(pu)
T_c	= 0.05	(s)
$K_{sv} (K_s)$	= 50.0	
T_v	= 0.01	(s)
T_{o1}	= 4.0	(s)
T_{r1}	= 0.01	(s)

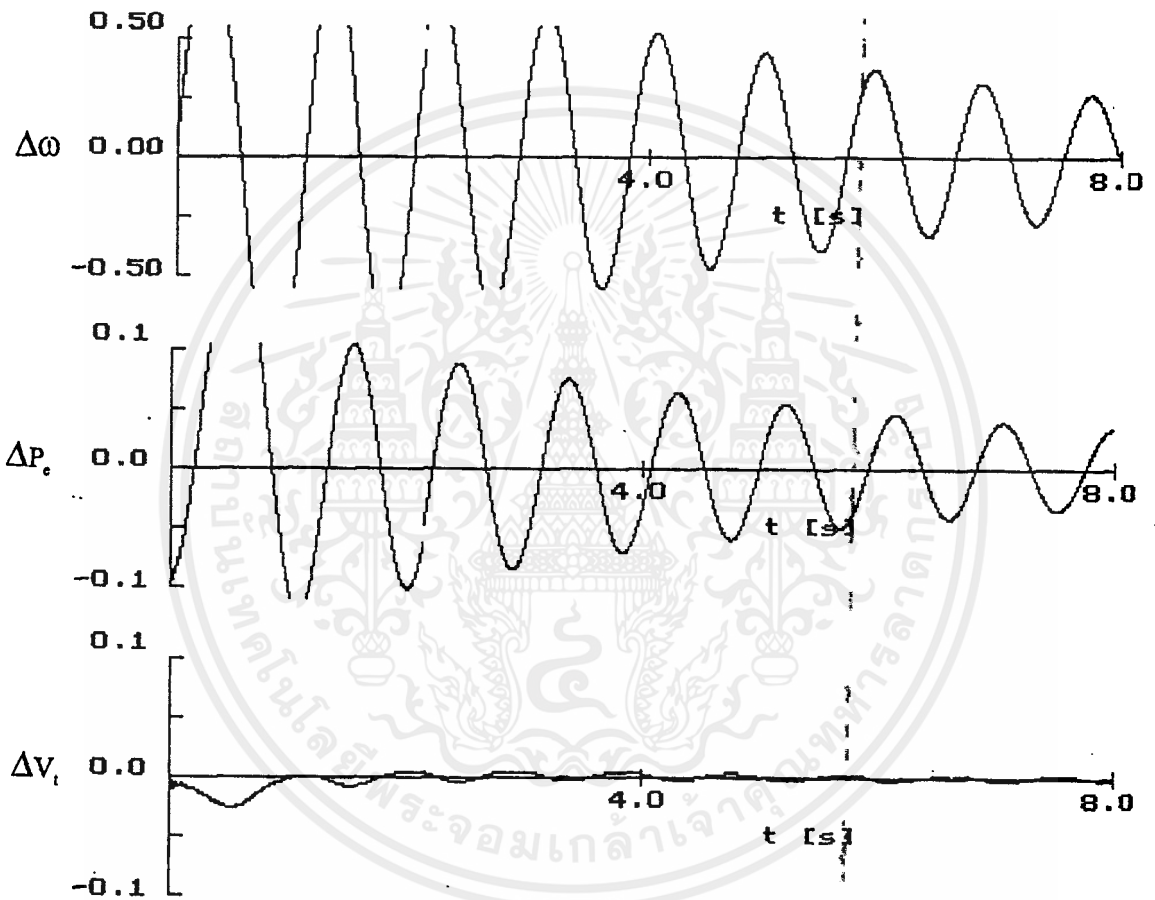
การควบคุมด้วยวิธีพีซี

	α_1	α_2	α_3
Small Disturbance	0.01	0.00	0.42
Large Disturbance	0.01	120	0.24

การควบคุมด้วยวิธี PD (Proportional and Derivative)

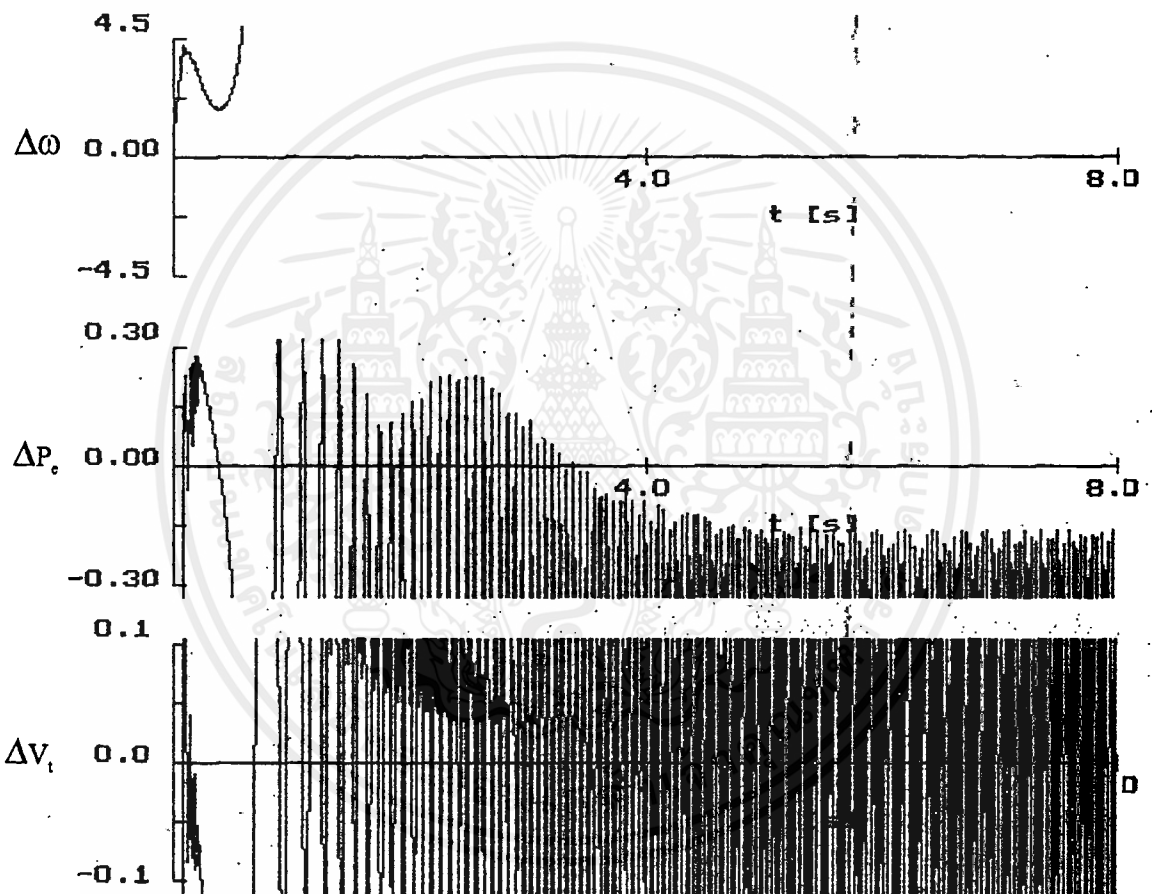
K_p	= 0.6
K_d	= 0.004

10.3 ผลการทดลอง



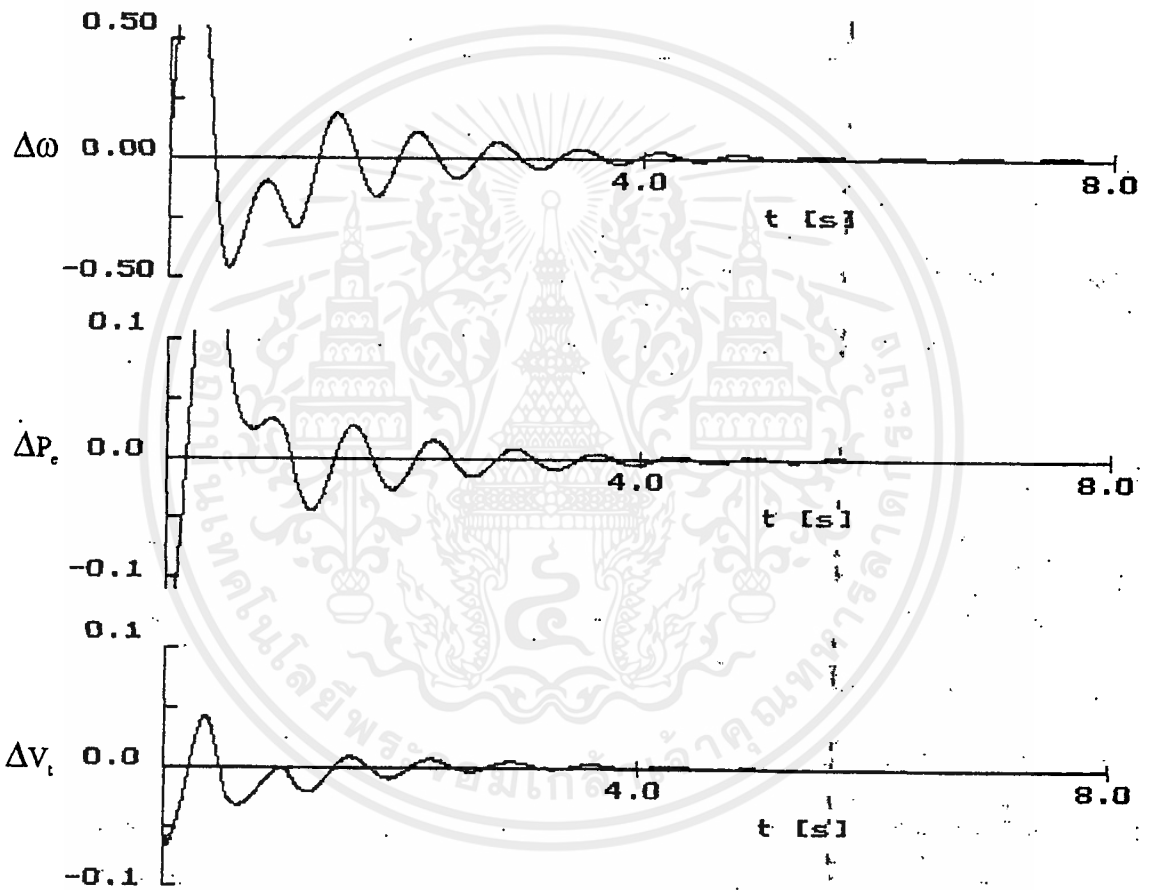
รูป 10.2 ระบบที่ไม่มีการควบคุม (การรบกวนแบบเล็กน้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



