

การออกแบบการควบคุมเชิงพลวัตสำหรับอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์เชิงสวิตช์  
เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดัน

นายกรกฎ วงษ์นิยม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DYNAMIC CONTROL DESIGN OF STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR  
FOR SECURING VOLTAGE STABILITY

Mr. Korrakot Wongniyom

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบการควบคุมเชิงพลวัตสำหรับอุปกรณ์ชดเชย ซึ่งโครนอสเชิงสถิติเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดัน
โดย	นายกรกฎ วงษ์นิยม
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุ่นเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุ่นเจริญ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สันชัย เตชานุกาพฤทธา)

กรกฎ วงษ์นิยม : การออกแบบการควบคุมเชิงพลวัตสำหรับอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัส  
เชิงสถิตเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดัน.(DYNAMIC CONTROL DESIGN OF STATIC  
SYNCHRONOUS COMPENSATOR FOR SECURING VOLTAGE STABILITY)  
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. แนนบุญ หุ่นเจริญ, 80 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์  
ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยใช้  
หลักการแก้ปัญหาสมการเมทริกซ์เชิงเส้น ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมด  
การหาตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต ใช้หลักการ  
พิจารณา巴士ที่มีผลต่อกลุ่มโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ณ ภาวะการทำงาน  
ของระบบที่แตกต่างกันไปมากที่สุด การทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันอ้างอิงที่นำเสนอ  
นี้ ใช้ระบบทดสอบ 9 บัสและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย  
ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแปรผันปกติและแบบเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่ ผล  
การศึกษาพบว่ากรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตแบบปรับค่า  
ได้จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันของระบบได้ดีกว่ากรณีกำหนด  
แรงดันอ้างอิงแบบคงที่ ส่งผลให้ความสามารถในการมีโหลดได้ของระบบส่งไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น  
นอกจากนี้ยังได้นำการออกแบบเดียวกันนี้ไปประยุกต์ในการออกแบบการควบคุมแรงดัน  
อ้างอิงร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต ผล  
การทดสอบโดยเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่พบว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงร่วมกันยังสามารถ  
รักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไว้ได้ยาวนานขึ้นกว่ากรณีการควบคุมแรงดันอ้างอิงของ  
อุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตตัวเดียว ส่งผลให้ความสามารถในการมีโหลดได้โดยรวมของ  
ระบบเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2554.....

# # 5270653921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : VOLTAGE STABILITY/ Q-V MODAL ANALYSIS/ BUS PARTICIPATION FACTORS/ STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR/ LINEAR MATRIX INEQUALITY

KORRAKOT WONGNIYOM : DYNAMIC CONTROL DESIGN OF STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR FOR SECURING VOLTAGE STABILITY.

ADVISOR : ASST. PROF. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 80 pp.

This thesis proposes the control design of adaptive reference voltage for static synchronous compensator for securing voltage stability of a power transmission system, employing the principle of linear matrix inequality in coordination with voltage stability modal analysis. The suitable location of static synchronous compensator is determined by considering a bus at which it is mostly associated with those modes highly risky to voltage instability, when investigating at various system conditions. Performance of the proposed method has been verified on the 9-bus WSCC test system and the northeastern Thailand's transmission system under normal load variation and ramp load increase. Test results show that the case with adaptive reference voltage for static synchronous compensator can extend the system's voltage stability longer than in the case with fixed reference voltage. In turn, load transfer capability of the system is significantly increased. Additionally, the proposed method has been extended to simultaneously determine reference voltages of both synchronous generators and static synchronous compensator. In so doing, it finds that voltage stability of the test system has even been better sustained. As a result, the total load transfer capability of the system has been much improved.

Department : ..... Electrical Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study : ..... Electrical Engineering ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..... 2011 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณสำหรับคำแนะนำและแนวคิดต่างๆ จาก ผศ. ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งสิ่งที่ได้รับเหล่านี้เป็นแรงบันดาลใจในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย ผศ. ดร.สมบุญรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ รศ. ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย และ อาจารย์ ดร. สัตยชัย เดชานุกาพฤทธา ที่ได้สละเวลามาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ แนะนำและเปิดสอนในวิชาที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยของผู้วิจัย

ขอบพระคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อนๆ ของผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับคำปรึกษาและกำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ครอบครัวของผู้วิจัย และผู้ที่มีได้กล่าวถึงอีกมากมาย สำหรับการช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า .....	5
2.1 นิยามและความรู้พื้นฐาน.....	5
2.2 การจำแนกประเภทการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดัน.....	6
2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน.....	9
2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมด.....	11
2.4.1 โหมดการเสถียรภาพแรงดัน.....	11
2.4.2 ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมของบัส .....	14
บทที่ 3 อุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต.....	15
3.1 องค์ประกอบเชิงกายภาพ .....	15

3.2 หลักการทำงาน.....	16
3.3 แบบจำลองอุปกรณ์และการควบคุม.....	19
บทที่ 4 อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น.....	22
4.1 รูปแบบของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น.....	22
4.2 การแก้ปัญหาอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น.....	23
4.3 ตัวอย่างการประยุกต์.....	24
บทที่ 5 การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต.....	26
5.1 การหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต.....	26
5.2 การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น.....	27
5.3 การประยุกต์การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบส่งไฟฟ้า.....	29
5.4 การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน.....	33
บทที่ 6 ระบบทดสอบและกรณีศึกษา.....	35
6.1 ระบบทดสอบ 9 บัส.....	35
6.2 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	36
6.3 กรณีศึกษา.....	36
บทที่ 7 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	41
7.1 กรณีศึกษาที่ 1 : การหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต.....	41
7.2 กรณีศึกษาที่ 2 : เปรียบเทียบติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส 5 และ 6.....	45
7.3 กรณีศึกษาที่ 3 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในสภาวะปกติ.....	46
7.4 กรณีศึกษาที่ 4 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบทดสอบ 9 บัส.....	47
7.5 กรณีศึกษาที่ 5 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	50
7.6 กรณีศึกษาที่ 6 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	52



7.7 กรณีศึกษาที่ 7 : เปรียบเทียบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน.....	54
บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	57
8.1 สรุปผล.....	57
8.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก. แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบส่งไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม.....	62
ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบทดสอบ.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการติดตั้งและพิกัดของอุปกรณ์ชุดเซชชิงโครนัสเชิงสถิต.....	18
ตารางที่ 7.1 กรณีสายส่งของบัส 5 เป็น 190 เมกกะวัตต์ .....	41
ตารางที่ 7.2 กรณีสายส่งของบัส 7 เป็น 130 เมกกะวัตต์ .....	42
ตารางที่ 7.3 กรณีสายส่งของบัสที่ 5 7 และ 9 เป็น 200 130 และ 300 เมกกะวัตต์.....	42
ตารางที่ 7.4 ดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซชชิงโครนัสเชิงสถิตของระบบ 9 บัส.....	43
ตารางที่ 7.5 ดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซชชิงโครนัสเชิงสถิตของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ .....	44
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบ 9 บัส.....	68
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบ 9 บัส .....	69
ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบทดสอบ 9 บัส.....	69
ตารางที่ ข.4 ข้อมูลบัสในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย.....	70
ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย.....	73
ตารางที่ ข.6 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย.....	78
ตารางที่ ข.7 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย.....	78
ตารางที่ ข.8 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย .....	78
ตารางที่ ข.9 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย .....	79

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในภาวะชั่วคราว.....	7
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในระยะเวลาปานกลาง .....	8
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในระยะเวลายาว .....	9
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบหลักของแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้า .....	10
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดัน.....	11
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟและแรงดัน .....	14
รูปที่ 3.1 การติดตั้งและวงจรสมมูลหนึ่งเฟสของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต .....	16
รูปที่ 3.2 การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต.....	16
รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต.....	17
รูปที่ 3.4 แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตและการควบคุม .....	19
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต .....	20
รูปที่ 5.1 พื้นที่เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบที่ต้องการ.....	27
รูปที่ 5.2 ภาพรวมการออกแบบการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต.....	30
รูปที่ 5.3 กำหนดขอบเขตของพื้นที่เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบที่ต้องการ .....	31
รูปที่ 5.4 ขั้นตอนวิธีการหาค่าแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ .....	32
รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ 9 บัสติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส 5 .....	35
รูปที่ 6.2 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย [18] .....	36
รูปที่ 6.3 โหลดแปรผันปกติที่ใช้ทดสอบ .....	38
รูปที่ 7.1 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ $J_R$ .....	45
รูปที่ 7.2 ขนาดแรงดันบัสต่างๆในระบบทดสอบ 9 บัส .....	45
รูปที่ 7.3 เปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันจริงของบัส 5.....	46
รูปที่ 7.4 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ $J_R$ .....	47

รูปที่ 7.5 ขนาดของแรงดันบัลต์ต่างๆของระบบทดสอบ 9 บัลต์ ..... 48

รูปที่ 7.6 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$ ..... 48

รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันจริงของบัลต์ 5..... 49

รูปที่ 7.8 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่อุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิต ..... 49

รูปที่ 7.9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัลต์ 7 ..... 50

รูปที่ 7.10 ขนาดของแรงดันบัลต์ต่างๆของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ..... 51

รูปที่ 7.11 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$ ..... 51

รูปที่ 7.12 ขนาดแรงดันที่บัลต์ต่างๆในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ..... 52

รูปที่ 7.13 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$ ..... 53

รูปที่ 7.14 เปรียบเทียบขนาดแรงดันอ้างอิงและขนาดแรงดันจริงของบัลต์ที่มีการควบคุมแรงดัน ... 53

รูปที่ 7.15 ขนาดแรงดันที่บัลต์ต่างๆในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ..... 54

รูปที่ 7.16 เปรียบเทียบขนาดแรงดันอ้างอิงและขนาดแรงดันจริงของบัลต์ที่มีการควบคุมแรงดัน ... 54

รูปที่ 7.17 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัลต์ NR2..... 55

รูปที่ 7.18 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัลต์ RE1 ..... 56

รูปที่ 7.19 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัลต์ UD1..... 56

รูปที่ ก.1 ระบบควบคุมความเร็ว ..... 64

รูปที่ ก.2 ระบบกระตุ้น ..... 64

รูปที่ ก.3 ส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า..... 64

รูปที่ ก.4 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่ของโหลด ..... 65

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเป็นปัญหาที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อระบบไฟฟ้า ปัจจุบันปัญหาดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิดเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันสามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น การปลดโหลด การชดเชยด้วยกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ การจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าใหม่ การปรับเปลี่ยนเส้นทางไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นต้น การชดเชยด้วยกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟได้รับความสนใจและถูกนำมาใช้แก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้ามากขึ้น

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟหลายชนิดที่นำมาใช้ในการรักษาแรงดัน ซึ่งแต่ละอุปกรณ์นั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป อุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต (Static synchronous compensator; STATCOM) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถสร้างแรงดันกระแสลับสมดุล 3 เฟสและควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟได้และมีการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงถูกนำมาใช้ในการนำมาเพิ่มความสามารถในการรักษาเสถียรภาพแรงดันเชิงพลวัตให้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ในการจะรักษาเสถียรภาพแรงดันให้มีประสิทธิภาพ ตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตถูกนำมาพิจารณาด้วย ถ้าติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตในตำแหน่งที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้การชดเชยกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟช่วยแก้ไขปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันได้ดียิ่งขึ้น การหาตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตใช้หลักการของตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัส ซึ่งแสดงถึงการมีส่วนร่วมของบัสที่ส่งผลต่อโหมด และการคำนวณหาโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันที่สุดในระบบ จะใช้ทฤษฎีของการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมดมาพิจารณา ซึ่งตัวอย่างและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสและการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมดแสดงอยู่ใน [1, 2, 3]

ในเชิงวิศวกรรมควบคุมอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาออกแบบตัวควบคุม เนื่องจากหลายปัญหาหรือข้อจำกัดต่างๆทางวิศวกรรมสามารถสร้างให้อยู่ในรูปแบบของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นได้ คุณสมบัติสำคัญอีกอย่างหนึ่งของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นคือความเป็นคอนเวกซ์ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายด้วยคอนเวกซ์โปรแกรมมิ่งและมีเครื่องมือสำเร็จรูปในการแก้ปัญหาที่แสดงอยู่ใน [4]

ในหลายปีที่ผ่านมาการนำอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลังได้รับความสนใจมากขึ้น ดังเช่น การออกแบบตัวควบคุมใน [5, 6] เนื่องจากปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถสร้างอยู่ในรูปแบบอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นมาใช้ในการแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันที่เป็นปัญหาหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยนำหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงใหม่มาใช้ในการออกแบบการควบคุมของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตด้วย ในส่วนของการทดสอบความสามารถของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ จะทดสอบเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันกับระบบทดสอบ 9 บัส [7] และระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยจะเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่และกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตที่ได้ทำการออกแบบ นอกจากนี้ยังได้นำหลักการเดียวกันที่ใช้ในการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต ไปใช้ในการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน เพื่อทำให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการทำวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตและแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

2. สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตโดยละเอียดภาวะชั่วคราวของคอนเวอร์เตอร์

3. ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงใหม่ร่วมในการออกแบบการควบคุมของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต

4. ทดสอบสมรรถนะการควบคุมของอุปกรณ์ชุดเซซิงโครนัสเชิงสถิตกับระบบทดสอบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

#### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในการทำการวิจัย มีขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพแรงดันและปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้า
3. ศึกษาการนำอุปกรณ์ชุดเซซิงโครนัสเชิงสถิตมาใช้แก้ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้า
4. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์ชุดเซซิงโครนัสเชิงสถิต
5. ศึกษาวิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซซิงโครนัสเชิงสถิต
6. สร้างการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซซิงโครนัสเชิงสถิตและทดสอบกับระบบทดสอบที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink
7. วิเคราะห์ผลการศึกษาและสรุปผลการวิจัย
8. เรียบเรียง พิมพ์ผลงานการวิจัย และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การควบคุมของอุปกรณ์ชุดเซซิงโครนัสเชิงสถิตที่ออกแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพแรงดันทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความมั่นคงและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

#### 1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมในแต่ละบทเป็นดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เสถียรภาพแรงดัน: กล่าวถึงนิยามและความรู้พื้นฐาน ประเภทของเสถียรภาพแรงดัน รวมไปถึงดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน (การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมด)

บทที่ 3 อุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิต: กล่าวถึงองค์ประกอบทางกายภาพ หลักการทำงาน แบบจำลองและการควบคุมของอุปกรณ์เซยซิงโครนัสเชิงสถิต

บทที่ 4 อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น: กล่าวถึงรูปแบบ การแก้ปัญหา และตัวอย่างการประยุกต์ใช้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

บทที่ 5 การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิต กล่าวถึงการหาตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิต การออกแบบและการประยุกต์การควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตโดยใช้วิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น รวมไปถึงการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน

บทที่ 6 ระบบทดสอบและกรณีศึกษา กล่าวถึงระบบทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และเป้าหมายและวิธีการทดสอบของกรณีศึกษา

บทที่ 7 การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบของความสามารถของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ที่ออกแบบ

บทที่ 8 นำเสนอบทสรุป และข้อเสนอแนะของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



## บทที่ 2

### เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ปัญหาเสถียรภาพแรงดันเป็นปัญหาสำคัญที่สร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพแรงดันแสดงในหัวข้อ 2.1 และในหัวข้อ 2.2 กล่าวถึงการจำแนกประเภทการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดัน หัวข้อ 2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน และในส่วนของหัวข้อ 2.4 กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิง โหมดที่ใช้เป็นดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันของระบบ

#### 2.1 นิยามและความรู้พื้นฐาน

เสถียรภาพแรงดันหมายถึง ความสามารถของระบบที่สามารถรักษาแรงดันให้มั่นคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ภายใต้การทำงานปกติหรือหลังจากเกิดเหตุการณ์รบกวน [1] เช่น โหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง, ความผิดพลาดต่างๆ เป็นต้น เมื่อเกิดเหตุการณ์รบกวนขึ้นในระบบอาจส่งผลให้ความต้องการโหลดเพิ่มมากขึ้นหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ ทำให้แรงดันในระบบลดลงอย่างต่อเนื่องและไม่สามารถควบคุมได้ โดยผลที่ตามมาคือการสูญเสียโหลด, สายส่งเส้นและอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบถูกปลดด้วยระบบป้องกัน จากเหตุการณ์นี้ทำให้ระบบโดยรวมที่เหลือยังมีความอ่อนแอลง หรือระยะทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟไปสู่อุปกรณ์มีระยะทางไกลยิ่งขึ้น อาจส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพแรงดันได้ ซึ่งการสูญเสียเสถียรภาพของบัสใดบัสหนึ่งในระบบอาจแพร่กระจายไปสู่บัสอื่นๆ ได้อย่างรวดเร็ว เหตุการณ์ลักษณะนี้เรียกว่า “การเกิดการพังทลายของแรงดัน” (Voltage Collapse) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

การเกิดการพังทลายของแรงดันคือกระบวนการที่เป็นผลต่อเนื่องมาจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันซึ่งนำไปสู่การมีระดับแรงดันที่ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ในส่วนสำคัญของระบบ [1]

ปัจจัยที่สำคัญของการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันของระบบคือการสูญเสียเสถียรภาพของระบบในการจ่ายโหลดได้อย่างเพียงพอ โดยปกติปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเกิดจากโหลดที่ตอบสนองของสิ่งรบกวน ทำให้ปริมาณโหลดบริเวณใดบริเวณหนึ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนเข้าใกล้ขีดจำกัดเชิงเสถียรภาพแรงดัน (Stability Limit) ของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งอาจส่งผลให้สายส่งบางเส้นมีปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลผ่านเกินขีดจำกัดและอาจถูกปลดออกจากระบบ ทำให้ระยะทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟไปสู่อุปกรณ์มีระยะทางที่ไกลขึ้น ทำให้ระบบอ่อนแอลง ส่งผลให้แรงดันตกลงอย่างต่อเนื่องและความต้องการของโหลดเพิ่มมากขึ้น จนทำให้

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส เข้าสู่ขีดจำกัดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันได้

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันอีกประการหนึ่งได้แก่ ลักษณะโหลดบางประเภทหรืออุปกรณ์ควบคุมที่ตอบสนองไวต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด (ULTC) เป็นต้น ซึ่งในภาวะชั่วขณะที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบและส่งผลให้แรงดัน ณ จุดต่างๆ ลดต่ำลง การตอบสนองเชิงพลวัตต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของโหลด หรืออุปกรณ์ควบคุมเหล่านี้ อาจเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพ (ดังที่เรียกว่า “เสถียรภาพโหลด”) หรืออาจช่วยเร่งให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันในระบบเร็วขึ้นได้

แนวทางการแก้ไขปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันขึ้นในระบบ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการปลดโหลดบางส่วนออกจากระบบ (Load Shedding) หรือการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยอุปกรณ์ควบคุม เช่น SVC Shunt Capacitor, อุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจทำได้โดยการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ (Generation Re-dispatch) โดยคำนึงถึงเงื่อนไขความสามารถในการมีโหลดได้ ณ จุดเชื่อมต่อต่างๆ ในระบบ หรือ การทำการปรับเปลี่ยนโครงข่าย (Network Reconfiguration) เพื่อปรับเปลี่ยนเส้นทางและปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในสายส่งเส้นต่างๆ ได้ด้วย

## 2.2 การจำแนกประเภทการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดัน

รูปแบบโดยทั่วไปของการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันที่เกิดขึ้นคือการที่แรงดันที่บัสตกลงอย่างต่อเนื่อง ในการแบ่งประเภทย่อยของปัญหาเสถียรภาพแรงดันสามารถพิจารณาจากการวิเคราะห์ โดยทำการแยกปรากฏการณ์ที่สามารถวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ที่สถานะคงตัวออกจากการวิเคราะห์เชิงพลวัต ซึ่งการแบ่งประเภทสามารถแบ่งเสถียรภาพแรงดันเป็น 2 ประเภทย่อย ดังนี้ [1]

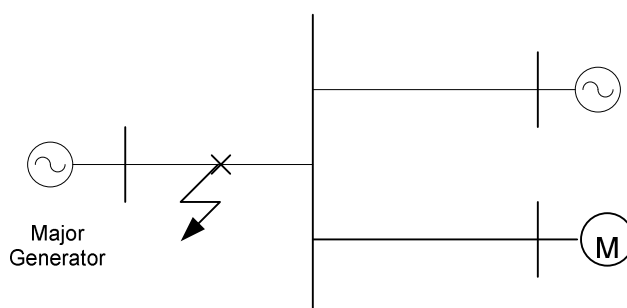
1. เสถียรภาพแรงดันเมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ หมายถึง ความสามารถของระบบในการรักษาแรงดันให้มั่นคงเมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ เช่น ความผิดปกติต่างๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ เป็นต้น ในการคำนวณของเสถียรภาพแรงดันเมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่จะพิจารณาผลตอบสนองของระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถทราบถึงพฤติกรรมและปฏิกิริยาของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์ หม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลดและตัวจำกัดกระแสสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปัญหาเหล่านี้สามารถศึกษาโดยใช้การจำลองในโดเมนเวลาแบบไม่เป็นเชิงเส้น

2. เสถียรภาพแรงดันเมื่อเกิดการรบกวนขนาดเล็ก หมายถึง ความสามารถของระบบในการรักษาแรงดันให้มั่นคงเมื่อระบบถูกรบกวนเล็กน้อย เช่น โหลดในระบบเพิ่มขึ้นๆ เป็นต้น ทำให้แรงดันของระบบเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยสมการของระบบสามารถถูกทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบ

