

การกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ
ผลกระทบจากการใช้งานที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง



นายวิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

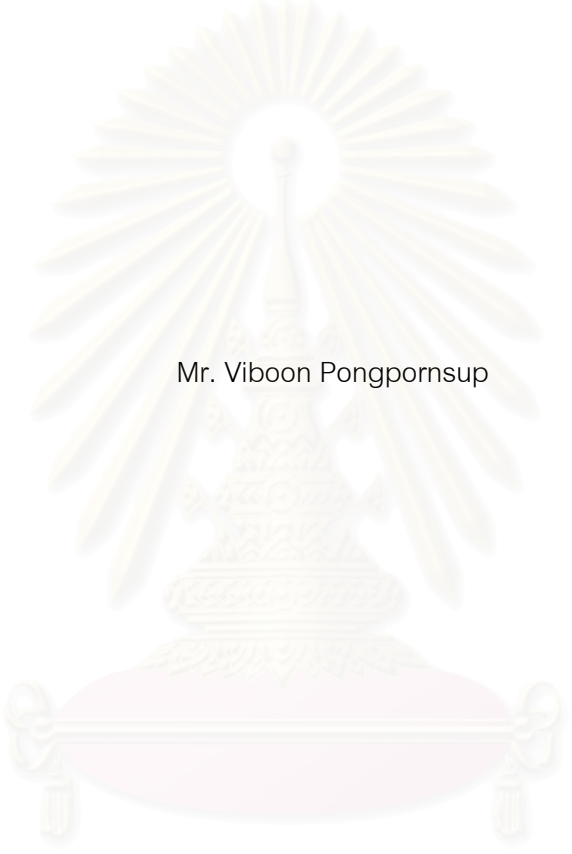
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-304-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS AND UTILIZATION IMPACTS ON
DISTRIBUTION SYSTEMS



Mr. Viboon Pongpornsup

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-347-304-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและผลกระทบจากการใช้งานที่มี
ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง
โดย นายวิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ไชยะ แซ่ม้อย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ
(ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(นายประหัด เครื่องประดิษฐ์)

วิทยุ พงศ์พรทรัพย์ : การกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและผลกระทบจากการใช้งานที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง (SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS AND UTILIZATION IMPACTS ON DISTRIBUTION SYSTEMS)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, 130 หน้า. ISBN 974-347-304-1

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการวิเคราะห์การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง รวมถึงผลกระทบของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยแบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในสถานะอยู่ตัว ในการศึกษาผลตอบในสถานะกระตุ้นตัวเอง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุ โหลด และความเร็วโรเตอร์ ในการศึกษาจะใช้การกำหนดเงื่อนไขให้กับสถานะกระตุ้นตัวเอง จากนั้นจึงทำการแก้สมการที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาคำตอบที่เป็นจุดทำงานในสถานะที่กำหนดขึ้นโดยวิธี นิวตัน-ราฟสัน แนวคิดที่นำเสนอได้นำมาใช้ทดสอบกับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ ขนาด 0.37 kW ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่จากผลการศึกษา พบว่าการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปใช้งานในสถานะกระตุ้นตัวเองนั้นมีความยุ่งยากและจำเป็นต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์ควบคุมต่างๆเพื่อควบคุมจุดทำงาน สำหรับในตอนท้ายของวิทยานิพนธ์ได้ทำการวิเคราะห์ถึงผลการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังและเปรียบเทียบผลกับกรณีที่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อแก้ไขปัญหาเพาเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ทำการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวนมากเข้ากับระบบ แรงดันในระบบจะตกมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้กำลังสูญเสียในระบบมากขึ้นอีกด้วย แต่เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วจะช่วยให้ระดับแรงดันของระบบดีขึ้นส่วนกำลังสูญเสียในระบบก็จะลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา _____ 2543 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4270541021: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: SELF-EXCITED / INDUCTION GENERATORS / CAPACITOR
REQUIREMENT / IMPACT ON DISTRIBUTION SYSTEMS
VIBOON PONGPORN SUP : SELF-EXCITED INDUCTION
GENERATORS AND UTILIZATION IMPACTS ON
DISTRIBUTION SYSTEMS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.
BUNDHIT EUA-ARPORN, Ph.D. 130 pp. ISBN 974-347-304-1

This thesis presents a self-excited induction generator analysis based on steady-state model, and the impact of utilizing an induction generator to electrical distribution systems. The study reveals that the process of self-excitation depends on the sizes of on-line capacitors, loads, and the rotor speed. The Newton-Raphson method is used to solve the non-linear representation of the machine equation. Numerical experiments based on the steady state model have been carried out with a 0.37 kW machine, and satisfactory results are obtained. However, in practice it is very difficult to use self-excited induction generators, since it requires several controllers to get a satisfied operating point. In the last section of this thesis, the impact from connecting an induction generator to a distribution grid has been analyzed. It is found that in some cases, e.g. several induction generators connected to the grid, the system losses and voltage drop will be increased. However, an appropriate size of parallel capacitors can be used to improve system voltage profiles and decrease the power losses.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department _____ Electrical Engineering _____

Student's signature _____

Field of study _____ Electrical Engineering _____

Advisor's signature _____

Academic year _____ 2000 _____

Co-advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการทำ วิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นที่เรียบร้อย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์ วาณิชย์ อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย และ คุณประหยัด เครื่องประดิษฐ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้ คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และผู้วิจัยขอขอบคุณสมาชิกของ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบพลังงานทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดระยะเวลาทำการ วิจัย รวมทั้งขอขอบคุณ เพื่อนๆ และญาติพี่น้องทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จในครั้งนี้ด้วย

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ โครงการทุนบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ(Nepo) รวมถึง เอส พี เอ็ม ฟาร์ม ที่สนับสนุนข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการศึกษา และให้กำลังใจแก่ ผู้วิจัยเสมอมาตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จการศึกษาด้วยดี

วิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำทั่วไป.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	6
2.1 การทำงานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ.....	6
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	8
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	10
2.3.1 การเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	10
2.3.2 ข้อจำกัดและปัญหาในการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	13
3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	15
3.1 ส่วนประกอบสมมาตร.....	15
3.2 แบบจำลองเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ.....	16
3.2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในระบบ 3 เฟส.....	16
3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบนแกนสเตเตอร์และแกนโรเตอร์.....	18

สารบัญ

บทที่	หน้า
3.2.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในระบบส่วนประกอบสมมาตร.....	19
3.2.4 แบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในสถานะอยู่ตัว.....	20
3.3 ส่วนประกอบสมมาตรของโหลด.....	22
3.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	23
3.5 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะโหลดสมดุล.....	24
3.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและรีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็ก.....	27
4 การศึกษาผลตอบในสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	30
4.1 การแก้สมการด้วยนิวตัน-ราฟสัน.....	30
4.2 การทดสอบสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	33
4.2.1 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
4.2.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมช่องอากาศและค่ารีแอกแตนซ์.....	33
4.2.3 การทดสอบสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	36
4.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง.....	37
4.2.5 ปัญหาจากการทดลองและวิธีแก้ไข.....	41
4.3 การกำหนดตัวแปรในสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	42
4.4 ปัจจัยในการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	44
4.4.1 วิธีการศึกษา.....	44
4.4.2 ผลการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	45
4.4.3 ขนาดโหลดกับผลการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	48
4.4.4 ความเร็วโรเตอร์กับผลการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง.....	49
4.5 สถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่.....	51
4.5.1 วิธีการศึกษา.....	51
4.5.2 ผลของการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่.....	54
4.5.3 ค่าตัวประกอบกำลังกับการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง เมื่อควบคุมแรงดันคงที่.....	55

สารบัญ

บทที่		หน้า
	4.5.4 ความเร็วโรเตอร์กับการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง เมื่อควบคุมแรงดันคงที่.....	57
4.6	การหาจุดทำงานที่เหมาะสมในสภาวะกระตุ้นตัวเอง.....	58
	4.6.1 วิธีการศึกษา.....	58
	4.6.2 ผลการวิเคราะห์จุดทำงานที่เหมาะสม.....	59
5	การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในปัจจุบัน.....	63
	5.1 ข้อมูลการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	63
	5.2 การประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง.....	68
	5.3 ข้อเสนอแนะ.....	70
6	การวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง.....	71
	6.1 แรงดันตกและกำลังสูญเสีย.....	71
	6.2 เอชไอโวลต์โพลาร์.....	73
	6.2.1 การกำหนดชนิดของบัส.....	74
	6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันบัส.....	74
	6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงดัน.....	75
	6.2.4 การหาค่าลิ่งที่ไหลในสายส่งและกำลังสูญเสีย.....	78
	6.3 การคำนวณ โวลต์โพลาร์เมื่อมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	81
	6.4 ตัวอย่างการหาจุดทำงานและกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย.....	81
	6.5 การปรับปรุงระบบจากผลกระทบที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	83
	6.6 การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์.....	84
7	ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง.....	85
	7.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา.....	85
	7.2 การศึกษาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงอยู่.....	85

สารบัญ

บทที่	หน้า
7.2.1 ผลกระทบของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	86
7.2.2 ผลการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการ เชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	93
7.3 การศึกษาผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง.....	98
7.3.1 ผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง.....	98
7.3.2 ผลการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการ ติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	105
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	110
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลระบบทดสอบ.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	130

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	9
4.1	ค่าแรงดันและกระแสสำหรับคำนวณหาความสัมพันธ์ของ (V_g / F) และ X_m	34
4.2	ผลของแรงดันในการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ.....	38
4.3	ผลของความถี่ในการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ	39
4.4	จุดทำงานที่เหมาะสมจากการคำนวณที่เงื่อนไขต่างๆ.....	59
4.5	จุดทำงานที่ได้จากการทดลองสถานะกระตุ้นตัวเองในเงื่อนไขต่างๆ.....	62
5.1	จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	63
6.1	ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	82
7.1	ระบบตัวอย่างในการศึกษาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	85
7.2	ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	87
7.3	ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	88
7.4	ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	89
7.5	ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	90
7.6	มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1.....	94
7.7	มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2.....	95
7.8	มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3.....	96
7.9	มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4.....	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.10 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	99
7.11 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	100
7.12 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	101
7.13 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	102
7.14 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 1.....	106
7.15 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 2.....	107
7.16 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 3.....	108
7.17 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 4.....	109
ก.1 ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของสายส่ง.....	114
ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังระบบที่ 1.....	117
ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังระบบที่ 2.....	119
ก.4 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 1.....	121
ก.5 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 2.....	123
ก.6 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 3.....	125
ก.7 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 4.....	127
ก.8 ราคาตัวเก็บประจุ.....	129

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำตามค่าสลิปต่างๆ	7
2.2 การถ่ายเทพลังงานของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	8
2.3 การถ่ายเทพลังงานในสภาวะกระตุ้นตัวเอง	10
2.4 การต่อตัวเก็บประจุให้กับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง	11
2.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลและตัวเก็บประจุ	12
2.6 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง	12
3.1 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส	17
3.2 แบบจำลองเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส	17
3.3 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในลำดับบวก	20
3.4 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในลำดับลบ	21
3.5 วงจรสมมูลของโหลดสามเฟส	22
3.6 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง	25
3.7 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสภาวะกระตุ้นตัวเองแบบลดรูปความถี่	25
3.8 วงจรสมมูลในสภาวะที่ความถี่มีค่าเท่ากับความเร็วโรเตอร์	28
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{V_g}{F}$ และ X_m	29
4.1 ขั้นตอนการแก้สมการด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน	32
4.2 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_g และ X_m	33
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง X_m กับ $\frac{V_g}{F}$ จากการทดลอง	35
4.4 วงจรที่ใช้ในการทดลองสภาวะกระตุ้นตัวเอง	36
4.5 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเทียบกับผลการคำนวณ	40
4.6 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะกระตุ้นตัวเอง	43
4.7 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ขนาดตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ	45
4.8 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่โหลดค่าต่างๆ	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ความเร็วโรเตอร์ค่าต่างๆ	50
4.10 ขั้นตอนการศึกษาผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเมื่อแรงดันคงที่	53
4.11 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่	54
4.12 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่โหลดและค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ เมื่อควบคุมแรงดันคงที่	56
4.13 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ความเร็วโรเตอร์ต่างๆ เมื่อควบคุมแรงดันคงที่	57
4.14 ขั้นตอนในการหาจุดทำงานที่เหมาะสมในการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง	60
4.15 จุดทำงานที่เหมาะสมในสภาวะไร้โหลด	61
4.16 จุดทำงานที่เหมาะสมในขณะจ่ายโหลด $pf=1$ ด้วยกระแสพิกัด	61
4.17 จุดทำงานที่เหมาะสมในขณะจ่ายโหลด $pf=0.8$ ด้วยกระแสพิกัด	61
5.1 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	64
5.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	64
5.3 ชุดเครื่องยंत्रขับเคลื่อนและมอเตอร์เหนี่ยวนำ	65
5.4 แผงควบคุมการทำงาน	65
5.5 บ่อหมักมูลสัตว์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ	66
5.6 แผนภาพของการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ เชื่อมโยงกับระบบการไฟฟ้า	67
5.7 แผนภาพของการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัว	69
6.1 ระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่	71
6.2 วงจรสมมูลสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส	78
6.3 ขั้นตอนการคำนวณโหลดโพล์ด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน	80
6.4 แผนภาพเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย	81
6.5 ผลการคำนวณโหลดโพล์เมื่อเทียบตามจำนวนกำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตได้	91

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้าเทียบตามจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เชื่อมโยงในระบบ.....	91
7.2 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้าเทียบตามสัดส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เชื่อมโยงในระบบ.....	92
7.3 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุ เทียบตามจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงในระบบ.....	98
7.4 ผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุ เทียบตามสัดส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงในระบบ.....	103
7.5 เปรียบเทียบผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	104
7.6 เปรียบเทียบผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	104
7.7 เปรียบเทียบผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	104
7.8 เปรียบเทียบผลโหลดโพล์ว้ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ.....	105
ก.1 แผนภาพเส้นเคี้ยวของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1.....	115
ก.2 แผนภาพเส้นเคี้ยวของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน พลังงานเชิงพาณิชย์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นน้ำมัน ถ่านหิน ฯลฯ มีราคาแพงและมีแนวโน้มที่จะคลาดเคลื่อนในอนาคต ในหลายๆ ประเทศจึงเริ่มมีความสนใจในการนำพลังงานรูปอื่น ๆ มาใช้ทดแทนเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อน พลังงานจากวัสดุเหลือใช้ในการเกษตร เป็นต้น พลังงานเหล่านี้ บางอย่างเป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ ไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายใดๆ บางอย่างเป็นการนำสิ่งที่ไม่ต้องการหรือของเหลือใช้ กลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น พลังงานอีกรูปหนึ่ง que เริ่มมีการสนับสนุนให้นำมาใช้กันมากก็คือ ก๊าซชีวภาพ(Biogas) ซึ่งเป็นพลังงานที่สามารถผลิตได้จากการหมักมูลสัตว์ต่างๆ

ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม มีฟาร์มเลี้ยงสัตว์อยู่มากมายตามที่แตกต่างกัน ซึ่งตามปกติมักจะมีการปลดปล่อยของเสียและน้ำเสียออกจากฟาร์มลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ก่อให้เกิดเป็นมลภาวะและปัญหาต่อชุมชน ทางภาครัฐได้พยายามเข้ามาแก้ไขปัญหานี้ โดยได้ริเริ่มโครงการระบบก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เพื่อนำมูลสัตว์และน้ำเสียดังกล่าวมาใช้ประโยชน์โดยการใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ ซึ่งนอกจากเจ้าของฟาร์มไม่ต้องจ่ายค่าพลังงานในการบำบัดน้ำเสียแล้วยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพ ที่สามารถนำไปใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ กากที่เหลือจากการหมักก็สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์อีกด้วย

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าฟาร์มเลี้ยงสุกรมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงและมี ความคุ้มค่ากว่าฟาร์มเลี้ยงสัตว์ประเภทอื่นๆ เช่น ฟาร์มเลี้ยงไก่ วัว หรือช้าง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสุกรเป็นสัตว์ที่ถ่ายมูลออกมามาก อีกทั้งการเลี้ยงก็สามารถดำเนินการได้ในพื้นที่จำกัดทำให้สามารถรวบรวมมูลสุกรได้สะดวก แต่ความต้องการในการใช้งานก๊าซชีวภาพนั้นยังมีน้อย จึงเหลือปริมาณก๊าซที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์อยู่ค่อนข้างสูง ทางภาครัฐจึงได้หาวิธีที่จะนำก๊าซชีวภาพที่เหลือเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ วิธีหนึ่งที่ได้มีการสนับสนุนก็คือ การผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในฟาร์ม โดยหลักการจะคล้ายกับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไป แต่จะเปลี่ยนมาใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงแทน นอกจากนี้ หากสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากเกินความต้องการ ก็สามารถขายกลับเข้าสู่ระบบ (เพราะในปัจจุบันมี

การเติบโตทางด้านการผลิตไฟฟ้าในระบบจำหน่ายซึ่งเปิดโอกาสให้กับผู้ผลิตรายเล็กสามารถผลิตไฟฟ้าขายให้กับระบบได้) ก่อให้เกิดรายได้อีกทางหนึ่ง

โดยทั่วไปในการผลิตไฟฟ้า เราจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเพราะมีประสิทธิภาพดี แต่เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายก่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในภาคเกษตรกรรม ดังนั้นเราจึงเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีราคาถูก แข็งแรง ทนทาน ระบบการทำงานและการควบคุมไม่ยุ่งยาก อีกทั้งยังง่ายต่อการบำรุงรักษา เหมาะกับการนำไปใช้ในภาคเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็มีข้อเสียที่สำคัญคือ ต้องเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าในขณะที่ทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เพียงกำลังจริง(Real Power)เท่านั้น ส่วนกำลังเสมือน(Reactive Power) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้สร้างสนามแม่เหล็กนั้นยังต้องอาศัยจากระบบไฟฟ้าที่เชื่อมอยู่ จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถทำงานในสภาวะแยกโดดได้ ดังนั้นหากเกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบไม่ว่าในกรณีใดๆ ที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกแยกออกจากระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็ไม่สามารถทำงานได้

อย่างไรก็ตามเราสามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้โดยไม่ต้องพึ่งพากำลังเสมือนจากระบบไฟฟ้า โดยทำการติดตั้งเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเสมือนกับการจ่ายกำลังเสมือนทดแทนที่ได้รับจากระบบไฟฟ้านั่นเอง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะสามารถทำงานได้ เราเรียกสภาวะดังกล่าวว่า สภาวะกระตุ้นตัวเอง(Self-excited) แต่นอกจากการติดตั้งเก็บประจุให้กับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำแล้ว ยังจำเป็นต้องเลือกขนาดโหลดและควบคุมความเร็ว โรเตอร์ให้เหมาะสม จึงจะสามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตไปใช้งานได้ ซึ่งทำให้การทำงานในสภาวะกระตุ้นตัวเองยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น

ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้แล้ว โดยเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังและอาศัยกำลังรีแอกทีฟจากระบบในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งผลกระทบอย่างหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดเจนก็คือ ระบบไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟมากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อถึงระดับแรงดันที่ลดลง และเกิดกำลังสูญเสียในสายส่งมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อระบบเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมโยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาก็คือ การลดกำลังรีแอกทีฟที่จะต้องดึงจากระบบ ซึ่งสามารถทำได้โดยการติดตั้งเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นการติดตั้งเก็บประจุจะมีประโยชน์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งในสภาวะกระตุ้นตัวเองและในสภาวะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ

ดังนั้นเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะทำการศึกษาการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้มีประโยชน์สูงสุด ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือการศึกษางานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะ

กระตุ้นตัวเองรวมถึงวิธีการและปัจจัยในการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ใน ส่วนที่ 2 จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังและแนวทางแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการทำงานของเครื่องจักรกลแบบเหนี่ยวนำเพื่อนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. ศึกษาผลของการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มาใช้งานในสถานะกระตุ้นตัวเอง(Self-excited)
3. ศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังในด้านต่างๆ เช่น กำลังสูญเสีย และ ระดับแรงดัน เป็นต้น

1.3 ขั้นตอนและการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ
2. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะการกระตุ้นตัวเอง
3. พัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าและจำลองระบบเพื่อดูผลตอบที่ได้
4. นำค่าที่ได้ไปทดลองกับระบบจริง
5. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง
6. ศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้า
7. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย เรียบเรียงผลงานวิจัย พิมพ์ผลงานและจัดเข้ารูปเล่มเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย

1. ใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะอยู่ตัวตามที่ได้นำเสนอไว้
2. พิจารณาระบบและเครื่องจักรกลโดยไม่คิดผลของอุปกรณ์ป้องกันใดๆ
3. สมมุติให้ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในสถานะอยู่ตัว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ และในสถานะกระตุ้นตัวเอง
2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเกิดสภาวะการกระตุ้นตัวเอง และการคำนวณหาขนาด ตัวเก็บประจุ ที่เหมาะสม
3. วิเคราะห์และประเมินผลกระทบของระบบจากการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้ากำลัง

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยแบ่งเนื้อหาเป็น 2 ส่วน ด้วยกันคือ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง ในส่วนที่สอง จะเป็นการศึกษาผลกระทบจากการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบและแนวทางแก้ไข ซึ่งจะแบ่งเป็นบทต่างๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ และสถานะกระตุ้นตัวเองรวมถึงข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดขึ้น

บทที่ 3 กล่าวถึงการศึกษาแบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ และนำมาสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษาและผลของสภาวะกระตุ้นตัวเองในเงื่อนไขต่างๆ จากแบบจำลองที่ได้ รวมถึงการหาจุดทำงานที่เหมาะสมในสถานะกระตุ้นตัวเอง โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 0.37 kW ในการอ้างอิงและทดสอบผล ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 5 กล่าวถึงการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในปัจจุบัน ปัญหาในการใช้งานและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานในสถานะกระตุ้นตัวเอง

บทที่ 6 ศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมโยง รวมถึงวิธีการวิเคราะห์ผลที่เกิด

บทที่ 7 ผลการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบกับกรณีที่เพิ่มตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมถึงการวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้น

บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ เป็นเครื่องจักรที่ใช้แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า มีใช้กันมากมายในโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับทำงานเป็นมอเตอร์ เนื่องจากจากราคาไม่สูงและมีความเชื่อถือได้ดี ในต่างประเทศมีการนำไปใช้งานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบ้างแต่ไม่มากนัก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังลม เนื่องจากข้อจำกัดและปัญหาต่างๆ

ในขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งแบบที่เชื่อมโยงกับระบบและสภาวะกระตุ้นตัวเอง รวมถึง ข้อดี ข้อเสีย ปัญหาและข้อจำกัดของการใช้งาน เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสามารถนำไปวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะได้กล่าวไว้ในบทถัดไป

2.1 การทำงานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ[1]

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับค่าผลต่างระหว่างความถี่ทางไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ซึ่งเรียกว่าสลลิป (Slip) ซึ่งเราสามารถแบ่งการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ออกได้เป็น 3 ช่วงตามค่าของสลลิป คือ

1.Motor (สลลิป เป็น 0 ถึง 1)

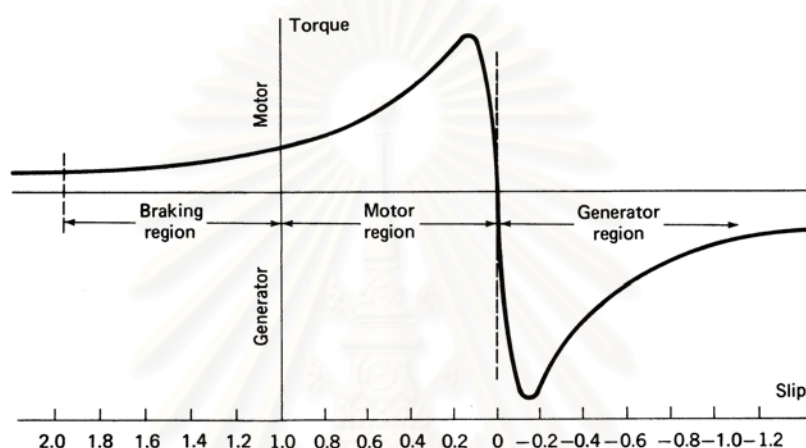
ในช่วงนี้เป็นการรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจากภายนอกและแปรผันไปเป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อน เป็นสภาวะที่นำไปใช้ในงานต่างๆ เมื่อทำการจ่ายไฟให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น โรเตอร์จะถูกเหนี่ยวนำให้หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก โดยมีความเร็วที่ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กหมุนเล็กน้อย

2.Breaking (สลลิป มากกว่า 1)

เป็นการให้พลังงานไฟฟ้าและเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน สามารถนำไปใช้ในการหยุดมอเตอร์อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เครื่องจักรกลทำงานเป็นมอเตอร์ เมื่อทำการสลับลำดับของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จะทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงข้ามซึ่งทำให้มอเตอร์หยุดทันที แต่ต้องรีเซ็ตไฟฟ้าทิ้งเพื่อไม่ให้มอเตอร์หมุนในทิศทางใหม่

3. Generator (Slip เป็น ลบ)

เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งหมุนโรเตอร์ ให้มีทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กและมีความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะจ่ายกำลังออกมา เสมือนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเองก็ยังคงต้องรับกำลังรีแอกทีฟจากแหล่งจ่ายอยู่ตลอดเวลาเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก



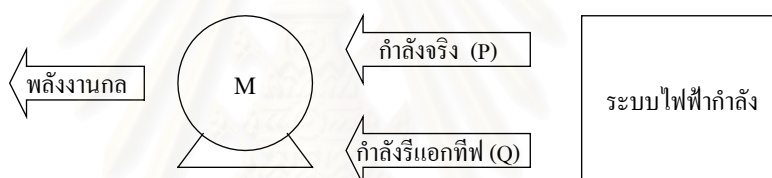
รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำตามค่าสลิปต่างๆ

จะเห็นได้ว่า เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นเราจึงสามารถนำมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่ทั่วๆ ไปมาทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้[2] โดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์ใดๆ เพียงแต่หาเครื่องยนต์ต้นกำลังมาหมุนโรเตอร์ให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ก็จะได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไว้ใช้งาน

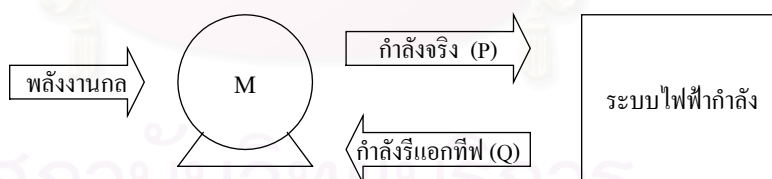
แต่การนำเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำมาใช้งานอาจมีปัญหาบ้าง เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว มอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกออกแบบให้มีความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส แต่เมื่อนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะต้องหมุนที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่าที่ออกแบบให้ใช้งานจริง ซึ่งจะทำให้อายุการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ต่ำลง ส่งผลให้เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำชำรุดเร็วขึ้น ดังนั้นในการเลือกมอเตอร์ที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงควรพิจารณาถึงพิกัดที่ของเครื่องจักรที่ออกแบบไว้ด้วย

2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้ากำลัง

ในสถานะที่เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้า จะทำงานเป็นมอเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส รับกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าและจ่ายกำลังกลออกไป ดังรูปที่ 2.2(ก) แต่ถ้าเราทำการจับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำด้วยด้วยเครื่องยนต์ต้นกำลัง ให้มีความเร็วที่สูงกว่าซิงโครนัส โดยที่เครื่องจักรกลยังเชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า สลิปจะมีค่าเป็นค่าลบ ทำให้เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเปลี่ยนการทำงานจากมอเตอร์กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกให้แก่ระบบ แต่ยังคงรับกำลังเสมือนจากระบบอยู่ ดังรูปที่ 2.2(ข) โดยที่ระดับแรงดันและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับกับค่าแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการควบคุมระดับแรงดันและความถี่ อีกทั้งยังสะดวกในการดูแลบำรุงรักษา



ก) สถานะมอเตอร์



ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 2.2 การถ่ายเทพลังงานในสถานะมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าการทำงานจะไม่ยุ่งยากซับซ้อนเมื่อเทียบกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนอุปกรณ์และการบำรุงรักษา ซึ่งทำให้เป็นข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อทำการเปรียบเทียบการทำงาน

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะได้ผลตามแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1[3-8]

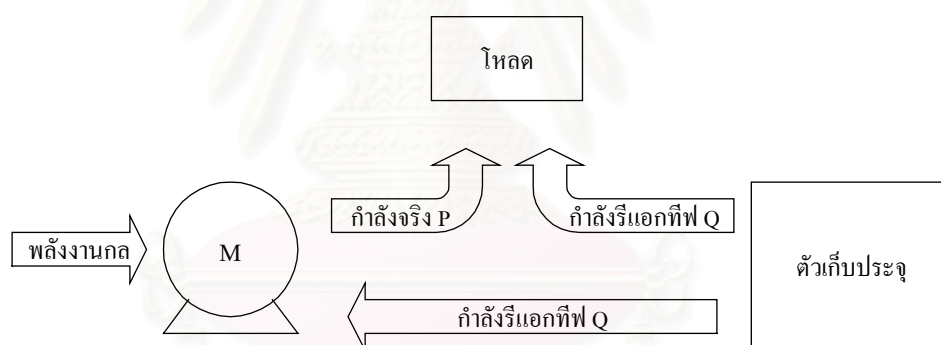
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
<ol style="list-style-type: none"> 1. ทำงานที่ความเร็วมากกว่าซิงโครนัส ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วโรเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง 2. กำลังผลิตแปรตามค่าสลิป 3. รับกำลังรีแอกทีฟจากระบบเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้ไม่สามารถทำงานได้เมื่อระบบเกิดเหตุผิดปกติ 4. ประสิทธิภาพต่ำกว่า 5. โครงสร้างโรเตอร์ไม่ยุ่งยาก แข็งแรงทนทาน เนื่องจากเป็น Brush-less rotor 6. ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมความถี่และแรงดันเนื่องจากถูกควบคุมด้วยระบบที่เชื่อมโยงอยู่ 7. เริ่มเดินเครื่องด้วยสภาวะมอเตอร์ซึ่งเชื่อมกับระบบอยู่แล้วและเพิ่มความเร็วโรเตอร์จนเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 8. ราคาถูก ออกแบบติดตั้งง่าย เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการควบคุมการทำงาน 9. การบำรุงรักษาง่าย ไม่ยุ่งยาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ทำงานที่ความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น จึงต้องมีตัวควบคุมความเร็วที่แม่นยำในการควบคุมความเร็วโรเตอร์ 2. กำลังผลิตแปรตาม power angle 3. ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่โรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถทำงานได้ด้วยตนเอง ถึงแม้ว่าระบบจะเกิดเหตุผิดปกติขึ้น 4. ประสิทธิภาพสูงกว่า 5. โครงสร้างโรเตอร์ยุ่งยากเพราะต้องมีส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก 6. ต้องมี Governor และ Exciter ในการควบคุมความถี่และแรงดัน 7. เริ่มเดินเครื่องในสภาวะที่ไม่ได้ต่อกับระบบ หากต้องการเชื่อมโยงเข้ากับระบบจะต้องทำการตรวจสอบ แรงดัน ลำดับเฟส ความถี่ ที่สร้างได้ว่าตรงกับของระบบหรือไม่ 8. ราคาแพง การออกแบบติดตั้งยุ่งยาก เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์หลายอย่างในการควบคุมการทำงาน 9. การใช้งาน และการบำรุงรักษายุ่งยาก ทำให้ค่าใช้จ่ายสูง

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อเชื่อมโยงกับระบบและดึงกำลังรีแอกทีฟจากระบบ ทำให้ระบบต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไม่มากนักน้อยอีกทั้งหากระบบเกิดสถานะผิดปกติขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งหากเราสามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องเชื่อมโยงกับระบบ ไฟฟ้าก็จะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

จากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นหากเราทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ(ดังรูปที่ 2.3) ซึ่งสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแทนระบบไฟฟ้ากำลังได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะสามารถทำงานได้ โดยที่ไม่ต้องเชื่อมโยงกับระบบ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าสถานะกระตุ้นตัวเอง (Self-excited)

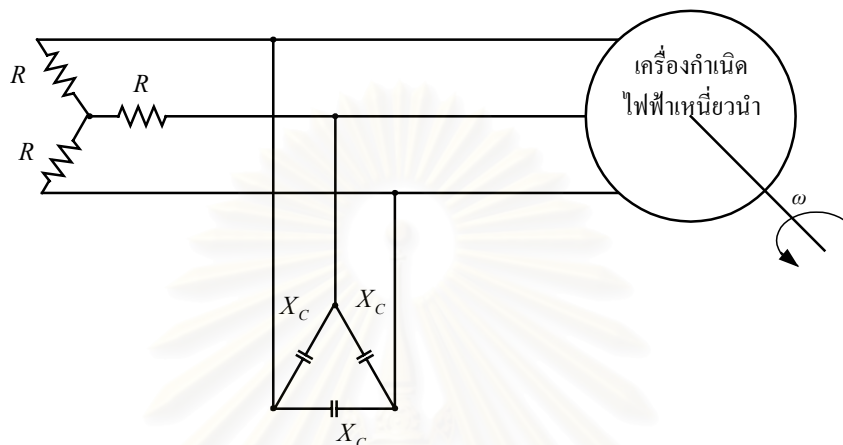


รูปที่ 2.3 การถ่ายเทพลังงานในสถานะกระตุ้นตัวเอง

2.3.1 การเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง[9-10]

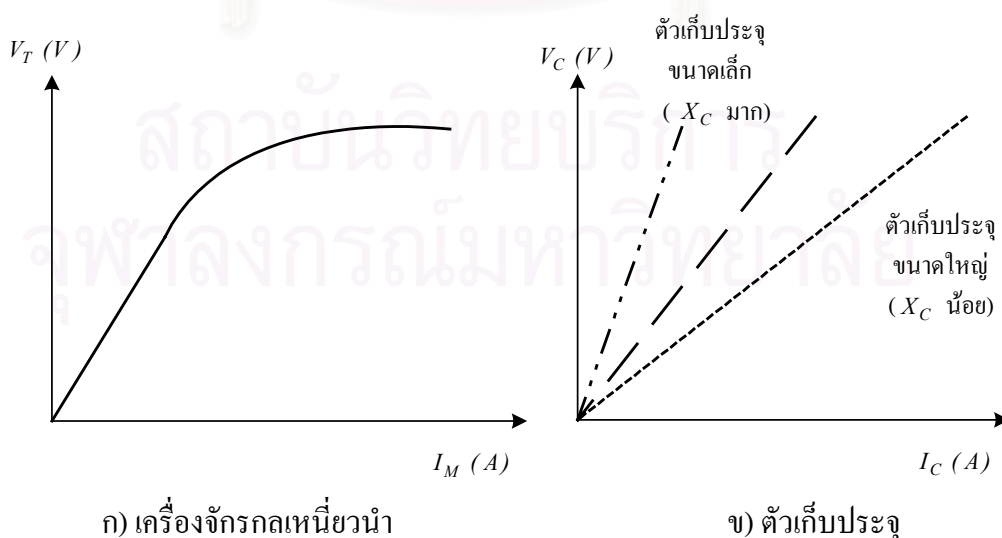
ในขณะที่หมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยไม่ได้ให้แรงดันทางฝั่งสเตเตอร์จากแหล่งจ่ายภายนอก จะพบว่า มีแรงดันเกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ ขนาดประมาณ 1-2% ของแรงดันพิกัด ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีสนามแม่เหล็กตกค้าง(Residual Flux)อยู่ในแกนโรเตอร์ อีกทั้งแรงดันที่ได้นี้ จะมีความถี่เท่ากับความถี่ซิงโครนัสด้วย ถ้าเราติดตัวเก็บประจุที่ปลายขดลวดสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (โดยจะต่อเป็นแบบเดลตาหรือสตาร์ก็ได้) จะเกิดกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะเหนี่ยวนำ

นำไปเกิดสนามแม่เหล็กแม่เหล็ก ทำให้แรงดันในขดลวดสเตเตอร์สูงขึ้น เมื่อแรงดันในขดลวดสูงขึ้น จะส่งผลต่อเนื่องกลับมาให้กระแสเตเตอร์มีค่ามากขึ้นและเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กแม่เหล็กเพิ่มขึ้น อีก แรงดันและกระแสจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงจุดสมดุล จึงจะเกิดเสถียรภาพในการทำงาน



รูปที่ 2.4 การต่อตัวเก็บประจุให้กับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง

รูปที่ 2.5(ก) แสดงความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ จากกราฟจะเห็นว่าความสัมพันธ์ในช่วงแรกเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งมีระดับแรงดันน้อยแต่เมื่อระดับแรงดันเพิ่มมากขึ้นความสัมพันธ์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ส่วนกราฟความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุจะเป็นความสัมพันธ์ แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 2.5(ข) โดยความชันของกราฟจะขึ้นอยู่กับขนาดตัวเก็บประจุและความถี่ใช้งาน