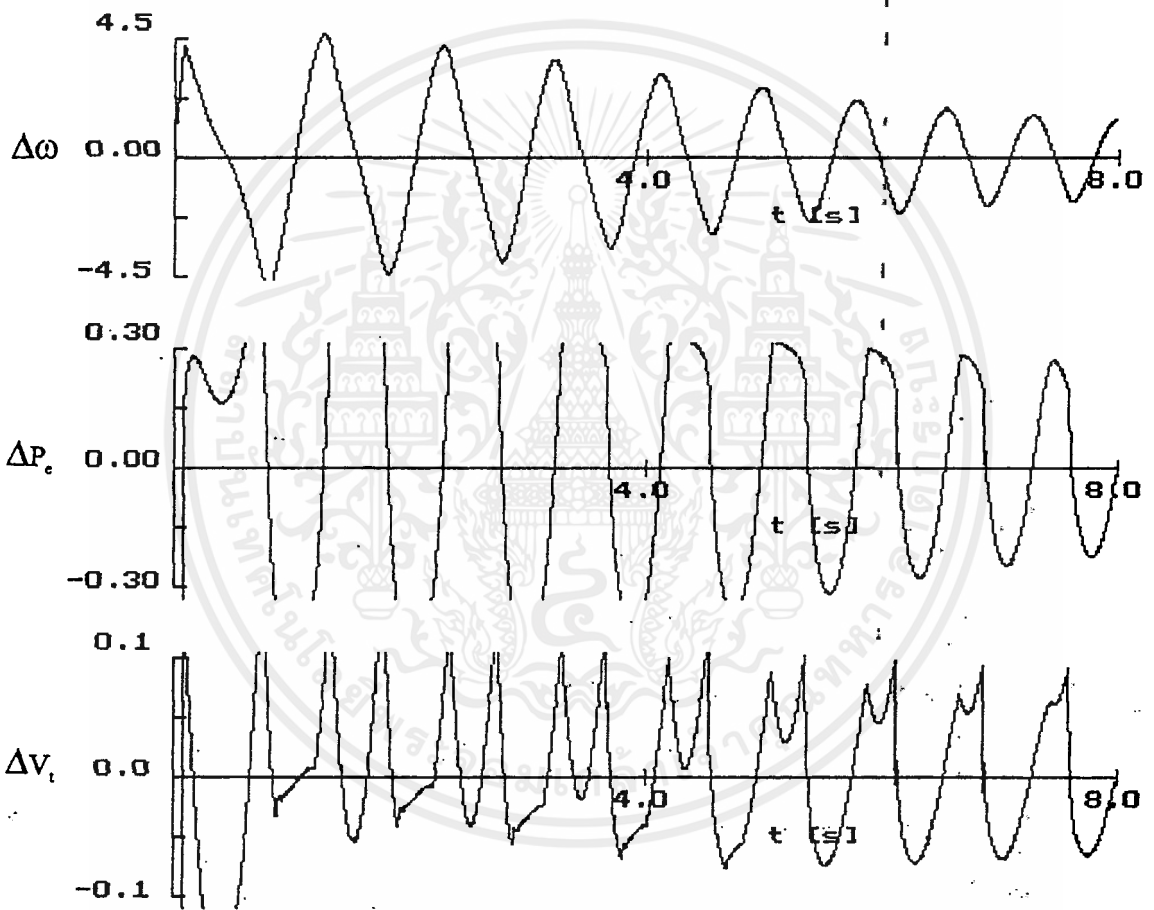
รูป 10.3 ระบบที่ไม่มีการควบคุม (การรบกวนแบบรุนแรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



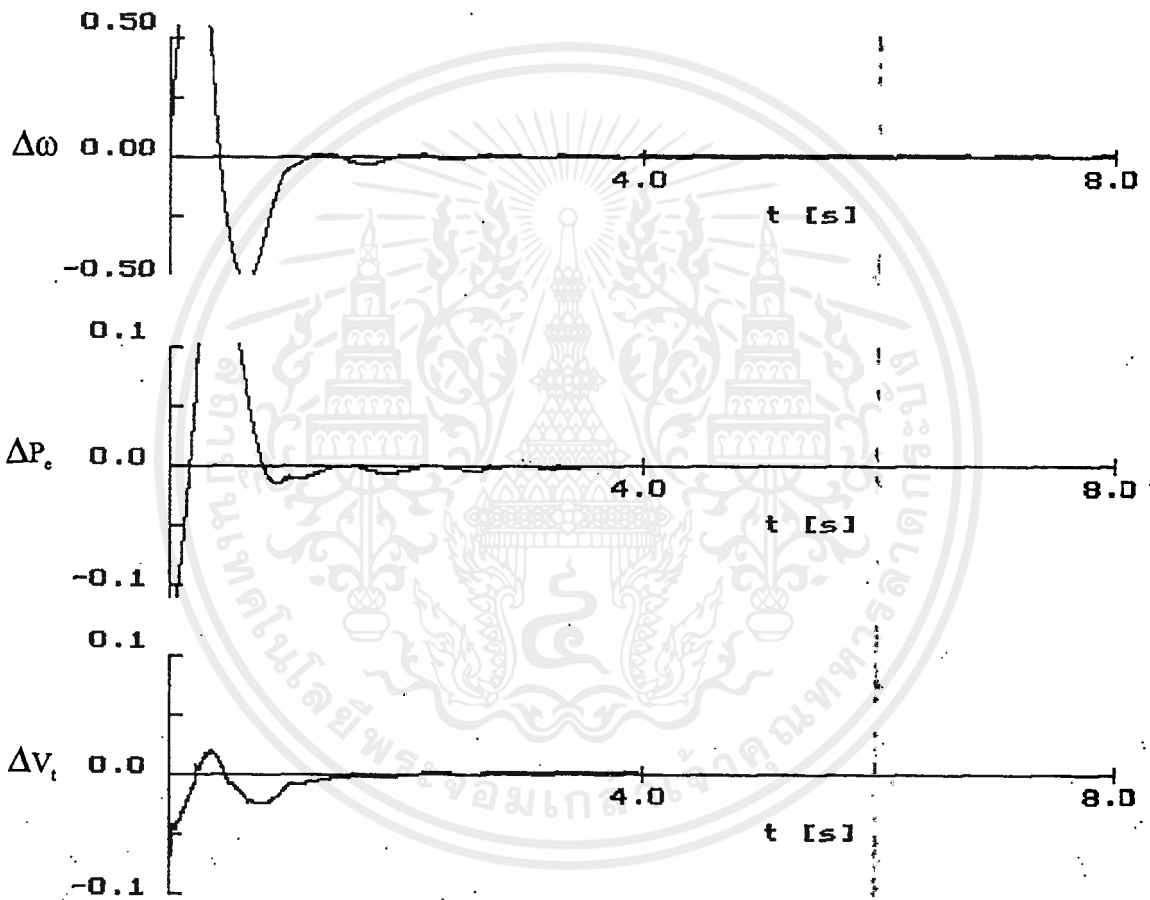
รูป 10.4 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธี PD (การรบกวนแบบเล็กน้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