เมื่อพิจารณาช่วงเวลาในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพแรงดันอาจจะอยู่ในช่วงวินาทีไปจนถึงหลายนาที ดังนั้นจึงสามารถแบ่งการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันตามช่วงเวลา [8] ซึ่งปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อช่วงเวลาดังกล่าว คือคุณลักษณะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามก็จะมีอุปกรณ์เพียงไม่กี่ประเภทที่มีผลอย่างมากต่อการกำหนดพลวัตของเหตุการณ์ดังกล่าว ดังนั้นอาจแบ่งการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันตามช่วงเวลา ดังต่อไปนี้

### 1. เสถียรภาพแรงดันในภาวะชั่วคราว (Transient Voltage Stability)

ระยะเวลาของการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันประเภทนี้จะอยู่ในหน่วยวินาที การพังทลายของแรงดันเกิดขึ้นเนื่องจากโหลดที่มีการฟื้นฟูแรงดันอย่างรวดเร็ว เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อเกิดแรงดันตกอันเนื่องมาจากการลัดวงจร ทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น เพื่อที่จะทำให้มอเตอร์กลับสู่สภาวะการทำงานปกติ อย่างไรก็ตามในภาวะดังกล่าว หากสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจรถูกปลดออกทำให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟได้เพียงพอต่อความต้องการของมอเตอร์ อาจทำให้แรงดันลดต่ำลงไปมากกว่าเดิม และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันในที่สุด ดังแสดงภาพประกอบในรูปที่ 2.1

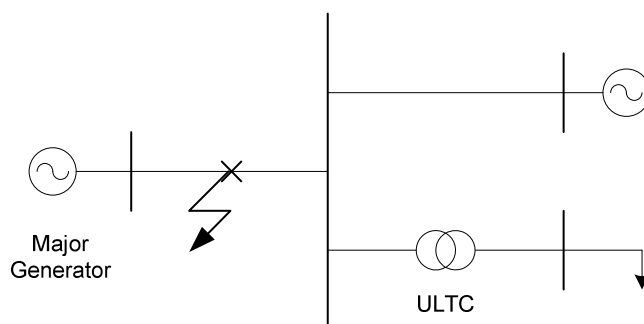


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในภาวะชั่วคราว

## 2. เสถียรภาพแรงดันในระยะเวลายานกลาง (Mid-Term Voltage Stability)

ระยะเวลาการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันในประเภทนี้จะอยู่ในช่วงเวลาที่ การพังทลายของแรงดันมักเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะโหลดที่เพิ่มสูงขึ้นในระบบ และการส่งกำลังไฟฟ้ามายังโหลดมีระยะทางไกล เช่น หลังเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรทำให้อุปกรณ์บางส่วนจากระบบ รวมถึงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าถูกปลดออก ซึ่งสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากขึ้นในสายส่งและเกิดแรงดันตกในพื้นที่

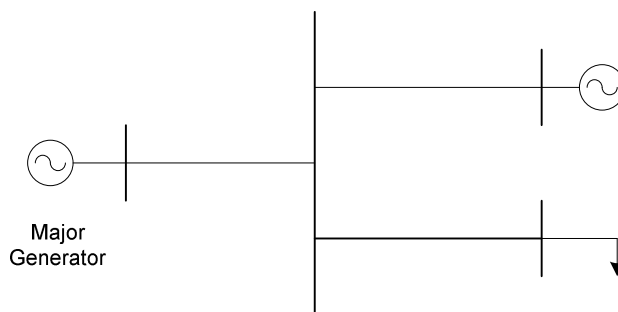
จากเหตุการณ์ข้างต้น ทำให้หม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลด (ULTC) พยายามที่จะควบคุมแรงดันให้กลับมาที่ค่าอ้างอิงตามเดิม แต่การกระทำดังกล่าวส่งผลให้ความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบแย่งอีก จึงส่งผลให้แรงดันตกอย่างต่อเนื่อง และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันในที่สุด ดังแสดงภาพประกอบในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในระยะเวลายานกลาง

## 3. เสถียรภาพแรงดันในระยะเวลายาว (Longer-Term Voltage Stability)

ช่วงเวลาการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันในประเภทนี้จะอยู่ในหลักของนาที่เช่นกัน แต่พลวัตของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจะยาวนานกว่าเสถียรภาพแรงดันในระยะเวลายานกลาง การพังทลายของแรงดันในกรณีนี้มักเกิดขึ้นเนื่องมาจากความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงภายในระบบ ณ จุดโหลดบางแห่ง มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในระยะเวลายาว

ในรูปที่ 2.3 หากโหลดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดันในระบบเริ่มตกลง และหากโหลดยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองในระบบไม่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้เพียงพอต่อความต้องการ (เนื่องจากเข้าสู่ขีดจำกัดด้านเสถียรภาพของสายส่ง) ก็อาจจะนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันของทั้งระบบได้ในที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความเข้มแข็งของระบบส่งไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดเป็นสำคัญด้วย

### 2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน

โครงสร้างทั่วไปของแบบจำลองของระบบสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันคล้ายกับการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพชั่วขณะ โดยสมการทั้งหมดประกอบไปด้วยเซตของสมการอนุพันธ์ที่ใช้แสดงแทนแบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเชิงพลวัตของระบบดังนี้

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.1)$$

และเซตของสมการโครงข่ายสายส่งคือ

$$I(x, u) = Y_N V \quad (2.2)$$

ซึ่งมีสภาวะเริ่มต้นคือ  $(x_0, u_0)$  โดย

$x$  = เวกเตอร์ตัวแปรสถานะของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเชิงพลวัต

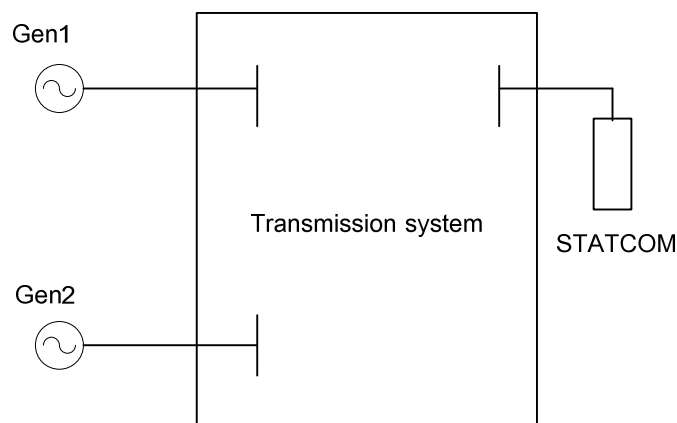
$u$  = เวกเตอร์สัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเชิงพลวัต

$V$  = เวกเตอร์ของแรงดันที่บัส

$I$  = เวกเตอร์ของกระแสฉีดเข้าบัส

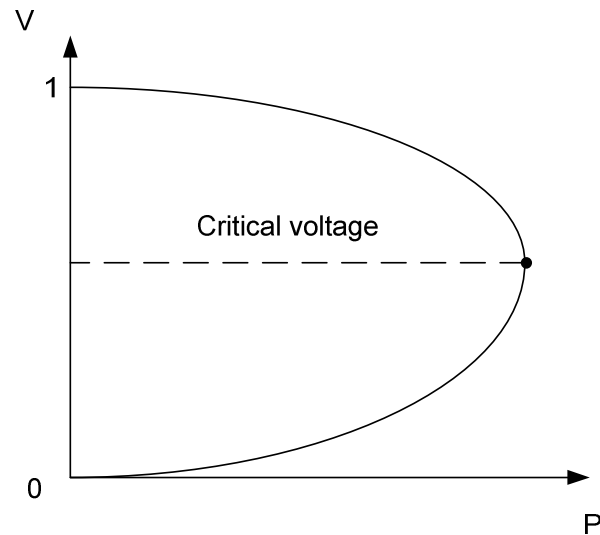
$Y_N$  = เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์

และทั้ง 2 สมการนี้สามารถแก้ปัญหาในโดเมนเวลาได้โดยการใช้วิธีประยุกต์เชิงตัวเลข และการวิเคราะห์การส่งผ่านของกำลังไฟฟ้า ช่วงเวลาในการศึกษาอาจจะอยู่ในช่วงหลายนาที่ นอกจากนี้การเชื่อมโยงแบบจำลองในแต่ละส่วนของระบบเข้าด้วยกัน เพื่อแสดงถึงพลวัตของระบบอย่างช้าๆก่อนนำไปสู่สถานะของการเกิดการพังทลายของแรงดัน ตัวอย่างการเชื่อมโยงแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบหลักของแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้า

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันที่ง่ายและพบเห็นได้บ่อยอย่างหนึ่งคือการเพิ่มโหลดของระบบขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งระบบเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ทำให้สามารถทราบจุดวิกฤติของระบบก่อนการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันหรือทราบค่าโหลดมากที่สุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะของกราฟกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดัน

## 2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมด

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมดเป็นดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันเป็นดัชนีที่สามารถบอกเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังได้ทั้งระบบ ส่วนตัวประกอบที่มีส่วนร่วมของบัสจะใช้พิจารณาหาบัสที่ส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน

### 2.4.1 โหมดการเสถียรภาพแรงดัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมดแสดงอยู่ใน [1, 2, 3] เมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน ( $J_R$ ) จะถูกใช้วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันระบบไฟฟ้ากำลังหรือประมาณระยะทางก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน จากสมการของโครงข่ายสายส่งที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ซึ่ง

$\Delta P$  = การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส

$\Delta Q$  = การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาที่บัส

$\Delta \theta$  = การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของมุมเฟสแรงดันที่บัส

$\Delta V$  = การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันที่บัส

เสถียรภาพแรงดันของระบบถูกกระทบจากทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ อย่างไรก็ตามในการประเมินเสถียรภาพแรงดันในแต่ละจุดการทำงาน กำลังไฟฟ้าจริงจะถูกกำหนดให้คงที่ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta Q$  และ  $\Delta V$  นั่นคือการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและแรงดัน แม้ว่ากำลังไฟฟ้าจริงจะถูกละเลยแต่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ก็จะถูกนำมาพิจารณาในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta Q$  และ  $\Delta V$  ในจุดการทำงานต่างๆ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและแรงดันแสดงดังรูปที่ 2.6

จากสมการ (2.3) กำหนดให้  $\Delta P = 0$  จะได้

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (2.4)$$

โดยที่

$$J_R = \begin{bmatrix} J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.5)$$

เสถียรภาพแรงดันของระบบอาจจะระบุได้จากการคำนวณของค่าลักษณะเฉพาะและเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน ( $J_R$ )

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (2.6)$$

ซึ่ง

$\xi$  = เมทริกซ์เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวาของ  $J_R$

$\eta$  = เมทริกซ์เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายของ  $J_R$

$\Lambda$  = เมทริกซ์ค่าลักษณะเฉพาะทแยงมุมของ  $J_R$



จากสมการ (2.6) จะได้

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (2.7)$$

และจากสมการ (2.5), (2.7) จะได้ว่า

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (2.8)$$

และเนื่องจาก  $\xi^{-1} = \eta$  จะได้ว่า

$$v = \Lambda^{-1} q \quad (2.9)$$

ซึ่ง

$v = \eta \Delta V$  คือเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงโหมดของแรงดัน

$q = \eta \Delta Q$  คือเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงโหมดของกำลังไฟฟ้าปรากฏ

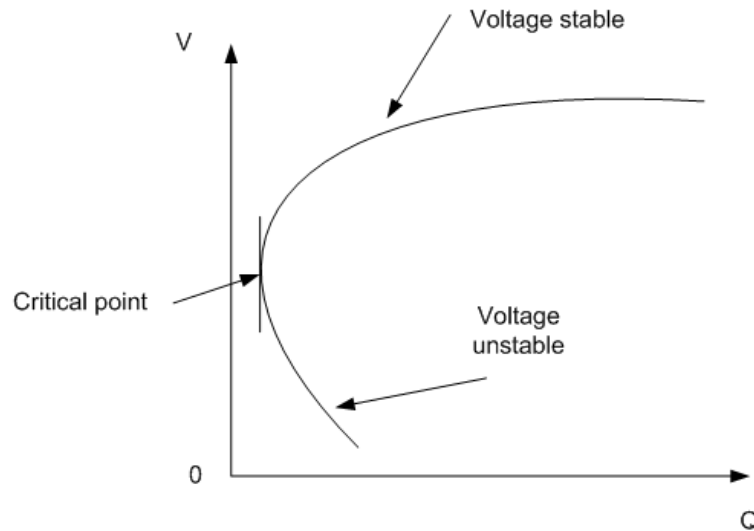
จากสมการ (2.9) เราสามารถพิจารณาแต่ละโหมดได้ว่า

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} q_i \quad (2.10)$$

ถ้า  $\lambda_i > 0$  ระบบจะมีเสถียรภาพแรงดัน

ถ้า  $\lambda_i < 0$  ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน

ถ้า  $\lambda_i = 0$  ระบบอยู่ที่จุดวิกฤตของเสถียรภาพแรงดัน



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและแรงดัน

#### 2.4.2 ตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัส

เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายและขวาของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน ( $J_R$ ) สอดคล้องกับโหมดวิกฤตที่เกี่ยวข้องกับกลไกของการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งการมีส่วนร่วมของบัส  $k$  ที่ส่งผลต่อโหมด  $\lambda_i$  จะสามารถแสดงได้จากตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัส:

$$P = \begin{bmatrix} \xi_{11}\eta_{11} & \cdots & \xi_{1i}\eta_{1i} & \cdots & \xi_{1n}\eta_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{k1}\eta_{1k} & & \xi_{ki}\eta_{ik} & & \xi_{kn}\eta_{nk} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{n1}\eta_{1n} & \cdots & \xi_{ni}\eta_{in} & \cdots & \xi_{nn}\eta_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสจะแสดงพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับแต่ละโหมด ซึ่งผลรวมของสมาชิกทุกตัวของตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสของแต่ละโหมดจะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายและขวาเป็นมีความเป็นปกติ นอกจากนี้ตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสแสดงถึงประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพที่บัส  $k$  แล้ว จะส่งผลต่อโหมด  $\lambda_i$  มากน้อยเพียงใด

## บทที่ 3

### อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิต

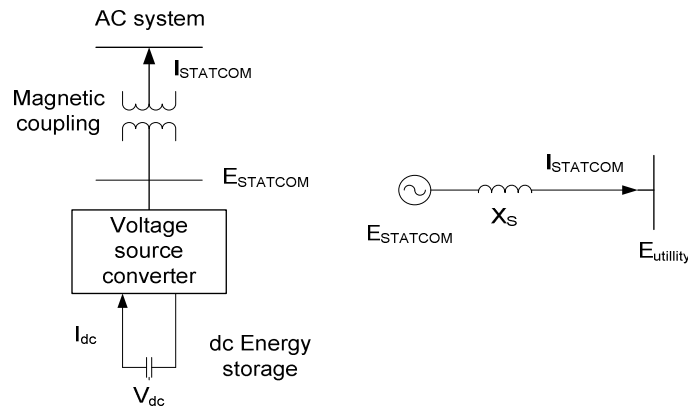
อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ชุดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อ 3.1 องค์ประกอบทางกายภาพ หัวข้อ 3.2 แสดงหลักการทำงานและในส่วนหัวข้อ 3.3 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตและการควบคุม

#### 3.1 องค์ประกอบเชิงกายภาพ

อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตเป็นอุปกรณ์ชุดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต่อขนานกับจุดเชื่อมต่อใดๆในระบบส่งกำลังไฟฟ้า มันสามารถควบคุมการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อได้อย่างอิสระเมื่อได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงานหรืออุปกรณ์เก็บพลังงาน อีกทั้งยังสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าสลับ 3 เฟสขาออกเพื่อควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อในระบบส่งกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการ [9]

อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชิงโครนัสในอุดมคติสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าไซน์ซออยด์สมมูล 3 เฟสที่มีความถี่มูลฐาน และสามารถควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดันได้ แต่อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตไม่มีความเฉื่อยที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชิงโครนัส ทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ส่วนของการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตไม่สามารถทำปรับค่าอิมพีแดนซ์ได้ แต่สามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบได้ ดังนั้นเราสามารถกล่าวโดยสรุปว่าอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสนับสนุนทางแรงดันโดยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อโดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุเข้ามาช่วยเหลือในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ

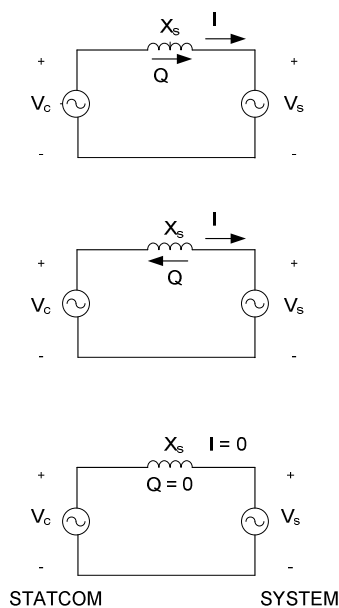
อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตสามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยผ่านกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ในคอนเวอร์เตอร์ วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตแสดงดังรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านทางหม้อแปลงและอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตถูกมองเป็นแหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแสดงให้เห็นถึงว่าอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุมาช่วยเหลือในการสร้างหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ด้วยเหตุนี้ทำให้อุปกรณ์ชุดเซยชิงโครนัสเชิงสถิตจึงมีโครงสร้างที่กะทัดรัด มีสัญญาณรบกวนและผลกระทบจากสนามแม่เหล็กต่ำ



รูปที่ 3.1 การติดตั้งและวงจรสมมูลหนึ่งเฟสของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิต

### 3.2 หลักการทำงาน

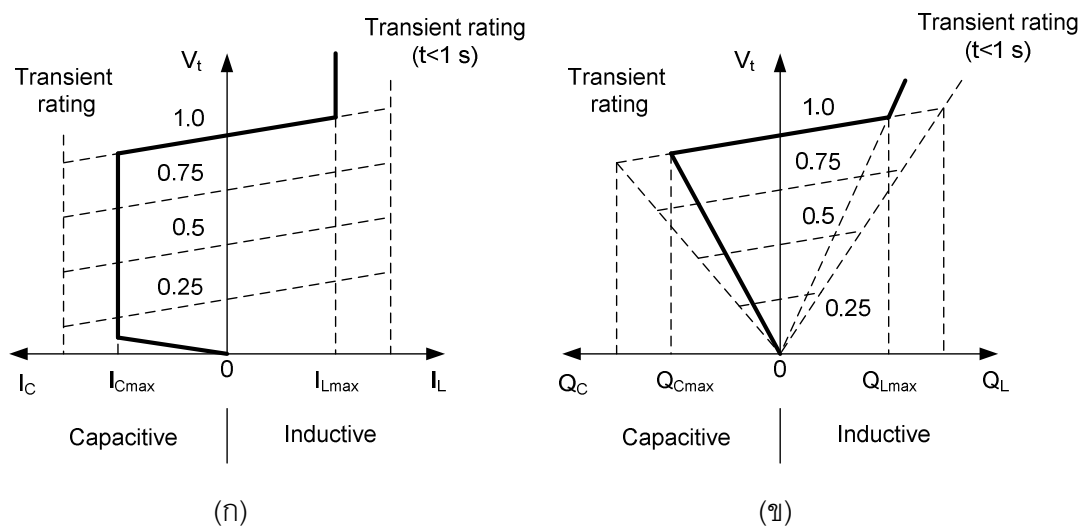
การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟระหว่างอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้โดยการปรับขนาดแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิตดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถ้าขนาดแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิตมีขนาดมากกว่าแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์จะชดเชยกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิตน้อยกว่าแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์จะดูดซับกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟจากระบบส่งกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิตมีขนาดเท่ากับแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะไม่มีการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟ ซึ่งในกรณีนี้อุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิตจะอยู่ในสถานะลอย



รูปที่ 3.2 การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคจรนิ่งเชิงสถิต

การปรับมุมเฟสต่างเฟสของแรงดันระหว่างแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต และแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงได้ กล่าวคือ อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้า ถ้ามุมเฟสแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตนำหน้ามุมเฟสของแรงดันระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในทางตรงกันข้ามอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตจะรับกำลังไฟฟ้าจริงถ้ามุมเฟสแรงดันของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตตามหลังมุมเฟสแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ตัวอย่างของกราฟคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับกราฟคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 3.3 จากรูปจะเห็นว่าอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ และสามารถควบคุมกระแสได้อย่างอิสระตลอดช่วงค่ากระแสตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมากที่สุด นอกจากนี้อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟได้เต็มที่ในช่วงที่ระดับแรงดันของระบบต่ำ (แม้ว่าแรงดันต่ำมากถึง 0.15 p.u.)



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต

(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ

ประโยชน์อย่างหนึ่งของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตคือสามารถจ่ายกระแสคงที่เมื่อระดับแรงดันต่ำๆ ทำให้มันสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจุดนี้ถือเป็นจุดแข็ง

ของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตในการสนับสนุนทางแรงดันในกรณีระหว่างเกิดความผิดปกติ และหลังเกิดการผิดปกติ

ในทางปฏิบัติสถิติที่กึ่งตัวของคอนเวอร์เตอร์มีการสูญเสีย ดังนั้นพลังงานที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุถูกใช้เพื่อชดเชยการสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์ และจะทำให้แรงดันกระแสตรงจะลดลง อย่างไรก็ตามการสูญเสียนี้สามารถถูกกำจัดได้โดยปรับมุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์ให้ตามหลังมุมแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นมุมเล็กๆ (โดยปกติ 0.1-0.2 องศา) กล่าวคือคอนเวอร์เตอร์จะรับกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบมาเล็กน้อยเพื่อจะชดเชยการสูญเสียและยังเป็นการควบคุมขนาดของแรงดันกระแสตรงทางอ้อมด้วย

การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่ระหว่างอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ การผสมผสานระหว่างการจ่ายหรือรับของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่ฟสามารถเป็นไปได้ ถ้าอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตถูกติดตั้งด้วยตัวแหล่งจ่ายพลังงานที่เหมาะสม ซึ่งการควบคุมการปรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่ฟอย่างมีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการปรับปรุงขีดจำกัดเสถียรภาพชั่วขณะและเสถียรภาพเชิงพลวัตได้

ตั้งแต่ในอดีตจนกระทั่งปัจจุบันได้มีการใช้อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตมาแก้ไขปัญหาในระบบไฟฟ้าอยู่อย่างต่อเนื่อง [10] ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการติดตั้งและพิกัดของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต

No.	Station-utility-Year of operation	STATCOM effective capacity
1	Inuyama- Kansai Electric Power Corp.,Japan-1991	± 80 MVA (at that time called as static var generator-SVG)
2	Sullivan-Tennessee Valley Authority(TVA), US-1996	± 100 MVA
3	Inez-American Electric Power (AEP),US-1998	± 160 MVA (shunt part of unified power flow controller-UPFC)
4	Henan-Henan Power Administration,China-1999	± 20 MVA
5	Marcy-New York Power Authority (NYPA), US-2001	± 200 MVA (±2x100 MVA converter units of convertible static compensator-CSC)
6	East Claydon-National Grid Company(NGC), UK-2001	± 75 MVA (re-locatable)
7	Essex-Vermont Electric Power Company (VELCO), US-2001	133/- 41 MVA
8	Kangjin-Korea Electric Power Corp. (KEPCO)-2002	± 40 MVA (shunt part of ±80 MVA unified power flow controller-UPFC)
9	Talega-San Diego Gas & Electric (SDG&E), California-2002	± 100 MVA (±2 x50 MVA)

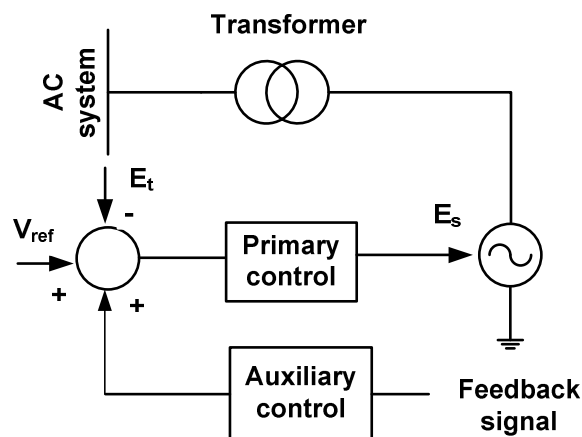
### 3.3 แบบจำลองอุปกรณ์และการควบคุม

แบบจำลองและการควบคุมทั่วไปของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติแสดงในรูปที่ 3.4 โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น การควบคุมหลักและการควบคุมเสริม การควบคุมอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติสามารถช่วยในการปรับปรุงพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าได้ดังนี้

1. สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเชิงพลวัตทั้งระบบส่งและระบบจำหน่าย
2. ช่วยหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งกำลังไฟฟ้า
3. ปัญหาเสถียรภาพชั่วขณะ
4. ควบคุมความผันผวนของแรงดันไฟฟ้า
5. ควบคุมได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รียกที่พในสายส่งที่เชื่อมต่อ

นอกจากนี้ อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติยังมีประโยชน์อย่างอื่นอีก ซึ่งจะแสดงดังต่อไปนี้

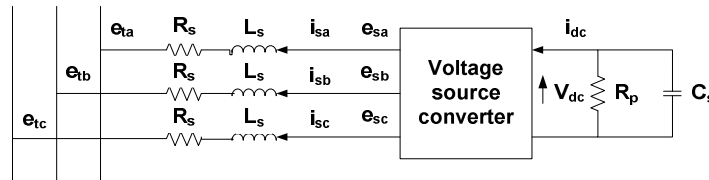
1. อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติมีขนาดเล็ก ทำให้สามารถลดขนาดของสถานที่และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้
2. อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อธรรมชาติน้อย



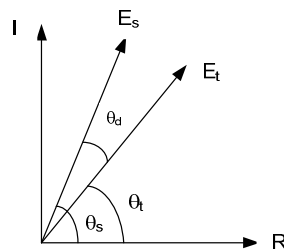
รูปที่ 3.4 แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติและการควบคุม

ในรูปที่ 3.5 แสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติ โดยทางฝั่งไฟฟ้า กระแสสลับเชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในวงจรประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ( $C_s$ ) คอนเวอร์เตอร์ และเชื่อมต่อไปยังระบบส่งกำลังไฟฟ้าผ่านทางตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_s$ ) และความต้านทาน ( $R_s$ )

ซึ่งแทนกำลังสูญเสียของคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลง ส่วน  $R_p$  ต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุนี้ แสดงถึงกำลังสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์และการสูญเสียในตัวเก็บประจุ [9, 15] ส่วนทางฝั่งไฟฟ้ากระแสตรงและคอนเวอร์เตอร์จะเลยภาวะชั่วคราวแทนด้วยแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับขนาดแรงดันได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ชุดเซมิคอนดักเตอร์เชิงสถิติ

แรงดันที่บัลเชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ

$$e_{ta} = \sqrt{2}E_t \cos(\omega t + \theta_t) \tag{3.1}$$

โดยที่  $E_t$  คือ ค่า RMS ของแรงดันเฟส และ  $\theta_t$  คือ มุมเฟสของแรงดันที่บัล ส่วนแรงดันที่บัลของอุปกรณ์ชุดเซมิคอนดักเตอร์เชิงสถิติมีค่าเท่ากับ

$$e_{sa} = \sqrt{2}E_s \cos(\omega t + \theta_s) \tag{3.2}$$



โดยที่  $E_s$  คือ ค่า RMS เฟสของแรงดันและ  $\theta_s$  คือ มุมเฟสของแรงดันที่บัสของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติ เมื่อพิจารณาทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 3.5ก สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{sa} \\ \dot{i}_{sb} \\ \dot{i}_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_{sa} - e_{ta} \\ e_{sb} - e_{tb} \\ e_{sc} - e_{tc} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

สมการที่ (3.3) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปค่าต่อหน่วยบนกรอบอ้างอิงจริงและจินตภาพ (synchronous reference frame) ดังแสดงในรูปที่ 3.5ข ได้ดังนี้ [16]

$$\begin{bmatrix} \dot{i}'_{sR} \\ \dot{i}'_{sI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_s \omega_b}{L'_s} & \omega_b \\ -\omega_b & \frac{-R'_s \omega_b}{L'_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{sR} \\ i'_{sI} \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{L'_s} \begin{bmatrix} E'_{sR} - E'_{tR} \\ E'_{sI} - E'_{tI} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

## บทที่ 4

### อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเป็นเครื่องมือในการออกแบบการควบคุมที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งรูปแบบของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 ส่วนในหัวข้อ 4.2 กล่าวถึงการแก้ปัญหาของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น และในหัวข้อ 4.3 ตัวอย่างการประยุกต์อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

#### 4.1 รูปแบบของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นคือข้อจำกัดคอนเวกซ์ [11] ดังนั้นปัญหาเชิงคอนเวกซ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้นจะสามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีคอนเวกซ์โปรแกรมมิ่งซึ่งแก้ปัญหาได้โดยใช้การคำนวณทางคอมพิวเตอร์ หลากหลายปัญหาทางทฤษฎีควบคุมเช่น อสมการเลียปูนอฟและรีคาคติสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นได้ รูปแบบของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$F(x) \triangleq F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0 \quad (4.1)$$

โดยที่  $x \in \mathcal{R}^m$  คือตัวแปรและ  $F_0, \dots, F_m$  เป็นเมทริกซ์สมมาตร เครื่องหมายอสมการ ">" ในสมการ (4.1) แสดงถึงความเป็นบวกแน่นอน

คุณสมบัติที่สำคัญของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นอย่างหนึ่งคืออสมการเมทริกซ์เชิงเส้นหลายสมการ  $F^{(1)}(x) > 0, \dots, F^{(p)}(x) > 0$  สามารถแสดงอยู่ในรูปอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเดี่ยว  $\text{diag}[F^{(1)}(x) > 0, \dots, F^{(p)}(x) > 0]$  ได้ [12] ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างระหว่างเซตของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นและอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเดี่ยว จากคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถเพิ่มเงื่อนไขในการออกแบบระบบควบคุมได้ง่าย

เมื่อพิจารณาถึงสมบัติความเป็นคอนเวกซ์ของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น คุณสมบัติที่สำคัญของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นคือเซตของ  $\{x \mid F(x) > 0\}$  เป็นคอนเวกซ์ กำหนดให้  $x$  และ  $y$  เป็น 2 เวกเตอร์ที่สอดคล้องกับ  $F(x) > 0$  และ  $F(y) > 0$  และให้  $\lambda \in (0, 1)$  แล้ว [11] จะได้

$$\begin{aligned}
F(\lambda x + (1-\lambda)y) &= F_0 + \sum_{i=1}^m (\lambda x_i + (1-\lambda)y_i) F_i \\
&= \lambda F_0 + (1-\lambda)F_0 + \lambda \sum_{i=1}^m x_i F_i \\
&\quad + (1-\lambda) \sum_{i=1}^m y_i F_i \\
&= \lambda F(x) + (1-\lambda)F(y) \\
&> 0
\end{aligned} \tag{4.2}$$

แสดงว่าอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเป็นคอนเวกซ์ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

#### 4.2 การแก้ปัญหาอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

ปัญหาอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นที่พบโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. ปัญหาการหาคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasibility problem) ภายใต้เงื่อนไขของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

$$F(x) > 0 \tag{4.3}$$

2. ปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization problem) สำหรับฟังก์ชันเชิงเส้น ภายใต้เงื่อนไขของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

$$\begin{aligned}
\min c^T x \\
s.t. \quad F(x) > 0
\end{aligned} \tag{4.4}$$

3. ปัญหาการหาค่าต่ำสุดของค่าลักษณะเฉพาะทั่วไป (Generalized eigenvalue minimization problem) ภายใต้เงื่อนไขของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

$$\begin{aligned}
& \min \lambda \\
& C(x) > 0 \\
\text{S.t.} \quad & B(x) > 0 \\
& \lambda B(x) - A(x) > 0
\end{aligned} \tag{4.5}$$

ซึ่งปัญหาทั้งหมดนี้สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีคอนเวกซ์โปรแกรมมิง ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นแสดงใน [4] และปัญหาการหาค่าต่ำสุดคำตอบที่ได้สามารถยืนยันได้ว่าเป็นค่าต่ำสุดทั่วไป (global minimizer) เนื่องจากความเป็นคอนเวกซ์ของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

### 4.3 ตัวอย่างการประยุกต์

เซตย่อย  $D$  ของพื้นที่เชิงซ้อนถูกเรียกว่าพื้นที่อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น ถ้ามีเมทริกซ์สมมาตร  $\alpha = [\alpha_{kl}] \in \mathfrak{R}^{m \times m}$  และเมทริกซ์  $\beta = [\beta_{kl}] \in \mathfrak{R}^{m \times m}$  ที่ทำให้

$$D = \{z \in C : f_D(z) < 0\} \tag{4.6}$$

โดยที่

$$f_D(z) := \alpha + z\beta + \bar{z}\beta^T = [\alpha_{kl} + \beta_{kl}z + \beta_{kl}\bar{z}]_{1 \leq k, l \leq m} \tag{4.7}$$

ซึ่ง  $C$  คือระนาบเชิงซ้อน และสัญลักษณ์ “ $< 0$ ” แสดงถึงความเป็นลบแน่นอน [5, 13]

หรือจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าพื้นที่อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นคือเซตย่อยของระนาบเชิงซ้อนที่แสดงเป็นอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นในรูปของ  $z$  และ  $\bar{z}$  โดยที่  $x = \text{Re}(z)$  และ  $y = \text{Im}(z)$  ยิ่งไปกว่านั้นพื้นที่อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นเป็นคอนเวกซ์และมีความสมมาตรตามแกนจริงโดยสามารถแสดงพื้นที่ได้หลายรูปแบบเช่น พื้นที่ครึ่งระนาบ พื้นที่วงกลม พื้นที่แถบแนวนอน เป็นต้น

จากทฤษฎีของเลียปูนอฟที่กล่าวว่าระบบจะมีเสถียรภาพ เมื่อค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์สถานะของ  $A$  อยู่ในฝั่งซ้ายของพื้นที่เชิงซ้อน หลังจากนั้นกัตแมนได้พยายามพัฒนาทฤษฎีดังกล่าว เพื่อที่จะสามารถให้พิจารณาพื้นที่เชิงซ้อนได้หลายหลายมากขึ้น (ไม่เฉพาะฝั่งซ้ายของพื้นที่เชิงซ้อน) และพัฒนามาจนได้รูปแบบสมบรูณ์ที่สามารถสร้างให้อยู่ในรูปของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นได้ดังนี้

**ทฤษฎี**  $A$  เป็น  $D$ -stable หรือค่าลักษณะเฉพาะของ  $A$  อยู่ในพื้นที่ที่กำหนดทั้งหมด ก็ต่อเมื่อมีเมทริกซ์สมมาตรและเป็นบวกอย่างแน่นอน  $P$  ที่ทำให้ [5, 13]

$$M_D(A, P) := \alpha \otimes P + \beta \otimes (AP) + \beta^T \otimes (AP)^T < 0 \quad (4.8)$$

ซึ่ง  $\otimes$  แสดงถึง Kronecker product ของเมทริกซ์ [14] ซึ่งจะเห็นว่าสมการ (4.8) คล้ายกับสมการของทฤษฎีเลียปูนอฟแต่เพิ่มส่วนของ  $\alpha$  และ  $\beta$  หรือจากสมการ (4.8) เมื่อแทนค่า  $\alpha=0$  และ  $\beta=1$  ก็จะได้สมการเลียปูนอฟ  $AP + PA^T < 0$  นั่นเอง กล่าวคือ  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามสมการ (4.7) ที่เพิ่มเข้ามาจากสมการเลียปูนอฟ ใช้เพื่อกำหนดพื้นที่เชิงซ้อนให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

- ตัวอย่างการประยุกต์สมการเมทริกซ์เชิงเส้นในการออกแบบตัวควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในอดีตมีการนำวิธีสมการเมทริกซ์เชิงเส้นมาออกแบบตัวควบคุมในทางไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลาย ดังตัวอย่างที่จะนำเสนออีกเป็นส่วนหนึ่งที่แสดงถึงการนำเอาวิธีสมการเมทริกซ์เชิงเส้นมาออกแบบตัวควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งรายละเอียดของแต่ละบทความแสดงดังต่อไปนี้

- ปี ค.ศ. 2000 P. Shrikant Rao และ I.Sen [5] ได้เสนอการออกแบบการควบคุมของ Power System Stabilizer ด้วยวิธีการแทนตำแหน่งโพลในหลายจุดการทำงาน เพื่อให้จะย้ายตำแหน่งของโพลของเมทริกซ์สถานะวงปิดให้อยู่ในพื้นที่ที่กำหนด ทำให้ระบบมีความหน่วงทางกำลังไฟฟ้าที่ดีด้วยวิธีสมการเมทริกซ์เชิงเส้น ซึ่งสิ่งที่แตกต่างกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือเมทริกซ์ที่พิจารณาในทฤษฎีการแทนตำแหน่งโพล โดยในบทความฉบับนี้จะพิจารณาค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์สถานะวงปิดของระบบ ขณะที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน  $J_R$
- ปี ค.ศ. 2006 C.-F. Xue, X.-P. Zhang และ K.R. Godfrey [6] ได้นำเสนอการออกแบบการควบคุมการหน่วงของกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต โดยใช้สัญญาณขาออกป้อนกลับด้วยวิธีสมการเมทริกซ์เชิงเส้น ซึ่งวิธีที่นำเสนอในบทความฉบับนี้ต้องการให้ค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์สถานะวงปิดของระบบอยู่ในพื้นที่ที่กำหนด เพื่อให้ระบบมีความหน่วงทางไฟฟ้าที่ดี สิ่งที่คล้ายกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการนำเอาอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตมาแก้ไขปัญหาในทางไฟฟ้ากำลังและมีการใช้หลักการแทนตำแหน่งโพลเช่นเดียวกันต่างกันตรงที่เมทริกซ์ที่พิจารณาในการแทนตำแหน่งโพลไม่เหมือนกัน

## บทที่ 5

### การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต

บทนี้ในหัวข้อ 5.1 กล่าวถึงการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต ส่วนหัวข้อ 5.2 จะกล่าวถึงการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตด้วยวิธีสมการเมทริกซ์เชิงเส้น หัวข้อ 5.3 กล่าวถึงการประยุกต์การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง และหัวข้อ 5.4 กล่าวถึงการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน

#### 5.1 การหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต โดยใช้หลักการของตัวประกอบการมีส่วนร่วมมาพิจารณาบัสที่ส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหนดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันมากที่สุดในภาวะของการทำงานที่แตกต่างกันไป เพื่อที่จะหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตที่ช่วยให้ประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบดียิ่งขึ้น

การเลือกตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตพิจารณาจากกลุ่มของค่าลักษณะเฉพาะของ  $J_R$  ที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดที่ภาวะโหลดของระบบแตกต่างกันไป ซึ่งในการพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต ได้ทำการเพิ่มโหลดของระบบและพิจารณาว่าบัสไหนส่งผลกระทบต่อกลุ่มของค่าลักษณะเฉพาะของ  $J_R$  ที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันมากที่สุดโดยใช้หลักการของตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัส ซึ่งการพิจารณาดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตจะศึกษาในสภาวะอยู่ตัว และจะสามารถหาตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตโดยพิจารณาจากหลากหลายจุดการทำงานที่สนใจ ตามดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตดังสมการต่อไปนี้

$$LI_k = \sum_{c=1}^{n_c} \left( \sum_{i=1}^{n_\phi} \left( \frac{\frac{1}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^{n_\phi} \frac{1}{\lambda_i}} p_{ki} \right) \right)_c \quad (5.1)$$

$p_{ki}$  = สมาชิกแถว  $k$  หลัก  $i$  ของตัวประกอบการมีส่วนร่วมของ巴士

$\lambda_i$  = ค่าลักษณะเฉพาะของ  $J_R$  ที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด

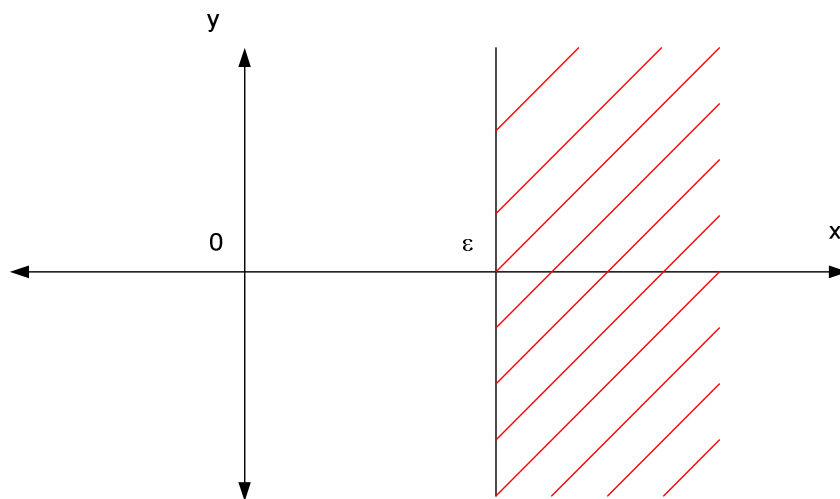
$n_c$  = จุดการทำงานที่พิจารณา

$n_\phi$  = จำนวนค่าลักษณะเฉพาะของ  $J_R$  ที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด

ค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตที่คำนวณได้ จะบอกว่า巴士ใดส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันมากน้อยเพียงใด ซึ่งถ้าค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตมีค่ามากแสดงว่า巴士นั้นจะส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเป็นอย่างมาก ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตมีค่าน้อยจะแสดงว่า巴士นั้นจะส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันน้อย

## 5.2 การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิต ที่ทำให้ค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน ( $J_R$ ) มีค่ามากกว่า  $\mathcal{E}$  เสมอ โดย  $\mathcal{E}$  มีค่าเท่ากับค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด ณ ขณะนั้น เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ จะแสดงพื้นที่เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบที่ต้องการ ( $x > \mathcal{E}$ ) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 พื้นที่เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบที่ต้องการ

จากพื้นที่ครึ่งระนาบของพื้นที่อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น  $x > \varepsilon$  และสมการ (4.6) (4.7) สามารถหาเมทริกซ์  $\alpha$  และ  $\beta$  ที่แสดงถึงพื้นที่อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นที่จะทำการออกแบบได้ ดังนี้

$$z + \bar{z} > 2\varepsilon \Rightarrow 2\varepsilon - z - \bar{z} < 0 \quad (5.2)$$

จะได้เมทริกซ์  $\alpha = 2\varepsilon$  และ  $\beta = -1$

การสร้างอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นของการแทนตำแหน่งโพลถูกใช้ร่วมกับหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมด เพื่อออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคโรนัสเชิงสถิต จากสมการ (4.8) จะแสดงถึงการยืนยันตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน ( $J_R$ ) ของระบบว่าอยู่ในพื้นที่ที่ได้ทำการออกแบบ ก็ต่อเมื่อมีเมทริกซ์สมมาตรและเป็นบวกอย่างแน่นอน  $P$  ที่ทำให้สมการ (5.3) เป็นจริง ดังนั้นจะสามารถยืนยันค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ของระบบว่ามีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด ( $\varepsilon$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$2\varepsilon \otimes P - 1 \otimes J_R P - 1 \otimes P^T J_R^T < 0 \quad (5.3)$$

โดยที่แทนค่า  $\alpha = 2\varepsilon$  และ  $\beta = -1$  โดยที่  $P > 0$

จาก  $J_R$  เป็นเมทริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนของโหนดบัสในระบบ ซึ่งจะกำหนดให้  $J_R$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $k \times k$  ดังนั้นจากสมการ (5.3) จะได้ว่า

$$2\varepsilon P - J_R P - P^T J_R^T < 0 \quad (5.4)$$

จากนั้นกำหนดให้เมทริกซ์  $P$  เป็นเมทริกซ์ทแยงมุมที่เก็บค่าของขนาดแรงดันของโหนดบัสในระบบทดสอบ และกำหนดให้เราทราบค่าของขนาดแรงดันทุกบัสแต่เราต้องการปรับขนาด



แรงดันที่บัลลิสต์ตั้งอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต จึงกำหนดให้ขนาดแรงดันที่บัลลิสต์ตั้งอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตเป็นตัวแปร  $V_{ref}$  จะได้

$$2\varepsilon \begin{bmatrix} V_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & V_{ref} & \\ 0 & \cdots & 0 & V_k \end{bmatrix} - J_R \begin{bmatrix} V_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & V_{ref} & \\ 0 & \cdots & 0 & V_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & V_{ref} & \\ 0 & \cdots & 0 & V_k \end{bmatrix} J_R^T < 0 \quad (5.5)$$

สุดท้ายจัดรูปสมการใหม่ จะสามารถเขียนอยู่ในรูปมาตรฐานอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นได้ดังนี้

$$F_0 + F_1 V_{ref} < 0 \quad (5.6)$$

โดย

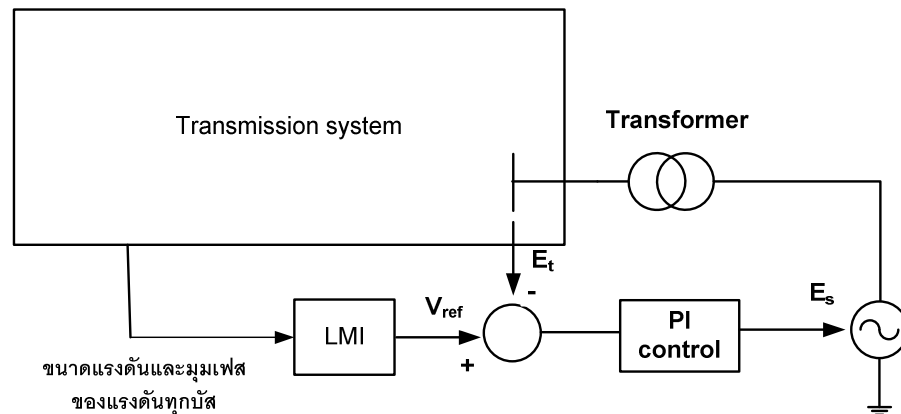
$$F_0 = \begin{bmatrix} (2\varepsilon - 2J_{11})V_1 & -J_{21}V_1 - J_{12}V_2 & \cdots & -J_{i1}V_1 & \cdots & -J_{k1}V_1 - J_{1k}V_k \\ -J_{21}V_1 - J_{12}V_2 & \ddots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ -J_{i1}V_1 & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & -J_{ik}V_k \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -J_{k1}V_1 - J_{1k}V_k & \cdots & -J_{ik}V_k & \cdots & -J_{k(k-1)}V_{k-1} - J_{(k-1)k}V_k & (2\varepsilon - 2J_{kk})V_k \end{bmatrix}$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & -J_{1i} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{(i-1)i} & 0 & \cdots & 0 \\ -J_{1i} & \cdots & -J_{(i-1)i} & (2\varepsilon - 2J_{ii}) & -J_{(i+1)i} & \cdots & -J_{ki} \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{(i+1)i} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{ki} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

### 5.3 การประยุกต์การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบส่งไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต โดยภาพรวมของการออกแบบการควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งแบบจำลองของ

อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตและการควบคุมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดให้ทางฝั่งไฟฟ้า กระแสตรงและคอนเวอร์เตอร์แต่ละเลเยอร์จะชั่วคราวจึงแทนด้วยแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับที่ปรับขนาดแรงดันได้ผ่านตัวควบคุม PI และจะไม่พิจารณาส่วนของการควบคุมเสริม อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต ส่วนมุมต่างเฟสของแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและบัสของอุปกรณ์ ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตกำหนดให้มีค่าคงที่



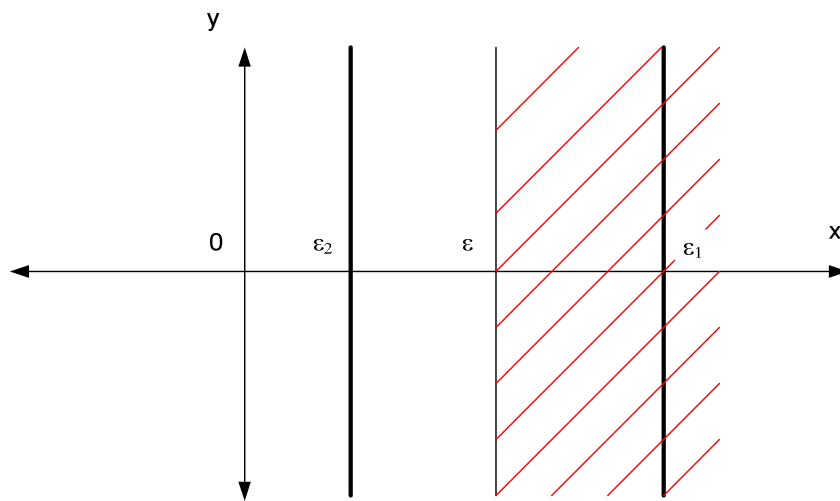
รูปที่ 5.2 ภาพรวมการออกแบบการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต

จากหัวข้อ 5.2 จะได้เงื่อนไขข้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นดังสมการ (5.6) และจะเพิ่มเงื่อนไข ข้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นอีก 2 เงื่อนไข เพื่อที่จำกัดของเขตของแรงดันอ้างอิงให้มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.1 p.u. คือ  $V_{ref} > 0.9$  และ  $V_{ref} < 1.1$  ซึ่งจะได้เงื่อนไขข้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นในรูปแบบ ปัญหาของการหาคำตอบที่เป็นไปได้ (feasibility problem) ทั้งหมด 3 เงื่อนไข ดังนี้

$$\begin{aligned} F_0 + F_1 V_{ref} &< 0 \\ V_{ref} &> 0.9 \\ V_{ref} &< 1.1 \end{aligned}$$

และทั้ง 3 เงื่อนไขสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ฟังก์ชันมาตรฐานของเครื่องมือสำเร็จรูปข้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นคือฟังก์ชัน feasp

ยิ่งไปกว่านั้นเพื่อที่จะทำให้การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงได้ทำการเพิ่มขั้นตอนวิธีมาช่วยในการออกแบบแรงดันอ้างอิง โดยมีหลักการคือ จะออกแบบให้  $\mathcal{E}$  สามารถปรับค่าอยู่ในระหว่างช่วง  $\mathcal{E}_1$  ถึง  $\mathcal{E}_2$  ซึ่ง  $\mathcal{E}$  มีค่าเท่ากับค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด ณ ขณะนั้น และเราจะพิจารณาค่าลักษณะเฉพาะของ  $J_R$  ทุก 2 วินาที ซึ่งการกำหนดพื้นที่เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบที่ต้องการตามขั้นตอนวิธีที่กล่าวมา จะแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กำหนดขอบเขตของพื้นที่เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบที่ต้องการ

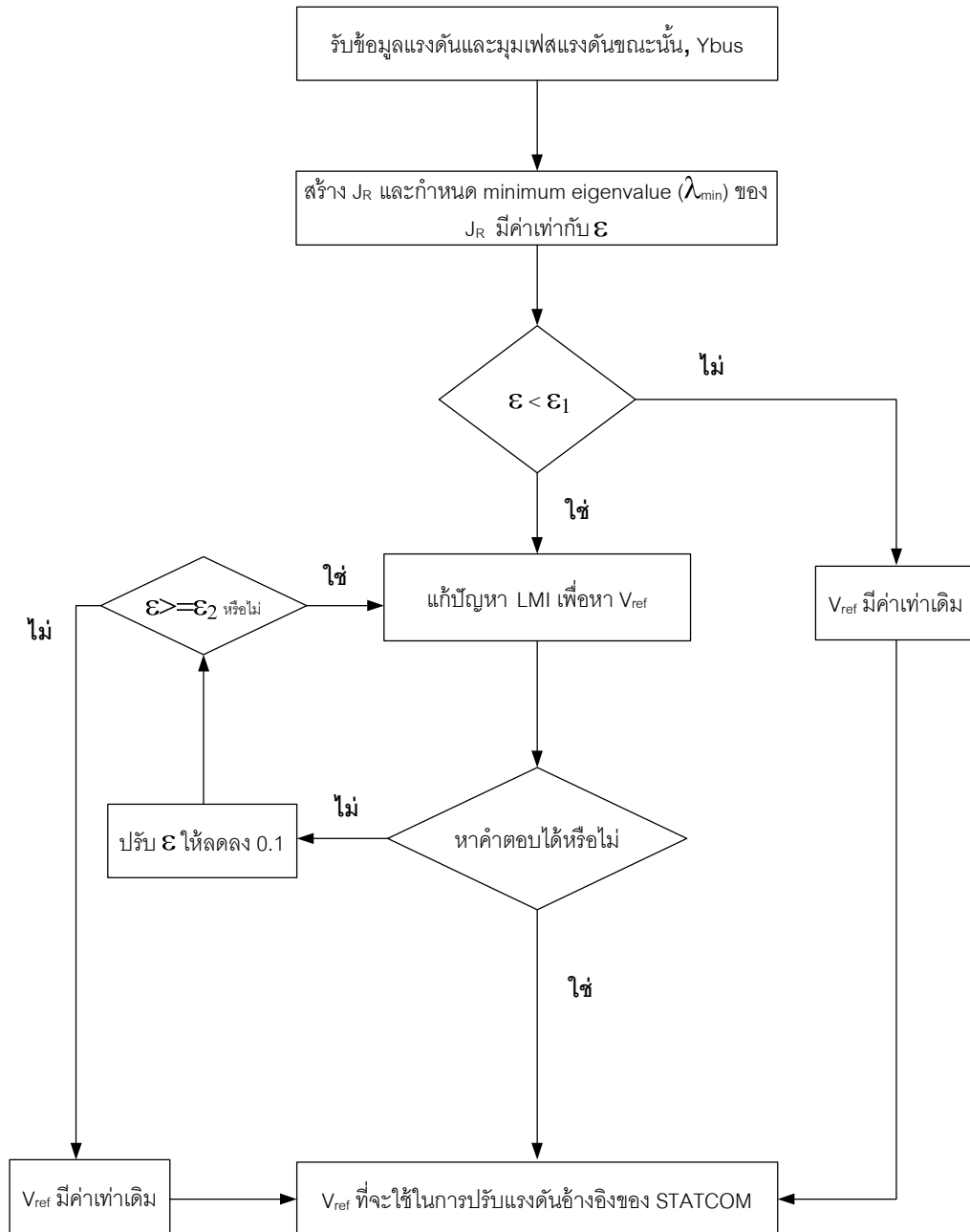
โดยที่

$\mathcal{E}$  = ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดในขณะนั้น

$\mathcal{E}_1$  = ค่าขอบเขตบน (มีค่าเท่ากับค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด ณ จุดการทำงานเริ่มต้น)

$\mathcal{E}_2$  = ค่าขอบเขตล่าง (มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นค่าที่ระบบใกล้สูญเสียเสถียรภาพแรงดัน)

ในขณะที่ขั้นตอนวิธีของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตสามารถเขียนออกมาเป็นแผนผังดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนวิธีการหาค่าแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้

แรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) จะนำไปใช้ในการปรับขนาดแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคโรนัสเชิงสถิต เพื่อเป็นการยืนยันตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ว่าค่าลักษณะเฉพาะทั้งหมดอยู่ในพื้นที่อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นที่ออกแบบ เพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพแรงดันอยู่ โดยที่การออกแบบแรงดันอ้างอิงนี้จะทำการปรับแรงดันอ้างอิงทุก 2 วินาที (การควบคุมทำงานทุก 2 วินาที)

#### 5.4 การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน

การออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันใช้หลักการคล้ายกับหัวข้อ 5.2 แต่จะเปลี่ยนจากการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์เพียงตัวเดียวเป็นการควบคุมแรงดันอ้างอิงของบัสควบคุมแรงดันที่สนใจในระบบ ดังนั้นจากสมการ (5.5) เมื่อกำหนดให้ระบบประกอบด้วย 3 บัสที่ต้องการควบคุมแรงดัน จะสามารถออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของทั้ง 3 บัส ดังสมการต่อไปนี้

$$2\varepsilon \begin{bmatrix} V_1 & 0 & \dots & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & V_{ref1} & & \vdots \\ & & & V_{ref2} & -J_R \\ & & & & & V_{ref3} \\ & & & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & & & & & & 0 & V_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 & 0 & \dots & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & V_{ref1} & & \vdots \\ & & & V_{ref2} & \\ & & & & & V_{ref3} \\ & & & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & & & & & & 0 & V_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_1 & 0 & \dots & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & V_{ref1} & & \vdots \\ & & & V_{ref2} & \\ & & & & & V_{ref3} \\ & & & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & & & & & & 0 & V_k \end{bmatrix} J_R^T < 0 \quad (5.7)$$

จากนั้นทำการจัดรูปสมการ สุดท้ายจะได้สมการเมทริกซ์เชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$F_0 + F_1 V_{ref1} + F_2 V_{ref2} + F_3 V_{ref3} < 0 \quad (5.8)$$

โดยที่

$$F_0 = \begin{bmatrix} (2\varepsilon - 2J_{11})V_1 & -J_{21}V_1 - J_{12}V_2 & \dots & -J_{(i-1)1}V_1 & -J_{i1}V_1 & -J_{(i+1)1}V_1 & \dots & -J_{k1}V_1 - J_{1k}V_k \\ -J_{21}V_1 - J_{12}V_2 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -J_{(i-1)1}V_1 & \dots & & 0 & & & & -J_{(i-1)k}V_k \\ -J_{i1}V_1 & \dots & & & 0 & & & -J_{ik}V_k \\ -J_{(i+1)1}V_1 & \dots & & & & 0 & & -J_{(i+1)k}V_k \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -J_{k1}V_1 - J_{1k}V_k & \dots & & -J_{(i-1)k}V_k & -J_{ik}V_k & -J_{(i+1)k}V_k & \dots & -J_{k(k-1)}V_{k-1} - J_{(k-1)k}V_k \\ & & & & & & & (2\varepsilon - 2J_{kk})V_k \end{bmatrix}$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & -J_{1(i-1)} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -J_{(i-1)(i-1)} & 0 & \dots & 0 \\ -J_{1(i-1)} & \dots & -J_{(i-1)(i-1)} & (2\varepsilon - 2J_{(i-1)(i-1)}) & -J_{(i+1)(i-1)} & \dots & -J_{k(i-1)} \\ 0 & \dots & 0 & -J_{(i+1)(i-1)} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -J_{k(i-1)} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & -J_{1i} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{(i-1)i} & 0 & \cdots & 0 \\ -J_{1i} & \cdots & -J_{(i-1)i} & (2\varepsilon - 2J_{ii}) & -J_{(i+1)i} & \cdots & -J_{ki} \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{(i+1)i} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{ki} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & -J_{1(i+1)} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{(i-1)(i+1)} & 0 & \cdots & 0 \\ -J_{1(i+1)} & \cdots & -J_{(i-1)(i+1)} & (2\varepsilon - 2J_{(i+1)(i+1)}) & -J_{(i+1)(i+1)} & \cdots & -J_{k(i+1)} \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{(i+1)(i+1)} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -J_{k(i+1)} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

จากนั้นกำหนดเงื่อนไขเพื่อจำกัดของเขตของแรงดันอ้างอิงให้มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.1 p.u. ซึ่งจะได้เงื่อนไขข้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นในรูปแบบปัญหาของการหาคำตอบที่เป็นไปได้ (feasibility problem) ทั้งหมด 7 เงื่อนไข ดังนี้

$$F_0 + F_1 V_{ref1} + F_2 V_{ref2} + F_3 V_{ref3} < 0$$

$$V_{ref1} > 0.9$$

$$V_{ref2} > 0.9$$

$$V_{ref3} > 0.9$$

$$V_{ref1} < 1.1$$

$$V_{ref2} < 1.1$$

$$V_{ref3} < 1.1$$

และทั้ง 7 เงื่อนไขสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ฟังก์ชันมาตรฐานของเครื่องมือสำเร็จรูปข้อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น คือฟังก์ชัน feasp เช่นเดียวกับในหัวข้อ 5.3 ส่วนขั้นตอนวิธีในการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน จะมีขั้นตอนวิธีเหมือนกับรูปที่ 5.4 ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.3

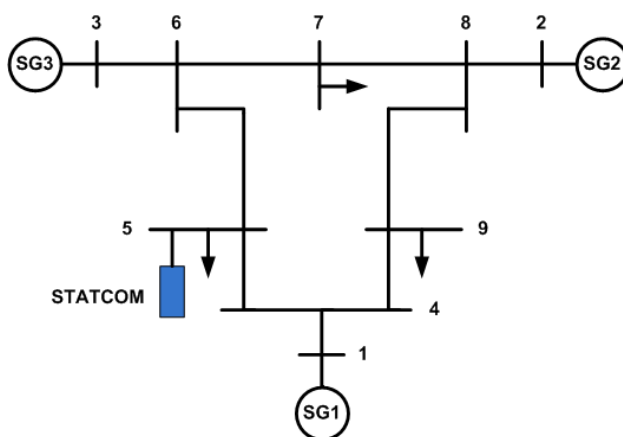
## บทที่ 6

### ระบบทดสอบและกรณีศึกษา

ระบบทดสอบที่จะใช้ในการทดสอบมี 2 ระบบคือ ระบบทดสอบ 9 บัส และระบบส่งไฟฟ้า บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยแสดงในหัวข้อ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ ในส่วนหัวข้อ 6.3 แสดงถึงภาพรวมและวิธีการทดสอบของกรณีศึกษาที่จะใช้ทดสอบหลักการและสมรรถนะการควบคุมที่ได้นำเสนอ

#### 6.1 ระบบทดสอบ 9 บัส

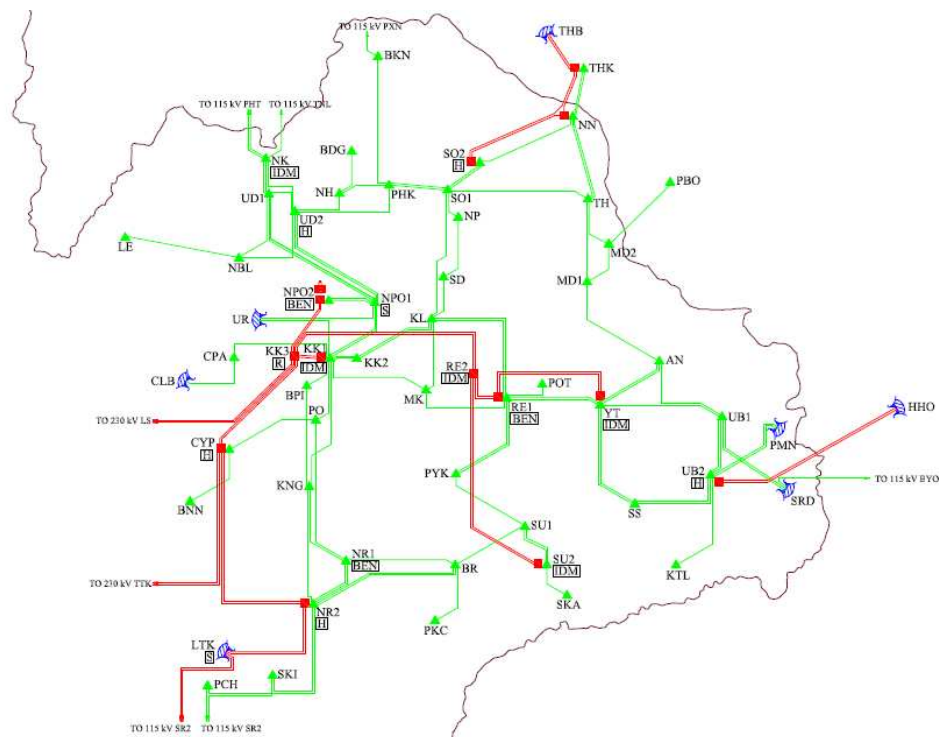
ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ละเลยผลของภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ที่ส่งผลในช่วงชับทรานเซียนต์แทนพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1-3 ส่วนแบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้าแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ของแรงดันบัสและกระแสที่เข้าสู่บัสในลักษณะเมตริกซ์แบบผสม (Hybrid Matrix) ซึ่งพิจารณาจากจำนวนบัสการเชื่อมโยงของสายส่งและแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ที่แต่ละบัส โดยละเลยผลของภาวะชั่วคราวในระบบส่ง แบบจำลองของโหลดที่ใช้ในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันใช้แบบจำลองแบบโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Load) ระบบทดสอบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [7] ถูกนำมาใช้เป็นระบบทดสอบในการศึกษาปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน และทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตขนาด  $\pm 100$  MVA ที่บัส 5 โดยใช้หลักการในหัวข้อ 5.1 ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ 9 บัสติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส 5

## 6.2 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

การศึกษาความสามารถของการออกแบบการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยใน [18] ใช้แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆแบบเดียวกับระบบทดสอบ 9 บัสในหัวข้อ 6.1 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ที่บัส NPO2 และ LTK ส่วน Tie line จะใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิมหรือชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิต ขนาด  $\pm 100$  MVA จะติดตั้งที่บัส UB2 ตามหลักการในหัวข้อ 5.1 โดยแผนภาพของโครงข่ายสายส่งของระบบแสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย [18]

## 6.3 กรณีศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 7 กรณี แต่ละกรณีศึกษามีจุดมุ่งหมายแตกต่างกัน เนื้อหาในส่วนนี้จะพูดถึงเป้าหมายและวิธีการทดสอบของแต่ละกรณีศึกษา ซึ่งใช้พิสูจน์หลักการและสมรรถนะการควบคุมที่ออกแบบ รายละเอียดแต่ละกรณีศึกษาเป็นดังต่อไปนี้