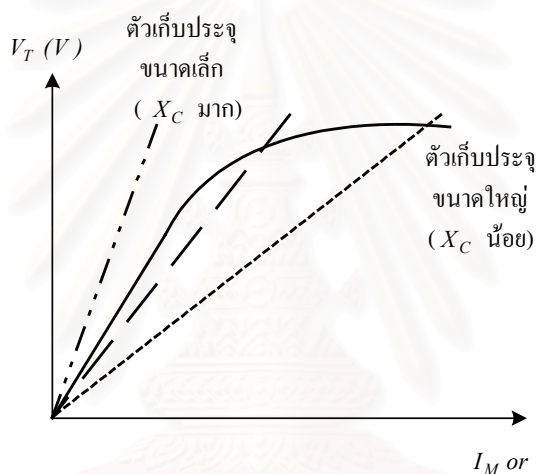


ก) เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ

ข) ตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลและตัวเก็บประจุ

เมื่อนำกราฟทั้งสองมาซ้อนทับกัน จะได้จุดตัดกันของกราฟเป็นจุดสมดุลของแรงดันและกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และยังเป็นจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะกระตุ้นตัวเองด้วย จากรูปจะเห็นได้ว่าจุดตัดกันของความสัมพันธ์จะอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้ ในช่วงที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น(ช่วงที่เกิดการอิมตัวขึ้น)ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ ถ้าตัวเก็บประจุที่ติดให้มีขนาดใหญ่ จะทำให้จุดตัดซึ่งเป็นจุดทำงานนั้นอยู่ที่ระดับแรงดันสูง กระแสมาก แต่ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก จุดทำงานที่ได้ก็จะมีแรงดันต่ำ แล้ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กเกินไป กราฟลักษณะของตัวเก็บประจุจะไม่ตัดกับกราฟลักษณะของเครื่องจักรกล ทำให้ไม่มีจุดทำงาน จึงเห็นได้ว่า ขนาดตัวเก็บประจุนั้น มีผลสำคัญต่อการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองอย่างมาก



รูปที่ 2.6 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง

นอกจากขนาดตัวเก็บประจุจะเป็นตัวกำหนดจุดทำงานแล้ว ความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะมีผลต่อจุดทำงานเช่นกัน ถ้าความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นแบบเชิงเส้นคือไม่เกิดการอิมตัวขึ้นในแกนเหล็ก (เป็นเครื่องจักรในอุดมคติ ซึ่งเป็นข้อสมมุติที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในสถานะมอเตอร์) กราฟความสัมพันธ์ของเครื่องจักรกลและตัวเก็บประจุจะเกิดการทับกันหรือไม่มีจุดตัดกัน ทำให้ไม่มีจุดสมดุลในการทำงาน นั่นก็คือจะไม่สามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเองได้ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะมีความเป็นไม่เชิงเส้นอยู่ในตัวอยู่แล้ว ดังนั้นในการนำแบบจำลองมาใช้วิเคราะห์สภาวะกระตุ้นตัวเอง จึงจำเป็นต้องคิดถึงผลความไม่เป็นเชิงเส้นด้วย

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองก็คือปริมาณสนามแม่เหล็กแม่เหล็กตกค้างในแกนโรเตอร์ ซึ่งโดยปรกติจะมีสนามแม่เหล็กแม่เหล็กตกค้างอยู่แล้ว แต่ถ้าหากไม่มี

สนามแม่เหล็กตกค้างหรือไม่เพียงพอ ก็จะไม่มีความดันเกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ในขณะที่หมุนโรเตอร์ ทำให้ไม่สามารถเกิดกระบวนการเหนี่ยวนำให้เกิดสถานะกระตุ้นตัวเองได้ แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสเตเตอร์เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างขึ้นในแกนโรเตอร์ หรืออีกวิธีหนึ่งก็คือให้แรงดันกับตัวเก็บประจุก่อนนำไปต่อให้กับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กแม่เหล็กขึ้น

สรุปได้ว่ากรณีที่เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้นั้น จะต้องอาศัยปัจจัยต่างๆในการทำงานซึ่งได้แก่ ปริมาณสนามแม่เหล็กแม่เหล็กตกค้างในแกนโรเตอร์ ความไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ และขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

2.3.2 ข้อจำกัดและปัญหาในการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง

ในสถานะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเชื่อมอยู่กับระบบ แรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าของระบบที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมโยงอยู่ ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น มีคุณภาพเช่นเดียวกับไฟฟ้าจากระบบ การทำงานในสถานะที่เชื่อมอยู่กับระบบจึงไม่จำเป็นต้องควบคุมปริมาณเหล่านี้ ดังนั้นจึงสะดวกในการนำไปใช้งาน

แต่ในสถานะกระตุ้นตัวเองจะแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ถึงแม้ว่าเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะสามารถเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองโดยเราทำการการติดตัวเก็บประจุเพิ่มเติมให้ แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น สามารถนำไปจ่ายโหลดได้ เนื่องจากจุดทำงานในสถานะกระตุ้นตัวเองจะขึ้นอยู่กับขนาดตัวเก็บประจุดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ทำให้แรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างขึ้นนั้นมีค่าไม่แน่นอน จะเปลี่ยนไปตามขนาดตัวเก็บประจุที่ติดให้ นอกจากนี้การที่ไม่ได้เชื่อมโยงกับระบบทำให้ ความถี่ที่ได้เป็นความถี่ที่เกิดขึ้นเองโดยจะแปรตามขนาดตัวเก็บประจุและโหลดที่เชื่อมต่อยู่ จึงเป็นปัญหาในการนำไปใช้งาน ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในการวิเคราะห์

นอกจากนี้ การจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะที่ต่อเชื่อมอยู่กับระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะจ่ายกำลังออกในปริมาณเท่าใดก็ได้ ไม่ขึ้นกับปริมาณโหลด ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตกำลังได้มากกว่าปริมาณโหลด ส่วนที่เหลือก็จะถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ถ้าผลิตได้น้อยโหลดในส่วนที่ไม่ได้รับการจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะดึงกำลังจากระบบไฟฟ้าเข้ามาใช้แทน จึงไม่จำเป็นต้องจัดปริมาณโหลด แต่ในสถานะกระตุ้นตัวเองนั้น โหลดจะรับกำลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตกำลังได้มากกว่า

จะส่งให้โหลดทั้งหมด ทำให้โหลดรับกำลังมากเกินไปอาจเกิดความเสียหายได้ แต่ถ้าโหลดมีปริมาณมากกว่ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ อาจส่งผลให้ไม่เกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง ดังนั้นในสถานะกระตุ้นตัวเองจึงจำเป็นต้องจัดโหลดให้พอเหมาะกับขนาดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นด้วย

จะเห็นได้ว่าการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้านั้นไม่ยุ่งยาก เพียงแต่ควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้สูงกว่าความเร็วซิงโครนัสก็จะสามารถทำงานได้แล้ว เพราะจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าแต่ในสถานะกระตุ้นตัวเอง เราไม่สามารถควบคุมจุดทำงานซึ่งได้แก่แรงดันและความถี่ได้โดยตรง เนื่องจากจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับปริมาณต่างๆดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ และเลือกขนาดของโหลด ตัวเก็บประจุและควบคุมความเร็วโรเตอร์ เพื่อให้ได้จุดทำงานที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการศึกษาสภาวะการทำงานหรือผลการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง จะเริ่มจากการศึกษาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อน ซึ่งตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็คือเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่ทำงานในสภาวะที่สลิปเป็นลบ ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงเหมือนกับแบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส ทัวไป แต่อาจจำเป็นต้องพิจารณาเงื่อนไขบางอย่างเพิ่มเติมซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

โดยทั่วไประบบ 3 เฟส จะยุ่งยากในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลอง ในการวิเคราะห์จึงมักจะทำการแปลงปริมาณต่างๆในระบบ 3 เฟส ให้อยู่ในระบบอื่น ในที่นี้เราจะแปลงส่วนประกอบในระบบ 3 เฟส ให้เป็นส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) เนื่องจากในระบบสมมาตรสามารถคิดถึงผลความไม่สมดุลของโหลดได้

เมื่อทำการศึกษาแบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำแล้ว เราจะทำการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง เพื่อนำไปทำการศึกษาถึงผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองต่อไป

3.1 ส่วนประกอบสมมาตร [11]

ในการแก้ปัญหาในระบบไม่สมดุล 3 เฟส เราสามารถแก้ปัญหาโดยการแปลงให้อยู่ในระบบที่สมดุลได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวเรียกว่า ส่วนประกอบสมมาตร โดยที่ส่วนประกอบสมมาตรจะประกอบด้วย

1. ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive-sequence component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120° และมีลำดับเฟสเหมือนกับระบบ 3 เฟสเดิม
2. ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative-sequence component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120° และมีลำดับเฟสตรงข้ามกับระบบ 3 เฟสเดิม
3. ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero-sequence component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสที่มีขนาดและทิศทางเท่ากัน

ในการแปลงความสัมพันธ์ในระบบ 3 เฟส ให้อยู่ในรูปส่วนประกอบสมมาตร จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ 3.1

$$K_{abc} = TK_{012} \quad (3.1)$$

เมื่อ K_{abc} = แรงดันหรือกระแสในเฟส a b และ c

K_{012} = แรงดันหรือกระแสใน ลำดับศูนย์ ลำดับบวก และ ลำดับลบ

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

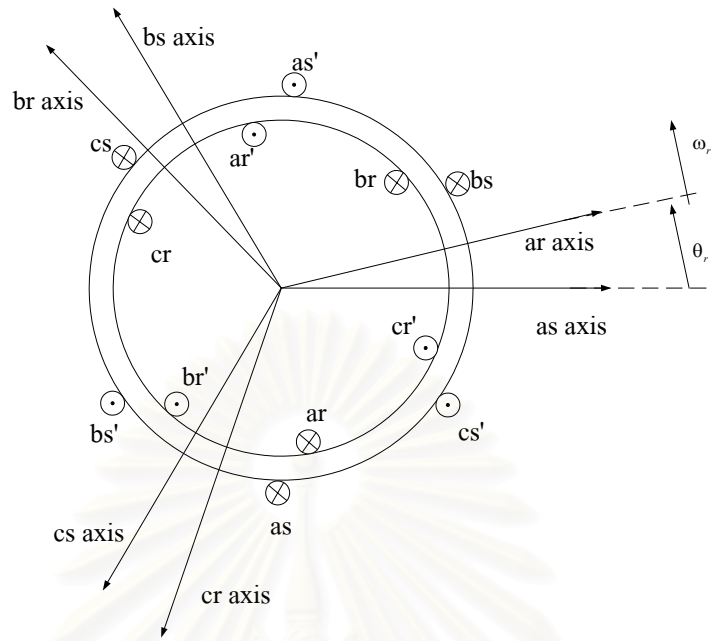
โดยที่ $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

3.2 แบบจำลองเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ[12,13]

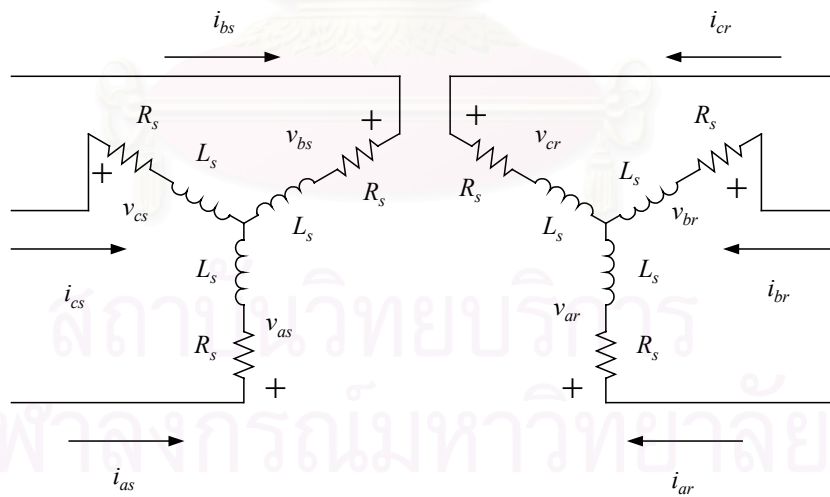
ในการศึกษาแบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ จะเริ่มจากเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้ว 3 เฟส เชื่อมโยงแบบสตาร์ ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดในทั้ง 3 เฟส คือ as, bs และ cs โดยในแต่ละเฟสจะห่างกัน 120° ส่วนในโรเตอร์จะเหมือนกับในสเตเตอร์คือประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดในทั้ง 3 เฟส คือ ar, br และ cr ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2

3.2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในระบบ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลรูปที่ 3.2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทางฝั่งสเตเตอร์และโรเตอร์ได้เป็นสมการที่ 3.2-3.7



รูปที่ 3.1 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส

$$\text{ขดลวดสเตเตอร์} \quad v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \quad (3.2)$$

$$v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} \quad (3.3)$$

$$v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} \quad (3.4)$$

$$\text{ขดลวดโรเตอร์} \quad v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \quad (3.5)$$

$$v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \quad (3.6)$$

$$v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \quad (3.7)$$

โดยที่

- v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} = แรงดันคร่อมความต้านทานและอินดักแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส
- v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} = แรงดันคร่อมความต้านทานและอินดักแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ในแต่ละเฟส
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} = กระแสที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส
- i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} = กระแสที่ไหลเข้าขดลวดโรเตอร์ในแต่ละเฟส
- $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$ = ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส
- $\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$ = ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องขดลวดโรเตอร์ในแต่ละเฟส
- R_s = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_r = ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบนแกนสเตเตอร์และแกนโรเตอร์

ปริมาณต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงดันหรือกระแสบนโรเตอร์นั้น เป็นปริมาณที่หมุนไปตามการหมุนของโรเตอร์เมื่อพิจารณาจากฝั่งสเตเตอร์ซึ่งหยุดนิ่ง ดังนั้นในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบนโรเตอร์และสเตเตอร์นั้น จึงจำเป็นต้องแปลงปริมาณทั้งหมดให้อยู่บนแกนอ้างอิงเดียวกัน โดยเราจะใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.8 ในการเชื่อมความสัมพันธ์

$$H_s = H_r e^{j\theta_r} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่} \quad H_s &= \text{ปริมาณบนขดลวดสเตเตอร์} \\
 H_r &= \text{ปริมาณบนขดลวดโรเตอร์} \\
 \theta_r &= \text{มุมที่แกนโรเตอร์กระทำกับแกนสเตเตอร์}
 \end{aligned}$$

3.2.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันกระแสในระบบส่วนประกอบสมมาตร

จากสมการที่ 3.2-3.7 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในระบบ 3 เฟส ของแรงดันและกระแสบนขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ เมื่อเราทำการย้ายแกนอ้างอิงจากโรเตอร์มายังขดลวดสเตเตอร์โดยใช้สมการที่ 3.8 พร้อมกับเปลี่ยนความสัมพันธ์ในระบบ 3 เฟส ให้เป็นส่วนประกอบสมมาตรโดยใช้สมการที่ 3.1 จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในส่วนประกอบสมมาตรดังสมการที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{r1} \\ v_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL & 0 & pL_m \\ (p - j\omega_r)L_m & 0 & R_r + (p - j\omega_r)L_r & 0 \\ 0 & (p - j\omega_r)L_m & 0 & R_r + (p - j\omega_r)L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{r1} \\ i_{r2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่} \quad v_{s1,s2} &= \text{แรงดันคร่อมความต้านทานและอินดักแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ในลำดับบวกและลำดับลบ} \\
 v_{r1,r2} &= \text{แรงดันคร่อมความต้านทานและอินดักแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ในลำดับบวกและลำดับลบ} \\
 i_{s1,s2} &= \text{กระแสที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ในลำดับบวกและลำดับลบ} \\
 i_{r1,r2} &= \text{กระแสที่ไหลเข้าขดลวดโรเตอร์ในลำดับบวกและลำดับลบ}
 \end{aligned}$$

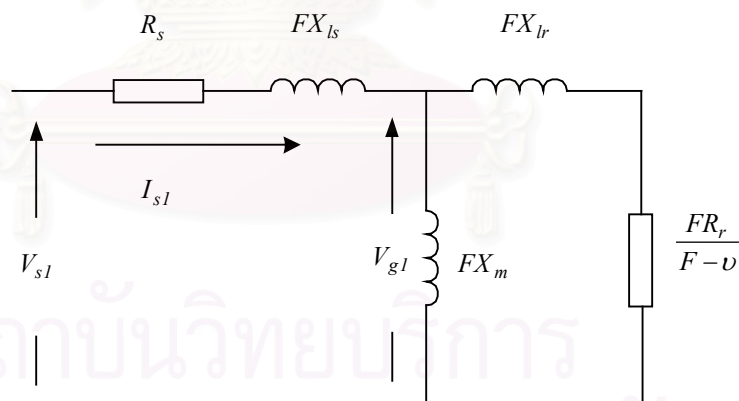
ในสถานะอยู่ตัวจะแทนค่า p ด้วย $j\omega_e$ อีกทั้งขดลวดโรเตอร์ถูกลัดวงจร ทำให้แรงดันทางขดลวดโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ นั่นก็คือ $v_{r1} = 0$ และ $v_{r2} = 0$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ในสถานะอยู่ตัวเป็น

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + jX_{ls} & 0 & jX_m & 0 \\ 0 & R_s + jX_{ls} & 0 & jX_m \\ jX_m & 0 & \frac{R_r}{S} + jX_{lr} & 0 \\ 0 & jX_m & 0 & \frac{R_r}{2-S} + jX_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

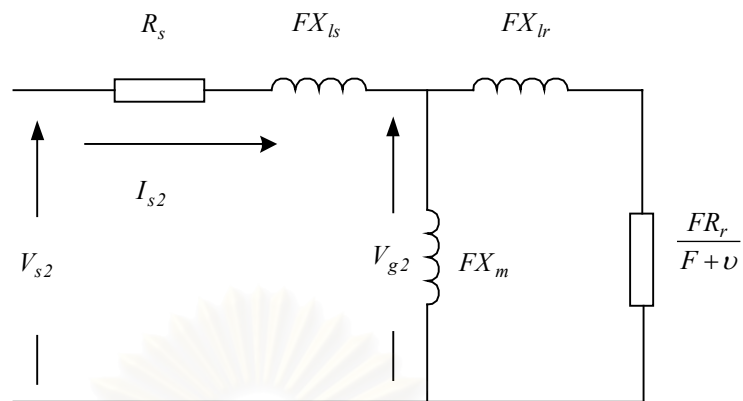
โดยที่	V_{s1}, V_{s2}	= แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์ในลำดับบวกและลบในสภาวะอยู่ตัว
	I_{s1}, I_{s2}	= กระแสในขดลวดสเตเตอร์ในลำดับบวกและลบในสภาวะอยู่ตัว
	X_{ls}	= รีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์
	X_{lr}	= รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์
	X_m	= รีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็ก
	ω_e	= ความถี่ทางไฟฟ้า
	ω_r	= ความเร็วทางด้าน โรเตอร์
	S	= $\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$

3.2.4 แบบจำลองของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัว

จากสมการที่ 3.10 จะสามารถเขียนเป็นวงจรมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัวในลำดับบวกและลำดับลบได้เป็นดังรูป 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรมุมเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในลำดับบวก



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในลำดับลบ

โดยที่

$$V_{g1}, V_{g2} = \text{แรงดันคร่อมช่องอากาศในลำดับบวกและลบในสภาวะอยู่ตัว}$$

$$\omega_b = \text{ความถี่ฐาน}$$

$$F = \frac{\omega_e}{\omega_b}$$

$$v = \frac{\omega_r}{\omega_b}$$

จากวงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์

จะได้

$$V_{s1} = Z_1 I_{s1} \quad (3.11)$$

และ

$$V_{s2} = Z_2 I_{s2} \quad (3.12)$$

โดยที่

$$Z_1 = \frac{R_s}{F} + jX_s + \left(jX_m \parallel \left(\frac{R}{F-v} \right) + jX_r \right)$$

$$Z_2 = \frac{R_s}{F} + jX_s + \left(jX_m \parallel \left(\frac{R}{F+v} \right) + jX_r \right)$$

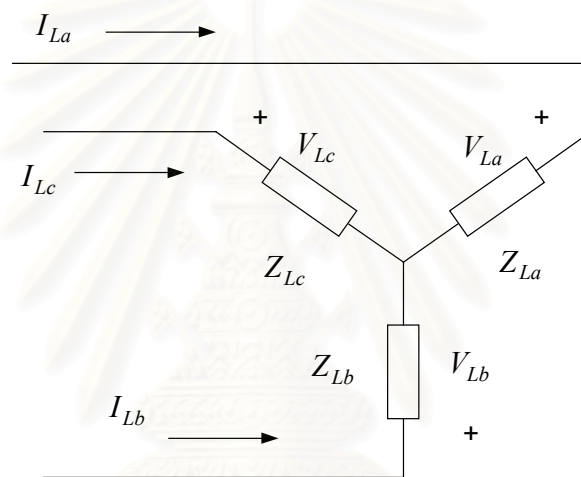
3.3 ส่วนประกอบสมมาตรของโหลด

จากรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นรูปแบบจำลองแสดงโหลดในระบบ 3 เฟส ที่ต่อแบบสตาร์ ซึ่งจากรูปวงจร โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$V_{La} = Z_a I_{La} \quad (3.13)$$

$$V_{Lb} = Z_b I_{Lb} \quad (3.14)$$

$$V_{Lc} = Z_c I_{Lc} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของโหลดสามเฟส

โดยที่

$$Z_{La} = (R_{La} + jFX_{La}) // \frac{jX_{Ca}}{F}$$

$$Z_{Lb} = (R_{Lb} + jFX_{Lb}) // \frac{jX_{Cb}}{F}$$

$$Z_{Lc} = (R_{Lc} + jFX_{Lc}) // \frac{jX_{Cc}}{F}$$

และ V_{La}, V_{Lb}, V_{Lc} = แรงดันคร่อมโหลด ในแต่ละเฟส

I_{La}, I_{Lb}, I_{Lc} = กระแสโหลดที่ไหลในแต่ละเฟส

R_{La}, R_{Lb}, R_{Lc} = ความต้านทานของโหลดในแต่ละเฟส

X_{La}, X_{Lb}, X_{Lc} = รีแอกแตนซ์ของโหลดในแต่ละเฟส

X_{Ca}, X_{Cb}, X_{Cc} = รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ในแต่ละเฟส

3.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง

จาก สมการที่ 3.1 เมื่อแทน K ด้วย V_L จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{L0} \\ V_{L1} \\ V_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{La} \\ V_{Lb} \\ V_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

เมื่อแทนความสัมพันธ์ 3.13-3.15 ลงในสมการ 3.16 จะได้เป็นดังสมการที่ 3.17

$$\begin{bmatrix} V_{L0} \\ V_{L1} \\ V_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{La}I_{La} & Z_{Lb}I_{Lb} & Z_{Lc}I_{Lc} \\ Z_{La}I_{La} & aZ_{Lb}I_{Lb} & a^2Z_{Lc}I_{Lc} \\ Z_{La}I_{La} & a^2Z_{Lb}I_{Lb} & aZ_{Lc}I_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

แต่จากสมการที่ 3.1 เมื่อแทน K ด้วย I_L จะได้

$$\begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L0} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

แทนค่าสมการ 3.18 ลงในสมการที่ 3.17 และทำการจัดรูปใหม่ จะได้สมการที่ 3.19

$$\begin{bmatrix} V_{L0} \\ V_{L1} \\ V_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})I_{L0} & (Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc})I_{L1} & (Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})I_{L2} \\ (Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})I_{L0} & (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})I_{L1} & (Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc})I_{L2} \\ (Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc})I_{L0} & (Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})I_{L1} & (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})I_{L2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

แต่เนื่องจาก I_{L0} มีค่าเป็นศูนย์ จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ที่ 3.19 ได้ใหม่เป็น 3.20-3.22

$$V_{L0} = \frac{1}{3} [(Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc})I_{L1} + (Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})I_{L2}] \quad (3.20)$$

$$V_{L1} = \frac{1}{3} [(Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})I_{L1} + (Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc})I_{L2}] \quad (3.21)$$

$$V_{L2} = \frac{I}{3} [(Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})I_{L1} + (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})I_{L2}] \quad (3.22)$$

แต่เนื่องจากแรงดันในลำดับลบของโหนดต้องเท่ากับแรงดันในลำดับลบจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($V_{s2} = V_{L2}$) ทำให้สมการที่ 3.12 เท่ากับสมการที่ 3.22 ส่วนกระแสในลำดับลบ ก็จะมีค่าเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม ($I_{s2} = -I_{L2}$) ดังนั้นเมื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวและจัดรูปใหม่จะได้ตามสมการที่ 3.23

$$I_{L2} = \left[\frac{(Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})}{-3Z_2 - (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})} \right] I_{L1} \quad (3.23)$$

และเมื่อแทนสมการที่ 3.23 ลงในสมการที่ 3.21 รวมทั้งใช้ความสัมพันธ์ที่ว่าแรงดันในลำดับบวกของโหนดต้องเท่ากับแรงดันลำดับบวกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($V_{s1} = V_{L1}$) ส่วนกระแสในลำดับบวกก็จะมีค่าเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม ($I_{s1} = -I_{L1}$) ดังนั้นเมื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวและจัดรูปใหม่จะได้ตามสมการที่ 3.24

$$(Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})\frac{I_{L1}}{3} + \left[\frac{(Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})}{-3Z_2 - (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})} \right] (Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc})I_{L1} = -Z_1 I_{L1} \quad (3.24)$$

แต่เนื่องจาก $I_{L1} \neq 0$ ดังนั้น จึงได้ว่า

$$\frac{1}{3}(Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc}) + \left[\frac{(Z_{La} + aZ_{Lb} + a^2Z_{Lc})}{-3Z_2 - (Z_{La} + Z_{Lb} + Z_{Lc})} \right] (Z_{La} + a^2Z_{Lb} + aZ_{Lc}) + Z_1 = 0 \quad (3.25)$$

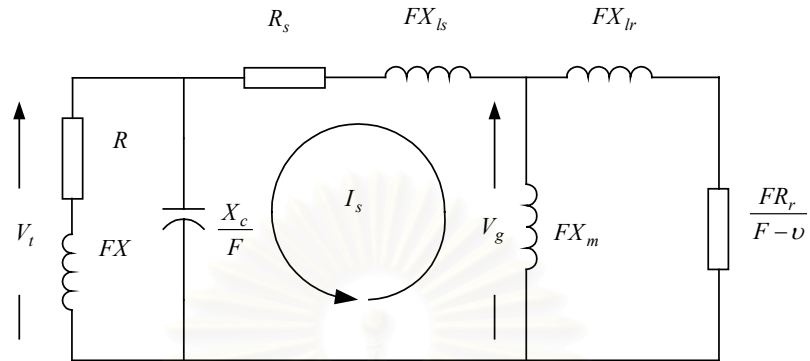
3.5 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อโหนดสมดุลย์

ในสถานะที่โหนดสมดุลย์ $Z_{La} = Z_{Lb} = Z_{Lc}$ ดังนั้น ในพจน์กลางของสมการที่ 3.25 จะมีค่าเป็น 0 และลดรูปเหลือเพียง

$$Z_L + Z_1 = 0 \quad (3.26)$$

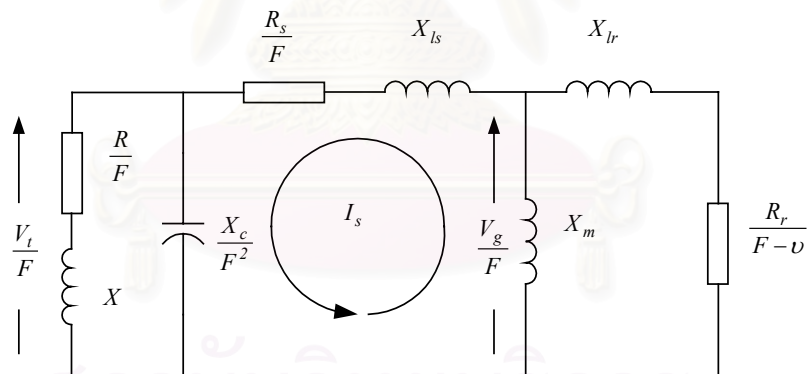
โดยที่ $Z_L = Z_{La} = Z_{Lb} = Z_{Lc}$

จากสมการที่ 3.26 เมื่อ V_s ด้วย V_t จะสามารถเขียนเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง

หลังจากนั้นทำการหารค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในวงจรด้วยค่า F จะได้วงจรสมมูลในสภาวะอยู่ตัวแบบลดรูปความถี่ ซึ่งรวมโหนดและตัวเก็บประจุ ได้เป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเองแบบลดรูปความถี่

จากสมการที่ 3.26 เมื่อเราแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงไป และจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\frac{\left(\frac{R_r}{F-v} + jX_{lr}\right)(jX_m)}{\frac{R_r}{F-v} + j(X_{lr} + X_m)} + \frac{R_s}{F} + jX_{ls} + \frac{\left(\frac{-jX_c}{F^2}\right)\left(\frac{R}{F} + jX\right)}{\frac{R}{F} + j\left(X - \frac{X_c}{F^2}\right)} = 0 \tag{3.27}$$

จากรูปวงจรที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า ในสถานะโหนดสมดุลย์วงจรมูลจะมีเพียงวงจรถ้าดับบวกของเครื่องจกรกลหนึ่งยวนำเท่านั้น ในส่วนของวงจรถ้าดับลบจะหายไป ซึ่งหากเราใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ในรูปในของวงจรมูล ก็จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.27 เช่นกัน

จากสมการที่ 3.27 ทำการจัดรูปสมการใหม่ เพื่อให้ง่ายในการแก้ปัญหา โดยจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน X_c , X_m , ν และ F และแยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพออกจากกัน จะได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ 3.28 และ 3.29

$$(A_1 X_m + A_2) F^3 + (A_3 X_m + A_4) \nu F^2 + (A_5 X_c X_m + A_6 X_c + A_7) F + (A_8 X_c X_m + A_9 X_c) \nu = 0 \quad (3.28)$$

และ

$$(B_1 X_m + B_2) F^4 + (B_3 X_m + B_4) \nu F^3 + (B_5 X_c X_m + B_6 X_c + B_7 X_m + B_8) F^2 + (B_9 X_c X_m + B_{10} X_c + B_{11} X_m + B_{12}) \nu F + B_{13} X_c = 0 \quad (3.29)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A_1 &= -RX_{ls} - RX_{lr} - R_s X - R_r X & B_1 &= -XX_{ls} - XX_{lr} \\ A_2 &= -RX_{ls} X_{lr} - R_s XX_{lr} - R_r XX_{ls} & B_2 &= -XX_{ls} X_{lr} \\ A_3 &= RX_{ls} + RX_{lr} + R_s X & B_3 &= XX_{ls} + XX_{lr} \\ A_4 &= RX_{ls} X_{lr} + R_s XX_{lr} & B_4 &= XX_{ls} X_{lr} \\ A_5 &= R + R_s + R_r & B_5 &= X + X_{ls} + X_{lr} \\ A_6 &= RX_{lr} + R_s X_{lr} + R_r X + R_r X_{ls} & B_6 &= XX_{lr} + X_{ls} X_{lr} \\ A_7 &= RR_s R_r & B_7 &= RR_s + RR_r \\ A_8 &= -R - R_s & B_8 &= RR_s X_{lr} + RR_r X_{ls} + R_s R_r X \\ A_9 &= -RX_{lr} - R_s X_{lr} & B_9 &= -X - X_{ls} - X_{lr} \\ & & B_{10} &= -XX_{lr} - X_{ls} X_{lr} \\ & & B_{11} &= -RR_s \\ & & B_{12} &= -RR_s X_{lr} \\ & & B_{13} &= -RR_r - R_s R_r \end{aligned}$$

ส่วนความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์อื่นๆ เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.7 โดยใช้กฎของโอห์มและกฎการแบ่งกระแส จะได้เป็น

$$I_s = \frac{\frac{(V_g/F)}{\frac{R_s}{F} + jX_{ls} + \frac{-jX_c(R+jXF)}{RF^2 + j(XF^3 - X_cF)}}}{\frac{(V_t/F)}{\frac{-jX_c(R+jXF)}{RF^2 + j(XF^3 - X_cF)}}} = \frac{(V_t/F)}{\frac{-jX_c(R+jXF)}{RF^2 + j(XF^3 - X_cF)}} \quad (3.30)$$

$$\frac{V_t}{F} = \frac{V_g}{F} - I_s \left(\frac{R_s}{F} + jX_{ls} \right) \quad (3.31)$$

$$I_L = \frac{V_t/F}{\frac{R}{F} + jX} \quad (3.32)$$

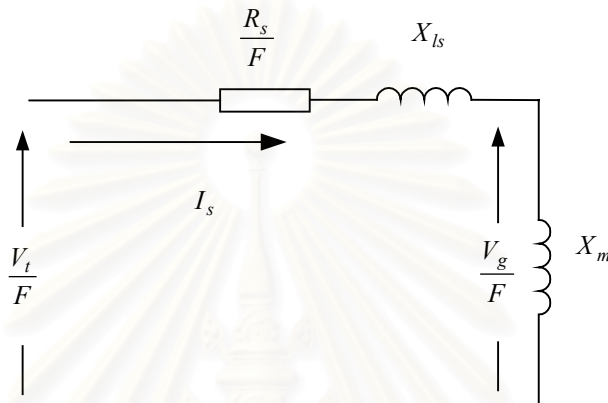
$$P_{out} = 3 |I_L^2| R \quad (3.33)$$

3.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและรีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากเกิดการอิมิตัวในแกนเหล็กทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันและฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น จึงส่งผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็กไม่คงที่ มีการแปรตามขนาดของแรงดันที่คร่อมช่องอากาศ ในการนำแบบจำลองไปใช้เป็นมอเตอร์ โดยปรกติจะละเลยผลของการอิมิตัวที่เกิดขึ้น ทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเป็นแบบเชิงเส้น (ค่า X_m คงที่) แบบจำลองที่ได้ก็จะไม่ยุ่งยากและสะดวกในการนำไปใช้งาน อีกทั้งในเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำขนาดใหญ่จะมีผลของการอิมิตัวน้อย ทำให้แบบจำลองที่ละเลยการอิมิตัวของแกนเหล็กสามารถนำไปใช้วิเคราะห์สภาวะต่างๆ ได้ แต่ในการทำงานเป็นเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเองจะต่างกัน ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ว่า จุดทำงานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเองจะเกิดจากจุดตัดของกราฟลักษณะแรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ ถ้าหากใช้แบบจำลองที่ละเลยการอิมิตัว จะทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุไม่เกิดจุดตัดกัน ส่งผลให้ไม่เกิดจุดทำงานในสภาวะกระตุ้นตัวเองขึ้น ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเองจึงจำเป็นต้องคิดผลของการอิมิตัวในแกนเหล็กด้วย

เมื่อเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก จะส่งผลให้ค่ารีแอกแตนซ์ไม่คงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_g และ X_m เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานในสถานะกระตุ้นตัวเองต่อไป

จากรูปวงจรที่ 3.7 ถ้า $F = \nu$ ทำให้ค่า $\frac{R_r}{F - \nu}$ มีค่าเป็นอนันต์ จึงได้วงจรสมมูลใหม่เป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลในสถานะที่ $F = \nu$

จากรูปจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_t และ I_s เป็น

$$\frac{|V_t|/F}{|I_s|} = \sqrt{\frac{R^2}{F} + (X_{ls} + X_m)^2} \quad (3.34)$$

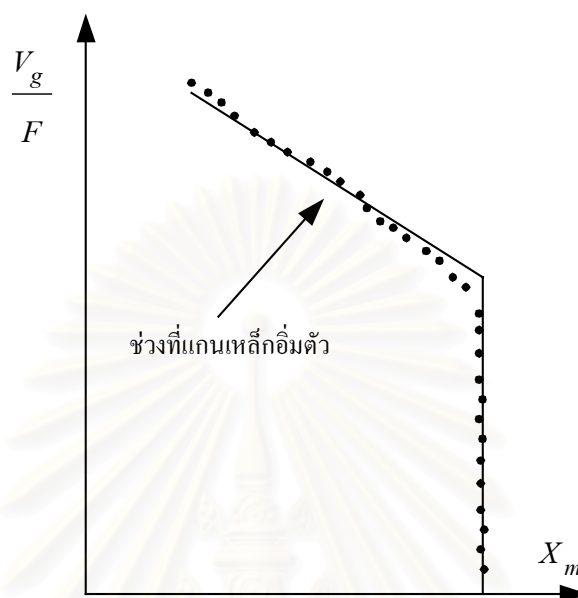
จากสมการที่ 3.34 ทำการย้ายข้างสมการและจัดรูปใหม่จะได้

$$X_m = \sqrt{\frac{(|V_t|/F)^2}{|I_s|^2} - \frac{R^2}{F} - X_{ls}} \quad (3.35)$$

และจากรูปที่ 3.8 คำนวณหาค่า V_g ได้จาก

$$\frac{|V_g|}{F} = |I_s| X_m \quad (3.36)$$

นำค่า $\frac{V_g}{F}$ และ X_m ที่คำนวณได้มาวาดกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{V_g}{F}$ และ X_m

จากกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ X_m มีค่าคงที่ ไม่แปรตาม $\frac{V_g}{F}$ และช่วงที่ X_m แปรตาม $\frac{V_g}{F}$ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\frac{V_g}{F} = f(X_m) \quad \text{ในช่วงอ้อมตัว} \quad (3.37)$$

$$X_m = k \quad \text{ในช่วงไม่อ้อมตัว} \quad (3.38)$$

ความสัมพันธ์ที่ 3.37 และ 3.38 นั้นสามารถคำนวณหาจากการประมาณค่าจากกราฟ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีแต่เพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้งาน อาจใช้การประมาณเป็นแบบเส้นตรงก็ได้

จะเห็นได้ว่า กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_g}{F}$ และ X_m จะเป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาภาวะกระตุ้นตัวเองซึ่งจะได้กล่าวถึงวิธีการหาในบทถัดไป

บทที่ 4

การศึกษาหาผลตอบในสภาวะกระตุ้นตัวเอง

ในบทที่ 3 เราได้กล่าวถึงการทำงานในสภาวะกระตุ้นตัวเองพร้อมทั้งเงื่อนไขและปัญหาที่เกิดขึ้น เห็นได้ว่าจะต้องมีปัจจัยหลายๆอย่างประกอบกันจึงจะสามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองได้

จากสมการที่ 3.28 และ 3.29 นั้น จะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลหนึ่งยวนำทุกค่าเป็นค่าคงที่และทราบค่าที่แน่นอน ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงไปตามจุดทำงาน ยกเว้น ค่ารีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็ก (X_m) ซึ่งจะแปรตามขนาดแรงดันที่เกิดขึ้น จึงเป็นค่าที่ยังไม่ทราบแน่นอน ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งได้แก่ ขนาดตัวเก็บประจุ ขนาดโหลด แรงดัน ความเร็วโรเตอร์และความถี่ทางไฟฟ้า เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่า

ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะทำให้เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองนั้น จะใช้วิธีแก้สมการ แต่จากความสัมพันธ์ที่ได้ในสมการที่ 3.28 และ 3.29 ซึ่งมีเพียง 2 สมการ ในขณะที่จำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่ามีมากกว่านั้น ทำให้ไม่สามารถแก้หาค่าตอบจากสมการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำหนดค่าคงที่เพิ่มขึ้นอีก โดยให้เหลือตัวไม่ทราบค่าเพียง 2 ตัว เพื่อให้สามารถแก้หาค่าตอบของสมการได้ ในการกำหนดตัวแปรจะขึ้นอยู่กับการศึกษาซึ่งมีได้หลายแบบซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

หลังจากกำหนดค่าคงที่ให้กับสมการเรียบร้อยแล้ว จะทำการแก้สมการเพื่อหาค่าตอบและทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น โดยจะใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน [14] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น

4.1 การแก้สมการด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

สมมุติสมการที่ต้องการหาค่าตอบเป็น f_1 และ f_2 ตามสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$f_1(x_1, x_2) = 0 \quad (4.1)$$

$$f_2(x_1, x_2) = 0 \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ประมาณค่าด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับ 1 รอบจุด x_1^0 และ x_2^0 ได้เป็นตามสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2) = f_1(x_1^0 + x_2^0) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \varepsilon_1 = 0 \quad (4.3)$$

$$f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2) = f_2(x_1^0 + x_2^0) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \varepsilon_2 = 0 \quad (4.4)$$

ทำการประมาณให้ค่า ε_1 และ ε_2 มีค่าเท่ากับศูนย์ และจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} -f_1(x_1, x_2) \\ -f_2(x_1, x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 ย้ายข้างสมการใหม่จะได้สมการที่ 4.6

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -f_1(x_1, x_2) \\ -f_2(x_1, x_2) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

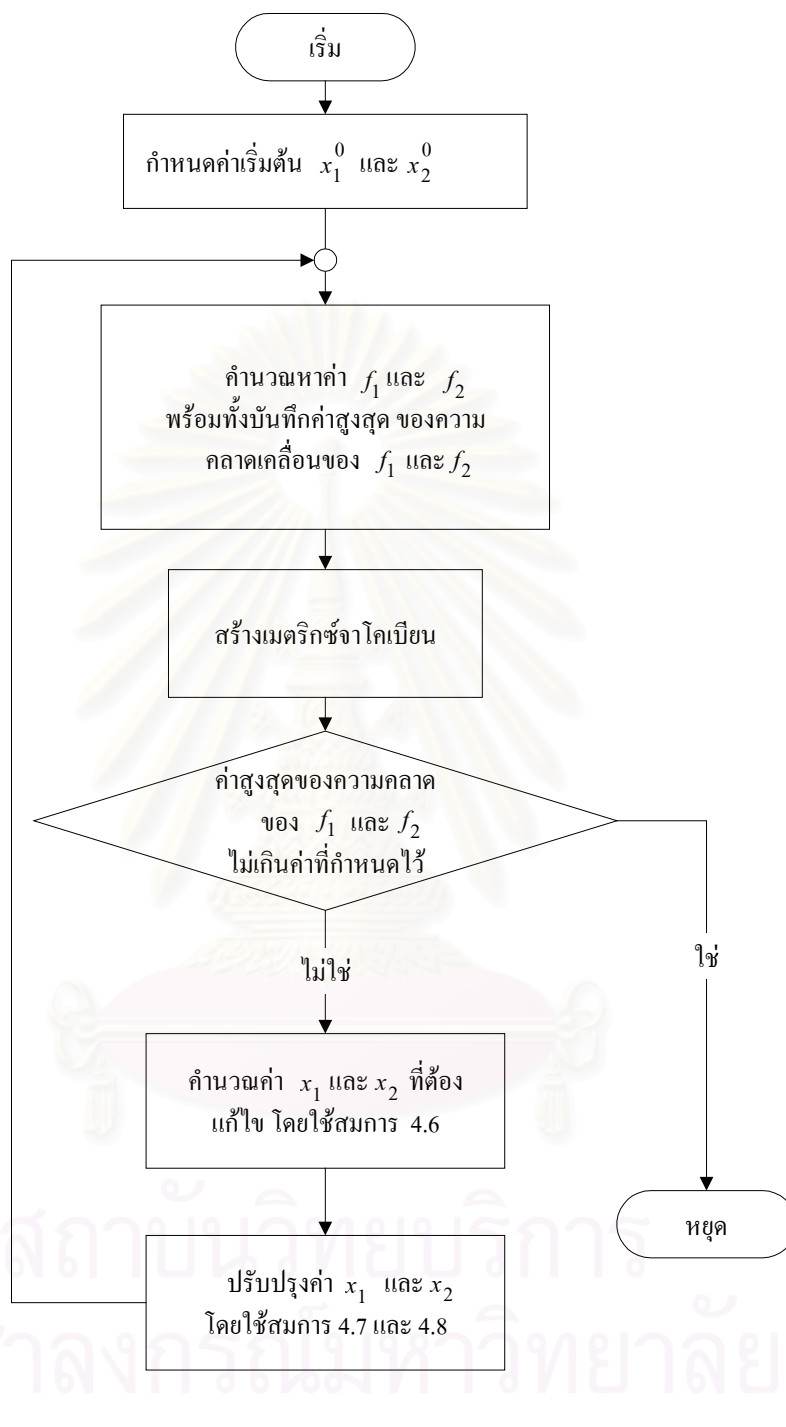
โดยที่ J คือ เมตริกซ์จาโคเบียน =
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}$$

ดังนั้นภายใต้การประมาณของอนุกรมเทย์เลอร์จะให้คำตอบ คือ

$$x_1 = x_1^0 + \Delta x_1 \quad (4.7)$$

$$x_2 = x_2^0 + \Delta x_2 \quad (4.8)$$

ซึ่งการคำนวณโดยทั่วไปจะทำซ้ำเป็นรอบๆ จนกระทั่ง $f_1(x_1, x_2)$ และ $f_2(x_1, x_2)$ มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น 0.0001 โดยขั้นตอนการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1



รูป 4.1 ขั้นตอนการแก้สมการด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน

4.2 การทดสอบสภาวะกระตุ้นตัวเอง

4.2.1 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบผล เป็นเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ความถี่ 50 Hz ขนาด 0.37 kW แรงดัน 220/380 Volt กระแสพิกัด 1.17 A โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

R_s	=	24	Ohm	R_r	=	21	Ohm
X_{ls}	=	16	Ohm	X_{lr}	=	16	Ohm
X_{mu}	=	330	Ohm				

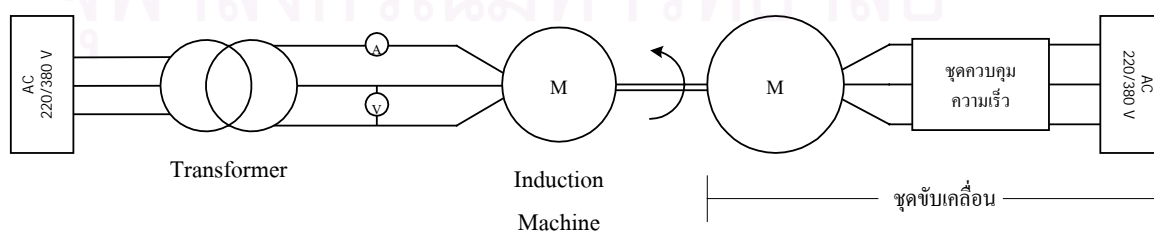
และกำหนดค่าฐานของระบบต่อหน่วย(per unit) ดังนี้

$$I_{base} = 1.17 \text{ A} \quad V_{base} = 220 \text{ V} \quad Z_{base} = 188.034 \text{ Ohm}$$

$$S_{base} = 772.2 \text{ W} \quad F_{base} = 50 \text{ Hz}$$

4.2.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมช่องอากาศและค่ารีแอกแตนซ์

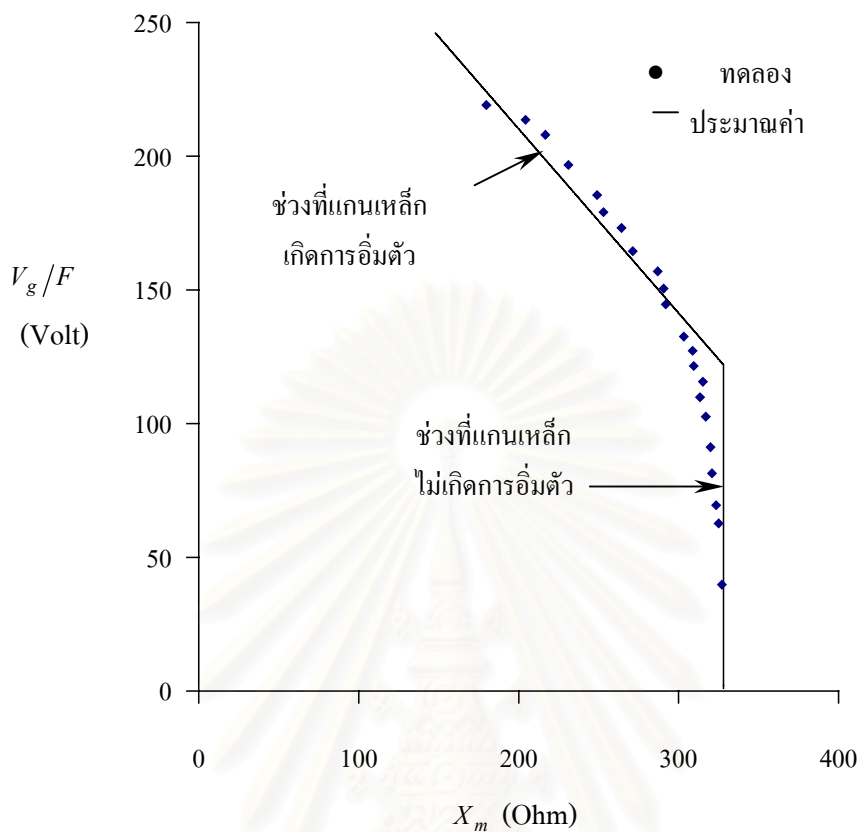
ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_g และ X_m จะต้องทำการทดลองโดยการต่อวงจรตามรูปที่ 4.2 ทำการขับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำด้วยตัวขับ ให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส หลังจากนั้นทำการป้อนแรงดันที่ค่าต่างๆให้กับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ และวัดค่ากระแสเตเตอร์ ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4.1 หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา X_m และ V_g ตามสมการที่ 3.35 และ 3.36 หลังจากนั้นนำค่า X_m และ V_g ที่ได้ มาวาดกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่า ความสัมพันธ์ระหว่าง V_g และ X_m

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันและกระแสสำหรับคำนวณหาความสัมพันธ์ของ (V_g / F) และ X_m

ทดลอง		คำนวณ	
V_t (Volt)	I_s (A)	(V_g / F) (volt)	X_m (Ohm)
240	1.22	219.10	179.79
232	1.05	213.62	204.31
225	0.96	208.02	216.69
211	0.85	196.76	231.09
198	0.74	185.44	249.10
191	0.71	179.09	253.00
184	0.66	173.21	264.29
175	0.61	164.50	271.34
166	0.55	156.92	286.92
159	0.52	150.46	290.68
153	0.50	144.57	292.00
140	0.44	132.56	303.16
134	0.41	127.19	308.76
128	0.39	121.53	309.48
122	0.37	115.64	315.20
116	0.35	109.87	313.34
108	0.32	102.60	316.99
96	0.29	91.20	320.00
86	0.25	81.40	320.80
73	0.21	69.50	323.40
66	0.19	62.70	325.00
42	0.12	39.80	327.00



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง X_m กับ $\frac{V_g}{F}$ จากการทดลอง

ในครั้งแรกใช้การประมาณค่าในช่วงอิ่มตัวด้วยสมการเส้นตรงเพียงเส้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แต่เมื่อนำไปคำนวณค่าเปรียบเทียบผลการทดลองแล้ว ปรากฏว่า ผลที่ได้แตกต่างกันมาก จึงทำการประมาณค่าใหม่ โดยการแบ่งความสัมพันธ์เป็นช่วงย่อยๆ และในแต่ละช่วงย่อยนั้นจะใช้การประมาณค่าเป็นสมการเชิงเส้นซึ่งแสดงในสมการที่ 4.9 ซึ่งผลจากการประมาณในครั้งนี้ ให้ค่าที่ใกล้เคียงการทดลองมากกว่า

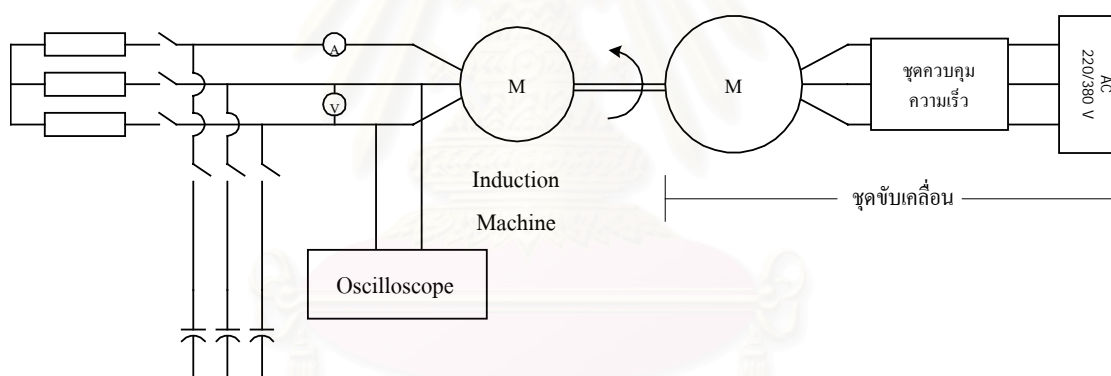
$$\frac{|V_g|}{F} = \begin{cases} 297.1551 - 0.4254 X_m & ; 0 < X_m < 223 \\ 361.8716 - 0.7153 X_m & ; 223 < X_m < 278 \\ 520.1716 - 1.2834 X_m & ; 278 < X_m < 308 \\ 834.9876 - 2.3057 X_m & ; 308 < X_m < 319 \\ 2937.067 - 8.9002 X_m & ; 319 < X_m < 330 \end{cases} \quad (4.9)$$

4.2.3 วิธีการทดสอบสถานะกระตุ้นตัวเอง

ในการทดลองสถานะการเกิดการกระตุ้นตัวเอง จะทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 1 เครื่อง ขนาด 0.37 kW 220/380 โวลต์
2. ชุดขับเคลื่อนพร้อมชุดควบคุมความเร็ว
3. ตัวเก็บประจุ 400 โวลต์ ขนาดต่างๆกัน
4. ความต้านทาน
5. โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์
6. ออสซิลโลสโคป
7. แผงสวิตช์

โดยการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุและโหลดจะต่อผ่านแผงสวิตช์เพื่อควบคุมการเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการทดลองสถานะกระตุ้นตัวเอง

วิธีการทดลอง

1. ต่อตัวเก็บประจุขนาดตามที่ต้องการไว้ แต่ยังไม่ต้องต่อโหลด
2. เริ่มจ่ายไฟให้กับตัวขับและตัวควบคุมความเร็ว เพื่อหมุนโรเตอร์โดยเพิ่มความเร็วไปเรื่อยๆจนเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองขึ้น หลังจากนั้นควบคุมโรเตอร์ให้มีความเร็ว 1515 rpm (1.01 Pu)

3. ทำการต่อโหลดขนาดต่างๆ เพื่อดูผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ทำการวัดค่าแรงดันและความถี่ เพื่อบันทึกผล
4. เปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุและทำการทดลองใหม่

4.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณจากแบบจำลอง

ผลการทดลองสภาวะกระตุ้นตัวเองแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจะอธิบายในส่วนถัดไป แต่ในตอนนี้เราจะทำการเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลการคำนวณค่าจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อดูว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมเพียงใด

ในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าจากการทดลองและการคำนวณ ในรูป 4.5 ก) ซึ่งแสดงค่าแรงดัน จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ผลจากการทดลองจะมีค่ามากกว่าผลจากการคำนวณอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากในแบบจำลองเราทำการละเลยค่าความต้านทานในแกนเหล็กไป ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของค่าแรงดัน ณ. ค่าตัวเก็บประจุต่างๆ ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองดังกล่าว สามารถนำมาใช้ศึกษาเพื่อดูแนวโน้มหรือผลของสภาวะกระตุ้นตัวเองได้

ส่วนในรูป 4.5 ข) ซึ่งแสดงผลของความถี่ที่ได้จากการทดลองและผลการคำนวณ จะเห็นว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ ทั้งนี้เกิดจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลอง เนื่องจากออสซิลอสโคปที่ใช้วัดความถี่แสดงความละเอียดของการวัดได้เพียง 0.5 Hz เท่านั้น ดังนั้นความถี่ที่วัดได้อาจไม่ตรงกับความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตาม เราพบว่าผลตอบความถี่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่สร้างขึ้นใช้ในการคำนวณถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับความจริง ถึงแม้จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเพราะเนื่องจากการละเลยค่าบางอย่างในแบบจำลองหรือข้อจำกัดของอุปกรณ์ แต่โดยภาพรวมแล้วก็น่าจะถือว่า แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สภาวะกระตุ้นตัวเองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงหรือสิ่งที่เกิดขึ้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ผลของแรงดันในการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ

ขนาดตัวเก็บประจุ μF	แรงดัน(%)			
	ไร้โหลด	800 โอม์	600 โอม์	400 โอม์
9	×	×	×	×
9.8	60	×	×	×
10.0	67.5	×	×	×
10.1	71	×	×	×
10.3	74	×	×	×
10.5	78	×	×	×
11.0	-	48	×	×
11.3	80	-	×	×
11.4	83	54	×	×
11.5	86	58	55	×
11.6	90	-	-	×
11.8	-	63	-	×
12	81.6	72	62	×
12.8	-	79	-	×
13.1	98.4	81	72.6	×
13.6	-	86	77.5	60
13.8	-	-	78.5	64
14.1	102	87	81	69
14.7	-	-	-	71
15.1	105	92	82.4	76
15.7	-	93	88	-
16	-	95.8	90	79
16.8	-	-	-	83.4
17.2	-	-	-	84.7
17.8	-	99.3	95.8	-
18.6	-	-	-	90
20.1	-	-	-	92
21.4	-	-	-	94.4
21.6	-	-	-	95
21.7	-	-	-	97

- ไม่ได้ทำการทดลอง

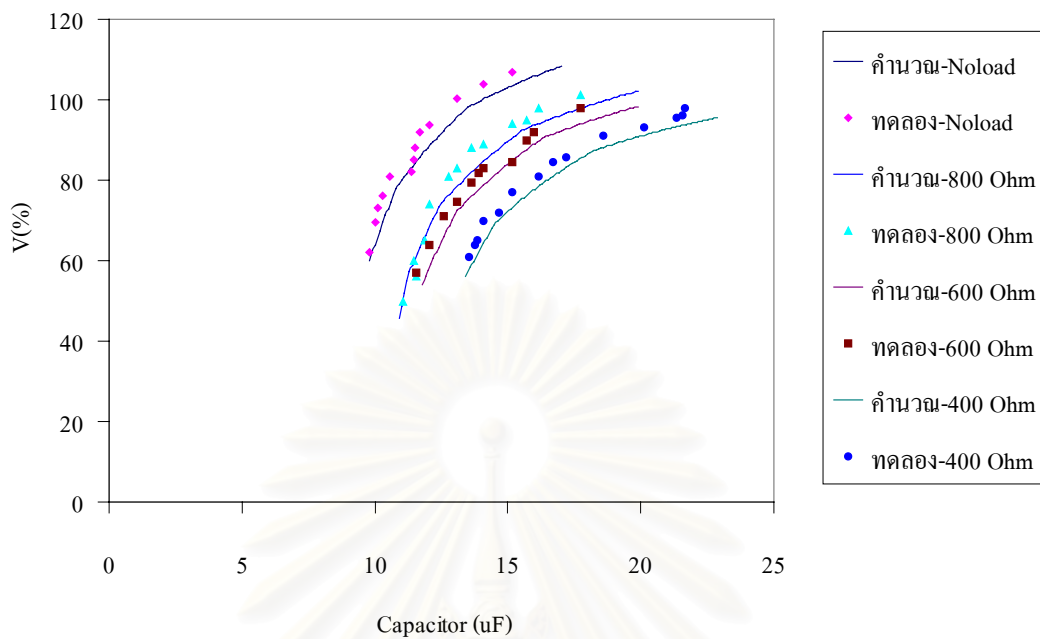
× ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

ตารางที่ 4.3 ผลของความถี่ในการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ

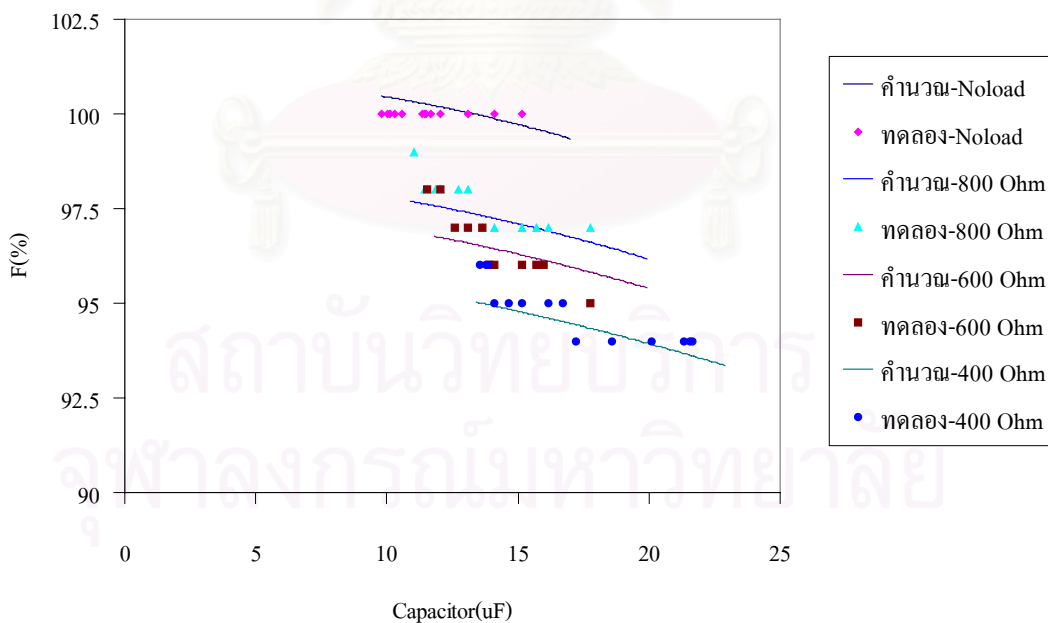
ขนาดตัวเก็บประจุ μF	ความถี่(%)			
	ไร้อโหลด	800 โห้้ม	600 โห้้ม	400 โห้้ม
9	×	×	×	×
9.8	100	×	×	×
10.0	100	×	×	×
10.1	100	×	×	×
10.3	100	×	×	×
10.5	100	×	×	×
11.0	-	99	×	×
11.3	100	-	×	×
11.4	100	98	×	×
11.5	100	98	98	×
11.6	100	-	-	×
11.8	-	98	-	×
12	100	98	98	×
12.8	-	98	-	×
13.1	100	98	97	×
13.6	-	97	97	96
13.8	-	-	97	96
14.1	100	97	96	96
14.7	-	-	-	95
15.1	100	97	96	95
15.7	-	97	96	-
16	-	97	96	95
16.8	-	-	-	95
17.2	-	-	-	95
17.8	-	97	95	-
18.6	-	-	-	94
20.1	-	-	-	94
21.4	-	-	-	94
21.6	-	-	-	94
21.7	-	-	-	94

- ไม่ได้ทำการทดลอง

× ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง



ก) แรงดัน



ข) ความถี่

รูปที่ 4.5 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเทียบกับผลการคำนวณ

4.2.5 ปัญหาจากการทดลองและวิธีการแก้ไข

ในการทดลองการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองนั้น พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหลายอย่างระหว่างการทดลอง ซึ่งได้สรุปไว้เป็นหัวข้อดังนี้

1. ไม่สามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองในสภาวะไร้อโหลดในบางครั้ง

เมื่อเราทำการเพิ่มความเร็วโรเตอร์ เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำก็จะค่อยๆเกิดการสร้างแรงดันขึ้น (สังเกตจากโวลต์มิเตอร์ หรือ ออสซิลอสโคป ที่ทำการวัดแรงดันอยู่) แต่ในบางครั้งต้องเพิ่มความเร็วจนถึง 2000 rpm จึงจะเริ่มเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง แต่ก็มีบางครั้งที่ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองขึ้นไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วไปเท่าใดก็ตาม

จากการวิเคราะห์พบว่า สาเหตุที่เกิดเหตุการณ์เช่นนี้น่าจะมาจากปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก เพราะปัจจัยสำคัญของการทำให้เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองนั้นมี 2 ประการ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วอันประกอบด้วย ขนาดตัวเก็บประจุและปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ในการทดลองซึ่งใช้ตัวเก็บประจุขนาดเท่ากัน แต่บางครั้งก็เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง แต่บางครั้งก็ไม่เกิด ก็น่าจะมีผลมาจากปริมาณ ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างซึ่งอาจจะมีน้อยไปหรือไม่มีเลย ทำให้ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

สาเหตุที่น่าจะทำให้ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างมีน้อยหรือไม่มีนั้น น่าจะเกิดจากกระบวนการในการทดลอง เพราะหลังจากทำการทดลองเสร็จในแต่ละครั้งจะทำการหยุดโรเตอร์โดยการค่อยๆลดความเร็วโรเตอร์เพื่อทำการเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุหรือโหลด ในขณะที่ทำการลดความเร็วนั้น อาจเกิดการถ่ายเทกระแสที่ควรจะต้องตกค้างอยู่ในแกนเหล็กไปยังโหลดหรือตัวเก็บประจุ ทำให้เหลือปริมาณ ฟลักซ์ตกค้างน้อยหรือไม่มีเพียงพอในการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองในการทดลองครั้งต่อไป

ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนวิธีในการทดลองใหม่โดยการปลดโหลดและตัวเก็บประจุออกก่อน เพื่อให้ไม่เกิดการถ่ายเทกระแสแล้วจึงค่อยลดความเร็วโรเตอร์ เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนนี้ผลปรากฏว่าจะเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองขึ้นทุกครั้ง

2. ไม่สามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองในสภาวะที่เชื่อมโยงโหลดอยู่

ในการทดลองสภาวะกระตุ้นตัวเองเพื่อจ่ายโหลด ในครั้งแรกได้ทดลองโดยการเชื่อมโยงต่อทั้งโหลดและตัวเก็บประจุเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเลย แต่ไม่ว่าจะอย่างไรก็ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่า ในสภาวะที่เกิดการสร้างแรงดัน หากมีโหลดเชื่อมต่อยู่จะทำให้กระแสบางส่วนต้องไปจ่ายโหลดด้วยทำให้มีปริมาณกระแสไม่เพียงพอที่จะเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ดังนั้นจึงลองปลดโหลดออกไปก่อน เมื่อเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองแล้วจึงค่อยเชื่อมต่อโหลดเข้ามา จึงจะสามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองในขณะที่มีโหลดได้

4.3 การกำหนดตัวแปรในสถานะกระตุ้นตัวเอง

จากสมการที่ 3.28 และ 3.29 จะเห็นได้ว่าสมการทั้งสองเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น 2 สมการ แต่มีจำนวนตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าอยู่ถึง 6 ตัว ซึ่งได้แก่ R, X, X_c, X_m, F และ v ดังนั้นในการหาคำตอบของสมการ จำเป็นต้องกำหนดค่าให้แก่ตัวแปรเหล่านี้เพิ่มขึ้นอีก เพื่อให้เหลือตัวไม่ทราบค่าเพียง 2 ตัวเท่านั้น จึงจะสามารถหาคำตอบของสมการได้

ในการกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปรนั้น เราต้องทำการกำหนดค่าคงที่โดยพิจารณาจากความ เป็นจริงทั้งในทางปฏิบัติและทางทฤษฎีประกอบ เพื่อไม่ให้เกิดความขัดแย้งขึ้นในการแก้สมการ นั่นก็คือเราไม่สามารถกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปรอย่างอิสระได้เอง เช่นกำหนด X_c กับ X_m เป็นตัวแปร และให้ค่าอื่นๆเป็นค่าคงที่ เพราะจะไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติอีกทั้งไม่สามารถแก้สมการได้ด้วย

เพื่อให้เป็นการเข้าใจได้ง่ายในการอธิบายวิธีการและเหตุผลในการกำหนดตัวแปรนั้น เราจะทำการแยกการไหลของพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง ออกเป็นดังรูปที่ 4.6 และเมื่อใช้กฎการอนุรักษ์พลังงาน จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$P_{Gen} = P_{load} + P_{loss} \quad (4.10)$$

และ

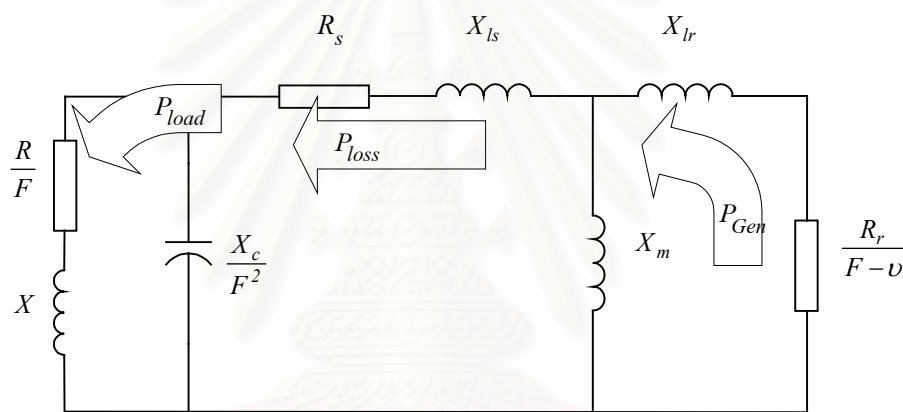
$$Q_{Cap} = Q_{load} + Q_{magnitizing} + Q_{s_leakage} + Q_{r_leakage} \quad (4.11)$$

เมื่อพิจารณารูป (ก) ซึ่งเป็นการไหลของกำลังจริง จะเห็นได้ว่ากำลังจริงที่ไหลอยู่ในวงจรจะขึ้นอยู่กับค่า F, v และ R ถ้าหากเราทำการกำหนดให้ตัวแปรทั้ง 3 ค่านี้เป็นค่าคงที่พร้อมกัน จะทำให้ความสัมพันธ์ที่ 4.10 ไม่เป็นจริง จึงเท่ากับว่าเราไม่สามารถกำหนดให้ตัวแปรทั้ง 3 ตัวเป็นค่าคงที่พร้อมกันได้ และเมื่อพิจารณาถึงผลในทางปฏิบัติ เช่น หากเราทำการหมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ก็จะได้ความถี่ทางไฟฟ้าค่าหนึ่งที่สอดคล้องกันซึ่งเราไม่สามารถกำหนดหรือเปลี่ยนแปลงให้เป็นค่าอื่นได้ หรือในทางกลับกัน ถ้าเราต้องการความถี่ทางไฟฟ้าตามที่เรากำหนด ก็จะต้องทำการเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ จึงเท่ากับว่า ตัวแปร F และ v ทั้ง 2 ตัวนี้มีความสัมพันธ์กันอยู่ เราสามารถกำหนดค่าคงที่ให้กับค่า F หรือ v เพียงตัวเดียวเท่านั้น ส่วนอีกตัวแปรที่เหลือจะต้องปล่อยให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเสมอ ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปร R ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ด้วย

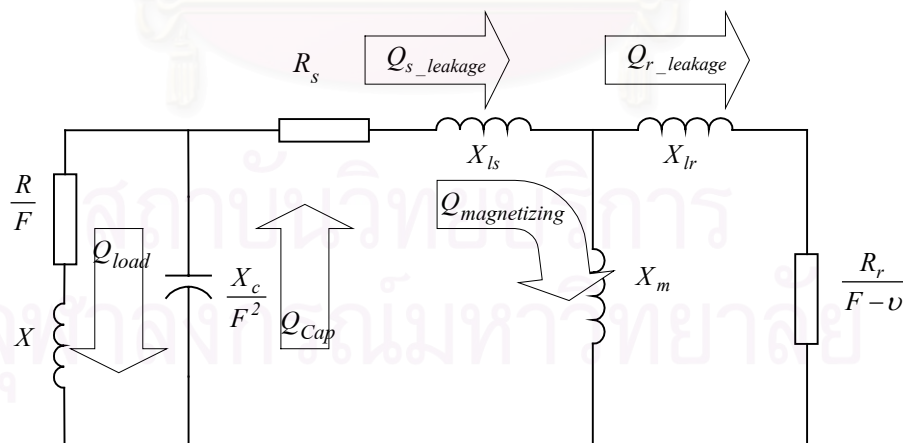
และในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณารูป (ข) ซึ่งเป็นการไหลของกำลังรีแอกทีฟ จะเห็นได้ว่ากำลังรีแอกทีฟที่ไหลอยู่ในวงจรจะขึ้นอยู่กับค่า X_c, X_m และ X ถ้าหากเราทำการกำหนดให้ตัวแปรทั้ง 3 ค่านี้เป็นค่าคงที่พร้อมกัน จะทำให้ความสัมพันธ์ที่ 4.11 ไม่เป็นจริง จึงเท่ากับว่าเราไม่สามารถ

กำหนดให้ตัวแปรทั้ง 3 ตัวเป็นค่าคงที่พร้อมกันได้ และเมื่อพิจารณาถึงผลในทางปฏิบัติ เช่น หากเราทำการติดตั้งตัวเก็บประจุค่าหนึ่ง ก็จะได้แรงดันไฟฟ้าในสถานะกระตุ้นตัวเองค่าหนึ่งที่สอดคล้องกัน ซึ่งเราไม่สามารถกำหนดหรือเปลี่ยนแปลงให้เป็นค่าอื่นได้ หรือในทางกลับกัน ถ้าเราต้องการแรงดันทางไฟฟ้าตามที่เรากำหนด ก็จะต้องทำการเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุ จึงเท่ากับว่า ตัวแปร X_C และ X_m ทั้ง 2 ตัวนี้มีความสัมพันธ์กันอยู่ เราสามารถกำหนดค่าคงที่ให้กับค่า X_C และ X_m เพียงตัวเดียวเท่านั้น ส่วนอีกตัวแปรที่เหลือจะต้องปล่อยให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเสมอ ดังนั้นตัวแปร X จะต้องถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ด้วย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาวิธีในการทดลองสถานะกระตุ้นตัวเอง จะพบว่าเราต้องทำการติดตั้งโหลดไว้เรียบร้อยแล้ว จึงเท่ากับว่า เรากำหนดค่า R และ X เป็นค่าคงที่ไว้แล้ว



ก) กำลังจริง



ข) กำลังเสมือน

รูปที่ 4.6 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะกระตุ้นตัวเอง

4.4 ปัจจัยในการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและหมุนโรเตอร์ ก็จะเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง สร้างแรงดันและกระแสเพื่อจ่ายโหลด สิ่งที่เราสนใจก็คือ ตัวเก็บประจุที่ติดตั้งนั้นเพียงพอที่จะเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองหรือไม่ ถ้าเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองขึ้นแล้ว ขนาดของแรงดันและความถี่ที่ได้เป็นอย่างไร และจุดทำงานที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปอย่างไรเมื่อเราทำการเปลี่ยน ขนาดตัวเก็บประจุ ความเร็วโรเตอร์ หรือโหลด