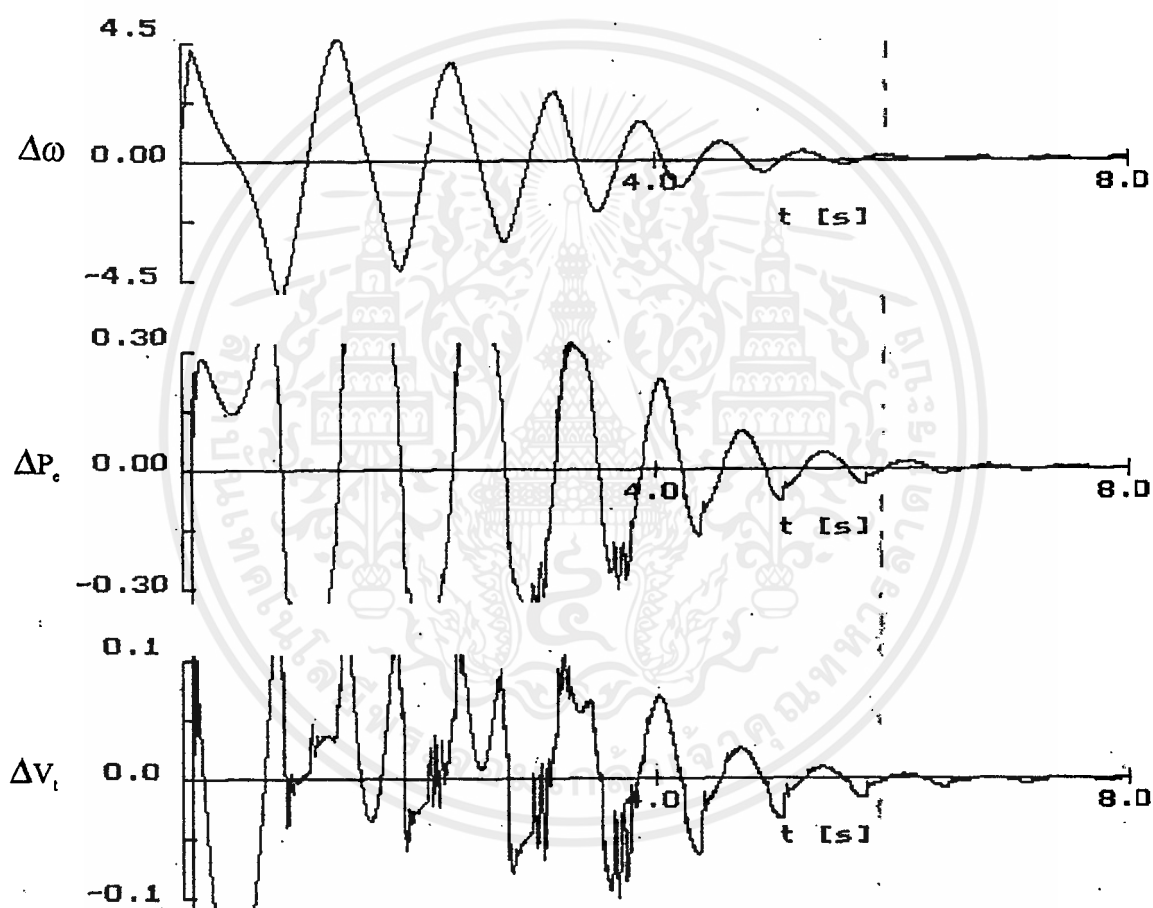
รูป 10.5 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธี PD (การรบกวนแบบรุนแรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 10.6 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธีพีชชี (การรบกวนแบบเล็กน้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 10.7 ระบบที่ถูกควบคุมด้วยวิธีพีชชี (การรบกวนแบบรุนแรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11

สรุปผลและวิจารณ์

จากทฤษฎีและจุดประสงค์ของการประยุกต์นำทฤษฎีฟuzzy มาใช้หาสัญญาณควบคุม อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ เพื่อรักษาเสถียรภาพและปรับปรุงระบบให้เข้าสู่สมดุลอีกครั้งหลังการเกิดฟอลท์

1. เมื่อทำการทดลองป้อนสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบโดยไม่มีกรควบคุมใดๆ จะได้ผลดังนี้

- เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนแบบเล็กน้อย ได้ผลดังรูป 10.2 ทำให้ระบบเสถียรภาพไปและพยายามเข้าสู่สมดุลแต่ใช้เวลานานมาก

- เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนแบบรุนแรง ได้ผลดังรูป 10.3 ทำให้ระบบเสถียรภาพอย่างมากและไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้เลย

2. เมื่อทำการทดลองป้อนสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบโดยใช้วิธีควบคุมแบบ PD จะได้ผลดังนี้

- เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนแบบเล็กน้อย ได้ผลดังรูป 10.4 ระบบจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 3 วินาที

- เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนแบบรุนแรง ได้ผลดังรูป 10.5 ระบบจะเข้าสู่สมดุลได้ แต่ต้องใช้เวลานาน

3. เมื่อทำการทดลองป้อนสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบโดยใช้วิธีควบคุมแบบฟuzzy จะได้ผลดังนี้

- เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนแบบเล็กน้อย ได้ผลดังรูป 10.6 ระบบจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 3 วินาที

- เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนแบบรุนแรง ได้ผลดังรูป 10.7 ระบบจะเข้าสู่สมดุลได้ แต่ต้องใช้เวลานานแต่จะรวดเร็วกว่าการใช้วิธีควบคุมแบบ PD

จากการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่า การนำทฤษฎีฟuzzy มาประยุกต์ใช้ควบคุมระบบ จะสามารถทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้ตรงตามจุดประสงค์

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้งหลังการเกิดฟอลท์นั้น จะต้องใช้เวลาประมาณ 8 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่นานเกินไปสำหรับการใช้กับระบบจริงที่

เอกสาร อุปกรณ์ต่างๆ จะสามารถทนต่อสภาวะการเกิดฟอลท์นั้นๆ ได้ อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ ในด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงการของเราเป็นการศึกษาระบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบจะได้มาจากระบบหนึ่งที่พิจารณาเท่านั้น รวมถึงค่าขีดจำกัดของอุปกรณ์ต่างๆด้วย ซึ่งค่าเหล่านี้จะแตกต่างกันในแต่ละระบบ จึงอาจทำให้ผลที่ได้แตกต่างกันออกไป

ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดี 1. ระบบจะเข้าสู่สมดุล ได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมเลย
2. ไม่ต้องการรายละเอียดซับซ้อน ในการออกแบบตัวควบคุม ทำให้สามารถใช้งานกับระบบที่มีการจำลองทางคณิตศาสตร์ได้

ข้อเสีย 1. ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการหาสัญญาณควบคุม ทำให้การหาค่าตัวแปรปรับค่าเพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมต้องใช้เวลาาน เพราะต้องใช้ในการวนลูปเพื่อหาค่าที่เป็นไปได้ทุกค่า

2. สัญญาณควบคุมที่ได้จะเหมาะสมกับแค่สภาวะการรบกวนเดียวเท่านั้น ถ้าระบบมีการรบกวนที่เปลี่ยนไปจะต้องหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมใหม่

3. ผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมด้วยวิธีพีชชี พบว่าที่สภาวะคงที่จะไม่เรียบเลยทีเดีย แต่จะมีการแกว่งเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. ในการควบคุมระบบจำลอง สามารถนำวิธีอื่นๆเข้ามาร่วมกันควบคุมได้ เช่นการควบคุมร่วมกันระหว่างการควบคุมที่ขั้วของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธี $\Delta P - PSS$ หรือ $\Delta \omega - PSS$ กับการควบคุมในส่วนของสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธี PD หรือวิธีพีชชี น่าจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น

2. เราสามารถใช้วิธีการควบคุมแบบนี้กับการเกิดฟลตที่ตำแหน่งต่างๆในระบบสายส่งได้ และสามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ติดตั้งหรือเพิ่มเติมจำนวนอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตย์ได้ ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมและการทำงานของระบบ

3. สามารถทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบได้ เพื่อที่จะนำไปใช้งานในเงื่อนไขที่กว้างขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ในระบบ

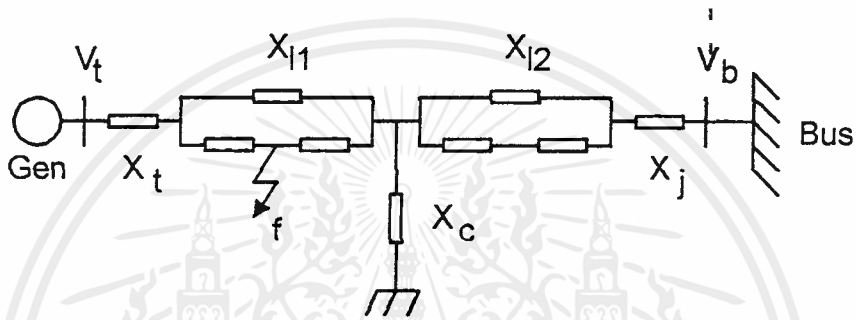


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สมการที่ใช้ในการคำนวณการเกิดฟอลต์ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

พิจารณาระบบจำลองการเกิดฟอลต์ ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าคู่ ดังรูป ก.1