### - กรณีศึกษาที่ 1

ทำการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งของอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตในระบบทดสอบ 9 บัสและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งวิธีการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

1. พิจารณาจุดการทำงาน 15 จุดการทำงานที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงโหลด
2. คำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะและตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสทั้ง 15 จุดการทำงาน
3. คำนวณหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตตามหัวข้อที่ 5.1

### - กรณีศึกษาที่ 2

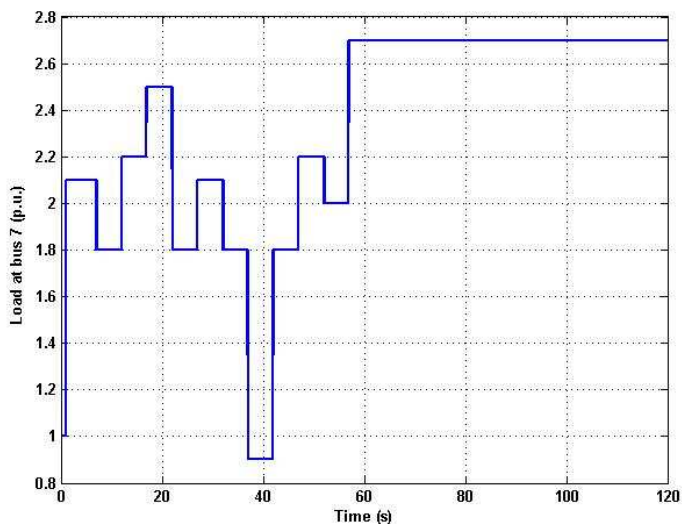
ทดสอบติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตที่บัส 5 และบัส 6 ในระบบทดสอบ 9 บัส เพื่อแสดงว่าติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สสถิตที่บัส 5 ดีกว่าบัส 6 จริง เป็นการยืนยันหลักการของการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตในหัวข้อ 5.1 สามารถนำไปใช้ได้ โดยวิธีการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่ (Ramp Load) โดยทำการเพิ่มโหลดของบัสที่ 9 ขึ้นตั้งแต่วินาทีที่ 2 เป็นต้นไป โดยโหลดที่เพิ่มขึ้นมีค่าความชันเท่ากับ 7 เมกกะวัตต์/วินาที
2. เปรียบเทียบผลตอบสนองของกรณีระบบติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตที่บัส 5 กับติดตั้งที่บัส 6 ซึ่งทั้งสองกรณีจะทำการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตโดยใช้หลักการในหัวข้อ 5.3

### - กรณีศึกษาที่ 3

ทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้สามารถทำงานได้ในสภาวะปกติและแรงดันในระบบไม่ผันผวนมากจนเกินไป โดยทำการทดสอบในระบบทดสอบ 9 บัส ซึ่งการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มโหลดแบบแปรผันปกติในบัส 7 โดยโหลดเป็นไปตามรูปที่ 6.3
2. จากนั้นพิจารณาผลตอบสนองของขนาดแรงดันในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชุดเซยชิงไครน์สเชิงสถิตว่ามีความผันผวนมากจนเกินไปหรือไม่



รูปที่ 6.3 โหลดแปรผันปกติที่ใช้ทดสอบ

#### - กรณีศึกษาที่ 4

ทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงปรับค่าได้ที่ออกแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพแรงดันได้มากกว่ากรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ โดยทำการทดสอบในระบบทดสอบ 9 บัส ส่วนวิธีการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่ (Ramp Load) โดยทำการเพิ่มโหลดของบัสที่ 7 ขึ้นตั้งแต่วินาทีที่ 2 เป็นต้นไป โดยโหลดที่เพิ่มขึ้นมีค่าความชันเท่ากับ 1 เมกกะวัตต์/วินาที
2. เปรียบเทียบผลตอบสนองของขนาดแรงดันในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้กับกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่

#### - กรณีศึกษาที่ 5

ทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงปรับค่าได้ที่ออกแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพแรงดันได้มากกว่ากรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ โดยทำการทดสอบในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย วิธีการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่ (Ramp Load) โดยทำการเพิ่มโหลดของบัส NR2 RE1 และ UD1 ขึ้นพร้อมกันตั้งแต่วินาทีที่ 2 เป็นต้นไปแล้วหยุดเพิ่มโหลดที่วินาทีที่ 48 โดยโหลดที่เพิ่มขึ้นมีค่าความชันเท่ากับ 3 เมกกะวัตต์/วินาที

2. จากนั้นเปรียบเทียบผลตอบสนองของขนาดแรงดันในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้กับกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่

#### - กรณีศึกษาที่ 6

ทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันดังการออกแบบในหัวข้อ 5.4 ว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบได้ยาวนานกว่ากรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโคโรน่าเชิงสถิต ทำให้ระบบที่มีการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันมีความแข็งแกร่งมากยิ่งขึ้น โดยทดสอบในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งวิธีการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่ (Ramp Load) โดยทำการเพิ่มโหลดของบัส NR2 RE1 และ UD1 ขึ้นพร้อมกันตั้งแต่วันที่ 2 เป็นต้นไปแล้วหยุดเพิ่มโหลดที่วันที่ 52 โดยโหลดที่เพิ่มขึ้นมีค่าความชันเท่ากับ 3 เมกกะวัตต์/วินาที
2. เปรียบเทียบผลตอบสนองของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันกับกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้

#### - กรณีศึกษาที่ 7

จากปัญหาการหาค่าตอบที่เป็นไปได้ (Feasibility problem) ในกรณีศึกษาที่ 6 เปลี่ยนเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization problem) ซึ่งมีเป้าหมายและเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \min \quad & \|V_{ref} - 1\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & F_0 + F_1V_{ref1} + F_2V_{ref2} + F_3V_{ref3} < 0 \\ & V_{ref1} > 0.9 \\ & V_{ref2} > 0.9 \\ & V_{ref3} > 0.9 \\ & V_{ref1} < 1.1 \\ & V_{ref2} < 1.1 \\ & V_{ref3} < 1.1 \end{aligned}$$

โดย  $V_{ref} = \begin{bmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{bmatrix}$  และจะสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ YALMIP จากนั้นทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ

ผลตอบสนองของขนาดแรงดันของกรณีการหาค่าตอบที่เป็นไปได้และการหาค่าต่ำสุด ซึ่งวิธีการทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มโหลดด้วยอัตราคงที่ (Ramp Load) โดยทำการเพิ่มโหลดของบัส NR2 RE1 และ UD1 ขึ้นพร้อมกันตั้งแต่วินาทีที่ 2 เป็นต้นไปแล้วหยุดเพิ่มโหลดที่วินาทีที่ 52 โดยโหลดที่เพิ่มขึ้นมีค่าความชันเท่ากับ 3 เมกกะวัตต์/วินาที
2. เปรียบเทียบผลตอบสนองของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันกรณีปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization problem) กับกรณีการหาค่าตอบที่เป็นไปได้ (Feasibility problem)

สุดท้ายจะทดสอบการควบคุมแบบต่างๆโดยเพิ่มโหลดของบัส NR2 RE1 และ UD1 ขึ้นพร้อมกันตั้งแต่วินาทีที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกว่าระบบจะเสถียรภาพแรงดัน โดยโหลดที่เพิ่มขึ้นมีค่าความชันเท่ากับ 3 เมกกะวัตต์/วินาที จากนั้นเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันของการควบคุมทุกแบบกับกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่

## บทที่ 7

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

หลักการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครน์สเชิงสถิตและวิธีการออกแบบการควบคุมที่ได้นำเสนอ ได้ถูกนำมาพิสูจน์และทดสอบประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพแรงดันกับระบบทดสอบ 9 บัสและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งผลการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 7 กรณีศึกษาดังต่อไปนี้

#### 7.1 กรณีศึกษาที่ 1 : การหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครน์สเชิงสถิต

กรณีศึกษาที่ 1 จะทำการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครน์สเชิงสถิตในระบบทดสอบ 9 บัสและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในระบบทดสอบ 9 บัสจะพิจารณาโหมดที่มีค่าต่ำกว่า 15 และพิจารณาจุดการทำงานทั้งหมด 15 จุดการทำงาน แต่จะยกตัวอย่างมาแสดงเพียงบางจุดการทำงานของการเพิ่มโหลด จากนั้นจะหาตำแหน่งติดตั้งของอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครน์สเชิงสถิตโดยใช้หลักการของการหาตำแหน่งตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซยชิงโครน์สเชิงสถิตในหัวข้อ 5.1 จุดการทำงานบางจุดการทำงานแสดงดังนี้ จุดการทำงานที่ 1 โหลดของบัส 5 เป็น 190 เมกกะวัตต์ ค่าลักษณะเฉพาะและตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 กรณีโหลดของบัส 5 เป็น 190 เมกกะวัตต์

	Eigenvalue	Bus participations						
		1	2	3	4	5	6	
1	44.6906	0.7952	0.0010	0.0394	0.0137	0.1436	0.0072	bus 4
2	30.9823	0.0644	0.0000	0.0169	0.2673	0.6019	0.0495	bus 5
3	25.6933	0.0001	0.8127	0.0168	0.0038	0.0086	0.1580	bus 6
4	10.9817	0.0001	0.1762	0.0011	0.0093	0.0374	0.7759	bus 7
5	3.8334	0.0105	0.0097	0.8184	0.1312	0.0221	0.0080	bus 8
6	5.9810	0.1297	0.0004	0.1074	0.5747	0.1865	0.0014	bus 9

ในกรณีนี้พบว่า โหมดหรือค่าลักษณะเฉพาะตัวที่ 5 เป็นโหมดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ 3.8334 และจะเห็นว่าโหมดที่น้อยกว่า 15 คือโหมด 4 5 และ 6 ดังนั้นจะเลือกคอลัมน์ที่ 4 5 และ 6 ของตัว

ประกอบการมีส่วนร่วมของบัส ( $p_{k4} p_{k5} p_{k6}$ ) มาพิจารณา เพื่อหาดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์  
ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติ

จุดการทำงานที่ 2 โหลดของบัส 7 เป็น 130 เมกกะวัตต์ ค่าลักษณะเฉพาะและตัว  
ประกอบการมีส่วนร่วมของบัสแสดงดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 กรณีโหลดของบัส 7 เป็น 130 เมกกะวัตต์

	Eigenvalue	Bus participations						
		1	2	3	4	5	6	
1	46.6861	0.7973	0.0013	0.0347	0.0096	0.1105	0.0466	bus 4
2	29.9230	0.0674	0.0000	0.0187	0.2966	0.4082	0.2091	bus 5
3	26.0913	0.0000	0.8176	0.0288	0.0034	0.0452	0.1049	bus 6
4	11.7990	0.0000	0.1617	0.0010	0.0083	0.2328	0.5962	bus 7
5	4.4247	0.0087	0.0182	0.8037	0.1345	0.0336	0.0013	bus 8
6	5.7224	0.1265	0.0012	0.1131	0.5476	0.1697	0.0419	bus 9

ในกรณีนี้พบว่า โหมดหรือค่าลักษณะเฉพาะตัวที่ 5 เป็นโหมดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ 4.4247  
และจะเห็นว่าโหมดที่น้อยกว่า 15 คือโหมด 4 5 และ 6 ดังนั้นจะเลือกคอลัมน์ที่ 4 5 และ 6 ของตัว  
ประกอบการมีส่วนร่วมของบัส ( $p_{k4} p_{k5} p_{k6}$ ) มาพิจารณา เพื่อหาดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์  
ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติ

จุดการทำงานที่ 3 โหลดของบัสที่ 5 7 และ 9 เป็น 200 130 และ 300 เมกกะวัตต์  
ตามลำดับ ค่าลักษณะเฉพาะและตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสแสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 กรณีโหลดของบัสที่ 5 7 และ 9 เป็น 200 130 และ 300 เมกกะวัตต์

	Eigenvalue	Bus participations						
		1	2	3	4	5	6	
1	40.5332	0.7834	0.0040	0.0267	0.1668	0.0069	0.0122	bus 4
2	29.1483	0.0730	0.0005	0.0098	0.5552	0.0356	0.3258	bus 5
3	25.2796	0.0006	0.8425	0.0213	0.0019	0.1290	0.0047	bus 6
4	2.3821	0.0003	0.1459	0.0066	0.0219	0.8123	0.0130	bus 7
5	5.2910	0.0040	0.0089	0.8419	0.0304	0.0178	0.0969	bus 8
6	9.7635	0.1387	0.0018	0.0937	0.2238	0.0018	0.5473	bus 9

ในกรณีนี้พบว่า โหมดหรือค่าลักษณะเฉพาะตัวที่ 4 เป็นโหมดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ 2.3821 และจะเห็นว่าโหมดที่น้อยกว่า 15 คือโหมด 4 5 และ 6 ดังนั้นจะเลือกคอลัมน์ที่ 4 5 และ 6 ของตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัส ( $P_{k4}$   $P_{k5}$   $P_{k6}$ ) มาพิจารณา

จากข้อมูลที่ได้จากจุดการทำงานดังกล่าว เราสามารถหาดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติได้ดังนี้

$$LI = \left( \begin{matrix} \left( \frac{1}{10.9817} \right) \\ \left( \frac{1}{10.9817 + 3.8334 + 5.9810} \right) \end{matrix} \right) \begin{bmatrix} 0.0137 \\ 0.2673 \\ 0.0038 \\ 0.0093 \\ 0.1312 \\ 0.5747 \end{bmatrix} + \left( \begin{matrix} \left( \frac{1}{3.8334} \right) \\ \left( \frac{1}{10.9817 + 3.8334 + 5.9810} \right) \end{matrix} \right) \begin{bmatrix} 0.1436 \\ 0.6019 \\ 0.0086 \\ 0.0374 \\ 0.0221 \\ 0.1865 \end{bmatrix} + \left( \begin{matrix} \left( \frac{1}{5.9810} \right) \\ \left( \frac{1}{10.9817 + 3.8334 + 5.9810} \right) \end{matrix} \right) \begin{bmatrix} 0.0072 \\ 0.0495 \\ 0.1580 \\ 0.7759 \\ 0.0080 \\ 0.0014 \end{bmatrix} \leftarrow \text{OC1}$$

$$+ \left( \begin{matrix} \left( \frac{1}{11.7990} \right) \\ \left( \frac{1}{11.7990 + 4.4247 + 5.7224} \right) \end{matrix} \right) \begin{bmatrix} 0.0096 \\ 0.2966 \\ 0.0034 \\ 0.0083 \\ 0.1345 \\ 0.5476 \end{bmatrix} + \left( \begin{matrix} \left( \frac{1}{4.4247} \right) \\ \left( \frac{1}{11.7990 + 4.4247 + 5.7224} \right) \end{matrix} \right) \begin{bmatrix} 0.1105 \\ 0.4082 \\ 0.0452 \\ 0.2328 \\ 0.0336 \\ 0.1697 \end{bmatrix} + \left( \begin{matrix} \left( \frac{1}{5.7224} \right) \\ \left( \frac{1}{11.7990 + 4.4247 + 5.7224} \right) \end{matrix} \right) \begin{bmatrix} 0.0466 \\ 0.2091 \\ 0.1049 \\ 0.5962 \\ 0.0013 \\ 0.0419 \end{bmatrix} \leftarrow \text{OC2}$$

+...

ทำไปจนถึงจุดการทำงานที่ 15 (การพิจารณาหาตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติจะพิจารณาทั้งหมด 15 จุดการทำงาน) จะได้ค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติของระบบ 9 บัส

LI	
1.1760	Bus 4
5.4668	Bus 5
0.7267	Bus 6
3.8880	Bus 7
0.5515	Bus 8
3.3177	Bus 9

จากผลการทดสอบค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติที่มากที่สุดคือ 5.4668 จึงสรุปได้ว่าจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติที่บัสที่ 5 ของระบบทดสอบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในส่วนระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจะใช้หลักการเกี่ยวกับการเลือกตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติในระบบทดสอบ 9 บัส โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงโหลด NR2 RE1 และ UD1 เพื่อให้สอดคล้องกับกรณีศึกษาที่ 5 6 และ 7 โดยโหลดดังกล่าวจะถูกสร้างเป็นแบบจำลองแบบโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Load) ซึ่งจะได้ผลการทดสอบค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

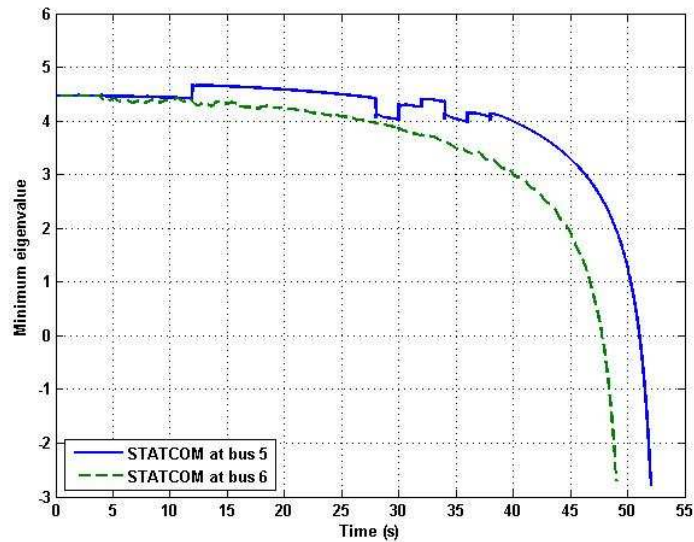
	LI		LI		LI		LI		LI
NR2	0.1108	SR2	0.007	YT	0.3473	RE1	0.174	KNG	0.2038
RE1	0.2149	PCH	0.4958	SS	0.8186	NP	0.3366	NPO1	0.0304
UD1	0.4434	SKI	0.3177	NR2	0.0431	SD	0.4358	NPO2	0.0183
UB2	0.9513	CYP	0.0449	UB1	0.8425	KL	0.1801	UD2	0.3967
SO1	0.1591	NR1	0.1345	AN	0.4548	MK	0.2571	KK3	0.0088
KK1	0.0371	BR	0.3844	YT	0.2433	KK2	0.0459	NK	0.6721
SU2	0.4416	SU1	0.4426	MD2	0.5589	RE2	0.1384	NBL	0.8133
MD1	0.5413	SU2	0.2651	TH	0.2898	BPI	0.4068	SO2	0.0438
CYP	0.1116	PYK	0.6496	NN	0.046	PO	0.3896	PHK	0.3358
NH	0.5838	KK1	0.0109	SO2	0.1137	NN	0.0083		

จะเห็นว่าผลการทดสอบค่าดัชนีชี้วัดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติที่มากที่สุดคือ 0.9513 จึงสรุปได้ว่าจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติที่บัส UB2 ของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

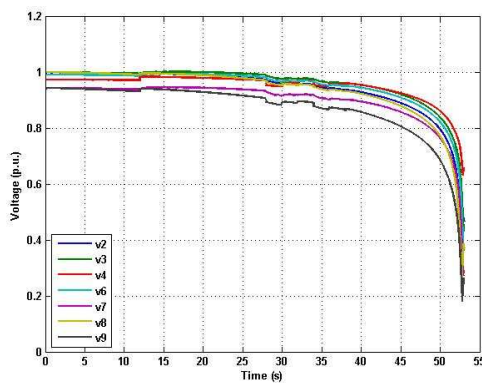


## 7.2 กรณีศึกษาที่ 2 : เปรียบเทียบติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส 5 และ 6

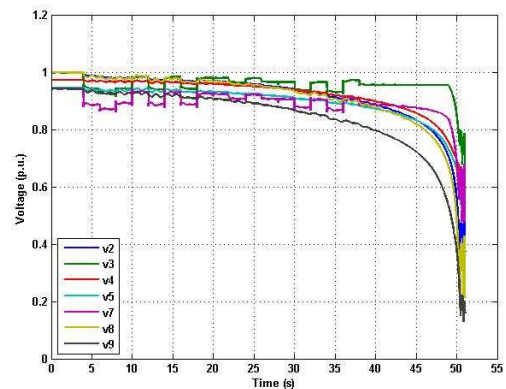
รูปที่ 7.1 แสดงค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ของทั้ง 2 กรณี พบว่ากรณีติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตในบัสที่ 5 ทำให้ระบบทดสอบ 9 บัส สูญเสียเสถียรภาพแรงดันช้ากว่ากรณีติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตในบัสที่ 6 ประมาณ 2-2.5 วินาที (ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดต่ำกว่า 0 ระบบสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน)



รูปที่ 7.1 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.2 ขนาดแรงดันบัสต่างๆในระบบทดสอบ 9 บัส

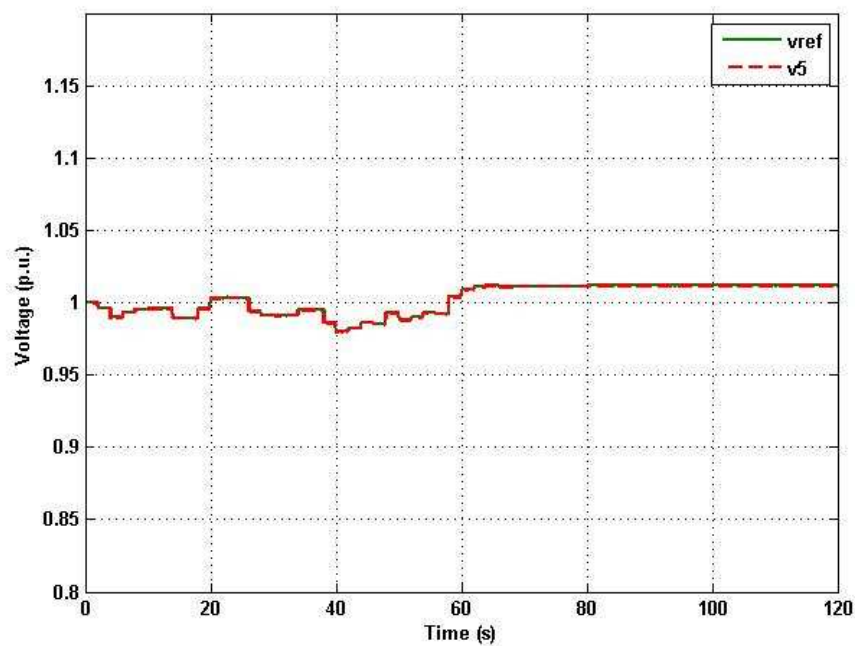
(ก) กรณีติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส 5