4.4.1 วิธีการศึกษา[15,16]

จากคำถามข้างต้น จะเห็นได้ที่เราทำการกำหนดขนาดตัวเก็บประจุและความเร็วโรเตอร์ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ซึ่งเท่ากับว่าเรากำหนดค่า X_c, v และโหลดไว้เป็นค่าคงที่ ดังนั้นตัวแปรในความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.28 และ 3.29 จะเหลือเพียง X_m กับ F ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$(C_1 X_m + C_2) F^3 + (C_3 X_m + C_4) F^2 + (C_5 X_m + C_6) F + C_7 X_m + C_8 = 0 \quad (4.12)$$

และ

$$(D_1 X_m + D_2) F^4 + (D_3 X_m + D_4) F^3 + (D_5 X_m + D_6) F^2 + (D_7 X_m + D_8) F + D_9 = 0 \quad (4.13)$$

โดยที่

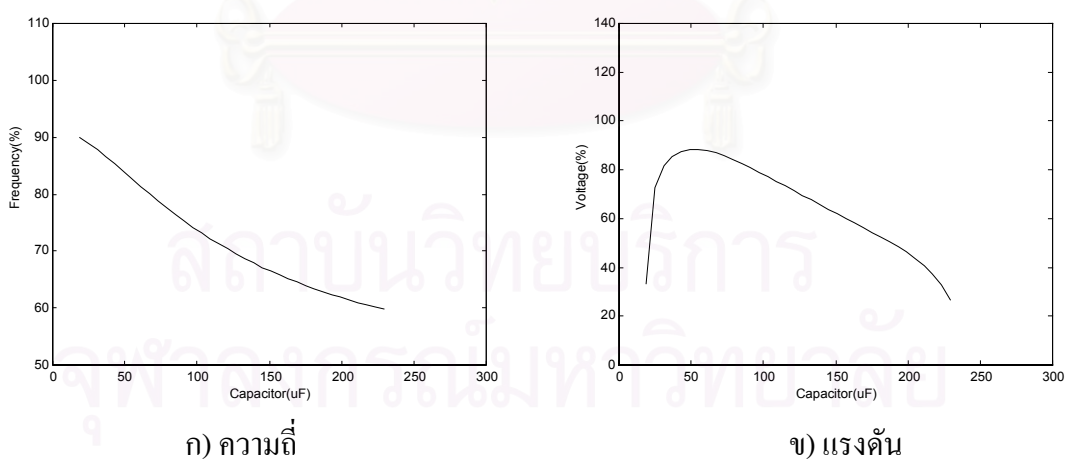
$C_1 = A_1$	$D_1 = B_1$	$D_2 = B_2$
$C_2 = A_2$	$D_3 = B_3 v$	
$C_3 = A_3 v$	$D_4 = B_4 v$	
$C_4 = A_4 v$	$D_5 = B_5 X_c + B_7$	
$C_5 = A_5 X_c$	$D_6 = B_6 X_c + B_8$	
$C_6 = A_6 X_c + A_7$	$D_7 = (B_9 X_c + B_{11}) v$	
$C_7 = A_8 X_c v$	$D_8 = (B_{10} X_c + B_{12}) v$	
$C_8 = A_9 X_c v$	$D_9 = B_{13} X_c$	

หากทำการแก้สมการที่ 4.12 และ 4.13 ก็จะได้ค่าของ X_m และ F ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสภาวะกระตุ้นตัวเอง แต่ถ้าหากไม่มีคำตอบที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดให้ แสดงว่าไม่สามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองในเงื่อนไขนั้นได้ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนในการหาคำตอบได้ดังนี้

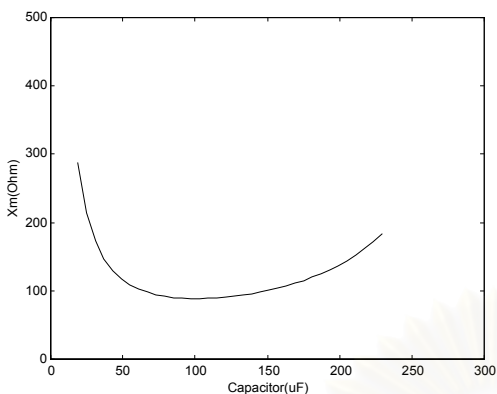
1. กำหนดค่า X_c v และ โหลด
2. ทำการแก้สมการ 4.12 และ 4.13 เพื่อหาค่า X_m และ F ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน
 - ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้ แสดงว่าไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง
 - ถ้าหาคำตอบได้ ก็นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า V_g จากสมการที่ 4.9 และค่า I_s, V_L, I_L จากสมการที่ 3.30- 3.33

4.4.2 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

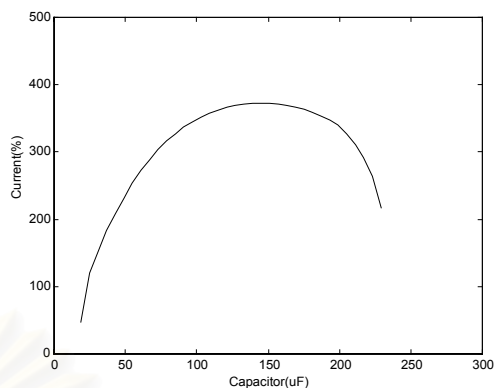
จากรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง เมื่อควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 1.01 pu. (1515 rpm) ที่ $R = 1$ pu. (188 ohm) จะพบว่าสามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ขนาดตัวเก็บประจุในช่วง 19-234 μF โดยในช่วงแรก แรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเก็บประจุ แต่พอตัวเก็บประจุมีค่าประมาณ 50 μF ขนาดแรงดันจะมีค่าลดลง ส่วนความถี่มีค่าลดลงตั้งแต่ 90% เมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุจนถึงประมาณ 60 % ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ จะแสดงไว้ดังในรูป



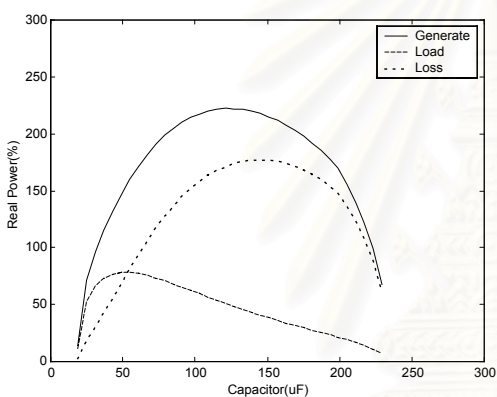
รูปที่ 4.7 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ขนาดตัวเก็บประจุค่าต่างๆ



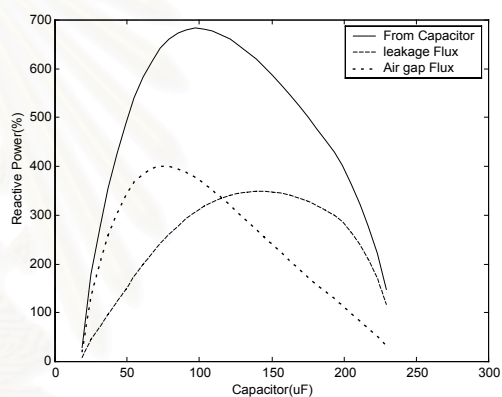
ก) X_m



ง) กระแสเตเตอร์



จ) กำลังจริง



ฉ) กำลังเสมือน

รูปที่ 4.7 (ต่อ) ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ขนาดตัวเก็บประจุค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 ก จะเห็นได้ว่าถ้าใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็ก จะไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง เนื่องจากปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กยังไม่เพียงพอซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่แล้ว แต่เมื่อถึงตัวเก็บประจุค่าหนึ่ง ก็จะเริ่มมีเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองและสร้างแรงดันเกิดขึ้น และเมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุไปเรื่อยๆ ก็จะได้แรงดันที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะตัวเก็บประจุมีหน้าที่จ่ายกำลังรีแอคทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก(ตามรูปที่ 4.6 ข) เมื่อใช้ตัวเก็บประจุตัวใหญ่ขึ้น ก็จะสามารถจ่ายกำลังรีแอคทีฟเพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศได้มากขึ้น แรงดันที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นไปด้วย แต่พอถึงช่วงหนึ่งแรงดันจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่ค่าอิมพีแดนซ์ทางฝั่งโรเตอร์มีค่าลดลงเมื่อความถี่ต่ำลง(ค่า $\frac{R}{F-\omega}$ ลดลง) ซึ่งจะทำให้กำลังส่วนใหญ่ไหลมาทางฝั่งโรเตอร์มากกว่า ทำให้กำลังรีแอคทีฟที่จะส่งไปสร้างฟลักซ์แม่เหล็กใน

ช่องอากาศลดลง แรงดันที่ได้จึงต่ำลงจนในที่สุดปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กก็ไม่เพียงพอสำหรับการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 ก ซึ่งแสดงการไหลของกำลังจริง จะพบว่ากำลังจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตได้จะแปรตามค่า $\frac{R}{F-v}$ ถ้าหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องจ่ายกำลังจริงมาก ค่า $\frac{R}{F-v}$ ก็จะมีค่าลดลง ในเมื่อค่าความเร็วโรเตอร์ v มีค่าคงที่ ค่าความถี่ F จึงต้องมีค่าลดลงเมื่อจ่ายโหลดมากขึ้น ดังนั้นจึงแสดงได้ว่าความถี่ของไฟฟ้านั้นจะแปรผกผันกับกำลังจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องจ่ายในสถานะกระตุ้นตัวเอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องจ่ายกำลังออกมากขึ้น ความถี่ก็จะลดลง

เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุให้มีขนาดมากขึ้น จะทำให้แรงดันมากขึ้นและสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ความถี่ลดลงดังรูป 4.7 ก แต่เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุไปเรื่อยๆ แรงดันจะตกลง ทำให้จ่ายโหลดได้ลดลงซึ่งน่าจะส่งผลให้ความถี่เพิ่มขึ้นแต่ความถี่กลับลดลงอีก เนื่องจากกระแสเตเตอร์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้นด้วยตามรูปที่ 4.7 จ จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องจ่ายกำลังจริงมากขึ้น ส่งผลให้ความถี่ลดลง

จากผลที่เกิดขึ้นจะพบว่าในสถานะกระตุ้นตัวเอง จะมีจุดทำงานได้มากมายตั้งแต่ตัวเก็บประจุขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งต่างก็ให้จุดทำงานที่แตกต่างกันออกไป เมื่อพิจารณาผลโดยรวมแล้วพบว่า ถ้าใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่จะทำให้จุดทำงานที่เกิดขึ้นนั้น ไม่สามารถนำไปใช้ได้เนื่องจากกระแสเตเตอร์มีค่าสูงถึง 350% ของค่ากระแสพิกัด ซึ่งหากนำไปใช้งานจะก่อให้เกิดความเสียหายกับเครื่องจักรกลได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากกว่ากำลังที่ใช้จ่ายโหลด นอกจากนี้ยังทำให้ความถี่ลดลงเหลือเพียง 60% ของความถี่พิกัด เนื่องจากต้องจ่ายกำลังออกมาก ซึ่งความถี่นี้มีค่าต่ำเกินไป ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

จากผลข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยภายนอกต่างๆ จะเป็นตัวกำหนดจุดทำงานของสถานะกระตุ้นตัวเอง ก่อให้เกิดการสร้างแรงดันและความถี่ ซึ่งทั้งแรงดันและความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวโยงกันอยู่ เมื่อสิ่งหนึ่งเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลกระทบให้อีกสิ่งหนึ่งเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานเป็นไปได้ค่อนข้างลำบาก

สรุปได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุในปริมาณที่พอเหมาะ ไม่มากหรือน้อยเกินไป จึงจะสามารถเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองได้ ดังนั้นการติดตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เกินไป ก็จะไม่เกิดประโยชน์ต่อการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง อีกทั้งยังอาจส่งผลให้

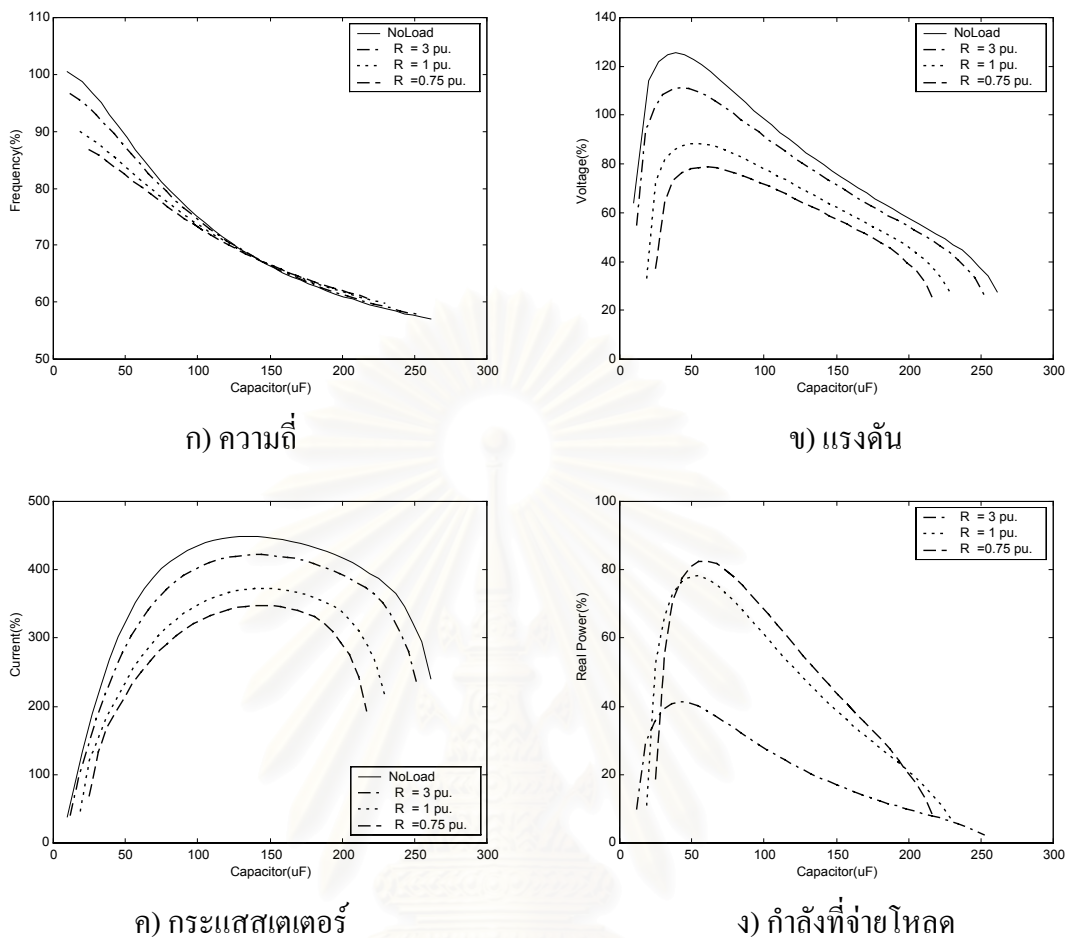
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเสียหายได้ แต่ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กเกินไปก็จะไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

4.4.3 ขนาดโหลดกับผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดโหลดโดยยังให้มีค่าตัวประกอบกำลังและความเร็วโรเตอร์เป็น 1 และ 1.01 pu เท่าเดิม แล้วทำการวิเคราะห์ผล จะได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่า เมื่อโหลดมีค่ามากขึ้นทั้งความถี่และแรงดันก็จะมีค่าลดลงไปด้วย นอกจากนี้จะพบว่าถ้าโหลดมากขึ้น ขนาดตัวเก็บประจุที่จะทำให้เริ่มเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย

ในขณะที่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองในสภาวะไร้โหลด หากเราทำการเชื่อมโยงโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องจ่ายกำลังออกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความถี่ลดลง ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว หากสมมติให้แรงดันคร่อมช่องอากาศมีค่าคงที่ เมื่อมีการจ่ายโหลด จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์มากขึ้นด้วย แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจึงมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่ส่งเข้ามายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วย และเนื่องจากแรงดันคร่อมช่องอากาศแปรตามปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลเข้ามายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงทำให้แรงดันคร่อมช่องอากาศมีค่าลดลงไปด้วย หากยังสามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองต่อไปได้ ก็จะได้ผลดังแสดงในรูป ซึ่งก็คือ ทั้งความถี่ แรงดันและกระแสสเตเตอร์ที่ลดลง (ตามรูปที่ 4.8) แต่ถ้าหากปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองต่อได้ หากต้องการให้เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ก็จำเป็นต้องเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุให้มีขนาดมากขึ้น เพื่อให้ได้ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่เพียงพอสำหรับการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

สาเหตุที่ความถี่ลดลงนั้นเกิดจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องจ่ายกำลังจริงเพิ่มมากขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ดังนั้นเมื่อความถี่ลดลงประกอบกับกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุมีค่าลดลง ก็จะส่งผลให้แรงดันลดลงด้วย เมื่อแรงดันลดลงก็จะส่งผลให้กระแสสเตเตอร์และกำลังสูญเสียมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.8 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่โหลดค่าต่างๆ

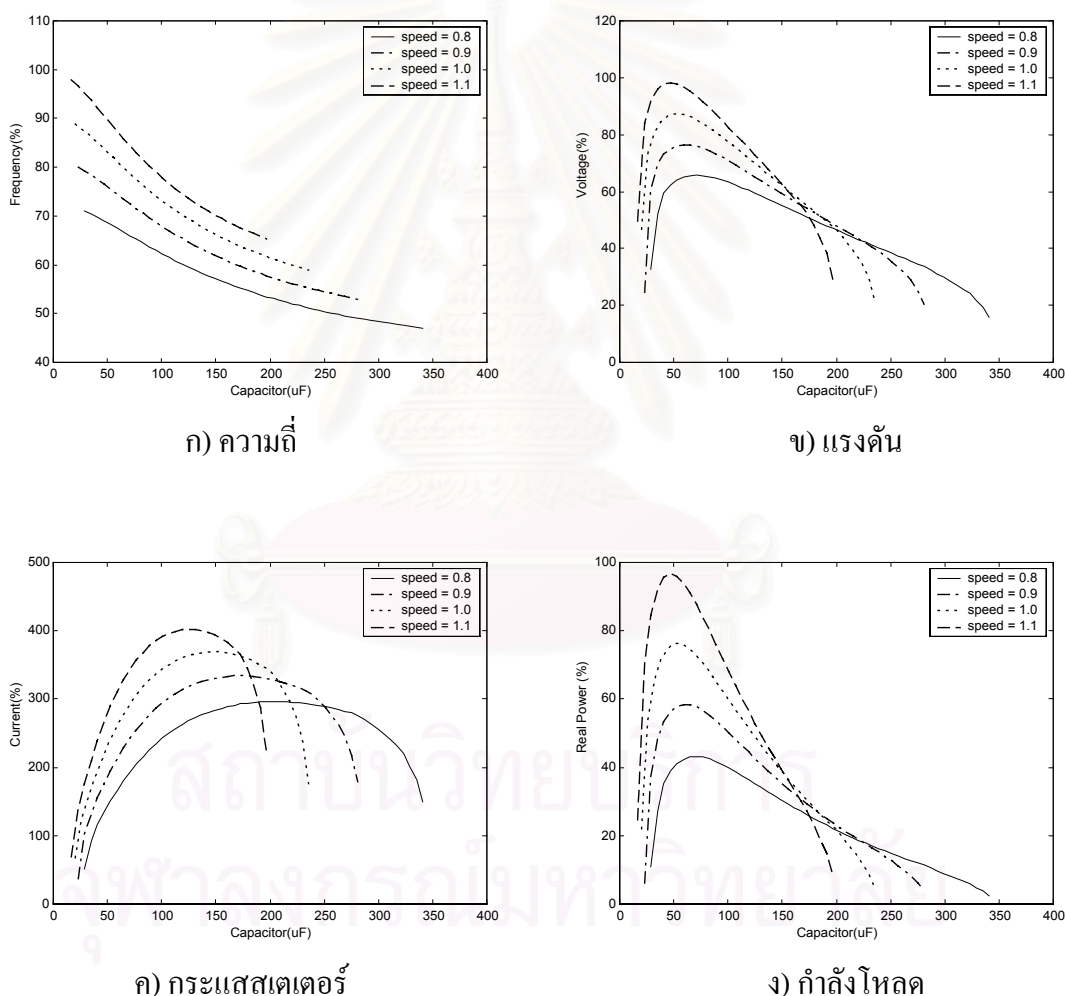
4.4.4 ความเร็วโรเตอร์กับผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์โดยยังให้โหลด R มีค่าเป็น 1 pu และมีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 เท่าเดิม ทำการวิเคราะห์ผล จะได้ผลดังรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่า เมื่อความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความถี่และแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น

ในขณะที่ เราจ่ายโหลดและหมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ให้มีความมากขึ้น จะทำให้กำลังจริงที่ผลิตได้มีค่ามากขึ้นด้วย แต่เมื่อเราไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงโหลด นั่นก็คือปริมาณกำลังจริงที่ไหลในวงจรจะต้องมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงทำให้ ความถี่ทางไฟฟ้าต้องปรับตัวให้มีความมากขึ้นไปด้วย ซึ่งการที่ความถี่ทางไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นนี้ จะส่งผลให้แรงดันในช่อง

อากาศมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มมากขึ้นและทำให้แรงดันที่คร่อมโหลดและตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ในทางกลับกันหากลดความเร็วโรเตอร์ลงก็จะให้ผลในทางตรงกันข้าม

นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วโรเตอร์ ยังส่งผลต่อช่วงของการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองด้วย เพราะการเพิ่มความเร็วโรเตอร์ จะส่งผลให้แรงดันมีค่ามากขึ้น จึงเท่ากับว่าเราสามารถลดขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่าเล็กลงได้ โดยที่ยังได้กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุเท่าเดิม ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ถ้าเราเพิ่มความเร็วโรเตอร์ให้มากขึ้น ขนาดตัวเก็บประจุที่จะทำให้เริ่มเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองจะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.9 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่ความเร็ว โรเตอร์ค่าต่างๆ

จากผลการศึกษา สามารถสรุปปัจจัยในการเกิดภาวะกระตุ้นตัวเองได้ดังนี้

1. ตัวเก็บประจุ ยิ่งมีขนาดใหญ่จะช่วยให้แรงดันมากแต่ถ้าใหญ่เกินไปแรงดันจะเริ่มตก ส่วนความถี่จะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ
2. ขนาดโหลด เมื่อเพิ่มโหลด ทั้งแรงดันและความถี่ก็จะลดลง
3. ความเร็วโรเตอร์ เมื่อความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น ทั้งความถี่และแรงดันก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

4.5 ภาวะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าช่วงของขนาดตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดภาวะกระตุ้นตัวเอง นั้นค่อนข้างกว้าง อีกทั้งจุดทำงานก็แตกต่างกันมาก ซึ่งจุดทำงานบางจุดไม่สามารถนำไปใช้ได้เพราะว่าแรงดันและกระแสสูงเกินไป หรือไม่ก็ความถี่ต่ำเกินไป ดังนั้นในการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องเลือกจุดทำงานที่เหมาะสม

ในการนำไปใช้งาน สิ่งที่เราต้องการก็คือพยายามควบคุมให้ค่าแรงดันมีค่าใกล้เคียงค่าพิกัด เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ นั่นก็คือเราต้องการให้แรงดันที่ปลายขดลวดสเตเตอร์ (V_r) มีค่าคงที่ ดังนั้นเราจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่จะควบคุมหรือส่งผลต่อการเกิดภาวะกระตุ้นตัวเองเมื่อพยายามควบคุมให้แรงดันมีค่าคงที่

4.5.1 วิธีการศึกษา[15,16]

ในการควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ เราสามารถควบคุมผ่านค่า X_m โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ 4.9 และเมื่อเรากำหนดความเร็วโรเตอร์และขนาดโหลดเพิ่มขึ้นอีก จะทำให้ความสัมพันธ์ที่ 3.28 และ 3.29 เหลือตัวแปร 2 ตัวคือขนาดตัวเก็บประจุและความถี่ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$G_1 F^3 + G_2 F^2 + (G_3 X_c + G_4) F + G_5 X_c = 0 \quad (4.14)$$

และ

$$H_1 F^4 + H_2 F^3 + (H_3 X_c + H_4) F^2 + (H_5 X_c + H_6) F + H_7 X_c = 0 \quad (4.15)$$

โดยที่

$$G_1 = A_1 X_m + A_2$$

$$G_2 = (A_3 X_m + A_4) \nu$$

$$G_3 = A_5 X_m + A_6$$

$$G_4 = A_7$$

$$G_5 = (A_8 X_m + A_9) \nu$$

$$H_1 = B_1 X_m + B_2$$

$$H_2 = (B_3 X_m + B_4) \nu$$

$$H_3 = B_5 X_m + B_6$$

$$H_4 = B_7 X_m + B_8$$

$$H_5 = (B_9 X_m + B_{10}) \nu$$

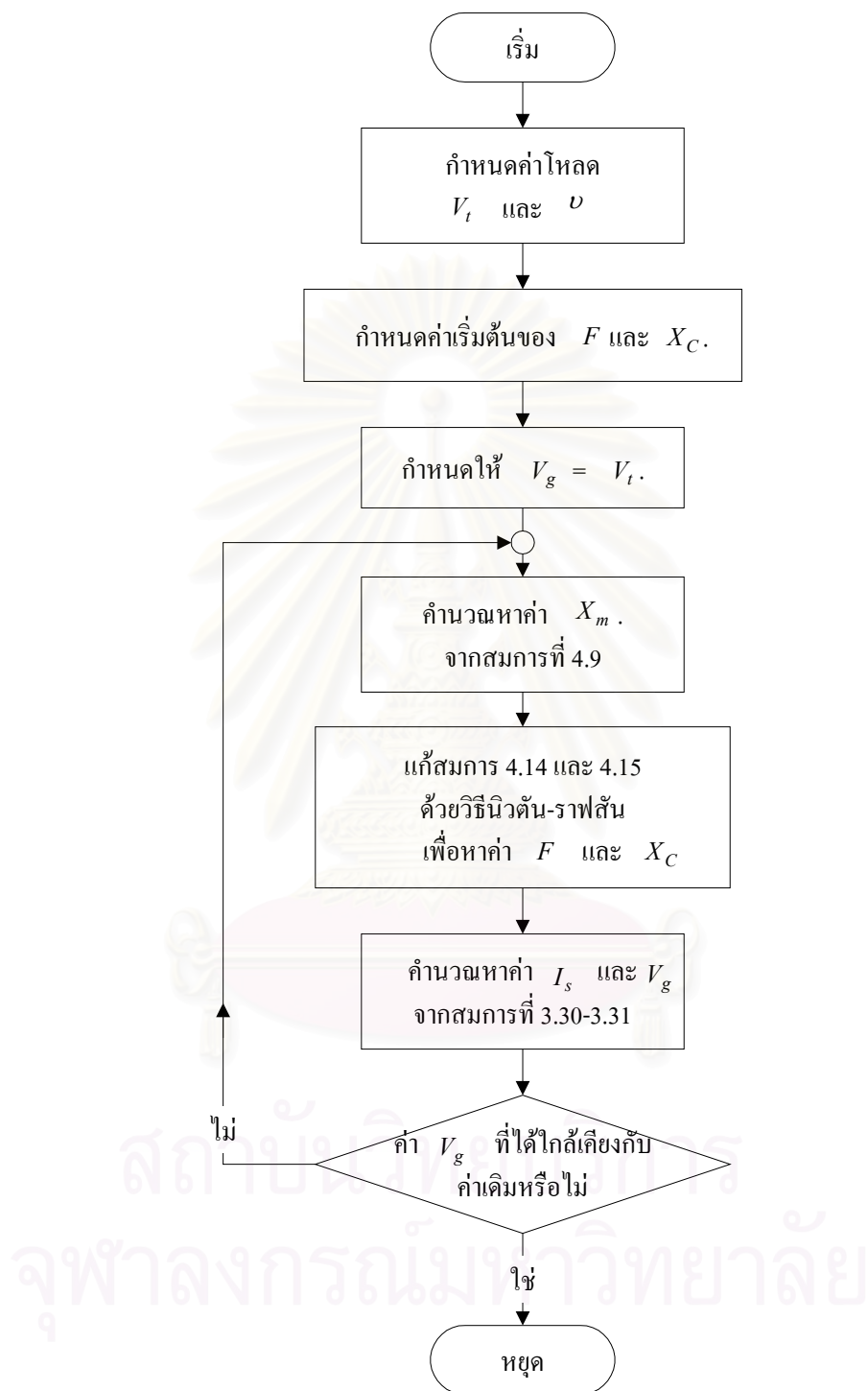
$$H_6 = (B_{11} X_m + B_{12}) \nu$$

$$H_7 = B_{13}$$

หากทำการแก้สมการที่ 4.14 และ 4.15 ก็จะได้ค่า X_c และ F ซึ่งก็คือขนาดตัวเก็บที่ทำให้แรงดันในสถานะกระตุ้นตัวเองมีค่าตามต้องการและค่าความถี่ที่เกิดขึ้น แต่ถ้าหากไม่มีคำตอบที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดให้ แสดงว่าไม่สามารถรักษาแรงดันได้ตามต้องการ โดยในการคำนวณจะมีขั้นตอนดังนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.10)

1. กำหนดค่า V_t ν และ โหลด
2. สมมุติค่าเริ่มต้นให้กับ X_c และ F
3. กำหนดให้ $V_g = V_t$
4. คำนวณค่า X_m จากสมการที่ 4.9 ได้
5. ทำการแก้สมการ 4.14 และ 4.15 เพื่อหาค่า X_c และ F ด้วยวิธีนิวตัน
6. คำนวณหาค่า I_s และ V_g จากสมการที่ 3.30-3.31
7. ทำซ้ำข้อ 4-6 จนกว่า V_g จะลู่เข้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



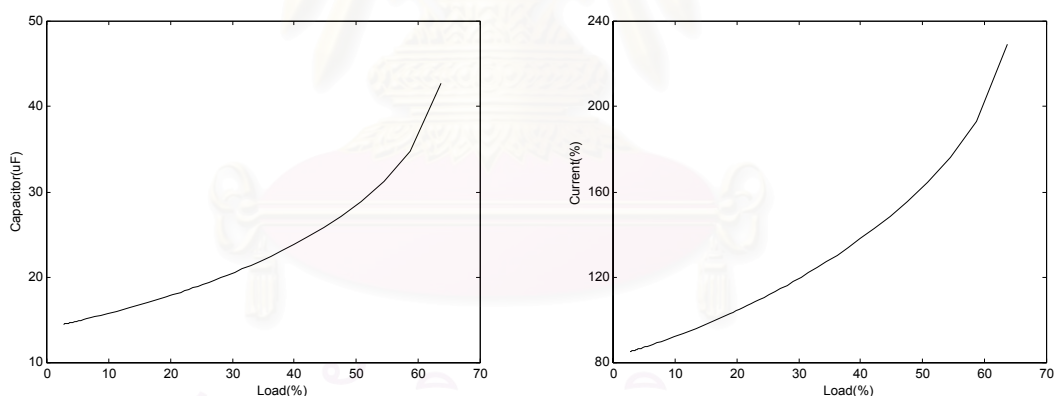
รูป 4.10 ขั้นตอนการศึกษาผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง เมื่อแรงดันคงที่

4.5.2 ผลของการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่

เมื่อควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1.01 pu. (1515 rpm) และทำการเพิ่มโหลดที่มีตัวประกอบกำลังเป็น 1 ไปเรื่อยๆ โดยพยายามควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 1 pu. (220 โวลต์) ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.11

จากกราฟ เมื่อทำการเพิ่มขนาดโหลด ไปเรื่อยๆ ขนาดตัวเก็บประจุก็จะต้องมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มโหลดจะทำให้แรงดันตกลง ดังนั้นหากต้องการคงค่าแรงดันไว้ก็จะต้องทำการเพิ่มปริมาณกำลังรีแอกทีฟโดยการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ แต่การเพิ่มโหลดและตัวเก็บประจุก็จะส่งผลให้ความถี่ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงไปด้วย ส่วนกระแสเตเตอร์นั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องจ่ายโหลดเพิ่มมากขึ้น

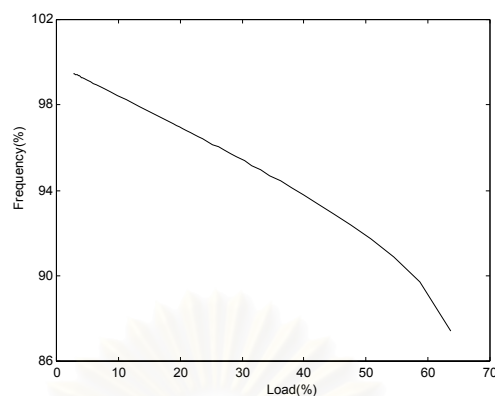
นอกจากนี้ จากผลที่ได้เราจะเห็นว่า ขนาดตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดสถานะกระตุ้นตัวเองจะอยู่ในช่วง 14-44 μF เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากหัวข้อที่ผ่านมาที่เราได้ทำการศึกษาขนาดตัวเก็บประจุทั้งหมดที่สามารถเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองซึ่งจะมีช่วงตั้งแต่ 10-350 μF โดยขึ้นกับเงื่อนไขที่กำหนด



ก) ขนาดตัวเก็บประจุ

ข) กระแสเตเตอร์

รูปที่ 4.11 ผลการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่

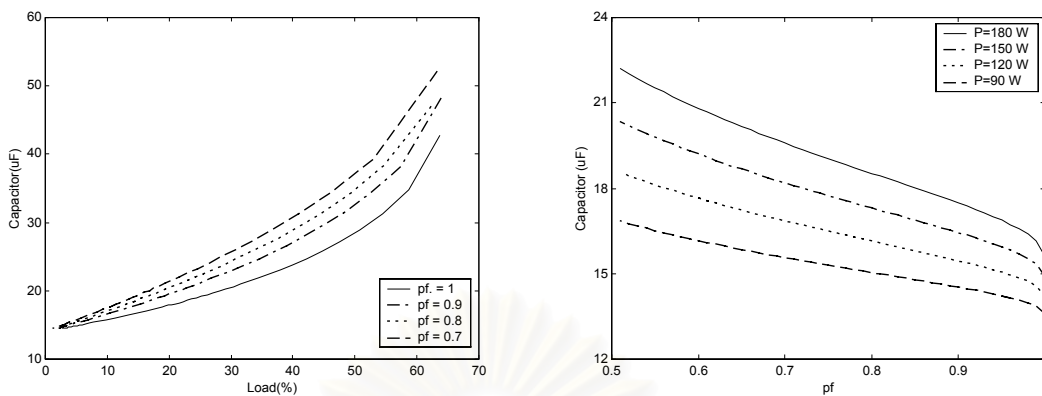


ค) ความถี่

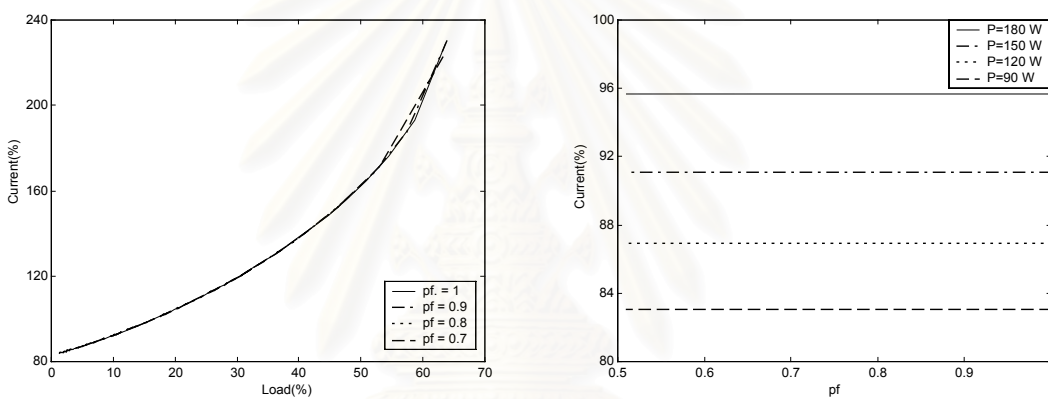
รูปที่ 4.11(ต่อ) ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่

4.5.3 ค่าตัวประกอบกำลังกับการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่