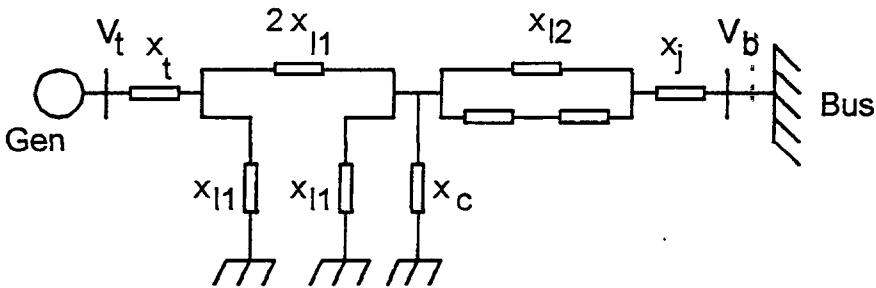
รูป ก.1 ระบบจำลองการเกิดฟอลต์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าคู่

ก.1 พิจารณาการเกิดฟอลต์ 3 เฟสลงดินที่ตำแหน่ง f

จะได้สมการดังนี้ โดยกำหนดให้

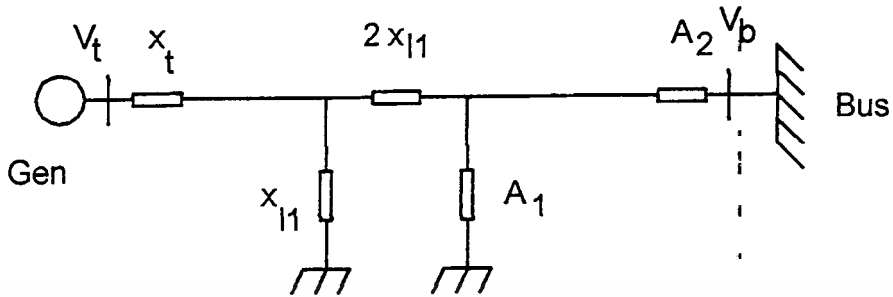
$$A_1 = (X_c X_{l1}) / (X_c - X_{l1}) \tag{ก.1}$$

$$A_2 = X_{l2} + X_j \tag{ก.2}$$



รูป ก.2 ระบบจำลองที่ได้จากรูป ก.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



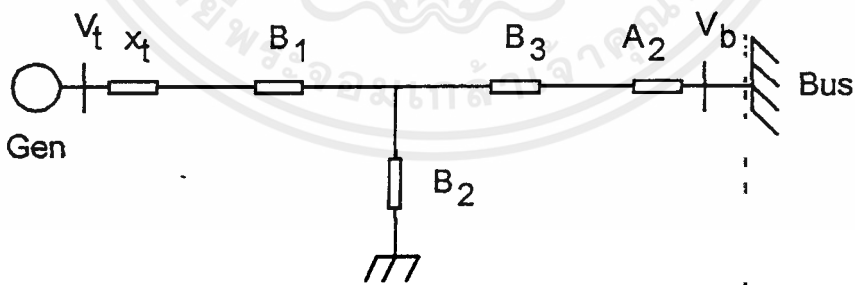
รูป ก.3 ระบบจำลองที่ได้จากรูป ก.2

แปลงจากระบบเดลต้า (Delta : Δ) เป็นระบบสตาร์ (Star : Y) โดยกำหนดให้

$$B_1 = \frac{(2X_{l1}X_{l1})}{(2X_{l1} + X_{l1} + A_1)} = \frac{(2X_{l1}X_{l1})}{(3X_{l1} + A_1)} \quad (ก.3)$$

$$B_2 = \frac{(X_{l1}A_1)}{(2X_{l1} + X_{l1} + A_1)} = \frac{(X_{l1}A_1)}{(3X_{l1} + A_1)} \quad (ก.4)$$

$$B_3 = \frac{(2X_{l1}A_1)}{(2X_{l1} + X_{l1} + A_1)} = \frac{(2X_{l1}A_1)}{(3X_{l1} + A_1)} \quad (ก.5)$$



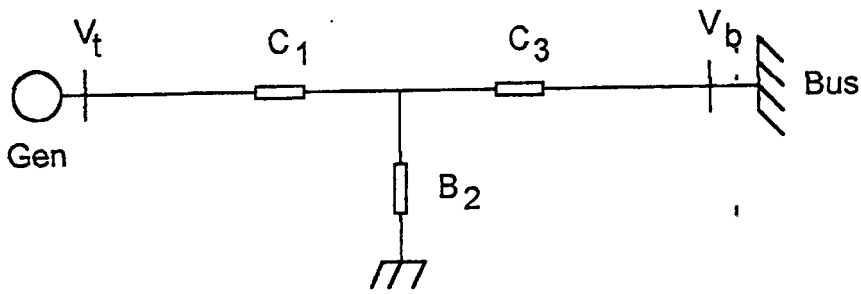
รูป ก.4 ระบบจำลองที่ได้จากรูป ก.3

กำหนดให้

$$C_1 = X_t + B_1 \quad (ก.6)$$

$$C_2 = A_2 + B_3 \quad (ก.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก.5 ระบบจำลองที่ได้จากรูป ก.4

แปลงจากระบบสตาร์เป็นระบบเดลต้าโดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} X_c &= (C_1 C_2 + C_1 B_2 + C_2 B_2) / B_2 \\ &= \{(C_1 C_2) + B_2(C_1 + C_2)\} / B_2 \end{aligned} \quad (ก.8)$$

$$\begin{aligned} X_a &= (C_1 C_2 + C_1 B_2 + C_2 B_2) / C_2 \\ &= \{(C_1 C_2) + B_2(C_1 + C_2)\} / C_2 \end{aligned} \quad (ก.9)$$

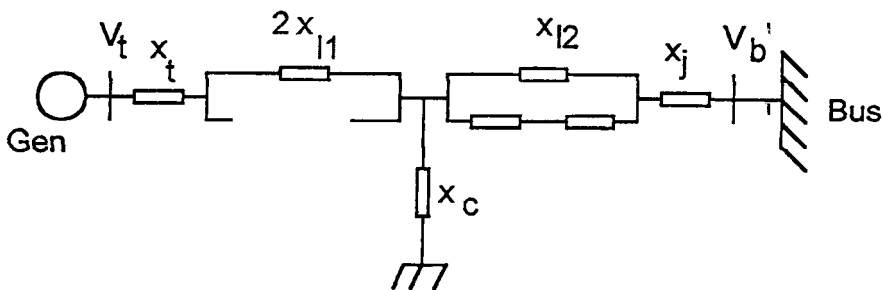
$$\begin{aligned} X_b &= (C_1 C_2 + C_1 B_2 + C_2 B_2) / C_1 \\ &= \{(C_1 C_2) + B_2(C_1 + C_2)\} / C_1 \end{aligned} \quad (ก.10)$$

ก.2 พิจารณาการที่สายส่งกำลังไฟฟ้าเส้นหนึ่งของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าคู่ถูกตัดวงจรออก หลังจากเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน

จะได้สมการดังนี้ โดยกำหนดให้

$$D_1 = X_i + 2X_{i1} \quad (ก.11)$$

$$D_2 = X_{i2} + X_j \quad (ก.12)$$



รูป ก.6 ระบบจำลองการเกิดฟอลท์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าคู่ ซึ่งสายส่งกำลังไฟฟ้าเส้นหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าคู่ถูกตัดวงจรออก หลังจากเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงจากระบบสตาร์เป็นระบบเดลต้า โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} X_c &= \{(D_1 D_2) - X_c(D_1 + D_2)\} / (-X_c) \\ &= \{X_c(X_1 + X_{11} + X_{12} + X_j) - (X_1 + X_{11})(X_{12} + X_j)\} / X_c \end{aligned} \quad (ก.13)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \{(D_1 D_2) - X_c(D_1 + D_2)\} / (X_{12} + X_j) \\ &= \{X_c(X_1 + X_{11} + X_{12} + X_j) - (X_1 + X_{11})(X_{12} + X_j)\} / (X_{12} + X_j) \end{aligned} \quad (ก.14)$$

$$\begin{aligned} X_6 &= \{(D_1 D_2) - X_c(D_1 + D_2)\} / (X_1 + X_{11}) \\ &= \{X_c(X_1 + X_{11} + X_{12} + X_j) - (X_1 + X_{11})(X_{12} + X_j)\} / (X_1 + X_{11}) \end{aligned} \quad (ก.15)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สมการรังกูตตาอันดับที่ 4 (Fourth-Order Rung-kutta Method)

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของสมการดิฟเฟอเรนเชียล

$$Y_{i+1} = Y_i + \left[\frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \right] h \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่

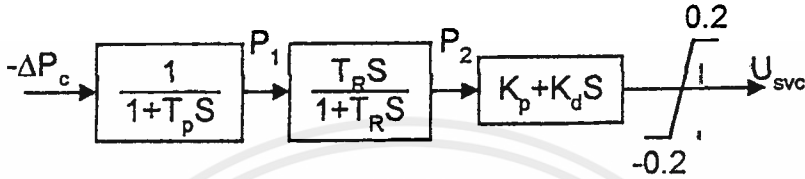
$$K_1 = f(x_i, y_i) h \quad (\text{ข.2})$$

$$K_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (\text{ข.3})$$

$$K_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (\text{ข.4})$$

$$K_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3) \quad (\text{ข.5})$$

ภาคผนวก ค
การหาสัญญาณควบคุมโดยใช้วิธี PD



รูป ค.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมโดยวิธี PD

จากบล็อกไดอะแกรมการควบคุมโดยวิธี PD ได้สมการดังนี้

$$P_1 = \frac{-\Delta P_c}{1 + T_p S}$$

$$SP_1 = \frac{-\Delta P_c - P_1}{T_p}$$

จะได้

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{-\Delta P_c - E}{T_p}$$

(ค.1)