(ข) กรณีติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส 6

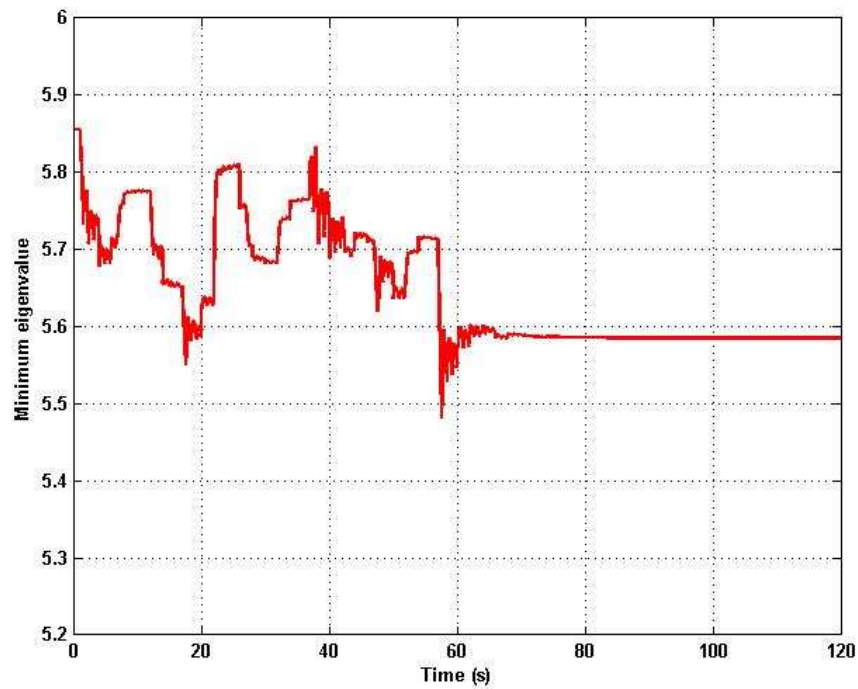
และเมื่อพิจารณาจากขนาดแรงดันของโหนดบัสจะเห็นว่ากรณีติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติในบัสที่ 5 เกิดการพังทลายของแรงดันช้ากว่ากรณีติดตั้งในบัสที่ 6 ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบขนาดแรงดันบัสต่างๆในระบบของทั้ง 2 กรณีดังรูปที่ 7.2

### 7.3 กรณีศึกษาที่ 3 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในสภาวะปกติ

จากรูปที่ 7.3 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่ 5 เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิติในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ จะเห็นว่าแรงดันของบัสที่ 5 สามารถปรับให้มีขนาดเท่ากับแรงดันอ้างอิงได้ตลอด และมีการผันผวนเล็กน้อยอยู่ในช่วง 0.95-1.05 p.u. ในรูปที่ 7.4 แสดงค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ลดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ซึ่งมีค่าลักษณะเฉพาะมากกว่า 0 แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพแรงดัน



รูปที่ 7.3 เปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันจริงของบัส 5

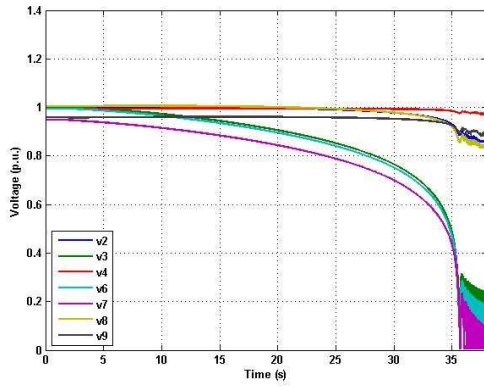


รูปที่ 7.4 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$

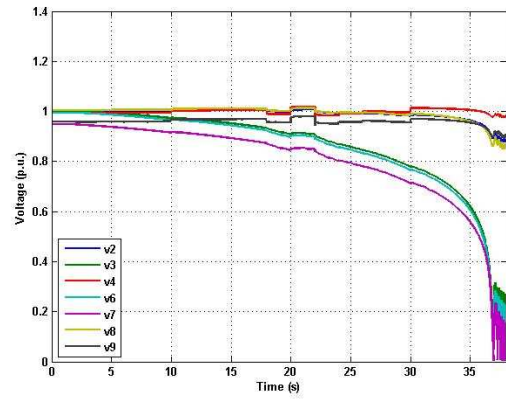
#### 7.4 กรณีศึกษาที่ 4 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบทดสอบ 9 บัส

จากรูปที่ 7.5 แสดงขนาดของแรงดันบัสต่างๆของระบบทดสอบ 9 บัสในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้และกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ พบว่ากรณีการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้มีการผันผวนเล็กน้อยของแรงดันก่อนที่จะสูญเสียเสถียรภาพแรงดันและเมื่อเปรียบเทียบกันจะเห็นว่ากรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้สูญเสียเสถียรภาพแรงดันช้ากว่าประมาณ 1.5-2 วินาที

ในรูปที่ 7.6 แสดงค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์จacobean  $J_R$  ของทั้ง 2 กรณีพบว่าค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของกรณีการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ต่ำกว่า 0 ณ เวลาที่ 37.5 วินาที ส่วนกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่มีค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดต่ำกว่า 0 ที่เวลาประมาณ 35.5 วินาที ดังนั้นจะเห็นว่ากรณการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มระยะเวลาในการรักษาเสถียรภาพแรงดันให้กับระบบได้



(ก)

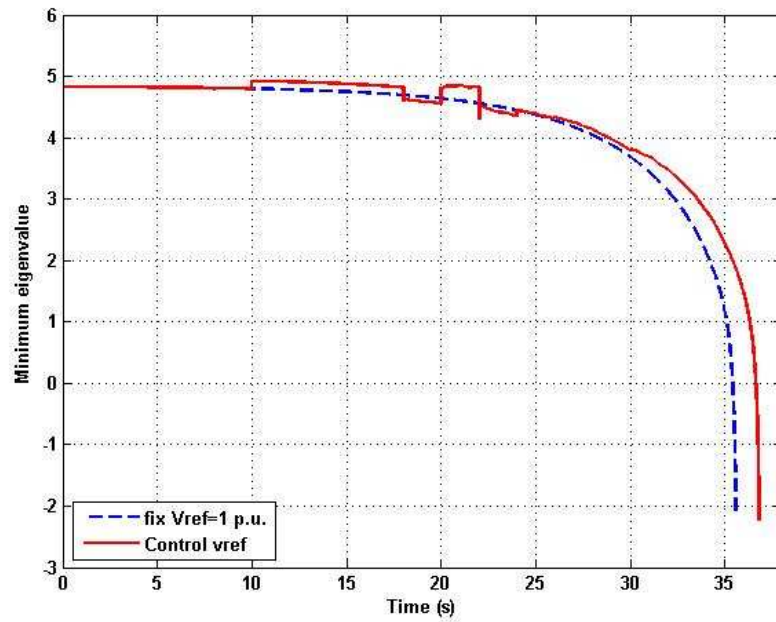


(ข)

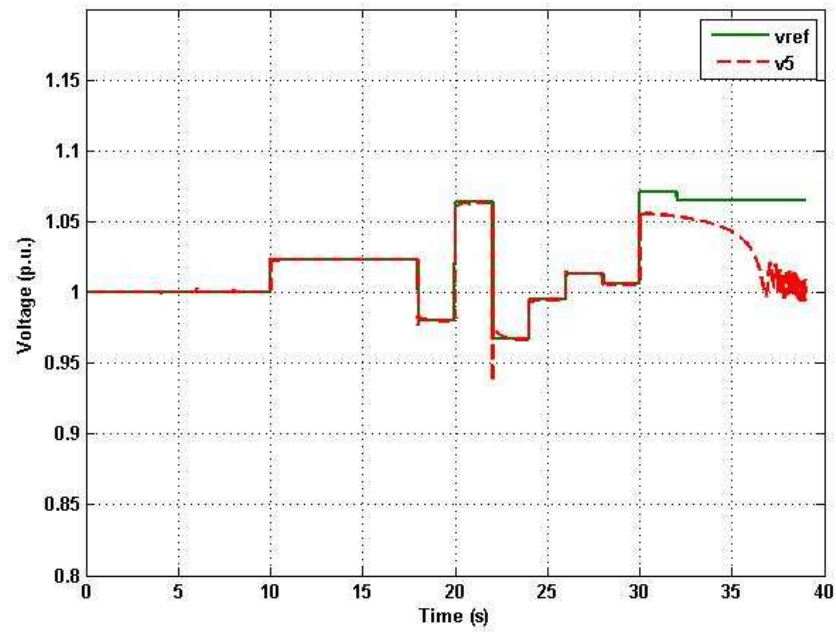
รูปที่ 7.5 ขนาดของแรงดันบัสต่างๆของระบบทดสอบ 9 บัส

(ก) กรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่

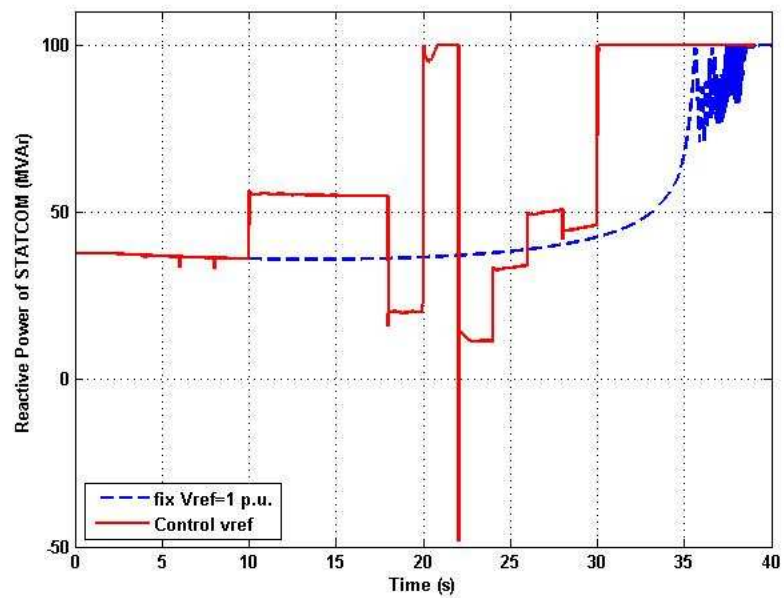
(ข) กรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้



รูปที่ 7.6 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$

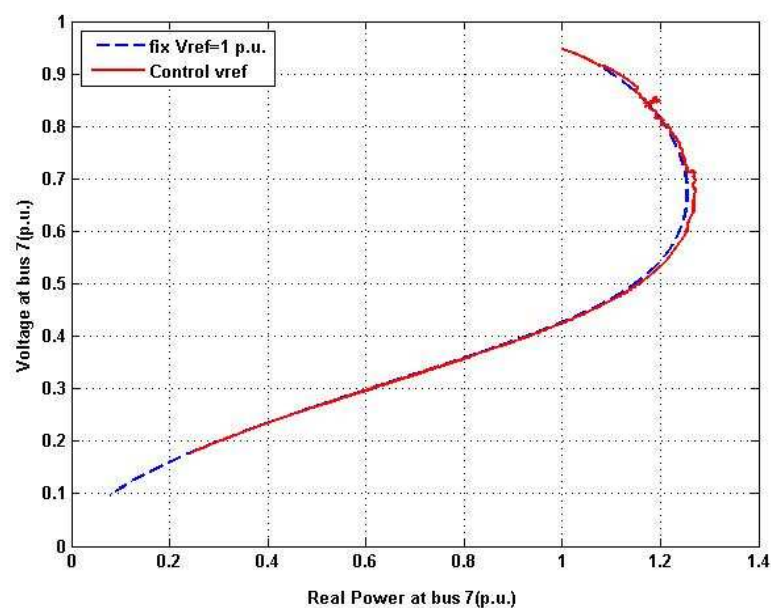


รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันจริงของบัส 5



รูปที่ 7.8 กำลังไฟฟ้่ารีแอกทีฟที่อุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนน้สเชิงสถิต

ขนาดแรงดันของบัสที่ 5 เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตแสดงดังรูปที่ 7.7 จะเห็นว่าแรงดันของบัสที่ 5 สามารถปรับให้มีขนาดเท่ากับแรงดันอ้างอิงได้ ยกเว้นช่วงที่ติดขอบเขตการจ่ายกำลังไฟฟ้าร์เอกทีฟของอุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิต รูปที่ 7.8 แสดงกำลังไฟฟ้าร์เอกทีฟที่อุปกรณ์ชดเชยซึ่งโครนัสเชิงสถิตจ่ายให้กับระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้และกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ จากการทดสอบนี้สามารถพล็อตกราฟ P-V ที่บัส 7 เพื่อแสดงความสามารถในการจ่ายโหลดของระบบ ซึ่งจะเห็นว่ากรณีนี้การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้สามารถช่วงเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดให้กับระบบได้ประมาณ 2 p.u. (2 MW) ดังแสดงในรูปที่ 7.9



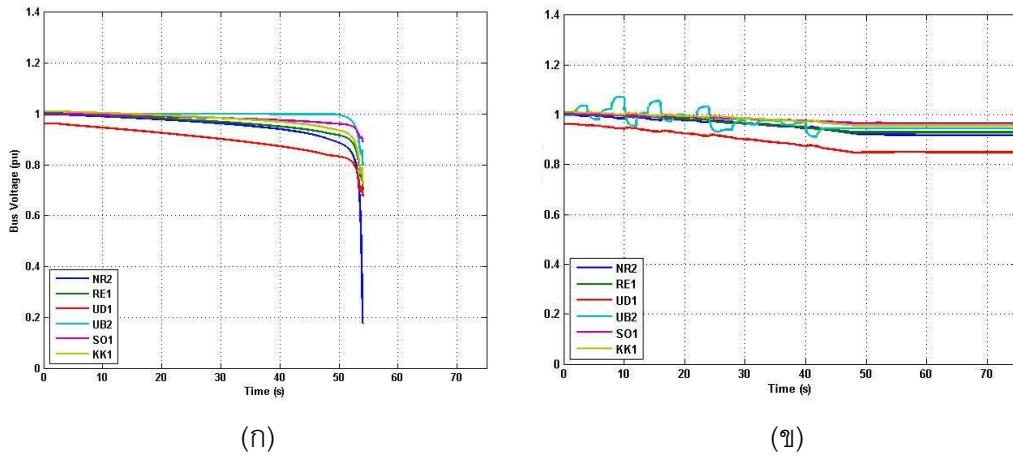
รูปที่ 7.9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัส 7

## 7.5 กรณีศึกษาที่ 5 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

รูปที่ 7.10 แสดงขนาดของแรงดันบัสต่างๆของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้และกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ พบว่ากรณีการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ไม่สูญเสียเสถียรภาพแรงดัน แต่กรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่เกิดการพังทลายของแรงดันประมาณวินาทีที่ 53

ในรูปที่ 7.11 แสดงค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ลีดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ของทั้ง 2 กรณี พบว่าค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้มีค่า

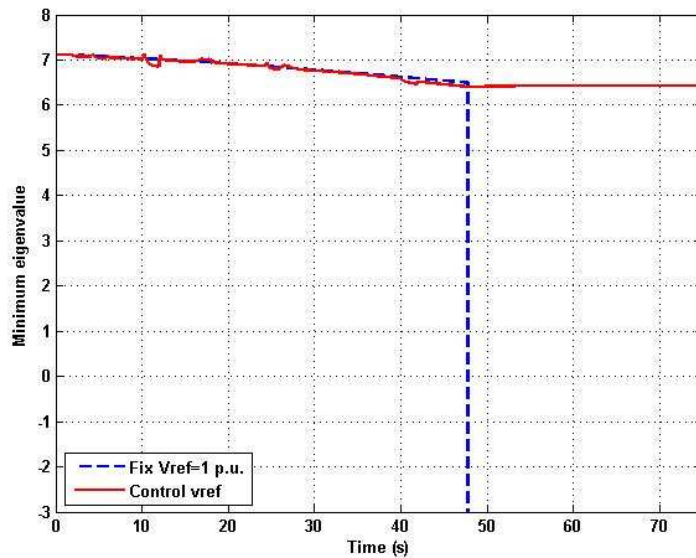
มากกว่า 0 เสมอ แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพแรงดัน ส่วนกรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่มีค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดต่ำกว่า 0 ที่เวลาประมาณ 49 วินาที ดังนั้นจะเห็นว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรักษาเสถียรภาพแรงดันได้ดีขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 7.10 ขนาดของแรงดันบัสต่างๆของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

(ก) กรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่

(ข) กรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้

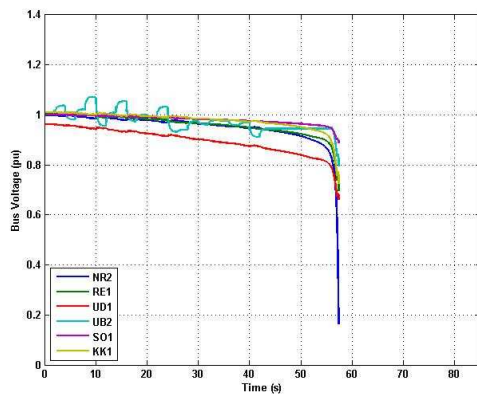


รูปที่ 7.11 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$

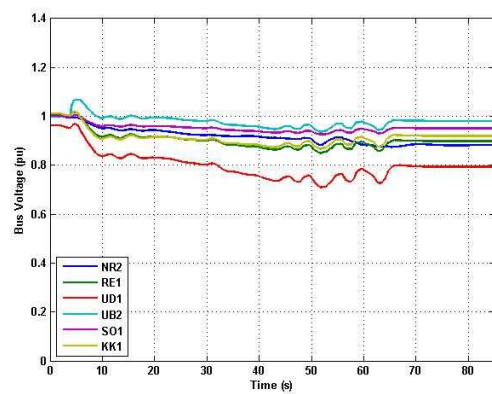


## 7.6 กรณีศึกษาที่ 6 : การควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

รูปที่ 7.12 แสดงการเปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัสต่างๆในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้กับการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน พบว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันสามารถรักษาเสถียรภาพแรงดันได้ ต่างจากกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ที่เกิดการพังทลายของแรงดันประมาณวินาทีที่ 56 เมื่อพิจารณาค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ลีดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  กรณีการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้พบว่า มีค่าน้อยกว่า 0 ที่วินาทีที่ 51 แสดงให้เห็นถึงระบบสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ส่วนค่าลักษณะเฉพาะของกรณีการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันมีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 7.13



(ก)



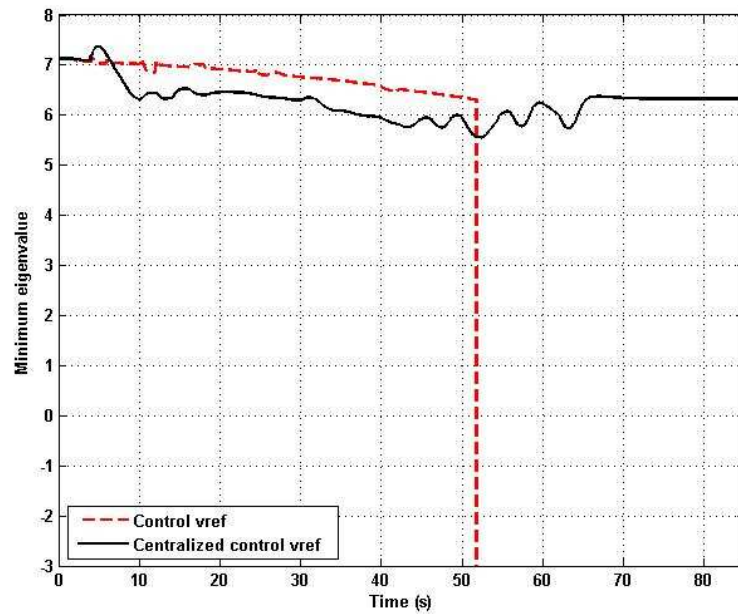
(ข)

รูปที่ 7.12 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

(ก) กรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่

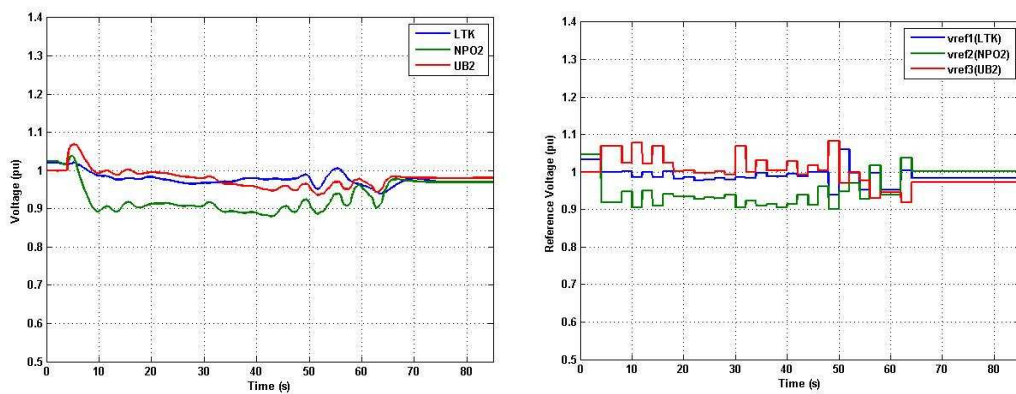
(ข) กรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้