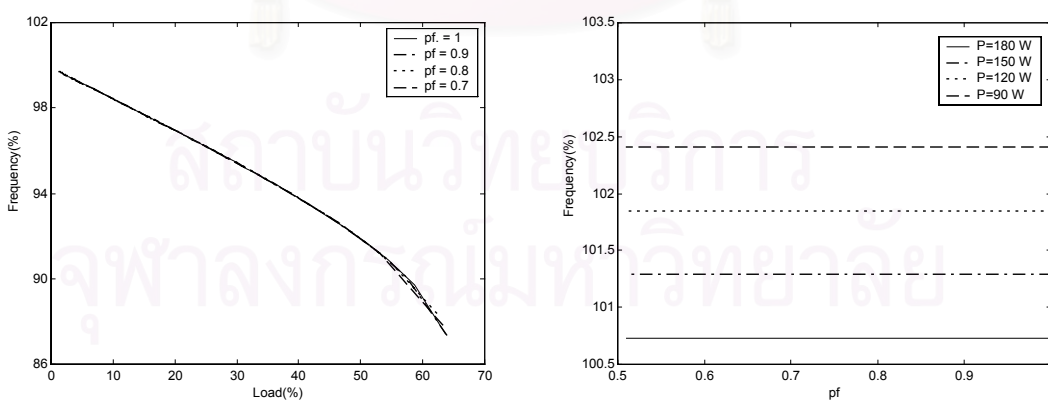
เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวประกอบกำลังของโหลดที่โหลดขนาดต่างๆ โดยยังควบคุมให้แรงดันเป็น 1 pu และโรเตอร์มีความเร็ว 1.01 pu จะพบว่ากำลังรีแอกทีฟบางส่วนจากตัวเก็บประจุจะต้องจ่ายให้กับโหลดด้วยเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายได้เพียงกำลังจริงเท่านั้น ทำให้กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่จะส่งให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าลดลง ส่งผลให้แรงดันที่ได้ต่ำลง ดังนั้นในการรักษาแรงดันให้มีค่าเท่าเดิม ก็จะต้องทำการเพิ่มตัวเก็บประจุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับโหลด นั่นก็คือปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่ไหลเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กยังคงมีค่าเท่าเดิม จึงจะทำให้ได้แรงดันเท่าเดิม หลังจากเพิ่มตัวเก็บประจุแล้วจะพบว่าความถี่และกระแสเดเตอร์ที่เกิดขึ้น จะมีค่าเท่าเดิม เช่นเดียวกับตอนที่ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดเป็น 1 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังคงจ่ายกำลังจริงและรับกำลังรีแอกทีฟเท่าเดิม ทำให้จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังคงเหมือนเดิม จึงเสมือนว่าค่าตัวประกอบกำลังของโหลดไม่ได้มีผลต่อจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่อย่างไร



ก) ขนาดตัวเก็บประจุ



ข) กระแสเตเตอร์

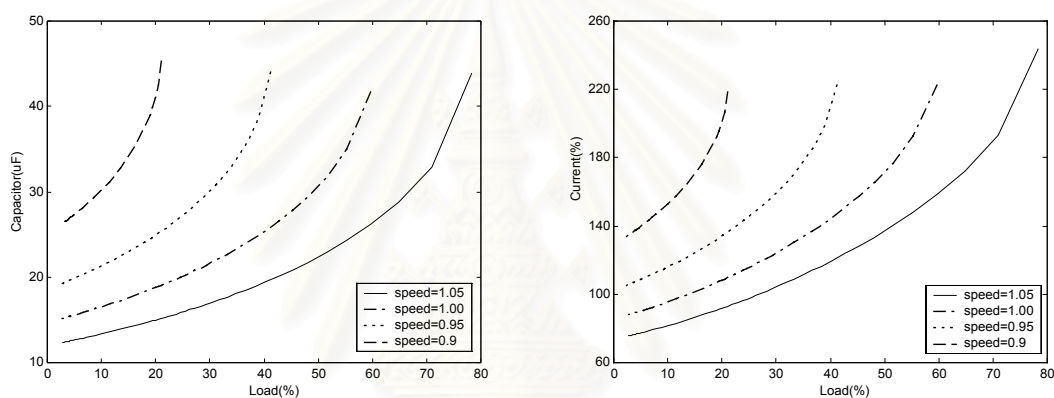


ค) ความถี่

รูปที่ 4.12 ผลการเกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองที่โหลดและค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ
เมื่อควบคุมแรงดันคงที่

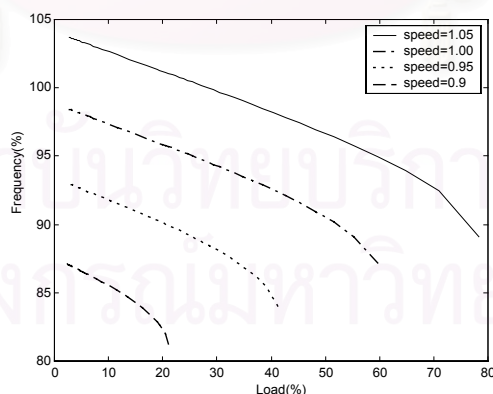
4.5.4 ความเร็วโรเตอร์กับการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อควบคุมแรงดันคงที่

เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์โดยที่ยังจ่ายโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 และรักษาแรงดันให้มีค่า 1 pu เท่าเดิม จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากผลจะเห็นได้ว่า เมื่อโรเตอร์มีความเร็วมากขึ้น เราจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็กลงในการจ่ายโหลด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เราสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุมีขนาดเท่าเดิม ส่วนความถี่ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วโรเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว



ก) ขนาดตัวเก็บประจุ

ข) กระแสเตเตอร์



ค) ความถี่

รูปที่ 4.13 ผลการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองที่ความเร็วโรเตอร์ค่าต่างๆ เมื่อควบคุมแรงดันคงที่

4.6 การหาจุดทำงานที่เหมาะสมในสถานะกระตุ้นตัวเอง

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อแรงดันมีค่าคงที่ จะเห็นได้ว่าจุดทำงานที่ได้นั้นอยู่ในช่วงที่พอจะสามารถนำไปใช้งานได้ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดโหลดและความเร็วโรเตอร์ ถ้าหากโรเตอร์มีความเร็วต่ำเกินไป ความถี่ที่ได้ก็จะต่ำ ในทางกลับกันถ้ามากเกินไปความถี่ก็อาจจะสูงเกินไป อีกทั้งยังจะส่งผลให้เครื่องจักรกลเสียหายด้วย นอกจากนี้ถ้าหากจ่ายโหลดมากเกินไปก็จะทำให้กระแสเตเตอร์เกินพิกัดส่งผลให้เครื่องจักรกลเสียหาย แต่ถ้าจ่ายโหลดต่ำเกินไปก็จะเป็นการใช้ประโยชน์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ไม่คุ้มค่า ดังนั้นปัญหาที่เรากำลังจะจัดโหลดและควบคุมความเร็วโรเตอร์อย่างไรเพื่อให้ได้จุดทำงานที่เหมาะสม

4.6.1 วิธีการศึกษา

จากปัญหาที่กล่าวไว้จะพบว่าสิ่งที่ต้องการ ก็คือพยายามรักษาแรงดันและความถี่ที่เกิดขึ้นให้มีค่าคงที่ตามต้องการ ดังนั้นจึงเป็นการกำหนดค่าคงที่ให้กับค่า X_m และ F ทำให้เหลือตัวแปรอีก 3 ตัว แต่เราไม่สามารถกำหนดค่าให้กับ X_c และ v ได้ตามที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดค่าให้กับขนาดโหลด ดังนั้นจากสมการที่ 3.28 และ 3.29 จะเขียนใหม่ได้เป็นดังสมการที่ 4.16 และ 4.17

$$M_1 X_c v + M_2 X_c + M_3 v + M_4 = 0 \quad (4.16)$$

และ

$$N_1 X_c v + N_2 X_c + N_3 v + N_4 = 0 \quad (4.17)$$

โดยที่

$$M_1 = A_8 X_m + A_9$$

$$M_2 = (A_5 X_m + A_6) F$$

$$M_3 = (A_3 X_m + A_4) F^2$$

$$M_4 = (A_1 X_m + A_2) F^3 + A_7 F$$

$$N_1 = (B_9 X_m + B_{10}) F$$

$$N_2 = (B_5 X_m + B_6) F^2 + B_{13}$$

$$N_3 = (B_3 X_m + B_4) F^3 + (B_{11} X_m + B_{12}) F$$

$$N_4 = (B_1 X_m + B_2) F^4 + (B_7 X_m + B_8) F^2$$

หลังจากนั้นทำการแก้สมการเพื่อหาค่า X_c และ v และคำนวณหาค่ากระแสเพื่อพิจารณาค่าว่าเกินพิกัดหรือไม่เพื่อไปปรับเปลี่ยนขนาดโหลดและทำการคำนวณใหม่เพื่อให้ได้ขนาดโหลดที่เหมาะสม โดยสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้(ดังแสดงในรูปที่ 4.14)

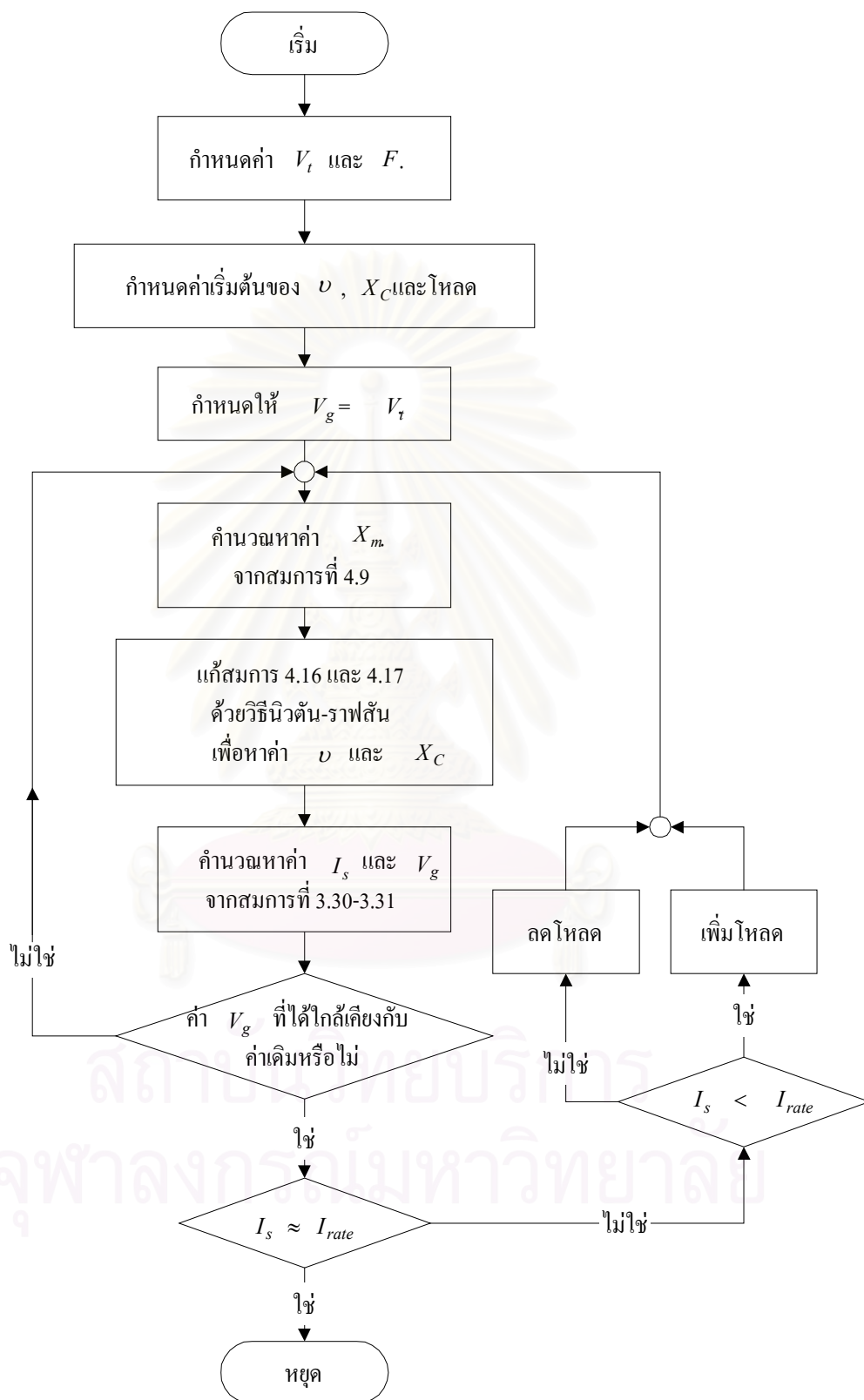
1. กำหนดค่า V_t , F และ โหลด
2. สมมุติค่าเริ่มต้นให้กับ X_c และ v
3. กำหนดให้ $V_g = V_t$
4. คำนวณค่า X_m จากสมการที่ 4.9
5. ทำการแก้สมการ 4.16 และ 4.17 เพื่อหาค่า X_c และ v ด้วยวิธีนิวตัน
6. คำนวณหาค่า I_s และ V_g จากสมการที่ 3.30 และ 3.31
7. ทำซ้ำข้อ 4-6 จนกว่า V_g จะลู่เข้า
8. แล้วทำซ้ำขั้นตอน 4-7 จนกว่า $I_s \approx I_{rate}$ จึงหยุดโดยที่
 - ถ้า $I_s > I_{rate}$ ให้ทำการลดโหลด
 - ถ้า $I_s < I_{rate}$ ให้ทำการเพิ่มโหลด

4.6.2 ผลการวิเคราะห์จุดทำงานที่เหมาะสม

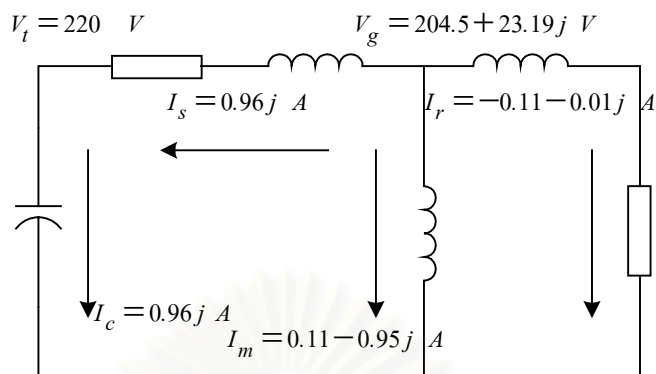
จากการหาจุดทำงานที่เหมาะสมตามขั้นตอนที่ได้เสนอไว้ จะได้จุดทำงานที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะต่างๆ ดังแสดงในตาราง และรูปที่ 4.15-4.17

ตารางที่ 4.4 จุดทำงานที่เหมาะสมจากการคำนวณที่เงื่อนไขต่างๆ

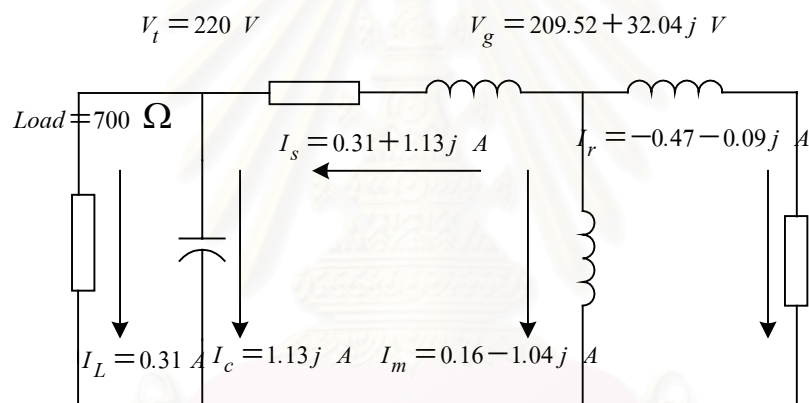
	ไว้โหลด	จ่ายโหลด pf=1	จ่ายโหลด pf=0.8
ความเร็วโรเตอร์ (pu.)	1.01	1.05	1.05
จ่ายโหลดกำลังจริง (W/ phase)	0	69.1	67.2
จ่ายโหลดกำลังเสมือน (Var/phase)	0	0	50.4
ขนาดตัวเก็บประจุ (μF /phase)	13.98	16.29	19.66
กำลังเสมือนจากตัวเก็บประจุ (Var/phase)	215.57	247.63	298.94



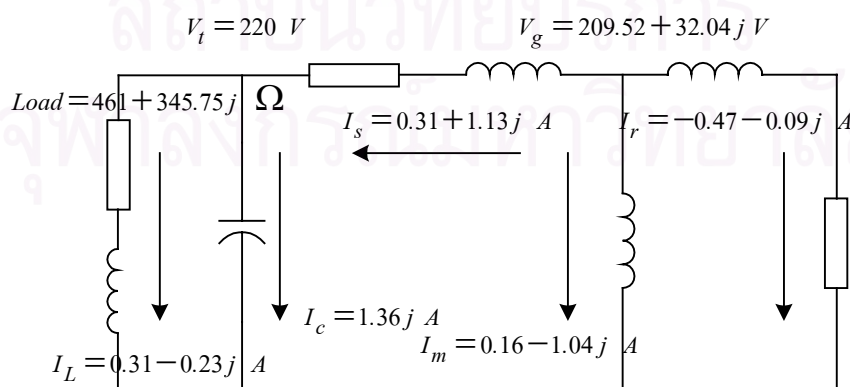
รูป 4.14 ขั้นตอนการหาจุดทำงานที่เหมาะสมในสภาวะกระตุ้นตัวเอง



รูปที่ 4.15 จุดทำงานที่เหมาะสมในสภาวะไร้โหลด



รูปที่ 4.16 จุดทำงานที่เหมาะสมในขณะที่จ่ายโหลด pf=1 ด้วยกระแสพิกัด



รูปที่ 4.17 จุดทำงานที่เหมาะสมในขณะที่จ่ายโหลด pf=0.8 ด้วยกระแสพิกัด

จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อนำไปทำการทดลองเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลเหนียวนำขนาด 0.37 kW จะได้ผลตามตาราง

ตารางที่ 4.5 จุดทำงานที่ได้จากการทดลองสภาวะกระตุ้นตัวเองที่เงื่อนไขต่างๆ

	ไร้โหลด	จ่ายโหลด pf=1
ความเร็วโรเตอร์ (pu.)	1.01	1.05
ขนาดความต้านทาน (Ω)	0	700
ขนาดตัวเก็บประจุ (μF /phase)	13.98	16.29
แรงดัน (Volt)	218.5	223.4
ความถี่ (Hz)	50	50

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแล้วจะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้สามารถนำไปใช้กำหนดจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำที่เหมาะสมได้

แต่ในทางปฏิบัติเราอาจไม่สามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำทำงานตามจุดทำงานที่กำหนดขึ้นได้ เนื่องจากขนาดตัวเก็บประจุที่มีขายอยู่อาจไม่มีขนาดที่พอดีกับที่ต้องการตามที่ได้คำนวณไว้ ดังนั้นเราจึงต้องเลือกตัวเก็บประจุขนาดที่เล็กหรือใหญ่กว่ามาใช้งานแทน โดยจะใช้ข้อมูลตามที่ได้ศึกษาไว้ในหัวข้อที่แล้วเป็นแนวทางในการเลือกตัวเก็บประจุประกอบการปรับเปลี่ยนขนาดโหลดและความเร็วโรเตอร์ เพื่อให้ได้จุดทำงานใกล้เคียงตามที่ต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในปัจจุบัน

ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้กันบ้างในประเทศไทย โดยเป็นการใช้งานในลักษณะที่เชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง ในบทนี้เรากล่าวถึงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในปัจจุบันและทำการศึกษาถึงวิธีการใช้งาน เพื่อทำการปรับปรุงการใช้งานและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้งานในสภาวะกระตุ้นตัวเอง

5.1 ข้อมูลการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

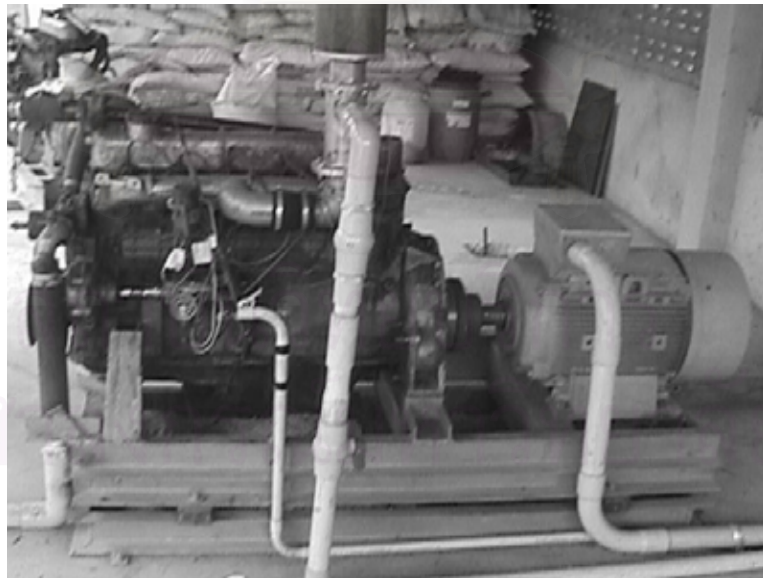
จากผลการตรวจวัดการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวอย่างจากฟาร์มเลี้ยงสุกรต่างๆ ในจังหวัดราชบุรี ซึ่งใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เป็นเชื้อเพลิง ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.1 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

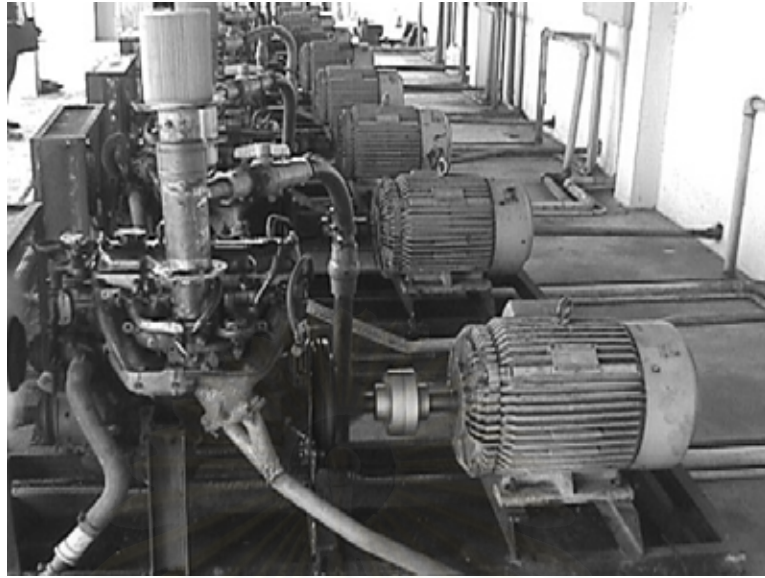
	เครื่องที่ 1	เครื่องที่ 2	เครื่องที่ 3
ขนาดเครื่องยนต์ต้นกำลังขับ (แรงม้า)	60	60	60
แรงดันสาย (Volt)	383	396	408
กระแส -3 เฟส (A)	50	67	65
ตัวประกอบกำลัง	-0.74	-0.72	-0.62
ความเร็วรอบ (rpm)	1512	1525	1513
จ่ายกำลังจริง-3 เฟส(kW)	24.7	33.5	28.4
รับกำลังรีแอกทีฟ-3 เฟส(kVar)	22	32.15	35.62



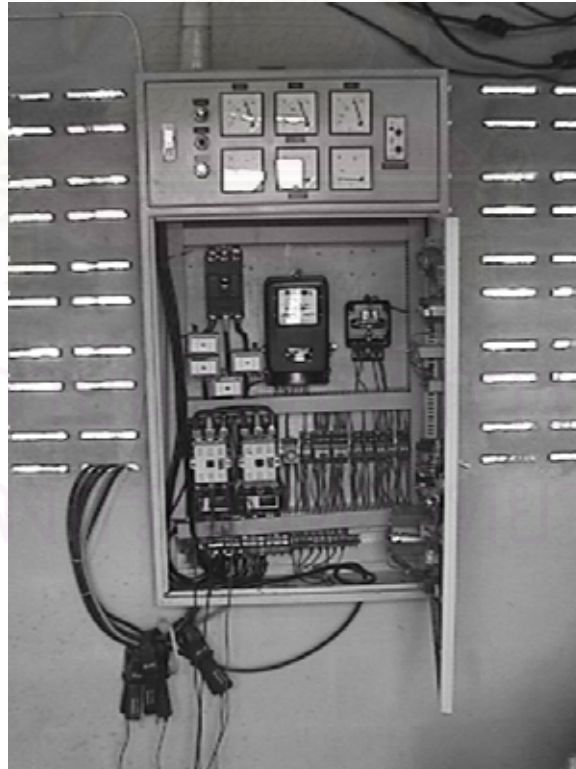
รูปที่ 5.1 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพร้อมอุปกรณ์ควบคุม



รูปที่ 5.2 ชุดเครื่องยนตร์ขับเคลื่อนและมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.4 แผงควบคุมการทำงาน

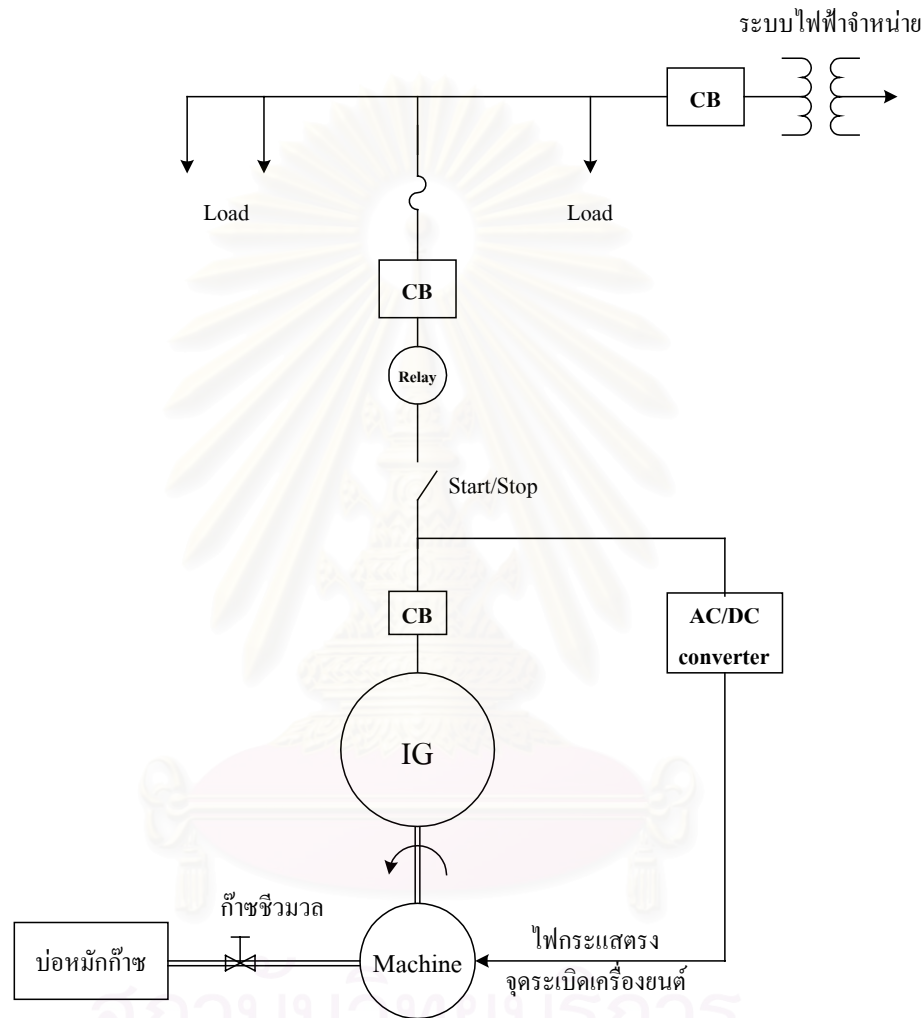


รูปที่ 5.5 บ่อหมักมูลสัตว์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

ในรูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยเป็นการนำมอเตอร์เก่าที่ซื้อมาในราคาไม่แพงมากนักมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและนำเครื่องยंत्रดีเซลเก่ามาทำการตัดแปลงเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงแทนได้ ดังแสดงในรูป 5.2 ส่วนในรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นจำนวนมากที่มีใช้อยู่ในฟาร์มแห่งนี้ นอกจากนี้ยังมีแผงควบคุม(ดังแสดงในรูป 5.4) เพื่อทำการเชื่อมโยงวงจรเข้ากับระบบของการไฟฟ้า ภายในตู้ควบคุมจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจร รีเลย์ที่ใช้ในการตรวจวัดความผิดปกติของไฟฟ้า หม้อแปลงไฟตรงที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการจุดระเบิดเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 5.6

ในการเริ่มทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผู้ควบคุมมีหน้าที่กดปุ่ม Start และทำการเปิดวาล์วควบคุมและปรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็สามารถทำงานได้โดยไม่ยุ่งยาก เนื่องจากระบบต่างๆ ถูกออกแบบมาเรียบร้อยแล้ว เมื่อผู้ควบคุมกดปุ่ม Start เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะรับไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าและทำงานเป็นมอเตอร์ก่อนเพื่อหมุนเครื่องยนต์ และไฟฟ้าจากระบบอีกส่วนหนึ่งจะถูกแปลงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการจุดระเบิดเครื่องยนต์ เมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบพอที่จะเกิดการสันดาบและทำงานได้เอง เมื่อเครื่องยนต์สามารถทำงานได้แล้วจึงเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง เพื่อให้เครื่องยนต์มีความเร็วมากขึ้น จนกระทั่งมีค่ามากกว่า

ความเร็วเชิงโรตัส เครื่องจักรกลก็จะเปลี่ยนการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้



รูปที่ 5.6 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงกับระบบการไฟฟ้า

5.2 การประยุกต์ใช้งานในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเอง

เมื่อลองเปรียบเทียบระบบการใช้งานจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับเงื่อนไขในการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง พบว่ามีกระบวนการบางอย่างที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เครื่องยนต์จะสามารถจุดระเบิดได้จะต้องถูกหมุนให้มีความเร็วรอบพอเหมาะ ซึ่งจากระบบที่ออกแบบไว้ จะให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นมอเตอร์หมุนเครื่องยนต์ให้มีความเร็วรอบที่พอเหมาะ และให้ไฟกระแสตรงที่ได้จากการแปลงไฟกระแสสลับจากระบบไฟฟ้าที่เชื่อมอยู่ ทำการจุดระเบิดเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จึงจะสามารถทำงานได้ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องยนต์ได้โดยที่ไม่มีไฟฟ้า

2. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากก๊าซบางส่วนจะถูกดึงไปใช้ในลักษณะอื่น เช่น เป็นเชื้อเพลิงในการทำความร้อน ทำให้ปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าไม่สม่ำเสมอ ความเร็วของเครื่องยนต์จึงไม่คงที่

3. ในสถานะกระตุ้นตัวเอง จำเป็นต้องจัดโหลดให้เหมาะกับขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จากระบบที่ใช้งานอยู่นี้ เนื่องจากถูกออกแบบมาให้ทำงานโดยเชื่อมโยงกับระบบเท่านั้น จึงต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบของการไฟฟ้าโดยไม่ได้แยกวงจรที่ใช้จ่ายโหลด กล่าวคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นจะเป็นเท่าไรก็ได้หากผลิตได้น้อยกว่าปริมาณที่โหลดต้องการ ก็จะดึงกำลังงานจากระบบ แต่ถ้าหากผลิตมากเกินไปกำลังงานก็จะถูกผลักเข้าระบบ

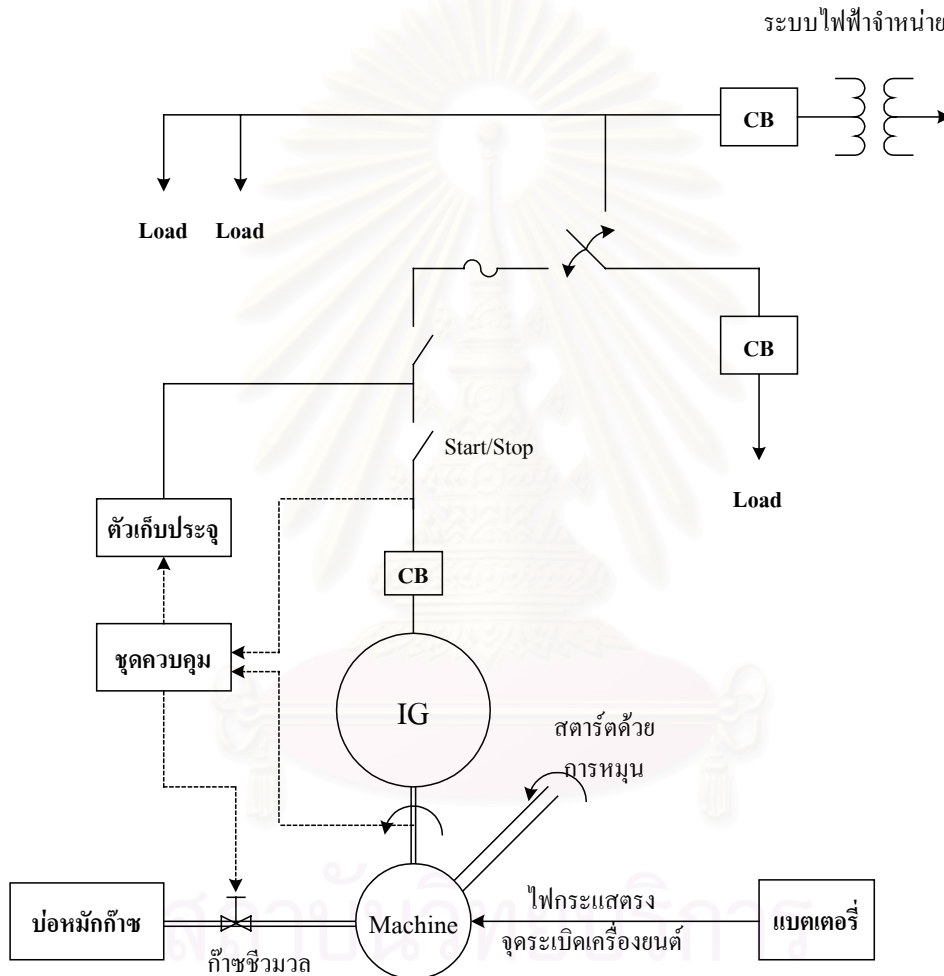
จากเหตุดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเองได้ จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนแก้ไขแบบ รวมถึงวิธีในการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานในสถานะกระตุ้นตัวเองได้ ซึ่งได้สรุปไว้ดังนี้

1. แยกวงจรไฟฟ้าที่ใช้จุดระเบิดเครื่องยนต์ โดยให้มีสวิตซ์ต่างหากแยกจากสวิตซ์ที่ใช้เดินเครื่อง หรือใช้แบตเตอรี่มาจุดระเบิดแทน และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการขับให้สามารถทำการสตาร์ทด้วยมือได้ (เหมือนกับการเดินเครื่องเรือหางยาว หรือรถจักรยานยนต์)

2. เพิ่มเติมอุปกรณ์เพื่อทำการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ ความเร็วโรเตอร์และขนาดตัวเก็บประจุ เพื่อควบคุมการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง

3. จัดวางระบบโหลดที่จะจ่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เหมาะสมและทำการแยกวงจรออกมาต่างหาก รวมถึงการติดตั้งสวิตซ์เพื่อทำการสับเปลี่ยน โหลดให้สามารถเชื่อมโยงเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้ด้วย

4. ในการทำงานจะเริ่มจากการหมุนจากการหมุนเครื่องยนต์ด้วยมือเพื่อทำการสตาร์ทเครื่องยนต์ หลังจากนั้นทำการต่อตัวเก็บประจุเพื่อทำให้เกิดสถานะกระตุ้นตัวเองและทำการปลดโหลดที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบเพื่อมาเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะอยู่ตัว

จะเห็นได้ว่าการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้ในสถานะกระตุ้นตัวเองนั้นมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อน จำเป็นต้องแก้ไขลักษณะของเครื่องยนต์ อีกทั้งจำเป็นต้องเพิ่มชุดควบคุม ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม อาจจะไม่คุ้มค่ากับประโยชน์ที่จะได้รับ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องแยกโหลดที่จะจ่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นเรื่องที่ลำบากและเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะจำ

เป็นต้องจัดระบบ โหลดใหม่ทั้งหมด อีกทั้งการกำหนดโหลดให้พอดีกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นไปได้ยาก ดังนั้นในทางปฏิบัติ ระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานใน สภาวะกระตุ้นตัวเอง

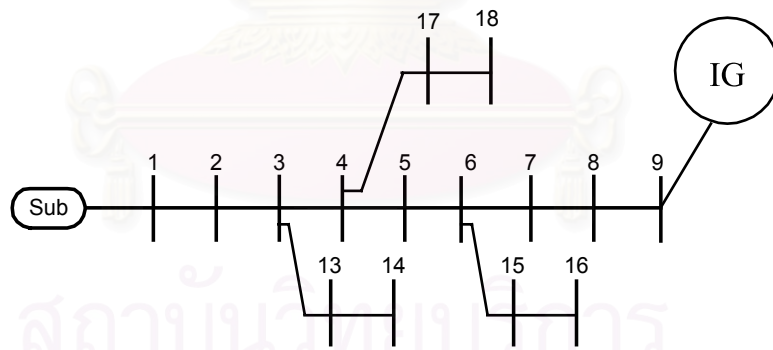
5.3 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติจะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้งานในสภาวะกระตุ้นตัวเองได้ แต่ในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสภาวะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบก็ควรจะต้องติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติมด้วย เนื่องจากผลกระทบของ การติดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบก็就会导致ทำให้ระบบต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟมากขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังจะต่ำลง อาจจะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันและกำลังสูญเสียของระบบไฟ ฟ้ากำลังไม่มากนักน้อย ดังนั้นในบทถัดไปเราจะทำการศึกษาถึงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังและผลจากการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