และ

$$P_2 = \frac{T_r SP_1}{1 + T_r S}$$

$$SP_2 = SP_1 - \frac{P_2}{T_r}$$

จะได้

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{dP_1}{dt} - \frac{P_2}{T_r}$$

(ค.2)

และ

$$U_{svc} = (K_p + K_d S) \cdot P_2$$

จะได้

$$U_{svc} = K_p P_2 + K_d \frac{dP_2}{dt}$$

(ค.3)

ภาคผนวก ง

โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

```
/*-----*/
/* Project :Power system stability by static var base on fuzzy control */
/* Program :Simulating the system when has disturbance */
/* Adviser :Assis.Prof. Monthon Leelajindakeailerk */
/* :Mr.Chai Chompoo-inwai */
/* By :Kong,Ton,Mod,Juke ->Power engineering 4B */
/* Year :1997 */
/*-----*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <float.h>
#include <math.h>
#include "c:\ton\rapee.h"

#define Umfp 0.2 /* Max control signal of SVC */
#define SL3 135.0 /* switching line */

#define Pmax 1.05 /* Limit of GOV */
#define Efmax 7.30 /* Limit of field voltage (max) */
#define Efmin -7.30 /* Limit of field voltage (min) */
#define Bsmax 1.0 /* Max susceptance of SVC */
#define Bsmin -1.0 /* Min susceptance of SVC */
#define Ue 200.0 /* Exciter gain:Ka */
#define Te 0.05 /* Exciter time constant:Ta */
#define Kf 0.0562*1.25 /* Hunting parameter:Kf */
#define Tf1.250 /* Time setting:Tf */
```

```

:
:
:
#define SIGM 0.05 /* Permanent drop:sigma */
#define Tg 0.20 /* Gate time conatant:Tg */
#define Tw 2.000 /* Water time constant:Tt */

#define P0 1.0 /* Real power */
#define V0 1.0 /* Reactive power */
#define Vt0 1.0 /* Terminal voltage */
#define W0 377.0 /* Synchronous speed */

#define Xdd (( 1.0 - xc*xa ) * xdd + xe )
#define Xq (( 1.0 - xe*xa ) * xq + xe )
#define Xd (( 1.0 - xe*xa ) * xd + xe )

#define T 0.005 /* Sampling time */
#define N 1601 /* Number of data */
#define LIMIT (T*(double)(N-1)) /* Max number of data */
#define NA 11 /* Number of differential equations */

#define Vc0 1.0 /* SVC */
#define Tc 0.05 /* SVC */
#define Ksv 50.0 /* SVC:Ks */
#define Tv 0.0 /* SVC */
#define TQ1 4.0 /* Controller:Tr */
#define TP1 0.01 /* Controller:Tp */

/*--- fuzzy parameters ---*/
#define sbp 0.01 /* alpha1 */
#define sap 120.0 /* alpha2 */
#define sDrp 0.24 /* alpha3 */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/*--- initial condition variables at t=0 s. ---*/
```

```
static double vd0,vq0,id0,iq0,  
del0,del1,  
Q0,Q0l,Q0t,  
fif0,  
vf0,vc0,v0,  
Bs0;
```

```
/*--- Transmission line ---*/
```

```
static double xc,xl,xa,xb,xl,  
xt = 0.14,  
xl1 = 0.21, /* 1/2 per cct */  
xl2 = 0.30, /* 1/2 per cct */  
xee = 0.05; /* Xj */
```

```
static double xd = 1.620, /* d-axis reactance */  
xdd = 0.250, /* d-axis transient reactance */  
xq = 1.600, /* q-axis reactance */  
Td0d= 5.600, /* d-axis open circuit time constant */  
M = 0.0191, /* Inertia constant */  
D = 0.00531; /* Damping coefficient */
```

```
static double u1[2][N], /* Control signal for SVC */  
dy1[N], /* Real power:Pe */  
dy2[N], /* Terminal voltage:Vt */  
dy3[N], /* SVC:Vc */
```

```
ti; /* kpt:simulation time */
```

```
static double Pd; /* for small disturbance */
```

```
static double ZZ; /* Vf */
```

```
static double SDEP,SEEP,SDkP,STkP; /* alpha1*Ep(k),Ep(k),De(k),sita(k) */
```

```
static double Jw1; /* performance index of large disturbance */
```

```
static double Jw2; /* performance index of small disturbance */
```

```
static int DD1,DD2,DXD1,DXD2; /* for limit checking */
```

```

static int  AVRL, AVRL1;      /* 1:over Max limit */
static int  SVCL, SVCL1;     /* -1:under Min limit */
                                /* 0:ok.          */

static int  kpt,CH,KH; /* count number,select disturbance,trip time */
/*--- Prototype ---*/
void  shoki(void);
void  x_stand(double x[]);
void  d_out(double  y1[]);
void  runge4(double x[],double u1[][N],double t,int n,double dy2[N],double dy3[N],int
flag1);
void  sys1(double x[],double u1[][N],double f[],double y[],double dy2[N],double dy3[N],int
flag1);
void  svcfuz(double u1[][N],double Vt,double Pe,double x1);
void  svcsita(double DE,double EE,double Dk,double *Tk);
void  svcsimem(double Tk,double a,double *Nk,double SL);
unsigned _stack = 50000;

/*-----*/
/*  Main Program */
/*-----*/

void main()
{
static double GD;
static double x1[NA], y1[4], f[NA];
static double dt1[2],dt2[2],dt3[2],dt4[2];
static int  flag,fri;

/*--- Select Disturbance Large , Small ---*/
clrscr();

printf("\n\n\n");
printf("
<----- Proposed Control ----->\n");

```

```

printf("                Please select Disturbance.\n");
printf("                large:[0],small:[1] --->");
scanf(" %d",&CH);
printf("\n");
if(CH==0)
{
    printf("                Select trip time after 3-phase fault.\n");
    printf("                [ 0 - 100 ]{normal=20} --->");
    scanf(" %d",&KH);
}
flag = 0;
xl = xt + xl1 + xl2 + xee;
/*--- Graphic:Prepare Graph ---*/
g_init();        /* initial screen */
g_cls();         /* clear screen */
floodfill(1,1,7); /* white screen for screen capture */
if(CH==0)
{
    g_view(40.0, 5.0,440.0, 105.0,-1,-1);
    w_view(40.0, 5.0,440.0, 105.0);
    w_axis(0.0, 4.5, N * T, -4.5);
    w_line(0.0, 0, 0);

    g_view(0, 0, 639, 399, -1, 1);
    g_print(54, (int)((110.0-0.0)*0.0/4.0+4.0), " 4.5");
    g_print(54, (int)((110.0-0.0)*2.0/4.0+2.0), " 0.00");
    g_print(30, (int)((110.0-0.0)*2.0/4.0+0.0), "W");
    g_print(54, (int)((110.0-0.0)*4.0/4.0-2.0), "-4.5");

    g_view(40.0, 5.0,440.0, 235.0,-1,-1);
    w_view(40.0, 135.0, 440.0, 235.0);

    w_axis(0.0, 0.3, N * T, -0.3);
    w_line(0.0, 0, 0);

```

```

g_view(40.0, 5.0, 440.0, 235.0,-1,-1);
w_view(40.0, 135.0, 440.0, 235.0);
w_axiss(0.0, 0.1, N * T, -0.1);
w_line(0.0, 0, 0);

g_view(0, 0, 639, 399, -1, 1);
g_print(54, (int)((250.0-140.0)*0.0/4.0+134.0), " 0.1");
g_print(54, (int)((250.0-140.0)*2.0/4.0+132.0), " 0.0");
g_print(30, (int)((250.0-140.0)*2.0/4.0+130.0), "P");
g_print(54, (int)((250.0-140.0)*4.0/4.0+128.0), "-0.1");

g_view(40.0, 5.0, 440.0,365.0,-1,-1);
w_view(40.0, 265.0, 440.0, 365.0);
w_axiss(0.0, 0.1, N * T, -0.1);
w_line(0.0, 0, 0);

g_view(0, 0, 639, 399, -1, 1);
g_print(54, (int)((380.0-270.0)*0.0/4.0+264.0), " 0.1");
g_print(54, (int)((380.0-270.0)*2.0/4.0+262.0), " 0.0");
g_print(30, (int)((380.0-270.0)*2.0/4.0+260.0), "Vt");
g_print(54, (int)((380.0-270.0)*4.0/4.0+258.0), "-0.1");
}

/*--- Initial Condition of System ---*/
shoki();

if(CH==1) Pd = 0.0;    /* Assign value=0 for Pd at t=0s. */
else    Pd = 0.0;

/*--- Initial Condition of State Equations ---*/