รูปที่ 7.13 ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์  $J_R$

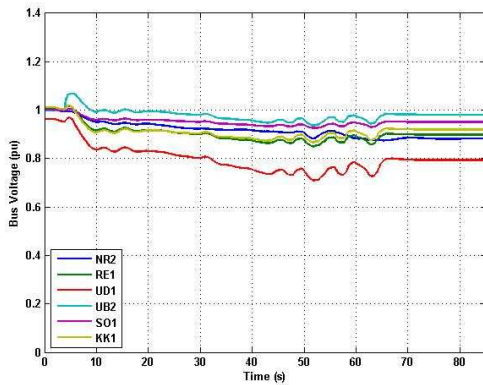
รูปที่ 7.14 แสดงขนาดแรงดันจริงของบัส LTK NPO2 UB2 และแรงดันอ้างอิงที่บัส LTK NPO2 และ UB2 ตามลำดับ จะเห็นว่าแรงดันและแรงดันอ้างอิงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันแต่ไม่สามารถปรับได้เท่ากัน เนื่องจากผลของ PSS และขีดจำกัดของอุปกรณ์ขดเคียงเชิงโครนัสเชิงสถิต



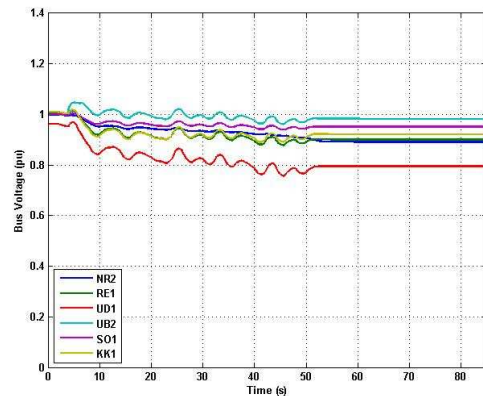
รูปที่ 7.14 เปรียบเทียบขนาดแรงดันอ้างอิงและขนาดแรงดันจริงของบัสที่มีการควบคุมแรงดัน

7.7 กรณีศึกษาที่ 7 : เปรียบเทียบการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน

รูปที่ 7.15 แสดงการเปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัสต่างๆในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกัน กรณีปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization problem) กับการหาค่าตอบที่เป็นไปได้ (Feasibility problem) จะเห็นว่าขนาดแรงดันมีความใกล้เคียงกัน และรูปที่ 7.16 แสดงขนาดแรงดันจริงของบัส LTK NPO2 และ UB2 และแรงดันอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสเชิงสถิตที่บัส LTK NPO2 และ UB2 ตามลำดับ จะเห็นว่าแนวโน้มของแรงดันจริงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับแรงดันอ้างอิง



(ก)

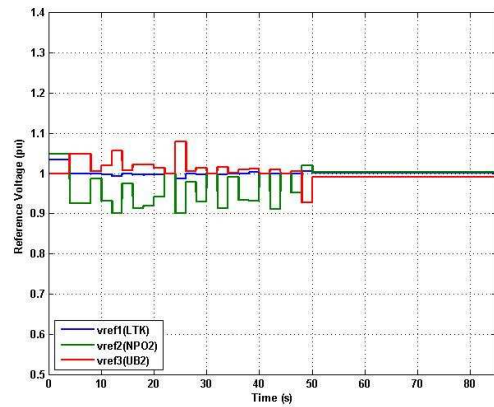
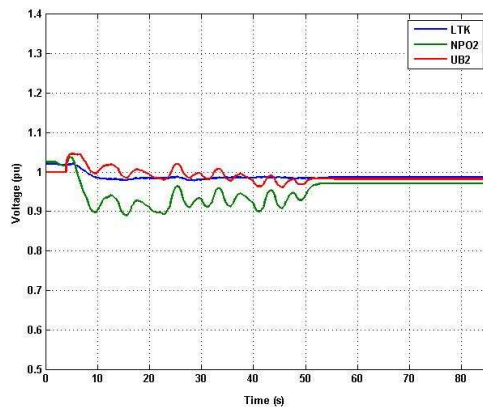


(ข)

รูปที่ 7.15 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

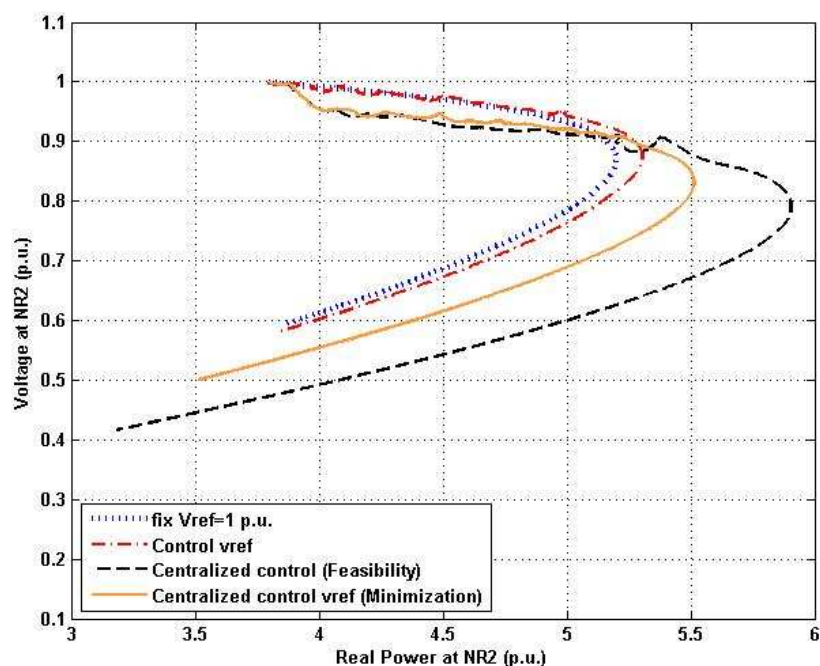
(ก) การหาค่าตอบที่เป็นไปได้ (Feasibility problem)

(ข) การหาค่าต่ำสุด (Minimization problem)

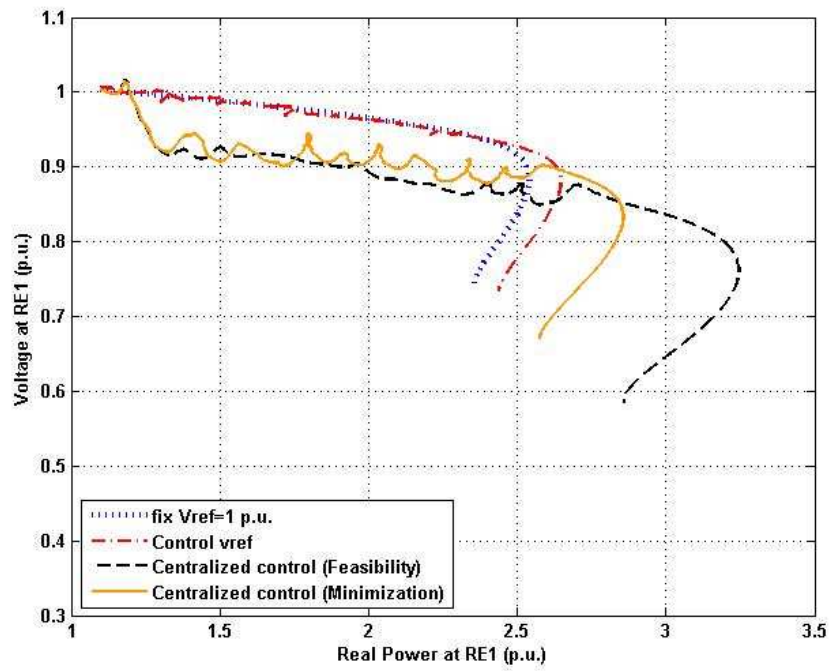


รูปที่ 7.16 เปรียบเทียบขนาดแรงดันอ้างอิงและขนาดแรงดันจริงของบัสที่มีการควบคุมแรงดัน

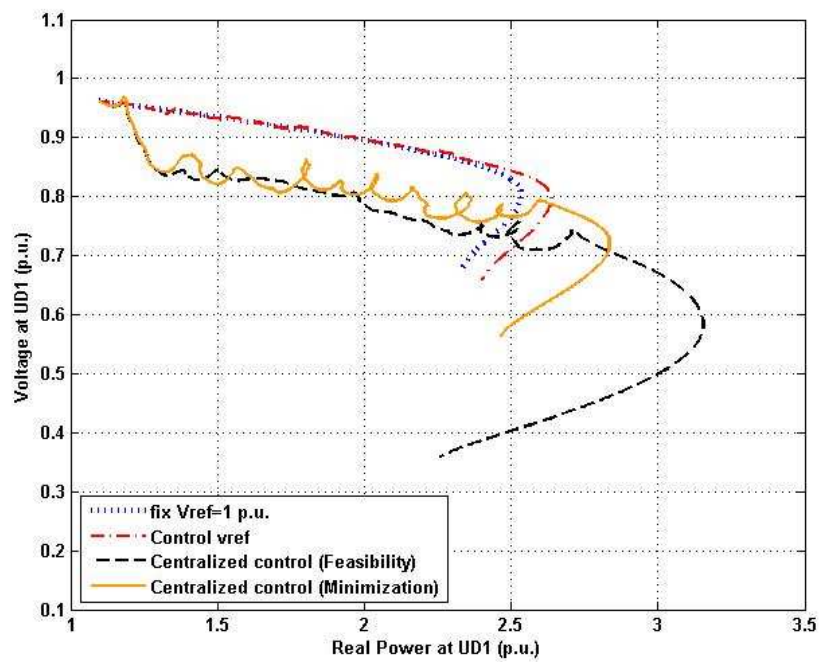
จากการควบคุมที่ออกแบบทั้งหมด เมื่อทดสอบเพิ่มโหลดที่บัส NR2 RE1 และ UD1 ในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือขึ้นเรื่อยๆ (ขนาดโหลดที่เพิ่มขึ้นกล่าวในหัวข้อ 6.3) จนกระทั่งระบบสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันที่บัส NR2 RE1 และ UD1 เพื่อดูความสามารถในการจ่ายโหลดของระบบในกรณีการควบคุมแบบต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันกรณีการหาค่าตอบที่เป็นไปได้ (Feasibility problem) สามารถเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดได้มากที่สุด รองลงมาคือการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันกรณีการหาค่าต่ำสุด (Minimization problem) ส่วนกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้สามารถเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันแบบต่างๆ ดังแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันที่บัส NR2 ตามรูปที่ 7.17 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันที่บัส RE1 แสดงดังรูปที่ 7.18 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันที่บัส UD1 เป็นไปตามรูปที่ 7.19 ซึ่งจากทั้ง 3 กราฟแสดงให้เห็นว่ากรณีควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันแบบต่างๆ สามารถเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดได้อย่างมาก แต่มีผลที่ไม่คาดหวังคือทำให้แรงดันในระบบลดต่ำลงด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจจำเป็นต้องนำอุปกรณ์การยกระดับแรงดันมาช่วยรักษาแรงดันในระบบด้วย



รูปที่ 7.17 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัส NR2



รูปที่ 7.18 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัส RE1



รูปที่ 7.19 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดแรงดันบัส UD1

## บทที่ 8

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตในระบบทดสอบ 9 บัสและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบความสามารถของการควบคุมระหว่างการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตกับการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นอกจากนี้ได้นำเสนอการหาตำแหน่งการติดตั้งของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเชิงโหมดและตัวประกอบการมีส่วนร่วมของบัสเพื่อที่จะหาบัสที่ส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหมดที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันของระบบเพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตสามารถช่วยแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนการออกแบบการควบคุมใช้หลักการของการแทนตำแหน่งโพล โดยจะพิจารณาตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ลุดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ให้มีค่าอยู่ในพื้นที่ที่กำหนดเพื่อจะเป็นการยืนยันว่าระบบมีเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งหลักการแทนตำแหน่งโพลสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้นและสามารถแก้ปัญหาโดยใช้เครื่องมือสำเร็จรูปของอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น จะได้ผลลัพธ์เป็นแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตที่ถูกนำไปใช้ในการปรับขนาดแรงดันของบัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตเพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพแรงดันต่อไป

จากระบบทดสอบ 9 บัสและระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือเมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตและทดสอบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบได้ดีกว่ากรณีกำหนดแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ และเมื่อทดสอบความสามารถของการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิตในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัสควบคุมแรงดันร่วมกันจะเพิ่มความสามารถในการมีโหลดของระบบมากกว่ากรณีการควบคุม

แรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตเพียงตัวเดียวเป็นอย่างมาก ดังนั้นการควบคุมแรงดันอ้างอิงแบบปรับค่าได้ของบัลควบคุมแรงดันร่วมกันจะเพิ่มระยะเวลาในการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบได้เป็นเวลานาน

## 8.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบการควบคุมเชิงพลวัตสำหรับอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันมีดังนี้

1. ขีดจำกัดของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตมีผลต่อเสถียรภาพแรงดันเป็นอย่างมาก ดังนั้นขนาดของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตควรเลือกให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา เพื่อให้อุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตสามารถช่วยในการรักษาเสถียรภาพแรงดันได้อย่างเต็มที่
2. สิ่งที่คาดว่าจะเป็ประโยชน์ในการพัฒนาการควบคุมแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์ชุดเซยซิงโครนัสเชิงสถิตคือ การหาค่ามากที่สุดของค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ลุดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ทำให้สามารถยกระดับค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุดของเมทริกซ์ลุดรูปของจาโคเบียน  $J_R$  ให้มีค่ามากที่สุดเพื่อที่จะทำให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่พิจารณามีความแข็งแกร่งและมั่นคงยิ่งขึ้น โดยพิจารณาแรงดันของระบบด้วย

## รายการอ้างอิง

- [1] Kundur, P. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [2] Gao, B., Morison, G.K., and Kundur, P. "Voltage Stability Evolution using Modal Analysis" IEEE Transaction on Power System, No.4, November 1992: pp. 1529-1542.
- [3] Sharma, C., and Ganness, M.G. "Determination of the Applicability of using Modal Analysis for Prediction of Voltage Stability" Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES, 2008: pp. 1-7.
- [4] Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A.J., and Chilali M. LMI toolbox user's guide, The MathWorks, Inc., 1995.
- [5] Shrikant Rao, P., and Sen, I. "Robust Pole Placement Stabilizer Design Using Linear Matrix Inequality" IEEE Transaction on Power Apparatus System, No.1, February 2000: pp. 313-319.
- [6] Xue, C.-F., Zhang, X.-P., and Godfrey, K.R. "Design of STATCOM damping control with multiple operating point: a multimodel LMI approach" IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., No. 4, July 2006: pp. 375-382.
- [7] Anderson, P.M., Fouad, A.A., Power system control and stability, Second Edition, Wiley-Interscience, 2003.
- [8] Taylor, C.W. Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, 1994.
- [9] Mathur, R.M., Varma, R.K. Thyristor-base FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley-Interscience, 2002.
- [10] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., and Al-Haddad, K. "Static synchronous compensators (STATCOM): a review" IET Power Electronics, 22nd April 2008: pp. 297-324.
- [11] VanAntwerp, J.G., and Braatz, R.D. "A tutorial on linear and bilinear matrix inequalities" Journal of Process Control 10, 2000: pp. 363-385.
- [12] Boyd, S., Ghaoui, L.E., Feron, E., and Balakrishnan, V. Linear matrix inequalities in system and control theory, SIAM, Philadelphia, PA 1994.

- [13] Chilali, M., and Gahinet, P. " $H_{\infty}$  Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach" IEEE Transaction on Power Apparatus System, No.3, March 1996: pp. 358-367.
- [14] Brewer, J.W. "Kronecker Products and Matrix Calculus in System Theory" IEEE Transaction on Circuits and Systems, No.9, September 1978: pp. 772-781.
- [15] Rao, P., Crow, M.L., and Yang, Z. "STATCOM control for power system voltage control applications", IEEE Trans. on Power Delivery, No. 4, Oct. 2000: pp. 1311-1317.
- [16] Schauder, C., and Mehta, H. "Vector analysis and control of advanced static VAR compensators", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., No. 4, July 1993: pp. 299-306.
- [17] Hoonchareon, N. Lecture Notes on Power System Stability, Chulalongkorn University, 2009.
- [18] ข้อมูลจากฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2552



ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก. แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบส่งไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองเชิงพลวัต (Dynamic Simulation) ของระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า รวมไปถึงเพื่อทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิติเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นในระบบว่าสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพแรงดันให้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้รายละเอียดของแบบจำลองอธิบายได้ดังนี้

#### ก.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในที่นี้ แสดงในระบบแกนอ้างอิง dq อธิบายพฤติกรรมเชิงพลวัตของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยสมการสถานะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์และการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดโรเตอร์ทั้งในแกน d และแกน q โดยละเลยผลของขดลวดหน่วงการสั้นของโรเตอร์ที่ภาวะชับทราน-เซียนต์ และละเลยการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าชั่วขณะในวงจรขดลวดสเตเตอร์ ทั้งนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับแบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้าที่จะได้กล่าวถึงต่อไป

ชุดสมการพื้นฐานที่ใช้ มีดังนี้ [1], [17]

- สมการฟลักซ์ค้ำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} \\
 \psi_{fd} &= -L_{ad} i_d + L_{ffd} i_{fd} \\
 \psi_q &= -L_q i_q + L_{aq} i_{kq} \\
 \psi_{kq} &= -L_{aq} i_q + L_{kkq} i_{kq}
 \end{aligned} \tag{ก.1}$$

- สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 e_d &= -R_s i_d + X'_d i_q + E'_d \\
 e_q &= -R_s i_q - X'_q i_d + E'_q
 \end{aligned} \tag{ก.2}$$

โดยที่

$$E'_d = -\frac{L'_{MQ}}{L_{kq}} \psi_{kq}$$

$$E'_q = \frac{L'_{MD}}{L_{fd}} \psi_{fd}$$

$$L'_{MQ} = L_{aq} // L_{kq} = L'_q - L_l$$

$$L'_{MD} = L_{ad} // L_{fd} = L'_d - L_l$$

- สมการสถานะของแรงดันที่ขดลวดโรเตอร์

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} \left( -E'_q - (X_d - X'_d) \cdot i_d + E_{fd} \right)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}} \left( -E'_d + (X_q - X'_q) \cdot i_q \right)$$
(ก.3)

โดยที่

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd}$$

- สมการไหลตแรงแบบทิศทางแม่เหล็กไฟฟ้า

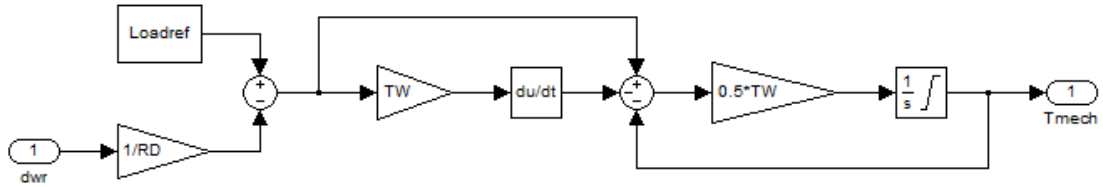
$$T_{em} = E'_q i_q + E'_d i_d + (X'_q - X'_d) \cdot i_d i_q$$
(ก.4)

- สมการสถานะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

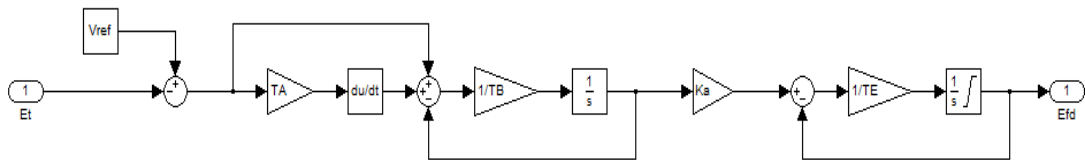
$$\Delta \dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (T_{mech} - T_{em} - D \Delta \omega_r)$$

$$\dot{\delta} = \omega_b \cdot \Delta \omega_r$$
(ก.5)

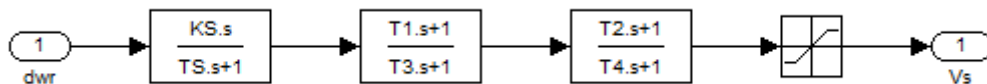
ส่วนระบบควบคุมความเร็วแสดงไว้ในรูปที่ ก.1 ระบบกระตุ้นและส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นแสดงไว้ในรูปที่ ก.2 และรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.1 ระบบควบคุมความเร็ว



รูปที่ ก.2 ระบบกระตุ้น



รูปที่ ก.3 ส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

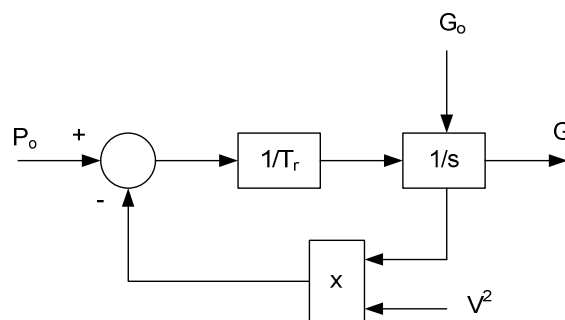
## ก.2 Tie line

แบบจำลองของ Tie line ใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิมหรือชั่วขณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งสมการลักษณะทางไฟฟ้าสามารถบรรยายได้ดังสมการ (ก.2) ส่วนสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบรรยายได้จากสมการ (ก.5)

### ก.3 แบบจำลองโหลด

แบบจำลองโหลดโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบจำลองสถิตและแบบจำลองพลวัต [8] สมการ (ก.6) คือสมการที่บรรยายแบบจำลองโหลดเชิงพลวัตและรูปที่ ก.4 แสดงแบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่ของโหลด

$$T_r \frac{dG}{dt} = P_o - GV^2 \quad (\text{ก.6})$$



รูปที่ ก.4 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่ของโหลด

### ก.4 แบบจำลองเครือข่ายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

แบบจำลองเครือข่ายระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะละเลยผลของภาวะชั่วขณะในวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transients) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับพลวัตของปัญหาเสถียรภาพแรงดัน โดยทั่วไปแล้ว นิยมใช้สมการทางพีชคณิตแบบเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ตามสมการที่ (ก.7)