การที่เราสามารถเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อจ่ายกำลังจากภายในของระบบจำหน่ายดังแสดงในรูปที่ 7.1 จะเป็นการช่วยทำให้กำลังสูญเสียของระบบลดลง เนื่องจากเราสามารถจ่ายโหลดในบริเวณปลายของระบบไฟฟ้า ทำให้กำลังที่วิ่งผ่านสายส่งเข้าสู่ระบบมีค่าลดลง (จากรูป เราสามารถจ่ายกำลังให้กับโหลดในบัส ที่ 9 และบัสใกล้เคียงซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้สามารถลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าของสถานีลงได้) ซึ่งจะส่งผลให้กระแสที่ไหลในสายส่งมีค่าลดลง และเกิดกำลังสูญเสียในสายลดลงด้วย แต่จากการศึกษาที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟเพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยในสภาวะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะดึงกำลังรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า ทำให้ระบบไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้นจากปกติ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบเกิดกำลังสูญเสียมากขึ้น อีกทั้งอาจทำให้แรงดันลดลง[17] ดังนั้นการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้านั้น มีทั้งผลดีและผลเสียซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผลจากกำลังจริงหรือกำลังรีแอกทีฟจะมีผลมากกว่ากัน ด้วยเหตุดังกล่าวเราจึงต้องศึกษาและวิเคราะห์ผลของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง และหาวิธีแก้ไขเพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้น



รูปที่ 6.1 ระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่

ในการวิเคราะห์ผลของกระทบต่อระบบนั้น เราจะอาศัยการคำนวณพื้นฐานที่เรียกว่า การคำนวณโหลดโพลว์ (Load Flow Calculation)[18,19] เพื่อทำการวิเคราะห์ระดับแรงดันและทิศทาง การไหลของพลังงาน รวมถึงกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยในที่นี้จะใช้วิธีการคำนวณโหลดโพลว์แบบเอซี ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

6.1 แรงดันตกและกำลังสูญเสีย (Voltage drops & Power loss)

ในการส่งกำลังไฟฟ้าจากระบบไปสู่บัสที่ต้องการจะต้องผ่านสายส่งซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) อยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมและกำลังสูญเสียในสายส่ง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{แรงดันตกคร่อมในสาย} = IZ = I(R + j \cdot X) \quad (6.1)$$

$$\text{กำลังสูญเสีย} = I^2 Z = I^2(R + j \cdot X) \quad (6.2)$$

โดยที่

$$I = \left[\frac{P - j \cdot Q}{V} \right] \quad (6.3)$$

และ
$$I^2 = I \times I^* = \left[\frac{P - j \cdot Q}{V^*} \right] \left[\frac{P + j \cdot Q}{V} \right] = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \quad (6.4)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\text{แรงดันตกคร่อม} = \left[\frac{P - j \cdot Q}{V} \right] (R + jX) \quad (6.5)$$

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot R \quad (6.6)$$

$$Q_{\text{loss}} = I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot X \quad (6.7)$$

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งแรงดันตกและกำลังสูญเสียจะขึ้นกับทั้งค่ากำลังที่ไหลในสายส่ง แรงดัน และค่า R, X ของสายส่งเอง แต่เนื่องจากค่า R, X เป็นค่าพารามิเตอร์ของสายส่งซึ่งถือว่ามีความคงที่ เมื่อยิ่งจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไหลในสายส่งมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมและกำลังสูญเสียมากขึ้น

ถึงแม้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายกำลังจริงให้กับระบบไฟฟ้า ทำให้กำลังจริงที่ไหลเข้ามาในระบบไฟฟ้าลดลงก็ตาม แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเองก็ต้องรับกำลังรีแอกทีฟจากระบบอยู่ ดังนั้นถึงแม้ว่าระบบจะจ่ายกำลังจริงน้อยลงแต่กลับต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ที่ 6.6 จะเห็นได้ว่า หากกำลังจริงมีค่าลดลงแต่กำลังรีแอกทีฟมีค่ามากขึ้น อาจทำให้กำลังสูญเสียมีค่ามากขึ้นหรือลดลงก็ได้

6.2 เอซีโหลดโฟลว์

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability) การวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง (Fault Analysis) การวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Planning) หรือการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) ล้วนจำเป็นต้องทำการศึกษาโหลดโฟลว์ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญก่อนจะทำการศึกษาลิ่งต่างๆ ต่อไป

ในอดีตการศึกษาโหลดโฟลว์เป็นเรื่องที่ยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งใช้เวลาในการคำนวณนานเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณยังมีประสิทธิภาพไม่ดี แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้การคำนวณหาโหลดโฟลว์ในปัจจุบันทำได้รวดเร็ว แม่นยำและถูกต้องมากขึ้น วิธีการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบ เอ.ซี. ประกอบด้วย วิธีเกาส์ (Gauss method) วิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method) และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมาตั้งแต่อดีต แต่วิธีนิวตัน-ราฟสันจะได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

6.2.1 การกำหนดชนิดของบัส

ในการศึกษาโหลดโพล์จะเห็นได้ว่า ในแต่ละบัสของระบบที่ทำการศึกษาจะประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับบัสนั้นอยู่ 4 ค่า คือ กำลังจริง (Real Power), กำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power), ขนาดของแรงดันบัส (Voltage Magnitude) และมุมของแรงดัน (Phase angle) ซึ่งในการศึกษา จะมีการกำหนดตัวแปร ให้ 2 ตัวเท่านั้นในแต่ละบัส และต้องคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหลืออีก 2 ตัว ในการกำหนดค่าตัวแปร 2 ตัวในแต่ละบัส จะทราบได้จากสิ่งที่มาเชื่อมต่อกับบัสนั้น เช่น เมื่อมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมโยงอยู่ จะสามารถกำหนดค่ากำลังจริงและขนาดของแรงดันได้ หรือถ้าเป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ก็จะทราบค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของบัสนั้น แต่เนื่องจากเราไม่สามารถหาค่ากำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าและเพื่อให้เกิดความสมดุลในการคำนวณหาค่ากำลังจริง จึงจำเป็นต้องให้ค่าของกำลังจริงที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่เป็นค่าลอยตัวเสียบัสหนึ่ง และให้บัสนั้นเป็นบัสอ้างอิงคือมีค่ามุมของแรงดันเป็นศูนย์ จึงจะสามารถแก้สมการหาค่าตอบได้ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชนิดของบัส ออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้คือ

1. บัสอ้างอิง (Reference Bus), สวิงบัส (Swing Bus) หรือ แสลคิบัส (Slack Bus) เป็นบัสที่กำหนดค่าขนาดและมุมของแรงดันให้มีค่าคงที่ (โดยทั่วไปจะกำหนดให้มุมของแรงดันมีค่าเป็นศูนย์) และต้องการทราบค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งเราจะทราบค่านี้ได้ก็ต่อเมื่อทราบกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งทั้งหมดในระบบก่อน โดยทั่วไปบัสอ้างอิงคือบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระบบที่ทำการศึกษายู่

2. บัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus หรือ PV Bus) เป็นบัสที่กำหนดค่ากำลังจริงและขนาดของแรงดันให้ และต้องการทราบค่ากำลังรีแอกทีฟและมุมของแรงดัน โดยบัสชนิดนี้จะต้องเป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมโยงอยู่เท่านั้น

3. โหลดบัส (Load Bus หรือ PQ Bus) เป็นบัสที่กำหนดค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟให้ เป็นค่าคงที่และต้องการทราบค่าขนาดและมุมของแรงดัน โดยบัสชนิดนี้จะเป็บบัสที่มีโหลดเชื่อมโยงอยู่

6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันบัส

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัส (Bus Current) และแรงดันบัส (Bus Voltage) เป็นไปตามสมการ

$$[I] = [Y_{bus}] [E] \quad (6.8)$$

- เมื่อ $[I]$ เป็น เวกเตอร์ของกระแสบัส (Bus Current)
 $[E]$ คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัส (Bus Voltage)
 $[Y_{bus}]$ คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus Admittance Matrix)

การหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สามารถทำได้โดยมีหลักการดังนี้

1. Y_{ii} คือ สมาชิกในแนวทแยง หาได้จาก ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่กับบัส i ทั้งหมด (Line Admittance และ Admittance to Ground)
2. Y_{ij} คือ สมาชิกนอกแนวทแยง หาได้จาก ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่ระหว่าง บัส i และบัส j (Line Admittance)

6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงดัน

สมการโหลดโพล้ว สามารถเขียนในรูปของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส และแรงดันที่บัสได้ดังนี้

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (6.9)$$

- โดยที่ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส i
 Q_i คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส i
 V_i, V_n คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i และ n ตามลำดับ
 V_i^* คือ สังกะยุคเชิงซ้อนของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 Y_{in} คือ สมาชิกในตำแหน่งที่ (i,n) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 N คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาสมการที่ 6.9 จะสามารถเขียนสมการแสดงค่ากำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าไปยังบัส i ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยบัสจำนวน N บัส ได้ดังสมการที่ 6.10 และ 6.11

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (6.10)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (6.11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} P_i, Q_i &= \text{กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าบัส } i \\ |V_i|, \delta_i &= \text{ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส } i \\ |V_n|, \delta_n &= \text{ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส } n \\ |Y_{in}|, \theta_{in} &= \text{สมาชิกตำแหน่ง } (i,n) \text{ ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ} \end{aligned}$$

สมการที่ 6.10 และ 6.11 เรียกว่าสมการโหลดโพล์ ซึ่งเป็นสมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์โหลดโพล์โดยการใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการ โหลดโพล์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นโดยใช้การกระจายของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) กระจายฟังก์ชัน ของ P และ Q รอบจุดประมาณเริ่มต้น และไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไปโดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเป็นเมตริกซ์ ดังสมการที่ 6.12

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & : & J_2 \\ \dots & & \dots \\ J_3 & : & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \Delta P & \text{ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงของแต่ละบัส} \\ \Delta Q & \text{ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังรีแอกทีฟของแต่ละบัส} \\ \Delta \delta & \text{ คือ เวกเตอร์ของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข(Correction)} \\ \Delta |V| & \text{ คือ เวกเตอร์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข(Correction)} \\ J_1, J_2, J_3, J_4 & \text{ คือ เมตริกซ์ จาโคเบียนย่อย (Sub Jacobian Matrix)} \end{aligned}$$

แต่ละสมาชิกของ ΔP และ ΔQ สามารถคำนวณได้จากสมการ 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ

$$\Delta P_i = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (6.13)$$

$$\Delta Q_i = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (6.14)$$

โดยที่

ΔP_i	คือ	สมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังจริง
ΔQ_i	คือ	สมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังรีแอกทีฟ
P_{gi}	คือ	ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้จากบัส i
P_{di}	คือ	ค่าความต้องการกำลังจริงของบัส i
Q_{gi}	คือ	ค่ากำลังรีแอกทีฟที่ผลิตได้จากบัส i
Q_{di}	คือ	ค่าความต้องการกำลังรีแอกทีฟของบัส i
$P_{i,calc}$	คือ	ค่ากำลังจริงที่คำนวณได้จากสมการที่ 6.10 สำหรับบัส i
$Q_{i,calc}$	คือ	ค่ากำลังรีแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการที่ 6.111 สำหรับบัส i

และสำหรับสมาชิกแต่ละสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_1 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 6.15 และ 6.16 สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_2 หาได้โดยใช้สมการที่ 6.17 และ 6.18 สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_3 หาได้โดยใช้สมการที่ 6.19 และ 6.20 และ สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_4 หาได้โดยใช้สมการที่ 6.21 และ 6.22 ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ij} \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (6.17)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -P_i - |V_i|^2 G_{ij} \quad (6.18)$$

$$|V_j| \left| \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \right| = |V_j| |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (6.19)$$

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = P_i + |V_i|^2 G_{ii} \quad (6.20)$$

$$|V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (6.21)$$

$$|V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (6.22)$$

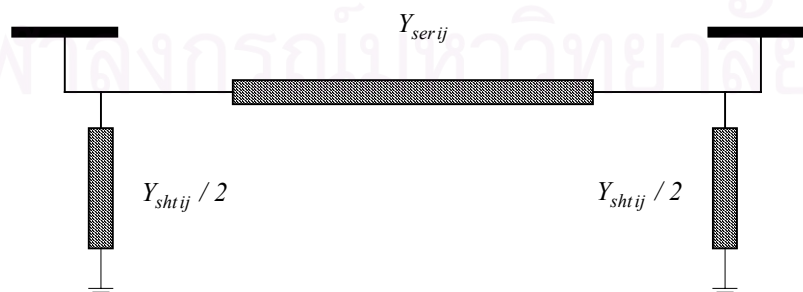
โดยค่าของ G_{ii} และ B_{ii} เป็นไปตามสมการ 6.23

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + j |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (6.23)$$

การคำนวณโหลดโพล์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันนั้นจำเป็นต้องทำการคำนวณสมการ 6.12 ซ้ำเพื่อหาค่าที่จะนำไปปรับเปลี่ยนค่ามุมกับขนาดแรงดันที่แต่ละบัสได้แก่ $\Delta \delta$ และ $\frac{\Delta V}{V}$ จากนั้นจึงนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณในรอบถัดไป จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ทุกบัสในระบบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งจึงหยุดคำนวณ

6.2.4 การหาค่ากำลังที่ไหลในสายส่งและกำลังสูญเสีย(Line Flow & Power Loss)

หลังจากคำนวณโหลดโพล์แล้ว จะได้ค่าขนาด (V) และมุม (δ) ของแรงดัน ที่บัสทุกๆบัส หลังจากนั้นเราจะนำไปคำนวณหาค่ากำลังที่ไหลจากบัสหนึ่งไปยังอีกบัสหนึ่ง ตามรูปที่ 6.2 เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่ง



รูปที่ 6.2 วงจรสมมูลสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส

พิจารณารูปวงจรสมมูลที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i และ บัส j ของสายส่ง ค่ากระแสที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j หาได้จาก I_{ij} หาได้จาก

$$I_{ij} = (E_i - E_j)Y_{serij} + E_i Y_{shtij} / 2 \quad (6.24)$$

โดยที่

Y_{serij} คือ Line Admittance ระหว่าง บัส i และบัส j

Y_{shtij} คือ Line Charging Admittance ทั้งหมดระหว่างบัส i และบัส j

$E_i Y_{shtij} / 2$ คือ ค่ากระแสที่ไหลเนื่องจาก Line Charging

ค่ากำลังส่งที่แท้จริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j (P_{ij} และ Q_{ij}) หาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{ij} - jQ_{ij} &= E_i^* I_{ij} \\ &= E_i^* (E_i - E_j)Y_{serij} + E_i^2 Y_{shtij} / 2 \end{aligned} \quad (6.25)$$

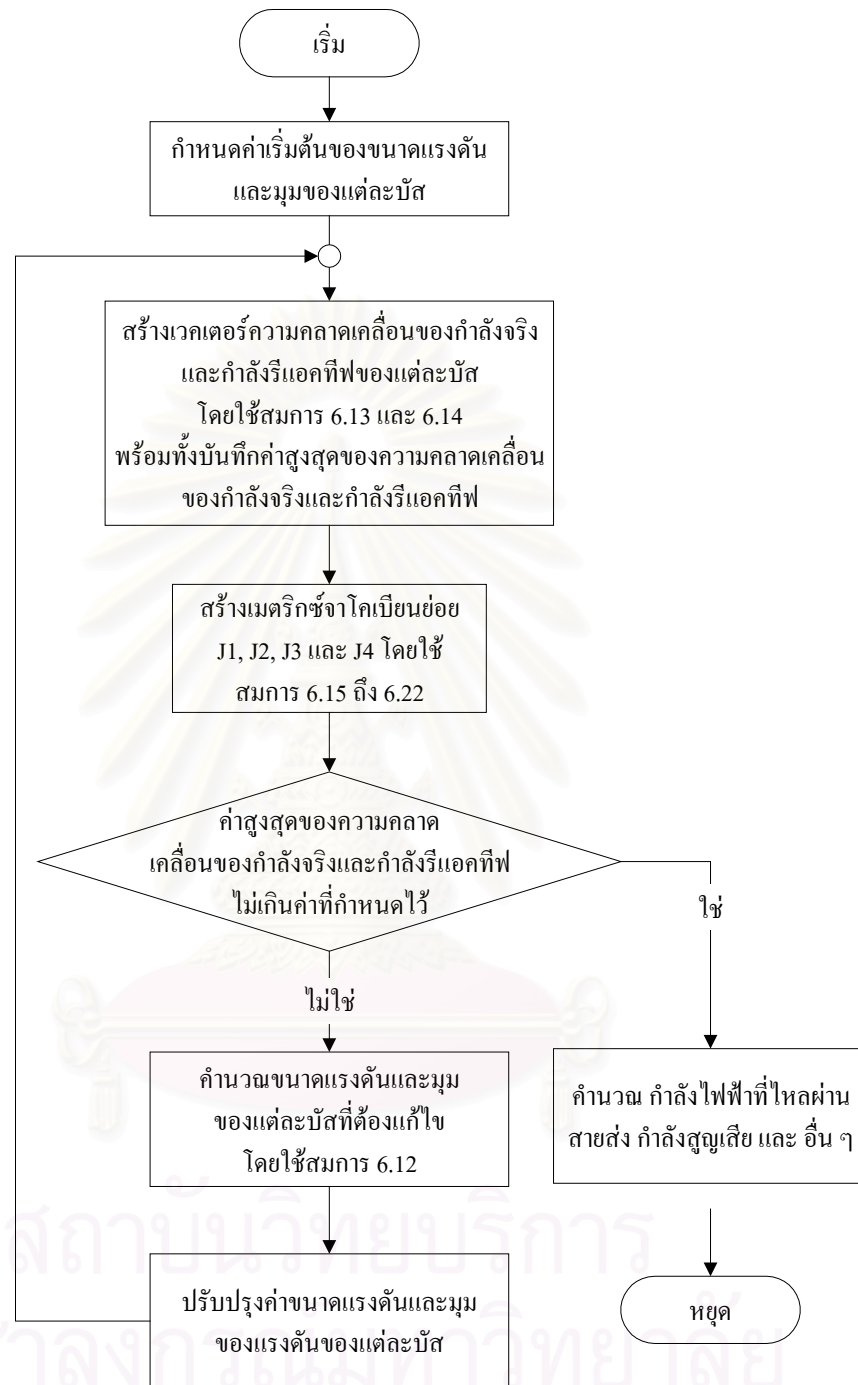
และในทำนองเดียวกัน ค่ากำลังส่งที่แท้จริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส j ไปยัง บัส i (P_{ji} และ Q_{ji}) หาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{ji} - jQ_{ji} &= E_j^* I_{ji} \\ &= E_j^* (E_j - E_i)Y_{serij} + E_j^2 Y_{shtij} / 2 \end{aligned} \quad (6.26)$$

ดังนั้น จะได้ค่ากำลังส่งสูญเสียในสายส่งระหว่างบัส i และบัส j เป็นดังสมการที่ 6.27

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (6.27)$$

จากขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นโฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการคำนวณโหลดโพล์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังรูป 6.3



รูป 6.3 ขั้นตอนการคำนวณโหลดไฟลว์ด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน

6.3 การคำนวณโหลดโพล์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปในการคำนวณ โหลดโพล์ บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมโยงอยู่ จะถูกกำหนดให้เป็นบัสควบคุมแรงดัน เนื่องจากเราสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสนี้ได้โดยผ่านทางเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นแบบซิงโครนัส ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อกำหนดชนิดของบัส แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต่างกัน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมแรงดันได้ แต่กลับต้องอาศัยแรงดันของบัสที่เชื่อมโยงอยู่ อีกทั้งยังต้องการกำลังรีแอกทีฟจากระบบ ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคล้ายโหลดมากกว่าที่จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นในการคำนวณโหลดโพล์เราจะกำหนดให้บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่เป็นโหลดบัส แต่จะจ่ายกำลังจริงเข้าสู่ระบบแทน ดังนั้นกำลังที่ไหลเข้าสู่บัส i ในสมการที่ 6.9 จะสามารถคำนวณหาได้จาก

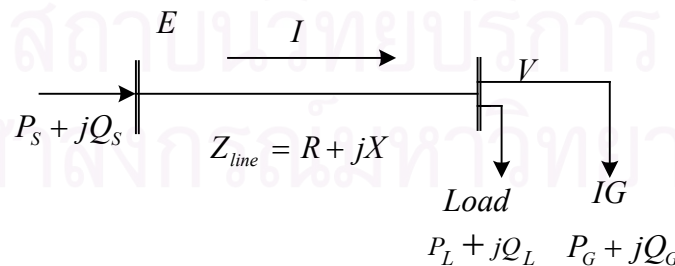
$$P_i = P_{IG} - P_{Load} \quad (6.28)$$

$$Q_i = -Q_{IG} - Q_{Load} \quad (6.29)$$

6.4 ตัวอย่างการหาจุดทำงานและกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย

จากรูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นแบบจำลองระบบไฟฟ้าอย่างง่าย โดยกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} |E| &= 1 \text{ pu} & Z_{line} &= 0.01+0.03j \text{ pu} \\ Load &= 0.8+0.6j \text{ pu} & Gen &= -0.02+0.02j \text{ pu/unit} \end{aligned}$$

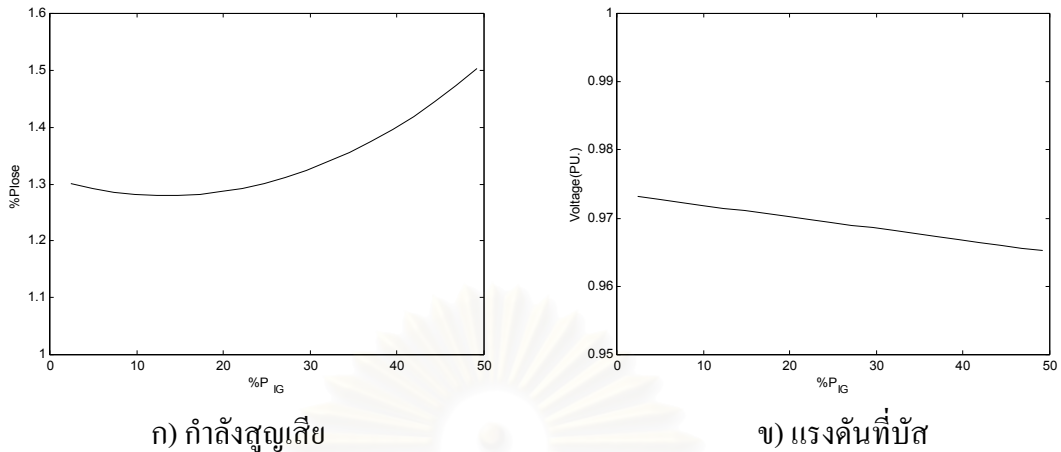


รูปที่ 6.4 แผนภาพเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย

หลังจากนั้นทำการคำนวณ โหลดโหล่วโดยค่อยๆเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทีละตัว ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิต

จำนวน (เครื่อง)	P_{IG} (pu)	$\%P_{IG}$	P_{SYS} (pu)	Q_{SYS} (pu)	pf_{SYS}	P_{loss} (pu)	Q_{loss} (pu)	V_L (pu)
0	0.00	0.0000	0.8106	0.6317	0.7888	0.0106	0.0317	0.9731
1	0.02	2.4676	0.7905	0.6515	0.7717	0.0105	0.0315	0.9727
2	0.04	4.9356	0.7704	0.6713	0.7539	0.0104	0.0313	0.9723
3	0.06	7.4037	0.7504	0.6912	0.7355	0.0104	0.0312	0.9719
4	0.08	9.8718	0.7304	0.7112	0.7165	0.0104	0.0312	0.9715
5	0.10	12.3397	0.7104	0.7312	0.6968	0.0104	0.0312	0.9711
6	0.12	14.8073	0.6904	0.7512	0.6767	0.0104	0.0312	0.9706
7	0.14	17.2745	0.6704	0.7713	0.6560	0.0104	0.0313	0.9702
8	0.16	19.7410	0.6505	0.7915	0.6349	0.0105	0.0315	0.9698
9	0.18	22.2067	0.6306	0.8117	0.6135	0.0106	0.0317	0.9694
10	0.20	24.6715	0.6107	0.8320	0.5917	0.0107	0.0320	0.9690
11	0.22	27.1353	0.5908	0.8523	0.5697	0.0108	0.0323	0.9686
12	0.24	29.5977	0.5709	0.8726	0.5475	0.0109	0.0326	0.9681
13	0.26	32.0587	0.5510	0.8930	0.5251	0.0110	0.0330	0.9677
14	0.28	34.5182	0.5312	0.9135	0.5027	0.0112	0.0335	0.9673
15	0.30	36.9759	0.5113	0.9340	0.4802	0.0113	0.0340	0.9669
16	0.32	39.4318	0.4915	0.9546	0.4578	0.0115	0.0346	0.9665
17	0.34	41.8856	0.4717	0.9752	0.4355	0.0117	0.0352	0.9660
18	0.36	44.3371	0.4520	0.9959	0.4133	0.0120	0.0359	0.9656
19	0.38	46.7863	0.4322	1.0166	0.3913	0.0122	0.0366	0.9652



รูปที่ 6.5 ผลการคำนวณโหลด โพล์เมื่อเทียบกับจำนวนกำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้

จากผลในตาราง เมื่อเรานำค่ากำลังสูญเสียและแรงดันมาวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรก ค่ากำลังสูญเสียจะลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะกระแสที่ระบบจะต้องจ่ายให้กับโหลดมีค่าลดลง เนื่องจากถูกจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่คิดให้ ส่วนแรงดันจะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดแรงดันตกคร่อมในสายส่งมีค่ามากขึ้นเนื่องจากระบบต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้มากขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปเรื่อยๆ จะพบว่ากำลังสูญเสียจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิม ถึงแม้ว่าระบบไฟฟ้ากำลังจะจ่ายกำลังจริงน้อยลงก็ตาม แต่ระบบไฟฟ้าจะต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้มากขึ้นกว่าเดิม และยังส่งผลให้แรงดันบัสมีค่าลดลงเรื่อยๆ

6.5 การปรับปรุงระบบจากผลกระทบที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากตัวอย่างที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าเราควรทำการปรับปรุงการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ เพราะการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวนมากเข้ากับระบบ จะก่อให้เกิดผลเสียกับระบบได้

การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำส่งผลกระทบต่อระบบก็เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟ ทำให้ระบบต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังที่แสดงไว้ในบทที่ 5 ซึ่งคล้ายกับสถานะกระตุ้นตัวเองก็น่าจะเป็นการช่วยทำให้ระบบไฟฟ้าดีขึ้น

ในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ถ้าหากเราทำการติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดพอดีกับความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำให้ระบบไม่ต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเลยซึ่งเสมือนว่าระบบไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่ในทางปฏิบัติ เราอาจไม่สามารถทำได้

เนื่องจาก อาจไม่สามารถหาตัวเก็บประจุขนาดตามที่ต้องการได้ ดังนั้นเราอาจคิดตัวเก็บประจุขนาดเล็กกว่าหรือขนาดที่ใหญ่กว่า ถ้าตัวเก็บประจุขนาดที่คิดให้สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟได้น้อยกว่าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการ ระบบก็ต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งก็ยังส่งผลกับระบบไฟฟ้าอยู่บ้างแต่อาจไม่มากเท่าเดิม แต่ถ้าตัวเก็บประจุขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการก็มีกำลังรีแอกทีฟไหลเข้าสู่ระบบด้วย ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อระบบ แต่ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของเจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกฎของการไฟฟ้าที่จะกำหนดขึ้น

6.6 การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์

ในการพิจารณาการลงทุนเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ควรจะคำนึงถึงความคุ้มค่าระหว่างค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัวเก็บประจุและประโยชน์ที่จะได้รับจากการติดตั้งเพื่อเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจ

ในการคำนวณผลประโยชน์ที่จะได้รับนั้น จากรายงานการศึกษาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า[20] พบว่า ในส่วนของระบบไฟฟ้าภูมิภาค เมื่อทำการประเมินผลโดยอาศัยค่า Long Run Marginal Cost พบว่ามีมูลค่าของพลังงานเป็น 1.4255 บาท/kWh นั่นก็คือ ถ้าเราสามารถลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าก็จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 1.4255 บาท ทุกๆ 1 kWh ที่ลดลงในทางกลับกัน ถ้าเกิดกำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้นในระบบ ก็จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม 1.4255 บาท ทุกๆ 1 kWh ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.8 ในส่วนของภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

7.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา

ระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบตัวอย่างของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังแสดงในรูปที่ ก1 และ ก2 โดยแบ่งเป็นการศึกษาเป็นแบบต่างๆ ตามตารางที่ 7.1 ดังนี้

ตารางที่ 7.1 ระบบตัวอย่างในการศึกษาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

กรณีที่	ระบบไฟฟ้า ตัวอย่าง	ปริมาณโหลด(kW)/ ตารางโหลด	ค่าตัวประกอบกำลัง ของระบบไฟฟ้า
1	1	11430 / ก4	0.75
2	1	11430 / ก5	0.83
3	2	4270 / ก6	0.72
4	2	4270 / ก7	0.82

7.2 การศึกษาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงอยู่

ในการศึกษาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เราจะทำการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้าทางด้านปลายของระบบ ดังแสดงในรูป ก1และ ก2 ซึ่งการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบทางด้านปลายนี้ เป็นกรณีที่น่าจะส่งผลกระทบต่อระบบมากที่สุด เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถส่งกำลังให้กับโหลดทางด้านปลายได้โดยตรงและเกิดการสูญเสียน้อย ทำให้ระบบลดการจ่ายกำลังจริงลงได้มากที่สุด แต่การเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านปลายของระบบก็จะทำให้ปริมาณของกำลังรีแอกทีฟที่ต้องการจากระบบมากที่สุดด้วย จากข้อมูลการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในบทที่ 6 จะพบว่าโดยเฉลี่ยแล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟในปริมาณที่ใกล้เคียงกับกำลังจริงที่

ผลิตได้ ณ จุดทำงานที่ได้ศึกษามา ดังนั้นเราจึงสมมุติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษา ผลกระทบครั้งนี้มีกำลังผลิต 30 kW และ ต้องการกำลังรีแอกทีฟ 30 kVar เช่นกัน

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ โดยเริ่มจากสถานะปกติที่ไม่ได้เชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง และค่อยๆ เพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไปเรื่อยๆ แล้วจึงพิจารณาผลที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 7.2-7.5 โดยที่ข้อมูลในแต่ละช่องจะมีความหมายดังนี้

- ช่องที่ 1 แสดงจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงอยู่ ณ บัส ที่กำหนดไว้ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละตัวมีกำลังการผลิตตามที่กำหนด
- ช่องที่ 2 แสดงปริมาณกำลังจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถผลิตและจ่ายออกจากบัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
- ช่องที่ 3 แสดงปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากระบบที่ผ่านบัสเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- ช่องที่ 4 แสดงปริมาณกำลังจริงที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย
- ช่องที่ 5 แสดงปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย
- ช่องที่ 6 แสดงค่าปริมาณกำลังจริงสูญเสียในสายส่งที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ
- ช่องที่ 7 แสดงค่าปริมาณกำลังรีแอกทีฟสูญเสียในสายส่งที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ
- ช่องที่ 8 แสดงค่าแรงดันของบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่
- ช่องที่ 9 แสดงค่าบัสและขนาดแรงดันบัสที่ต่ำที่สุดในระบบไฟฟ้า

7.2.1 ผลกระทบของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

จากผลในตารางเมื่อนำมาวาดกราฟดังแสดงในรูปที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าในทุกๆระบบเมื่อเริ่มทำการติดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้ว แรงดันและกำลังสูญเสียจะลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจยังไม่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากปริมาณของกำลังจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จ่ายเข้าระบบยังมีน้อยและปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่ระบบต้องจ่ายเพิ่มขึ้นให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังน้อยอยู่เช่นกัน แต่เมื่อทำการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปเรื่อยๆ จะพบว่าระดับแรงดันก็จะลดลงไปอีก ส่วนกำลังสูญเสียในบางระบบจะกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ยิ่งเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากขึ้น ๆ แรงดันก็จะตกลง ซึ่งในบางระบบมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานแล้ว (ค่าแรงดันมาตรฐานอยู่ระหว่าง 10.5-0.95 pu.) ส่วนกำลังสูญเสียในทุกๆระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างมาก

ตารางที่ 7.2 ผลโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ผลิตได้(kW)	กำลังรีแอกทีฟที่ต้องการจากระบบ(kVar)	กำลังจริงจากระบบ(MW)	กำลังรีแอกทีฟจากระบบ(MVar)	กำลังจริงสูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟสูญเสีย(kVar)	แรงดันบัลต์ที่มี IG(pu.)	แรงดันบัลต์ต่ำสุดในระบบ(pu.)/บัลต์
0	0	0	11.9	10.6	437.90	819.89	0.9733	0.9729/102
5	150	150	11.7	10.7	437.16	818.53	0.9728	0.9724/102
10	300	300	11.6	10.9	437.13	818.25	0.9723	0.9718/102
15	450	450	11.4	110	437.80	819.04	0.9717	0.9713/102
20	600	600	11.3	11.2	439.19	820.91	0.9712	0.9707/102
25	750	750	11.1	11.3	441.30	823.87	0.9706	0.9701/102
30	900	900	110	11.5	444.13	827.92	0.9701	0.9696/102
35	1050	1050	10.8	11.7	447.68	833.06	0.9695	0.9690/102
40	1200	1200	10.7	11.8	451.95	839.30	0.9689	0.9684/102
45	1350	1350	10.5	12.0	456.96	846.65	0.9683	0.9678/102
50	1500	1500	10.4	12.1	462.69	855.10	0.9677	0.9672/102
55	1650	1650	10.2	12.4	469.16	864.66	0.9671	0.9666/102
60	1800	1800	10.1	12.3	476.38	875.36	0.9665	0.9659/102
65	1950	1950	10.0	12.6	484.33	887.16	0.9659	0.9653/102
70	2100	2100	9.8	12.8	493.02	900.09	0.9652	0.9647/102
75	2250	2250	9.7	12.9	502.46	914.16	0.9646	0.9640/102
80	2400	2400	9.5	13.1	512.65	929.36	0.9639	0.9634/102
85	2550	2550	9.4	13.3	523.60	945.70	0.9633	0.9627/102
90	2700	2700	9.3	13.4	535.30	963.21	0.9626	0.9620/102
95	2850	2850	9.1	13.6	547.78	981.86	0.9619	0.9613/102
100	3000	3000	9.0	13.8	560.08	1000	0.9612	0.9606/102

ตารางที่ 7.3 ผลโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

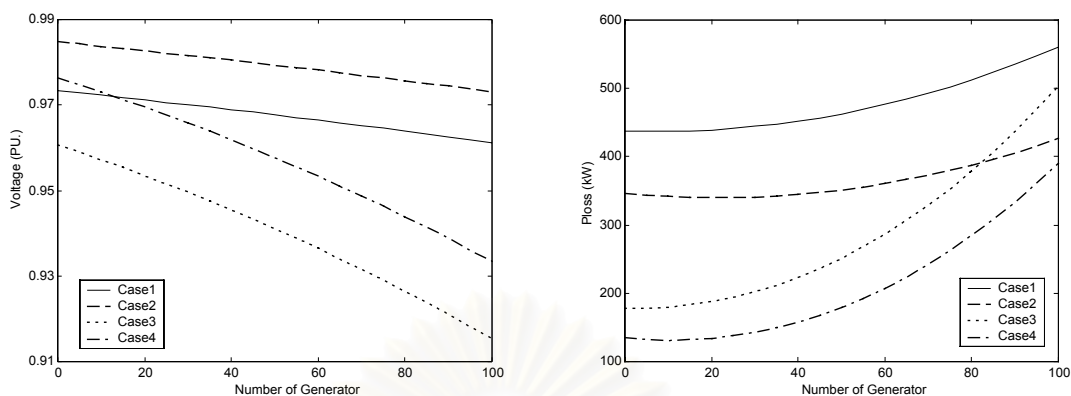
จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ผลิตได้(kW)	กำลังรีแอกทีฟที่ต้องการจากระบบ(kVar)	กำลังจริงจากระบบ(MW)	กำลังรีแอกทีฟจากระบบ(MVar)	กำลังจริงสูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟสูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มีIG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุดในระบบ(pu.)/ บัส
0	0	0	11.8	7.8	346.89	648.93	0.9848	0.9844/102
5	150	150	1.6	8.0	343.85	644.18	0.9843	0.9839/102
10	300	300	11.5	8.1	341.89	640.46	0.9837	0.9834/102
15	450	450	11.3	8.3	340.62	637.78	0.9832	0.9828/102
20	600	600	11.2	8.4	340.04	636.13	0.9827	0.9823/102
25	750	750	11.0	8.6	340.14	635.53	0.9820	0.9818/102
30	900	900	10.9	8.7	340.94	635.97	0.9816	0.9812/102
35	1050	1050	10.7	8.9	342.44	637.46	0.9811	0.9806/10
40	1200	1200	10.6	9.0	344.63	640.00	0.9805	0.9801/102
45	1350	1350	10.4	9.2	347.52	643.60	0.9799	0.9795/102
50	1500	1500	10.3	9.3	351.11	648.26	0.9793	0.9789/102
55	1650	1650	10.1	9.5	355.40	653.99	0.9788	0.9783/102
60	1800	1800	9.9	9.6	360.42	660.78	0.9782	0.9777/102
65	1950	1950	9.8	9.7	366.14	668.65	0.9776	0.9771/102
70	2100	2100	9.7	9.9	372.57	677.59	0.9769	0.9765/102
75	2250	2250	9.6	10.1	379.72	687.62	0.9763	0.9758/102
80	2400	2400	9.4	10.3	387.59	698.74	0.9757	0.9752/102
85	2550	2550	9.3	10.4	396.18	710.95	0.9751	0.9746/102
90	2700	2700	9.1	10.6	405.51	724.26	0.9744	0.9739/102
95	2850	2850	9.0	10.8	415.48	738.67	0.9738	0.9732/102
100	3000	3000	8.9	10.9	426.35	754.20	0.9731	0.9726/102