```

```
x_stand(x1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*--- On line ( Loop for simulation) ---*/
for (kpt = 0;kpt <N-1;kpt++) /* start loop */
{
    ti=(double)kpt*T; /* print current time */
    gotoxy(20,25);
    printf("Simulation time: %5.2fs\r", ti);

/*--- Disturbance ---*/
    if(CH==0) /* Large disturbance */
        if(kpt==0) flag = 1; /* at t=0s. */
    if(CH==0)
        if(kpt==0+KH) /* after trip 1 line of double line */
        {
            flag = 0;
            x1 = 2.0*x1;
        }
    if(CH==1) /* Small disturbance */
        if(kpt>0)
            if(kpt<100) Pd=-0.1/100*kpt;/* 0<=t<0.5 sec */
    if(CH==1)
        if(kpt>=100)
            if(kpt<200) Pd=-0.2 + 0.1 /100*kpt;/* 0.5<=t<1 sec */
    if(CH==1)
        if(kpt>=200) Pd=0.0;/* t>=1.0 sec */

/*----- starting point of control action -----*/
    if(kpt%2==0)
    {
        svcfuz(u1,x1[7],dy1[kpt],x1[9]);
    }
    else u1[1][kpt] = u1[1][kpt-1];
/*----- ending point of control action -----*/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/*---System state equations calculation using Rungekutta---*/
```

```
AVRL = AVRL1;
```

```
DD1 = DXD1;
```

```
DD2 = DXD2;
```

```
SVCL = SVCL1;
```

```
runge4(x1, u1, T, NA, dy2, dy3, flag);
```

```
/*--- Limiter of AVR ---*/
```

```
if(x1[3] > Efmax - vf0)
```

```
{ AVRL1 = 1;
```

```
ZZ = Efmax - vf0;
```

```
}
```

```
else if(x1[3] < Efmin - vf0)
```

```
{ AVRL1 = -1;
```

```
ZZ = Efmin - vf0;
```

```
}
```

```
else
```

```
{ AVRL1 = 0;
```

```
ZZ = x1[3];
```

```
}
```

```
/*--- Limiter of GOV ---*/
```

```
GD = (-x1[1]/W0 - SIGM*x1[5]) / Tg;
```

```
if(GD > 0.1) DXD1=1;
```

```
else if(GD < -0.1) DXD1=-1;
```

```
else DXD1=0;
```

```
if(x1[5] > (Pmax-(P0-Pd))) DXD2=1;
```

```
else if(x1[5] < -(P0-Pd)) DXD2=-1;
```

```
else DXD2=0;
```

```
/*--- Limiter of SVC ---*/
```

```
if(x1[10] > 1.0 - Bs0)
```

```
{ SVCL1 = 1;
```

```
x1[10] = 1.0 - Bs0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
else if(x1[10] < -1.0 - Bs0)
    {
        SVCL1 = -1;
        x1[10] = -1.0 - Bs0;
    }
else SVCL1 = 0;
xc = 1.0 / (x1[10] + Bs0);
/*--- calculation system ---*/
sys1(x1, u1, f, y1, dy2, dy3, flag);
/*--- Calculation of Deviation of Output ---*/
d_out(y1);
/*--- calculation performance index ---*/
if(CH==0)
    {
        Jw1 += fabs(x1[1])* ti + fabs((u1[1][kpt]-u1[1][kpt-1])/T);
    }
if(CH==1)
    {
        Jw2 += fabs(x1[1])* ti + fabs((u1[1][kpt]-u1[1][kpt-1])/T);
    }
/*--- Graphic:Plot Graph ---*/
/* select variable to plot */
dt1[1] = x1[1]; \ /* 1st graph -> w */
dt2[1] = dy1[kpt+1]; /* 2nd graph -> Pe */
dt3[1] = dy2[kpt+1]; /* 3rd graph -> Vt */

if(kpt==0)fri =0;
else fri=1;
if(CH==0)
    {
        g_view(40.0, 5.0, 440.0, 105.0,-1,-1);
        w_view(40.0, 5.0, 440.0, 105.0);
        w_axis(0.0,4.5,N*T,-4.5);
        w_attr(5, 0xffff);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

w_line2((ti), dt1[1], fri,1);

g_view(40.0, 5.0, 440.0, 235.0,-1,-1);
w_view(40.0,135.0, 440.0, 235.0);
w_axis(0.0,0.3,N*T,-0.3);
w_attr(5, 0xffff);
w_line2((ti), dt2[1], fri, 2);

g_view(40.0, 5.0, 440.0, 365.0,-1,-1);
w_view(40.0, 265.0, 440.0, 365.0);
w_axis(0.0,0.1,N*T,-0.1);
w_attr(5, 0xffff);
w_line2((ti), dt3[1], fri, 3);
}
else
{
g_view(40.0, 5.0, 440.0, 105.0,-1,-1);
w_view(40.0, 5.0, 440.0, 105.0);
w_axis(0.0,0.5,N*T,-0.5);
w_attr(5, 0xffff);
w_line2((ti), dt1[1], fri, 1);

g_view(40.0, 5.0, 440.0, 235.0,-1,-1);
w_view(40.0, 135.0, 440.0, 235.0);
w_axis(0.0,0.1,N*T,-0.1);
w_attr(5,
0xffff);
w_line2((ti), dt2[1], fri, 2);

g_view(40.0, 5.0, 440.0, 365.0,-1,-1);
w_view(40.0, 265.0, 440.0, 365.0);

```

```

        w_line2((ti), dt3[1], fri, 3);
    }
    dt1[0] = dt1[1];
    dt2[0] = dt2[1];
    dt3[0] = dt3[1];
}          /* End loop */
getch();
}          /* End main */

/*-----*/
/*      Initial Condition of state variables      */
/*-----*/
void x_stand(double x[])
{
    x[0] = del0;    /* delta */
    x[1] = 0.0;    /* w */
    x[2] = fif0;   /* fif */
    x[3] = 0.0;    /* Vf */
    x[4] = 0.0;    /* Rf */
    x[5] = 0.0;    /* g */
    x[6] = 0.0;    /* Pi */
    x[7] = 0.0;    /* Vcm */
    x[8] = 0.0;    /* Pc */
    x[9] = 0.0;    /* Ep */
    x[10] = 0.0;   /* Bs */
}

```

```

/*-----*/
/*      Ininitial system equation      */
/*-----*/

void shoki()
{
    static double    A, C;

/*----- 1.delta1 -----*/
    del1 = asin(P0*xl/2.0);

/*----- 2. xc -----*/
    xc = xl/(4.0*(1.0 - cos(del1)));
    Bs0 = 1.0/xc;

/*----- 3.xe,xa,xb -----*/
    xe = (xc*(xt+xl1+xl2+xee)-(xt+xl1)*(xl2+xee))/xc;
    xa = (xc*(xt+xl1+xl2+xee)-(xt+xl1)*(xl2+xee))/(xl2+xee);
    xb = (xc*(xt+xl1+xl2+xee)-(xt+xl1)*(xl2+xee))/(xt+xl1);
    xa = 1.0/xa;

/*----- 4.delta1 -----*/
    del1 = asin(P0*xe);

/*----- 5. Q0 -----*/
    Q0l = (1.0-cos(del1))/xe;
    Q0t = xa;
    Q0 = Q0l - Q0t;

/*----- 6.vd0 Calculation -----*/
    A = ( Vt0 * Vt0 / xq + Q0);
    A = A * A;
    A = A + P0 * P0;
    vd0 = P0 * Vt0 / sqrt(A);

/*----- 7.iq0 Calculation -----*/
    C = Vt0 * Vt0 + xq * Q0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    iq0 = P0 * Vt0 / sqrt(C);
/*----- 8.vq0 Calculation -----*/
    A = Vt0 * Vt0 - vd0 * vd0;
    vq0 = sqrt(A);
/*----- 9.id0 Calculation -----*/
    id0 = (P0 - vq0 * iq0) / vd0;
/*----- 10.del0 Calculation -----*/
    del0 = asin((iq0*xe+vd0-vd0*xa*xe)/V0);
/*----- 11.fif0 Calculation -----*/
    fif0 = ( xdd * V0 * cos(del0)/Xdd );
    fif0 = ( vq0 - fif0 ) * Xdd * Td0d / xe ;
/*----- 12.vf0 Calculation -----*/
    vf0 = (Xd*fif0) / (Xdd*Td0d) - (xd-xdd)*V0*cos(del0) / Xdd;
/*----- 13.vc0 calculation -----*/
    vc0 = sqrt((vd0+(xt+x11)*iq0)*(vd0+(xt+x11)*iq0)
        +(vq0-(xt+x11)*id0)*(vq0-(xt+x11)*id0));
/*----- 14.v0 Calculation -----*/
    A = iq0 * xe + vd0 - vd0 * xa * xe;
    C = sin (del0);
    v0 = A/C;
}

```

```

/*-----*/
/*  Deviation of Output  */
/*-----*/

```

```

void  d_out(double  y1[])
{
    dy1[kpt+1] = y1[0] - P0;
    dy2[kpt+1] = y1[1] - Vt0;
    dy3[kpt+1] = y1[3] - vc0;
}

```

```

/*-----*/
/* System Equation */
/*-----*/

void sys1(double x[],double u1[][N],double f[],double y[],double dy2[N],double dy3[N],int
flag1)
{
    static double A1,A2,B1,B2,B3,C1,C2;
    double vd, /* d axis voltage */
    vq, /* q axis voltage */
    id, /* d axis current */
    iq; /* q axis current */

/*--- Operating point calculation ---*/
    if(flag1==1) /* small flag always =0 */
    {
        A1 = x11*xc/(xc-x11); /* large t=0 to (KH*T) ->flag=1 */
        A2 = x12+xee; /* t>(KH*T) ->flag=0 */
        B1 = 2.0*x11*x11 / (3.0*x11+A1);
        B2 = x11*A1/(3.0*x11+A1);
        B3 = 2.0*x11*A1/(3.0*x11+A1);
        C1 = xt+B1;
        C2 = A2+B3;

        xe = (C1*C2+B2*(C1+C2))/B2;
        xa = (C1*C2+B2*(C1+C2))/C2;
        xa = -1.0/xa;
        xb = (C1*C2+B2*(C1+C2))/C1;
    }
    if(flag1==0)
    {
        xe = (xc*(xt+x11+x12+xee)-(xt+x11)*(x12+xee))/xc;
        xa = (xc*(xt+x11+x12+xee)-(xt+x11)*(x12+xee))/(x12+xee);
        xb = (xc*(xt+x11+x12+xee)-(xt+x11)*(x12+xee))/(xt+x11);
        xa = 1.0/xa;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*-----      d axis voltage calculation      -----*/
    vd = xq * V0 * sin(x[0]) / Xq;
/*-----      q axis voltage calculation      -----*/
    vq = (xe*x[2])/(Xdd*Td0d)+xdd*V0*cos(x[0])/Xdd;
/*-----      d axis current calculation      -----*/
    id = x[2]*(1.0-xe*xa)/(Xdd*Td0d)-V0*cos(x[0])/Xdd;
/*-----      q axis current calculation      -----*/
    iq = V0 * sin(x[0]) / Xq;
/*-----      Real Power calculation      -----*/
    y[0] = vd * id + vq * iq;
/*-----      Terminal Voltage calculation      -----*/
    y[1] = sqrt(vd * vd + vq * vq);
/*-----      Reactive Power calculation      -----*/
    y[2] = vq * id - vd * iq;
/*-----      S V C Terminal Voltage calculation      -----*/
    y[3] = sqrt((vd+(xt+x1)*iq)*(vd+(xt+x1)*iq)
    +(vq-(xt+x1)*id)*(vq-(xt+x1)*id));
/*-----      Nonlinear differential equation      -----*/
/*-----      delta: torque angle      -----*/
    f[0] = x[1];
/*-----      1: w      -----*/
    f[1] = 1.0 / M * (x[6] - D * x[1] - (y[0]-(P0-Pd)));
/*-----      2: f      -----*/
    switch(AVRL)
    {
        case 1 :f[2] = Efmmax - x[2] / Td0d - (xd - xdd)*id;
                break;
        case -1:f[2] = Efmin - x[2] / Td0d - (xd - xdd)*id;
                break;
        case 0 :f[2] = (vf0 + x[3]) - x[2] / Td0d - (xd - xdd)*id;
                break;
    }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 }
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*-----      3: vf      -----*/
    f[3] = (- x[3] + Ue * (- dy2[kpt] - (Kf * ZZ - x[4]) / Tf)) / Te;
/*-----      4: Rf      -----*/
    f[4] = (Kf * ZZ - x[4]) / Tf;
/*-----      5: g      -----*/
    switch(DD1)
    {
        case 1 :f[5] = 0.1;
            break;
        case -1:f[5] = -0.1;
            break;
        case 0 :f[5] = -SIGM * x[5] / Tg + 1.0 / Tg * - x[1] / W0;
            break;
    }
/*-----      6: h      -----*/
    switch(DD2)
    {
        case 1 :f[6] = (-x[6]+(Pmax-(P0-Pd)))/Tw;
            break;
        case -1 :f[6] = (-x[6]-(P0-Pd))/Tw;
            break;
        case 0 :f[6] = (-x[6]+x[5])/Tw;
            break;
    }
/*-----      7: SVC -> Vcm      -----*/
    f[7] = (dy3[kpt] - x[7]) / Tv;
/*-----      8: SVC -> Pin      -----*/
    f[8] = -(y[0] - (P0 - Pd)) - x[8] / TP1;
/*-----      9: SVC -> Ep      -----*/
    f[9] = -(y[0] - (P0 - Pd)) - x[8] / TP1 - x[9] / TQ1;
/*-----     10:SVC -> Bs      -----*/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

```

        break;
    case -1 :f[10] = (-x[10]-Ksv * (x[7]-u1[1][kpt])) / Tc;
        break;
    case 0 :f[10] = (-x[10]-Ksv * (x[7]-u1[1][kpt])) / Tc;
        break;
    }
}

```

```

/*-----*/

```

```

/*4th-Rungekutta Method*/

```

```

/*-----*/

```

```

void runge4( double x[],double u1[][N],double t,int n,
double dy2[N],double dy3[N],int flag1)
{
    double k1[NA], k2[NA], k3[NA], k4[NA], y[3], z[NA];
    int i;
    sys1(x, u1, k1, y,dy2,dy3,flag1); /* 1st */
    for (i = 0; i < n; i++)
        z[i] = x[i] + t / 2 * k1[i];
    sys1(z, u1, k2, y,dy2,dy3 ,flag1);
    for (i = 0; i < n; i++)
        z[i] = x[i] + t / 2 * k2[i]; /* 2nd */
    sys1(z, u1, k3, y,dy2,dy3,flag1); /* 3rd */
    for (i = 0; i < n; i++)
        z[i] = x[i] + t * k3[i];
    sys1(z, u1, k4, y,dy2,dy3,flag1); /* 4st */
    for (i = 0; i < n; i++)
        x[i] = x[i] + t * (k1[i] + 2 * k2[i] + 2 * k3[i] + k4[i]) / 6;
}

```

```

/*-----*/
/* SVC fuzzy control */
/*-----*/
void svcfuz(double u1[][N],double Vt,double Pe,double x1)
{
    static double SNkP,SGkP;

    SNkP = 0.0; /* uN */
    SDEP = sbp*(x1-SEEP)/(2.0*T); /* alpha1*[Ep(k)-Ep(k-1)] */
    SEEP = x1; /* Ep(k) */
    SDkP = sqrt(SDEP*SDEP + x1*x1); /* De(k) */
/*----- Phase plan select -----*/
    svcsita(SDEP,x1,SDkP,&STkP); /* STkP:sita(k) */
    svcsimem(STkP,sap,&SNkP,SL3);
/*----- determine Gain factor -----*/
    SGkP = SDkP/sDrp; /* uG */
    if(SGkP>1.0) SGkP=1.0; /* limit membership func of uG */
/*----- calculate the SVC control signal -----*/
    u1[1][kpt] = -(2.0*SNkP-1.0)*Umfp*SGkP;
    if(u1[1][kpt] < -Umfp) u1[1][kpt]=-Umfp; /* limit control signal */
    if(u1[1][kpt] > Umfp) u1[1][kpt]= Umfp;
}

/*-----*/
/* Find angle:sita(k) */
/*-----*/
void svcsita(double DE,double EE,double Dk,double *Tk)
{
    if(DE>0.0 && EE>0.0) *Tk= asin(DE/Dk)*180.0/PI;
    if(DE>0.0 && EE<0.0) *Tk= -asin(DE/Dk)*180.0/PI+180.0;
    if(DE<0.0 && EE<0.0) *Tk= -asin(DE/Dk)*180.0/PI+180.0;
    if(DE<0.0 && EE>0.0) *Tk= asin(DE/Dk)*180.0/PI+360.0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*-----*/
/* Find N-membership gain for U(f) */
/*-----*/
void svcsimem(double Tk,double a,double *Nk,double SL)
{
    if(Tk >= 0.0 && Tk < SL - a / 2.0)
        *Nk = 1.0;
    if(Tk >= SL - a/2.0 && Tk < SL + a / 2.0)
        *Nk = ( - Tk + SL ) / a + 0.5;
    if(Tk >= SL + 180.0 - a / 2.0 && Tk < SL + 180.0 + a / 2.0)
        *Nk = ( Tk - ( SL + 180.0 ) ) / a + 0.5;
    if(Tk >= SL + 180.0 + a / 2.0 && Tk <= 360.0)
        *Nk = 1.0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เพิ่มเฮดเดอร์ (header file) rapee.h

```
#include <dos.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define PI 22/7.
#define coright 0
#define cotop 0
#define coleft 639
#define cobottom 399

typedef unsigned word;

int w_vx1,w_vy1,w_vx2,w_vy2;
double w_sx = 0.0;
double w_sy = 0.0;
double w_dx = 1.0;
double w_dy = 1.0;
int w_col = 7;
word w_pat = 0xffff;
int maxcolor;

#ifdef __BCPLUSPLUS__

/* prototype */
void w_view(double, double, double, double);
void w_axis(double, double, double, double);
void w_axiss(double, double, double, double);/* Draw Graph */
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void w_attr(int, word); /* set attribute */
void w_line(double, double, int);
void w_line2(double, double, int, int);

/* Function Prototypes */
void g_init (void);          /* initial graphics mode */
void g_print(int x,int y,char *st);
void g_screen(int x1,int x2,int x3,int x4); /* initial attribute */
void g_cls(void);/* clear viewport */
void t_cls(void);/* clear text mode screen */
void g_line(int x1,int y1,int x2,int y2,int col,int linestyle,int thickness,word pat);
void g_view(int x1,int x2,int x3,int x4,int x5,int x6);/* set viewport area */
#endif

/*      Function      */

void g_view(int x1,int x2,int x3,int x4,int x5,int x6)
{
    if(x6 == -1) setviewport(x1,x2,x3+100,x4+10,x5);
    else setviewport(x1,x2,x3,x4,x5);
}

void g_init (void)          /* initial graphics mode */
{
    int driver = DETECT, mode, ErrorCode;

/* Set up screen in graphics mode, virtual coords */

    initgraph (&driver, &mode, "");
    if ((ErrorCode = graphresult ()) != grOk)
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        gotoxy (5,12);
        printf ("%s",grapherrormsg(ErrorCode));
        delay (3000);
        exit (0);
    }
    maxcolor=getmaxcolor()+1;
}

```

```

void g_print (int x,int y,char *st)

```

```

{
    int oldc;

    oldc = getcolor();
    setcolor(maxcolor-5);
    settxtjustify (CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
    settxtstyle (2,HORIZ_DIR,6);
    outtextxy (x,y,st);
    setcolor (oldc);
}

```

```

void g_cls(void)

```

```

{
    cleardevice();
}

```

```

void g_line(int x1,int y1,int x2,int y2,int col,int linestyle,int thickness,word pat)

```

```

{
    int oldc,a,b,c;
    struct linesettingstype *oldlineinfo=0;

    oldc=getcolor();

```

เอกสารนี้ **setcolor(col);** วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    getlinesettings(oldlineinfo);
    setlinestyle(linestyle,pat,thickness);
    line(x1,y1,x2,y2);
    setlinestyle((*oldlineinfo).linestyle,(*oldlineinfo).upattern,(*oldlineinfo).thickness);
    setcolor(oldc);
}

```

```

void w_view(x1, y1, x2, y2)

```

```

double x1, y1, x2, y2;

```

```

{
    w_vx1 = (int)x1;
    w_vy1 = (int)y1;
    w_vx2 = (int)x2;
    w_vy2 = (int)y2;
}

```

```

void w_axiss(x1, y1, x2, y2)

```

```

double x1, y1, x2, y2;

```

```

{
    int i1, i2, i3, i4;

    i2 = 5;

    g_line(w_vx1, w_vy2, w_vx1, w_vy1, 9, 0, 0, w_pat);

    i1 = (int)((w_vy2+w_vy1)/2);
    g_line(w_vx1, i1, w_vx2, i1, 9, 0, 0, w_pat);

    i3 = w_vx1+i2;
    g_line(w_vx1, w_vy1, i3, w_vy1, 9, 0, 0, w_pat);
    g_line(w_vx1, w_vy2, i3, w_vy2, 9, 0, 0, w_pat);
}

```

```

i4 = (int)((i1+w_vy1)/2);
g_line(w_vx1, i4, i3, i4, 9, 0, 0, w_pat);

i4 = (int)((i1+w_vy2)/2);
g_line(w_vx1, i4, i3, i4, 9, 0, 0, w_pat);

i4 = (int)((w_vx2+w_vx1)/2);
g_line(i4, i1+3, i4, i1-3, 9, 0, 0, w_pat);

g_line(w_vx2, i1+3, w_vx2, i1-3, 9, 0, 0, w_pat);

g_print(i4-10, i1+10, " 4.0");

g_view(0, 0, 639, 399, -1, -1);
g_print(w_vx2-14, i1+10, " 8.0");
g_print((int)((i4+w_vx2)/2)-45, i1+25, " t [s] ");

g_view(w_vx1, w_vy1, w_vx2, w_vy2, -1, -1);

w_sx = x1;
w_sy = y1;

w_dx = (x2 - x1) / (w_vx2 - w_vx1);
w_dy = (y2 - y1) / (w_vy2 - w_vy1);
}

```

```
void w_axis(x1, y1, x2, y2)
```

```
double x1, y1, x2, y2;
```

```
{
```

```
w_sx = x1;
```

```
w_sy = y1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

w_dx = (x2 - x1) / (w_vx2 - w_vx1);
w_dy = (y2 - y1) / (w_vy2 - w_vy1);
}

```

```

void w_attr(col, pat)

```

```

int col;
word pat;
{
w_col = col;
w_pat = pat;
}

```

```

void w_line(x, y, flag)

```

```

double x, y;
int flag;
{
int ix, iy;
static int prex = 0;
static int prey = 0;

ix = (int)(w_vx1 + (x - w_sx) / w_dx);
iy = (int)(w_vy1 + (y - w_sy) / w_dy);

if (flag) g_line(prex, prey, ix, iy, w_col, 0, 1, w_pat);

prex = ix;
prey = iy;
}

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและวิทยาศาสตร์ กระทรวงศึกษาธิการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double xxx, yyy;
int flag ,no;
{
    int ix, iy;
    static int prex[15];
    static int prey[15];

    ix = (int)(w_vx1 + (xxx - w_sx) / w_dx);
    iy = (int)(w_vy1 + (yyy - w_sy) / w_dy);

    if (flag) g_line(prex[no], prey[no], ix, iy, w_col, 0, 1, w_pat);

    prex[no] = ix;
    prey[no] = iy;
}

void t_cls(void)
{
    clrscr();
}

void g_screen(int x1,int x2,int x3,int x4)
{
    int screen_x,screen_y;
    screen_x= getmaxx();
    screen_y= getmaxy();
    if (!((screen_x>=600) && (screen_y>=400)))
        {
            outtextxy(10,10,"Can not use with this monitor");
            cxlt(0);
        }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
setcolor(x1);  
setbkcolor(x2);  
settextstyle(x3,x3,x4);  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณบุคคลที่มีนามข้างล่างนี้ไว้เป็นอย่างสูง เพราะท่านผู้ที่ถูกกล่าวชื่อนามเหล่านี้เป็นผู้ที่ช่วยให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

1. ผศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
2. อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
3. คุณธีรวัฒน์ วงศ์วัฒน์ ให้ยืมคอมพิวเตอร์พิมพ์งานและที่ปรึกษาโปรแกรม
4. คุณอดิพร อุ่นชู ให้ยืมคอมพิวเตอร์พิมพ์งาน
5. คุณเทอดพงศ์ สมภักดี ให้ยืมคอมพิวเตอร์พิมพ์งาน
6. คุณฐาปนี ศรีช่วง ให้ยืมคอมพิวเตอร์พิมพ์งาน
7. คุณแสงดาว คณิตปัญญาเจริญ ช่วยพิมพ์งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Borland International, Inc , " Turbo C User's Guide Reference Guide Additions & Enhancements " , IBM Version , California , USA , 1987.
- [2] Carson W. Taylor , " Power System Voltage Stability " , McGraw-Hill, Inc , USA , 1994.
- [3] M.A. Iskanda , M. Satoh , Y. Ohmori , S. Matoba , T. Okabe , Y. Mizutani , " On Fuzzy Control Based Static Var Power System Stability Control , IEEE Trans , pp.201-205 , 19-22 April 1993.
- [4] M.A. Skandar , A. Suzuki , M. Ishizeki , Y. Mizutani , " On Combination Of ΔP -Type PSS and $\Delta\omega$ -Type Fuzzy Control for Power System Stabilizer " , IEE Trans Japan , Vol. 112-3 , No.9 , pp.840-841 , 1992.
- [5] M. Satoh , M.A. Iskandar , S. Matoba , T. Okabe , Y. Mizutani , " Application of Fuzzy Control to SVC " , IEE Japan Power Engineering Technical Report, PE-92-087, pp. 65-74 , October 1992.
- [6] William D. Stevenson, Jr. , " Elements Of Power System Analysis " , McGRAW-HILL Book Company , USA , 1982.
- [7] ชนิดา รอดอินทร์ และ เนตรทราย สุตสัมฤทธิ์ , " ระบบกำลังไฟฟ้า " , สำนักพิมพ์ฟิลิกส์เซ็นเตอร์ , กรุงเทพฯ , 2539.
- [8] ถิ่นวา ศรีประโม่ง , " การเขียนโปรแกรมภาษาซีสำหรับวิศวกรรม " , โครงการตำราวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , กรุงเทพฯ , 2538.
- [9] บุญเลิศ เขี่ยมทัศนาศ , ยืน ภู่วรรณ และสมนึก ศิริโต , " โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาษาซี " , บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด , กรุงเทพฯ , 2521.
- [10] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล , " ระบบไฟฟ้ากำลัง " , เล่ม 1 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537.
- [11] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล , " ระบบไฟฟ้ากำลัง " , เล่ม 2 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537.
- [12] สมพัฒน์ รุ่งตะวันเรืองศรี , " เรียนรู้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ 2 มิติ ด้วยภาษา C " , บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด , กรุงเทพฯ , 2521.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้