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{ก.7})$$

ซึ่ง  $Y_{bus}$  คือ บัสด  $n \times n$  เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ของสายส่งจำนวน  $n$  บัสด,  $I_{bus}$  คือ เวกเตอร์ของกระแสที่ฉีดเข้าสายส่งและ  $V_{bus}$  คือ เวกเตอร์ของแรงดันที่บัสด จากสมการ (ก.7) เนื่องจากมีหลากหลายแบบจำลองของอุปกรณ์เชิงพหุวัตต์อ้างอิงกับชนิดของสัญญาณขาเข้าและขาออก นั่นคือแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นสัญญาณขาเข้าเป็นแรงดันและสัญญาณขาออกเป็นกระแสของสายส่ง, โหลดทุกบัสดมีสัญญาณขาเข้าเป็นกระแสของสายส่ง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับเปลี่ยนสัญญาณขาเข้าและขาออกของสมการ (ก.7)

และกรรมวิธีของการปรับเปลี่ยนสัญญาณขาเข้าและขาออกแสดงดังตัวอย่างการปรับแถว  $i$  ตามนี้

จากสมการ (ก.7) สามารถถูกเขียนไว้ดังนี้

$$i_1 = Y_{11}V_1 + \dots + Y_{1i}V_i + \dots + Y_{1n}V_n \quad (\text{ก.8})$$

...

$$i_i = Y_{i1}V_1 + \dots + Y_{ii}V_i + \dots + Y_{in}V_n \quad (\text{ก.9})$$

...

$$i_n = Y_{n1}V_1 + \dots + Y_{ni}V_i + \dots + Y_{nn}V_n \quad (\text{ก.10})$$

จากสมการ (ก.9) จะสามารถหา  $V_i$  ได้ตามนี้

$$V_i = -\frac{Y_{i1}}{Y_{ii}}V_1 - \dots + \frac{1}{Y_{ii}}i_i - \dots - \frac{Y_{in}}{Y_{ii}}V_n \quad (\text{ก.11})$$

แทน  $V_i$  ในสมการ (ก.8) - (ก.11) จะได้สมการกระแสใหม่ดังนี้

$$i_1 = Y_{11}V_1 + \dots + Y_{1i}\left(-\frac{Y_{i1}}{Y_{ii}}V_1 - \dots + \frac{1}{Y_{ii}}i_i - \dots - \frac{Y_{in}}{Y_{ii}}V_n\right) + \dots + Y_{1n}V_n$$

หรือ

$$i_1 = (Y_{11} - \frac{Y_{l1}Y_{i1}}{Y_{ii}})V_1 + \dots + \frac{Y_{li}}{Y_{ii}}i_i + \dots + (Y_{1n} - \frac{Y_{li}Y_{in}}{Y_{ii}})V_n \quad (\text{ก.12})$$

...

$$V_i = -\frac{Y_{il}}{Y_{ii}}V_1 - \dots + \frac{1}{Y_{ii}}i_i - \dots - \frac{Y_{in}}{Y_{ii}}V_n \quad (\text{ก.13})$$

...

$$i_n = Y_{n1}V_1 + \dots + Y_{ni}(-\frac{Y_{il}}{Y_{ii}}V_1 - \dots + \frac{1}{Y_{ii}}i_i - \dots - \frac{Y_{in}}{Y_{ii}}V_n) + \dots + Y_{nn}V_n$$

หรือ

$$i_n = (Y_{n1} - \frac{Y_{ni}Y_{i1}}{Y_{ii}})V_1 + \dots + \frac{Y_{ni}}{Y_{ii}}i_i + \dots + (Y_{nn} - \frac{Y_{ni}Y_{in}}{Y_{ii}})V_n \quad (\text{ก.14})$$

จากนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ Hybrid Matrix,  $H_{\text{mod}}$  ตามนี้

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} - \frac{Y_{l1}Y_{i1}}{Y_{ii}} & \dots & \frac{Y_{li}}{Y_{ii}} & \dots & Y_{1n} - \frac{Y_{li}Y_{in}}{Y_{ii}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ -\frac{Y_{il}}{Y_{ii}} & \dots & \frac{1}{Y_{ii}} & \dots & -\frac{Y_{in}}{Y_{ii}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} - \frac{Y_{ni}Y_{i1}}{Y_{ii}} & \dots & \frac{Y_{ni}}{Y_{ii}} & \dots & Y_{nn} - \frac{Y_{ni}Y_{in}}{Y_{ii}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{ก.15})$$

## ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบทดสอบ

### ข.1 ระบบทดสอบ 9 บัส

ข้อมูลของระบบ 9 บัส แสดงดังต่อไปนี้

#### ข.1.1 ข้อมูลบัส

ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 9 บัสแสดงไว้ในตารางที่ ข.1 โดยค่าฐานกำลังคือ 100 MVA และค่าฐานแรงดันคือ 345 กิโลโวลต์

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบ 9 บัส

บัส	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตรีแอกทีฟ (MVA <sub>r</sub> )	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVA <sub>r</sub> )	ตัวเก็บประจุ ขนาน (MVA <sub>r</sub> )	ขนาด แรงดัน (pu)	มุมของ แรงดัน (องศา)
1	0	0	0	0	0	1	0
2	163	0	0	0	0	1	0
3	85	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	90	30	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	100	35	0	1	0
8	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	125	50	0	1	0

#### ข.1.2 ข้อมูลสายส่ง

ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 9 บัสแสดงไว้ในตารางที่ ข.2



ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบ 9 บัส

จากบัส	ไปบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ค่าการประจุสายส่ง (p.u.)
1	4	0	0.0576	0
4	5	0.017	0.092	0.158
5	6	0.039	0.17	0.358
3	6	0	0.0586	0
6	7	0.0119	0.1008	0.209
7	8	0.0085	0.072	0.149
8	2	0	0.0625	0
8	9	0.032	0.161	0.306
9	4	0.01	0.085	0.176

### ข.1.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสของระบบทดสอบ 9 บัส แสดงไว้ในตารางที่ ข.3 ค่าพิกัดกำลังและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 คือ 247.5 MVA และ 16.5 กิโลโวลต์ ค่าพิกัดกำลังและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2 คือ 192 MVA และ 18 กิโลโวลต์ ค่าพิกัดกำลังและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 3 คือ 128 MVA และ 13.8 กิโลโวลต์

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบทดสอบ 9 บัส

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3
$X_d$	0.1460 pu	0.8958 pu	1.3125 pu
$X_q$	0.0969 pu	0.8645 pu	1.2578 pu
$X'_d$	0.0608 pu	0.1198 pu	0.1813 pu
$X'_q$	0.0969 pu	0.1969 pu	0.25 pu
$X_l$	0.0336 pu	0.0521 pu	0.0742 pu
$R_s$	0 pu	0 pu	0 pu
$T'_{d0}$	8.96 s	6.00 s	5.89 s

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่บัส 1	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่บัส 2	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่บัส 3
$T'_{q0}$	0.4 s	0.535 s	0.600 s
$H$	23.64 s	6.4 s	3.01 s
$D$	0 pu	0 pu	0 pu

#### ข.1.4 ข้อมูลอุปกรณ์ชดเชยเชิงโรนัสเชิงสถิต

ค่าพารามิเตอร์ในการควบคุม PI ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโรนัสเชิงสถิต  $K_p = 30$ ,  $K_i = 100$  และค่าความต้านทาน  $R_s$  เท่ากับ 0.01 pu ตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล  $L_s$  เท่ากับ 0.15 pu

#### ข.2 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

##### ข.2.1 ข้อมูลบัส

ข้อมูลบัสของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยแสดงไว้ในตารางที่ ข.4 โดยค่าฐานกำลังคือ 100 MVA และค่าฐานแรงดันคือ 115/230 กิโลโวลต์

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลบัสในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

บัส	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตรีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)	ตัวเก็บประจุ ขนาน (MVar)	ขนาด แรงดัน (pu)	มุมของ แรงดัน (องศา)
NR2	0	0	380	126.8	63.8	1.0283	-31.63
RE1	0	0	110	26	22	1.0284	-52.69
UD1	0	0	110	19.7	41.9	1.0099	-59.33
LS	200	-55.4	0	0	0	1.0084	-28.62
LTK	450	69.8	0	0	0	1.02	-14.61
NPO2	616.6	106.7	0	0	0	1.025	-37.74
UB2	0	0	101	11.6	22	1.0068	-66.81
SO1	0	0	43.2	7.3	22	1.0157	-59.42
KK1	0	0	112.1	34.3	39.6	1.0272	-42.54

บัส	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิต รีแอกทีฟ (MVA <sub>r</sub> )	โหลด จริง (MW)	โหลด รีแอกทีฟ (MVA <sub>r</sub> )	ตัวเก็บประจุ ขนาน (MVA <sub>r</sub> )	ขนาด แรงดัน (pu)	มุมของ แรงดัน (องศา)
SR2	0	0	0	0	64.8	1.0375	-10.66
SU2	0	0	19.1	2	0	1.0249	-51.2
TTK	425.4	31.1	0	0	0	1.0426	-12.39
MD1	0	0	19.8	3.2	11	0.9887	-62.91
CYP	0	0	144.1	39.4	0	1.0205	-32.87
NH	0	0	35	12.3	22	1.0095	-62.38
THK	212	-18.6	0	0	0	0.9989	-55.24
SR2	780.8	-45.8	301.3	125.6	128.5	1.0203	-15.7
PCH	0	0	49.1	11.7	22	1.009	-25.48
SKI	0	0	36.6	0.8	19.8	1.0259	-29.7
CYP	0	0	0	0	64.8	1.0038	-30.01
NR1	0	0	75.4	21	56.4	1.0323	-33.5
BR	0	0	92.4	9.2	22.1	1.0055	-44.9
SU1	0	0	60.8	9.9	22	1.0244	-51.23
SU2	0	0	0	0	0	0.9882	-49.56
PYK	0	0	76.7	11.5	22	1.0254	-56
KK1	0	0	0	0	0	1.0184	-38.95
YT	0	0	44.5	11.4	0	1.0224	-56.38
SS	0	0	80.1	16.6	44.1	1.0116	-65.27
NR2	0	0	0	0	0	0.9813	-26.08
UB1	0	0	20.2	4.8	22	1.014	-64.97
AN	0	0	28.3	7	11	1.0131	-60.13
YT	0	0	0	0	0	0.9921	-52.53
MD2	0	0	40.5	13.2	0	0.9858	-63.08
TH	0	0	18.8	0.3	0	0.9965	-61.45
NN	0	0	78.8	20	0	1.0124	-58.78

บัส	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิต รีแอกทีฟ (MVar)	โหลด จริง (MW)	โหลด รีแอกทีฟ (MVar)	ตัวเก็บประจุ ขนาน (MVar)	ขนาด แรงดัน (pu)	มุมของ แรงดัน (องศา)
SO2	0	0	0	0	0	1.0131	-58.6
RE1	0	0	0	0	0	0.9924	-49.83
NP	0	0	0	1.7	0	1.0116	-58.24
SD	0	0	28.8	8.1	0	1.0054	-56.09
KL	0	0	42.7	1.4	22	1.0176	-52.57
MK	0	0	49.8	6.4	22	1.011	-52.61
KK2	0	0	50.8	6.7	0	1.0233	-43.65
RE2	0	0	0	0	0	0.9957	-47.93
BPI	0	0	30.4	8.3	0	1.0118	-42.37
PO	0	0	19.9	4.5	0	1.023	-36.64
NN	0	0	0	0	0	0.995	-56.61
KNG	0	0	55	11.7	22	1.0224	-37.53
NPO1	0	0	52.9	21.8	22	1.0415	-43.62
NPO2	0	0	0	0	0	1.0456	-42.25
UD2	0	0	46.3	13.7	44.1	1.0112	-59.22
KK3	0	0	0	0	65.1	1.0185	-38.46
NK	0	0	106	21	22	0.9853	-62.45
NBL	0	0	102.1	4.8	66.1	1.0362	-64.4
SO2	0	0	0	0	0	1.0055	-57.34
PHK	0	0	104.5	13.7	44.1	1.009	-63.26

## ข.2.2 ข้อมูลสายส่ง

ข้อมูลสายส่งของระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยแสดงไว้ในตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

จากบัส	ไปบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ค่าการประจุสายส่ง (p.u.)
CYP	KK3	0.00954	0.07327	0.14978
CYP	KK3	0.00954	0.07327	0.14978
CYP	NR2	0.0099	0.07608	0.15519
CYP	NR2	0.0099	0.07608	0.15519
CYP	TTK	0.01919	0.14833	0.30583
CYP	TTK	0.01919	0.14833	0.30583
KK1	KK3	0.00068	0.00517	0.01081
KK1	KK3	0.00068	0.00517	0.01081
KK3	LS	0.01731	0.13183	0.27854
KK3	LS	0.01731	0.13183	0.27854
KK3	NPO2	0.00144	0.01583	0.06192
KK3	NPO2	0.00144	0.01583	0.06192
KK3	RE2	0.00904	0.06927	0.14123
KK3	RE2	0.00906	0.06925	0.14121
LTK	NR2	0.00798	0.05349	0.10402
LTK	NR2	0.00806	0.0534	0.1043
LTK	SR2	0.00729	0.04887	0.09502
LTK	SR2	0.00737	0.04879	0.09527
RE1	RE2	0.00201	0.01535	0.03122
RE1	RE2	0.00201	0.01534	0.03121
RE1	YT	0.00343	0.03844	0.14268
RE1	YT	0.00346	0.0384	0.14289
RE2	SU2	0.01404	0.1078	0.22055
RE2	SU2	0.01406	0.10777	0.22052
NN	SO2	0.00845	0.06488	0.1323
NN	THK	0.00205	0.01569	0.03195
SO2	THK	0.00772	0.05925	0.12085

จากบัส	ไปบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ค่าการประจุสายส่ง (p.u.)
SR2	PCH	0.05777	0.16906	0.02253
SR2	SKI	0.10227	0.30249	0.03938
PCH	NR2	0.07457	0.22357	0.02823
SKI	NR2	0.03007	0.09014	0.01138
NR2	NR1	0.0072	0.03307	0.00475
NR2	NR1	0.0072	0.03307	0.00475
NR2	BR	0.13846	0.40391	0.05379
NR2	BR	0.13846	0.40391	0.05379
NR2	KNG	0.06039	0.17562	0.02326
NR1	BR	0.15626	0.33587	0.0413
NR1	PO	0.28601	0.35736	0.0393
NR1	KNG	0.04738	0.13779	0.01825
BR	SU1	0.06581	0.14049	0.01721
SU1	SU2	0.00074	0.00339	0.00049
SU1	SU2	0.00074	0.00339	0.00049
SU1	PYK	0.05676	0.26065	0.03752
PYK	RE1	0.05625	0.25893	0.0373
PYK	RE1	0.05625	0.25893	0.0373
RE1	YT	0.06988	0.20338	0.02693
RE1	YT	0.06988	0.20338	0.02693
RE1	KL	0.03803	0.11059	0.01464
RE1	KL	0.03803	0.11059	0.01464
RE1	MK	0.09861	0.11202	0.01483
YT	SS	0.08935	0.26021	0.03448
YT	SS	0.08935	0.26021	0.03448
YT	UB1	0.09617	0.28738	0.03639
YT	AN	0.04936	0.14347	0.01904
YT	AN	0.04936	0.14347	0.01904

จากบัส	ไปบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ค่าการประจุสายส่ง (p.u.)
SS	UB2	0.06058	0.17627	0.02335
SS	UB2	0.06058	0.17627	0.02335
UB2	UB1	0.03006	0.0874	0.01157
UB2	UB1	0.03006	0.0874	0.01157
UB1	AN	0.03998	0.18402	0.02645
AN	MD1	0.23977	0.30348	0.03249
MD1	MD2	0.00542	0.02488	0.00358
MD1	TH	0.02853	0.13112	0.01884
MD2	TH	0.02289	0.10527	0.01512
TH	NN	0.03712	0.17083	0.02455
TH	NN	0.03712	0.17083	0.02455
TH	SO1	0.28394	0.27788	0.01865
NN	SO2	0.18786	0.2141	0.02826
SO2	SO1	0.00546	0.03681	0.00972
SO2	SO1	0.00546	0.03681	0.00972
SO1	NP	0.01786	0.08243	0.01174
SO1	KL	0.0757	0.35022	0.05018
SO1	PHK	0.07418	0.16087	0.01911
SO1	PHK	0.05191	0.15395	0.01958
NP	SD	0.03227	0.14846	0.02133
SD	KL	0.02575	0.11838	0.01701
KL	MK	0.11921	0.13546	0.01794
KL	KK2	0.07505	0.21844	0.02894
KL	KK2	0.07505	0.21844	0.02894
MK	KK1	0.22212	0.28104	0.03008
KK2	KK1	0.00705	0.0205	0.00271
KK2	KK1	0.00705	0.0205	0.00271
KK1	BPI	0.03985	0.11591	0.01535

จากบัส	ไปบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ค่าการประจุสายส่ง (p.u.)
KK1	PO	0.18897	0.2356	0.02588
KK1	KNG	0.13631	0.39688	0.05263
KK1	NPO1	0.02968	0.0863	0.01142
KK1	NPO1	0.02968	0.08603	0.01142
BPI	KNG	0.09646	0.28097	0.03728
PO	CYP	0.05471	0.16171	0.0207
NPO1	NPO2	0.00182	0.01168	0.0034
NPO1	NPO2	0.00182	0.01168	0.0034
NPO1	UD2	0.0829	0.24134	0.03199
NPO1	UD2	0.0829	0.24134	0.03199
NPO1	UD1	0.09874	0.28747	0.03819
NPO1	UD1	0.09874	0.28747	0.03819
UD2	UD1	0.01106	0.03215	0.00426
UD2	NK	0.0556	0.16169	0.02141
UD2	NBL	0.03389	0.15603	0.02239
UD2	NH	0.03884	0.11596	0.01455
UD2	PHK	0.14458	0.3141	0.03738
UD1	NK	0.11596	0.14648	0.01567
UD1	NK	0.0473	0.13756	0.01822
UD1	NBL	0.05199	0.15114	0.02004
NH	PHK	0.05549	0.16572	0.02081
CYP	CYP	0	0.0577	0
CYP	CYP	0	0.0577	0
KK1	KK1	0	0.0592	0
KK1	KK1	0	0.0586	0
KK1	KK1	0	0.0586	0
NPO2	NPO2	0	0.0583	0
NPO2	NPO2	0	0.0583	0



จากบัส	ไปบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ค่าการประจุสายส่ง (p.u.)
NPO2	NPO2	0	0.0583	0
NR2	NR2	0	0.054	0
NR2	NR2	0	0.054	0
NR2	NR2	0	0.054	0
RE1	RE1	0	0.0583	0
RE1	RE1	0	0.0583	0
SR2	SR2	0	0.054	0
SR2	SR2	0	0.0537	0
SR2	SR2	0	0.048	0
SU2	SU2	0	0.0583	0
YT	YT	0	0.0583	0
YT	YT	0	0.0583	0
NN	NN	0	0.0583	0
NN	NN	0	0.0583	0
SO2	SO2	0	0.0583	0
SO2	SO2	0	0.0583	0

### ข.2.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงไว้ในตารางที่ ข.6 และค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วแสดงไว้ในตารางที่ ข.7 ส่วนค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นแสดงไว้ในตารางที่ ข.8 และตารางที่ ข.9 ส่วนค่าพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส LTK คือ 564 MVA และค่าพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส NPO2 คือ 865.2 MVA

ตารางที่ ข.6 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส LTK	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส NPO2
$X_d$	0.72 pu	1.96 pu
$X_q$	0.54 pu	1.87 pu
$X'_d$	0.252 pu	0.181 pu
$X'_q$	0.54 pu	0.331 pu
$X_l$	0.072 pu	0.09 pu
$R_s$	0 pu	0 pu
$T'_{d0}$	11.9 s	6 s
$T'_{q0}$	1 s	1 s
$H$	5.36 s	1.94 s
$D$	1 pu	0 pu

ตารางที่ ข.7 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส LTK	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส NPO2
$R_D$	0.05 pu	0.05 pu
$T_w$	1.3 s	0.4 s

ตารางที่ ข.8 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นในระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส LTK	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส NPO2
$K_a$	100 pu	100 pu
$T_A$	1 s	1 s
$T_B$	10 s	10 s

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ บัส LTK	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ บัส NPO2
$T_E$	0.1 s	0.1 s

ตารางที่ ข.9 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นในระบบส่งไฟฟ้า  
บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส LTK	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส NPO2
$K_s$	240 pu	240 pu
$T_s$	30 s	30 s
$T_1$	0.497 s	0.497 s
$T_2$	0.497 s	0.497 s
$T_3$	0.07 s	0.07 s
$T_4$	0.07 s	0.07 s
$V_{s,max}$	0.1 pu	0.1 pu
$V_{s,min}$	-0.1 pu	-0.1 pu

#### ข.2.4 ข้อมูลอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต

ค่าพารามิเตอร์ในการควบคุม PI ของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต  $K_p = 1$ ,  $K_i = 10$  และค่าความต้านทาน  $R_s$  เท่ากับ 0.01 pu ตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล  $L_s$  เท่ากับ 0.15 pu

หมายเหตุ: กรณีศึกษาที่ 1 2 และ 4 ใช้ข้อมูลของระบบทดสอบ 9 บัสที่แสดงใน [7] แต่ทำการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของสายส่งเพื่อให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพโดยที่ไม่ให้ติดขอบเขตของการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของอุปกรณ์ชดเชยเชิงโครนัสเชิงสถิต โดยจะทำการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของสายส่ง 5-6 และสายส่ง 7-8 เป็น  $2.3+j2.3 \Omega$  และ  $0.5+j0.5 \Omega$  ตามลำดับ

กรณีศึกษาที่ 3 ใช้ข้อมูลของระบบทดสอบ 9 บัสแสดงใน [7]

กรณีศึกษาที่ 1 5 6 และ 7 ใช้ข้อมูลระบบส่งไฟฟ้าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย [18] ดังที่กล่าวมาแล้ว

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกรกฎ วงษ์นิยม เกิดวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดขอนแก่น เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2551 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554