ตารางที่ 7.4 ผลโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ผลิตได้(kW)	กำลังรีแอกทีฟที่ต้องการจากระบบ(kVar)	กำลังจริงจากระบบ(kW)	กำลังรีแอกทีฟจากระบบ(kVar)	กำลังจริงสูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟสูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มี IG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุดในระบบ(pu./บัส)
0	0	0	4447.9	4276.1	177.87	340.20	0.9607	0.9603/120
5	150	150	4298.0	4426.0	178.01	340.43	0.9590	0.9586/120
10	300	300	4149.7	4579.3	179.71	343.38	0.9572	0.9568/120
15	450	450	4003.0	4735.0	182.96	349.09	0.9554	0.9550/120
20	600	600	3857.8	4893.5	187.80	357.59	0.9535	0.9531/120
25	750	750	3714.2	5054.8	194.25	368.91	0.9516	0.9511/120
30	900	900	3572.3	5219.0	202.32	383.11	0.9496	0.9491/120
35	1050	1050	3432.0	5386.1	212.05	400.21	0.9475	0.9471/120
40	1200	1200	3293.4	5556.2	223.45	420.27	0.9454	0.9450/120
45	1350	1350	3156.6	5729.3	236.56	443.34	0.9433	0.9428/120
50	1500	1500	3021.4	5905.4	251.41	469.46	0.9410	0.9406/120
55	1650	1650	2888.0	6084.6	268.01	498.69	0.9388	0.9383/120
60	1800	1800	2756.4	6267.0	286.42	531.09	0.9364	0.9360/120
65	1950	1950	2626.7	6452.7	306.66	566.72	0.9340	0.9337/120
70	2100	2100	2498.8	6641.6	328.78	605.65	0.9316	0.9311/120
75	2250	2250	2372.8	6833.9	352.80	647.95	0.9290	0.9286/120
80	2400	2400	2248.8	7029.6	378.78	693.69	0.9264	0.9260/120
85	2550	2550	2126.8	7228.9	406.52	742.82	0.9238	0.9233/120
90	2700	2700	2006.8	7431.7	436.78	795.84	0.9210	0.9206/120
95	2850	2850	1888.9	7638.4	468.91	852.43	0.9182	0.9178/120
100	3000	3000	1773.2	7848.8	503.20	912.83	0.9153	0.9149/120

ตารางที่ 7.5 ผลโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4 เมื่อเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ผลิตได้(kW)	กำลังรีแอกทีฟที่ต้องการจากระบบ(kVar)	กำลังจริงจากระบบ(kW)	กำลังรีแอกทีฟจากระบบ(kVar)	กำลังจริงสูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟสูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มี IG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุดในระบบ(pu./บัส)
0	0	0	4404.5	3060.2	134.53	257.33	0.9764	0.9761/120
5	150	150	4252.2	3205.7	132.20	252.79	0.9748	0.9744/120
10	300	300	4101.3	3353.7	131.33	250.84	0.9731	0.9727/120
15	450	450	3951.9	3504.4	131.95	251.48	0.9713	0.9710/120
20	600	600	3804.0	3657.6	134.06	254.76	0.9696	0.9692/120
25	750	750	3657.7	3813.6	137.68	260.70	0.9677	0.9673/120
30	900	900	3512.8	3972.0	142.84	269.34	0.9658	0.9655/120
35	1050	1050	3369.6	4133.6	149.56	280.71	0.9639	0.9635/120
40	1200	1200	3227.8	4297.7	157.85	294.85	0.9619	0.9615/120
45	1350	1350	3087.7	4460.7	167.74	311.80	0.9598	0.9595/120
50	1500	1500	2949.3	4634.5	179.26	331.61	0.9577	0.9574/120
55	1650	1650	2812.4	4807.2	192.43	354.32	0.9556	0.9552/120
60	1800	1800	2677.3	4982.9	207.27	379.98	0.9533	0.9530/120
65	1950	1950	2543.8	5161.5	223.83	408.64	0.9511	0.9507/120
70	2100	2100	2412.1	5343.2	242.12	440.36	0.9487	0.9484/120
75	2250	2250	2282.2	5528.1	262.20	475.21	0.9463	0.9460/120
80	2400	2400	2154.1	5716.0	284.08	513.23	0.9439	0.9435/120
85	2550	2550	2027.8	5907.4	307.80	554.50	0.9414	0.9410/120
90	2700	2700	1903.4	6102.0	333.42	599.09	0.9388	0.9384/120
95	2850	2850	1781.0	6299.9	360.96	647.08	0.9361	0.9358/120
100	3000	3000	1660.0	6501.0	390.49	698.54	0.9334	0.9330/120



ก) แรงดัน

ข) กำลังสูญเสีย

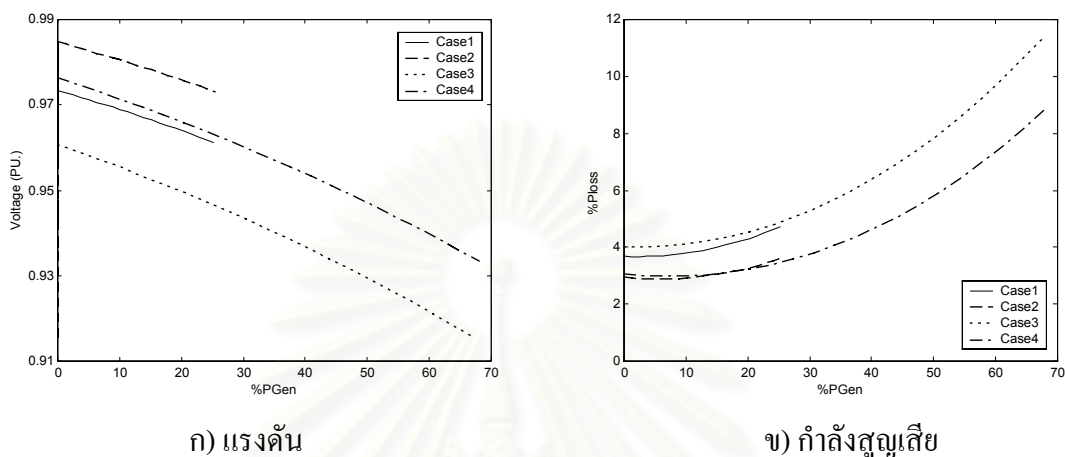
รูปที่ 7.1 ผลโหนดโวลต์ของระบบไฟฟ้าเทียบกับจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงในระบบ

ถึงแม้ว่าทุกกรณีจะได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ก็ได้รับผลกระทบที่แตกต่างกันออกไป เช่นในกรณีที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะเห็นได้ว่าแรงดันจะลดลงน้อยกว่าในกรณีที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อทำการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเท่ากัน หรือค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 1 และ 2 ก็มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเทียบกับกรณีที่ 3 และ 4 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าขนาดของระบบไฟฟ้าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจุดทำงาน เมื่อทำการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าสู่ระบบ โดยระบบไฟฟ้าขนาดเล็กจะได้รับผลกระทบมากกว่าเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

แต่เมื่อเราทำการเปลี่ยนปริมาณทางแกน X ของกราฟ จากเดิมที่เป็นจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้กลายเป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทียบกับปริมาณกำลังทั้งหมดในระบบ และเปลี่ยนปริมาณทางแกน Y ของกราฟ จากเดิมที่แสดงค่ากำลังสูญเสียเป็นกิโลวัตต์(kW) ให้เป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียเมื่อเทียบกับปริมาณกำลังทั้งหมดในระบบ แล้วจะได้กราฟดังรูปที่ 7.2

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันและกำลังสูญเสียจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้านั้น นำแปรตามสัดส่วนของกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับขนาดของระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่ นั่นก็คือ ถ้าเราเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก จะทำให้สัดส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อขนาดของระบบไฟฟ้ามีค่ามาก ระบบก็จะได้รับผลกระทบมาก แต่ ถ้าเราเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะทำให้สัดส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อขนาดของระบบไฟฟ้ามีค่าน้อย ระบบก็จะได้

รับผลกระทบน้อย ดังนั้น การเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดที่เท่ากันในระบบไฟฟ้ากำลังที่แตกต่างกัน ก็จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน



ก) แรงดัน

ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.2 ผลโหลดโพล์วของระบบไฟฟ้าเทียบตามสัดส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงในระบบ

นอกจากขนาดของระบบไฟฟ้าแล้ว ค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากกรณีที่ 1 และ 2 ที่เป็นระบบไฟฟ้าที่มีปริมาณโหลดเท่ากัน (รับ P เท่ากัน) แต่ค่าตัวประกอบกำลังแตกต่างกัน โดยกรณีที่ 2 จะมีค่าตัวประกอบกำลังมากกว่ากรณีที่ 1 และกรณีที่ 3 และ 4 ซึ่งก็เป็นระบบไฟฟ้าที่มีปริมาณโหลดเท่ากัน แต่ค่าตัวประกอบกำลังกรณีที่ 4 จะมีค่ามากกว่ากรณีที่ 3 จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 2 และ 4 ซึ่งมีค่าตัวประกอบกำลังสูง จะได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 และ 3 ทั้งระดับแรงดันและกำลังสูญเสีย

จะเห็นได้ว่าการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าระบบ จะมีทั้งผลดีและผลเสียกับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมถึงลักษณะและขนาดขนาดของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่ หากขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่มีค่าตัวประกอบกำลังที่ดี ก็จะได้รับผลกระทบไม่มากนัก ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงแก้ไขการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้า แต่ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ ก็จะได้รับผลกระทบมาก ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ไข มิฉะนั้นจะทำให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบนั้นแยกลงรวมถึงเกิดการสูญเสียในทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้นด้วย แต่จากผลการศึกษา จะเห็นได้ว่าเป็นการยากที่จะระบุขนาดที่แน่นอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะเริ่มส่ง

ผลกระทบในทางที่ไม่ดีต่อระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงอยู่ ดังนั้นในทางปฏิบัติเราควรจะทำการปรับปรุงการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเท่าใดก็ตาม เพื่อให้ไม่เกิดผลกระทบในทางที่ไม่ดีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

นอกจากผลกระทบต่อระบบที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากขึ้นและทำให้แรงดันลดลงแล้ว ระบบไฟฟ้ากำลังยังต้องจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งเท่ากับว่าระบบไฟฟ้าต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นโดยไม่ได้ผลตอบแทนใดๆ เนื่องจากการคิดค่าไฟฟ้าในปัจจุบันคิดจากปริมาณการใช้กำลังจริงเท่านั้น ส่วนกำลังรีแอกทีฟจะมีการคิดในกรณีที่มีการใช้เกินค่าที่กำหนดไว้เท่านั้น ซึ่งถือว่ามีย่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ระบบต้องจ่ายเพิ่มขึ้น จึงเท่ากับว่า เจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับกำลังรีแอกทีฟจากระบบโดยแทบไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใดๆ แต่การไฟฟ้าจะเป็นผู้เสียค่าใช้จ่ายแทน

7.2.2 ผลการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

เมื่อนำผลของโหลดโพลาร์ที่ได้ มาทำการคำนวณหาปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลงจากกรณีที่ ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และคำนวณหามูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้น ตามข้อมูลในหัวข้อที่ 6.6 จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7.6-7.9

จากผลที่ได้ จะเห็นว่าในช่วงแรกที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในปริมาณที่ไม่มาก กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงจากกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่ายขึ้นในระบบไฟฟ้า แต่มูลค่าที่ได้ไม่มากนักเนื่องจากกำลังสูญเสียที่ลดลงมีค่าน้อย แต่เมื่อปริมาณเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีมากขึ้น กำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม กลายเป็นว่าแทนที่ระบบจะประหยัดค่าใช้จ่ายกลับกลายเป็นระบบต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีมูลค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับมูลค่าที่จะได้รับจากกรณีที่กำลังสูญเสียลดลง จากผลตรงนี้เป็นภาระเน้นให้เห็นได้ชัดเจนว่าถ้าหากทำการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังในปริมาณมากโดยไม่มี การปรับปรุงแก้ไข จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มขึ้นแทนที่จะลดลง

ตารางที่ 7.6 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้า
กรณีที่ 1

กำลังการผลิตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง (kW)	มูลค่าที่ได้รับจาก กำลังสูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)
0	0.00	0.00
150	0.74	759.51
300	0.77	790.30
450	0.10	102.64
600	-1.29	-1324.00
750	-3.40	-3489.62
900	-6.23	-6394.22
1050	-9.78	-10037.80
1200	-14.05	-14420.36
1350	-19.06	-19562.42
1500	-24.79	-25443.46
1650	-31.26	-32084.01
1800	-38.48	-39494.33
1950	-46.43	-47653.89
2100	-55.12	-56572.96
2250	-64.56	-66261.80
2400	-74.75	-76720.41
2550	-85.70	-87959.05
2700	-97.40	-99967.46
2850	-109.88	-112776.44
3000	-122.18	-125400.66

ตารางที่ 7.7 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้า
กรณีที่ 2

กำลังการผลิตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง (kW)	มูลค่าที่ได้รับจาก กำลังสูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)
0	0.00	0.00
150	3.04	3120.13
300	5.00	5131.80
450	6.27	6435.28
600	6.85	7030.57
750	6.75	6927.93
900	5.95	6106.84
1050	4.45	4567.30
1200	2.26	2319.57
1350	-0.63	-646.61
1500	-4.22	-4331.24
1650	-8.51	-8734.32
1800	-13.53	-13886.65
1950	-19.25	-19757.43
2100	-25.68	-26356.92
2250	-32.83	-33695.40
2400	-40.70	-41772.85
2550	-49.29	-50589.28
2700	-58.62	-60165.22
2850	-68.59	-70398.03
3000	-79.46	-81554.57

ตารางที่ 7.8 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้า
กรณีที่ 3

กำลังการผลิตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง (kW)	มูลค่าที่ได้รับจาก กำลังสูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)
0	0.00	0.00
150	-0.14	-143.69
300	-1.84	-1888.50
450	-5.09	-5224.17
600	-9.93	-10191.75
750	-16.38	-16811.78
900	-24.45	-25094.50
1050	-34.18	-35080.98
1200	-45.58	-46781.49
1350	-58.69	-60237.07
1500	-73.54	-75478.51
1650	-90.14	-92516.09
1800	-108.55	-111411.38
1950	-128.79	-132184.90
2100	-150.91	-154887.99
2250	-174.93	-179541.15
2400	-200.91	-206205.99
2550	-228.65	-234677.21
2700	-258.91	-265734.87
2850	-291.04	-298711.81
3000	-325.33	-333905.70

ตารางที่ 7.9 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้า
กรณีที่ 4

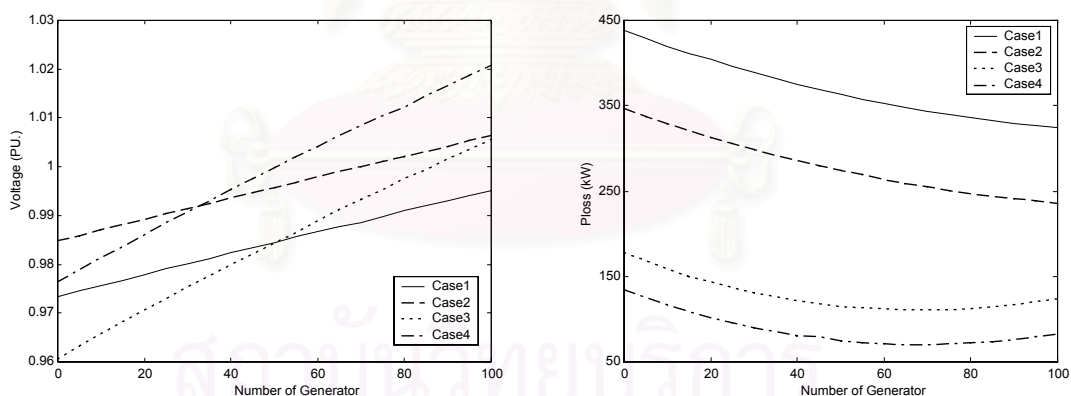
กำลังการผลิตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง (kW)	มูลค่าที่ได้รับจาก กำลังสูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)
0	0.00	0.00
150	2.33	2391.42
300	3.20	3284.35
450	2.58	2648.01
600	0.47	482.39
750	-3.15	-3233.03
900	-8.31	-8529.05
1050	-15.03	-15426.19
1200	-23.32	-23934.72
1350	-33.21	-34085.42
1500	-44.73	-45909.08
1650	-57.90	-59426.24
1800	-72.74	-74657.43
1950	-89.30	-91653.95
2100	-107.59	-110426.07
2250	-127.67	-131035.38
2400	-149.55	-153492.14
2550	-173.27	-177837.40
2700	-198.89	-204132.74
2850	-226.43	-232398.69
3000	-255.96	-262707.11

7.3 การศึกษาผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

จากผลในหัวข้อที่แล้ว จะเห็นได้ว่าควรมีการปรับปรุงแก้ไขการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม โดยในการศึกษา เราจะทำการสมมติให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุโดยให้มีขนาดพอดีกับความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟ 30 kVar เราก็จะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 30 kVar และทำการคำนวณโหลดโพล์ตามปกติ

7.3.1 ผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

จากผลการคำนวณซึ่งได้ตามตารางที่ 7.6-7.9 เมื่อนำไปวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 7.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้ว จะช่วยทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งกำลังสูญเสียก็จะมีค่าลดลงด้วย โดยที่จะไม่ขึ้นกับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและระบบไฟฟ้าว่าจะมีจุดทำงานเดิมเป็นอย่างไร



ก) แรงดัน

ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.3 ผลโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุเทียบตามจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงในระบบ

ตารางที่ 7.10 ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

จำนวนเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ ผลิต ได้(kW)	กำลังรีแอก- ทีฟที่ต้องการ จาก ระบบ(kVar)	กำลังจริง จากระบบ(MW)	กำลังรีแอกทีฟ จากระบบ(MVar)	กำลังจริง สูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟ สูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มี IG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุด ในระบบ(pu.)/ บัส
0	0	0	11.9	10.6	437.9	819.89	0.9733	0.9729/102
5	150	0	11.7	10.6	428.79	803.79	0.9745	0.9740/102
10	300	0	11.5	10.6	420.05	788.25	0.9756	0.9751/102
15	450	0	11.4	10.5	411.69	773.28	0.9767	0.9762/102
20	600	0	11.2	10.5	403.69	758.88	0.9778	0.9773/102
25	750	0	11.1	10.5	396.06	745.04	0.9790	0.9784/102
30	900	0	10.9	10.5	388.8	731.75	0.9801	0.9795/102
35	1050	0	10.8	10.5	381.9	719.01	0.9812	0.9806/102
40	1200	0	10.6	10.5	375.35	706.81	0.9823	0.9817/102
45	1350	0	10.4	10.5	369.16	695.17	0.9834	0.9828/102
50	1500	0	10.3	10.5	363.33	684.06	0.9845	0.9838/102
55	1650	0	10.1	10.4	357.85	673.48	0.9856	0.9849/102
60	1800	0	10.0	10.4	352.72	603.44	0.9866	0.9860/102
65	1950	0	9.8	10.4	347.94	653.93	0.9877	0.9870/102
70	2100	0	9.7	10.4	343.5	644.91	0.9885	0.9881/102
75	2250	0	9.5	10.4	339.4	636.47	0.9898	0.9891/102
80	2400	0	9.4	10.4	335.64	628.53	0.9909	0.9902/91
85	2550	0	9.2	10.4	332.23	621.09	0.9920	0.9912/91
90	2700	0	9.1	10.4	329.14	614.17	0.9930	0.9916/93
95	2850	0	8.9	10.4	326.39	607.75	0.9941	0.9933/90
100	3000	0	8.8	10.4	323.98	601.84	0.9951	0.9943/90

ตารางที่ 7.11 ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

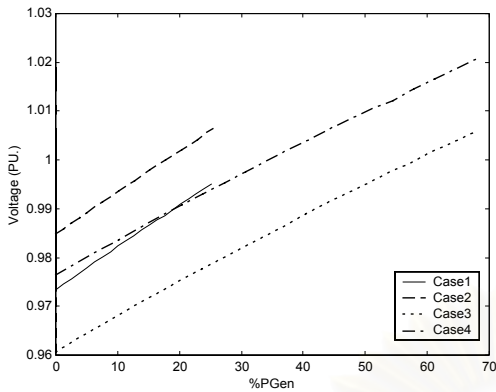
จำนวนเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ ผลิต ได้(kW)	กำลังรีแอก- ทีฟที่ต้องการ จาก ระบบ(kVar)	กำลังจริง จาก ระบบ(MW)	กำลังรีแอกทีฟ จาก ระบบ(MVar)	กำลังจริง สูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟ สูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มี IG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุด ในระบบ(pu.)/ บัส
0	0	0	11.8	7.8	346.89	648.93	0.9848	0.9844/102
5	150	0	11.6	7.8	337.66	633.33	0.9859	0.9855/102
10	300	0	11.5	7.8	329.19	618.28	0.9870	0.9866/102
15	450	0	11.3	7.8	321.08	603.77	0.9881	0.9877/102
20	600	0	11.1	7.8	313.33	589.81	0.9892	0.9888/102
25	750	0	11	7.7	305.43	576.39	0.9903	0.9899/102
30	900	0	10.8	7.7	298.89	563.5	0.9914	0.9911/102
35	1050	0	10.7	7.7	292.2	551.14	0.9925	0.9921/102
40	1200	0	10.5	7.7	285.85	539.32	0.9936	0.9931/102
45	1350	0	10.4	7.7	279.84	528.01	0.9947	0.9942/102
50	1500	0	10.2	7.7	274.18	517.22	0.9958	0.9952/102
55	1650	0	10	7.7	268.86	506.96	0.9968	0.9963/102
60	1800	0	9.9	7.7	263.88	497.20	0.9979	0.9973/102
65	1950	0	9.7	7.7	259.23	487.95	0.9991	0.9984/102
70	2100	0	9.6	7.6	254.90	479.21	1.0000	0.9994/94
75	2250	0	9.4	7.6	250.94	470.98	1.0011	1.0002/93
80	2400	0	9.3	7.6	247.30	463.24	1.0021	1.0010/88
85	2550	0	9.1	7.6	243.90	456.00	1.0032	1.0013/88
90	2700	0	8.9	7.6	240.90	449.26	1.0042	1.0025/88
95	2850	0	8.8	7.6	238.28	443.00	1.0053	1.0032/88
100	3000	0	8.7	7.6	235.90	437.23	1.0063	1.0039/86

ตารางที่ 7.12 ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

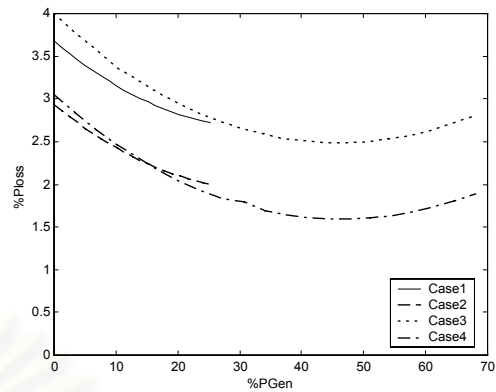
จำนวนเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ ผลิต ได้(kW)	กำลังรีแอก- ทีฟที่ต้องการ จาก ระบบ(kVar)	กำลังจริง จาก ระบบ(kW)	กำลังรีแอกทีฟ จาก ระบบ(kVar)	กำลังจริง สูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟ สูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มี IG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุด ในระบบ(pu.)/ บัส
0	0	0	4447.9	4276.9	177.87	340.20	0.9607	0.9603/120
5	150	0	4288.1	4257.8	168.56	321.41	0.9632	0.9628/120
10	300	0	4129.3	4240.7	159.74	304.21	0.9657	0.9653/120
15	450	0	3973.5	4224.6	150.31	288.54	0.9683	0.9679/120
20	600	0	3813.5	4259.4	143.42	273.68	0.9706	0.9702/120
25	750	0	3656.8	4196.5	136.80	260.58	0.9730	0.9725/120
30	900	0	3500.6	4184.8	130.95	248.85	0.9753	0.9749/120
35	1050	0	3345.7	4174.4	125.80	238.46	0.9776	0.9750/120
40	1200	0	3191.5	4165.3	121.53	229.42	0.9799	0.9765/112
45	1350	0	3037.9	4157.6	117.92	221.61	0.9822	0.9779/112
50	1500	0	2885.9	4151.1	115.05	215.17	0.9845	0.9794/112
55	1650	0	2732.9	4195.9	112.89	209.96	0.9865	0.9808/112
60	1800	0	2581.9	41416	111.86	206.06	0.9889	0.9822/112
65	1950	0	2430.1	4139.5	110.69	203.29	0.9911	0.9836/112
70	2100	0	2280.3	4137.7	110.63	201.79	0.9932	0.9850/112
75	2250	0	2131.6	4137.4	111.24	201.5	0.9954	0.9863/112
80	2400	0	1982.5	4138.3	112.53	202.38	0.9975	0.9876/112
85	2550	0	1834.5	4140.4	114.4	204.4	0.9995	0.9889/112
90	2700	0	1687.1	4143.6	117.09	207.67	1.0016	0.9902/112
95	2850	0	1540.3	4148.5	120.35	212.03	1.0036	0.9915/112
100	3000	0	1394.2	4153.5	124.25	217.53	1.0056	0.9927/112

ตารางที่ 7.13 ผลโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

จำนวนเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ	กำลังจริงที่ ผลิต ได้(kW)	กำลังรีแอก- ทีฟที่ต้องการ จาก ระบบ(kVar)	กำลังจริง จาก ระบบ(kW)	กำลังรีแอกทีฟ จาก ระบบ(kVar)	กำลังจริง สูญเสีย(kW)	กำลังรีแอกทีฟ สูญเสีย(kVar)	แรงดันบัสที่มี IG(pu.)	แรงดันบัสต่ำสุด ในระบบ(pu.)/ บัส
0	0	0	4404.5	3060.2	134.53	257.33	0.9764	0.9762/120
5	150	0	4245.1	3042.2	125.12	239.34	0.9789	0.9786/120
10	300	0	4086.5	3025.6	116.49	222.74	0.9813	0.9810/120
15	450	0	3928.6	3010.4	108.64	207.51	0.9837	0.9834/120
20	600	0	3771.5	2996.5	101.54	193.62	0.9861	0.9855/120
25	750	0	3615.2	2984.6	95.24	181.66	0.9885	0.9870/112
30	900	0	3459.6	2972.7	89.59	169.82	0.9908	0.9885/112
35	1050	0	3304.6	2962.7	84.71	159.82	0.9931	0.9906/112
40	1200	0	3150.5	2954.3	80.54	151.11	0.9953	0.9915/112
45	1350	0	2997.1	2946.5	79.08	143.65	0.9976	0.9929/112
50	1500	0	2844.3	2940.3	74.32	137.44	0.9998	0.9944/112
55	1650	0	2692.2	2935.3	72.24	132.41	1.0021	0.9958/112
60	1800	0	2540.9	2931.4	70.84	128.57	1.0042	0.9972/112
65	1950	0	2390.1	2928.8	70.12	125.93	1.0063	0.9985/112
70	2100	0	2240.5	2927.3	70.05	124.46	1.0084	0.9999/112
75	2250	0	2040.6	2927.5	70.63	124.14	1.0105	1.0012/112
80	2400	0	1941.9	2927.8	71.86	124.96	1.0121	1.0025/112
85	2550	0	1793.7	2929.8	73.73	126.91	1.0146	1.0038/112
90	2700	0	1642.2	2932.8	76.23	129.64	1.0167	1.0051/112
95	2850	0	1499.4	2937.7	79.35	134.13	1.0187	1.0063/112
100	3000	0	1353.5	2942.2	83.09	139.37	1.0207	1.0076/112



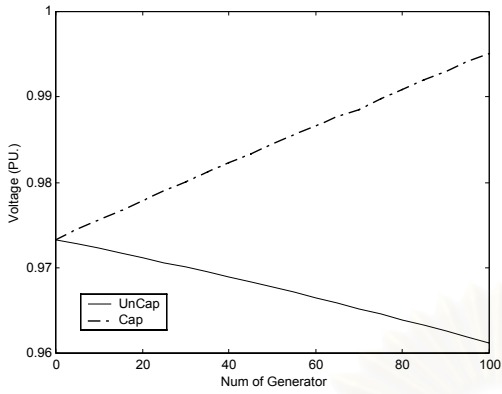
ก) แรงดัน



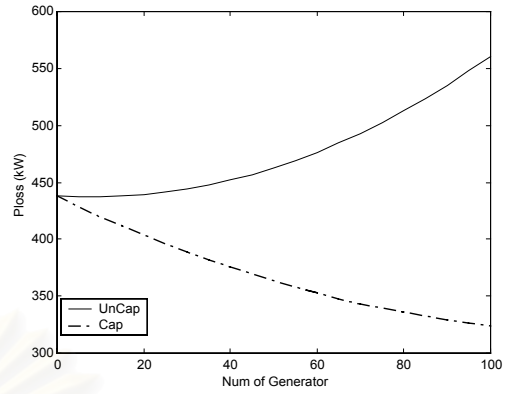
ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.4 ผลโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุเทียบตามสัดส่วน
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงในระบบ

เมื่อลองเปรียบเทียบผลการคำนวณ โหลดโพล์ของแต่ละระบบระหว่างการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุและแบบที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ จะได้ผลดังรูปที่ 7.5-7.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในทุกๆระบบเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำให้ระดับแรงดันที่บัสสูงขึ้นกว่าตอนที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุ อีกทั้งกำลังสูญเสียของระบบก็มีค่าลดลงมากกว่าตอนที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย เนื่องจากการที่เราติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ต้องรับกำลังรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังส่งกำลังจริงให้กับโหลดในบริเวณใกล้เคียงทำให้ลดปริมาณกำลังจริงที่จะต้องไหลจากระบบ ทำให้เกิดการสูญเสียในสายส่งลดลงและส่งผลให้ระดับแรงดันสูงขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงกับระบบนั้น จะช่วยให้จุดทำงานของระบบดีขึ้น ไม่ว่าจะเดิมระบบไฟฟ้าจะมีจุดทำงานเป็นอย่างไร เช่น ในบางกรณี จะเห็นได้ว่า ถ้าเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพียงไม่กี่ตัวจะส่งผลให้กำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้าลดลง ซึ่งอาจไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติมก็ได้ แต่จากผลที่ได้เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุแล้ว พบว่าจะช่วยทำให้กำลังสูญเสียในระบบลดลงอีก นอกจากนี้ยังช่วยให้ระดับแรงดันเพิ่มขึ้นจากเดิมด้วย

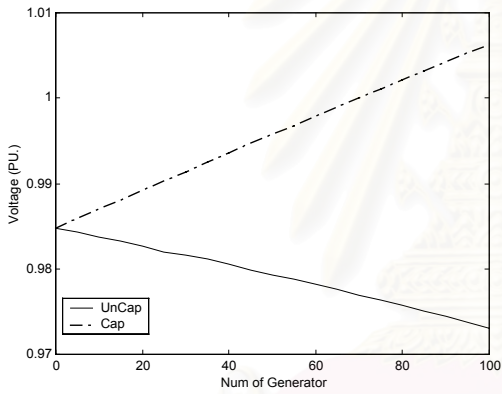


ก) แรงดัน

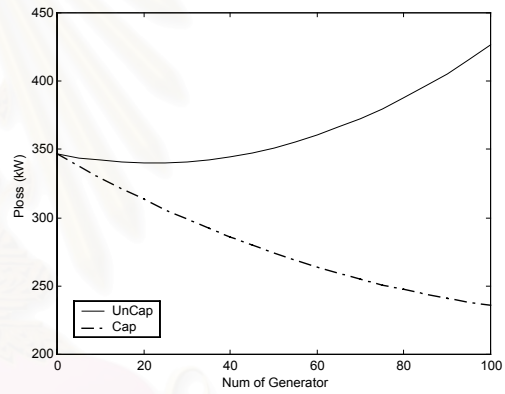


ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบผลโหลดโวลต์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

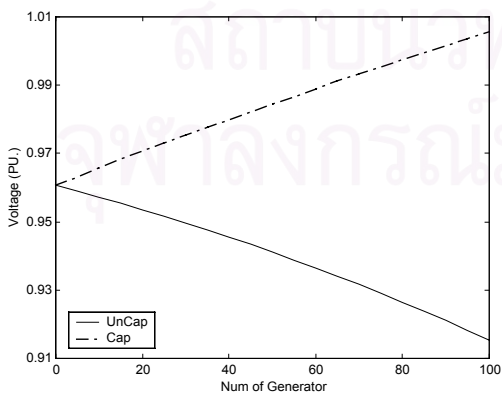


ก) แรงดัน

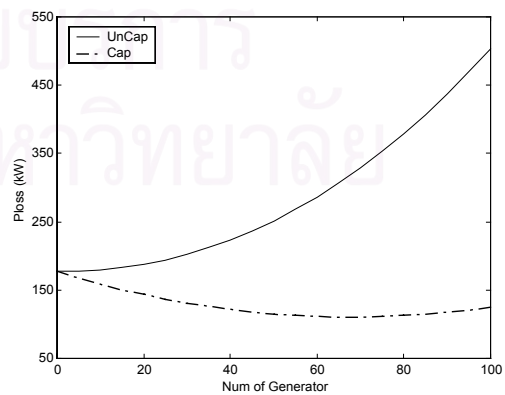


ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบผลโหลดโวลต์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 2 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

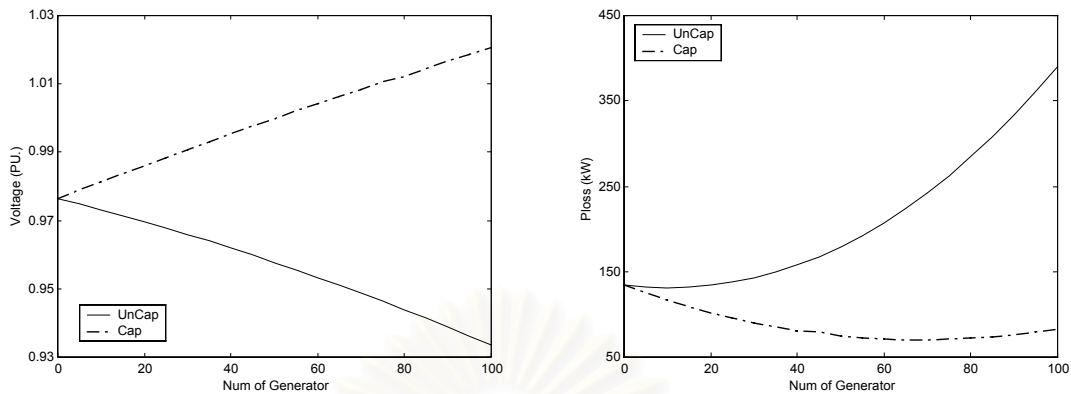


ก) แรงดัน



ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบผลโหลดโวลต์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 3 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ



ก) แรงดัน

ข) กำลังสูญเสีย

รูปที่ 7.8 เปรียบเทียบผลโหลดโพล์วของระบบไฟฟ้ากรณีที่ 4 เมื่อเพิ่มตัวเก็บประจุ

7.3.2 ผลการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการเปรียบเทียบผล เราจะทำการศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากผลการประเมินมูลค่าที่ได้รับจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ กับมูลค่าการลงทุนติดตั้งตัวเก็บประจุ ดังแสดงในตารางที่ 7.14-7.17 จะเห็นว่า ระยะเวลาในการคืนทุนในการติดตั้งตัวเก็บประจุ จะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่ โดยระยะเวลาในการคืนทุนจะอยู่ใน ช่วงเวลาประมาณ 7-10 เดือน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.14 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่
เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 1

กำลังการผลิต ของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง(kW)	มูลค่าที่ได้รับจากกำลัง สูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)	ราคาตัวเก็บ ประจุ(บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (เดือน)
0	0.00	0.00	0	-
5	9.11	9350.14	78100	8.35
10	17.85	18320.53	143000	7.81
15	26.21	26900.90	221100	8.22
20	34.21	35111.78	286000	8.15
25	41.84	42942.90	364100	8.48
30	49.10	50394.28	429000	8.51
35	56.00	57476.16	507100	8.82
40	62.55	64198.82	572000	8.91
45	68.74	70551.99	650100	9.21
50	74.57	76535.67	715000	9.34
55	80.05	82160.12	793100	9.65
60	85.18	87425.34	858000	9.81
65	89.96	92331.35	936100	10.14
70	94.40	96888.38	1001000	10.33
75	98.50	101096.46	1079100	10.67
80	102.26	104955.57	1144000	10.90
85	105.67	108455.46	1222100	11.27
90	108.76	111626.91	1287000	11.53
95	111.51	114449.40	1365100	11.93
100	113.92	116922.93	1430000	12.23

ตารางที่ 7.15 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่
เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 2

กำลังการผลิต ของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง(kW)	มูลค่าที่ได้รับจากกำลัง สูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)	ราคาตัวเก็บ ประจุ(บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (เดือน)
0	0.00	0.00	0	-
5	8.83	9062.76	78100	8.62
10	17.30	17756.03	143000	8.05
15	25.41	26079.81	221100	8.48
20	33.16	34034.10	286000	8.40
25	41.06	42142.34	364100	8.64
30	47.60	48854.74	429000	8.78
35	54.29	55721.08	507100	9.10
40	60.64	62238.47	572000	9.19
45	66.65	68406.89	650100	9.50
50	72.31	74216.09	715000	9.63
55	77.63	79676.33	793100	9.95
60	82.61	84787.60	858000	10.12
65	87.26	89560.17	936100	10.45
70	91.59	94004.31	1001000	10.65
75	95.55	98068.70	1079100	11.00
80	99.19	101804.65	1144000	11.24
85	102.59	105294.27	1222100	11.61
90	105.59	108373.35	1287000	11.88
95	108.21	111062.42	1365100	12.29
100	110.59	113505.15	1430000	12.60

ตารางที่ 7.16 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่
เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 3

กำลังการผลิต ของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง(kW)	มูลค่าที่ได้รับจากกำลัง สูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)	ราคาตัวเก็บ ประจุ(บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (เดือน)
0	0.00	0.00	0	-
5	9.69	9945.43	78100	7.85
10	18.51	18997.92	143000	7.53
15	27.94	28676.50	221100	7.71
20	34.83	35748.12	286000	8.00
25	41.45	42542.62	364100	8.56
30	47.30	48546.83	429000	8.84
35	52.45	53832.58	507100	9.42
40	56.72	58215.14	572000	9.83
45	60.33	61920.30	650100	10.50
50	63.20	64865.95	715000	11.02
55	65.36	67082.89	793100	11.82
60	66.39	68140.04	858000	12.59
65	67.56	69340.88	936100	13.50
70	67.62	69402.46	1001000	14.42
75	67.01	68776.38	1079100	15.69
80	65.72	67452.38	1144000	16.96
85	63.85	65533.09	1222100	18.65
90	61.16	62772.18	1287000	20.50
95	57.90	59426.24	1365100	22.97
100	54.00	55423.44	1430000	25.80

ตารางที่ 7.17 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่
เชื่อมโยงอยู่กับระบบกรณีที่ 4

กำลังการผลิต ของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ(kW)	ปริมาณกำลังสูญเสียที่ลดลง(kW)	มูลค่าที่ได้รับจากกำลัง สูญเสียที่ลดลง ในเวลา 1 เดือน (บาท)	ราคาตัวเก็บ ประจุ(บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (เดือน)
0	0.00	0.00	0	-
5	9.41	9658.05	78100	8.09
10	18.04	18515.53	143000	7.72
15	25.89	26572.46	221100	8.32
20	32.99	33859.62	286000	8.45
25	39.29	40325.68	364100	9.03
30	44.94	46124.62	429000	9.30
35	49.82	51133.26	507100	9.92
40	53.99	55413.18	572000	10.32
45	55.45	56911.66	650100	11.42
50	60.21	61797.14	715000	11.57
55	62.29	63931.96	793100	12.41
60	63.69	65368.87	858000	13.13
65	64.41	66107.85	936100	14.16
70	64.48	66179.69	1001000	15.13
75	63.90	65584.40	1079100	16.45
80	62.67	64321.98	1144000	17.79
85	60.80	62402.69	1222100	19.58
90	58.30	59836.79	1287000	21.51
95	55.18	56634.54	1365100	24.10
100	51.44	52795.96	1430000	27.09

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ปัจจัยสำคัญในการกำหนดจุดทำงานในสถานะกระตุ้นตัวเองได้แก่ ตัวเก็บประจุ ความเร็วโรเตอร์ และขนาดโหลด ซึ่งปัจจัยแต่ละอย่างก็จะส่งผลให้จุดทำงานมีค่าเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไป ดังนั้น ในการนำไปใช้งาน จำเป็นต้องทำการคำนวณหาจุดทำงานที่เหมาะสมดังที่ได้แสดงไว้ เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการกำหนดค่า และทำการควบคุมค่าต่างๆ ให้ได้ใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ โดยใช้ผลจากการศึกษาเป็นแนวทางในการปรับแต่งจุดทำงานเพื่อให้ความเหมาะสมยิ่งขึ้น

ในการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองนั้น จะต้องมีเงื่อนไขต่างๆ มากมาย อีกทั้งผลของการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเอง จะขึ้นอยู่กับโหลดและขนาดตัวเก็บประจุด้วย ทำให้การควบคุมการเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองทำได้ยาก อีกทั้งจำเป็นต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการการควบคุม เพิ่มเติมจากระบบเดิมที่ใช้อยู่ ซึ่งทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการจัดการแยกโหลดที่จ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากปัญหาต่างๆทำให้การนำไปใช้งานในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก

ส่วนการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ ดูเหมือนว่าจะมีผลดีต่อระบบเพราะจะช่วยลดกำลังจริงที่จะต้องส่งผ่านสายส่งมา แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังต้องการกำลังรีแอกทีฟอยู่ ผลโดยรวมจึงอาจก่อให้เกิดข้อเสียกับระบบไฟฟ้ามากกว่า ดังนั้นในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้ในสถานะที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบ จึงควรที่จะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ เพื่อเป็นการช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยที่ไม่ต้องพึ่งพากำลังรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้ากำลัง อีกทั้งยังช่วยลดกำลังสูญเสียให้ระบบไฟฟ้า และทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไป

1. พัฒนาออกแบบระบบควบคุมและระบบขับเคลื่อน เพื่อให้สามารถใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะกระตุ้นตัวเอง และทำการควบคุมจุดทำงานได้ตามต้องการ
2. ศึกษาผลของสถานะกระตุ้นตัวเองเมื่อโหลดไม่สมดุลย์
3. ศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว เช่น การเกิดไฟฟ้าดับหรือไฟฟ้าตก หรือ ผลในขณะที่ทำการเชื่อมโยงหรือแยกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบ
4. ศึกษาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่ออุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] E. Fitzgerald and Charles Kingsley, Jr. 1961. Electric machinery. New York : McGraw-Hill.
- [2] S.S Murthy, B.P. Singh, C. Nagamani and K.V.V. Satyanarayana. 1988. Studies on the use of conventional motors as self-excited induction generators. IEEE Trans. Vol. EC-3. No4. December 1988 : 842-848.
- [3] Pham K.D 1991. Cogeneration application: interconnection of induction generators with public electric utility. Rural Electric Power Conference 1991. Papers Presented at the 35th Annual Conference. : D4/1 -D4/7.
- [4] Sen P.K. and Nelson J.P. 1997. Application guidelines for induction generators. Electric Machines and Drives Conference Record. IEEE International : WC1/5.1 -WC1/5.3 .
- [5] Henderson, D.S..1996. Synchronous or induction generators? The choice for small scale generation. Opportunities and Advances in International Electric Power Generation. International Conference on (Conf. Publ. No. 419) : 146 –149.
- [6] Edward L. Owen and Glenn R. Griffith 1983. Induction Generator application for petroleum and chemical plants. IEEE Trans. Vol. IA-19. No6. November/December : 1003-1013.
- [7] Ray Holland. 1989. Appropriate technology rural electrification in developing countries. IEE Review July/August : 251-254.
- [8] Sutanto D., Grantham C.and Rahman F. 1993. A regulated self-excited induction generator for use in a remote area power supply. Electrical Machines and Drives 1993 Sixth International Conference on : 234 –239.
- [9] **Ralph Restieaux Lawrence; Revised by Henry E. Richards. 1953. Principles of alternating-current machinery**. New York : McGraw-Hill.
- [10] S.S. Murthy, O.P.malik and A.K. Tandon. 1982. Analysis of Self-Excited Induction Generators IEE ProC. Vol.129 Pt.C No.6. November : 260-265.
- [11] Glenn W. Stagg and Ahmed H. El-Abiad. 1985. Computer Methods in Power System Analysis. Singapore : McGraw Hill.
- [12] Peter Vas. 1992. Electrical Machines and Drives. Oxford : Pergamon.

- [13] McPherson George and Laramore Robert D. 1990. **An introduction to electrical machines and transformers.** New York : John Wiley.
- [14] Stephen G. Nash and Ariela Sofer. 1996. Linear and Nonlinear Programming. Singapore : McGraw Hill.
- [15] N.H. Malik and A.A. Mazi. 1987. Capacitor Requirements for Self-Excited Induction Generators. IEEE Trans. Vol. EC-2. No1. March : 62-68.
- [16] A.K. Tandon, S.S. Murthy and G.J. Berg. 1984. Steady State Analysis of Capacitor Self-Excited Induction Generators. IEEE Trans. Vol. PAS-103. No3. March : 612-618.
- [17] Tande J.O.G.. 1998. **Impact of wind turbines on voltage quality.** Harmonics and Quality of Power Proceedings. 8th International Conference On Vol. 2 . : 1158 -1161 .
- [18] Grainger J.J. and Stevenson D.W.Jr. 1994. Power System Analysis. New York : McGraw-Hill.
- [19] Wood A. J.and Wollenberg B.F. 1984. Power generation operation and control. New York : John Wiley.
- [20] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2542. รายงานฉบับสมบูรณ์ การศึกษาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในประเทศไทย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

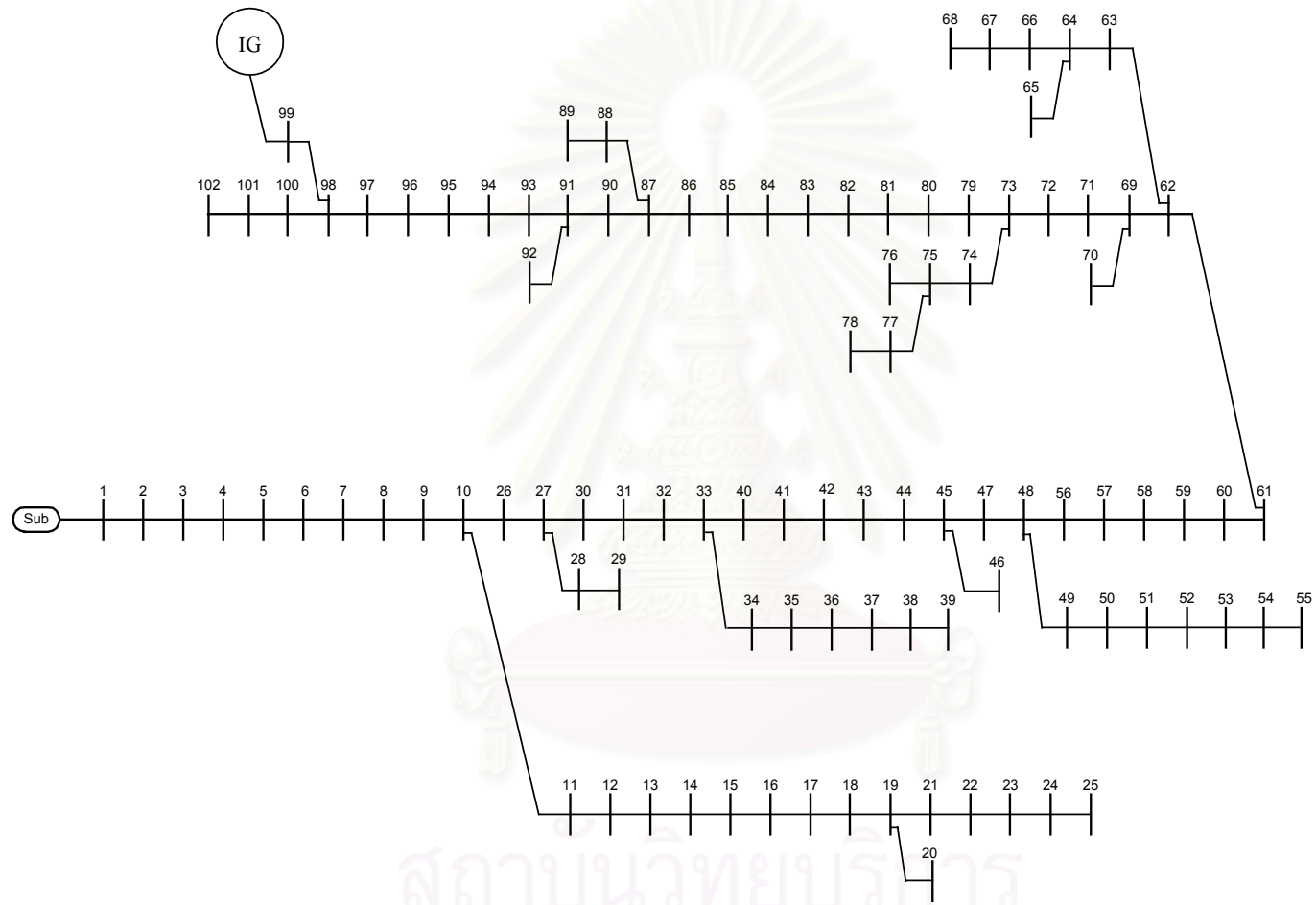
ภาคผนวก ก

ข้อมูลระบบทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของสายส่ง

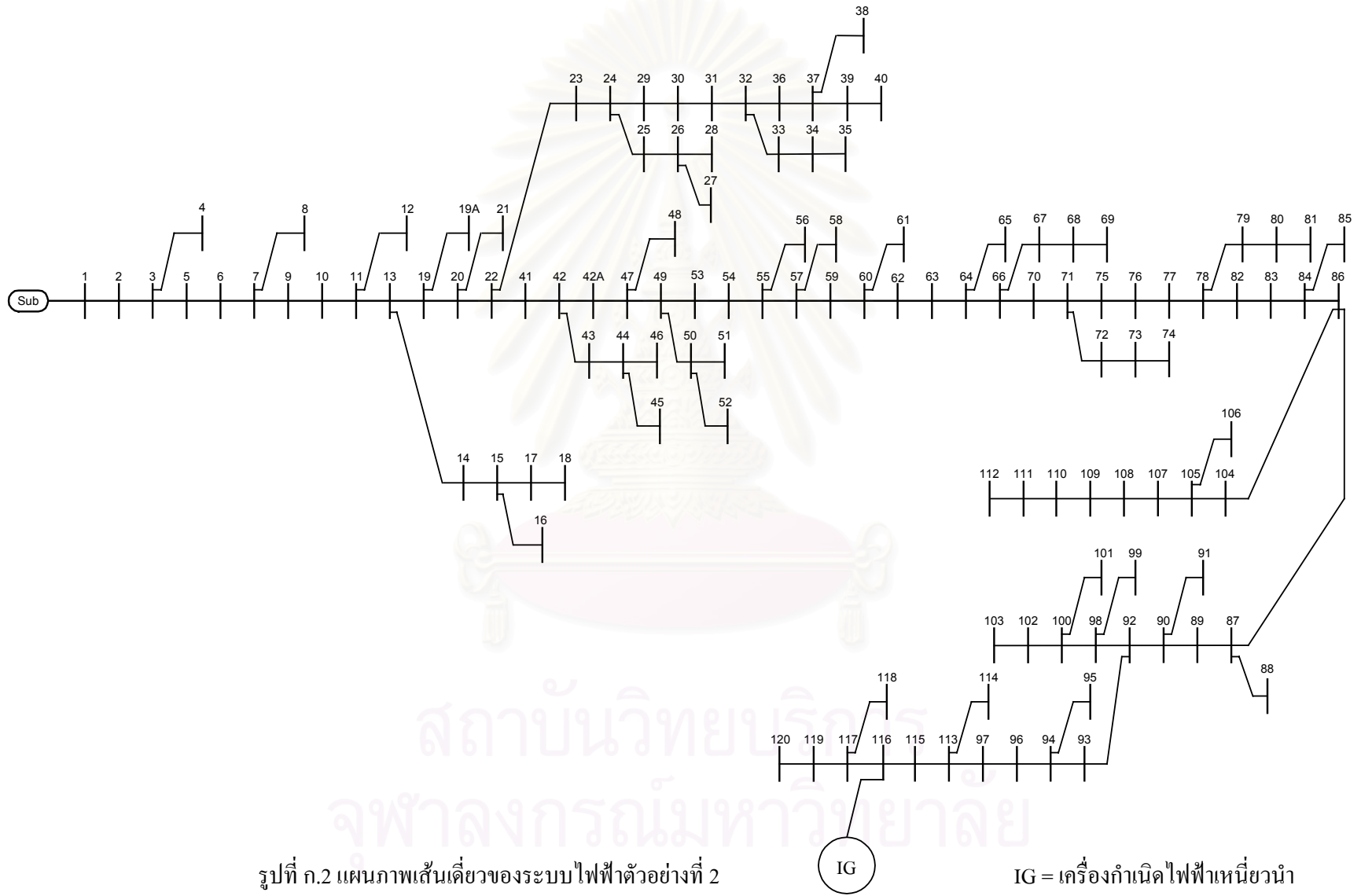
ประเภทสาย	R(ohm/km)	X(ohm/km)
120A	0.26643	0.36147
120PIC	0.26643	0.34869
185A	0.17571	0.34721
185PIC	0.17571	0.33444
50ACSR	0.66668	0.38899
50PIC	0.64015	0.37985
95A	0.34059	0.3692
AVR	0.0001	0.0002
UG	0.1	0.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.1 แผนภาพเส้นเคเบิลของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

IG = เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ ก.2 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

IG

IG = เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังระบบที่ 1

From Node	To Node	Type	Length(km)	From Node	To Node	Type	Length(km)
SA	1	185A	0.220	30	31	185A	0.100
1	2	185A	0.500	31	32	185A	0.100
2	3	185A	1.000	32	33	185A	0.100
3	4	185A	0.200	33	34	50ACSR	0.200
4	5	185A	0.200	34	35	50ACSR	0.100
5	6	185A	0.300	35	36	50ACSR	0.100
6	7	185A	1.000	36	37	50ACSR	0.100
7	8	185A	0.300	37	38	50ACSR	0.100
8	9	185A	0.400	38	39	50ACSR	0.750
9	10	185A	0.500	33	40	185A	0.100
10	11	50ACSR	0.200	40	41	185A	0.500
11	12	50ACSR	0.300	41	42	185A	0.200
12	13	50ACSR	0.300	42	43	185A	0.100
13	14	50ACSR	0.250	43	44	185A	0.250
14	15	50ACSR	0.200	44	45	185A	0.150
15	16	50ACSR	0.200	45	46	50ACSR	0.350
16	17	50ACSR	0.400	45	47	120A	0.200
17	18	50ACSR	0.300	47	48	120A	0.300
18	19	50ACSR	0.500	48	49	50ACSR	0.300
19	20	50ACSR	0.200	49	50	50ACSR	0.500
19	21	50ACSR	0.300	50	51	50ACSR	0.100
21	22	50ACSR	0.150	51	52	50ACSR	0.310
22	23	50ACSR	0.500	52	53	50ACSR	0.300
23	24	50PIC	0.200	53	54	50ACSR	0.150
24	25	50PIC	0.200	54	55	50ACSR	0.350
10	26	185A	0.200	48	56	120A	0.400
26	27	185A	0.100	56	57	120A	0.250
27	28	50ACSR	0.150	57	58	120A	0.200
28	29	50ACSR	0.150	58	59	120A	0.100
27	30	185A	0.110	59	60	120A	0.200

ตารางที่ ก.2(ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังระบบที่ 1

From Node	To Node	Type	Length(km)	From Node	To Node	Type	Length(km)
60	61	120A	0.200	81	82	120A	0.300
10	62	120A	0.100	82	83	120A	0.250
62	63	120A	0.100	83	84	120A	0.700
63	64	120A	0.400	84	85	120A	0.600
64	65	120A	0.100	85	86	120A	0.100
64	66	50ACSR	0.100	86	87	120A	0.600
66	67	50ACSR	0.100	87	88	50ACSR	0.200
67	68	50ACSR	0.200	88	89	50ACSR	0.100
62	69	120A	0.180	87	90	120A	0.500
69	70	50ACSR	0.200	90	91	120A	0.200
69	71	120A	0.350	91	92	50ACSR	0.100
71	72	120A	0.300	91	93	120A	0.600
72	73	120A	0.400	93	94	120A	0.200
73	74	50ACSR	0.100	94	95	120A	0.230
74	75	50ACSR	0.500	95	96	120A	0.800
75	76	50ACSR	0.100	96	97	120A	0.800
75	77	50ACSR	0.100	97	98	120A	0.800
77	78	50ACSR	0.100	98	99	50ACSR	0.100
73	79	120A	0.400	98	100	120A	0.200
79	80	120A	0.500	100	101	120A	0.700
80	81	120A	0.500	101	102	120A	0.700

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังระบบที่ 2

From Node	To Node	Type	Length(km)	From Node	To Node	Type	Length(km)
SA	1	185A	1.000	29	30	185A	0.800
1	2	185A	0.200	30	31	185A	0.200
2	3	185A	0.500	31	32	185A	1.200
3	4	50ACSR	1.250	32	33	50ACSR	0.900
3	5	185A	1.000	33	34	50ACSR	1.700
5	6	185A	1.100	34	35	50ACSR	1.200
6	7	185A	1.500	32	36	50ACSR	0.200
7	8	50ACSR	0.040	36	37	50ACSR	0.600
7	9	185A	0.500	37	38	50ACSR	0.040
9	10	185A	1.100	37	39	50ACSR	0.550
10	11	185A	0.600	39	40	50ACSR	2.080
11	12	50ACSR	0.040	22	41	185A	0.400
11	13	185A	0.800	41	42	185A	0.800
13	14	50ACSR	0.900	42	43	50ACSR	1.620
14	15	50ACSR	0.100	43	44	50ACSR	4.000
15	16	50ACSR	0.500	44	45	50ACSR	2.310
15	17	50ACSR	2.450	44	46	50ACSR	0.540
17	18	50ACSR	0.600	42	42A	185A	0.600
13	19	185A	0.700	42A	47	185A	0.580
19	19A	50ACSR	0.040	47	48	50ACSR	1.410
19	20	185A	1.200	47	49	185A	0.250
20	21	50ACSR	0.040	49	50	50ACSR	4.040
20	22	185A	0.300	50	51	50ACSR	0.040
22	23	185A	0.900	51	52	50ACSR	2.950
23	24	50ACSR	2.000	49	53	185A	0.900
24	25	50ACSR	0.950	53	54	185A	0.800
25	26	50ACSR	0.450	54	55	185A	0.700
26	27	50ACSR	1.250	55	56	50ACSR	1.550
26	28	50ACSR	2.950	55	57	185A	0.500
24	29	185A	0.920	57	58	50ACSR	0.040

ตารางที่ ก.3(ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังระบบที่ 2

From Node	To Node	Type	Length(km)	From Node	To Node	Type	Length(km)
57	59	185A	0.400	89	90	120A	1.200
59	60	185A	0.500	90	91	50ACSR	0.040
60	61	50ACSR	1.650	90	92	120A	0.970
60	62	50ACSR	0.040	92	93	120A	0.560
62	63	185A	0.800	93	94	120A	0.360
63	64	185A	0.500	94	95	50ACSR	0.040
64	65	50ACSR	1.200	94	96	120A	0.620
64	66	185A	0.500	96	97	120A	2.100
66	67	50ACSR	0.130	92	98	50ACSR	0.040
67	68	50ACSR	1.350	98	99	50ACSR	0.040
68	69	50ACSR	1.380	98	100	50ACSR	0.200
66	70	185A	0.300	100	101	50ACSR	0.040
70	71	185A	0.500	100	102	50ACSR	0.800
71	72	50ACSR	1.870	102	103	50ACSR	1.340
72	73	50ACSR	1.900	86	104	120A	0.500
73	74	50ACSR	1.160	104	105	120A	0.400
71	75	185A	0.080	105	106	50ACSR	0.040
75	76	185A	0.420	105	107	120A	0.570
76	77	185A	0.900	107	108	50ACSR	1.430
77	78	185A	0.500	108	109	50ACSR	1.000
78	79	50ACSR	2.050	109	110	50ACSR	2.420
79	80	50ACSR	1.200	110	111	50ACSR	2.600
80	81	50ACSR	1.880	111	112	50ACSR	0.800
78	82	185A	1.300	97	113	120A	1.800
82	83	185A	1.500	113	114	50ACSR	0.900
83	84	185A	0.900	113	115	120A	0.500
84	85	50ACSR	0.040	115	116	120A	1.200
84	86	185A	0.500	116	117	50ACSR	0.740
86	87	185A	0.250	117	118	50ACSR	0.500
87	88	50ACSR	1.100	117	119	50ACSR	0.440
87	89	120A	0.320	119	120	50ACSR	0.500

ตารางที่ ก.4 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 1

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
1	100.00	75.00	66.14	36	100.00	80.00	60.00
3	150.00	112.50	99.22	37	50.00	37.50	33.07
4	50.00	37.50	33.07	38	50.00	37.50	33.07
5	100.00	75.00	66.14	39	100.00	80.00	60.00
6	160.00	128.00	96.00	40	150.00	112.50	99.22
7	100.00	80.00	60.00	41	200.00	160.00	120.00
8	100.00	75.00	66.14	42	160.00	128.00	96.00
9	100.00	75.00	66.14	43	100.00	75.00	66.14
11	150.00	120.00	90.00	44	160.00	120.00	105.83
12	100.00	75.00	66.14	46	150.00	112.50	99.22
13	150.00	120.00	90.00	47	100.00	75.00	66.14
14	100.00	75.00	66.14	49	150.00	112.50	99.22
15	100.00	75.00	66.14	50	100.00	75.00	66.14
16	100.00	75.00	66.14	51	300.00	225.00	198.43
17	50.00	37.50	33.07	52	200.00	150.00	132.29
18	100.00	75.00	66.14	53	100.00	75.00	66.14
20	50.00	37.50	33.07	54	100.00	75.00	66.14
21	80.00	60.00	52.92	55	300.00	225.00	198.43
22	100.00	75.00	66.14	56	200.00	150.00	132.29
23	160.00	120.00	105.83	57	100.00	75.00	66.14
24	150.00	112.50	99.22	58	200.00	150.00	132.29
25	150.00	112.50	99.22	59	100.00	75.00	66.14
26	100.00	75.00	66.14	60	700.00	400.00	300.00
28	100.00	75.00	66.14	61	300.00	225.00	198.43
29	100.00	75.00	66.14	63	100.00	75.00	66.14
30	60.00	45.00	39.69	65	60.00	48.00	36.00
31	100.00	80.00	60.00	66	200.00	150.00	132.29
32	150.00	112.50	99.22	67	150.00	112.50	99.22
34	100.00	75.00	66.14	68	150.00	112.50	99.22
35	100.00	75.00	66.14	70	100.00	75.00	66.14

ตารางที่ ก.4(ต่อ) ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 1

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
71	200.00	150.00	132.29	88	60.00	45.00	39.69
72	100.00	75.00	66.14	89	40.00	30.00	26.46
74	200.00	150.00	132.29	90	50.00	37.50	33.07
76	150.00	112.50	99.22	92	80.00	60.00	52.92
77	150.00	112.50	99.22	93	160.00	128.00	96.00
78	100.00	75.00	66.14	94	150.00	112.50	99.22
79	100.00	75.00	66.14	95	50.00	37.50	33.07
80	200.00	150.00	132.29	96	80.00	60.00	52.92
81	100.00	80.00	60.00	97	50.00	37.50	33.07
82	150.00	112.50	99.22	99	700.00	400.00	300.00
83	60.00	45.00	39.69	100	100.00	75.00	66.14
84	100.00	75.00	66.14	101	250.00	187.50	165.36
85	250.00	187.50	165.36	102	100.00	75.00	66.14
86	160.00	120.00	105.83				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 2

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
1	100.00	87.00	49.31	36	100.00	87.00	49.31
3	150.00	130.50	73.96	37	50.00	41.50	27.89
4	50.00	41.50	27.89	38	50.00	41.50	27.89
5	100.00	83.00	55.78	39	100.00	87.00	49.31
6	160.00	139.20	78.89	40	150.00	124.50	83.66
7	100.00	87.00	49.31	41	200.00	174.00	98.61
8	100.00	83.00	55.78	42	160.00	139.20	78.89
9	100.00	83.00	55.78	43	100.00	83.00	55.78
11	150.00	130.50	73.96	44	160.00	132.80	89.24
12	100.00	83.00	55.78	46	150.00	130.50	73.96
13	150.00	130.50	73.96	47	100.00	83.00	55.78
14	100.00	83.00	55.78	49	150.00	130.50	73.96
15	100.00	87.00	49.31	50	100.00	87.00	49.31
16	100.00	87.00	49.31	51	300.00	249.00	167.33
17	50.00	41.50	27.89	52	200.00	174.00	98.61
18	100.00	83.00	55.78	53	100.00	83.00	55.78
20	50.00	41.50	27.89	54	100.00	87.00	49.31
21	80.00	69.60	39.44	55	300.00	261.00	147.92
22	100.00	87.00	49.31	56	200.00	166.00	111.55
23	160.00	139.20	78.89	57	100.00	83.00	55.78
24	150.00	130.50	73.96	58	200.00	166.00	111.55
25	150.00	130.50	73.96	59	100.00	83.00	55.78
26	100.00	87.00	49.31	60	700.00	400.00	300.00
28	100.00	83.00	55.78	61	300.00	249.00	167.33
29	100.00	87.00	49.31	63	100.00	83.00	55.78
30	60.00	49.80	33.47	65	60.00	52.20	29.58
31	100.00	87.00	49.31	66	200.00	166.00	111.55
32	150.00	124.50	83.66	67	150.00	130.50	73.96
34	100.00	83.00	55.78	68	150.00	130.50	73.96
35	100.00	83.00	55.78	70	100.00	87.00	49.31

ตารางที่ ก.5(ต่อ) ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 2

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
71	200.00	174.00	98.61	88	60.00	49.80	33.47
72	100.00	83.00	55.78	89	40.00	33.20	22.31
74	200.00	166.00	111.55	90	50.00	41.50	27.89
76	150.00	124.50	83.66	92	80.00	66.40	44.62
77	150.00	124.50	83.66	93	160.00	139.20	78.89
78	100.00	83.00	55.78	94	150.00	124.50	83.66
79	100.00	87.00	49.31	95	50.00	43.50	24.65
80	200.00	174.00	98.61	96	80.00	66.40	44.62
81	100.00	87.00	49.31	97	50.00	41.50	27.89
82	150.00	130.50	73.96	99	700.00	400.00	300.00
83	60.00	52.20	29.58	100	100.00	87.00	49.31
84	100.00	87.00	49.31	101	250.00	207.50	139.44
85	250.00	217.50	123.26	102	100.00	83.00	55.78
86	160.00	132.80	89.24				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 3

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
2	100.000	72.000	69.397	47	40.000	28.800	27.759
4	50.000	36.000	34.699	48	50.000	40.000	30.000
5	40.000	28.800	27.759	51	30.000	21.600	20.819
6	20.000	16.000	12.000	52	20.000	14.400	13.879
8	50.000	40.000	30.000	53	15.000	12.000	9.000
9	50.000	36.000	34.699	54	15.000	12.000	9.000
10	40.000	32.000	24.000	56	25.000	20.000	15.000
12	25.000	18.000	17.349	58	30.000	21.600	20.819
14	40.000	28.800	27.759	59	15.000	10.800	10.410
16	50.000	36.000	34.699	60	60.000	43.200	41.638
17	40.000	32.000	24.000	61	60.000	43.200	41.638
18	40.000	28.800	27.759	63	40.000	28.800	27.759
21	50.000	36.000	34.699	65	50.000	36.000	34.699
23	50.000	36.000	34.699	67	60.000	43.200	41.638
25	60.000	43.200	41.638	68	90.000	64.800	62.458
27	50.000	36.000	34.699	69	50.000	36.000	34.699
28	60.000	43.200	41.638	70	80.000	57.600	55.518
29	90.000	64.800	62.458	72	60.000	43.200	41.638
30	50.000	36.000	34.699	73	40.000	28.800	27.759
31	60.000	43.200	41.638	74	30.000	24.000	18.000
33	50.000	36.000	34.699	76	30.000	21.600	20.819
34	60.000	43.200	41.638	77	25.000	18.000	17.349
35	80.000	57.600	55.518	79	30.000	21.600	20.819
36	80.000	57.600	55.518	80	60.000	43.200	41.638
38	50.000	40.000	30.000	81	30.000	21.600	20.819
39	60.000	43.200	41.638	82	25.000	18.000	17.349
40	60.000	43.200	41.638	83	40.000	28.800	27.759
43	50.000	36.000	34.699	85	60.000	43.200	41.638
45	80.000	57.600	55.518	88	25.000	18.000	17.349
46	60.000	43.200	41.638	89	60.000	43.200	41.638

ตารางที่ ก.6(ต่อ) ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 3

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
91	50.000	40.000	30.000	108	50.000	36.000	34.699
93	30.000	21.600	20.819	109	40.000	28.800	27.759
95	30.000	24.000	18.000	110	80.000	57.600	55.518
96	45.000	32.400	31.229	111	50.000	36.000	34.699
97	30.000	21.600	20.819	112	60.000	43.200	41.638
99	50.000	36.000	34.699	114	50.000	36.000	34.699
101	50.000	36.000	34.699	115	50.000	36.000	34.699
102	40.000	28.800	27.759	116	400.000	250.000	150.000
103	45.000	32.400	31.229	118	50.000	36.000	34.699
104	100.000	72.000	69.397	119	40.000	28.800	27.759
106	50.000	36.000	34.699	120	60.000	43.200	41.638
107	80.000	57.600	55.518				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 4

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
2	100.00	80.00	60.00	47	40.00	32.00	24.00
4	50.00	42.50	26.34	48	50.00	42.50	26.34
5	40.00	34.00	21.07	51	30.00	25.50	15.80
6	20.00	17.00	10.54	52	20.00	16.00	12.00
8	50.00	42.50	26.34	53	15.00	12.75	7.90
9	50.00	42.50	26.34	54	15.00	12.75	7.90
10	40.00	34.00	21.07	56	25.00	21.25	13.17
12	25.00	20.00	15.00	58	30.00	25.50	15.80
14	40.00	32.00	24.00	59	15.00	12.00	9.00
16	50.00	42.50	26.34	60	60.00	51.00	31.61
17	40.00	34.00	21.07	61	60.00	51.00	31.61
18	40.00	34.00	21.07	63	40.00	32.00	24.00
21	50.00	42.50	26.34	65	50.00	42.50	26.34
23	50.00	40.00	30.00	67	60.00	51.00	31.61
25	60.00	51.00	31.61	68	90.00	76.50	47.41
27	50.00	40.00	30.00	69	50.00	42.50	26.34
28	60.00	51.00	31.61	70	80.00	68.00	42.14
29	90.00	76.50	47.41	72	60.00	51.00	31.61
30	50.00	42.50	26.34	73	40.00	32.00	24.00
31	60.00	51.00	31.61	74	30.00	25.50	15.80
33	50.00	42.50	26.34	76	30.00	25.50	15.80
34	60.00	51.00	31.61	77	25.00	20.00	15.00
35	80.00	64.00	48.00	79	30.00	25.50	15.80
36	80.00	68.00	42.14	80	60.00	48.00	36.00
38	50.00	42.50	26.34	81	30.00	25.50	15.80
39	60.00	48.00	36.00	82	25.00	20.00	15.00
40	60.00	51.00	31.61	83	40.00	34.00	21.07
43	50.00	42.50	26.34	85	60.00	51.00	31.61
45	80.00	64.00	48.00	88	25.00	20.00	15.00
46	60.00	51.00	31.61	89	60.00	48.00	36.00

ตารางที่ ก.7(ต่อ) ค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่ 4

Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)	Node	S(kVA)	P(kW)	Q(kVar)
91	50.00	42.50	26.34	108	50.00	40.00	30.00
93	30.00	24.00	18.00	109	40.00	34.00	21.07
95	30.00	25.50	15.80	110	80.00	64.00	48.00
96	45.00	36.00	27.00	111	50.00	42.50	26.34
97	30.00	25.50	15.80	112	60.00	48.00	36.00
99	50.00	40.00	30.00	114	50.00	42.50	26.34
101	50.00	42.50	26.34	115	50.00	42.50	26.34
102	40.00	32.00	24.00	116	400.00	250.00	150
103	45.00	38.25	23.71	118	50.00	42.50	26.34
104	100.00	85.00	52.68	119	40.00	34.00	200.00
106	50.00	40.00	30.00	120	60.00	51.00	26.34
107	80.00	68.00	42.14				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ราคาตัวเก็บประจุ

ขนาด (kVar)	ราคาชุดตัวเก็บประจุ(บาท) ยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม	ราคาชุดตัวเก็บประจุ(บาท) เมื่อรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม
20	14500	15950
30	19000	20900
40	22000	24200
50	22500	24750
60	26000	28600

หมายเหตุ

1. ชุดตัวเก็บประจุ จะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุชนิดแห้ง(Polypropylene Film) ติดตั้งบนแผ่นเพลทพร้อมด้วยคอนแทกเตอร์ ฟิวส์ป้องกัน รวมถึงการเดินสายเคเบิลไว้เรียบร้อย พร้อมสำหรับนำไปใช้งานได้ทันที
2. ภาษีมูลค่าเพิ่มคิดเป็นร้อยละ 10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายวิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์ เกิดวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 ด้วยทุนการศึกษาของสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย