

การควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไข  
ลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

**CONTROL OF TRANSIENT STABILITY IN POWER SYSTEM  
USING TCSC UNDER GENERATOR PROTECTIVE RELAY  
COORDINATE CONDITION**

วรรณวิษ จุลกัลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณา  
เงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วรรณวิษ จุลกัลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณา  
เงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
Control of Transient Stability in Power System using TCSC under  
Generator Protective Relay Coordinate Condition


ชื่อ - นามสกุล            นายวรรณวิษ จุลกัลป์

สาขาวิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้า

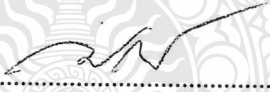
อาจารย์ที่ปรึกษา          รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, Ph.D.

ปีการศึกษา                2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, D.Eng.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรพัชร พันธรัตน์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ชื่อ – นามสกุล	นายวรรณวิษ จุกัลป์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน สถานการณ์ของพลังงานที่ถูกจำกัดเนื่องจากทรัพยากรหลักที่ลดลง รัฐบาลจึงได้มีนโยบายสนับสนุนให้มีการนำพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ กระจายอยู่ทั่วไปในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อระบบถูกรบกวนอย่างรุนแรง เช่น จากการลัดวงจร จะส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันเนื่องจากการตั้งค่าของรีเลย์ป้องกันต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าโดยใช้ TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจำลองการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทซิงโครนัส กำลังการผลิตติดตั้ง 5 เมกกะวัตต์ เข้ากับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ แบ่งแบบจำลองออกเป็น 3 สถานะ คือ 1. ระบบจำหน่ายพื้นฐาน 2. ระบบจำหน่ายพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ 3. ระบบจำหน่ายพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว และ TCSC ติดตั้งอยู่ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำหน่าย การศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม DIGSILENT

จากการศึกษาแบบจำลอง พบว่าการนำเอาอุปกรณ์ชดเชย TCSC มาติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรให้มีค่าใกล้เคียงกับระบบก่อนติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ลดผลกระทบต่อค่าของรีเลย์ป้องกัน สามารถช่วยลดการแกว่งตัวของโรเตอร์เครื่องกำเนิด และเพิ่มระยะเวลาค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตได้ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย TCSC จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการลดผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวต่อระบบป้องกัน และในการช่วยเพิ่มเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เสถียรภาพระบบไฟฟ้า TCSC ค่ากระแสลัดวงจรวิกฤต

<b>Thesis Title</b>	Control of Transient Stability in Power System using TCSC under Generator Protective Relay Coordinate Condition
<b>Name - Surname</b>	Mr. Wannawit Junlakan
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

The situation of the diminishing conventional energy sources in Thailand is becoming critical as the energy resources have been decreasing. The government, therefore, has adopted a policy to encourage development of alternative energy and renewable energy in order to produce the electricity for demand load. As a result, distribution generators of renewable energy have been installed in power distribution systems. When a power system is severely disturbed, for example in case of a short circuit, this affects the protection system directly as the parameters for setting the protection relay needs to be adjusted.

This thesis presents the control of transient stability in a proposed power system using TCSC under a generator protective relay coordinate condition. A 5-MW synchronous distribution generator was installed into a 22-kV power distribution system. In order to analyze the proposed method, the simulation scheme was divided into three states to investigate the effect of a short circuit as it occurs at different locations in the power distribution system. The first state was for examining the effect of a short circuit on the normal system, the second state for the effect on the normal system with an installed distribution generator, and the last state for the effect on the normal system with an installed distribution generator and TCSC. This proposed study was conducted by using the DIgSILENT program.

The simulation results showed that the TCSC could reduce the amount of short circuit current close to that of the normal system. This reduced the effect on setting parameters of the protection relay, reduced the oscillation of the generator's rotor and increased the critical clearing time. This thesis verifies that TCSC can reduce the effect of a short circuit and can improve the transient stability in a power system.

**Keywords :** distribution generator, transient stability, critical clearing time, TCSC

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและคำแนะนำจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิ กิตติพิชญ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนชี้แนะทางในการทำ วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง และ กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ เอื้อเพื่อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่เป็น กำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และรวมถึงพี่ๆน้องๆ ทีม งานวิจัย ณ ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้กำลังใจและร่วมแรงร่วมใจอยู่ด้วยกันในการปฏิบัติงาน ตลอดมา

วรรณวิษ จุลกัลป์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	15
1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์.....	15
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	15
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	16
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	16
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Systems).....	20
2.3 ความเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability).....	22
2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า.....	39
2.5 อุปกรณ์ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS).....	44
2.6 ระบบป้องกันเบื้องต้น.....	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	57
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	57
3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	58
3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory.....	61

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 กรณีศึกษา.....	64
3.5 สรุป.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	67
4.1 กรณีที่ 1 เกิดการลัดวงจรที่บัส 401.....	67
4.2 กรณีที่ 2 เกิดการลัดวงจรที่บัส 503.....	70
4.3 กรณีที่ 3 เกิดการลัดวงจรที่บัส 505.....	82
4.4 สรุป.....	92
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม.....	96
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก ตารางพิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลอากาศ และตารางซีเควินซ์ อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศสำหรับสายจำหน่าย 22, 33 kV ของ กฟภ.....	99
ภาคผนวก ข ตารางค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด และ THEVENIN IMPEDANCE ในระบบไฟฟ้าเขต ก.1.....	103
ภาคผนวก ค ผลงานดีพิมพ์เผยแพร่.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	144



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้า.....	59
ตารางที่ 3.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายจำหน่ายระหว่างบัส.....	59
ตารางที่ 3.3 พิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลอากาศ (SAC).....	59
ตารางที่ 3.4 ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดสายป้อนที่ 5.....	60
ตารางที่ 3.5 ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดสายป้อนที่ 4.....	60



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล .....21
รูปที่ 2.2	โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบลูป .....22
รูปที่ 2.3	แผนผังแสดงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.....22
รูปที่ 2.4	ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีค่าแรงดันสนามไฟฟ้าคงที่ .....25
รูปที่ 2.5	ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมการกระตุ้น .....25
รูปที่ 2.6	เวกเตอร์ของแกนโรเตอร์ภายใต้สภาวะปกติของทางไฟฟ้าจะคงที่ .....28
รูปที่ 2.7	เงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....38
รูปที่ 2.8	ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบ 2 บัส .....39
รูปที่ 2.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับกำลังไฟฟ้าจริง ที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลง .....40
รูปที่ 2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง .....41
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี CPF .....42
รูปที่ 2.12	อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น .....44
รูปที่ 2.13	ลักษณะของการติดตั้ง SVC .....45
รูปที่ 2.14	สวิตช์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน(Thyristor-Controlled-Reactor ,TCR).....45
รูปที่ 2.15	วงจรมุมของ SVC .....46
รูปที่ 2.16	วงจรแบบจำลองของ SVC .....46
รูปที่ 2.17	คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC .....47
รูปที่ 2.18	ควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสถานะคงตัว.....48
รูปที่ 2.19	พื้นฐานวงจรแปลงผันแบบเดียวกับสำหรับการต่ออนุกรมกับสายส่งและเฟสเซอร์.....49
รูปที่ 2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุม SSSC.....49
รูปที่ 2.21	วงจรแบบจำลองของ SSSC .....50
รูปที่ 2.22	วงจรมุมของ TCSC .....50
รูปที่ 2.23	วงจรพื้นฐานของอุปกรณ์ TCSC .....51
รูปที่ 2.24	กราฟพฤติกรรมของอุปกรณ์ TCSC .....52
รูปที่ 2.25	วงจรควบคุมแบบวงปิด ชนิด Constant-Current (CC) Control .....52

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{TCSC}$ กับ $I_L$ ในสภาวะคงตัว.....	53
รูปที่ 2.27 รูปแบบการต่อ CT แบบ Multi core และแบบ Multi ratio .....	54
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างการ set Relay ให้มี Margin Time อย่างน้อย 0.3 sec.....	56
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน .....	58
รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่.....	60
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ .....	61
รูปที่ 3.4 โครงสร้างอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIgSILENT.....	62
รูปที่ 3.5 Composite Frame ของอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIgSILENT .....	63
รูปที่ 3.6 Block control แบบวงปิด ของอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIgSILENT .....	63
รูปที่ 3.7 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน ในโปรแกรม DIgSILENT .....	64
รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เชื่อมต่ออยู่ ในโปรแกรม DIgSILENT.....	64
รูปที่ 3.9 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เชื่อมต่ออยู่และมี TCSC ติดตั้งอยู่ในโปรแกรม DIgSILENT.....	65
รูปที่ 4.1 การไหลของกระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน .....	67
รูปที่ 4.2 ค่ากระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน .....	68
รูปที่ 4.3 การไหลของกระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่.....	68
รูปที่ 4.4 ค่ากระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่.....	69
รูปที่ 4.5 การไหลของกระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่ มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ .....	69
รูปที่ 4.6 ค่ากระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่.....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 503.....	70
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.1 .....	71
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.1 .....	72
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.1 .....	72
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.1 .....	73
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.2 .....	74
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.2 .....	74
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2 .....	75
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2 .....	75
รูปที่ 4.16 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ เมื่อการลัดวงจรที่บัส 503.....	76
รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1.....	77
รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1.....	77
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสต่างๆ หลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1 .....	78
รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่เครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1.....	78

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC กรณี 4.2.2.1 .....	79
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.2 .....	80
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.2 .....	80
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.3 .....	81
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.3 .....	81
รูปที่ 4.26 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ เมื่อเกิดการลัดวงจร ที่ บัส 505 .....	82
รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.1 .....	83
รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.1 .....	83
รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.3.1.1 .....	84
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.3.1.1 .....	84
รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.2 .....	85
รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.2 .....	85
รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2 .....	86
รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2 .....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.35 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ ที่มี TCSC ติดตั้งอยู่เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ บัส 505 .....	87
รูปที่ 4.36 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1 .....	87
รูปที่ 4.37 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1 .....	88
รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสต่างๆ หลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1 .....	88
รูปที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่เครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1 .....	89
รูปที่ 4.40 ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC กรณี 4.3.2.1 .....	89
รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.2 .....	90
รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.2 .....	90
รูปที่ 4.43 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.3 .....	91
รูปที่ 4.44 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.3 .....	91
รูปที่ 4.45 ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC กรณี 4.3.2.3 .....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน สถานการณ์ของพลังงานที่ถูกจำกัดเนื่องจากทรัพยากรหลักที่ลดลง รัฐบาลจึงได้มีนโยบายสนับสนุนให้มีการนำพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น หนึ่งในนั้นคือ โครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP, Very Small Power Producer) จากทั้งภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ และประชาชนทั่วไปผ่านระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ได้แก่ กฟภ. และ กฟน. เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ทรัพยากรภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเชิงพาณิชย์ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยแบ่งเบาภาระด้านการลงทุนของรัฐในระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า

จากนโยบายดังกล่าว ทำให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ กระจายอยู่ทั่วไปในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโดยปกติระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. เป็นระบบแบบเรเดียล กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดในทิศทางเดียว แต่เมื่อมีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) ต่อเชื่อมและจ่ายไฟขนานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งขนาดและทิศทาง การเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสไฟฟ้าง่ายๆ ดังกล่าวนี้ ส่งผลกระทบต่อเทคนิคต่างๆ ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย เช่น การตั้งค่าของระบบป้องกัน เสถียรภาพระบบไฟฟ้าเมื่อระบบถูกรบกวน ซึ่งเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ก็จะต้องส่งผลกระทบต่อระบบป้องกัน เสถียรภาพระบบไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการนำอุปกรณ์ชดเชย TCSC เข้ามาช่วยลดผลกระทบดังกล่าว ก็จะเป็นการช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าโดยใช้ TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจำลองการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทซิงโครนัส กำลังการผลิตติดตั้ง 5 เมกกะวัตต์ เข้ากับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ แบ่งแบบจำลองออกเป็น 3 สถานะ คือ 1. ระบบจำหน่ายพื้นฐาน 2. ระบบจำหน่ายพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ 3. ระบบจำหน่ายพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว และ TCSC ติดตั้งอยู่ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำหน่าย โดยใช้โปรแกรม DIGSILENT แบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณี 1 เป็นการวิเคราะห์

ผลกระทบต่อค่ากระแสลัดวงจร เพื่อการจัดลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันต่างๆ ให้สัมพันธ์กัน ส่วนกรณี 2 และ 3 เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้า รวมถึงพิจารณาถึงค่าระยะเวลา ลัดวงจรวิกฤต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและพฤติกรรมของอุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) และนำเสนอแบบจำลอง TCSC ในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากการลัดวงจร

1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

## 1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อถูกรบกวนจากการลัดวงจร จะส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแตกต่างกัน

1.3.2 หลังติดตั้ง TCSC เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ติดตั้งอยู่ เมื่อถูกรบกวนจากการลัดวงจร จะส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแตกต่างกัน

1.3.3 การรบกวนระบบจากการลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่างกัน จะส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแตกต่างกัน

## 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 วิเคราะห์หลักการทำงานและพฤติกรรมของ TCSC พร้อมทั้งสร้างแบบจำลอง TCSC ในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4.2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากการลัดวงจร

1.4.3 วิเคราะห์การควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว



## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษารายละเอียดของวิทยานิพนธ์จากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.5.2 ศึกษาหลักการทํางานและพฤติกรรมของ TCSC

1.5.3 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.5.4 สร้างแบบจำลอง TCSC ระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม DIgSILENT Powerfactory

1.5.5 วิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากการลัดวงจร

1.5.6 วิเคราะห์การควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทํางานของรีเลย์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

1.5.7 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

1.5.8 จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## 1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ จะศึกษาถึงการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทํางานของรีเลย์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยมีข้อจำกัดในการศึกษาดังนี้

1.6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ใช้ศึกษา เป็นเครื่องกำเนิดประเภทซิงโครนัส ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 5 เมกกะวัตต์

1.6.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นแบบเรเดียล ที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์

1.6.3 ข้อมูลโหลดในระบบจำหน่ายที่ใช้ศึกษา เป็นระบบสามเฟสแบบสมดุล และมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงหลักการทํางานและพฤติกรรมของ TCSC

1.7.2 สามารถสร้างแบบจำลอง TCSC ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม DIgSILENT Powerfactory

1.7.3 เข้าใจถึงผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากการลัดวงจร

1.7.4 เข้าใจถึงการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่มีผู้ทำการวิจัยไว้แล้ว และมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง สอดคล้องกับงานวิจัยที่กำลังศึกษาอยู่ ทั้งในส่วนที่เป็นงานวิจัยขององค์กรต่างๆ และผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสถาบันต่างๆ ที่ได้ดำเนินการไปแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาปรับปรุง พัฒนาการดำเนินการวิจัยให้เกิดประสิทธิภาพ โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในลำดับต่อไปนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภาธร มีนาบุญ [1] วิเคราะห์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อต่อร่วมกับผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายย่อย” โดยศึกษาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลง ความถี่ของเครื่องกำเนิดเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และวิธีแก้ไขปัญหา การแกว่งแบบ Local Plant Mode และ Inter Area Mode ของกำลังไฟฟ้าให้ลดลงอยู่ในค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ยังไม่ได้นำถึงผลการทบทวน Line-coordination ของรีเลย์ Generator ของผู้ใช้ไฟ

อมร อ้นกรอง [2] วิเคราะห์การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น FACTs ในสถานะ Transient เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพด้านแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองตามมาตรฐาน IEEE14 บัส ในโปรแกรม PSAT แต่ยังไม่ได้นำถึงการศึกษาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Saeed lahdi and Loi Lei Lai [3] ศึกษาผลกระทบของ TCSC ที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลอง IEEE14 บัส ที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้า และการส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่ง TCSC ที่ต่ออยู่ในระบบมีผลทำให้รีเลย์ป้องกันทำงานผิดพลาดได้ แต่ยังไม่ได้ทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ภาธร มีนาบุญ [4] ศึกษาและวิเคราะห์การแกว่งของระบบไฟฟ้าโดยการประมวลผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสองแบบซึ่งในแบบ Local Plant Mode โดยการทดสอบการเปิดและกลับเบรกเกอร์ที่สถานีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและที่บัสของเครื่องกำเนิดพบการแกว่งความถี่ต่ำประมาณ 1.68 Hz ใช้เวลาประมาณ 1.85 วินาที ซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่การไฟฟ้ากำหนดและการจำลองรูปแบบการต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องระหว่างพื้นที่ Inter Area Mode สมมุติให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เกิดการถ่ายเทกำลังไฟฟาระหว่างพื้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ประมาณ 0.3 Hz ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์การแกว่งของ

กำลังไฟฟ้าบ่งบอกถึงคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะมีผลต่อการผลิตผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ยังไม่ได้ทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Galu Papy Yuma [5] ใช้การควบคุมโดย FACTS เป็นการเพิ่มความสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าการแกว่งระบบไฟฟ้าและการควบคุมแรงดันที่บัสเป็นตัวชดเชย โดยใช้วิธีการ SVC , STATCOM ในการควบคุมการแกว่งในระบบ IEEE 14 บัส ระบบมาตรฐาน IEEE 14 ได้รับการสร้างแบบจำลองและจำลองการใช้ Simulink ของ MATLAB ผลการจำลองของ IEEE 14 บัสโดยไม่ต้องควบคุมและรวมกับ SVC-PID และ SVCS TATCOM ได้รับการนำเสนอ สามารถเห็นได้ว่าการใช้ควบคุมการนำเสนอ (SVC -STATCOM) มีการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันและคุณภาพไฟฟ้าผลการจำลองเป็นสอดคล้องกับการคาดการณ์ แม้ว่า SVC และ STATCOM ทำงานบนหลักการที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันสามารถเทียบเคียง ปัญหาดังกล่าวเป็นความสูญเสียค่าต้องถูกตรวจสอบสำหรับความถูกต้องที่เหมาะสม

P.K. Iyambo [6] การศึกษาบทความนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัสโดยใช้โปรแกรม (Matlab Power System Toolbox , PST) โดยการเกิดสามเฟสสภาวะความผิดปกติในระบบที่แตกต่างในสถานที่ วิเคราะห์ผลกระทบในการเกิดสภาวะผิดปกติที่สำคัญที่เวลาเสถียรภาพในระบบ ซึ่งเสถียรภาพจะพิจารณาได้จากสมการการแกว่งที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วิธีการดีเทอร์มิแนนต์เมทริกซ์ในการเชื่อมต่อ  $F_{\text{fault}}$  และ  $Y_{\text{postfault}}$  หลังจากเกิดสภาวะผิดปกติแล้ว โดยการเปรียบเทียบระหว่างของการเกิดสภาวะผิดปกติสองพื้นที่ โดยดูจากผลกระทบของการเกิดสภาวะผิดปกติของบัสเครื่องกำเนิดและเสถียรภาพ ดังนั้นขอแนะนำให้ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าต้องทำตรวจสอบที่เหมาะสมกับการออกแบบโดยคำนึงถึงการชั่วคราวเสถียรภาพในขณะที่มันเป็นด้านที่ย่างยากมากที่สุดในระบบไฟฟ้าออกแบบ

R.M. Chabanloo [7] ศึกษาลำดับการทำงานในสภาวะ Transient ของ overcurrent relay เนื่องจากพฤติกรรม DG และ FCL (fault current limiter) ในระบบจำหน่าย พบว่าเมื่อมี DG ต่อเข้ากับระบบแล้ว จะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรเปลี่ยนไป ส่งผลให้ overcurrent relay ทำงานผิดพลาด ซึ่งการต่อ FCL ในระบบ สามารถแก้ไขปัญหาค่าความผิดพลาดของ overcurrent relay ได้ แต่ยังไม่ได้ใช้ TCSC เป็นอุปกรณ์จำกัดค่ากระแสลัดวงจร

Mojtaba KHEDERZADEH [8] ศึกษาปัญหาที่เกิดจากผลกระทบของค่ากระแสลัดวงจร ต่อการทำงานของ overcurrent relay ในระบบจำหน่าย ก่อนและหลังมี DG ในระบบจำหน่าย โดยทดลองประยุกต์ต่อ TCSC เข้าในระบบจำหน่าย เพื่อทำหน้าที่เสมือน FCL พบว่าสามารถลดกระแสลัดวงจร

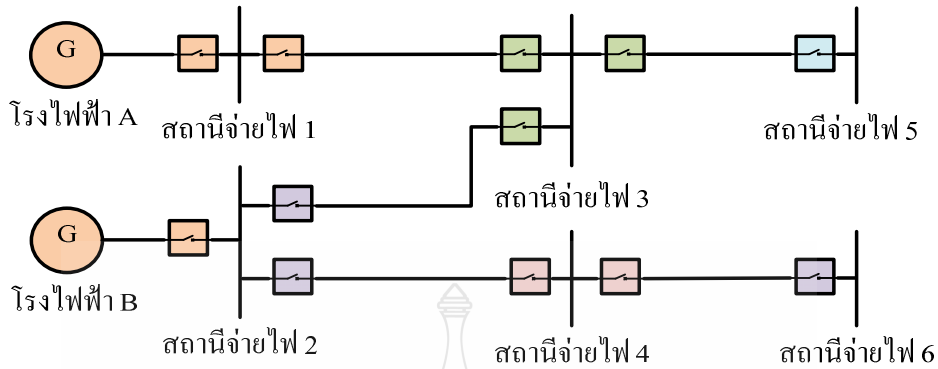
ลงได้ ใกล้เคียงกับก่อนที่จะมี DG ในระบบ ทำให้ overcurrent relay สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง แต่ยังไม่ได้นำ TCSC มาใช้ในการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้า

## 2.2 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Systems)

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า [9] เป็นระบบที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างมาจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าผ่านมายังระบบส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อแยกการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดผู้ใช้ไฟ มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ สถานีไฟฟ้าทำหน้าที่ปรับลดแรงดันก่อนส่งจ่ายไปยังผู้จ่ายไฟ โดยส่วนใหญ่แล้วระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าครอบคลุมทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทูติยภูมิ รวมถึงระดับแรงดันสูงสุด สำหรับประเทศไทยจะกำหนดแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 115 กิโลโวลต์ รูปแบบของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลักคือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดิน และระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดิน การเลือกใช้ระบบใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ความปลอดภัย สิ่งแวดล้อมและความสวยงาม เป็นต้น แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปในประเทศไทยจะเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าระบบจำหน่ายแบบใต้ดินมาก แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีบ้านเรือนหนาแน่น กรณีต้องเดินสายไฟข้ามแม่น้ำหรือภายในนิคมอุตสาหกรรม นิยมใช้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเพราะสายใต้ดินเป็นสายที่มีฉนวนหุ้ม ยังมีความปลอดภัยและความมั่นคงสูงกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินในอากาศ

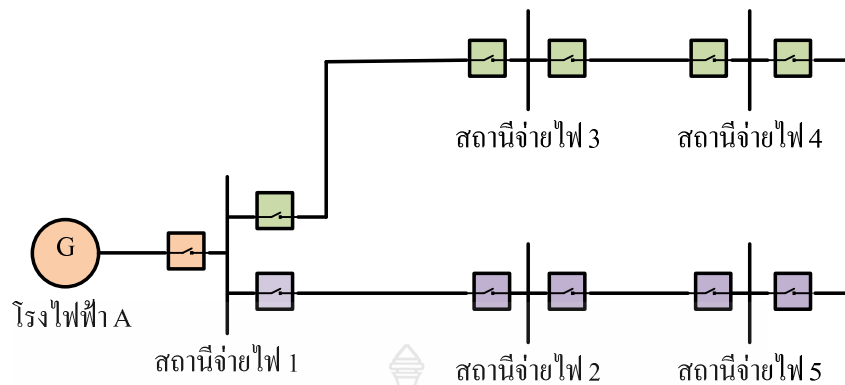
ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ดีต้องมีการวางแผนการก่อสร้างระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยคำนึงถึงองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้า ชนิดของวงจรการจ่ายไฟ ตลอดจนความเหมาะสมในการใช้งานในแต่ละพื้นที่ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำรูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าอยู่ 2 แบบ คือ

2.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial Distribution Systems) เป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดที่มีการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านสายจำหน่ายเพียงด้านเดียว โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากสถานีไฟฟ้าไปยังโหลดภาระการใช้งาน การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายแบบลูปได้ หรือระบบจำหน่ายแบบร่างแหต่อไปได้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือในชนบท เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทที่ลงทุนต่ำ มีการป้องกันระบบง่าย ๆ และลักษณะของการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ลักษณะของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

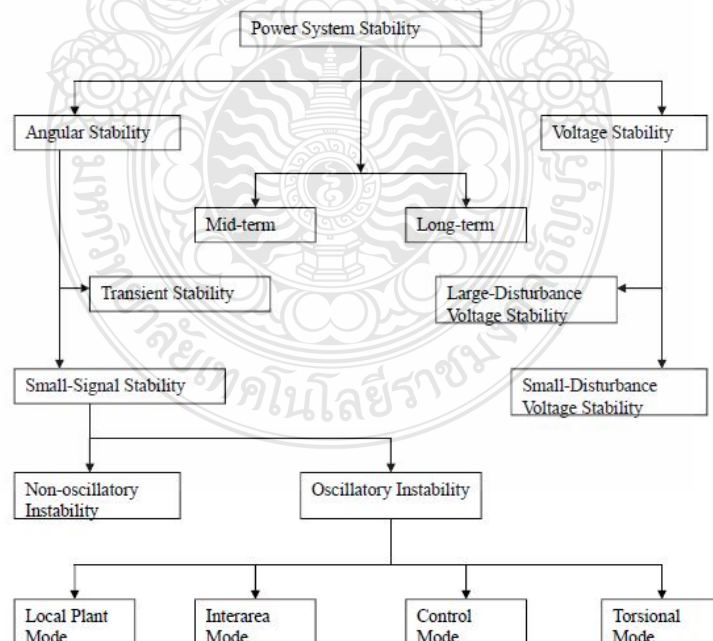
2.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป (Loop Distribution Systems) เป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงให้กับระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า เป็นระบบที่มีการจ่ายไฟเข้าที่ต้นทางและปลายทางโดยสถานีจ่ายไฟฟ้าแห่งเดียวกัน โดยผู้ใช้ไฟจะสามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าหนึ่งทาง ระบบจำหน่ายแบบนี้ในการใช้งานจริงบางครั้งจะเปิดวงจรออกทำให้ระบบเป็นวงจรจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลก็ได้ การกระทำเช่นนี้จะทำการป้องกันระบบนั้นทำได้ง่ายขึ้น ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูปนี้สามารถนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชนขนาดใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ข้อดีของระบบนี้คือ เมื่ออุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดเกิดขัดข้องก็สามารถทำการตัดส่วนนั้นออกไปและวงจรส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าต่อไปได้อีก ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือได้สูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ข้อเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูปคือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะกระทำได้โดยผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้าเพียงสถานีเดียว ดังนั้นถ้าเกิดการขัดข้องขึ้นภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า ย่อมทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นระบบป้องกันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบลูป ก็ยังต้องมีขีดความสามารถสูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล เนื่องจากระบบป้องกันต้องตรวจสอบให้ทราบว่าการลัดวงจรขึ้นที่อุปกรณ์ตัวใด เพื่อที่จะได้ตัดอุปกรณ์ส่วนนั้นออกจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดใดหลดที่ไม่ได้รับผลกระทบต่อการเกิดขัดข้องของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ลักษณะของระบบไฟฟ้าแบบลูป แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบลูป

### 2.3 ความเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability)

เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นในระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพย่อมสามารถทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ได้ เสถียรภาพในระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เสถียรภาพการเคลื่อนที่เชิงมุม เสถียรภาพแรงดัน และเสถียรภาพระยะกลางและระยะยาว ซึ่งผลของปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นนี้จะเกิดปัญหาต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ [10]



รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.3.1 ความเสถียรภาพทางมุม (Angle Stability) จุดสมดุลระหว่างกำลังบิดทางกล (Mechanical torque) และกำลังบิดทางไฟฟ้า (Electrical torque) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วคงที่ ถ้าสภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกรบกวนจุดสมดุลก็จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้อัตราเร่งของมุม โรเตอร์ (Rotor Angle) เพิ่มขึ้นหรือลดลงและถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหมุนเร็วกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง มุมโรเตอร์เทียบกับแกนโรเตอร์ของเครื่องนั้นจะมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนช้ากว่า ความแตกต่างของมุมนี้เป็นผลให้ภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช้าจะย้ายไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เร็วซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-มุมโรเตอร์ (Power angle relationship) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ส่งผลให้ลดความแตกต่างของความเร็วและมุมที่แยกออกจากกันการเพิ่มขนาดของมุมที่แยกออกจากกันนี้เกิดขึ้นจากความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าลดลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-มุม และยังเพิ่มความแตกต่างของมุมที่แยกออกจากกัน เสถียรภาพของระบบจะยิ่งลดลง ดังนั้นกล่าวได้ว่าเสถียรภาพของระบบจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของมุมที่แยกกันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด โดยขึ้นอยู่กับจุดทำงานของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ และถ้าค่ามุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ก็จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสูญเสียสภาพซิงโครไนส์และทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบไฟฟ้า การสูญเสียสภาพซิงโครไนส์ในระบบไฟฟ้าสามารถเกิดได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวหรือหลายเครื่องก็ได้ จะกลับมาสู่สภาพซิงโครไนส์ใหม่ได้ด้วยการขนานเข้าสู่ระบบอีกครั้ง การทำงานของระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมกัน สามารถเปรียบได้กับการที่มีรถหลาย คัน วิ่งเกาะกลุ่มกันไป โดยรถแต่ละคันจะเชื่อมต่อกันด้วยสายที่ยืดหยุ่นได้หรือ Rubber band โดยเปรียบเสมือนได้กับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายที่ยืดหยุ่นได้เปรียบเหมือนสายส่ง เมื่อรถทุกคันวิ่งด้วยความเร็วเท่ากัน สายที่ยืดหยุ่นได้ก็จะอยู่ในภาวะที่คงที่ แต่ถ้ามีแรงมากระทำ ที่รถคันหนึ่งทำให้ความเร็วของรถเพิ่มขึ้นชั่วขณะสายที่ยืดหยุ่นได้ที่ต่อกับรถคันนี้ก็จะยืดออกจากคันอื่นทำให้รถที่ถูกแรงมากระทำจะช้าลงส่วนรถที่ต่ออยู่จะเร็วขึ้น ลักษณะนี้จะเกิดต่อเนื่องเป็นลูกโซ่กับรถทุกคัน จะกระทั่งความเร็วของรถทั้งหมดกลับสู่ปกติ ถ้าแรงที่มากระทำทำให้สายที่ยืดหยุ่นได้รับแรงมากเกินไปจนขาด รถก็จะแยกออกจากกลุ่ม เสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แยกออกจากระบบไฟฟ้านั่นเอง แต่ถ้าสายที่ยืดหยุ่นได้มีความยืดหยุ่นมากเกินไป รถที่ต่อเชื่อมอยู่ก็จะมีอาการแกว่งรอบความเร็วของรถหรือถ้าวิเคราะห์จากปริมาณกำลังบิดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยกำลังบิดซิงโครไนส์ (Synchronizing torque) และกำลังบิดการหน่วง (Damping torque) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ



$$\Delta T_e = T_S \Delta \sigma + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

เมื่อ

$\Delta T_e$  = กำลังบิดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง

$T_S \Delta \sigma$  = กำลังบิดเชิงโครโมสเป็นค่ากำลังบิดในเฟสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุม

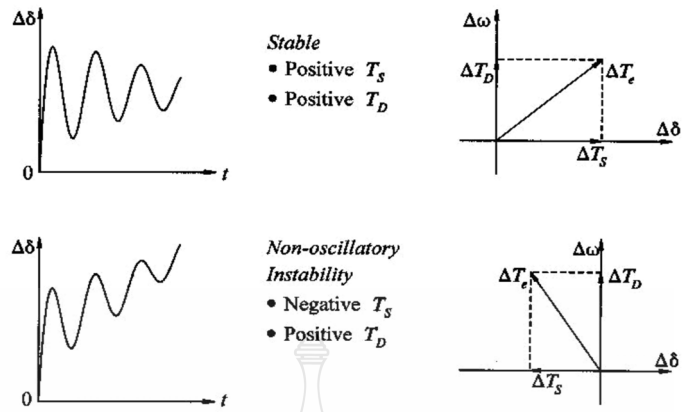
โรเตอร์  $\Delta \delta$

โดยที่  $T_S$  เรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลังบิดเชิงโครโมส

$T_D \Delta \omega$  = กำลังบิดการหน่วงเป็นค่ากำลังบิดในเฟสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว  $\Delta \omega$  โดยที่

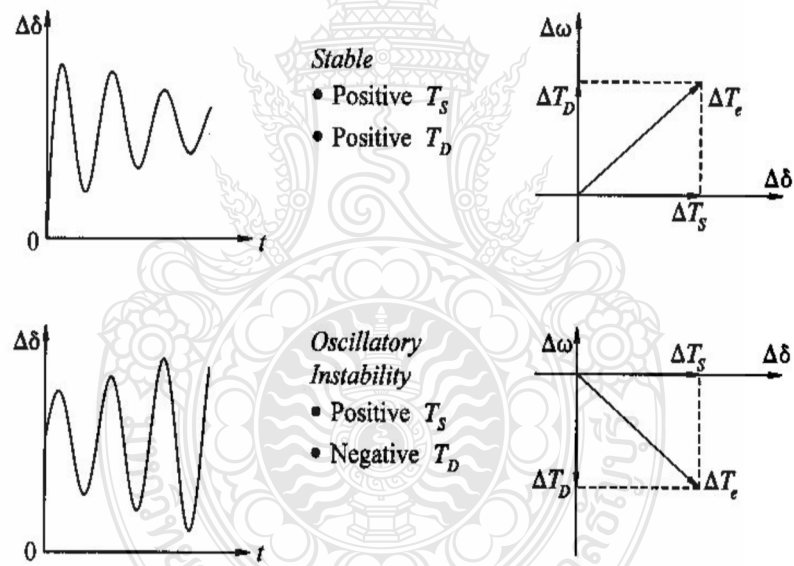
$T_D$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์กำลังบิดการหน่วง (Damping torque coefficient)

ถ้าระบบขาดกำลังบิดเชิงโครโมสหรือมีค่า  $T_S$  เป็นลบจะทำให้มุมโรเตอร์มีอัตราเร่งเพิ่มขึ้นจนสูญเสียสภาพเชิงโครโมส และถูกปลดออกจากระบบในที่สุดทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ส่วนการขาดกำลังบิดการหน่วงหรือมีค่า  $T_D$  ก็จะเป็นผลทำให้เมื่อเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขึ้นจะไม่สามารถลดขนาดการแกว่งที่เกิดขึ้นได้จนทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพในที่สุดในระบบไฟฟ้าโดยปกติลักษณะของการรบกวนขนาดเล็กจะขึ้นอยู่กับค่าการทำงานเริ่มต้น, ความยาวสายส่ง ชนิดของระบบกระตุ้น (Excitation) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกันอยู่นั้น ถ้าระบบไม่มีตัวปรับเปลี่ยนแรงดัน (Voltage regulator) หรือมีค่าแรงดันสนามคงที่ (Constant field voltage) การสูญเสียเสถียรภาพของระบบเป็นผลเนื่องมาจากการขาดกำลังบิดเชิงโครโมสไม่ได้เกิดจากการแกว่งเนื่องจากขาดกำลังบิดการหน่วง ซึ่งจะเรียกการสูญเสียเสถียรภาพในลักษณะนี้ว่า Non-Oscillatory Instability ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 แต่ถ้ามีการควบคุมการกระตุ้น (Excitation control) ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของระบบจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากการขาดกำลังบิดการหน่วงในระบบทำให้เกิดการแกว่งที่มีการเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเรียกการสูญเสียเสถียรภาพในลักษณะนี้ว่า Oscillatory Instability แสดงดังรูปที่ 2.5



(a) With constant field voltage

รูปที่ 2.4 ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีค่าแรงดันสนามไฟฟ้าคงที่



(b) With excitation control

รูปที่ 2.5 ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมการกระตุ้น

ในระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กนี้เป็นปัญหาที่ส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากการขาดการหน่วงของการแกว่งในระบบนั่นเองหรือเรียกว่าระบบเกิดการแกว่งนั่นเอง ซึ่งเสถียรภาพของการแกว่งนี้สามารถแบ่งตามความถี่ได้เป็น 4 ลักษณะด้วยกัน ดังนี้

2.3.1.1 โหมดพื้นที่เดียวกัน (Local mode) เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกันตอบสนองโต้ตอบกันกับระบบที่เหลือซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ความถี่ที่เกิดอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 2.0 Hz

2.3.1.2 โหมดระหว่างพื้นที่ (Inter-Area mode) เป็นการแกว่งจากการโต้ตอบของกลุ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลุ่มหนึ่งกับกลุ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลุ่มอื่นๆ ในระบบ การแกว่งแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโหมดพื้นที่เดียวกัน ความถี่จะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 Hz

2.3.1.3 โหมดควบคุม (Control mode) เกิดจากการปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมในระบบที่ไม่เหมาะสมเช่น ตัวควบคุมความเร็ว (Speed Governor) หรือ ตัวชดเชยวาล์วสถิต (SVC) เป็นต้น

2.3.1.4 โหมดเชิงความบิด (Tensional mode) เป็นการแกว่งที่เกิดขึ้นที่แกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกังหัน ความถี่จะอยู่ในช่วงความถี่ซับซิงโครนัส

2.3.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) บางครั้งเรียกว่า เสถียรภาพโหลดความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจาก เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่ลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจาก การสูญเสียที่โหลดหรือการสูญเสียในสายส่ง เสถียรภาพแรงดันแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

2.3.2.1 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนกับระบบอย่างรุนแรง (Large Disturbance Voltage Stability) คือระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้า เมื่อเกิดการรบกวนกับระบบอย่างรุนแรง เช่นการเกิดความผิดปกติในระบบ (Faults) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบตัวใดตัวหนึ่งเสียหาย

2.3.2.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนเพียงเล็กน้อย (Small Disturbance Voltage Stability) คือระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการรบกวนหรือมีความผิดปกติในระบบเพียงเล็กน้อย เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

2.3.3 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Stability) เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กนั้นจะเป็นความสามารถของระบบจะคงอยู่ได้ เมื่อระบบเจอสัญญาณขนาดเล็กในบางครั้งเสถียรภาพแบบนี้จะเรียกว่า “เสถียรภาพสภาวะคงตัว (Steady state stability) เพราะว่าเสถียรภาพชนิดนี้จะพิจารณาในช่วงที่ระบบทำงานในสภาวะผิดปกติ แต่เนื่องจากการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็กต่างดังนั้นการวิเคราะห์อาจใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นได้ การขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น

เนื่องจาก 2 สาเหตุ คือ การเพิ่มขึ้นเรื่อยๆของมุมโหลดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีแรงบิดเพียงพอ และการแกว่งของโรเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงบิดหน่วงน้อยเกินไป

2.3.3.1 สมการการแกว่ง (Swing Equation) โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนเร็วขึ้นหรือช้าจะมีผลกระทบต่อดังกล่าว (Synchronously Rotating Air Gap MMF) ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร่งและมีการเคลื่อนที่แบบพลวัต (Dynamic mutation) ที่เกิดขึ้นเรียกสมการการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า สมการการแกว่งในระบบกำลังไฟฟ้า (Swing Equation) และที่สภาวะคงตัว (Study State Condition) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยที่ไม่คิดค่าสูญเสียภายในเครื่องกำเนิดจะพบว่าระบบฟ้าจะสมดุลเมื่อแรงบิด (Torque) ทางกลจะเท่ากับทางกำลังไฟฟ้างสมการ

$$T_e = T_m \quad (2.2)$$

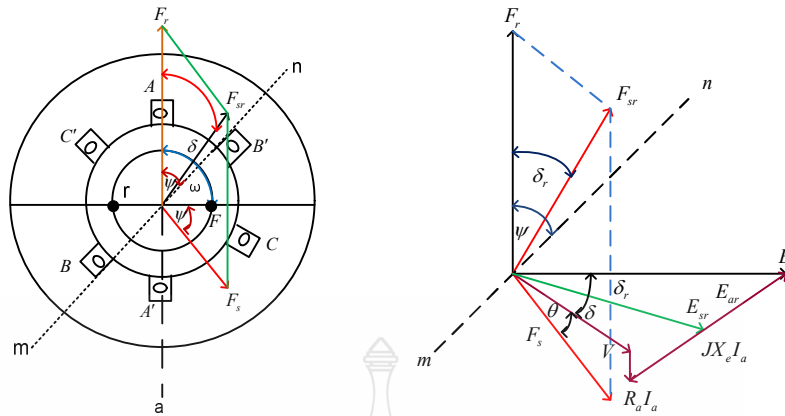
เมื่อมีการรบกวนในระบบจะพิจารณาแล้วพบว่า  $T_e \neq T_m$  ขึ้นอยู่กับลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นและมีแรงบิดที่อัตราเร่ง (Accelerating Torque,  $T_a$ ) เกิดขึ้นที่บนโรเตอร์ แบ่งเป็น Accelerating ( $T_e < T_m$ ) และ Decelerating ( $T_e > T_m$ ) ดังสมการที่ 2.3

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

และจัดอยู่ในรูปของสมการความเฉื่อย (Moment of Inertia) ดังในสมการที่ 2.4

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} T_a = T_m - T_e \quad (2.4)$$

เมื่อ  $J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ Prime Mover และ Generator และ  $\theta_m$  มุมแกนเคลื่อนที่ของโรเตอร์โดยอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์



รูปที่ 2.6 เวกเตอร์ของแกนโรเตอร์ภายใต้สภาวะปกติมุมทางไฟฟ้าจะคงที่

เมื่อความเร็วของสเตเตอร์มีความสัมพันธ์กับโรเตอร์การวัดมุมของโรเตอร์จะเทียบกับแกนอ้างอิง โดยที่ความเร็วเชิงโคจรนั้นเขียนความเร็วดังสมการที่ 2.5

$$\theta_m = \omega_{sm} + \delta_m \quad (2.5)$$

เมื่อ

$\theta_m$  คือ ความเร็วเชิงโคจรของเครื่องจักรกลมีหน่วยเป็น (rad/s)

$\delta_m$  คือ มุมของการเคลื่อนที่ (Angular Displacement) ของโรเตอร์เทียบแกน

อ้างอิงก่อนเกิดการ

รบกวนที่เวลา ( $t=0$ ) และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ดังสมการที่ 2.6

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{mst} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.6)$$

โดยอัตราเร่งของโรเตอร์หาได้ดังสมการ 2.7

$$J\omega_m = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.7)$$

ถ้าค่า  $M$  ไม่คงที่ความเร็วของโรเตอร์  $\omega_m$  เบี่ยงออกจากความ  $\omega_{sm}$  แต่ในทางปฏิบัติค่าของ  $\omega_m$  จะไม่ต่างจาก  $\omega_{sm}$  มากนักเมื่อเครื่องทำงานที่สภาวะคงที่ ก่อนจะสูญเสียเสถียรภาพซึ่งสามารถสมมติให้  $\omega_m = \omega_{sm}$  จะได้สมการที่ 2.8

$$M = \frac{2W_k}{\omega_n} \quad (2.8)$$

และยังสามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในค่าเทมของค่ามุมกำลังไฟฟ้า (Electrical Power Angle,  $\delta$ ) โดยที่  $\sigma = \frac{\rho}{2} \delta_m$  และ  $\omega = \frac{\rho}{2} \omega_m$  เมื่อ  $\rho$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเขียนได้ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{\rho}{2} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

สามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในรูป PU. ได้เป็นสมการที่ 2.10

$$\frac{\rho}{2} \frac{2wk}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $S_B$  คือ ค่าฐานกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติจะบ่งบอกเป็นค่าคงที่  $H$  นิยามว่า

$$H = \frac{\text{Kinetic Energy in MJ at Rated Speed}}{\text{Machine Rating in MVA}} = \frac{W_k}{W_B}$$

$$\text{แทนค่า } \omega_{sm} = \frac{\rho}{2} \omega_m$$

$$\frac{\rho}{2} \frac{2H}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(PU) - P_e(PU) \quad (2.11)$$

$$\frac{2H}{\pi f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(PU) - P_e(PU) \quad (2.12)$$

และวิเคราะห์มุม  $\delta$  ในรูปแบบขององศาทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังสมการ  
ที่ 2.13

$$\frac{H}{180 f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

จากกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดแปลงสภาพมาได้จากกำลังทางกล จึงเขียน  
สมการการแกว่งนี้ได้เป็น

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin \delta \quad (2.14)$$

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 (\delta_o + \Delta \delta)}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin (\delta_o + \Delta \delta) \quad (2.15)$$

สำหรับค่าเริ่มต้นก่อนมีการรบกวน คือ

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin \delta_o \quad (2.16)$$

ดังนั้นสมการข้างบนเฉพาะส่วนของมุม โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็น

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_{\max} \cos(\delta_o) \Delta \delta \quad (2.17)$$

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_s \Delta \delta = 0 \quad (2.18)$$

สมการที่ 2.17 และ 2.18 เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งคำตอบของสมการนี้ขึ้นอยู่กับรากของสมการเอกลักษณ์ (Characteristic equation) เขียนสมการได้เป็น

$$S^2 = -\frac{\pi f_o}{H} P_s \quad (2.19)$$

หาก  $P_s$  มีค่าเป็นลบ รากของสมการที่อยู่ด้านขวาของ  $S$ -plane ผลตอบสนองของระบบนี้จะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกโพเนนเชียลและระบบอาจขาดเสถียรภาพ แต่ถ้าหาก  $P_s$  มีค่าเป็นบวก ได้รากที่สองของสมการสองตัวอยู่บนแกน  $j - \omega$  จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพอยู่ขอบ โดยระบบจะตอบสนองเป็นแบบแกว่งไปมาโดยไม่มีการหน่วงต่ออย่างได้ ระบบจะสั้นที่ความถี่โดยธรรมชาติ

$$P_d = D \frac{d\delta}{dt} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $D$  เป็นสมประสิทธิ์การหน่วง ซึ่งอาจหาค่าได้ซึ่งอาจหาค่าได้จากการออกแบบเครื่องกลหรือการทดสอบ ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์กำลังเชิงโครโนซ์มีค่าเป็นบวกผลของกำลังการหน่วงนี้จะส่งผลให้การแกว่งของระบบหายไปในที่สุด ซึ่งระบบจะเข้าสู่สภาวะปกติและทำงานอยู่ที่จุดมุมโหลดหยุดนิ่งลักษณะเช่นนี้จะถือว่าระบบเสถียรภาพถ้าหากมีการหน่วงเข้ามาสมการเขียนได้เป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_o}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_o}{H} P_s \Delta\delta \quad (2.21)$$

หรือในแบบมาตรฐานสมการอนุพันธ์อันดับสองเป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n^2 P_s \Delta\delta = 0 \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\omega_n$  เป็นความถี่ธรรมชาติของการสั้น และ  $\zeta$  เป็นอัตราส่วนของการหน่วงเขียนได้เป็น



$$\zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_o}{HP_2}} \quad (2.23)$$

จากสมการเอกลักษณะ

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (2.24)$$

เชิงซ้อน

สภาวะรอบทำงานปกติงานปกติค่า  $\zeta < 1$  และรากที่สองของสมการจำนวน

$$\begin{aligned} S_1, S_2 &= -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \\ &= -\zeta\omega_n \pm j\omega_d \end{aligned} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\omega_d$  เป็นค่าความถี่ของการสั่นที่ถูกหน่วงไว้เขียนได้เป็น

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.26)$$

สำหรับระบบที่มีค่าการหน่วงเป็นบวก ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์กำลังซิงก์โครไนต์  $P_s$  มีค่าเป็นบวกแล้ว ค่ารากของสมการเอกลักษณะจะมีจำนวนค่าจริงเป็นลบ ซึ่งถือว่าระบบเสถียรภาพจากสมการที่ 2.21 เขียนอยู่ในรูปตัวแปรสถานะ (State variable) จะทำได้สะดวกขึ้นเมื่อการวิเคราะห์จำนวนมากขึ้น

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta\delta \quad \text{และ} \quad x_2 = \Delta\dot{\delta} = \dot{\Delta\delta} \\ \dot{x}_1 &= x_2 \quad \text{และ} \quad \dot{x}_2 = -\omega_n^2 x_1 - 2\zeta\omega_n x_2 \end{aligned}$$

จัดสมการอยู่ในสมการเมทริกต์

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

หรือ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

สมการที่ 2.28 และ 2.29 เป็นสมการตัวแปรสถานะธรรมชาติ (Unforced state variable) หรือสมการสถานะโฮโมจีนียส เป็นตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นการตอบสนองที่ต้องการเวกเตอร์เขียนได้เป็น

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

หรือ

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.31)$$

เมื่อแปลงลาปลาซของสมการที่ 2.27 จะได้สมการที่ 2.32

$$sX(s) - x(0) = AX(s) \quad (2.32)$$

$$X_s = \frac{\begin{bmatrix} s+2\zeta\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.33)$$

เมื่อโรเตอร์ถูกรบกวนแบบทันทีทันใดด้วยมุมเล็กๆ  $\Delta\delta_0$ ,  $x_1(0)$  และ  $x_2(0) = \Delta\omega_0 = 0$

$$\Delta\delta(s) = \frac{(s + 2\zeta\omega_n)\Delta\delta_0}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.34)$$

และ

$$\Delta\omega(s) = -\frac{\omega_n^2\Delta\delta_0}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.35)$$

ทำการแปลงลาปลาซ คำตอบของการตอบสนองขณะไม่มีอินพุต (Zero-input response) จะได้

$$\Delta\delta(s) = -\frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n t + \theta) \quad (2.36)$$

$$\Delta\omega(s) = -\frac{\omega_n\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t) \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\omega_d$  เป็นความถี่ของการสั่นที่ถูกหน่วงไว้  $\theta$  หาได้จาก

$$\theta = \cos^{-1} \zeta \quad (2.38)$$

การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่หมุนไปกับความถี่เชิงโคโรนัสเป็น

$$\delta = \delta_0 + \frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1+\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} (\sin \omega_d t + \theta) \quad (2.39)$$

ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์มีค่าเป็น

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_n\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.40)$$

ค่าคงตัวในการตอบสนองนี้มีค่าเป็น

$$\tau = \frac{1}{\zeta\omega_n} = \frac{2H}{\pi f_o D} \quad (2.41)$$

สำหรับระยะเวลาที่ระบบจะเข้าที่ หรือหนึ่งนั้นจะใช้เวลาประมาณสี่เท่าของค่าคงตัว ดังนั้นเวลาการตอบสนองเป็น

$$t_s = 4\tau \quad (2.42)$$

ถ้าค่าคงตัวความเฉื่อย  $H$  มีค่าเพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงจะมีค่าลดลง จะทำให้เวลาที่ใช้สำหรับใช้ระบบนิ่งหรือสภาวะคงตัวนั้นมีค่ามากขึ้นการรบกวนของกำลังไฟฟ้า  $\Delta P$  เข้ามา

ในระบบแล้วกำลังนั้นยังคงอยู่สมการการแกว่งจะเขียนได้เป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_o}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_o}{H} P_s \Delta\delta = \frac{\pi f_o}{H} \Delta P \quad (2.43)$$

หรือในแบบมาตรฐานสมการอนุพันธ์อันดับสองเป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta\delta = \Delta u \quad (2.44)$$

เมื่อ

$$\Delta u = \frac{\pi f_o}{H} \Delta P \quad (2.45)$$

เขียนในสมการรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

หรือ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.47)$$

สมการที่ 2.47 เป็นสมการตัวแปรสถานะที่ถูกกระตุ้น หรือเรียกว่าสมการ Zero state เป็นผลตอบสนองที่เกิดที่  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นตัวที่ต้องการ แปลงลาปลาซจะได้

$$sX(s) = AX(s) + B\Delta U(s) \quad (2.48)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1} B\Delta U(s) \quad (2.49)$$

ทำการแปลงลาปลาซผกผันจะได้ผลตอบสนองแบบขั้น (Step response) เป็น

$$\Delta\delta = \frac{Au}{\omega_n^2} \left[ 1 - \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \right] \quad (2.50)$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta u}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.51)$$

นำสมการที่ 2.29 มาแทนค่าในสมการที่ 2.50 และ 2.51 พร้อมกันนำค่าเริ่มต้นเข้าไปด้วยจะได้ว่า

$$\delta = \delta_o + \Delta\delta = \frac{\pi f_o}{H\omega_n^2} \left[ 1 - \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \theta) \right] \quad (2.52)$$

ความเร็วเชิงมุมมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาทีเป็น

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega = \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.53)$$

2.3.3.2 เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) การศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวเป็นไปอย่างกว้างขวาง เพื่อจะศึกษาว่าเครื่องกำเนิดจะอยู่ในระบบได้หรือไม่เมื่อต้องเจอการรบกวนที่รุนแรงและทันทีทันใด เช่น การลัดวงจร การหยุดออกของเครื่องกำเนิดโดยระบบ การต่อเข้ากับโหลดขนาดใหญ่หรือการสูญเสียโหลดขนาดใหญ่ เป็นต้น การวิเคราะห์ลักษณะนี้จะไม่ใช้สมการแบบเชิงเส้น จะต้องใช้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น วิธีการที่ได้รับความนิยมคือ วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน (Equal-area criterion) วิธีการนี้สามารถพยากรณ์ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในเสถียรภาพหรือไม่ การศึกษาจะใช้พื้นที่เก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการหมุน กับพลังงานที่สามารถเข้ามาบรรจบว่ามีขนาดเท่ากันหรือไม่วิธีนี้จะศึกษาเครื่องกำเนิดตัวหนึ่งเท่านั้น

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ 2.54 เป็นความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเครื่องกลเทียบกับความเร็วเชิงโคจรสำหรับระบบที่มีเสถียรภาพแล้วความเร็วรอบตัวนี้จะมีค่าพลังงานเป็นศูนย์หลังจากที่เจอการรบกวนแล้ว ถ้าการมีเสถียรภาพของเครื่องกลจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.55)$$

ถ้าพิจารณาที่จุดทำงานปกติหนึ่ง หรือหนึ่งของการทำงาน  $\delta_0$  ณ จุดนี้กำลังทางกล  $P_{m0} = P_{e0}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถ้าพิจารณาในรูปนี้ซึ่งกำลังทางกลด้านเข้าไปเป็น  $P_{m1}$  เนื่องจาก  $P_{m0} > P_{e0}$  กำลังการเร่งขึ้นที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นบวก และมุมโหลดจะมีค่าสูงขึ้น พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นการเร่งนี้เป็

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{area } abc = \text{area } A1 \quad (2.56)$$

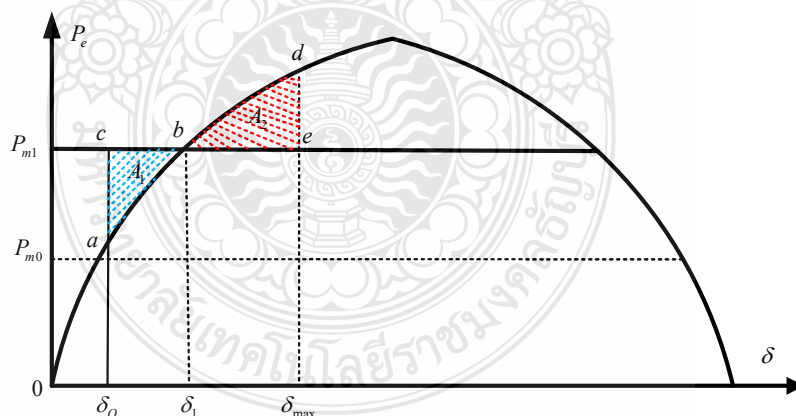
การที่มุมโหลดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อ  $\delta = \delta_1$  ทางกำลังไฟฟ้า  $P_e$  จะเท่ากับกำลังด้านทางกลด้านเข้า  $P_{m1}$  ถึงแม้ว่ากำลังการเร่งจะมีค่าเป็นศูนย์ ณ จุดนี้ แต่โรเตอร์จะมีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส เนื่องจากมุมโหลดยังสูงขึ้นไป กำลังฟ้าจะสูงขึ้นไปอีกเช่นเดียวกัน ณ ที่ ขณะ  $P_m < P_e$  จะทำให้โรเตอร์มีการเร่งลดลงซึ่งความเร็วจะลดลงจนกระทั่ง  $\delta = \delta_{max}$  ลักษณะนี้โรเตอร์จะต้องแกว่งผ่านจุด b จนกระทั่งพื้นที่เท่ากับพลังงานที่ให้กับโรเตอร์นั่นเอง สำหรับพลังงานที่ให้โดยโรเตอร์นี้หาได้จาก

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{max}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area } bde = \text{area } A2 \quad (2.57)$$

การแกว่งของโรเตอร์ผ่านจุด b จนถึงจุด  $\delta_{max}$  จะทำให้

$$|\text{area } A1| = |\text{area } A2| \quad (2.58)$$

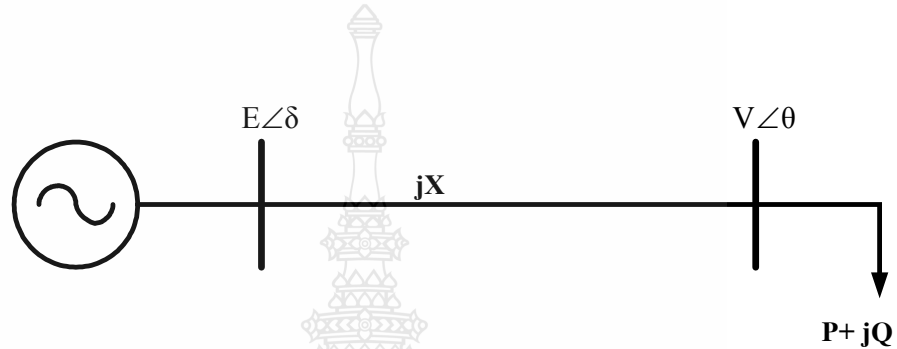
สมการนี้เรียกว่า “เงื่อนไขการเท่ากัน” (Equal Area) มุมของโรเตอร์จะแกว่งไปมาระหว่าง  $\delta_0$  และ  $\delta_{max}$  ความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์เอง การแกว่งนี้จะมีการหน่วงและเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งใหม่ที่จุด b



รูปที่ 2.7 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

## 2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส ใช้ศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจคุณลักษณะของเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า โดยที่  $E\angle\delta$  คือ แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sending End Bus),  $V\angle\theta$  คือแรงดันที่จุดต่อของโหลด (Receiving End Bus),  $jX$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสาย และ  $P+jQ$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดคงที่เขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส

เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้จากสมการที่ 2.59 และ 2.60 ตามลำดับ

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (2.59)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \delta \quad (2.60)$$

จะได้สมการกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส คือ

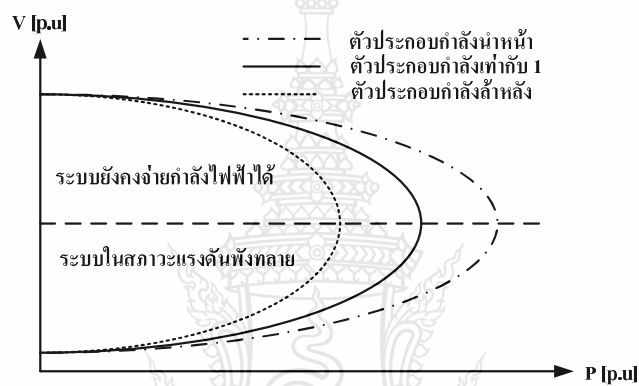
$$V^2 = \frac{PX}{E} + \left[ \frac{QX + V^2}{E} \right] \quad (2.61)$$

แรงดันที่โหลดจะมีค่าดังสมการ



$$V = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{(E^2 - 2QX)^2 - 4(P^2 + Q^2)X^2}}{2}} \quad (2.62)$$

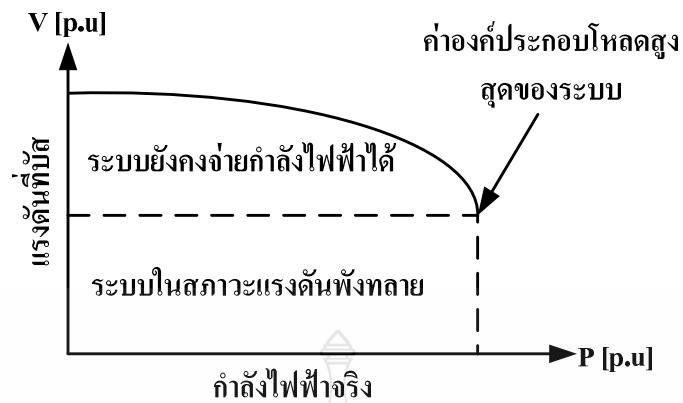
จากสมการที่ 2.62 ถ้ากำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังของโพลดคงที่ และ ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงของโพลดเปลี่ยนแปลงไป (P) เราจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่แสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังต่ำลงค่าองค์ประกอบโพลดสูงสุดของระบบจะลดลง เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าค่าองค์ประกอบโพลดสูงสุดของระบบจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลง

#### 2.4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับกำลังไฟฟ้าจริง

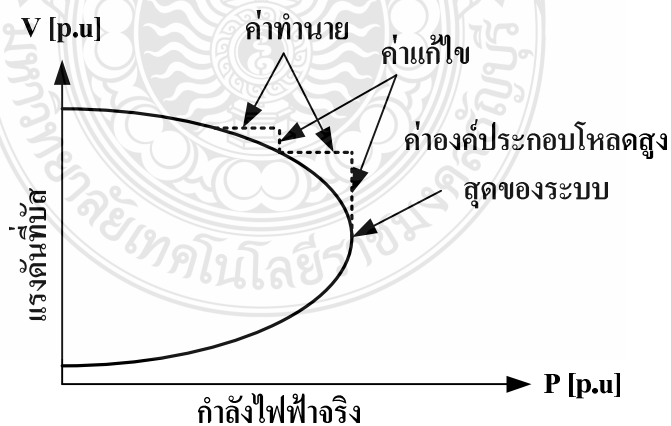
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดความสามารถของระบบในการจ่ายโพลด ที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าอยู่ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) และแรงดันที่บัส (V) ที่สนใจศึกษา



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 2.10 เป็นลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อหาขีดจำกัดของระบบไฟฟ้า กำลัง โดยการหาค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย แรงดันที่บัสจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความต้องการ โหลดเพิ่มมากขึ้น

วิธี Continuation Power Flow (CPF) คือ วิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าองค์ประกอบโพลสูงสุด วิธีการของ CPF จะทำงานเข้าไปเป็นขั้นๆ คือการทำนายค่าและการหาค่าแก้ไข ดังรูปที่ 2.11 [11]



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการคำนวณ โดยวิธี CPF

พื้นฐานบนสมการของ CPF มีลักษณะคล้ายกับการวิเคราะห์โหลดโพล้วแต่จะมีการเพิ่มโหลดคือเพิ่มค่าพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) ต่อท้ายสมการโหลดโพล้ว สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหลดสามารถเขียนสมการได้

$$\lambda K - f(\delta, V) = 0 \quad (2.63)$$

หรือ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.64)$$

เมื่อ  $K$  คือ ลักษณะของโหลด และ  $\lambda$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุด จากสมการที่ 2.64 เขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\frac{\partial f}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial f}{\partial V} dV + \frac{\partial f}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (2.65)$$

จากสมการที่ 2.65 มีตัวแปรอีกหนึ่งตัวตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ  $\lambda$  ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรมากกว่าสมการ ดังนั้นเราต้องเพิ่มสมการอีกหนึ่งสมการคือ

$$e_k \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \pm 1 \quad (2.66)$$

เมื่อ  $e_k$  คือแถวของเวกเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจะมีค่าเป็น 1 ค่าพารามิเตอร์ของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า ( $\lambda$ ) จะมีค่าเป็นบวกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในสถานะตามการเพิ่มขึ้นของโหลด แต่จะมีค่าเป็นลบเมื่อค่าของแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจากจุดที่ระบบสามารถรับโหลดได้สูงสุด

ค่าทำนาย หาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{\text{predicted}} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & & & \\ & J_{LF} & & \\ & & \vdots & K \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & [e_k] & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

และ  $\sigma$  คือ ขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการทำนายครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด  $dx_k = 1$  จะได้

$$x_k^{predicted} = x_{k0} + \sigma \quad (2.69)$$

วิธีการคำนวณหาค่าแก้ไข หาได้จากสมการ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.70)$$

$$x_k - x_k^{predicted} = 0 \quad (2.71)$$

เมื่อ  $x_k$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้

#### 2.4.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.4.2.1 การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ การเกิดแรงดันฟัลทลายมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ป้องกันด้วย ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ และมีการตัดตอนส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุดออกไป

2.4.2.2 กรณีการเกิดข้อผิดพลาดในระบบ ถ้าใช้เวลาในการตัดข้อผิดพลาดมากเกินไปจะทำให้แรงดันของระบบลดลง จนอาจทำให้เกิดสภาวะการฟัลทลายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบและการตั้งเวลาวิกฤติของระบบ จะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะแรงดันฟัลทลายเอาไว้ด้วย

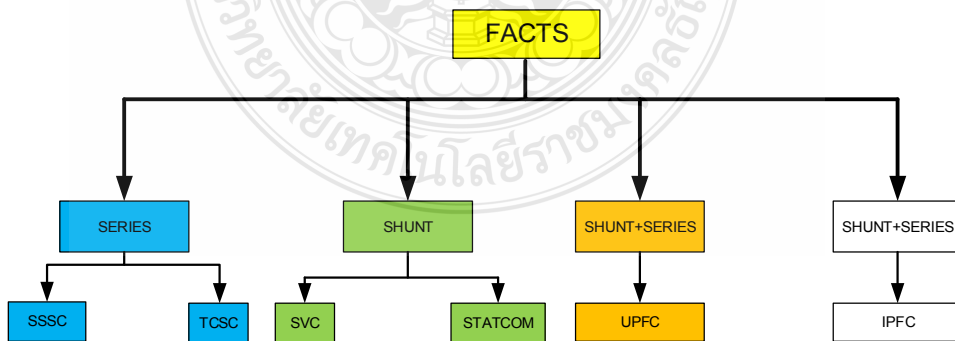
2.4.2.3 ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ กำลังไฟฟัรีแอกทีฟจากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลดเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งระหว่างการจ่าย

กำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งต้องมีปริมาณที่พอเพียง และอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแรงดันพ้ทหลาย

2.4.2.4 ปัจจัยอันเนื่องมาจากปัญหาเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง เพราะปกติการเกิดสภาวะแรงดันพ้ทหลายมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่อยู่ในสภาวะเครียดนั้นคือ ระบบมีความยืดหยุ่นต่ำอันเนื่องมาจากรายจ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรายได้ จากสภาวะทางสังคมและเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้บรรดาผู้ผลิตไฟฟ้าต่างๆ ต้องปิดโรงไฟฟ้าลง อันเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุนและปัญหาทางสังคม ส่งผลให้แหล่งจ่ายพลังงานลดลงแต่โผลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

## 2.5 อุปกรณ์ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS)

อุปกรณ์ชดเชยในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีไว้เพื่อรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น FACTS เป็นอุปกรณ์ควบคุมและชดเชยแรงดันการไหลในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีความราบเรียบและยืดหยุ่น มีการตอบสนองตอบสนองได้รวดเร็วกว่าอุปกรณ์การควบคุมแบบดั้งเดิมมาก FACTS มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม SSSC ,TCSC อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน SVC , STATCOM และอุปกรณ์ชดเชยแบบ อนุกรม-ขนาน UPFC โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และแบบต่ออนุกรม-อนุกรม IPFC ควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งชนิดของ FACTS



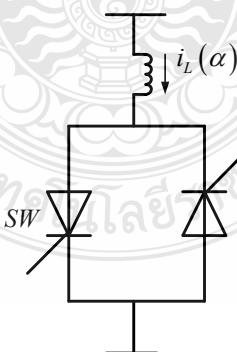
รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

2.5.1 Static Var Compensator (SVC) ตัวชดเชยระบบไฟฟ้ากำลัง ถูกใช้งานครั้งแรก ในปี 1979 โดยนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า SVC จะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายและโหลดทางไฟฟ้า เพราะสามารถจ่ายและรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบได้ และจะช่วยในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บ้ลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นซึ่ง ประกอบด้วย สวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน(Thyristor-Controlled-Reactor, TCR) และสวิตซ์ตัดต่อเหนี่ยวนำ (Thyristor-Switched Capacitor, TSC) ต่อขนานเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ



รูปที่ 2.13 ลักษณะของการติดตั้ง SVC

องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสของสวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (TCR) แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยพิจารณาจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) และใช้ไทรสเตอร์สวิตช์แบบสองทิศทาง

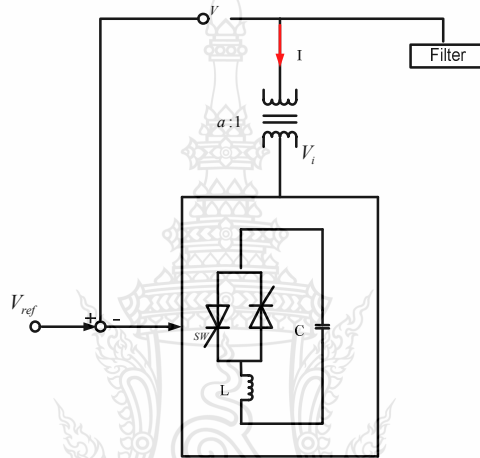


รูปที่ 2.14 สวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Thyristor-Controlled-Reactor, TCR)

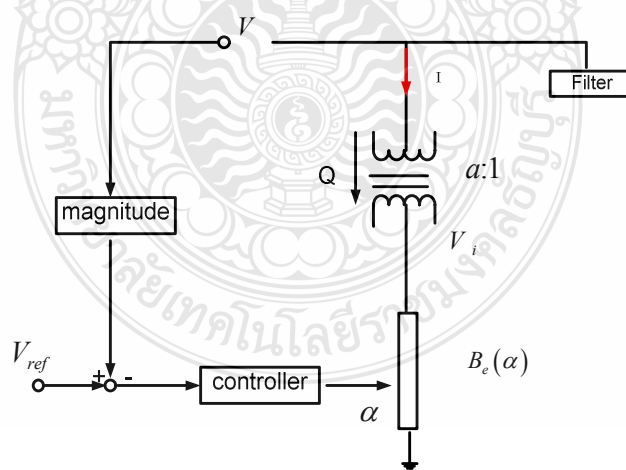
เมื่อกระแสไฟฟ้าต้านกลับสามารถควบคุมค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดถึงศูนย์ โดยใช้วิธีการโดยการควบคุมมุมให้ช้าลง

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (2.72)$$

วงจรสมมูล และแบบจำลองการควบคุมเสถียรภาพของ SVC แสดงดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

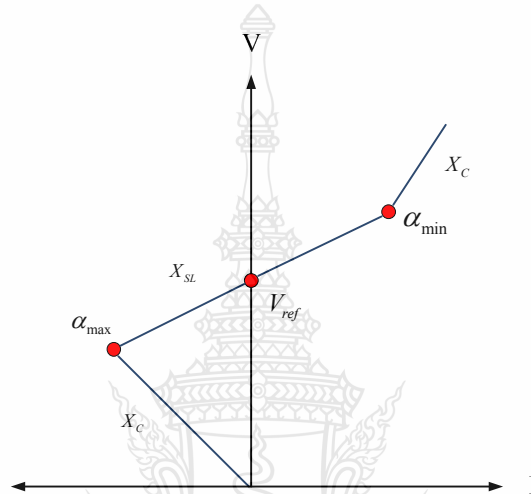


รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของ SVC



รูปที่ 2.16 วงจรแบบจำลองของ SVC

ความสำคัญของ SVC ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ รักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่ หรือ ใกล้เคียง ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ของโหลด SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์การรับหรือจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ มุมการจุดชนวนนี้จะอยู่ในช่วง  $90^\circ \sim 180^\circ$  คุณลักษณะเฉพาะของ SVC แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC

การทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ส่วนขอบเขตของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ SVC จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่จุด  $\alpha_{min}$  คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงาน โดยรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบตามพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ และที่จุด  $\alpha_{max}$  คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเก็บประจุทำงานจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ

ส่วนประกอบในการควบคุมของ SVC มีความสำคัญมากในแบบจำลองของ SVC มีสมการเชิงอนุพันธ์ ดังสมการที่ 2.73 และ 2.74

$$\begin{bmatrix} X_c \\ \alpha \end{bmatrix} = f(X_c, \alpha, V, V_{ref}) \quad (2.73)$$



$$0 = \underbrace{B_e - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L / X_C)}{\pi X_L}}_{g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e)} \quad (2.74)$$

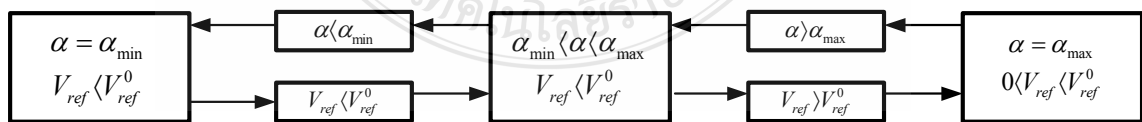
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าจะต้องกำหนดค่าให้ชัดเจน โดยที่  $X_C$  และ  $f(\cdot)$  ยังคงอยู่ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดขอบเขตของสมการยกเว้น มุมการจุดชนวน ( $\alpha$ ), โดยเฉพาะกระแส ( $I$ ), การควบคุมแรงดัน ( $V$ ) และ แรงดัน SVC ( $V_i$ ) เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ

จากสมการที่ 2.73 และ 2.74 สามารถเขียนสมการจำลองของ SVC ได้สมการใหม่คือ

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e) \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

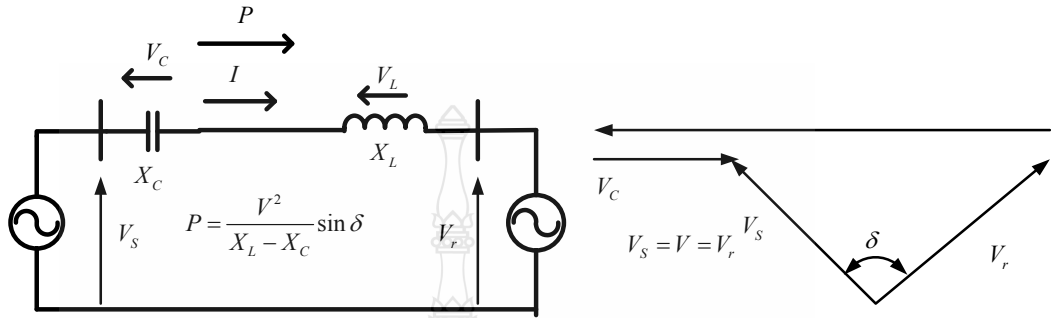
ดังนั้นเราสามารถใช้โปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในการหาขอบเขตที่เหมาะสมของมุมจุดชนวนจากสมการที่ 2.75 เป็นแสดงบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซัสเซ็ปแตนซ์ ( $B_e$ ) และมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ), กระแส ( $I$ ) และ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ ( $Q$ )

ขอบเขตของการควบคุม SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ซึ่งอยู่ในช่วง  $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$  และ  $\alpha_M$  คือ มุมจุดชนวนน้อยที่สุดและมุมจุดชนวนมากที่สุดตามลำดับ ถ้าเราไม่รู้วิธีหาขอบเขตมุมจุดชนวน ให้กำหนดมุมจุดชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขตแสดงดังรูปที่ 2.18



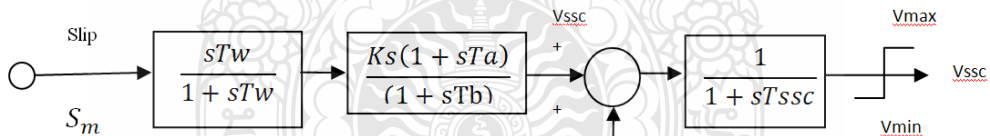
รูปที่ 2.18 ควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัว

2.5.2 Static Synchronous Series Compensator (SSSC) อุปกรณ์ SSSC เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าโดยมีการเริ่มต้นในปี 1989 โดยการใช้พื้นฐานวงจรแปลงผันแบบเดียวกับสำหรับการต่อขนานและอนุกรม จะใช้ในการควบคุมมุมของสายส่ง การทำงานขึ้นพื้นฐานของ SSSC สามารถอธิบายโดยการอ้างอิงการต่ออนุกรมของคาปาซิเตอร์



รูปที่ 2.19 พื้นฐานวงจรแปลงผันแบบเดียวกับสำหรับการต่ออนุกรมกับสายส่งและเฟสเซอร์ไคอะแกรม

SSSC เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันโดยขึ้นอยู่กับการทำงานของทรานซิสเตอร์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ (Voltage Source Inverter, VSI) มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คาปาซิเตอร์



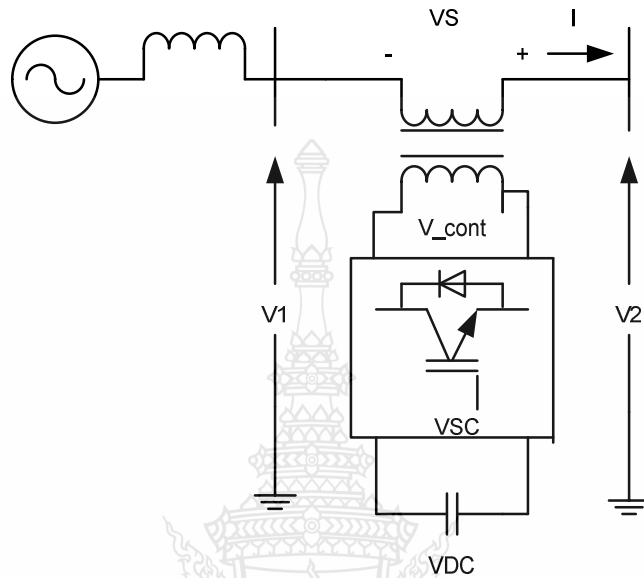
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุม SSSC

สมการควบคุมของ SSSC มีดังนี้

$$V_{SSSC_{ref}} = \frac{(S_m - x_1) K_2 T_a}{T_b + x_2 + V_{SSSCO}} \quad (2.76)$$

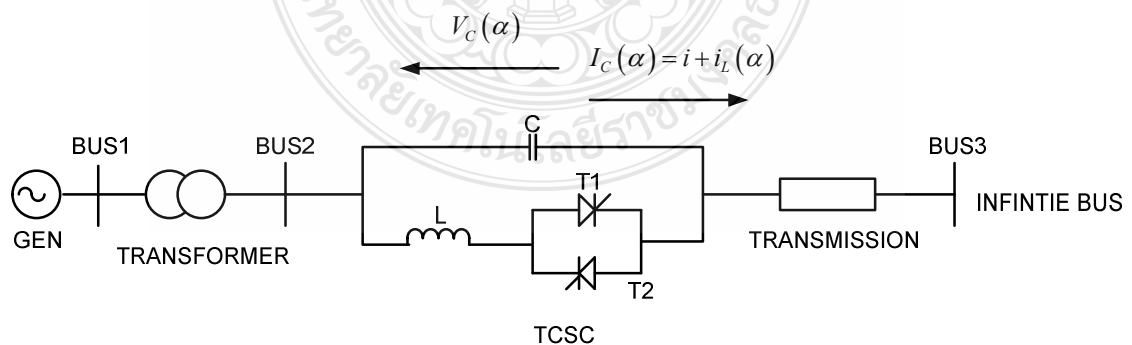
$$V_q = R_e I_q - x_e I_d + h_1 E_b \cos \delta + h_2 E_b \sin \delta - V_{SSSC} \cos \beta \quad (2.77)$$

$$V_d = x I_e q - R I_e d + h_2 E_b \cos \delta + h_1 E_b \sin \delta - V_{SSSC} \cos \beta \quad (2.78)$$



รูปที่ 2.21 วงจรแบบจำลองของ SSSC

2.5.3 Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC) พื้นฐานของอุปกรณ์ (Thyristor Controlled Series Capacitors, TCSC) เริ่มต้นใช้งานปี ค.ศ 1986 โดย Vithayathil เป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปสำหรับการปรับค่าของการเชื่อมต่อค่าความต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลของ TCSC

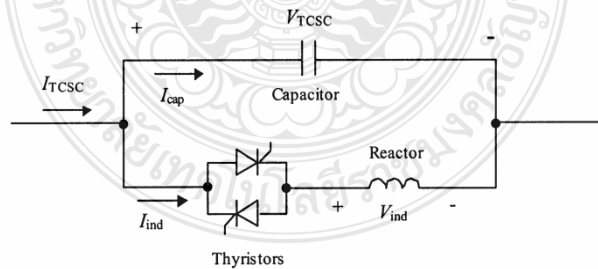
2.5.3.1 วงจรพื้นฐานของอุปกรณ์ TCSC ประกอบด้วยตัวเก็บประจุค่าคงที่ (fixed series capacitor: FSC) ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำที่ควบคุมโดยไทรสเตอร์ 2 ตัวต่อขนานแต่กลับทิศทางต่ออนุกรม ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งการทำงานของ TCSC ซึ่งการทำงานของ TCSC อาศัยการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์สุทธิ ( $X_{TCSC}$ ) สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 3 โหมด [12] ดังนี้

- 1) โหมดขั้วขั้ว (block mode) คือ การหยุดป้อนสัญญาณจุดชนวนให้กับไทรสเตอร์ จึงเสมือนว่าขณะนี้เปิดวงจร TCSC ทำงานเป็นตัวเก็บประจุค่าคงที่ ( $X_C$ )
- 2) โหมดลัดผ่าน (bypass mode) คือ ป้อนสัญญาณจุดชนวนให้มีกระแสไหลผ่านไทรสเตอร์ตลอดเวลา TCSC ทำงานเป็นตัวเหนี่ยวนำคงที่ ( $X_L$ )
- 3) โหมดควบคุม (control mode) คือ ป้อนสัญญาณจุดชนวนตามมุมการทำงานที่เหมาะสมทุกอย่างเกิดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามมุมทำงาน ( $\alpha$ ) ตามสมการที่ 2.79 และ 2.80 [13] และมีพฤติกรรมตามกราฟ [14] ดังรูปที่ 2.24

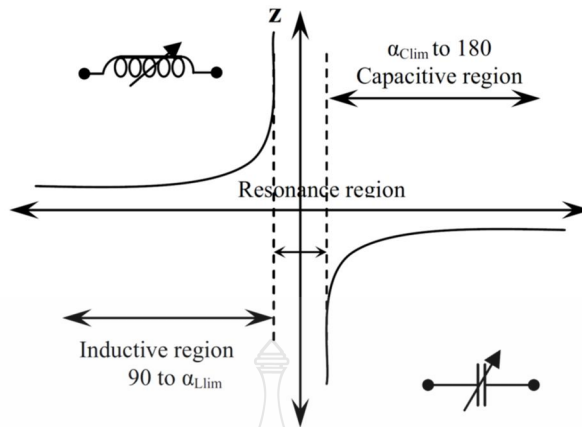
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (2.79)$$

$$X_L(\alpha) = \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha}, X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (2.79)$$

เมื่อ  $X_L = \omega L$  และ  $\alpha$  คือ มุมทำงาน (องศา)



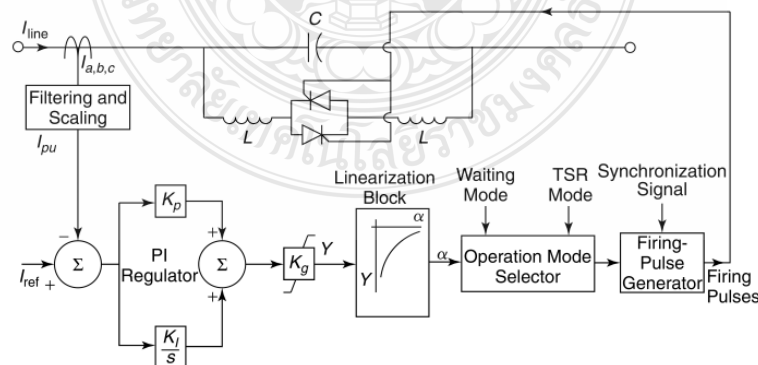
รูปที่ 2.23 วงจรพื้นฐานของอุปกรณ์ TCSC



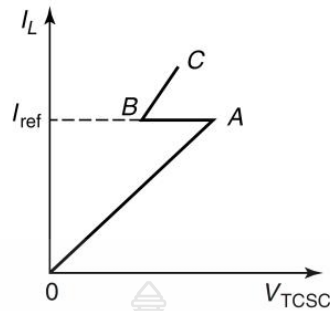
รูปที่ 2.24 กราฟพฤติกรรมของอุปกรณ์ TCSC

### 2.5.3.2 วงจรควบคุมสำหรับอุปกรณ์ TCSC แบบวงปิด (Close loop control)

วงจรควบคุมแบบวงปิด ชนิด Constant-Current (CC) Control [15] เป็นการควบคุมเพื่อต้องการรักษาระดับกระแสให้มีขนาดคงที่ตามค่ากระแสอ้างอิง แสดงวงจรดังรูปที่ 2.25 โดยจะนำค่ากระแสที่วัดได้เป็น rms มาเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิง ผ่านตัวกรองสัญญาณ ส่งให้วงจรควบคุม proportional-integral (PI) ซึ่งจะเป็นตัวคำนวณหาค่ามุมทำงานที่เหมาะสม โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{TCSC}$  กับ  $I_L$  ในสภาวะคงตัว ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งหลักการควบคุมจะพยายามรักษาค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นบวก พฤติกรรมแบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วง OA, AB และ BC โดยช่วง OA และ BC แสดงให้เห็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่ารีแอกแตนซ์ ส่วนช่วง AB แสดงให้เห็นช่วงที่สามารถควบคุมให้ค่ากระแสไหลมีค่าคงที่ตามค่ากระแสอ้างอิงได้ด้วยการควบคุมมุมทำงานของไทริสเตอร์ [16]



รูปที่ 2.25 วงจรควบคุมแบบวงปิด ชนิด Constant-Current (CC) Control



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{TCSC}$  กับ  $I_L$  ในสภาวะคงตัว

## 2.6 ระบบป้องกันเบื้องต้น

Protective Relay [17] คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระดับแรงดัน High Voltage และทำงานสั่งปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดปัญหาออกจากระบบไฟฟ้าโดยเร็วเพื่อไม่ให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย โดยจะต้องมีคุณสมบัติที่ดี คือ Reliability (ความน่าเชื่อถือ) Speed (ความรวดเร็ว) Selectivity (ความสามารถในการแยกแยะได้) และ Simplicity (ความสะดวกและง่ายในการใช้งาน) โดย Relay สามารถรับรู้ถึงความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้โดยอาศัย Instrument Transformer 2 ชนิด คือ CT (Current Transformer) และ PT (Potential Transformer)

2.6.1 CT (Current Transformer) เป็นอุปกรณ์แปลงกระแสด้าน High Voltage ให้เป็นกระแสปริมาณเล็กน้อยเพื่อป้อนให้กับ Relay โดยจะมี Ratio ให้เลือกใช้งานทั้งแบบ Single และ Multi Ratio เช่น 500/5 หรือ 100-2000/5 ใน CT 1 เฟส อาจมี 1 core หรือ 2 core ก็ได้ โดยแต่ละ core จะมี Ratio ของตัวเองเป็นอิสระต่อกัน

2.6.1.1 ข้อควรระวังของ CT คือ ห้าม Open Circuit ด้าน Secondary ของ CT ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านขดลวดของ CT ด้าน Primary

2.6.1.2 การต่อใช้งานของ CT นั้น โดยปกติจะใช้ CT ในการแปลงกระแสทั้ง 3 เฟส เพื่อส่งให้ Relay การต่อใช้งานของ CT จะมี 3 แบบ คือ

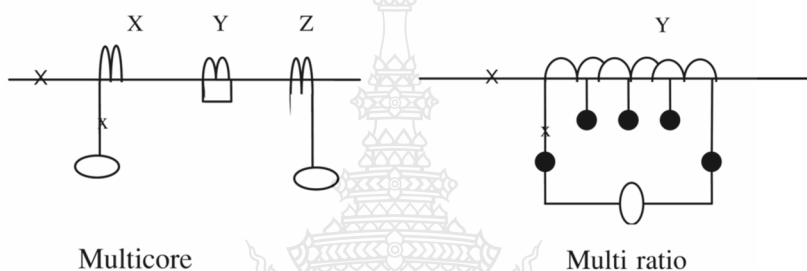
- 1) แบบ Y ใช้ CT 3 ตัว Detect Fault ได้ทุกเฟส
- 2) แบบ V ใช้ CT 2 ตัว Detect Fault ได้เฉพาะเฟสที่มี CT

3) แบบ Delta ใช้ CT 3 ตัว ต่อเป็น Delta คุณสมบัติสำคัญคือ จะทำให้กระแส Secondary มี Phase Shift กับกระแส Primary และขนาดของกระแสที่ไหลเข้า Relay จะมีขนาด  $\sqrt{3}$  เท่า ของกระแสที่แปลงด้วย CT Ratio ปกติ (คุณสมบัตินี้ไม่มีในการต่อแบบ Y และ V)

2.6.1.3 ข้อแนะนำการ Short CT นั้น เนื่องจาก CT ไม่ควร Open ขณะใช้งาน ดังนั้น การ Short CT จะยึดหลักดังนี้

- 1) พวง Multi core ใน Core ใดไม่ได้ต่อไปใช้งานให้ Short ไว้
- 2) พวง Multi ratio เมื่อใช้ Ratio ใดไปแล้ว Terminal ที่เหลือไม่จำเป็นต้อง

Short ตามรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 รูปแบบการต่อ CT แบบ Multi core และแบบ Multi ratio

2.6.1.4 CT Saturate คือ การอิ่มตัวของ CT เนื่องจากไม่สามารถ Drive Load ทางด้าน Secondary ของ CT ได้ส่งผลให้กระแสด้าน Secondary ไม่เป็นไปตาม Ratio ที่กำหนดไว้ (ค่าน้อยลง) หรืออาจไม่มีกระแสออกมาเลย (Completely Saturate) โดยสาเหตุที่ทำให้ CT Saturate คือ

1) ค่า Load (Burden) ที่ต่อทางด้าน Secondary ของ CT มีค่าสูงกว่า Standard Burden ของ CT

2) ค่า Fault Current และ DC Component ขณะเกิด Fault มีค่าสูง

3) ค่า Knee Point Voltage ของ CT มีค่าต่ำกว่าค่า Voltage ที่เกิดขึ้นด้าน Secondary ของ CT ในขณะที่เกิด Maximum Fault Current โดยค่านี้สามารถรู้ได้จาก CT Excitation Curve การหาค่า Standard Burden และค่า Max. Fault Current สามารถรู้ได้จากข้อมูลของ CT ที่เรียกว่า CT Accuracy Class เช่น 15 VA 5P20 หรือ C400 เป็นต้น

2.6.2 PT (Potential Transformer) เป็นอุปกรณ์แปลงแรงดันจากระดับ High Voltage ลงมาให้เหมาะสมกับ Relay ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 66-115 kV (phase-to-ground) การวัดแรงดันของ PT จะวัดในลักษณะ phase-to-ground เสมอ ดังนั้นในระบบไฟฟ้า เช่น 115 kV (Line to Line) PT Ratio ที่ใช้ก็

จะเป็น  $115/\sqrt{3}$  kV /  $115/\sqrt{3}$  Volt เป็นต้น บางครั้งจะพบว่ามีการใช้ CCVT (Coupling Capacitance Voltage Transformer) เป็นตัวลด Volt ให้กับ Relay แทน PT ด้วย

2.6.2.1 ข้อควรระวังของ PT คือ ห้าม Short Circuit ด้าน Secondary ของ PT ขณะที่มิ Volt อยู่ทางด้าน Primary ของ PT

2.6.2.2 การต่อใช้งานของ PT ขึ้นกับจุดประสงค์การใช้งานบางครั้งใช้แค่ Phase เดียว บางครั้งต่อทั้ง 3 Phase กรณีต่อแบบ 3 Phase จะมีการต่อดังนี้

- 1) แบบ Y ต่อ PT ครบทุกเฟส โดยต่อด้าน Secondary เป็นแบบ Y ด้วย
- 2) แบบ Open Delta โดยต่อด้าน Primary เป็นแบบ Y แต่ Secondary เป็นแบบ Delta พบเห็นบ่อยในการใช้เพื่อ Detect Ground Fault กับระบบไฟฟ้าแบบ Unground

2.6.3 การป้องกัน Feeder ใช้ Overcurrent Relay (50/51) เข้ามาช่วยป้องกัน

การทำงานของ O/C คือ Relay จะให้ Output เมื่อมีกระแสเข้าตัว Relay เกินค่า Setting

2.6.3.1 การแบ่งค่า setting ของ Relay แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1) Instantaneous O/C Relay (50) เป็น Relay ที่ทำงานเมื่อกระแสเกินค่า Setting และให้ Output โดยไม่มีการหน่วงเวลา โดยทั่วไป Operating Time ประมาณ 50-100 ms ใช้ป้องกันอุปกรณ์ทั่วไป เช่น Motor, Transformer ที่อยู่ปลายทาง ไม่จำเป็นต้องรอเวลาเพื่อ Co-ordinate กับ Relay ตัวอื่น

2) Time Delay O/C Relay (51) เมื่อกระแสเกินค่า Setting จะมีการหน่วงเวลาตามที่ตั้งไว้ก่อนจะให้ Output ออกมาสามารถแบ่งได้เป็น Definite or Fix Time Delay (เวลาไม่ขึ้นกับกระแส) และ Inverse Time Delay (เวลาแปรผกผันกับกระแส)

นอกจากนี้ใน Inverse Time Delay ยังมีลักษณะของ Curve แบบต่างๆ ด้วย เช่น Normal, Standard Inverse, Extremely Inv., Very Inv. Etc.

2.6.3.2 ค่าที่ต้อง Set บนตัว O/C มีดังนี้

- 1) Pick Up คือค่า Setting ของ O/C นั้นเอง มีหน่วยเป็น Amp
- 2) Time Multiple หรือ Dial เป็นตัวกำหนดค่าการหน่วงเวลาในการให้ Output ของ Relay

2.6.3.3 การ Co-ordination คือ การกำหนดให้ Relay ทำงานร่วมกันตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป (หรือจะเป็น Relay กับ Fuse ก็ได้) โดยกำหนดลำดับการทำงานก่อนหลังกัน คือ ตัวที่อยู่ใกล้ Fault



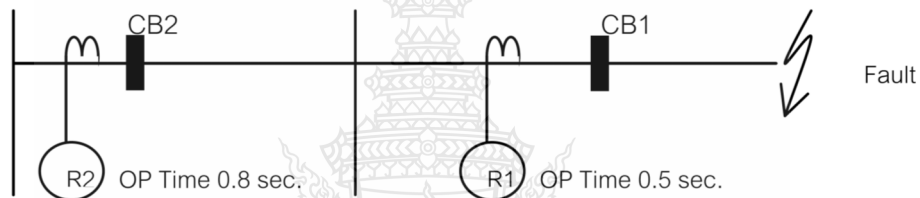
(R1) ควร Clear Fault ก่อน ขณะเดียวกัน Relay ในตำแหน่งที่ห่างออกมา (R2) ก็ต้องรอเวลาขณะหนึ่ง ถ้า Relay ที่ใกล้ Fault Trip Circuit Breaker1 ไม่สำเร็จ คือ Fault ยังอยู่ Relay ตัวถัดมาก็จะทำงานเพื่อ Clear Fault ให้ได้ โดยการ Trip CB2 เวลาระหว่าง Relay 2 ตัวมีชื่อเรียกว่า Margin Time หรือ Coordination Time Interval (CTI) ซึ่งจะถูกกำหนดจากค่าต่างๆ ดังนี้

1) Circuit Breaker Open Time

2) Arcing Time

3) Relay Operating Time

โดยทั่วไปจะต้อง Set Relay ให้มี Margin Time อย่างน้อย 0.3 sec ขึ้นไปที่ค่า Fault ค่าเดียวกัน ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างการ set Relay ให้มี Margin Time อย่างน้อย 0.3 sec

#### 2.6.3.4 การกำหนด Pickup ของ Phase และ Ground O/C (51 และ 51G)

1) Phase O/C - ค่า Pickup มักจะขึ้นกับ Load ของสิ่งที่มันป้องกันอยู่ มักจะใช้ Full Load Current เป็นตัวกำหนด เช่น 100%, 120%  $I_{Full Load}$  เป็นต้น

2) Ground O/C - ค่า Pickup จะ Set ไว้ต่ำๆ เพื่อให้มีความไวต่อ Ground Fault แต่ต้องสูงกว่า Unbalance Current ในระบบนั้น มักจะ set ไว้ 20-30%  $I_{Full Load}$  ที่ set ต่ำได้ เพราะปกติจะไม่มีกระแสไหลผ่าน Relay ตัวนี้เมื่อจ่าย Load ปกติแบบ Balance

3) การนำ Phase O/C มาป้องกันหม้อแปลงจำเป็นต้องรู้ข้อมูลต่อไปนี้ คือ Transformer Damage Curve เพื่อ set ค่า Dial และขนาดของ Transformer เพื่อ Set ค่า Pick up

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าโดยใช้ TCSC ด้วยการพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจำลองการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทซิงโครนัส กำลังการผลิตติดตั้ง 5 เมกกะวัตต์ เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 เควี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบป้องกันและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าจากการถูกรบกวนอย่างรุนแรงด้วยการลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่างๆของระบบ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจรและเสถียรภาพชั่วคราว โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.1.1 จัดเตรียมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบจำหน่าย 22 เควี ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบเสถียรภาพระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว เพื่อนำมาป้อนค่าในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

3.1.2 สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่จะนำมาทดสอบ ในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory โดยนำค่าพารามิเตอร์จากขั้นตอนที่ 1 มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

3.1.3 คำนวณ และวิเคราะห์ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

3.1.4 สร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

3.1.5 คำนวณ และวิเคราะห์ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ เพื่อหาค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time)

3.1.6 สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC เพื่อติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่

3.1.7 กำหนด และวิเคราะห์ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรและเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว และอุปกรณ์ TCSC ติดตั้งอยู่

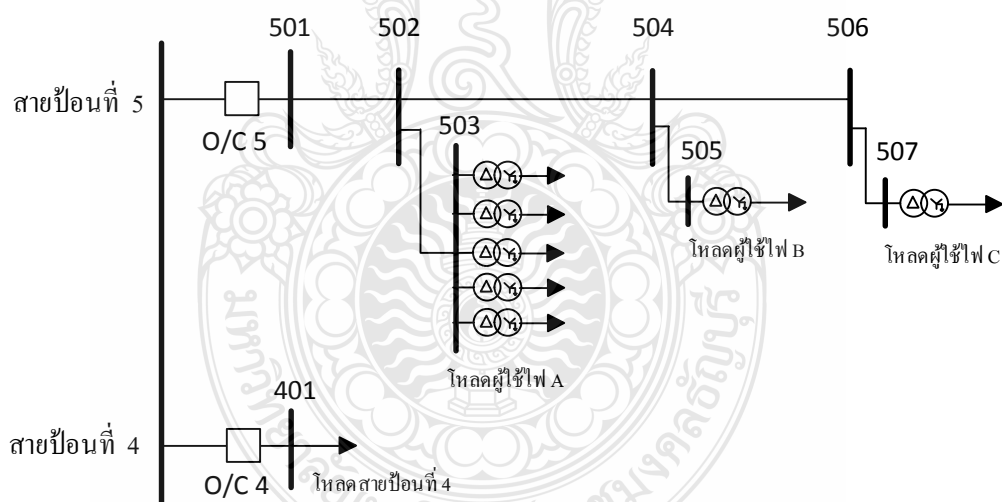
3.1.8 ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของวงจร TCSC ให้เหมาะสม ในการควบคุมเสถียรชั่วคราวระบบไฟฟ้า

3.1.9 สรุปผลการทดสอบ

## 3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ เป็นระบบจำหน่าย 22 เควี แบบเรเดียล คัดแปลงระบบไฟฟ้ามาจากสถานีไฟฟ้าชัยบุรี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 1 (ภาคกลาง) โดยแบ่งเป็น 3 สถานะ ดังนี้

3.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวได้ตามรูปที่ 3.1 โดยประกอบด้วยข้อมูลระบบไฟฟ้าต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน

3.2.2 ข้อมูลสถานีไฟฟ้า คัดแปลงมาจากสถานีไฟฟ้าชัยบุรี ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้า

ชื่อสถานีไฟฟ้า	ระดับแรงดัน (kV)	R1 (pu.)	X1 (pu.)	R2 (pu.)	X2 (pu.)	R0 (pu.)	X0 (pu.)
ธัญบุรี	22	0.01645	0.3849	0.01645	0.38491	0.00638	0.29832

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3.2.2.1 ข้อมูลสายจำหน่ายไฟฟ้า คัดแปลงมาจากระบบจำหน่ายสายป้อนที่ 5 สถานีไฟฟ้าธัญบุรี ประกอบด้วยสายเคเบิลอากาศ ขนาด 50, 120 และ 185 ตร.มม. มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายระหว่างบัสแต่ละช่วงตามตารางที่ 3.2 โดยมีค่ากระแสใช้งานตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายจำหน่ายระหว่างบัส

จากบัส	ถึงบัส	ระยะทาง	Resistance	Reactance	susceptance
		(km)	(ohm)	(ohm)	(ohm)
1	2	0.4	0.08607200	0.08953200	0.00000248
1	8	0.5	0.10759000	0.11191500	0.00000310
2	3	1.0	0.21518000	0.22383000	0.00000621
2	4	0.5	0.10759000	0.11191500	0.00000310
4	5	0.5	0.10759000	0.11191500	0.00000310
4	6	3.0	0.64554000	0.67149000	0.00001862
6	7	0.5	0.10759000	0.11191500	0.00000310

ตารางที่ 3.3 พิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลอากาศ (SAC)

พิกัดแรงดัน (kV)	กระแสใช้งาน (แอมแปร์)		
	พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ (ตร.มม.)		
	50	120	185
22	180	315	410

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3.2.3 ข้อมูลโหลด ดัดแปลงมาจากโหลดสายป้อนที่ 5 สถานีไฟฟ้าชัยบุรี เป็นโหลดผู้ใช้ไฟ เฉพาะรายทั้งหมด จำนวน 3 ราย ประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้า ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดสายป้อนที่ 5

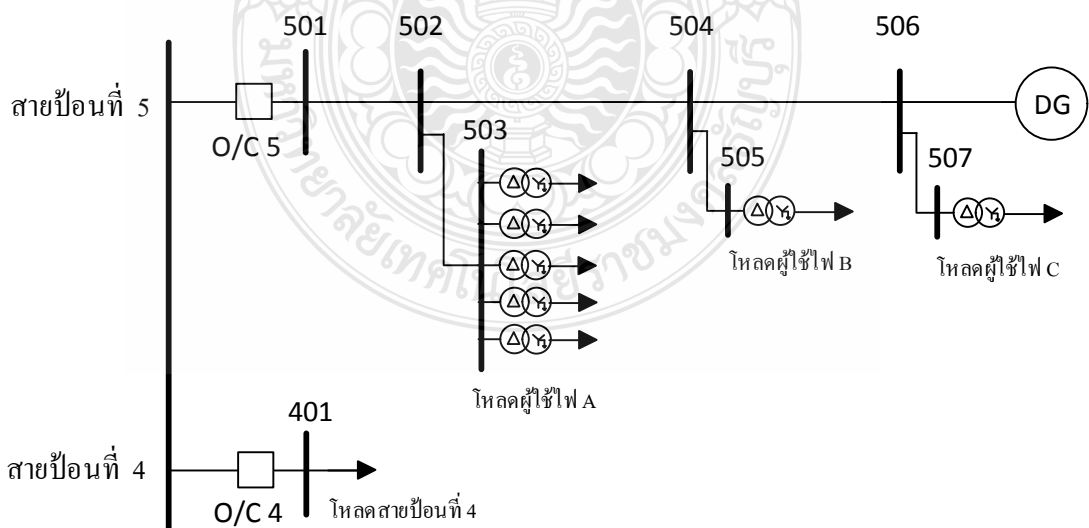
โหลดผู้ใช้ไฟ	MW	MVAR
A	2.771	1.3959
B	1.02	0.6321
C	1.7	1.0536

โหลดสายป้อนที่ 4 มีค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดสายป้อนที่ 4

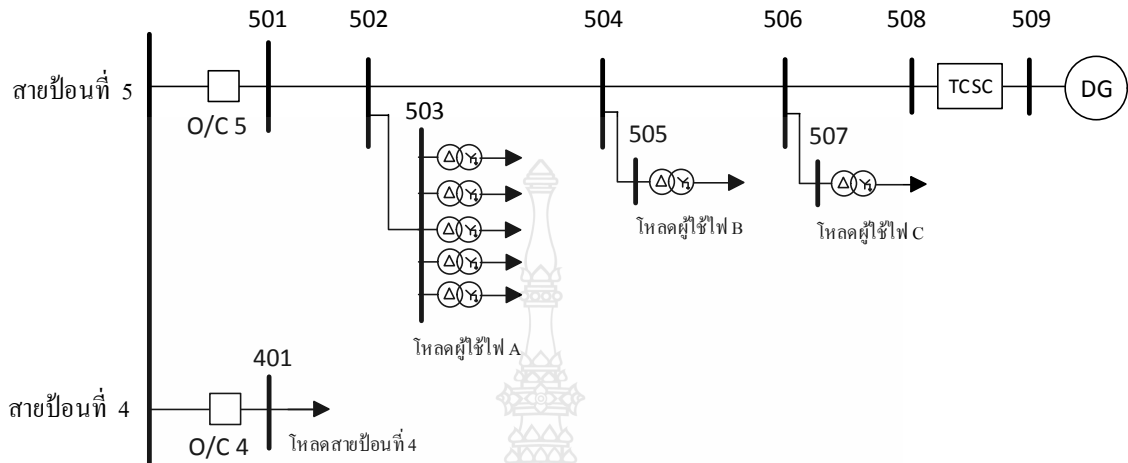
โหลดผู้ใช้ไฟ	MW	MVAR
สายป้อนที่ 4	5.1	3.1607

3.2.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่

3.2.5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวได้ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่

### 3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

#### 3.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory [18]

DIgSILENT PowerFactory เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ที่สามารถสร้างแบบจำลองด้วยรูปภาพหรือป้อนข้อมูลด้วย Text file สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในระบบผลิต ระบบส่ง ระบบจำหน่าย และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งความสามารถของโปรแกรม ยกตัวอย่างได้ดังนี้

- Load Flow and Fault Analysis of complete AC/DC network representation, meshed & mixed 1, 2 and 3 phase AC and /or DC networks
- Dynamic Simulation
- EMT Simulation
- Eigenvalue Analysis
- Protection Analysis
- Reliability
- Voltage Stability Analysis
- Contingency analysis
- Power Electronic Device Modeling


- DPL User Script
- DOLE Interface for SCADA/GIS
- PSS/E & PSS/U Compatibility

ซึ่งจะเห็นได้ว่าโปรแกรมนี้ มีความสามารถในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้ ทั้งในสภาวะคงตัว (Steady state) และสภาวะทรานเซียน (Transient state)


### 3.3.1.1 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ในการสร้างแบบจำลอง

1) แบบจำลองแหล่งจ่ายสถานีไฟฟ้า ใช้สัญลักษณ์  แทนแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าชลบุรี

2) หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ใช้สัญลักษณ์  แทนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังผู้ใช้ไฟเฉพาะราย และหม้อแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

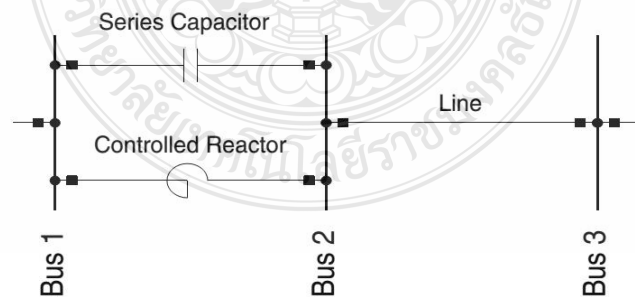
3) สายจำหน่าย ใช้สัญลักษณ์  แทนสายจำหน่ายเคเบิลอากาศ

4) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ใช้สัญลักษณ์  แทนแหล่งจ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

5) โหลด ใช้สัญลักษณ์  แทนโหลด โดยจำลองโหลดจาก 80% ตามพิกัดติดตั้งของหม้อแปลงจำหน่าย ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์เท่ากับ 0.9

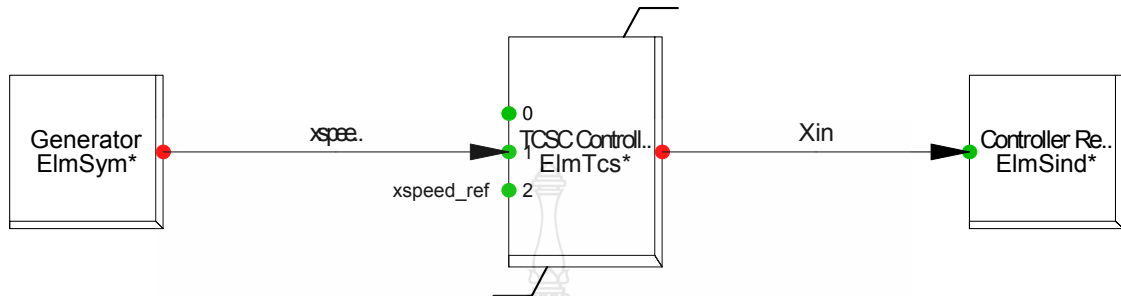
### 3.3.1.2 การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง TCSC ด้วยการสร้าง Reactor ขนานกับ Capacitor โดยต่ออนุกรมกับสายจำหน่ายตามรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



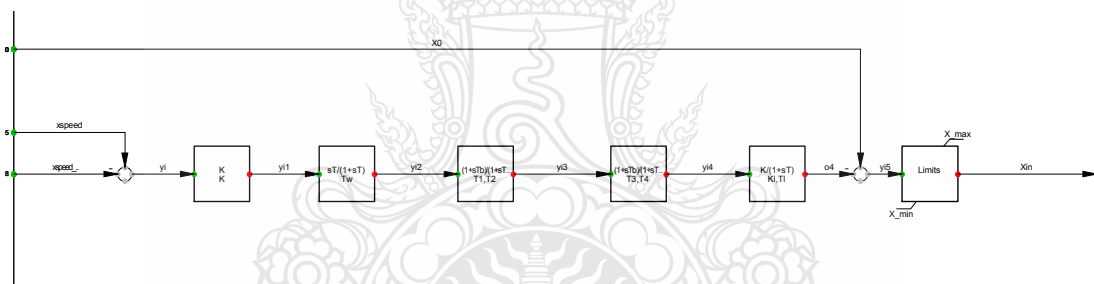
รูปที่ 3.4 โครงสร้างอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIgSILENT

1) เฟรมตัวควบคุม TCSC มีหน้าที่รับค่าพารามิเตอร์ความเร็วโรเตอร์ จากเครื่องกำเนิดแบบกระจายตัว แล้วส่งค่าอิมพีแดนซ์ให้อุปกรณ์ Reactor เพื่อควบคุมความเร็วโรเตอร์ มีวงจรตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Composite Frame ของอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIGSILENT

2) Slot วงจรควบคุมแบบวงปิดของอุปกรณ์ TCSC มีหน้าที่ควบคุมโรเตอร์ให้เข้าสู่สภาวะสมดุล มีวงจรตามรูปที่ 3.6

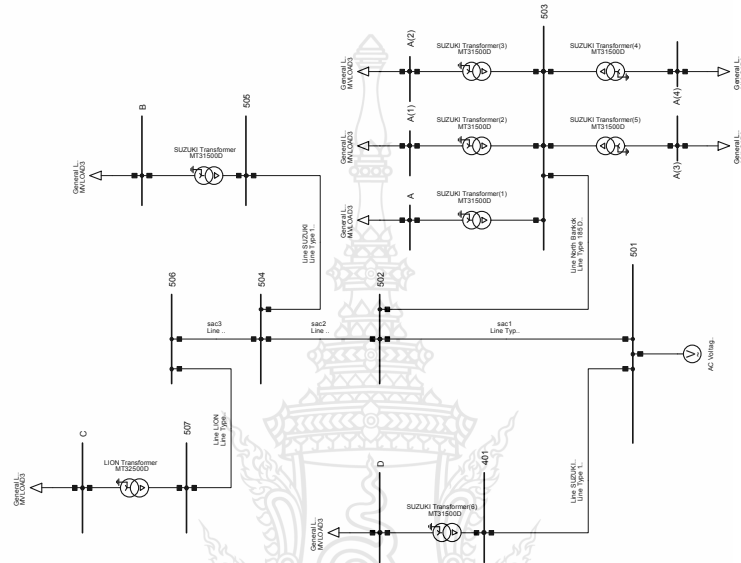


รูปที่ 3.6 Block control แบบวงปิด ของอุปกรณ์ TCSC ในโปรแกรม DIGSILENT

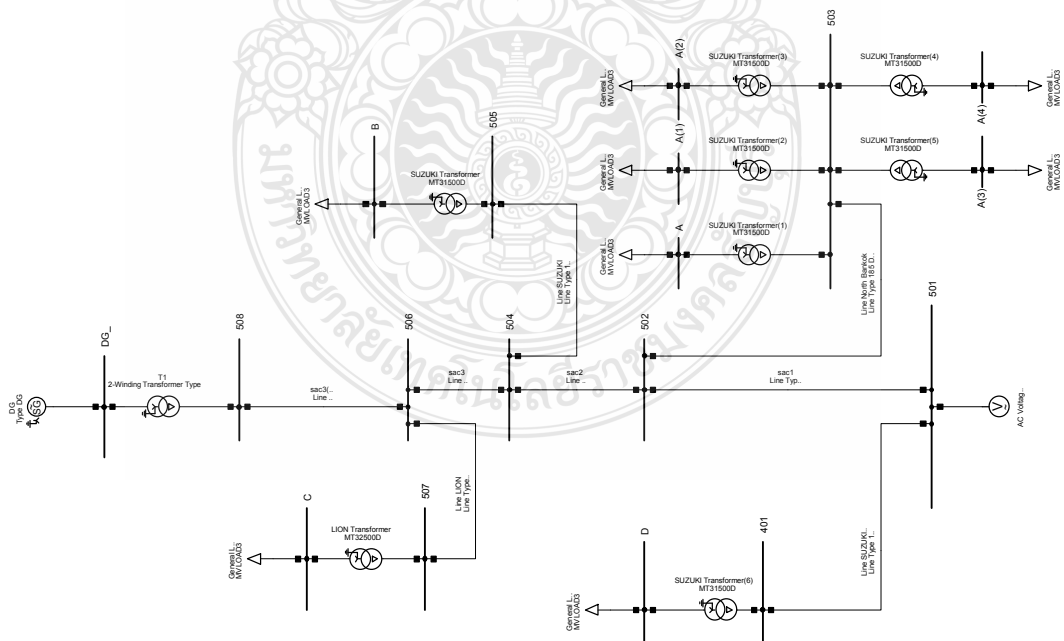


### 3.4 กรณีศึกษา

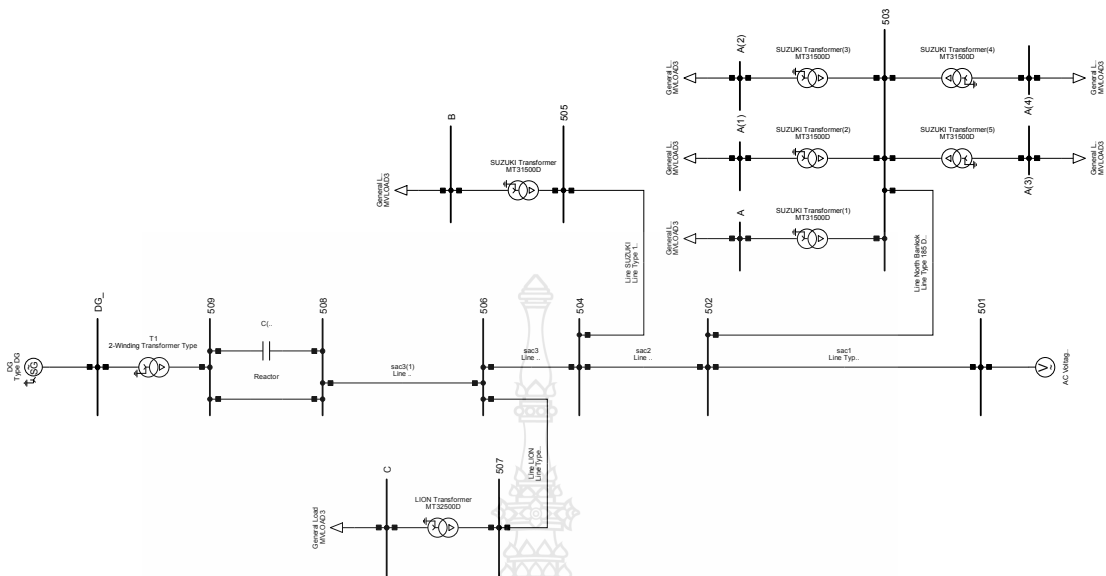
ในการสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 เควี ทั้ง 3 สถานะ คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน, ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่และมี TCSC ติดตั้งอยู่ ดังรูปที่ 3.7, 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน ในโปรแกรม DIgSILENT



รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ในโปรแกรม DIgSILENT



รูปที่ 3.9 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ในโปรแกรม DIgSILENT

โดยได้จำลองเหตุการณ์ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

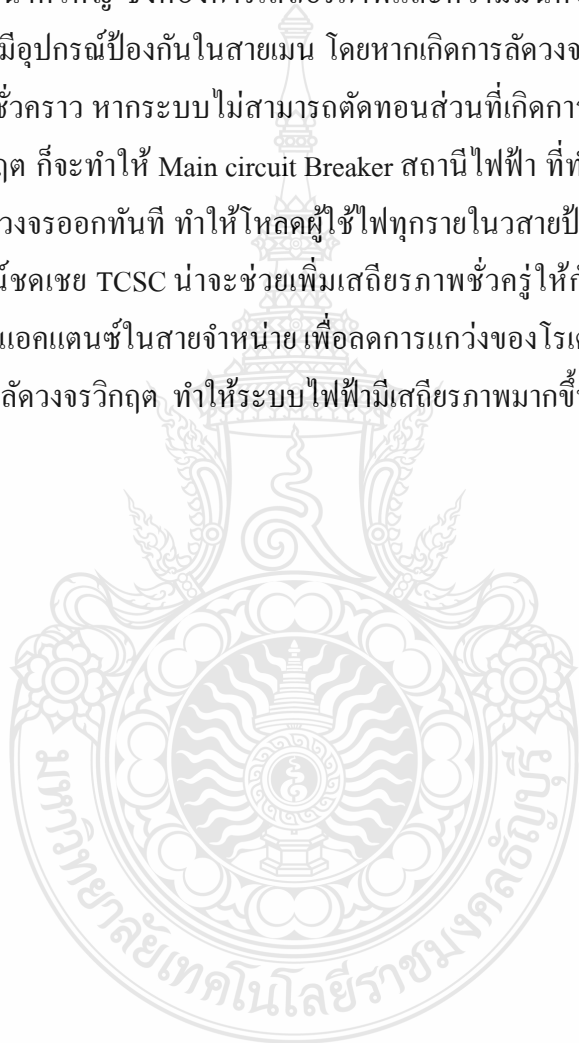
3.4.1 กรณีที่ 1 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ก่อนและหลังมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ บัส 401

3.4.2 กรณีที่ 2 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ เพื่อหาค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 503

3.4.3 กรณีที่ 3 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ เพื่อหาค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 505 ซึ่งมีระยะเข้าใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายมากขึ้นกว่ากรณี 2

### 3.5 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจร และเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล 7 บัส ด้วยการดัดแปลงข้อมูลระบบไฟฟ้า มาจากสายป้อนที่ 5 สถานีไฟฟ้าชัยบุรี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 1 ภาคกลาง เนื่องจากระบบจำหน่ายดังกล่าว ประกอบด้วยโหลดผู้ใช้ไฟเฉพาะราย และเป็นโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งต้องการเสถียรภาพและความมั่นคงสูง อีกทั้งวงจรดังกล่าวมีระยะทางสั้น ทำให้ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันในสายเมน โดยหากเกิดการลัดวงจรขึ้นในไลน์แยกย่อย แม้จะเป็นการลัดวงจรแบบชั่วคราว หากระบบไม่สามารถตัดทอนส่วนที่เกิดการลัดวงจรออกได้ทันภายในระยะเวลาลัดวงจรวิกฤต ก็จะทำให้ Main circuit Breaker สถานีไฟฟ้า ที่ทำหน้าที่ป้องกันสายเมนขาออก (outgoing) ตัดวงจรออกทันที ทำให้โหลดผู้ใช้ไฟทุกรายในสายป้อนที่ 5 หลุดออกจากระบบ ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย TCSC น่าจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพชั่วคราวให้กับระบบไฟฟ้าได้ ด้วยการชดเชยค่ากำลังไฟรีแอกแตนซ์ในสายจำหน่าย เพื่อลดการแกว่งของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเพิ่มช่วงระยะเวลาลัดวงจรวิกฤต ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้นนั่นเอง



## บทที่ 4

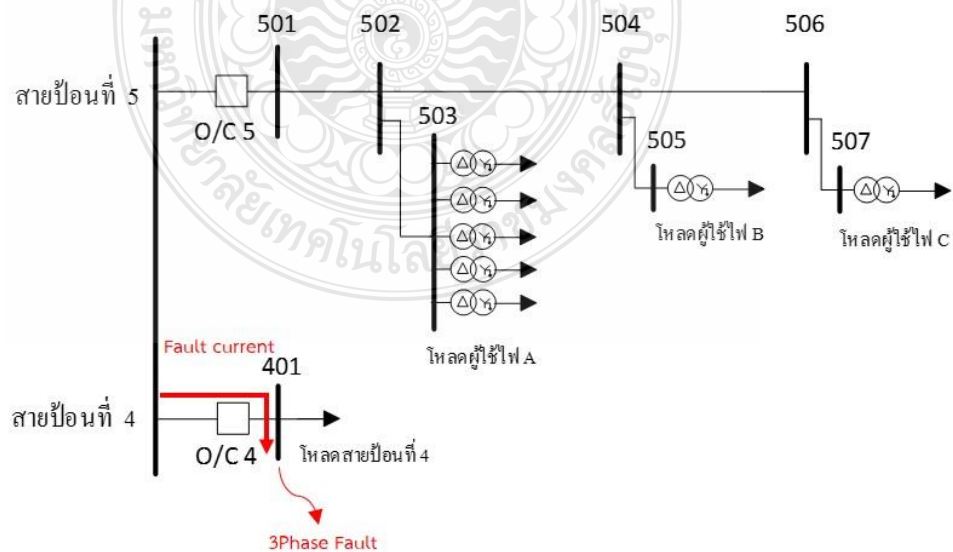
### ผลการทดลอง

ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คัดแปลงมาจากระบบจำหน่ายเรเดียล 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 1 ภาคกลาง โดยการนำข้อมูลระบบไฟฟ้า จากโปรแกรม GIS มาเป็นฐานข้อมูล ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory เพื่อศึกษาการควบคุมเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ของระบบไฟฟ้าแบบพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยสมมติให้มีการรบกวนระบบไฟฟ้าอย่างรุนแรง (Disturbance) บริเวณต่างๆ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีผลการทดสอบทั้ง 3 กรณี ดังนี้

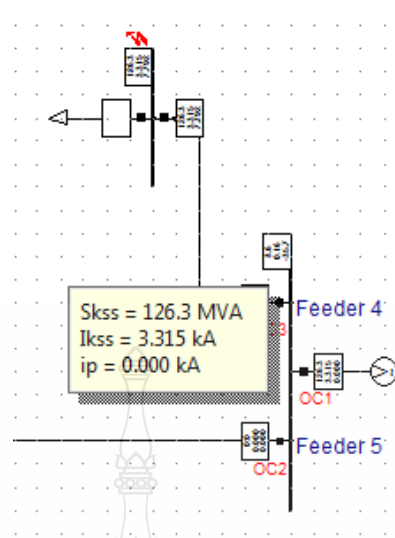
#### 4.1 กรณีที่ 1 เกิดการลัดวงจรที่บัส 401

ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over current Relay ของสายป้อนที่ 4 ซึ่งเป็นสายป้อนข้างเคียง เมื่อจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 401 กับระบบไฟฟ้าทั้ง 3 สถานะ คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน, ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่และมี TCSC ติดตั้งอยู่ ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1.1 สำหรับสถานะระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พบว่ามีค่ากระแสลัดวงจรไหลผ่าน Over current Relay ของสายป้อนที่ 4 เท่ากับ 3.315 kA ดังรูปที่ 4.1 – 4.2

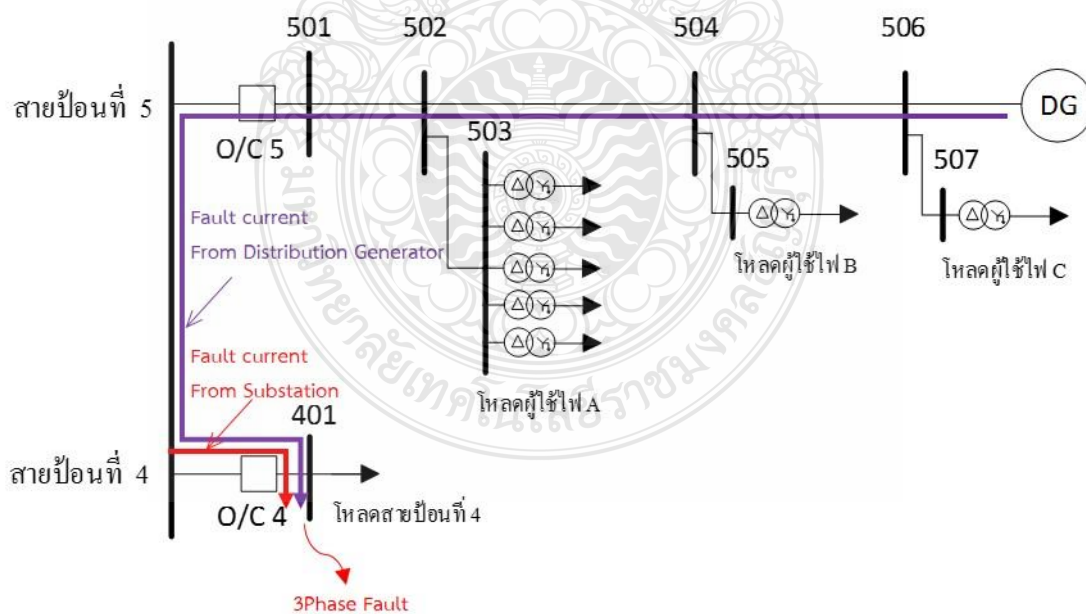


รูปที่ 4.1 การไหลของกระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

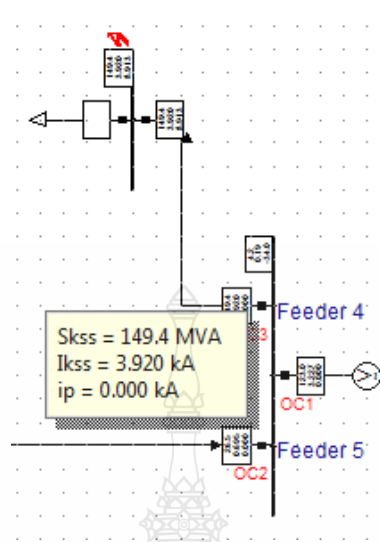


รูปที่ 4.2 ค่ากระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

4.1.2 สำหรับสถานะระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ พบว่ามีค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over current Relay ของสายป้อนที่ 4 เพิ่มขึ้นเป็น 3.920 kA ดังรูปที่ 4.3 – 4.4

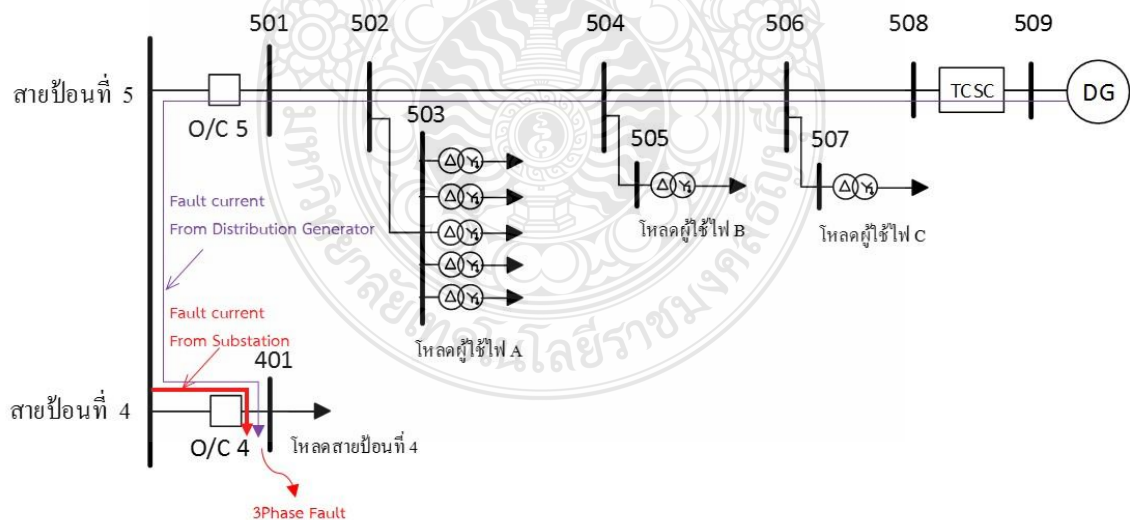


รูปที่ 4.3 การไหลของกระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่

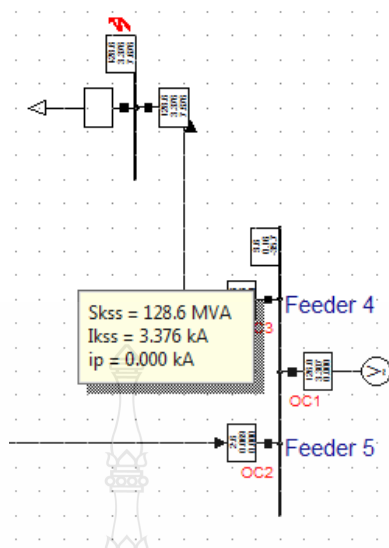


รูปที่ 4.4 ค่ากระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่

4.1.3 สำหรับสถานะระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ พบว่ามีค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over current Relay ของสายป้อนที่ 4 ลดลงเหลือ 3.376 kA ดังรูปที่ 4.5 – 4.6



รูปที่ 4.5 การไหลของกระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่

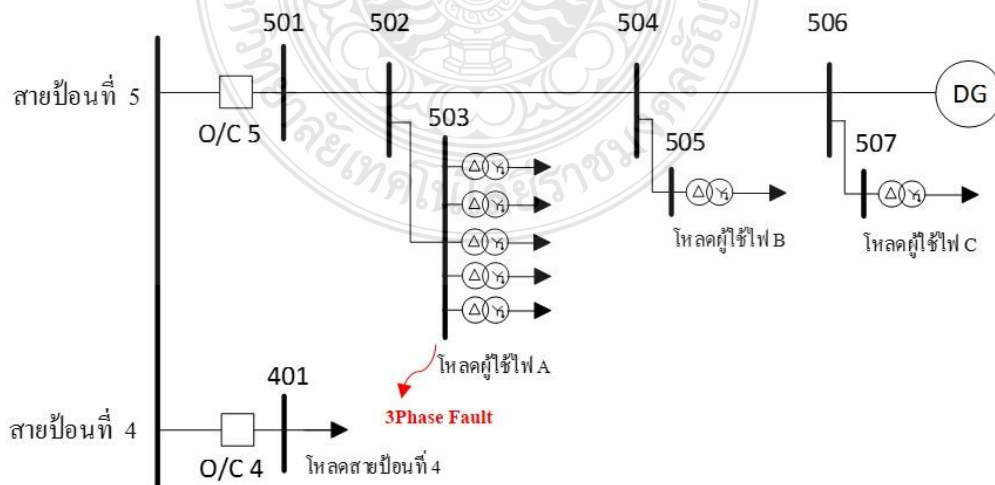


รูปที่ 4.6 ค่ากระแสลัดวงจร กรณีที่ 1 สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่

#### 4.2 กรณีที่ 2 เกิดการลัดวงจรที่บัส 503

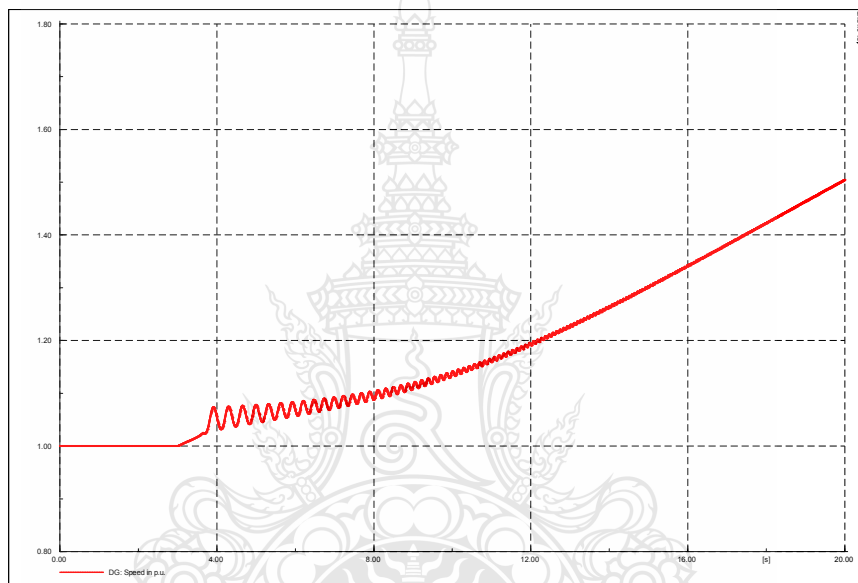
ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้า เพื่อหาค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) และการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าด้วย TCSC เมื่อจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 503 ณ เวลา  $t = 3$  วินาที กับระบบไฟฟ้าทั้ง 2 สถานะ คือ

4.2.1 สถานะระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ เมื่อการลัดวงจรที่บัส 503 ดังรูปที่ 4.7 ได้ผลการทดสอบดังนี้



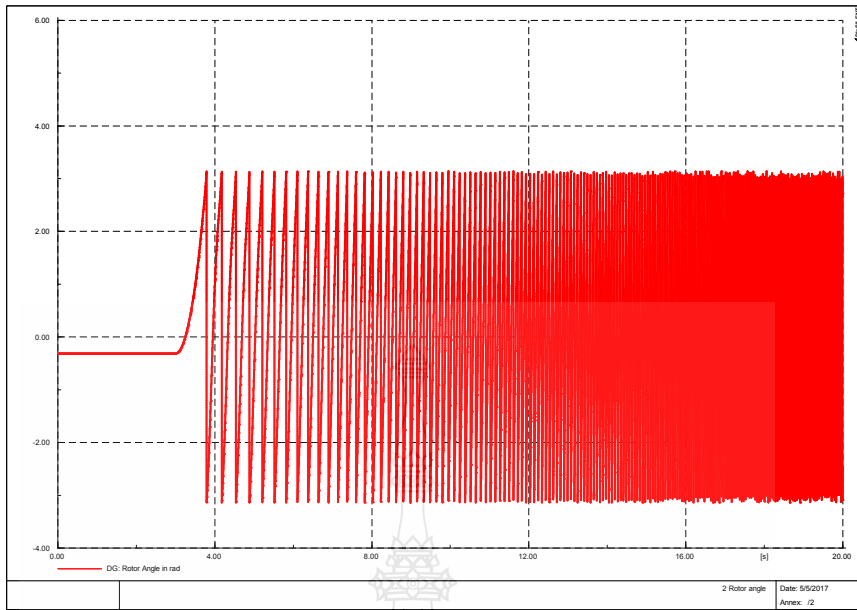
รูปที่ 4.7 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 503

4.2.1.1 การลัดวงจรในช่วงระยะเวลา  $t > 0.60$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเกิดการแกว่งตัวจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งหมายความว่ามีการลัดวงจรในช่วงระยะเวลาเกินกว่าค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเอง โดยผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Speed, p.u.), ค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Angle, rad), ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของ ณ บัสต่างๆ (Active Power, MW) และค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ (Voltage, p.u.) แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 – 4.11

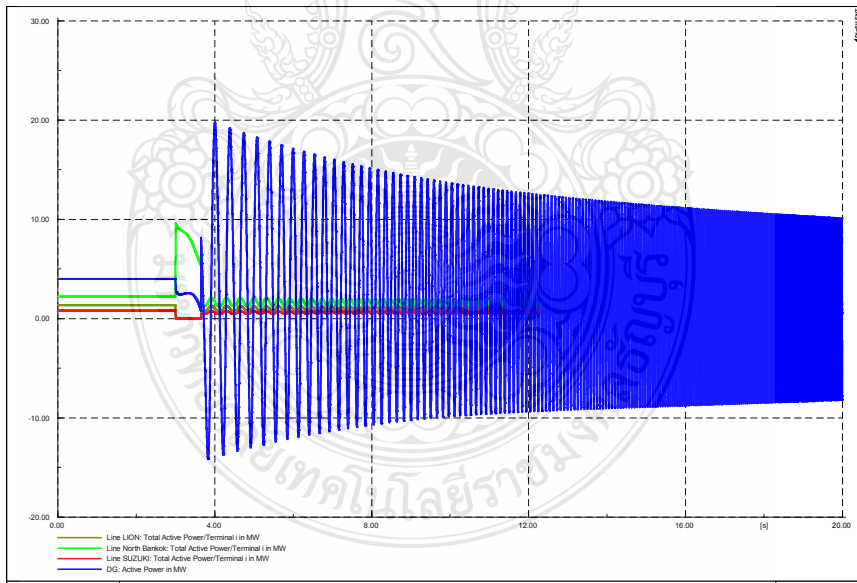


รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.1

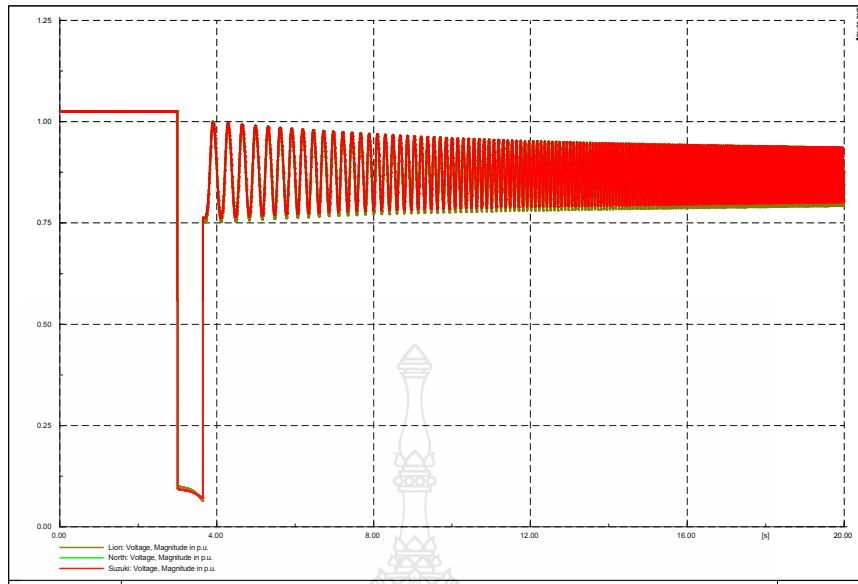




รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.1

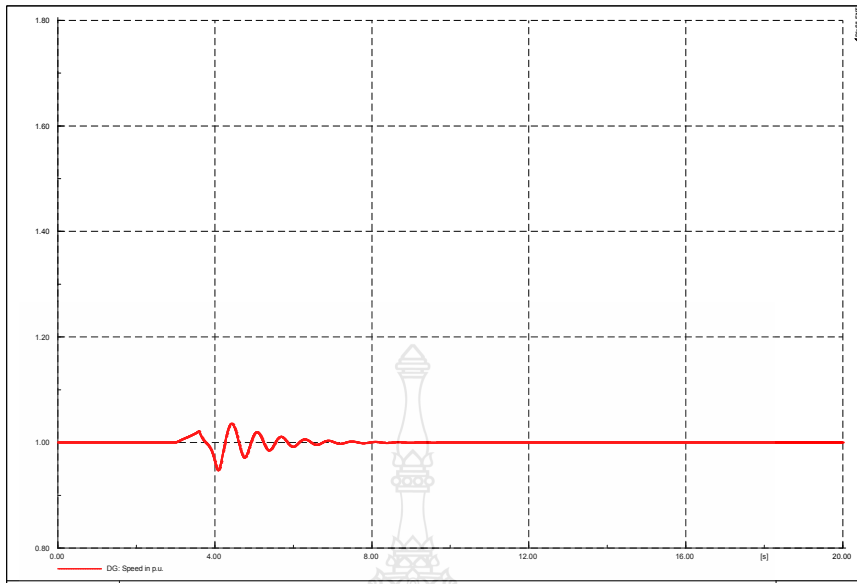


รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.1

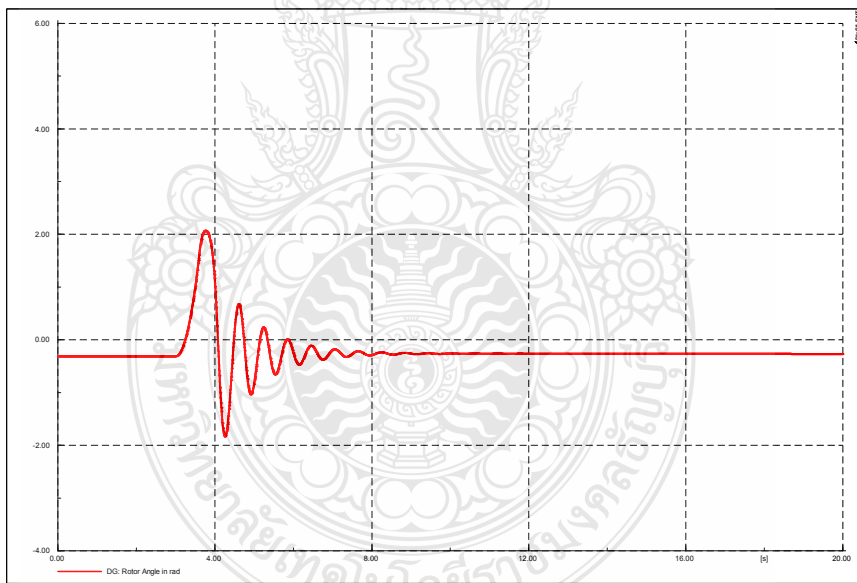


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.1

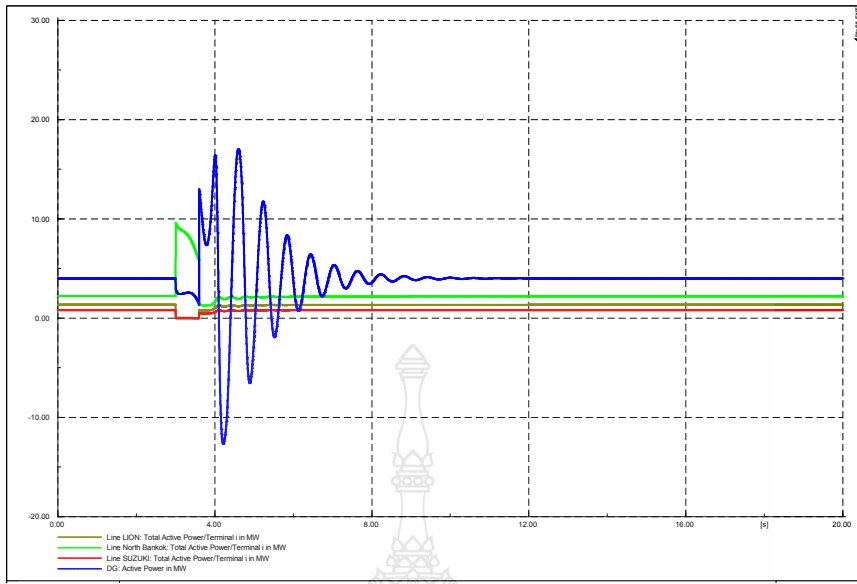
4.2.1.2 การลัดวงจรภายในช่วงระยะเวลา  $t \leq 0.60$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เกิดการแกว่งตัวในช่วงแรก แต่สามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ ซึ่งหมายความว่ามีการลัดวงจรในช่วงระยะเวลาดำกว่าค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง โดยผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Speed, p.u.), ค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Angle, rad), ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของ ณ บัสต่างๆ (Active Power, MW) และค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ (Voltage, p.u.) แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 – 4.15



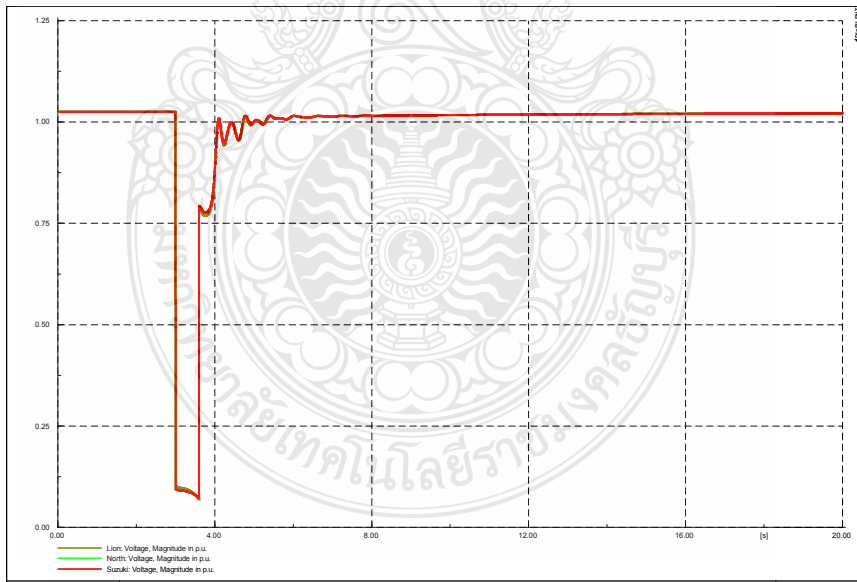
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.2



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.1.2

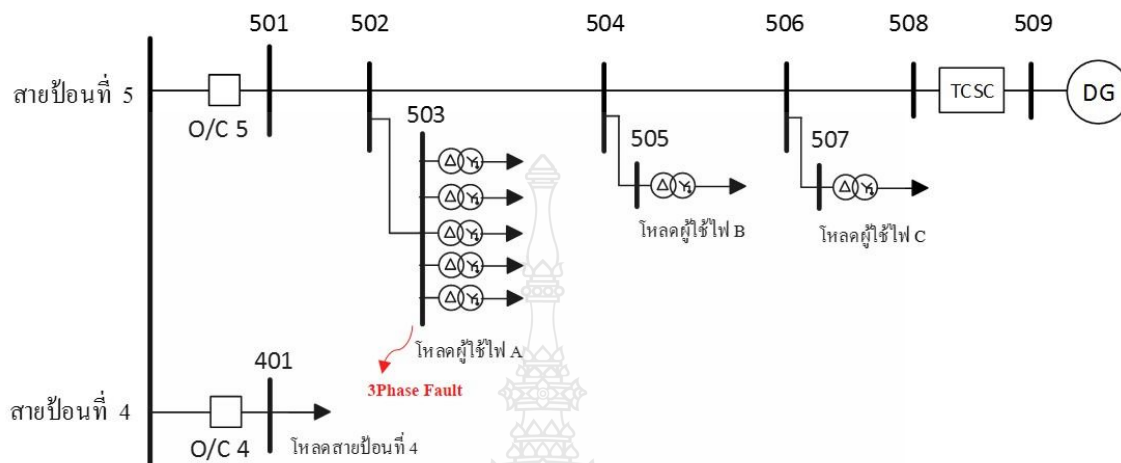


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ  
กรณี 4.2.1.2



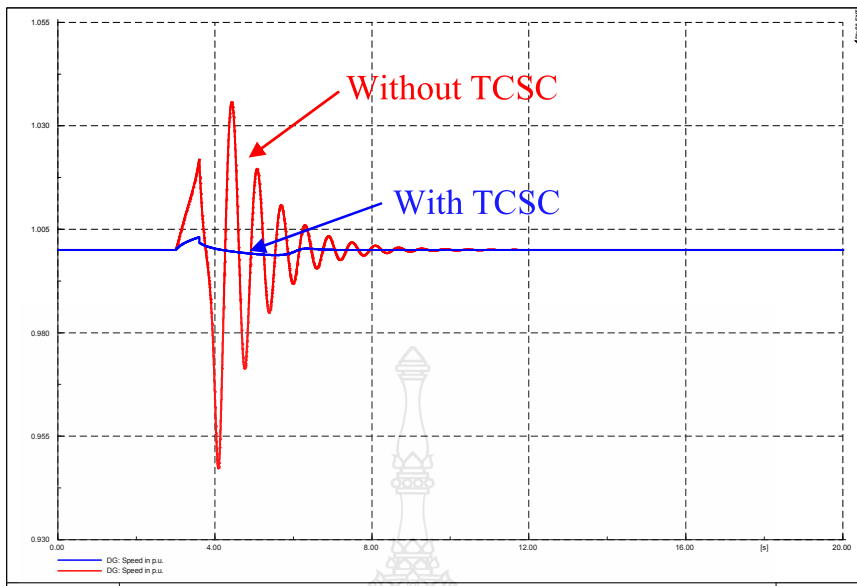
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2

4.2.2 สำหรับสถานะระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ เมื่อการลัดวงจรที่บัส 503 ดังรูปที่ 4.16 ได้ผลการทดสอบดังนี้

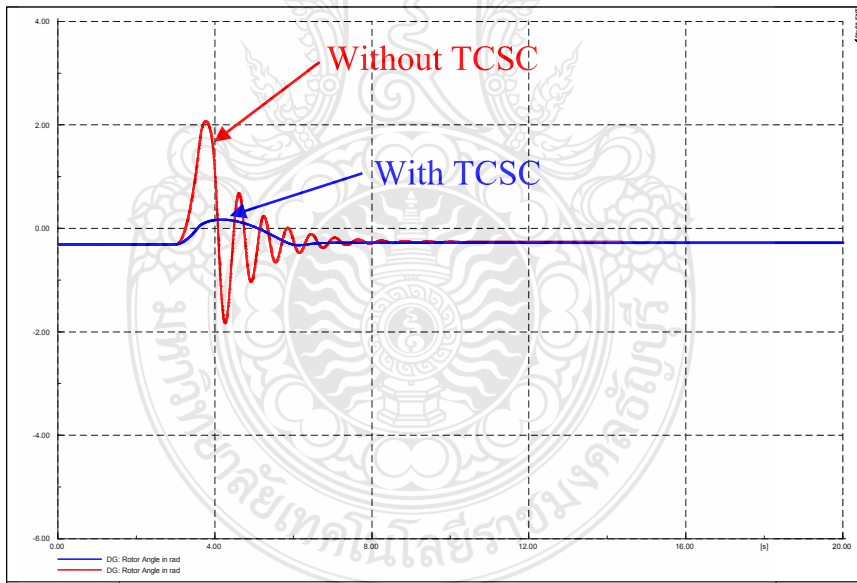


รูปที่ 4.16 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ เมื่อการลัดวงจรที่บัส 503

4.2.2.1 การลัดวงจรภายในช่วงระยะเวลา  $t \leq 0.60$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เกิดการแกว่งตัวเพียงเล็กน้อย และสามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว โดยผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วโรเตอร์ และค่าความเร็วเชิงมุมของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ระหว่างก่อนและหลังติดตั้ง TCSC แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

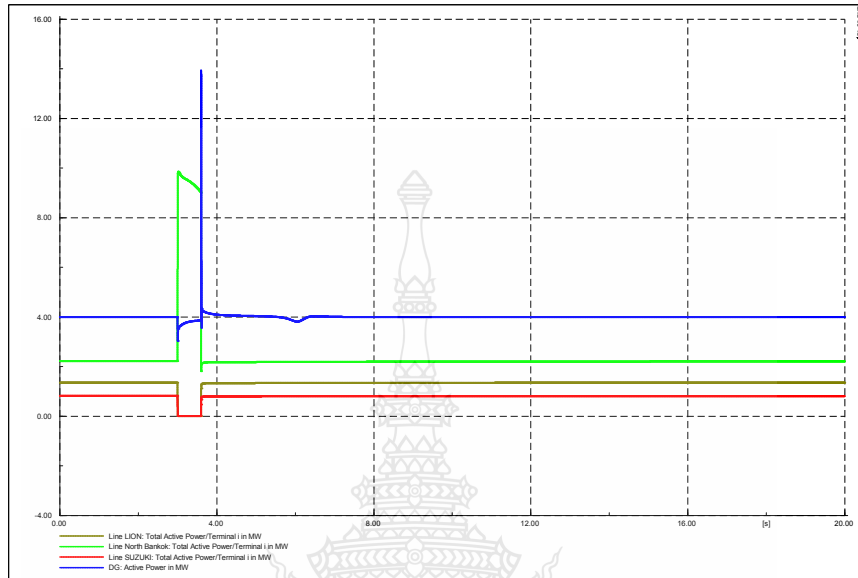


รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1

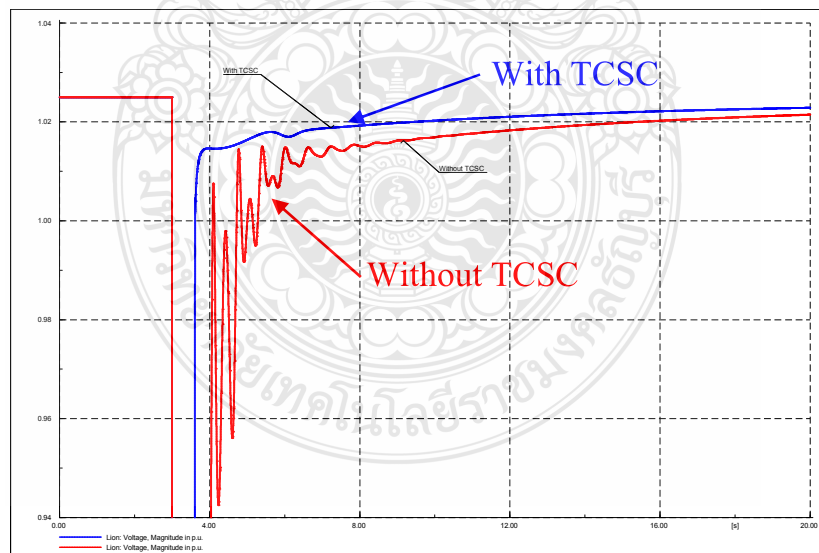


รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1

กำลังไฟฟ้าปรากฏและแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ มีการแกว่งตัวที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

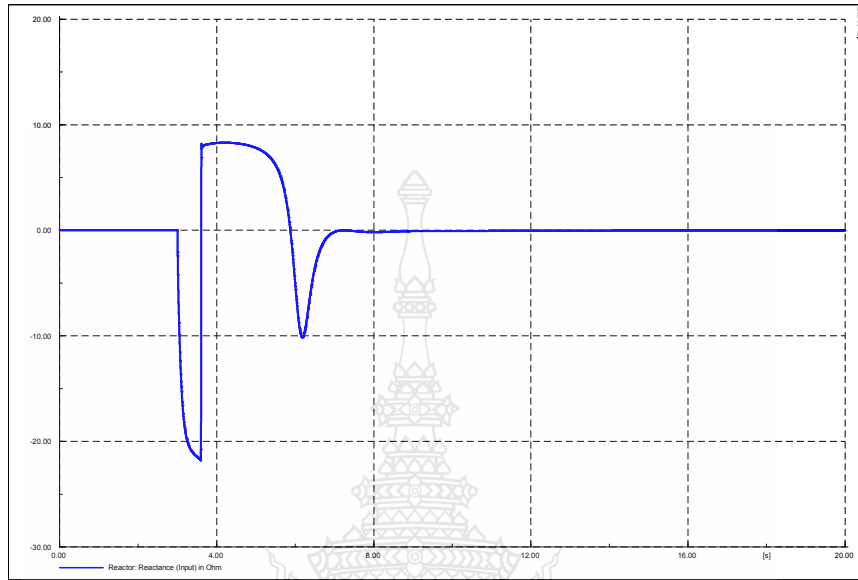


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสต่างๆ หลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1



รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่เครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.2.2.1

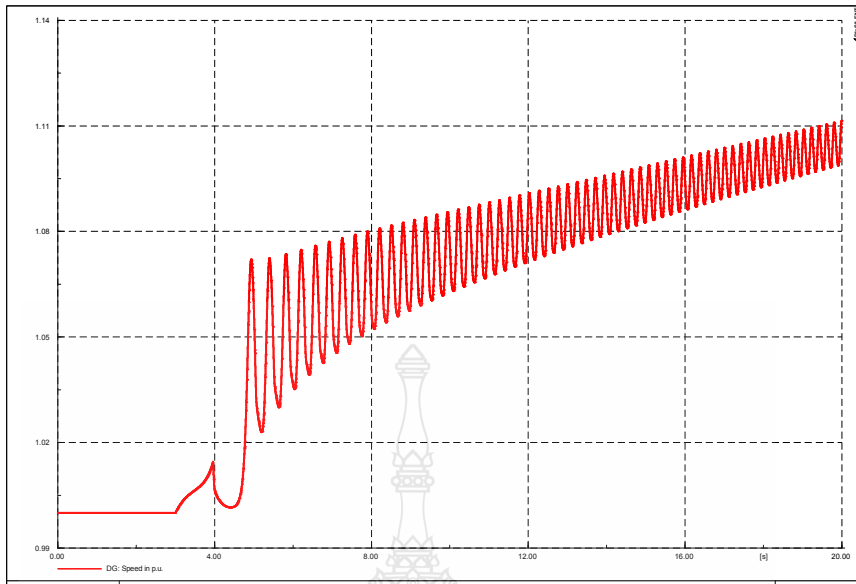
โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC (ohm) ที่เปลี่ยนแปลงไป ตามการชดเชยค่าความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.21



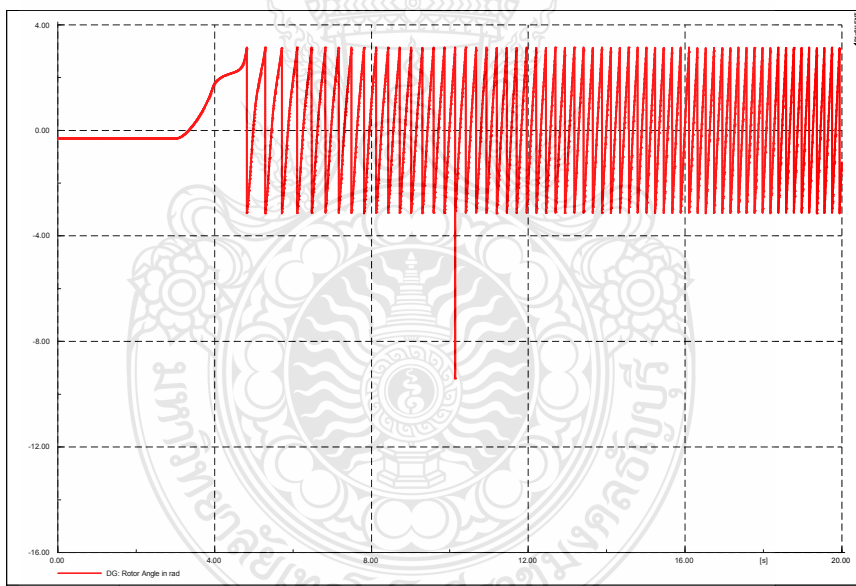
รูปที่ 4.21 ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC กรณี 4.2.2.1

4.2.2.2 การลัดวงจรในช่วงระยะเวลา  $t > 0.95$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเกิดการแกว่งตัวจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งหมายความว่ามีการลัดวงจรในช่วงระยะเวลาเกินกว่าค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Speed, p.u.), ค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Angle, rad) แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 – 4.23



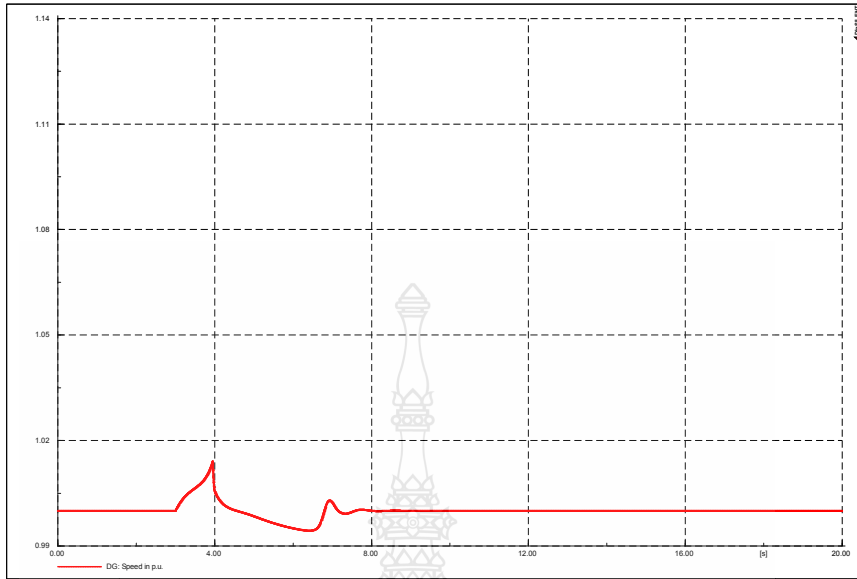


รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.2

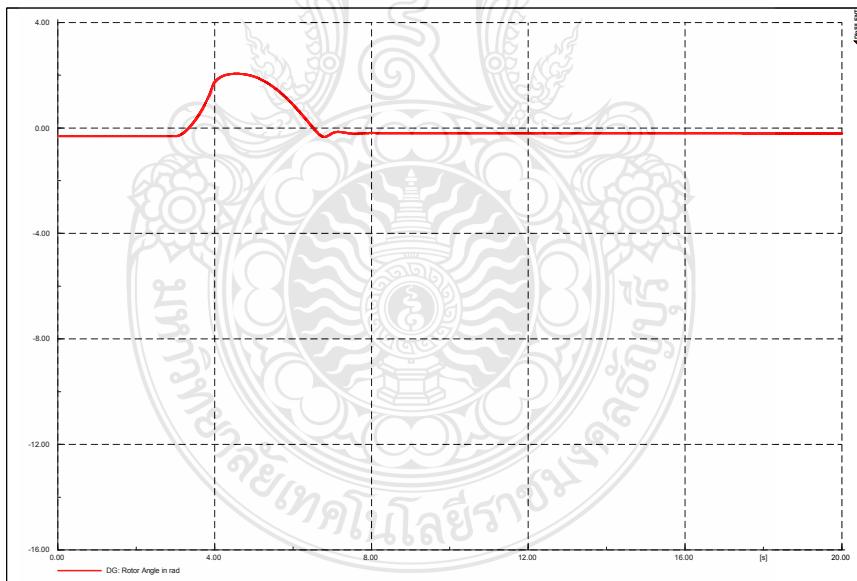


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.2

4.2.2.3 การลัดวงจรภายในช่วงระยะเวลา  $t \leq 0.95$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เกิดการแกว่งตัวเล็กน้อย และสามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว โดยผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ และค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.3

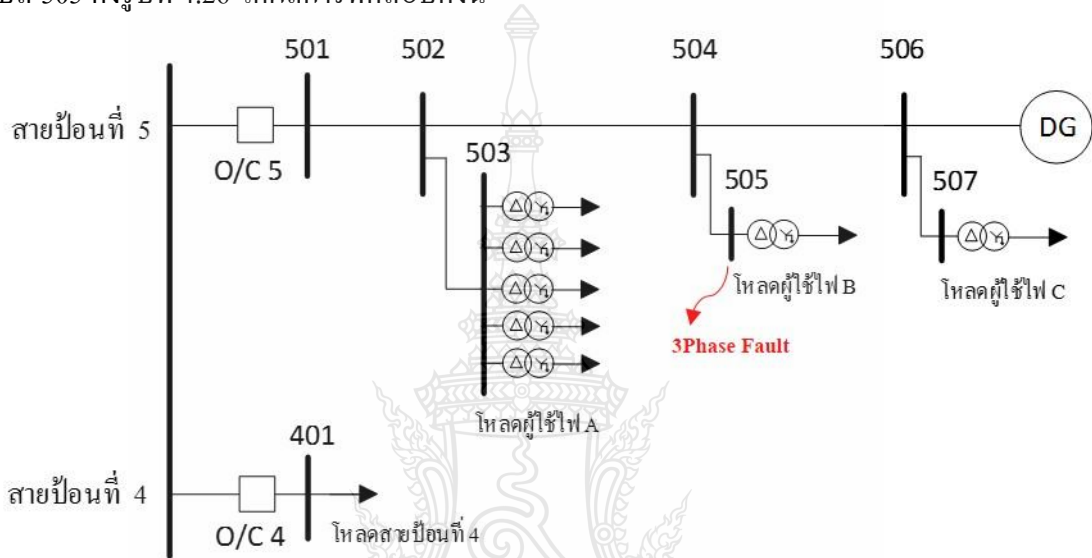


รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.2.2.3

### 4.3 กรณีที่ 3 เกิดการลัดวงจรที่บัส 505

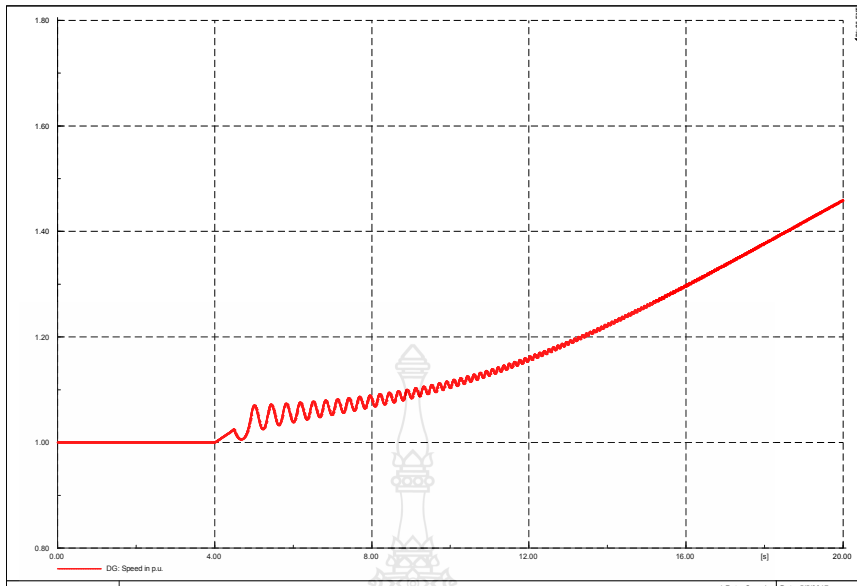
ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้า เพื่อหาค่าเวลาการกำจัด กระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) และการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าด้วย TCSC เมื่อจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 505 ณ เวลา  $t = 4$  วินาที กับระบบไฟฟ้าทั้ง 2 สถานะ คือ

4.3.1 สำหรับสถานะระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ เมื่อการลัดวงจรที่บัส 505 ดังรูปที่ 4.26 ได้ผลการทดสอบดังนี้

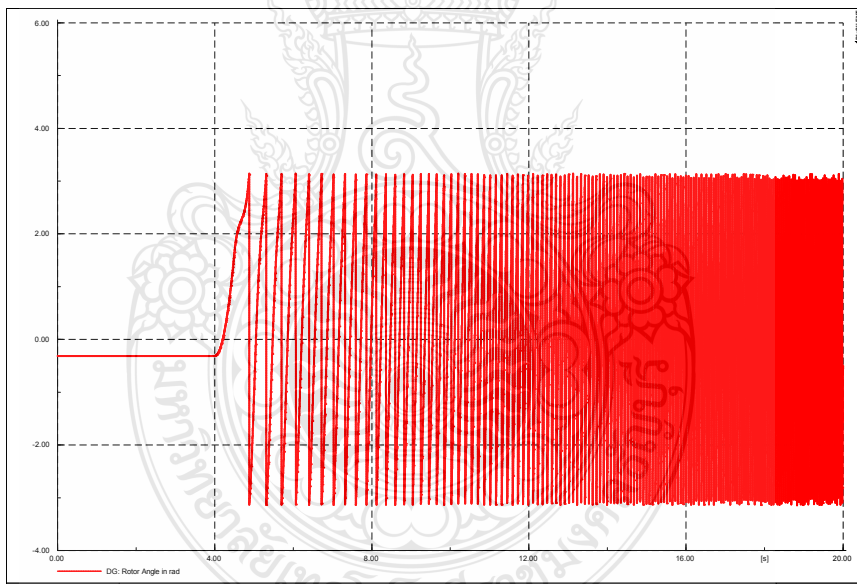


รูปที่ 4.26 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ บัส 505

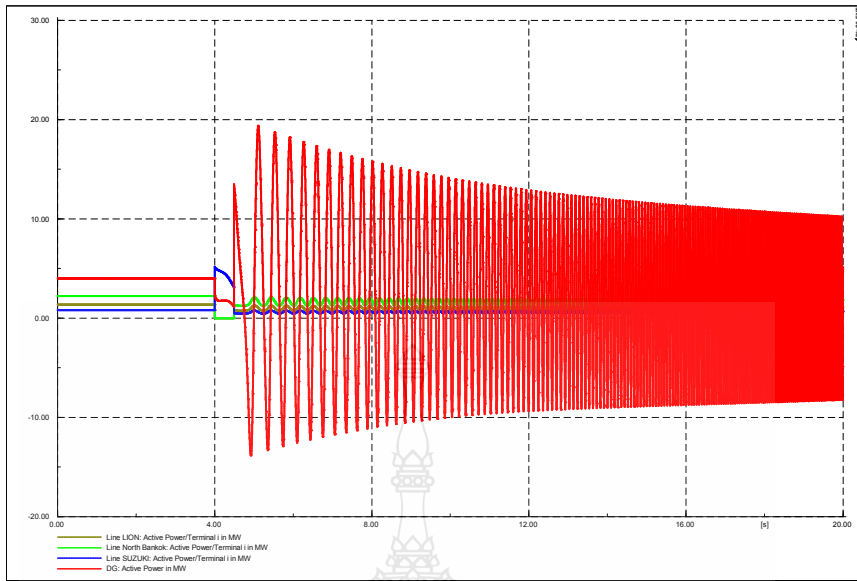
4.3.1.1 การลัดวงจรในช่วงระยะเวลา  $t > 0.48$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเกิดการแกว่งตัวจนไม่สามารถเข้าสู่สถานะสมดุลได้ ซึ่งหมายความว่ามีการลัดวงจรในช่วงระยะเวลาเกินกว่าค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเอง โดยผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Speed, p.u.), ค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Angle, rad), ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสต่างๆ (Active Power, MW) และค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ (Voltage, p.u.) แสดงได้ดังรูปที่ 4.27 – 4.30



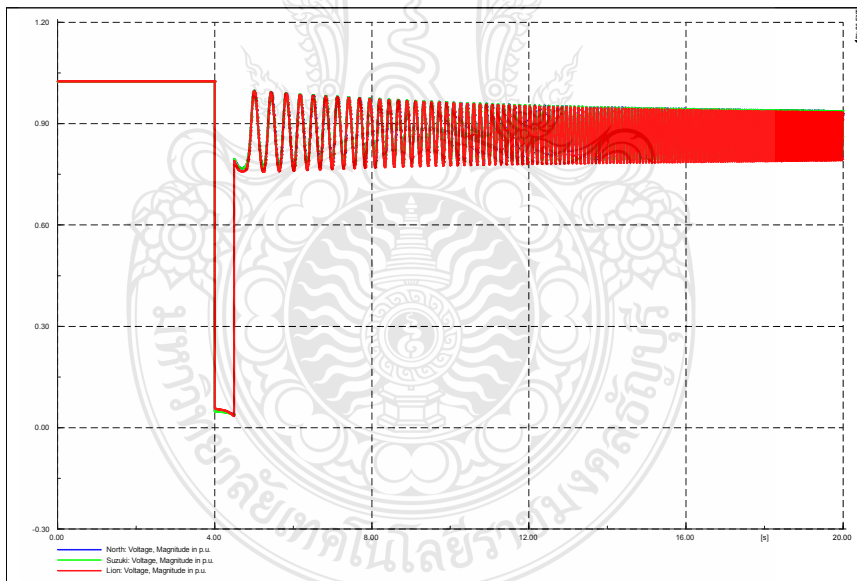
รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.1



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.1



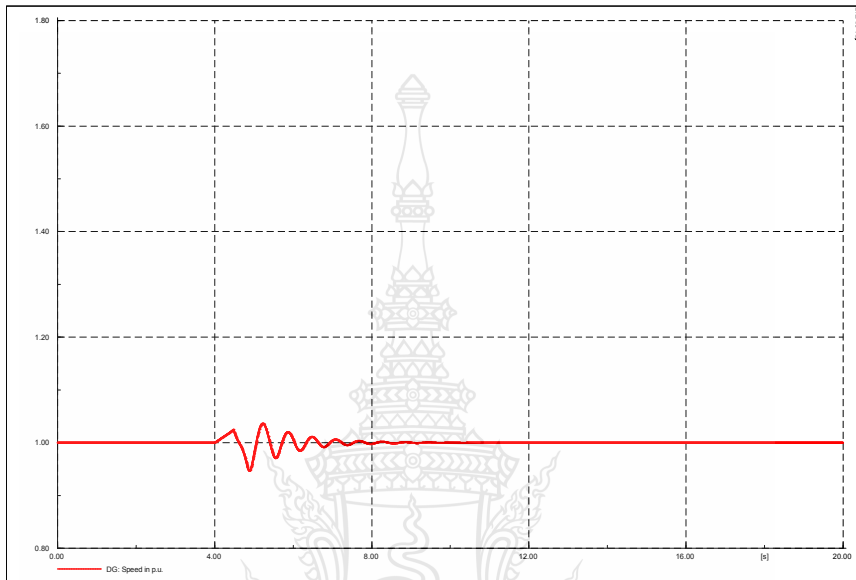
รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.3.1.1



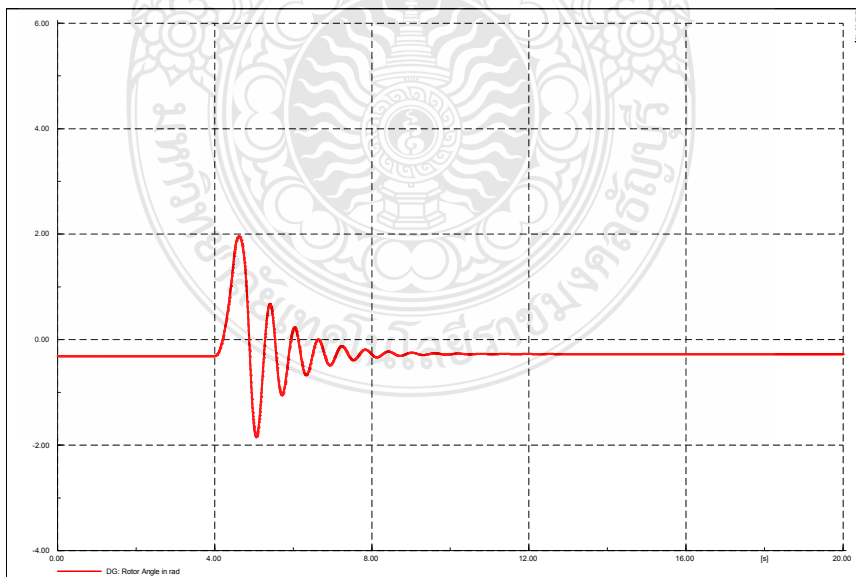
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.3.1.1

4.3.1.2 การลัดวงจรภายในช่วงระยะเวลา  $t \leq 0.48$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เกิดการแกว่งตัวในช่วงแรก แต่สามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ ซึ่งหมายความว่ามีการลัดวงจรในช่วงระยะเวลาต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง โดยผล

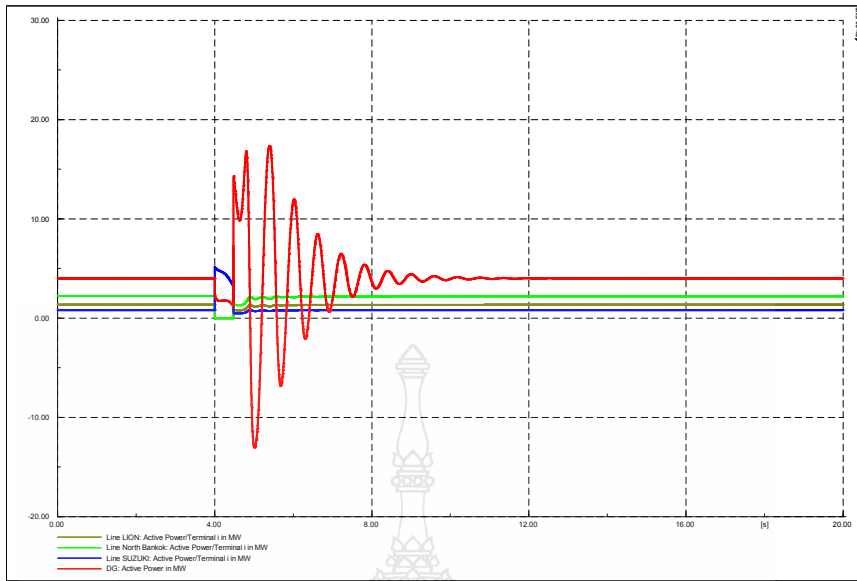
การทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Speed, p.u.), ค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Angle, rad), ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสต่างๆ (Active Power, MW) และค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ (Voltage, p.u.) แสดงได้ดังรูปที่ 4.31 – 4.34



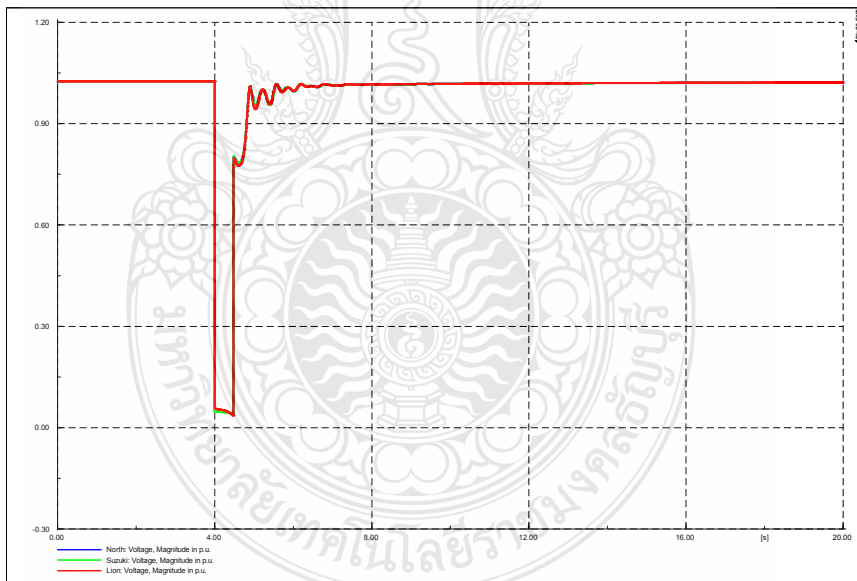
รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.2



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.1.2

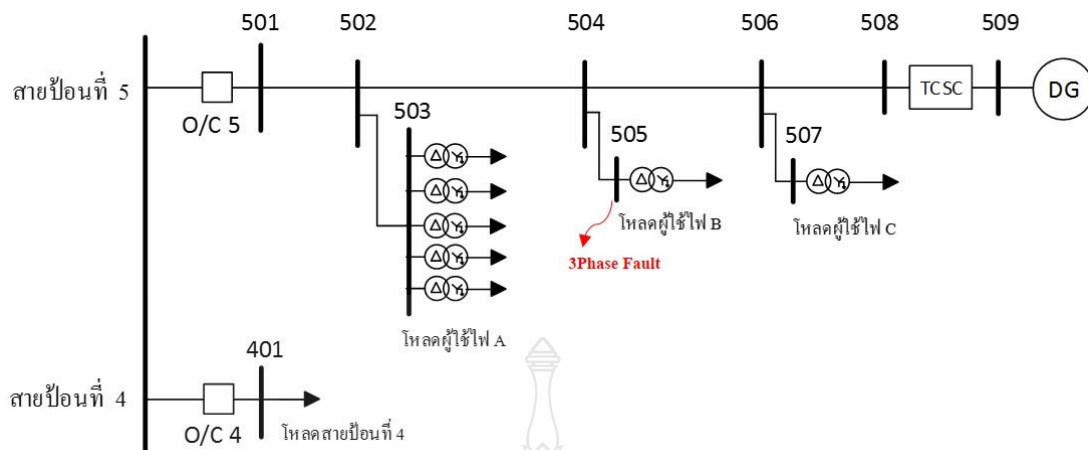


รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2



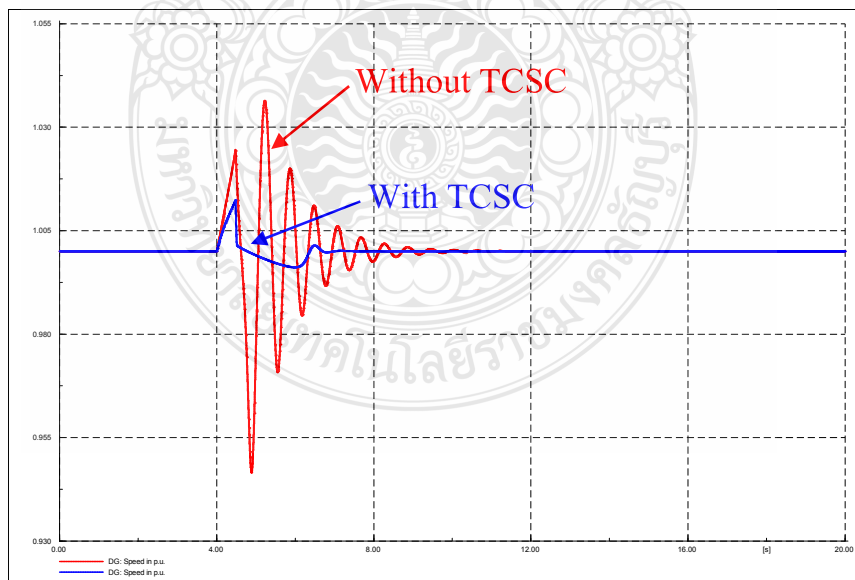
รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ กรณี 4.2.1.2

4.3.2 สำหรับสถานระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ และมี TCSC ติดตั้งอยู่ เมื่อการลัดวงจรที่บัส 505 ดังรูปที่ 4.35 ได้ผลการทดสอบดังนี้



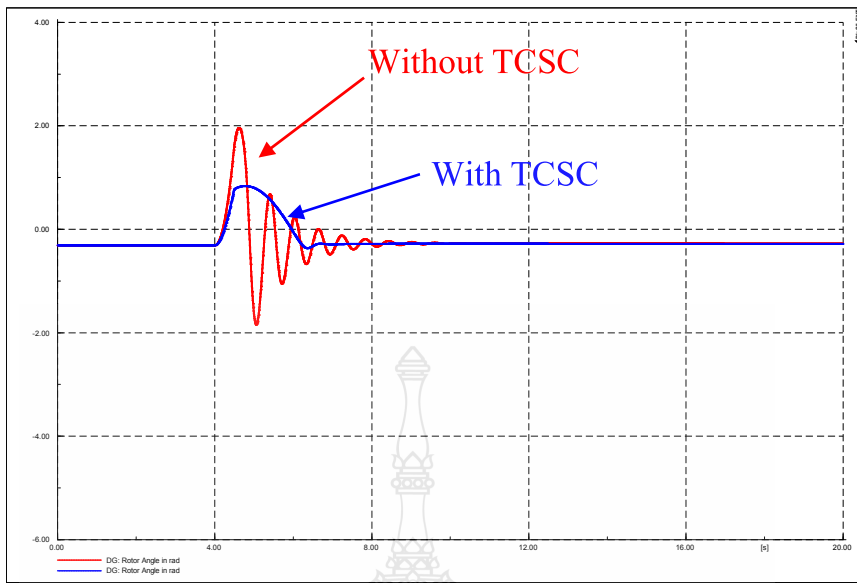
รูปที่ 4.35 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ ที่มี TCSC ติดตั้งอยู่ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ บัส 505

4.3.2.1 การลัดวงจรภายในช่วงระยะเวลา  $t \leq 0.48$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เกิดการแกว่งตัวเพียงเล็กน้อย และสามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว โดยผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วโรเตอร์ และค่าความเร็วเชิงมุมของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ระหว่างก่อนและหลังติดตั้ง TCSC แสดงได้ดังรูปที่ 4.36 – 4.37 ตามลำดับ



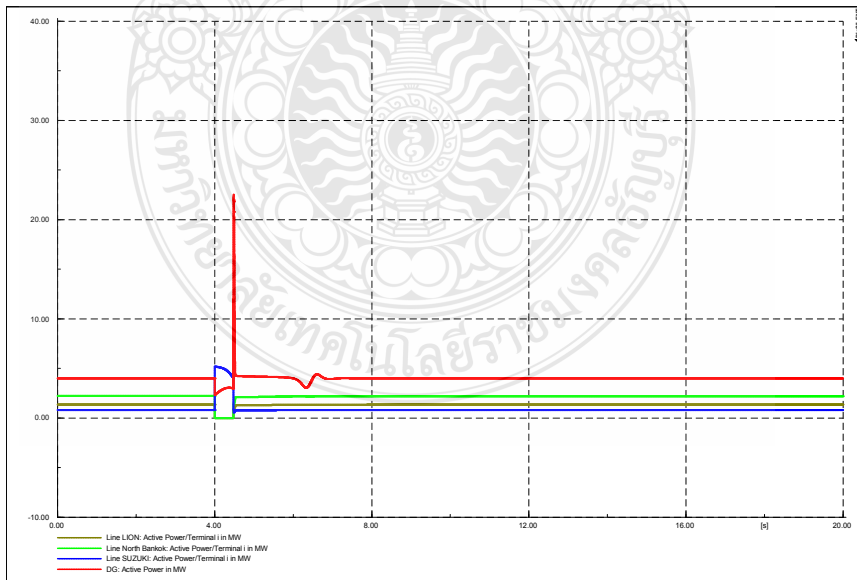
รูปที่ 4.36 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1



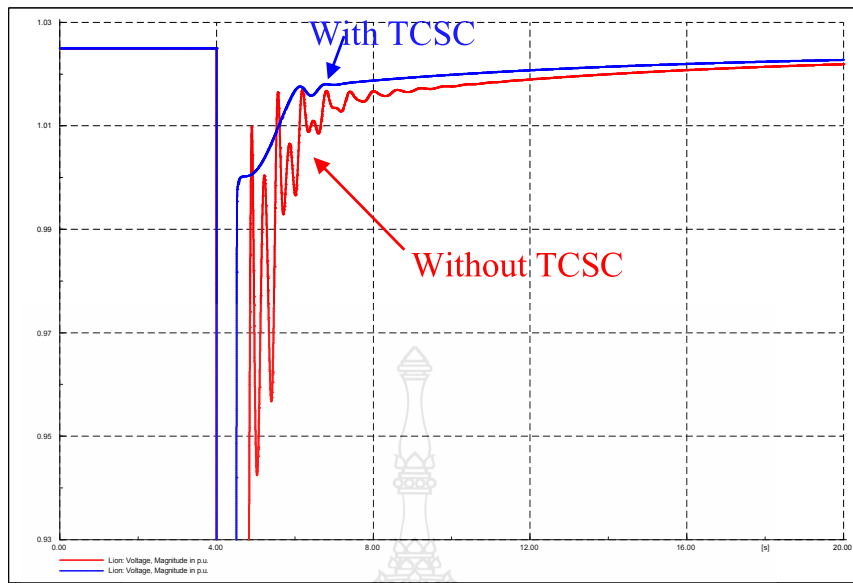


รูปที่ 4.37 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ก่อนและหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1

กำลังไฟฟ้าปรากฏและแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ มีการแกว่งตัวที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ

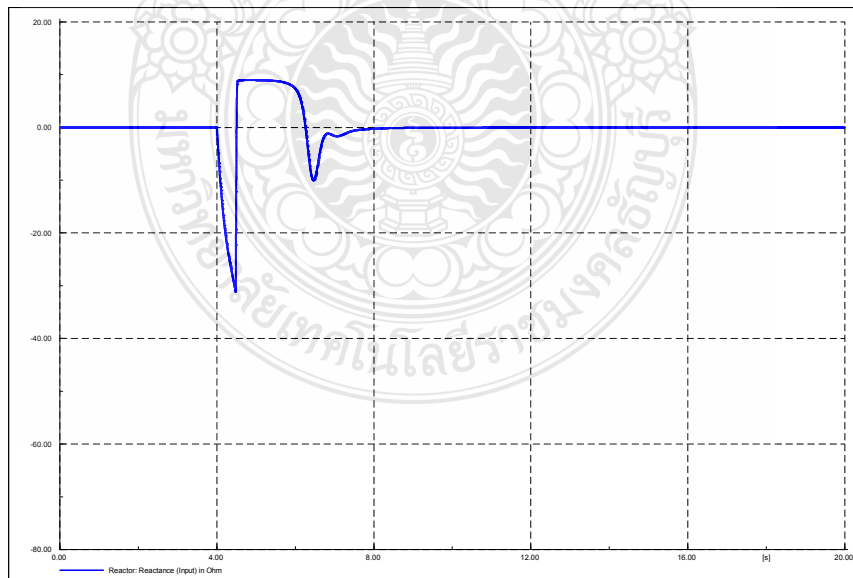


รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสต่างๆ หลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1



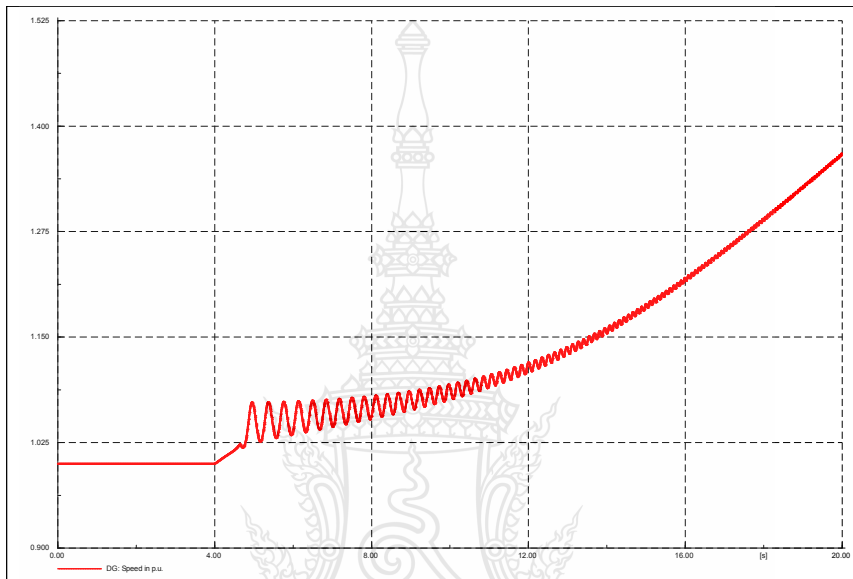
รูปที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่เครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ก่อน และหลังติดตั้ง TCSC กรณี 4.3.2.1

โดยมีค่ารีแอคแตนซ์ของ TCSC (ohm) ที่เปลี่ยนแปลงไป ตามการชดเชยค่า ความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.40

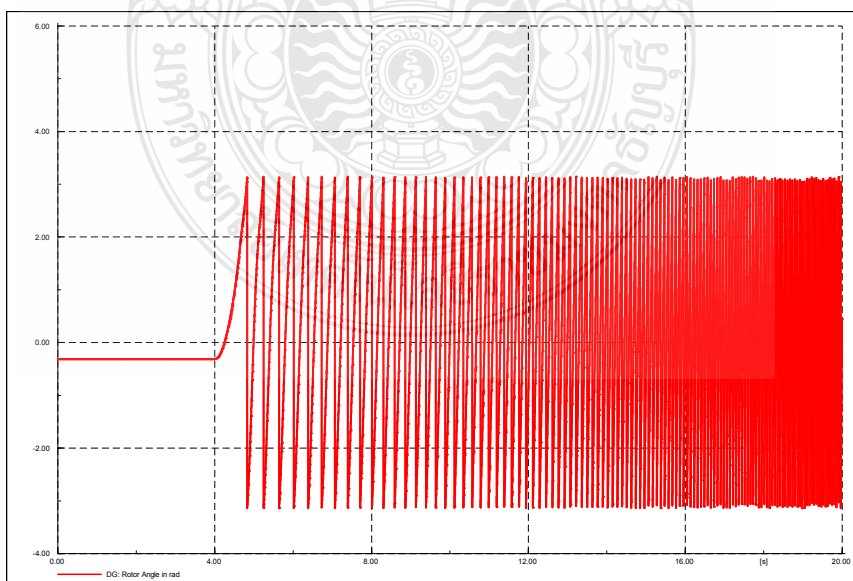


รูปที่ 4.40 ค่ารีแอคแตนซ์ของ TCSC กรณี 4.3.2.1

4.3.2.2 การลัดวงจรในช่วงระยะเวลา  $t > 0.64$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเกิดการแกว่งตัวจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งหมายความว่ามีการลัดวงจรในช่วงระยะเวลาเกินกว่าค่ากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเอง โดยผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Speed, p.u.), ค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Roter Angle, rad) แสดงได้ดังรูปที่ 4.41 – 4.42

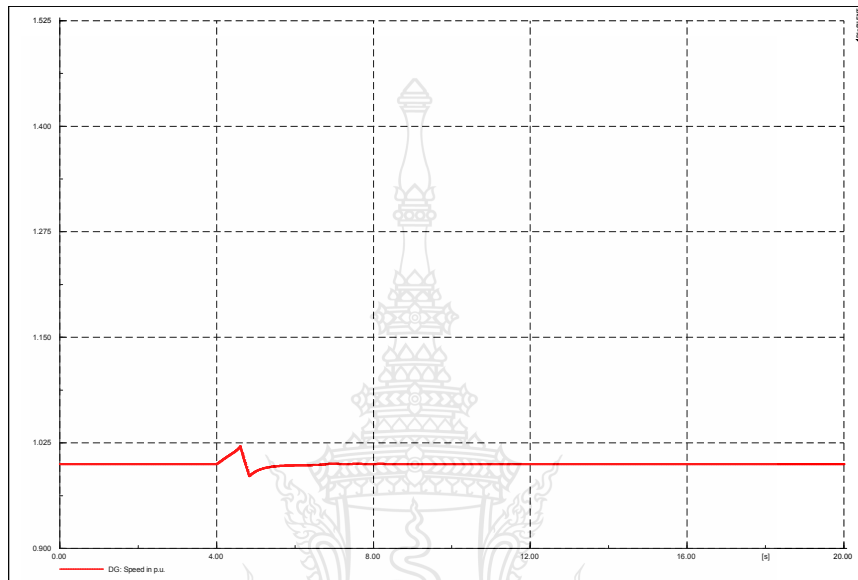


รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.2

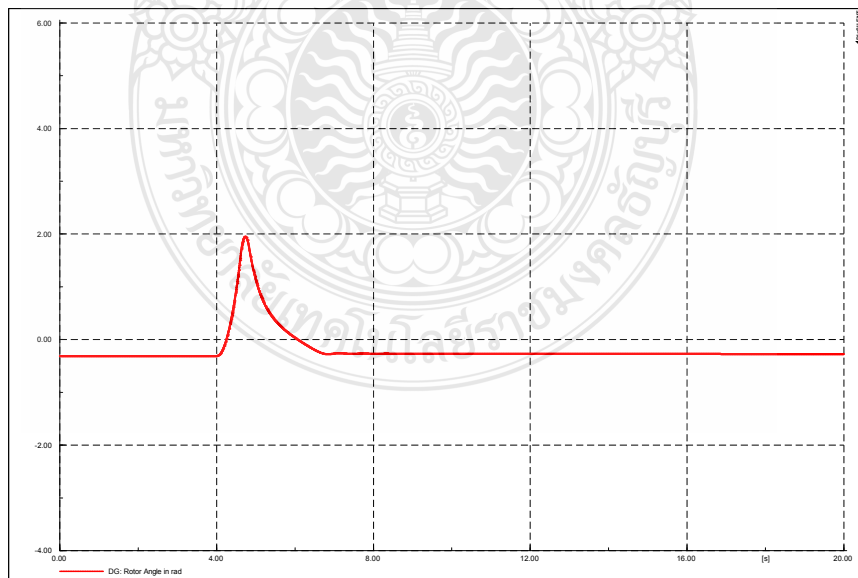


รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.2

4.3.2.3 การลัดวงจรภายในช่วงระยะเวลา  $t \leq 0.64$  วินาที พบว่าโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เกิดการแกว่งตัวเล็กน้อย และสามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว โดยผลการทดสอบค่าความเร็ว โรเตอร์ และค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว แสดงได้ดังรูปที่ 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ

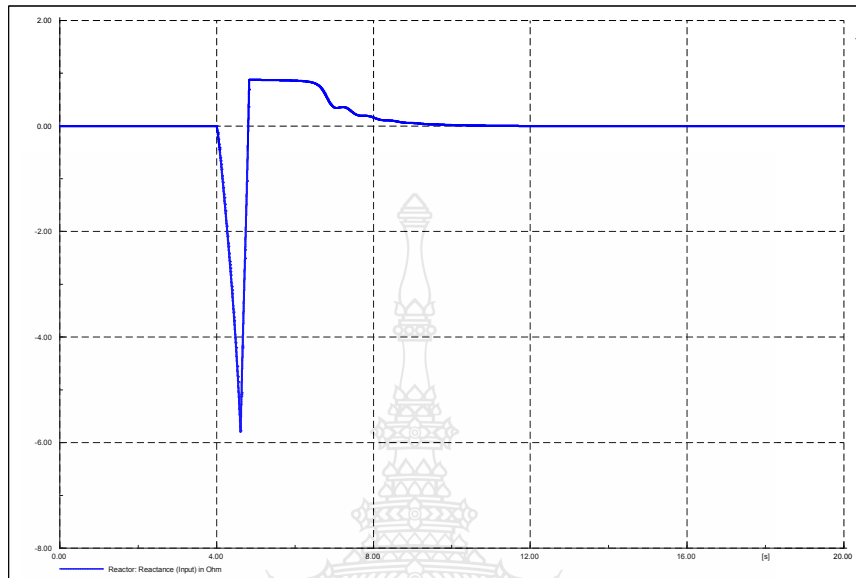


รูปที่ 4.43 ผลการทดสอบค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.3



รูปที่ 4.44 ผลการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณี 4.3.2.3

โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC (ohm) ที่เปลี่ยนแปลงไป ตามการชดเชยค่าความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC กรณี 4.3.2.3

#### 4.4 สรุป

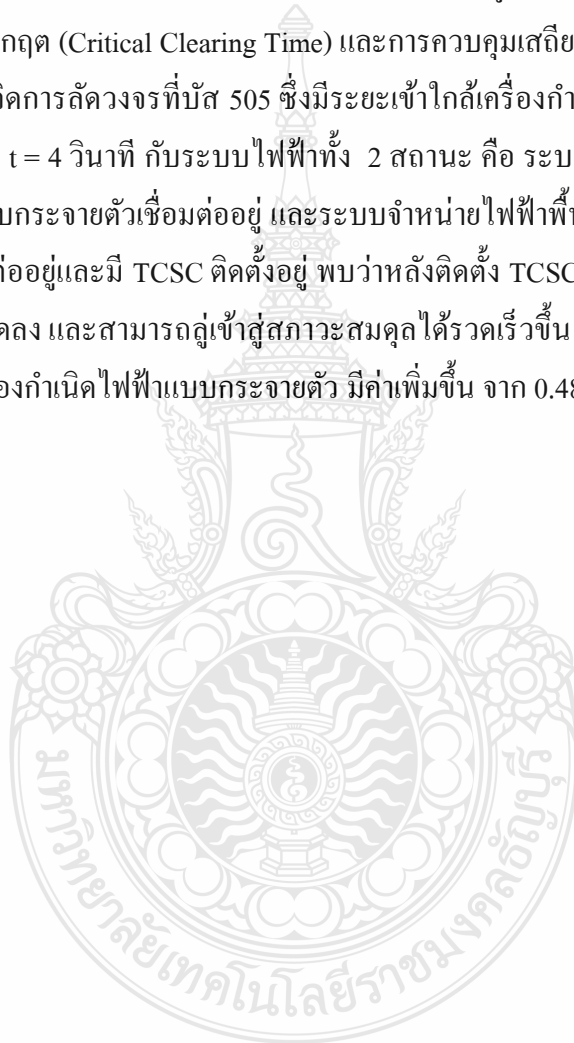
ผลการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over Current Relay ของสายป้อนข้างเคียง และการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้า ด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้ผลการทดสอบดังนี้

กรณีที่ 1 ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over current Relay ของวงจรขาออกสายป้อนที่ 4 ซึ่งเป็นสายป้อนข้างเคียง เมื่อจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 401 กับระบบไฟฟ้าทั้ง 3 สถานะ คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน, ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่และมี TCSC ติดตั้งอยู่ พบว่าหลังติดตั้ง TCSC ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่ผ่าน Over Current Relay ของสายป้อน 4 มีค่าลดลงจาก 3.920 กิโลแอมป์ เป็น 3.376 กิโลแอมป์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าก่อนมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่

กรณีที่ 2 ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าเพื่อหาค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) และการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าด้วย TCSC เมื่อจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 503 ณ เวลา  $t = 3$  วินาที กับระบบไฟฟ้าทั้ง 2 สถานะ คือ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่และมี TCSC ติดตั้งอยู่ พบว่าหลังติดตั้ง TCSC ทำให้โรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งตัวลดลง และสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น รวมทั้งค่าระยะเวลากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.60 วินาที เป็น 0.95 วินาที

กรณีที่ 3 ผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าเพื่อหาค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) และการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าด้วย TCSC เมื่อจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 505 ซึ่งมีระยะเข้าไปใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายมากขึ้นกว่ากรณี 2 ณ เวลา  $t = 4$  วินาที กับระบบไฟฟ้าทั้ง 2 สถานะ คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐานที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่และมี TCSC ติดตั้งอยู่ พบว่าหลังติดตั้ง TCSC ทำให้โรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งตัวลดลง และสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น รวมทั้งค่าระยะเวลากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.48 วินาที เป็น 0.64 วินาที



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าด้วย TCSC โดยพิจารณาเงื่อนไขลำดับการทำงานของรีเลย์ป้องกันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over Current Relay ของสายป้อนข้างเคียง และการควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์

5.1.1 กรณีที่ 1 ในการศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าพื้นฐานก่อนและหลังมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และหลังจากการติดตั้ง TCSC โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 401 ซึ่งเป็นสายป้อนข้างเคียง เพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน Over Current Relay ของวงจรขาออกสายป้อนที่ 4 พบว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นฐาน มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับ 3.315 กิโลแอมป์ แต่เมื่อถูกเชื่อมต่อด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว บริเวณปลายสายของสายป้อนที่ 5 ทำให้ค่ากระแสลัดวงจร มีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 3.920 กิโลแอมป์ แต่หลังจากติดตั้ง TCSC สามารถทำให้ค่ากระแสลัดวงจร มีค่าลดลง เป็น 3.376 กิโลแอมป์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าก่อนมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่

5.1.2 กรณีที่ 2 ในการศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และหลังจากการติดตั้ง TCSC โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 503 ณ เวลา  $t = 3$  วินาที เพื่อควบคุมเสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว พิจารณาจากค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) พบว่าหลังติดตั้ง TCSC ทำให้โรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งตัวลดลง และสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น รวมทั้งค่าระยะเวลากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.60 วินาที เป็น 0.95 วินาที แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่ติดตั้ง TCSC สามารถรักษาเสถียรภาพชั่วคราวจากการลัดวงจรได้ดีขึ้น

5.1.3 กรณีที่ 3 ในการศึกษาผลกระทบจากการลัดวงจร ต่อเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่ และหลังจากการติดตั้ง TCSC โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 505 ซึ่งเข้าใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวมากขึ้น ณ เวลา  $t = 4$  วินาที เพื่อควบคุม

เสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว พิจารณาจากค่าเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤต (Critical Clearing Time) พบว่าหลังติดตั้ง TCSC ทำให้โรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งตัวลดลง และสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น รวมทั้งค่าระยะเวลากระแสลัดวงจรวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.48 วินาที เป็น 0.64 วินาที แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่ติดตั้ง TCSC สามารถรักษาเสถียรภาพชั่วคราวจากการลัดวงจรได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งการเกิดลัดวงจรต่างกัน จะส่งผลต่อเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤตแตกต่างกัน โดยเมื่อเกิดการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวมากขึ้น จะทำให้ค่าระยะเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรวิกฤตมีค่าลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาเฉพาะการวิเคราะห์การควบคุมค่ากระแสลัดวงจร และเสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทซิงโครนัส เพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การพิจารณาแบบจำลองโหลดจะใช้เป็นค่ากำลังคงที่ วิทยานิพนธ์นี้ไม่เน้นผลกระทบทางด้านอื่นๆ เช่น คุณภาพไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย



## บรรณานุกรม

- [1] ภาธร มีนาบุญ. (2553). การวิเคราะห์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อต่อร่วมกับผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายย่อย (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [2] อมร อันกรอง. (2556). การชดเชยการแกว่งความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ FACTS (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [3] Saeed lahdi and Loi Lei Lai. (2011). **Affects of TCSC Usages on Distance Protection and Voltage Profile of a System; a Novel**, Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International.
- [4] ภาธร มีนาบุญ , ไพศาล บุญเยี่ยม. (2553). การวิเคราะห์การแกว่งระบบไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้าจำหน่าย 115 KV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อต่อร่วมกับผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายย่อย การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 วันที่ 28-31 ตุลาคม 2553.
- [5] Galu Papy Yuma , Kanzumba Kusakana. (2012) **Damping of Oscillations of the IEEE 14 bus Power System by SVC with STATCOM** 978-1-4577-1829-8/12/\$26.00 ©2012 IEEE.
- [6] P.K. Iyambo, and R. Tzoneva. (2007). **Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Electric Power System.** 1-4244-0987-X/07/\$25.00 ©2007 IEEE.
- [7] R.M. Chabanloo, H.A. Abyaneh, A. Agheli and H. Rastegar. (2011). **Overcurrent relays coordination considering transient behaviour of fault current limiter and distributed generation in distribution power network.** Published in IET Generation, Transmission & Distribution.
- [8] Mojtaba KHEDERZADEH. (2009). **Application of TCSC to restore directional overcurrent relay coordination in systems with distributed generation.** 20<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution. (Prague, 8-11 June 2009)
- [9] บัณฑิต เอื้ออาภรณ์. (2547). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (หน้า 23-38).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. (2553). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. ISBN 978-616-7326-20-7.
- [11] P.K. Iyambo, and R. Tzoneva. (2007) **Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Electric Power System.** 1-4244-0987-X/07/\$25.00 ©2007 IEEE.
- [12] Leonard L. Grigsby. (2012). **Power System Stability and Control, 3rd ed.** The Electric Power Engineering Handbook, ed. CRC Press.
- [13] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. (2000) **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems.** IEEE Press.
- [14] S. Meikandasivam, Rajesh Kumar Nema and Shailendra Kumar Jain. (2008). **Behavioral Study of TCSC Device – A MATLAB/Simulink Implementation.** World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:2, No:9.
- [15] R. Mohan Mathur and Rajiv K. Varma. (2002). **THYRISTOR- BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS.** IEEE Press and Wiley-Interscience.
- [16] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara. (2002). **Power Electronic Control in Electrical System.** Newnes Power Engineering Series.
- [17] บริษัท ไอต้า เอ็นจิเนียริง จำกัด. (มิถุนายน 2559). มาตรฐาน **Substation Equipment and Protective.** ch10-Protection สืบค้นจาก <http://www.aida-engineering.co.th/>
- [18] กลุ่มบริษัทธุรกิจค้าร่วม (Consortium), บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด, บริษัท จีไอเอส ดาต้า จำกัด, บริษัท คอนโทรล ดาต้า (ประเทศไทย) จำกัด. (2552). **คู่มือการฝึกอบรม โปรแกรมประยุกต์ Network Analysis and PowerFlow Modeling (Training Manual).** โครงการพัฒนาสารสนเทศระบบไฟฟ้าทางภูมิศาสตร์ ระยะที่ 2, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ตารางพิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลอากาศ

และตารางซีเควินซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศสำหรับสายจำหน่าย

22, 33 kV ของ กฟภ.

ตารางพิกัดกระแสใช้งานของเคเบิลอากาศ (SAC)  
TABLE OF CURRENT RATINGS OF SPACED AERIAL CABLE

พิกัดแรงดัน (kV) VOLTAGE RATING (kV)	กระแสใช้งาน (แอมแปร์) CURRENT RATING (Amperes)						
	พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ (ต.มม.) NOMINAL CROSS-SECTION AREA OF CONDUCTOR (mm <sup>2</sup> )						
	50	70*	95	120	150*	185	240*
22	180	220	270	315	360	410	490
33	180	220	270	315	360	410	490

หมายเหตุ

NOTES

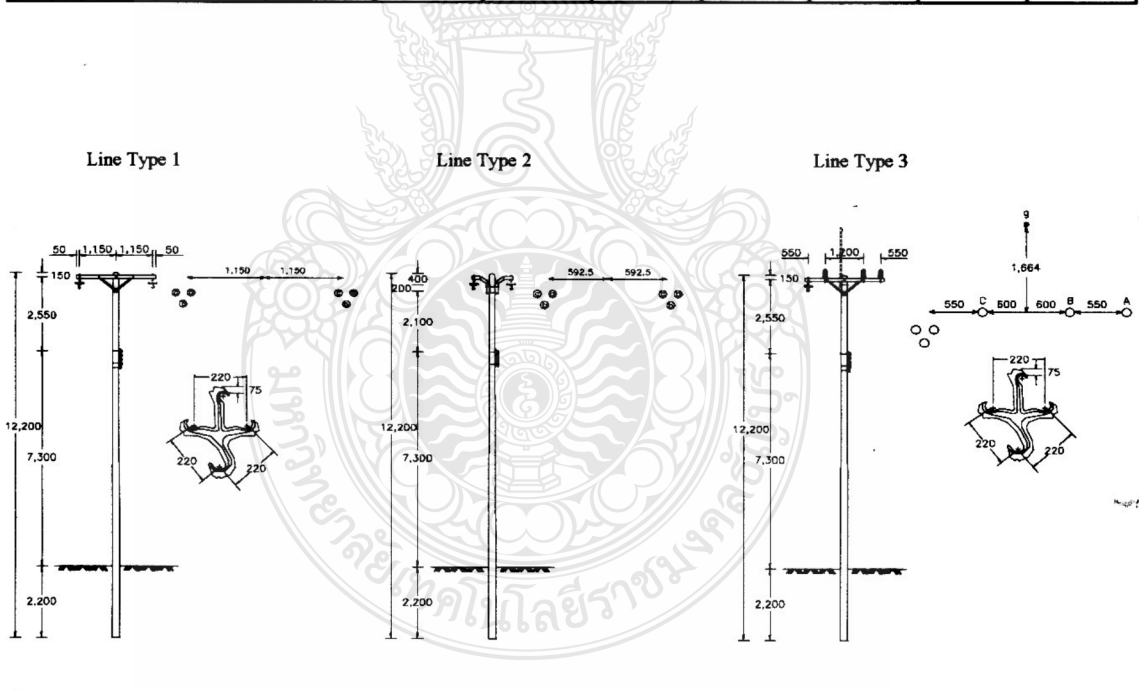
- ตารางนี้ใช้สำหรับเคเบิลอากาศชนิดตัวนำอะลูมิเนียม ที่พาดสายในบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมดังนี้ :-
  - กลางแจ้งถูกแสงอาทิตย์โดยตรง
  - ลมนิ่ง
  - อุณหภูมิโดยรอบไม่เกิน 40° C
- ตารางนี้คำนวณตามมาตรฐาน IEC PUBLICATION 287-1982
- \* ปัจจุบันไม่มีซื้อมาใช้งานแล้ว

- THIS TABLE IS USED FOR ALUMINIUM AERIAL CABLE INSTALLED IN LOCATION WHERE :-
  - DIRECTLY EXPOSED TO SOLAR RADIATION.
  - STILL AIR;
  - THE AMBIENT TEMPERATURE IS NOT IN EXCESS OF 40° C .
- THIS TABLE IS CALCULATED ACCORDING TO IEC STANDARD PUBLICATION 287-1982 .
- \* NO PURCHASING ANY MORE .

กองวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล ฝ่ายวิศวกรรม	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	ใช้แทนแบบ .....
ผู้เขียน .....	ผู้ตรวจ .....	ฐานทุนโดยแบบ .....
ผู้สำรวจ .....	วิศวกร .....	เขียนเสร็จวันที่ 4 พค. 2538
หัวหน้าแผนก .....	วิศวกร .....	นับแบบวันที่ .....
ผู้อำนวยการกอง .....	วิศวกร .....	มีเป็น .....
ผู้อำนวยการฝ่าย .....	วิศวกร .....	มาตราส่วน .....
รองผู้อำนวยการเทคนิค พ. ๓๓๑๐๐	ตารางพิกัดกระแสใช้งานของเคเบิลอากาศ	แบบเลขที่ SA1-045/38004
	TABLE OF CURRENT RATING OF SPACED AERIAL CABLE	แผ่นที่ 1 ของจำนวน 1 แผ่น

ตารางซีควีนซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศ สำหรับสายจำหน่าย 22,33 kV 1 วงจร  
TABLE OF SEQUENCE IMPEDANCE OF ARIAL CABLE FOR 22,33 kV DISTRIBUTION LINE 1 CIRCUIT

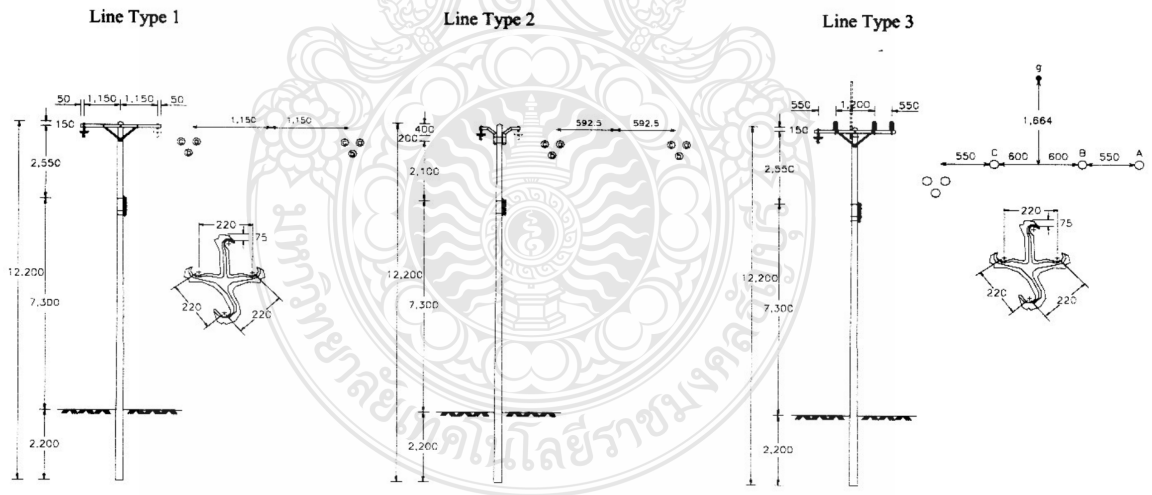
Cond. (mm <sup>2</sup> ) No.cct	Line Type	Sequence	Surge Impedance		Attenuation db/km	Velocity km/sec	Wavelength ohm/km	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Susceptance S/km
			Magnitude ohm	Angle degree						
1 CIRCUIT										
50	1,3	Zero	1109.90	-14.66	0.0040828	1.7489E+05	3497.70	1.009500	1.796800	1.6729E-06
		Positive	427.23	-35.44	0.0095318	2.0372E+05	4074.50	0.763980	0.264950	4.4301E-06
	2	Zero	1046.20	-15.31	0.0043124	1.7317E+05	3463.50	1.002000	1.693600	1.7977E-06
		Positive	468.19	-33.71	0.0085192	2.1366E+05	4273.10	0.764030	0.317890	3.7752E-06
120	1,3	Zero	1030.60	-8.88	0.0024185	1.7638E+05	3527.50	0.567060	1.769400	1.7492E-06
		Positive	282.85	-26.80	0.0055308	2.4923E+05	4984.60	0.321520	0.237030	4.9928E-06
	2	Zero	1030.70	-8.89	0.0024181	1.7642E+05	3528.50	0.567020	1.769100	1.7486E-06
		Positive	283.01	-26.79	0.0055271	2.4928E+05	4985.50	0.321520	0.237230	4.9885E-06
185	1,3	Zero	1007.00	-7.34	0.0020000	1.7574E+05	3514.90	0.459960	1.755800	1.7898E-06
		Positive	241.72	-21.87	0.0041511	2.6389E+05	5277.70	0.214410	0.224020	5.3073E-06
	2	Zero	1007.40	-7.34	0.0019992	1.7580E+05	3516.00	0.459940	1.755800	1.7886E-06
		Positive	241.71	-21.87	0.0041513	2.6388E+05	5277.70	0.214410	0.224010	5.3076E-06



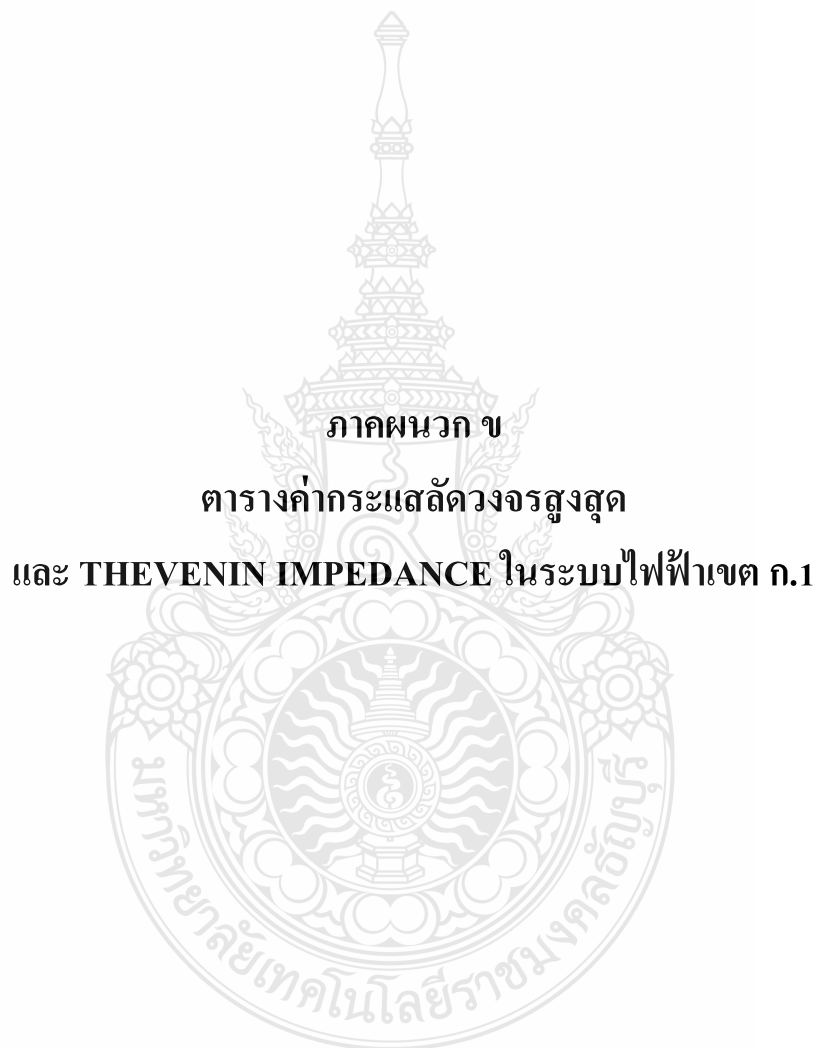
กองวิจัย ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	ใช้แทนแบบ SB2-015/30004 ถูกแทนโดยแบบ.....
ผู้เขียน..... สรศักดิ์..... ผู้สำรวจ..... วิศวกร..... ส.ส.ค. หัวหน้าแผนก..... ส.ส.ค. ผู้อำนวยการกอง..... ผู้อำนวยการฝ่าย.....	ผู้ว่าการ..... <i>กมล</i>  ตารางซีควีนซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศ สำหรับสายจำหน่าย 22,33 kV ของ กฟภ.	เขียนเสร็จวันที่ 9 พ.ย. 2541 แก้ไขแบบวันที่..... มิติเป็น..... มาตราส่วน.....
รองผู้ว่าการฝ่ายวางแผนและ พัฒนาระบบไฟฟ้า <i>กมล</i>	TABLE OF SEQUENCE IMPEDANCE OF AERIAL CABLE FOR PEA 22,33 kV DISTRIBUTION LINE	แบบเลขที่...SB2-015/41005 แผ่นที่.1.ของจำนวน.2.แผ่น

ตารางซีเควินซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศ สำหรับสายจำหน่าย 22,33 kV 2 วงจร  
TABLE OF SEQUENCE IMPEDANCE OF ARIAL CABLE FOR 22,33 kV DISTRIBUTION LINE 2 CIRCUITS

Cond. (mm <sup>2</sup> ) No.cct	Line Type	Sequence	Surge Impedance		Attenuation db/km	Velocity km/sec	Wavelength ohm/km	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Susceptance S/km
			Magnitude ohm	Angle degree						
2 CIRCUITS										
50	1	Zero	1076.20	-15.45	0.0044183	1.7068E+05	3413.50	1.055300	1.763600	1.7744E-06
		Positive	427.19	-35.44	0.0095329	2.0370E+05	4074.10	0.763990	0.264940	4.4310E-06
	2	Zero	1045.90	-15.63	0.0045984	1.6596E+05	3319.30	1.066500	1.757600	1.8793E-06
		Positive	427.09	-35.44	0.0095352	2.0366E+05	4073.10	0.763990	0.264940	4.4331E-06
	3	Zero	868.92	-15.38	0.0054663	1.3731E+05	2746.20	1.054500	1.771800	2.7309E-06
		Positive	402.58	-35.45	0.0101280	1.9185E+05	3836.90	0.764750	0.264770	4.9935E-06
120	1	Zero	994.37	-9.72	0.0027159	1.7218E+05	3443.50	0.612900	1.735800	1.8617E-06
		Positive	282.98	-26.79	0.0055278	2.4925E+05	4985.00	0.321520	0.237220	4.9897E-06
	2	Zero	964.32	-9.92	0.0028534	1.6724E+05	3344.90	0.624100	1.729800	1.9775E-06
		Positive	282.90	-26.79	0.0055293	2.4918E+05	4983.70	0.321530	0.237210	4.9923E-06
	3	Zero	786.86	-9.67	0.0034267	1.3567E+05	2713.30	0.612040	1.744100	2.9853E-06
		Positive	263.66	-26.83	0.0059492	2.3202E+05	4640.50	0.322290	0.237040	5.7550E-06
185	1	Zero	970.25	-8.18	0.0022874	1.7154E+05	3430.70	0.505820	1.722500	1.9070E-06
		Positive	241.68	-21.87	0.0041517	2.6386E+05	5277.10	0.214410	0.224010	5.3086E-06
	2	Zero	939.79	-8.38	0.0024150	1.6647E+05	3329.40	0.517010	1.716500	2.0298E-06
		Positive	241.61	-21.87	0.0041530	2.6378E+05	5275.60	0.214410	0.224000	5.3117E-06
	3	Zero	758.89	-8.14	0.0029202	1.3358E+05	2671.50	0.505150	1.730800	3.1306E-06
		Positive	223.64	-21.94	0.0045047	2.4394E+05	4878.90	0.215180	0.223830	6.2080E-06



กองวิจัย ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	ใช้แทนแบบ SB2-015/3000
ผู้เขียน.....สุรศักดิ์..... ผู้สำรวจ..... วิศวกร..... หัวหน้าแผนก..... ผู้อำนวยการกอง..... ผู้อำนวยการฝ่าย.....	ผู้ว่าการ.....  ตารางซีเควินซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศ สำหรับสายจำหน่าย 22,33 kV ของ กฟภ.	ถูกแทนโดยแบบ..... เขียนเสร็จวันที่ 9 พ.ย. 2541 แก้ไขวันที่..... มิติเป็น..... มาตราส่วน.....
รองผู้ว่าการฝ่ายวางแผนและ พัฒนาระบบไฟฟ้า	TABLE OF SEQUENCE IMPEDANCE OF AERIAL CABLE FOR PEA 22,33 kV DISTRIBUTION LINE	แบบเลขที่...SB2-015/41005 แผ่นที่ 2 ของจำนวน 2 แผ่น



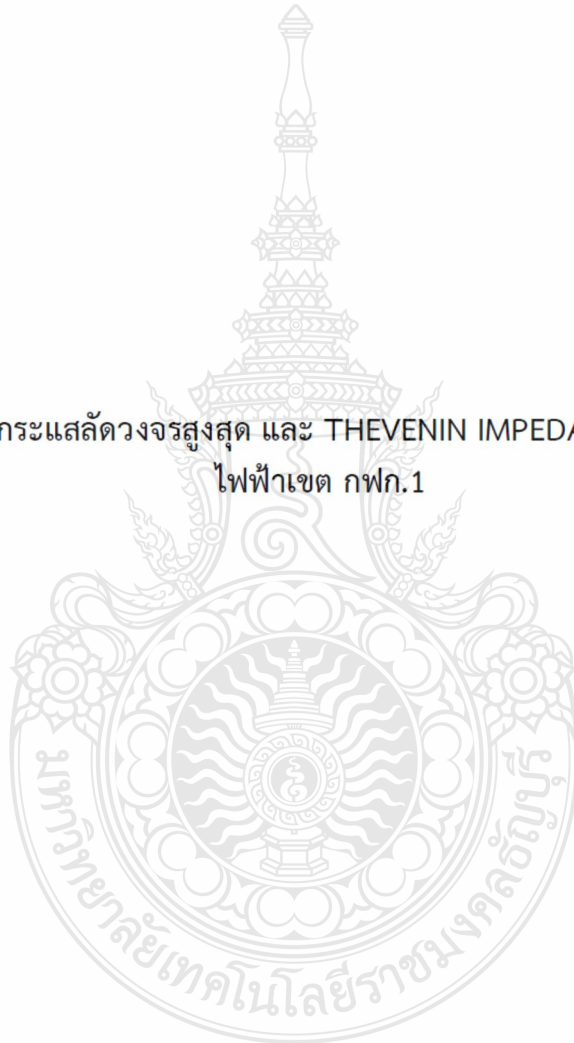
ภาคผนวก ข

ตารางค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด

และ THEVENIN IMPEDANCE ในระบบไฟฟ้าเขต ก.1



ตารางค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด และ THEVENIN IMPEDANCE ในระบบ  
ไฟฟ้าเขต กฟภ.1



## สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.1 (กฟภ.)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS kV	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
1 กบินทร์บุรี	115		5.829	2.949	0.01080	0.08545	0.01073	0.08555	0.05283	0.33424
	22-TP1	50	7.812	0.986	0.02011	0.33534	0.02004	0.33546	7.88011	0.32270
	22-TP2	40	6.695	0.986	0.01828	0.39154	0.01821	0.39166	7.87828	0.29733
2 คลองเจ็ด (ข้าวคราว)	115		4.883	2.337	0.01468	0.10175	0.01460	0.10257	0.06822	0.43283
	22-TP1	25	6.106	6.687	0.02253	0.42922	0.02244	0.43013	0.00000	0.31710
3 คลองสี่	115		4.752	2.268	0.01513	0.10457	0.01506	0.10539	0.07034	0.44642
	22-TP1	50	6.350	7.000	0.02306	0.41262	0.02298	0.41352	0.00638	0.29733
	22-TP2	50	6.350	7.000	0.02306	0.41262	0.02298	0.41352	0.00638	0.29733
4 คลองหลวง	115		6.767	3.391	0.01015	0.07350	0.01007	0.07432	0.04536	0.29150
	22-TP1	50	6.929	7.457	0.01757	0.37836	0.01748	0.37927	0.00638	0.29733
	22-TP2	50	6.929	7.457	0.01757	0.37836	0.01748	0.37927	0.00638	0.29733
5 โคนชัย	115		11.920	4.926	0.00550	0.04176	0.00516	0.04195	0.04534	0.21690
	22-TP1	50	7.188	0.987	0.01263	0.36490	0.01225	0.36511	7.87847	0.31886
	22-TP2	50	7.120	0.987	0.01263	0.36836	0.01225	0.36857	7.87847	0.32233
6 ดอนพุด	115		7.075	4.089	0.01065	0.07015	0.01059	0.07026	0.03415	0.22377
	22-TP1	50	6.647	7.115	0.01808	0.39438	0.01802	0.39450	0.00000	0.31710
	22-TP2	50	6.647	7.115	0.01808	0.39438	0.01802	0.39450	0.00000	0.31710
7 ตาลเดี่ยว	115		11.870	6.875	0.00503	0.04199	0.00506	0.04240	0.01965	0.13265
	22-TP1	50	7.496	7.839	0.01191	0.34990	0.01195	0.35034	0.00637	0.30360
	22-TP2	50	7.496	7.839	0.01191	0.34990	0.01195	0.35034	0.00637	0.30360
8 ท่าลาน3	115		26.751	25.076	0.00134	0.01872	0.00136	0.01901	0.00229	0.02212
9 ไทรน้อย	115		15.897	11.296	0.00151	0.03154	0.00151	0.03155	0.00783	0.06980
10 ัญบุรี	115		6.349	3.199	0.00914	0.07854	0.00914	0.07854	0.04628	0.30923
	22-TP1	50	6.812	7.366	0.01645	0.38490	0.01645	0.38491	0.00638	0.29832
	22-TP2	40	6.423	6.914	0.01664	0.40822	0.01664	0.40822	0.00657	0.32163
11 นครนายก2	115		1.911	0.853	0.03877	0.25983	0.03870	0.25994	0.19970	1.22378
	22-TP1	50	4.304	5.111	0.04908	0.60776	0.04900	0.60788	0.00633	0.32130
12 นครหลวง	115		6.659	3.304	0.01032	0.07469	0.01034	0.07498	0.04723	0.30105
	22-TP1	50	6.904	7.442	0.01776	0.37968	0.01778	0.38000	0.00638	0.29733
13 นนทบุรี	115		7.933	4.298	0.00718	0.06287	0.00711	0.06298	0.03452	0.22118
	22-TP1	50	6.781	0.987	0.01426	0.38674	0.01418	0.38686	7.87824	0.30495
	22-TP2	50	6.781	0.987	0.01426	0.38674	0.01418	0.38686	7.87824	0.30495
14 นวนคร1	115		22.690	19.875	0.00063	0.02212	0.00050	0.02322	0.00347	0.03030
	22-TP1	40	6.201	6.317	0.00862	0.42310	0.00848	0.42432	0.00792	0.39872
	22-TP2	40	6.201	6.317	0.00862	0.42310	0.00848	0.42432	0.00792	0.39872
15 นวนคร2	115		18.675	13.811	0.00140	0.02685	0.00127	0.02797	0.00724	0.05379
	22-TP1	40	5.918	6.077	0.00973	0.44332	0.00959	0.44455	0.00819	0.40734
	22-TP2	40	5.918	6.077	0.00973	0.44332	0.00959	0.44455	0.00819	0.40734

แผนกวิเคราะห์ และวางแผนระบบไฟฟ้า 1, 2 กองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า โทร 5384, 5386 โทรสาร 5299

## สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.1 (กฟภ.)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
16 นวนคร3	115		15.145	9.855	0.00239	0.03306	0.00226	0.03418	0.01220	0.08465
	22-TP1	50	7.897	0.990	0.00902	0.33221	0.00888	0.33345	7.87828	0.29576
	22-TP2	50	7.864	0.990	0.00902	0.33359	0.00887	0.33483	7.87828	0.29714
17 บางกระสัน	115		20.384	13.750	0.00233	0.02452	0.00235	0.02474	0.01107	0.05915
	22-TP1	40	8.460	0.990	0.00965	0.31004	0.00967	0.31026	7.87922	0.28552
	22-TP2	40	8.460	0.990	0.00965	0.31004	0.00967	0.31026	7.87922	0.28552
18 บางกะดี	115		17.007	12.070	0.00127	0.02949	0.00127	0.02949	0.00710	0.06542
	22-TP1	40	6.084	0.984	0.00933	0.43124	0.00933	0.43124	7.87982	0.39872
	22-TP2	40	6.027	0.984	0.00932	0.43535	0.00932	0.43535	7.87982	0.40283
19 บางชัน	115		10.523	5.978	0.00417	0.04753	0.00417	0.04753	0.02152	0.15512
	22-TP1	50	7.368	7.749	0.01096	0.35600	0.01096	0.35600	0.00637	0.30360
	22-TP2	50	7.401	7.785	0.01096	0.35444	0.01096	0.35444	0.00637	0.30204
	22-TP3	50	7.409	7.794	0.01096	0.35405	0.01096	0.35405	0.00637	0.30164
20 บางชัน 2 (ข้าวคราว)	115		10.739	6.142	0.00401	0.04658	0.00401	0.04658	0.02076	0.15038
	22-TP1	50	7.019	7.357	0.01450	0.37362	0.01450	0.37362	0.00000	0.32243
	22-TP2	50	7.019	7.357	0.01450	0.37362	0.01450	0.37362	0.00000	0.32243
21 บางไทร	115		4.802	2.342	0.01309	0.10373	0.01309	0.10374	0.06563	0.42902
	22-TP1	50	4.334	5.270	0.02507	0.60501	0.02507	0.60502	0.01064	0.28277
	22-TP2	50	4.346	5.281	0.02507	0.60337	0.02507	0.60338	0.01064	0.28285
23 บางปะหัน	115		8.638	5.397	0.00861	0.05748	0.00856	0.05759	0.02407	0.16091
	22-TP1	50	6.816	7.213	0.01583	0.38467	0.01577	0.38479	0.00633	0.32130
23 บางปะอิน2	115		25.031	22.981	0.00157	0.02000	0.00149	0.02082	0.00228	0.02451
24 บางปะอิน3	115		5.900	2.969	0.01001	0.08450	0.01001	0.08451	0.05027	0.33344
	22-TP1	50	6.741	7.328	0.01741	0.38892	0.01741	0.38893	0.00638	0.29576
25 บางพระครู	115		5.081	2.676	0.01506	0.09766	0.01500	0.09777	0.05618	0.36068
	22-TP1	50	6.454	0.984	0.02298	0.40599	0.02291	0.40611	7.87828	0.29832
	22-TP2	50	6.454	0.984	0.02298	0.40599	0.02291	0.40611	7.87828	0.29832
26 บางพูน	115		11.487	6.725	0.00353	0.04356	0.00353	0.04356	0.01834	0.13539
	22-TP1	50	7.493	7.853	0.01026	0.35006	0.01026	0.35006	0.00637	0.30204
	22-TP2	50	7.493	7.853	0.01026	0.35006	0.01026	0.35006	0.00637	0.30204
27 บ้านลาดทราย	115		13.479	8.120	0.00429	0.03700	0.00422	0.03782	0.01587	0.10906
	22-TP1	50	8.132	8.448	0.01162	0.32252	0.01154	0.32334	0.00732	0.28552
28 บ้านเลน1	115		13.774	8.374	0.00417	0.03621	0.00409	0.03703	0.01522	0.10507
	22-TP1	40	8.152	0.989	0.01149	0.32173	0.01141	0.32256	7.87922	0.28552
	22-TP2	40	8.152	0.989	0.01149	0.32173	0.01141	0.32256	7.87922	0.28552
29 บ้านเลน2 (ข้าวคราว)	115		12.560	7.368	0.00473	0.03969	0.00465	0.04051	0.01800	0.12236
	22-TP1	50	7.689	8.027	0.01159	0.34109	0.01150	0.34200	0.00638	0.29733
	22-TP2	40	7.689	8.027	0.01159	0.34109	0.01150	0.34200	0.00638	0.29733

แผนวิเคราะห์ และวางแผนระบบไฟฟ้า 1, 2 กองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า โทร 5384, 5386 โทรสาร 5299

## สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.1 (กฟภ.)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
30 บ้านสร้าง	115		2.713	1.239	0.02647	0.18317	0.02641	0.18328	0.13568	0.83439
	22-TP1	50	5.243	6.064	0.03556	0.49928	0.03549	0.49940	0.00638	0.29733
31 บ้านใหม่	115		21.678	18.754	0.00026	0.02316	0.00026	0.02316	0.00204	0.03395
	22-TP1	50	8.102	8.320	0.00666	0.32385	0.00666	0.32385	0.00638	0.29832
	22-TP2	50	8.102	8.320	0.00666	0.32385	0.00666	0.32385	0.00638	0.29832
32 ปทุมธานี1	115		6.869	3.557	0.00810	0.07264	0.00810	0.07265	0.04074	0.27432
	22-TP1	50	6.930	7.457	0.01531	0.37840	0.01531	0.37841	0.00638	0.29832
	22-TP2	50	6.930	7.457	0.01531	0.37840	0.01531	0.37841	0.00638	0.29832
33 ปทุมธานี2	115		4.809	2.346	0.01307	0.10359	0.01307	0.10360	0.06551	0.42829
	22-TP1	50	6.445	7.114	0.02079	0.40663	0.02079	0.40664	0.00639	0.29242
	22-TP2	50	6.445	7.114	0.02079	0.40663	0.02079	0.40664	0.00639	0.29242
34 ปทุมธานี3	115		7.397	3.836	0.00736	0.06747	0.00736	0.06747	0.03745	0.25426
	22-TP1	50	5.496	5.798	0.01603	0.47722	0.01603	0.47722	0.00792	0.40283
	22-TP2	50	5.496	5.798	0.01603	0.47722	0.01603	0.47722	0.00792	0.40283
35 ประจันตคาม	115		6.968	3.659	0.00857	0.07154	0.00850	0.07165	0.04143	0.26423
	22-TP1	50	6.973	7.498	0.01582	0.37601	0.01575	0.37613	0.00638	0.29714
36 ปราจีนบุรี2	115		18.704	15.862	0.00139	0.02681	0.00133	0.02691	0.00538	0.04089
37 พระพุทธบาท2 (ข้าวคราว)	115		4.991	2.385	0.01431	0.09957	0.01433	0.09986	0.06711	0.42472
	22-TP1	25	6.245	6.848	0.03347	0.41887	0.03349	0.41919	0.00000	0.30961
38 พุแค	115		6.987	3.494	0.00976	0.07119	0.00978	0.07148	0.04443	0.28364
	22-TP1	50	7.005	7.531	0.01714	0.37425	0.01716	0.37457	0.00638	0.29576
39 มวกเหล็ก	115		11.106	6.281	0.00549	0.04487	0.00552	0.04527	0.02207	0.14735
	22-TP1	50	7.541	7.914	0.01243	0.34778	0.01246	0.34823	0.00638	0.29832
	22-TP2	50	7.541	7.914	0.01243	0.34778	0.01246	0.34823	0.00638	0.29832
40 ม.ธรรมศาสตร์	115		17.342	14.428	0.00176	0.02890	0.00172	0.03149	0.00433	0.04371
	22-TP1	50	9.086	9.401	0.00839	0.28872	0.00835	0.29157	0.00645	0.25686
	22-TP2	50	9.086	9.401	0.00839	0.28872	0.00835	0.29157	0.00645	0.25686
	22-TP3	50	9.086	9.401	0.00839	0.28872	0.00835	0.29157	0.00645	0.25686
41 เมืองเอก (ข้าวคราว)	115		13.049	8.037	0.00270	0.03838	0.00270	0.03838	0.01420	0.10962
	22-TP1	40	7.728	8.064	0.00935	0.33945	0.00935	0.33945	0.00638	0.29714
42 รังสิตใต้	69		7.107	3.486	0.01297	0.11702	0.01297	0.11701	0.06679	0.47998
	22-TP1	50	5.521	6.072	0.02059	0.47491	0.02059	0.47490	0.00629	0.34590
	22-TP2	50	5.521	6.072	0.02059	0.47491	0.02059	0.47490	0.00629	0.34590
43 โรจนะ	115		6.217	3.079	0.01119	0.07997	0.01111	0.08079	0.05031	0.32302
	22-TP1	40	7.171	0.986	0.01851	0.36550	0.01843	0.36632	7.87922	0.28552
	22-TP2	40	7.171	0.986	0.01851	0.36550	0.01843	0.36632	7.87922	0.28552

## สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.1 (กฟภ.)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS kV	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
44 โรจนะ 2	115		16.513	11.288	0.00303	0.03025	0.00297	0.03349	0.00960	0.06877
	22-TP1	50	7.933	8.179	0.00972	0.33069	0.00965	0.33425	0.00638	0.29733
	22-TP2	50	7.933	8.179	0.00972	0.33069	0.00965	0.33425	0.00638	0.29733
45 โรจนะ 3 (ข้าวคราว)	115		5.886	2.891	0.01191	0.08447	0.01183	0.08529	0.05390	0.34535
	22-TP1	40	6.713	7.289	0.01951	0.39046	0.01942	0.39136	0.00638	0.29733
46 ลาดบัวหลวง	115		7.268	3.812	0.00747	0.06867	0.00747	0.06868	0.03747	0.25426
	22-TP1	50	7.123	7.649	0.01462	0.36813	0.01462	0.36814	0.00639	0.29242
	22-TP2	50	7.123	7.649	0.01462	0.36813	0.01462	0.36814	0.00639	0.29242
47 ลาดหลุมแก้ว	115		10.478	6.084	0.00411	0.04774	0.00411	0.04775	0.02079	0.15038
	22-TP1	50	7.495	7.891	0.01091	0.34997	0.01091	0.34998	0.00638	0.29733
48 ลำลูกกา	115		5.556	3.086	0.00878	0.08994	0.00878	0.09001	0.04387	0.30427
	22-TP1	50	6.536	7.124	0.01605	0.40120	0.01605	0.40127	0.00637	0.30204
	22-TP2	50	6.536	7.124	0.01605	0.40120	0.01605	0.40127	0.00637	0.30204
49 วังน้อย	115		9.016	4.793	0.00722	0.05522	0.00714	0.05604	0.03047	0.19976
	22-TP1	50	7.373	7.813	0.01434	0.35566	0.01425	0.35656	0.00638	0.29478
	22-TP2	50	7.443	7.892	0.01434	0.35232	0.01426	0.35322	0.00639	0.29144
50 วังน้อย2 (ข้าวคราว)	115		6.087	2.313	0.01094	0.08174	0.01034	0.08194	0.08753	0.47819
	22-TP1	40	5.364	5.716	0.01998	0.48884	0.01932	0.48906	0.00792	0.39872
51 วังน้ำเย็น	115		2.323	1.058	0.03140	0.21386	0.03133	0.21397	0.15750	0.97885
	22-TP1	50	4.908	5.761	0.04099	0.53312	0.04092	0.53324	0.00638	0.29733
52 วังม่วง	115		5.042	2.427	0.01411	0.09857	0.01414	0.09897	0.06550	0.41590
	22-TP1	50	6.126	6.693	0.02189	0.42784	0.02192	0.42829	0.00634	0.31917
53 วิหารแดง	115		5.026	2.406	0.01420	0.09888	0.01422	0.09917	0.06641	0.42082
	22-TP1	50	6.449	7.083	0.02203	0.40635	0.02206	0.40667	0.00638	0.29733
54 ศรีมหาโพธิ์	115		8.490	4.693	0.00652	0.05877	0.00645	0.05888	0.03106	0.20023
	22-TP1	50	6.793	7.196	0.01352	0.38610	0.01345	0.38622	0.00633	0.32130
55 สระแก้ว	115		5.829	2.944	0.01080	0.08545	0.01073	0.08556	0.05311	0.33509
	22-TP1	50	6.695	7.280	0.01828	0.39154	0.01821	0.39166	0.00638	0.29733
56 สระบุรี 5	115		8.562	4.455	0.00767	0.05813	0.00769	0.05842	0.03375	0.21794
	22-TP1	50	7.327	7.791	0.01505	0.35788	0.01507	0.35820	0.00660	0.29379
	22-TP2	50	7.291	7.751	0.01504	0.35962	0.01507	0.35994	0.00659	0.29553
57 สระบุรี 2	115		26.051	25.756	0.00138	0.01922	0.00141	0.01962	0.00146	0.01948
58 สามโคก	115		8.518	4.558	0.00595	0.05864	0.00595	0.05864	0.03042	0.21044
	22-TP1	50	7.122	7.566	0.01292	0.36825	0.01292	0.36825	0.00637	0.30360
	22-TP2	50	7.122	7.566	0.01292	0.36825	0.01292	0.36825	0.00637	0.30360
59 เสนา	115		4.655	2.224	0.01610	0.10664	0.01610	0.10674	0.07224	0.45581
	22-TP1	50	6.250	6.897	0.02412	0.41922	0.02411	0.41933	0.00637	0.30164
	22-TP2	50	6.250	6.897	0.02412	0.41922	0.02411	0.41933	0.00637	0.30164

แผนกวิเคราะห์ และวางแผนระบบไฟฟ้า 1, 2 กองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า โทร 5384, 5386 โทรสาร 5299

## สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.1 (กฟภ.)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
60 ทนองแค	115		8.913	3.216	0.00680	0.05592	0.00620	0.05611	0.06678	0.34949
	22-TP1	50	6.892	7.286	0.01406	0.38051	0.01340	0.38073	0.00657	0.31886
	22-TP2	50	6.830	7.216	0.01406	0.38397	0.01340	0.38419	0.00656	0.32233
61 ทนองปลิง	115		10.565	3.703	0.00540	0.04721	0.00480	0.04741	0.05977	0.30609
	22-TP1	50	6.751	0.986	0.01250	0.38855	0.01184	0.38877	7.87845	0.33650
	22-TP2	50	6.751	0.986	0.01250	0.38855	0.01184	0.38877	7.87845	0.33650
62 องครักษ์	115		3.377	1.560	0.02194	0.14703	0.02187	0.14786	0.10469	0.65883
	22-TP1	50	5.462	6.215	0.03053	0.47953	0.03045	0.48044	0.00634	0.30495
	22-TP2	50	5.462	6.215	0.03053	0.47953	0.03045	0.48044	0.00634	0.30495
63 อรัญประเทศ	115		3.527	1.646	0.02138	0.14074	0.02140	0.14085	0.14075	0.61466
	22-TP1	50	5.733	6.468	0.02994	0.45681	0.02996	0.45693	0.00637	0.30164
64 อรัญประเทศ 2 (ข้าวคั่ว)	115		3.461	1.613	0.02181	0.14342	0.02182	0.14352	0.14288	0.62793
	22-TP1	25	9.811	11.966	0.02181	0.26660	0.02182	0.26671	0.00000	0.12318
65 อ่างทอง1	115		15.068	14.195	0.00469	0.03299	0.00463	0.03310	0.00448	0.03911
	22-TP1	50	7.977	8.282	0.01155	0.32879	0.01149	0.32891	0.00639	0.29242
	22-TP2	50	8.001	8.308	0.01155	0.32781	0.01149	0.32793	0.00639	0.29144
66 อ่างทอง2	115		22.389	18.829	0.00257	0.02228	0.00256	0.02237	0.00430	0.03478
67 คูคต (ข้าวคั่ว)	69		9.782	5.066	0.00786	0.08518	0.00786	0.08517	0.04140	0.32185
	22-TP1	40	6.382	6.910	0.01501	0.41095	0.01501	0.41093	0.00000	0.31710



ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ  
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8**

4-6 พฤศจิกายน 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**T R E C 8**

**บ้านสินทรัพย์**  
โครงการ 3  
ลำลูกกาคลอง 4 (ตลาดลาดสาว)







การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบ  
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8



เรียน คุณวรรณวิษ จุลกัลป์ และคุณกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความ TREC-8

อ้างถึง รหัสบทความ CP-019

ชื่อบทความ การออกแบบและวิเคราะห์วงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับอุปกรณ์ TCSC

ตามที่ท่านผู้ทรงคุณวุฒิของการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ได้พิจารณาบทความ

รหัสบทความ CP-019

ชื่อเรื่อง การออกแบบและวิเคราะห์วงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับอุปกรณ์ TCSC

ทางผู้จัดการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ขอแจ้งว่า บทความดังกล่าว ได้รับการ ยอมรับให้นำเสนอแบบปากเปล่า (Oral Presentation) ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 นี้ โดยมีรายละเอียดการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแนบท้าย เพื่อปรับแก้ไขให้เป็นบทความฉบับสมบูรณ์ต่อไป

ขอให้ผู้เขียนบทความส่งบทความฉบับสมบูรณ์กลับมาที่ <http://www.reca.or.th/trec8.aspx> ภายในวันที่ 10 ตุลาคม 2558 และสามารถดูรายละเอียดข้อมูลการลงทะเบียนและตารางการนำเสนอได้ที่เว็บไซต์ข้างต้น และที่ทางเว็บไซต์ [www.en.rmutt.ac.th](http://www.en.rmutt.ac.th) ต่อไป

ทางคณะผู้จัดการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ขอขอบพระคุณท่านที่ได้ให้ความสนใจในการนำเสนอผลงานทางวิชาการและงานวิจัยมาเผยแพร่ในการประชุมวิชาการครั้งนี้ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติมสามารถติดต่อได้ที่ [trec8@en.rmutt.ac.th](mailto:trec8@en.rmutt.ac.th)

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนันทฉัตร)

เลขานุการการจัดการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ  
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8

รายนามคณะกรรมการดำเนินงานการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8  
(The 8<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-8))

ด้วยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย กำหนดให้มีการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 (The 8<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Conference:TREC-8) ระหว่างวันที่ 4 – 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่แวดวงวิชาการ และแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ด้านการวิจัย อีกทั้งยังเป็นการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านการวิจัยร่วมกับเครือข่ายการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากภายนอก

เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อย มีประสิทธิภาพและบรรลุวัตถุประสงค์ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการดำเนินงานการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ดังนี้

1. ที่ปรึกษาโครงการ

1.1 พลเอก อนันตพร	กาญจนรัตน์	ประธานที่ปรึกษา
1.2 ศ.ดร.ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	ที่ปรึกษา
1.3 ศ.ดร.ทองเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	ที่ปรึกษา
1.4 ผศ.ดร.วิรัชชัย	โรยรินทร์	ที่ปรึกษา

2. คณะกรรมการอำนวยการ

2.1 อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	ประธานกรรมการ
2.2 รองอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด)	กรรมการ
2.3 รองอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภัทรา โพธิ์พ่วง)	กรรมการ
2.4 รองอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรศักดิ์ ตระกูลขิวพานิตต์)	กรรมการ
2.5 รองอธิการบดี (นายวิชัย พยัคฆ์)	กรรมการ
2.6 รองอธิการบดี (นายวิรัช ไทตระไวศยะ)	กรรมการ
2.7 รองอธิการบดี (นายพงศ์พิชญ์ ถ้วนภูษา)	กรรมการ
2.8 รองอธิการบดี (นางวนิดา ปอน้อย)	กรรมการ
2.9 ผู้ช่วยอธิการบดี (รองศาสตราจารย์สุจิระ ขอบจิตต์เมตต์)	กรรมการ
2.10 ผู้ช่วยอธิการบดี (รองศาสตราจารย์ณัฐา คุปต์ขันธ์)	กรรมการ
2.11 ผู้ช่วยอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพบุสย์ แยมเมื่อน)	กรรมการ
2.12 ผู้ช่วยอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งอรุณ รังรองรัตน์)	กรรมการ
2.13 ผู้ช่วยอธิการบดี (นายวิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร)	กรรมการ
2.14 ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา	กรรมการและเลขานุการ

3. คณะกรรมการดำเนินงาน

3.1 คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	ประธานกรรมการ
3.2 รองคณบดีฝ่ายบริหารและวางแผน	กรรมการ
3.3 รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย	กรรมการ
3.4 รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา	กรรมการ
3.5 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัชชัย โรยรินทร์)	กรรมการ
3.6 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์)	กรรมการ
3.7 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาติ สนธิสมบัติ)	กรรมการ
3.8 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์คำ)	กรรมการ

3.9 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ)	กรรมการ
3.10 หัวหน้าสำนักงานคณบดี	กรรมการ
3.11 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา	กรรมการ
3.12 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	กรรมการ
3.13 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	กรรมการ
3.14 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม	กรรมการ
3.15 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
3.16 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม	กรรมการ
3.17 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ	กรรมการ
3.18 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเกษตร	กรรมการ
3.19 หัวหน้าโครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์	กรรมการ
3.20 หัวหน้าโครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ	กรรมการ
3.21 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรัญ ศรีนนท์ฉัตร)	กรรมการและเลขานุการ
3.22 หัวหน้าสำนักงานบัณฑิตศึกษา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

#### 4. คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

4.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์	ประธานกรรมการ
4.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์คำ	กรรมการ
4.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัชย์ ไชยรินทร์	กรรมการ
4.4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี ศรีนนท์ฉัตร	กรรมการ
4.5 ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง	กรรมการ
4.6 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย แดงแอม	กรรมการ
4.7 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภวิทย์ ลวณะสกล	กรรมการ
4.8 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภานุ ประทุมพนรัตน์	กรรมการ
4.9 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล	กรรมการ
4.10 ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	กรรมการ
4.11 ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมศักดิ์ แก่นทอง	กรรมการ
4.12 ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์	กรรมการ
4.13 ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุณศิริ จักรบุตร	กรรมการ
4.14 นายณัฐภัทร พันธุ์คง	กรรมการ
4.15 นายวีระศักดิ์ ละอองจันทร์	กรรมการ
4.16 นางหิมิง จิ่ง	กรรมการ
4.17 นายมนูศักดิ์ กานทอง	กรรมการ
4.18 นายชัยภพ ศิระวรกุล	กรรมการ
4.19 นางสาวกุลวดี สังข์สนธิ์	กรรมการ
4.20 นายฉัตรชัย วีระนิตสกุล	กรรมการ
4.21 นายเกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์	กรรมการและเลขานุการ
4.22 นางสาวเมธิกา หมั่นทองสุขพร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
4.23 นางสาวเกวลี โพธิ์ทอง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

#### 5. คณะกรรมการฝ่ายพิธีการจัดการประชุม

5.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี ศรีนนท์ฉัตร	ประธานกรรมการ
5.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ	กรรมการ
5.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิ่นฉัตร ศลิขภู่อินวัฒน์	กรรมการ
5.4 นายวีระ คมปริยารัตน์	กรรมการ

5.5 นายวิเชียร	อุปแก้ว	กรรมการ
5.6 นายจักรกฤษ	อ่อนชื่นจิตร	กรรมการ
5.7 นายสถาพร	ทองวิค	กรรมการ
5.8 นายพุดศยน	นินทนางศา	กรรมการ
5.9 ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญฤทธิ์	ประสาทแก้ว	กรรมการและเลขานุการ
5.10 นางสาวปิยวรรณ	แน่นนอก	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
5.11 นางสาวปัทมาภรณ์	ประดิษฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
5.12 นางสาวศศิประภา	รัตนพันธ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

#### 6. คณะกรรมการฝ่ายลงทะเบียนและต้อนรับ

6.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล	ทองอินทร์คำ	ประธานกรรมการ
6.2 นายณรงค์ชัย	โอเจริญ	กรรมการ
6.3 นางกุลยา	สาริชีวิน	กรรมการ
6.4 นายศิริชัย	เตรียมล้ำเลิศ	กรรมการ
6.5 นายนที	ศรีสวัสดิ์	กรรมการและเลขานุการ
6.6 นางปรางทอง	โอเจริญ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
6.7 นายมรกต	ประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
6.8 นางสาวณัฐนันท์	คงเพ็ชรศักดิ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

#### 7. คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ

7.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช	โรยรินทร์	ประธานกรรมการ
7.2 นายอโณทัย	ผลสุวรรณ	กรรมการ
7.3 นายชัยยะ	ปราณีตพลกรัง	กรรมการ
7.4 นายสมควร	แววดี	กรรมการ
7.5 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อ่องอาจ	แสตใหม่	กรรมการ
7.6 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจักษ์	อ่างบุญตา	กรรมการและเลขานุการ
7.7 นางสาวธนาวดี	เนตรกรรม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
7.8 นางสาวกรรณา	แสตใหม่	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
7.9 นางสาวโชติกา	วงศ์อามาตย์กัฏ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

#### 8. คณะกรรมการฝ่ายการงานเลี้ยงรับรอง

8.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลชาติ	จุลเพ็ญ	ประธานกรรมการ
8.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนาจ	เรืองวาริ	กรรมการ
8.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ	หาพานนท์	กรรมการ
8.4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐสิทธิ์	พัฒนะอิม	กรรมการ
8.5 นายศักดิ์ชัย	จันทร์ศรี	กรรมการ
8.6 นายปราโมทย์	พูนนายม	กรรมการ
8.7 นางสาวสุนนมาลย์	เนียมกลาง	กรรมการและเลขานุการ
8.8 นางสาวบุษราภรณ์	จิตจำเนียร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
8.9 นางสาวมยุรี	แหวนครุฑ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
8.10 นางสาวนฤพร	เจียรศิริพรชัย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

### 9. คณะกรรมการฝ่ายประเมินผล

9.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาติ	สนธิสมบัติ	ประธานกรรมการ
9.2 นายพัฒนศัพท์	สุนันทพงษ์	กรรมการ
9.3 นายวินัย	จันทร์เพ็ญ	กรรมการและเลขานุการ
9.4 นางสาวอัญชลี	สิมอ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

### 10. คณะกรรมการฝ่ายการเงินและบัญชี

10.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราชญ์	อัศวนรากุล	ประธานกรรมการ
10.2 นางสาวเมธีรัฐญา	เจตน์คุณาวัดน์	กรรมการ
10.3 นางสาวกานต์ศรีชญา	โพธิ์ศรี	กรรมการ
10.4 นางสาวนุช	เทียมวรรณ	กรรมการ
10.5 นางรัศมีลภัส	อัศวนรากุล	กรรมการ
10.6 นางสาวรัฐตาภัสร์	สิทธิอัมพลวุฒิ	กรรมการและเลขานุการ

### 11. คณะกรรมการพิจารณาบทความ

11.1 ศ.ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11.2 ศ.ดร.ผดุงศักดิ์	รัตน์เดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11.3 ศ.ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.4 รศ.ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.5 รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิศักดิ์พิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.6 ผศ.ดร.กษศร	หัสโรศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.7 ผศ.ดร.จักรี	ศรีรัตน์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.8 ผศ.ดร.เจนศักดิ์	เอกบุรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.9 ผศ.ดร.นัฐพร	ไชยญาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
11.10 ผศ.ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.11 ผศ.ดร.บุญฤทธิ	ประสาทแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.12 ผศ.ดร.พัฒนาพล	มินา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.13 ผศ.ดร. ยุทธนา	ทองท่วม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11.14 ผศ.ดร.วิรัชชัย	โรยรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.15 ผศ.ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.16 ผศ.ดร.สรพงษ์	ภาสุปรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.17 ผศ.ดร.โสรัตน์	มงคลมะไฟ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.18 ผศ.ดร.อำนาจ	เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.19 ดร.ชาญวิทย์	บุญช่วย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.20 ดร.ธนิต	เรืองรุ่งชัยกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11.21 ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
11.22 ดร.ประสพโชค	โพทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.23 ดร.พิสิษฎ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
11.24 ดร.มนต์ชัย	พินิจจิตรสมุท	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11.25 ดร.มนตรี	สมตุลยกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.26 ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.27 ดร.รวิภา	ยงประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
11.28 ดร.วิเชียร	อุปกแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

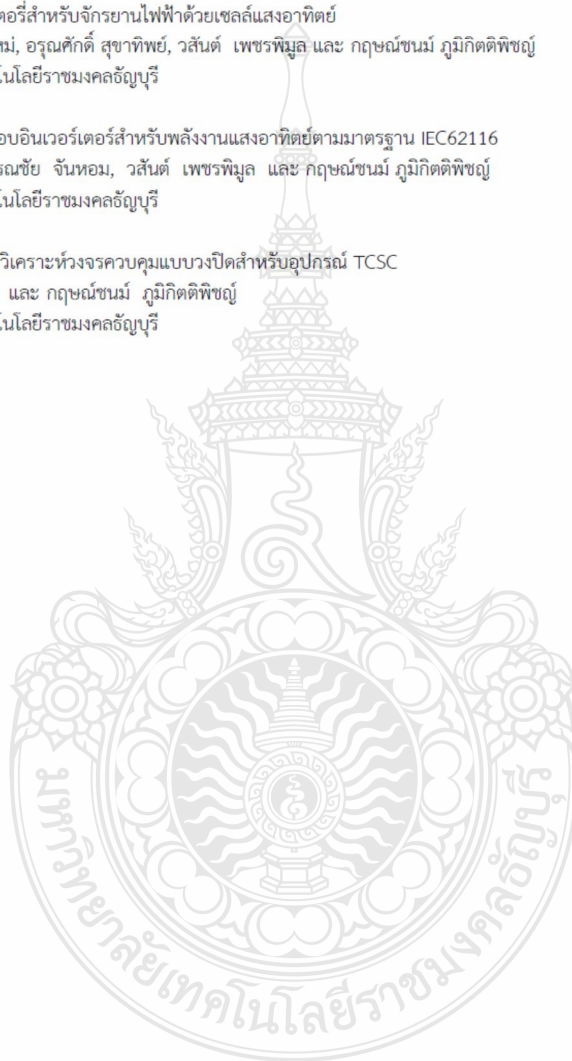
11.29 ดร.วรจิตต์	เศรษฐพรค์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
11.30 ดร.ศักดิ์ชาย	เพชรตรา	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
11.31 ดร.ศุภกิจ	วรศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
11.32 ดร.สันติ	ไทยยีนวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.33 ดร.สำเนียง	องสุพันธ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.34 ดร.สุบิน	หินจันทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
11.35 ดร.สหัสยา	ทองสาร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
11.36 ดร.หทัยทิพย์	นิลสนธิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
11.37 ดร.อนันต์	พงศ์อรกุลพานิช	มหาวิทยาลัยนเรศวร
11.38 ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.39 ดร.อำพล	อาณาจักร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
11.40 ผศ.บัญญัติ	นิยมวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
11.41 อาจารย์วราคม	วงศ์ชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
11.42 อาจารย์อดิสร	ณยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
11.43 อาจารย์พัฒนพงศ์	เกิดพิพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

#### 12.คณะกรรมการพิจารณานวัตกรรมด้านพลังงานสู่ชุมชน

12.1 คุณโกศล	แสงทอง	ประธานกลุ่มรวมใจตามรอยพ่อ จ.เพชรบุรี
12.2 คุณดรณพร	กมลพัล	นักวิชาการอิสระ
12.3 คุณพุทธพร	ประวาลพฤกษ์	นักวิชาการอิสระ
12.4 คุณพิสาร	หมื่นไกร	นักวิชาการอิสระ
12.5 คุณวิสูตร	ยังพลพันธ์	นักวิชาการอิสระ
12.6 คุณสุภรัตน์	ฤทธิชัย	นักวิชาการอิสระ
12.7 นายवलัน	ดอนชัย	นายก อบต.ท่ามะนาว จ.ลพบุรี

## สารบัญ

CP 016	การเปรียบเทียบสำหรับการสร้างแบบจำลองของฟาร์มกังหันลมขนาดเล็กซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 ทิศทาง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 ทิศทางโดยโปรแกรม PSCAD เซาว์น ชนะดี <sup>1</sup> , เจษฎา สายใจ <sup>2</sup> , ณัฐพันธ์ ถนอมสัจย์ <sup>3</sup> และ บุญยัง ปลั่งกลาง <sup>4</sup> <sup>1,2</sup> มหาวิทยาลัยบูรพา <sup>3,4</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	39-43
CP 017	สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับจักรยานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ภาณุพงศ์ ปล้องใหม่, อรุณศักดิ์ สุชาติพิชัย, วสันต์ เพชรพินุล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	44-47
CP 018	แนวทางการทดสอบอินเวอร์เตอร์สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน IEC62116 สัญญา อิมเอ็บ, รณชัย จันทอม, วสันต์ เพชรพินุล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	48-51
CP 019	การออกแบบและวิเคราะห์วงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับอุปกรณ์ TCSC วรณวิช จุลกัลป์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	52-55



การออกแบบและวิเคราะห์วงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับอุปกรณ์ TCSC  
Design and Analysis of Close Loop Control Circuit for TCSC

วรรณวิษ จุลกัลป์\* และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
Email : 1156704210094@gmail.com,rmutt.ac.th

**บทคัดย่อ**

วิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลังเผชิญกับความท้าทายในการเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าภายใต้สายส่งที่มีอยู่เดิม ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีอุปกรณ์ FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการเพิ่มความยืดหยุ่นของการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitor: TCSC) เป็นอุปกรณ์ FACTS ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในตระกูล FACTS ติดตั้งโดยอนุกรมเข้ากับระบบสายส่ง ทำหน้าที่ชดเชยคาร์แอคแตนซ์ในสายส่ง ทำให้สายส่งสามารถส่งจ่ายพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยควบคุมผ่านมุมทำงาน (Thyristor firing angle:  $\alpha$ ) ซึ่งสามารถควบคุมได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้องอย่างต่อเนื่อง บทความนี้นำเสนอการออกแบบจำลองวงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับอุปกรณ์ TCSC ในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อที่จะชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เมื่อเบรกเกอร์เปิดวงจรหลังจากเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าของตัวนำสายส่งวงจรข้างเคียง

**คำสำคัญ:** อุปกรณ์ FACTS, ตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์, มุมทำงาน, วงจรควบคุมแบบวงปิด

**Abstract**

Power system engineers are currently facing challenges to enhance the power transfer capabilities of existing transmission system. This is where the Flexible AC Transmission Systems (FACTS) technology comes into effect. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) is one of the important member of FACTS family, is an impedance compensation which is used in series reactance on an AC transmission system to provide smooth control of series reactance by controlling thyristor firing angle ( $\alpha$ ) to increase the capability of the reactive power compensation of the transmission line. This paper presents design of control system by MATLAB/PSCAD which is used to implement the performance of the proposed control circuit in case of peak load and half load of the transmission line where the simulation shows a good result where the reactive power is compensated and transmission line capacity is extended.

**Keywords:** FACTS, TCSC, Thyristor firing angle, Close loop control

**1. บทนำ**

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังนับวันจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ต้องการคุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น และความมั่นคงสูงขึ้น แต่บางครั้งการสร้างโรงไฟฟ้าแห่งใหม่อาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่ดีนัก เนื่องจากต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆด้าน ทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ การหาพื้นที่เพื่อก่อสร้างโรงไฟฟ้าหรือก่อสร้างสายส่งใหม่ทำได้ลำบากขึ้น การก่อสร้างต้องใช้ระยะเวลาาน ดังนั้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องบริหารจัดการระบบไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วให้ยังสามารถรองรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ อุปกรณ์ FACTS (Flexible AC Transmission Systems) จึงได้เข้ามามีบทบาทในการเพิ่มความยืดหยุ่นในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ทำให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ในปริมาณที่สูงขึ้น และควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitor: TCSC) เป็นหนึ่งอุปกรณ์ FACTS ที่มีความสำคัญ

**2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

**2.1 สภาวะชั่วคราว**

สภาวะชั่วคราว คือ การเกิดของสัญญาณในช่วงเวลาสั้น ๆ ของการเปิด-ปิดสวิตช์ ช่วงเวลาสั้น ๆ นี้สภาพวงจรจะเปลี่ยนไป เรียกการเปลี่ยนแปลงของวงจรไฟฟ้านี้ว่าเป็นการเกิดของสัญญาณในช่วงเวลาชั่วคราว ซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่เปิดหรือปิดสวิตช์ของวงจรไฟฟ้าในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า จึงพิจารณาตั้งแต่ก่อนหรือหลังการทำงานของสวิตช์ คือช่วงก่อนสวิตช์จะต่อหรือตัดวงจร ที่เวลา  $t = 0$  ซึ่งเรียกช่วงเวลานี้ว่า "ช่วงเวลาทรานเซียนต์" ผลตอบสนองรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ได้ในช่วงเวลานี้เรียกว่าผลตอบสนองต่อทรานเซียนต์ หรือการเกิดทรานเซียนต์ ซึ่งจะเกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้าที่มีตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวเพราะว่าตัวต้านทาน ไม่สามารถเก็บหรือสะสมพลังงานไว้ที่ตัวมันเองได้ พลังงานที่ตัวต้านทานได้รับนั้นจะกระจายออกไปในรูปของพลังงานความร้อน ส่วนในวงจรไฟฟ้าที่มีขดลวดเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ ต่ออยู่จะมีการเกิดทรานเซียนต์ขึ้น เพราะว่าขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสามารถเก็บหรือสะสมพลังงานไว้ได้

**2.2 องค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ TCSC**

วงจรมูลฐานของอุปกรณ์ TCSC ประกอบด้วยตัวเก็บประจุค่าคงที่ (fixed series capacitor: FSC) ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำที่ควบคุมโดยไทรสเตอร์ 2 ตัวต่อขนานแต่กลับทิศทางต่ออนุกรม ดังรูปที่ 1 ซึ่งการทำงานของ TCSC ซึ่งการทำงานของ TCSC อาศัยการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนคาร์แอคแตนซ์สุทธิ ( $X_{TCSC}$ ) สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 3 โหมด [3] ดังนี้

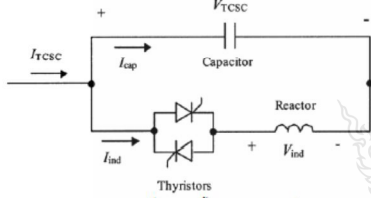


1. โหมดขั้วยั้ง (block mode) คือ การหยุดป้อนสัญญาณจุดชนวนให้กับไทรสเตอร์ จึงเสมือนว่าขณะนี้เปิดวงจร TCSC ทำงานเป็นตัวเก็บประจุค่าคงที่ ( $X_C$ )
2. โหมดลัดผ่าน (bypass mode) คือ ป้อนสัญญาณจุดชนวนให้มีกระแสไหลผ่านไทรสเตอร์ตลอดเวลา TCSC ทำงานเป็นตัวเหนี่ยวนำคงที่ ( $X_L$ )
3. โหมดควบคุม (control mode) คือ ป้อนสัญญาณจุดชนวนตามมุมการทำงานที่เหมาะสมทุกๆ ไซเคิลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามมุมทำงาน ( $\alpha$ ) ตามสมการ [4] ที่ 1 และ 2 และมีพฤติกรรมตามกราฟ[5] ดังรูปที่ 2

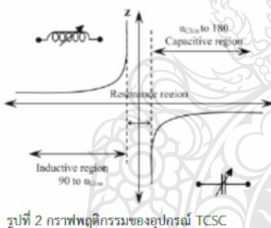
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (1)$$

$$X_L(\alpha) = \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin\alpha} X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (2)$$

เมื่อ  $X_L = \omega L$  และ  $\alpha$  คือ มุมทำงาน (องศา)



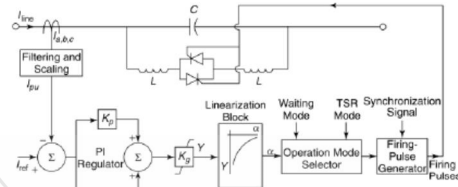
รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของอุปกรณ์ TCSC



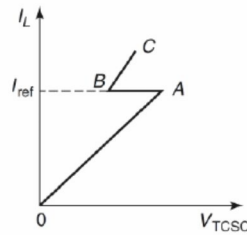
รูปที่ 2 กราฟพฤติกรรมของอุปกรณ์ TCSC

### 2.3 วงจรควบคุมสำหรับอุปกรณ์ TCSC แบบวงปิด (Close loop control)

วงจรควบคุมแบบวงปิด ชนิด Constant-Current (CC) Control [1] เป็นการควบคุมเพื่อต้องการรักษาระดับกระแสให้มีขนาดคงที่ตามค่ากระแสอ้างอิง แสดงวงจรถังรูปที่ 3 โดยจะนำค่ากระแสที่วัดได้เป็น rms มาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิง ผ่านตัวกรองสัญญาณ ส่งให้วงจรควบคุม proportional-integral (PI) ซึ่งจะเป็นตัวคำนวณหาความผิดพลาดที่เหมาะสม โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{TCSC}$  กับ  $I_L$  ในสภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4 ซึ่งหลักการควบคุมจะพยายามรักษาค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นบวก พฤติกรรมแบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วง OA, AB และ BC โดยช่วง OA และ BC แสดงให้เห็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่ารีแอกแตนซ์ ส่วนช่วง AB แสดงให้เห็นช่วงที่สามารถควบคุมให้ค่ากระแสไหลมีค่าคงที่ตามค่ากระแสอ้างอิงได้ด้วยวิธีการควบคุมมุมทำงานของไทรสเตอร์



รูปที่ 3 วงจรควบคุมแบบวงปิด ชนิด Constant-Current (CC) Control

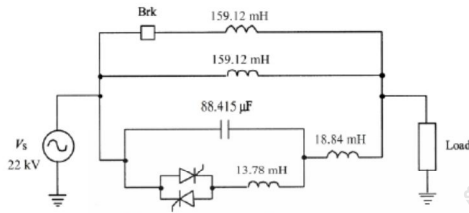


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{TCSC}$  กับ  $I_L$  ในสภาวะคงตัว

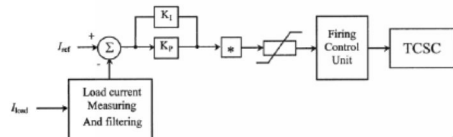
### 2.4 ระบบที่ออกแบบ

เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อบรรยากาศไฟฟ้าเมื่อมีการเกิดของสัญญาณในช่วงเวลาสั้น ๆ จากการเปิดสวิตช์ ในช่วงเวลาสั้น ๆ ของเซอร์กิตเบรกเกอร์และศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์ TCSC ที่มีวงจรควบคุมแบบเปิด และแบบวงปิด ที่มีความแตกต่างในการการชดเชยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด จึงได้สร้างแบบจำลองระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันคงที่ 1 เฟส ขนาด 22 kV จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด R-L ที่มีค่าความต้านทาน 2  $\Omega$  รีแอกแตนซ์ 0.030846 H ผ่านตัวนำสายส่งขนาดกัน 2 เส้น ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งแต่ละเส้นเท่ากับ 159.12 mH โดยมีอุปกรณ์ TCSC ต่อขนานอยู่กับสายส่งและเส้นบวมมิเซอร์กิตเบรกเกอร์ต่ออนุกรมอยู่ วงจรสมมูลดังรูปที่ 5 โดยจำลองเหตุการณ์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อบรรยากาศไฟฟ้าและพฤติกรรมของอุปกรณ์ TCSC กรณีเปิดเบรกเกอร์ ที่เวลา 1.8 วินาที หลังจากเกิดความผิดปกติในระบบ ซึ่งทำให้ตัวนำเส้นหนึ่งหลุดออกจากระบบแบบทันทีทันใด เนื่องจากเมื่อเบรกเกอร์เปิด ทำให้สายส่งเส้นหนึ่งหลุดออกจากระบบ เหลือสายส่งเพียงเส้นเดียว ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าลดลง ซึ่งอุปกรณ์ TCSC จะทำหน้าที่จ่ายค่ากำลังค่าปชชีพให้กับระบบ เพื่อรักษาค่ากระแส ณ จุดนั้น ให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ

โดยวงจรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ TCSC [2] แบบ Close loop ดังรูปที่ 6 ใช้หลักการควบคุมกระแสคงที่ (Constant-Current Control) ด้วยการวัดค่า rms ของกระแสโหลด ( $I_{load}$ ) กรองสัญญาณฮาร์มอนิกสออก แล้วนำมาเทียบกับค่า rms ของกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) ส่งสัญญาณค่าความแตกต่างเข้าสู่ PI Controller เพื่อคำนวณมุมทำงาน Firing angle ที่เหมาะสม ไปสั่งไทรสเตอร์ของอุปกรณ์ TCSC เพื่อลดค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่ง และยกค่ากระแสโหลดให้เพิ่มขึ้นเท่ากับก่อนการเปิดเบรกเกอร์ต่อไป



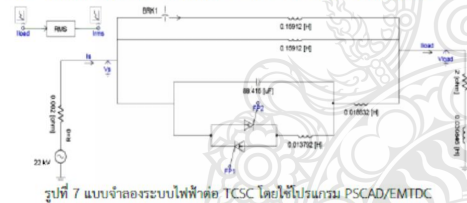
รูปที่ 5 วงจรสมมูลแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา



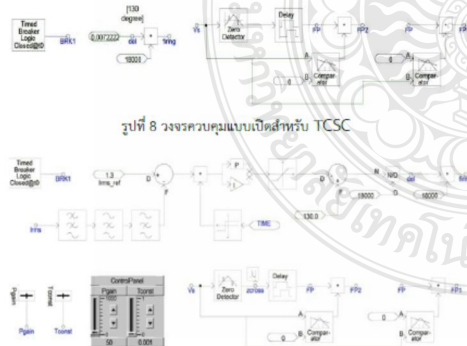
รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ TCSC แบบ Close loop

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

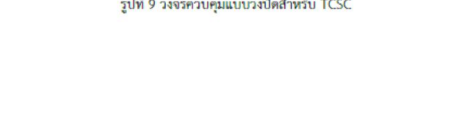
ผลการทดลองสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบวงเปิดสำหรับ TCSC ในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ดังรูปที่ 7 ทดลองเปิดเบรกเกอร์ที่เวลา 1.8 วินาที เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของระบบในสภาวะชั่วคราว และพฤติกรรมแบบพลวัตของ TCSC ระหว่างระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบเปิด ดังรูปที่ 8 กับวงจรควบคุมแบบวงปิด ดังรูปที่ 9 โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของมุมทำงานมีค่าเท่ากับ  $130^\circ$  และมีค่ากระแสอ้างอิงเท่ากับ 1.30 kA ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 7 แบบจำลองระบบไฟฟ้าต่อ TCSC โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC



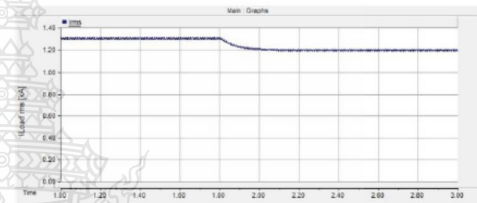
รูปที่ 8 วงจรควบคุมแบบเปิดสำหรับ TCSC



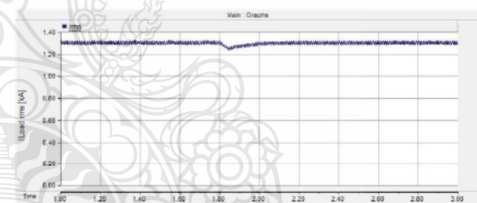
รูปที่ 9 วงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับ TCSC

ผลการทดลองที่สภาวะคงตัวของระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบเปิดสำหรับ TCSC: ค่ากระแส rms ของโหลด มีเท่ากับ 1.30 kA และเมื่อเบรกเกอร์เปิดที่เวลา 1.8 วินาที ค่ากระแส rms โหลด ลดลงมีค่าเท่ากับ 1.19 kA ดังรูปที่ 10 และรูปกราฟกระแสโหลดและแรงดันโหลดได้ ดังรูปที่ 12 และ 14 ตามลำดับ

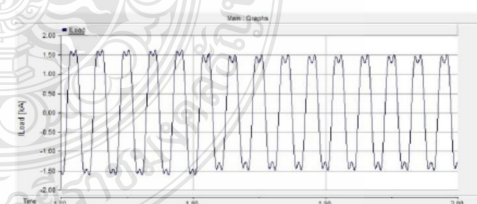
ผลการทดลองที่สภาวะคงตัวของระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับ TCSC: ค่ากระแสโหลด rms มีค่าเท่ากับ 1.30 kA ตามรูปที่ 11 ซึ่งมีค่าเท่ากับก่อนเปิดเบรกเกอร์ และแสดงรูปกราฟกระแสโหลดและแรงดันโหลดได้ ตามรูปที่ 13 และ 15 ตามลำดับ โดยมุมทำงานที่ถูกผลิตออกมาเพื่อปรับค่ากระแส rms ของโหลดให้มีค่าคงที่มีค่าเริ่มต้นที่  $130^\circ$  และปรับลดลงเหลือ  $124^\circ$  ดังรูปที่ 16 ซึ่งส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของอุปกรณ์ TCSC มีค่าพาหุคูณเพิ่มขึ้นตามพฤติกรรมของอุปกรณ์ TCSC ดังรูปที่ 2 ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์รวมของสายส่งรวมมีค่าลดลง จึงสามารถยกระดับกระแสไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้



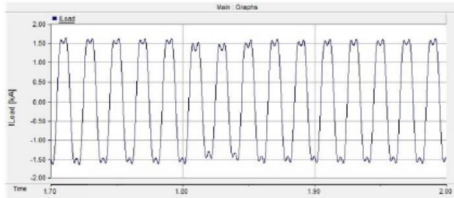
รูปที่ 10 ค่ากระแส rms ของโหลด ของระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบเปิดสำหรับ TCSC



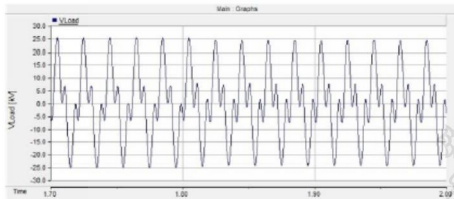
รูปที่ 11 ค่ากระแส rms ของโหลด ของระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบเปิดสำหรับ TCSC



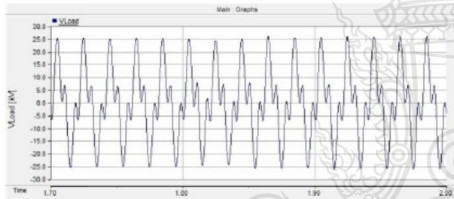
รูปที่ 12 กราฟกระแสโหลด ของระบบไฟฟ้าที่ใช้วงจรควบคุมแบบเปิดสำหรับ TCSC



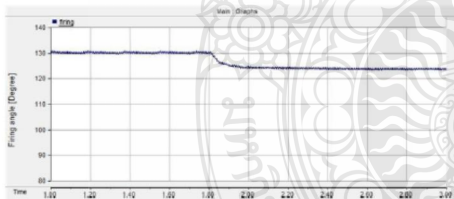
รูปที่ 13 กราฟกระแสไหลของระบบไฟฟ้าที่เชิงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับ TCSC



รูปที่ 14 กราฟแรงดันไหลของระบบไฟฟ้าที่เชิงจรควบคุมแบบเปิดสำหรับ TCSC



รูปที่ 15 กราฟแรงดันไหลของระบบไฟฟ้าที่เชิงจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับ TCSC



รูปที่ 16 ค่ามุมทำงานจากวงจรจจรควบคุมแบบวงปิดสำหรับ TCSC

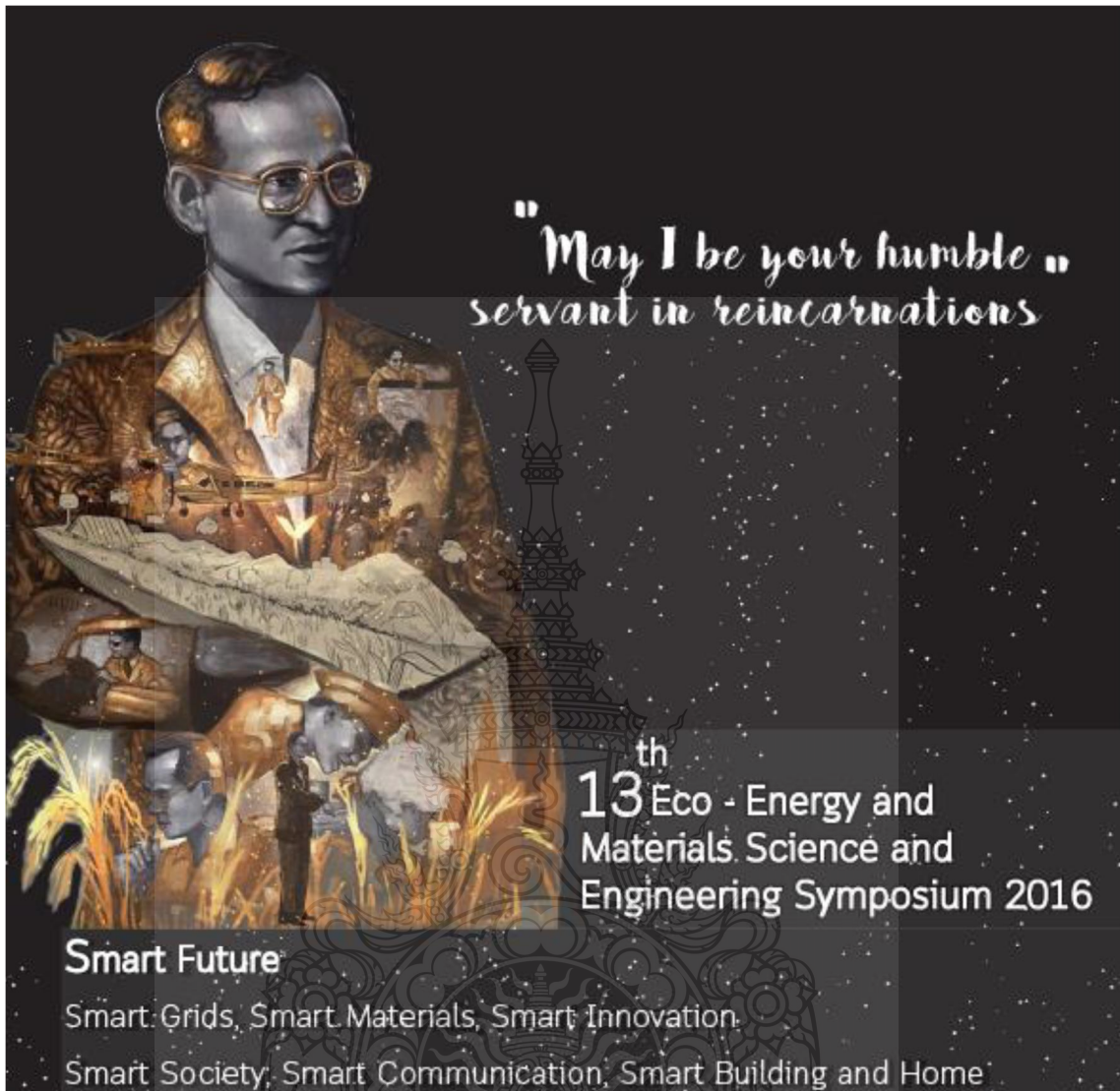
อ้างอิง ที่ค่า 1.30 kA ได้ โดยใช้เวลาประมาณ 2 ไซเคิล ตั้งรูปอยู่ที่ 11 และ 13 จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าที่ต่ออุปกรณ์ TCSC และควบคุมด้วยวงจรแบบวงปิด สามารถรักษาค่ากระแสไหลที่มีค่าคงที่

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Mohan Mathur and Rajiv K. Varma, "THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS", IEEE Press and Wiley-Interscience, 2002.
- [2] E. Acha, V.G. Agelidis, O.Anaya-Lara et al., "Power Electronic Control in Electrical System", Newnes Power Engineering Series, 2002.
- [3] *Power System Stability and Control*, 3rd ed., The Electric Power Engineering Handbook, Leonard L. Grigsby, ed. CRC Press, 2012.
- [4] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, 2000.
- [5] S. Meikandasivam, Rajesh Kumar Nema and Shailendra Kumar Jain "Behavioral Study of TCSC Device - A MATLAB/Simulink Implementation", World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:2, No:9, 2008.

#### 4. สรุป

บทความนี้เป็นการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การควบคุมแบบวงปิดสำหรับอุปกรณ์ TCSC จากผลการทดลองสรุปได้ว่า จากแบบจำลองนี้ เมื่อมีตัวนำสายส่งเส้นหนึ่งหลุดออกจากระบบอย่างทันทีทันใด และเหลือสายส่งเพียงเส้นเดียว สำหรับระบบที่ควบคุมแบบเปิดที่สภาวะคงตัว ทำให้ค่ากระแส rms ของไหลลดจาก 1.30 kA เหลือเพียง 1.19 kA คิดเป็นลดลง 8.46% ดังรูปที่ 10 และ 12 สำหรับระบบที่ควบคุมแบบวงปิดสามารถทำให้ค่ากระแส rms ของไหลมีค่ากลับมามีค่าเท่ากับค่ากระแส rms



## Proceeding

Organized by



Sponsored by



## EMSES Conference Committee

### Honorary Advisory Chair:

Prasert PINPATHOMRAT (Pr RMUTT, Thailand)

### Honorary Advisory Co-Chair:

Masao FURUYAMA (KIT, Japan)

Hideaki OHGAKI (Kyoto University, Japan)

### International Advisory Committees

Hiroyuki HAMADA (KIT, Japan)

Akinori SEITO (Kyoto University, Japan)

Hitomi OHARA (KIT, Japan)

Nadarajah MITHULANANTHAN (UQ, Australia)

Takeshi YAO (Kayawa College., Japan)

Yuichi ANADA (Hokkaido Info. Uni., Japan)

Young S. CHAI (YOUNG NAM UNI., Korea)

Seonghyuk KO (YONSEI UNI., Korea)

Nipon TANGTHAM (KU, Thailand)

Kumron SIRATHANAKUL (NPU, Thailand)

### General Chair

Somma PIVSA-ART (RMUTT, Thailand)

### General Co-Chair

Sivakorn ANGTHONG (RMUTT, Thailand)

### Technical Program Committee Chair

Krischonme BHUMKITTIPICH (RMUTT, Thailand)

### Technical Program Committee Co-Chair

Supakit SUTIRUENGWONG (SU, Thailand)

Sumonman NIAMLANG (RMUTT, Thailand)

### Technical Conference Committees

T. INOUE (Yamagata Uni, Japan)

Sakorn RIMJEAM (CMU, Thailand)

K. YAMADA (KIT, Japan)

T. ITO (Kagawa College, Japan)

M. OKOSHI (KIT, Japan)

Nagahiro SAITO (Nagoya Uni., Japan)

Bawornkit NEKHAMANURAK (RMUTR, Thailand)

Pimolpan NIAMLANG (RMUTR, Thailand)

Wanchai SUBSINGHA (RSU, Thailand)

Monthon NAWONG (RMUTT, Thailand)

Y. ANADA (HIU, Japan)

Yuqiu YANG (Dong Hua University, China)

Pimnapat IEMSOMBOON, RMUTT, Thailand

Boonyang PLANGKLANG (RMUTT, Thailand)

Sorapong PAVASUPREE (RMUTT, Thailand)

Yuttana KUMSUWAN (CMU, Thailand)  
Kaan KERDCHERN (RMUTI, Thailand)  
Uthen KAMNAN (RMUTL, Thailand)  
Tanapong SUWANNASRI (TGGs, Thailand)  
Wirachai ROYNARIN (RMUTT, Thailand)  
Napaporn PHUANGPORNPIKAK (KU, Thailand)  
Jakkree SRINONCHAT (RMUTT, Thailand)  
Pramook UNHALEKHAKA (RMUTSB, Thailand)  
Nattapong PHANTHUNA (RMUTP, Thailand)  
Sakorn PO-NGAM (KMUTT, Thailand)  
Nattawoot SUWANTHA (MSU, Thailand)  
Boonrit PRASARTKAEW (RMUTT, Thailand)  
Kittiwat NIMKERDPOL (RMUTT, Thailand)

**Publicity and Website Chair**

Somchai BIANSONGNERN (RMUTT, Thailand)  
Nathabhat PHANKONG (RMUTT, Thailand)

**Registration Chair**

Anin MEMON (RMUTT, Thailand)

**Financial Chair**

Weeraporn PIVSA-ART (RMUTT, Thailand)

**Local Arrangement Chair**

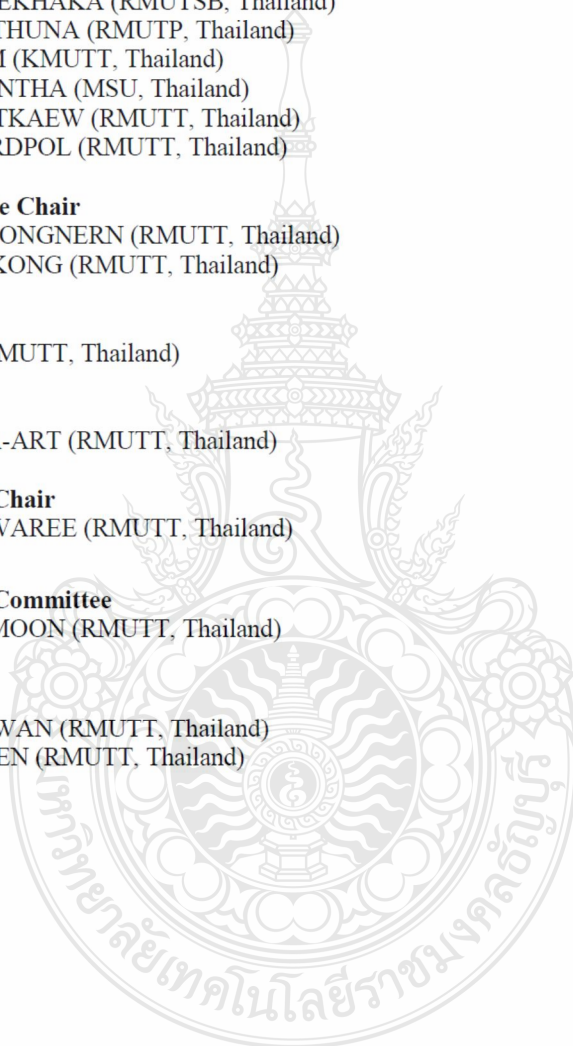
Amnoiy REUNGWAREE (RMUTT, Thailand)

**Local Arrangement Committee**

Wasan PHETPHIMOON (RMUTT, Thailand)

**General Secretariat**

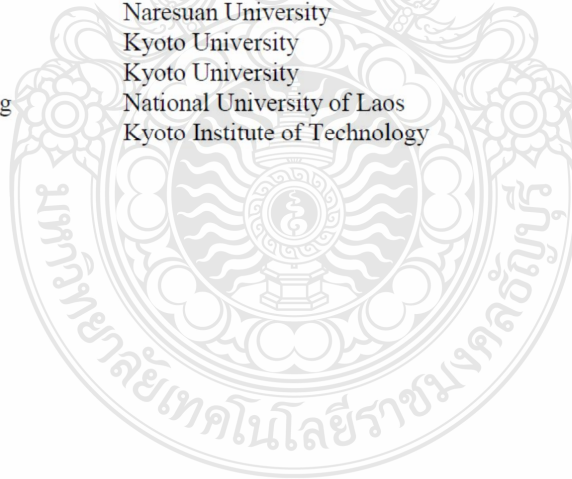
Porakoch SIRISUWAN (RMUTT, Thailand)  
Yuttana KONGJEEN (RMUTT, Thailand)



**List of Reviewers**

Hiroyuki Hamada	Kyoto Institute of Technology
Akinori Seito	Kyoto University
Hitomi Ohara	Kyoto Institute of Technology
Nadarajah Mithulananthan	University of Queensland
Takeshi Yao	Kayawa College
Yuichi Anada	Hokkaido Information University
Young S. Chai	Youngnam University
Seonghyuk Ko	Yonsei University
Nipon Tangtham	Kasetsart University
Kumron Sirathanakul	Nakhon Panom University
Pimnapat Iemsomboon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sorapong Pavasupree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pimolpan Niamlang	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Yuttana Kumsuwan	Chiang Mai University
Kaan Kerdchern	Rajamangala University of Technology Isan
Uthen Kamnan	Rajamangala University of Technology Lanna
Tanapong Suwannasri	The Siridhorn International Thai-German Graduate School Of Engineering, KMUTNB
Wirachai Roynarin	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Napaporn Phuangpornpitak	Kasetsart University
Jakkree Srinonchat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pramook Unhalekhaka	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Nattapong Phanthuna	Rajamangala University of Technology Pha Nakon
Sakorn Po-Ngam	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Nattawoot Suwantha	Maharakham University
Tawatchai Charinpanitkul	Chulalongkorn University
Mbaitiga Zacharie	National Institute of Technology, Okinawa College
Natha Kuptasthien	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pongsri Siwarasak	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Yuji Aso	Kyoto Institute of Technology
Krischonme Bhunkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sutham Niyomwas	Prince of Songkla University
Napaporn Phuangpornpitak	Kasetsart University
Pramoch Rangsunvigit	Chulalongkorn University
Kaan Kerdchuen	Rajamangala University of Technology Isan
Winadda Wongwiriyan	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chanchai Thongpin	Silpakorn University
Boonrit Prasartkaew	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Wirachai Roynarin	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Thammasak Rojviroon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nathabhat Phankong	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Supakij Suttiruengwong	Silpakorn University
uthen kamnan	Rajamangala University of Technology Lanna
Pimnapat Bhumkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Pramuk Unahalekhaka	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Nattachote Rugthaicharoencheep	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Nattakarn Hongsrirphan	Silpakorn University
Surawut Chuangchote	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Chuntip Sakulkhaemaruehai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sirichai Torsakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somma Pivsa-Art	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Supaphorn Thumsorn	Kyoto Institute of Technology
Putinun Uawongsuwan	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Leong Yew Wei	Institute of Materials Research and Engineering
Chatchai Suppitaksakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Apisit Kositchaitong	PTT Global Chemical Public Company Limited
Weraporn Pivsa-Art	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sumonman Niamlang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Natee Srisawat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Atitaya Tohsan	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Watthanaphon	
heewawuttipong	Rajamangala University of Technology Srivijaya
Supattana Nirukkanaporn	Rangsit University
Winai Chanpeng	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Supawat kamtip	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nithiwatthn Choosakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pimolpun Niamlang	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Teerin Kongpun	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Thirawat Mueansichai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Taro Sonobe	Kyoto University
Noppawan Motong	Naresuan University
Hideaki Ohgaki	Kyoto University
Tetsuo Tezuka	Kyoto University
Khampone Nanthong	National University of Laos
Hitomi Ohara	Kyoto Institute of Technology





## CONTENT

**SMART GRIDS**

SG01	Analysis of Energy Consumption and Behavior of Elevator in a Complex Residential Building <i>S. Marsong, B. Plangklang</i>	46
SG02	Modeling and Stability Analysis of Thailand Power Grid Interconnection <i>W. Pinthurat, J. G. Singh, S. Panusuwat and P. Kongsuk</i>	51
SG03	The Modeling of Temperature Effect on Lithium-ion Battery for Personal Electric Vehicle <i>P. Prabpal and K. Bhumkittipich</i>	58
SG04	A Study of Electricity Demand Forecasting of Sakonnakhon Province, Thailand <i>N. Phuangpornpitak and B. Prasartkaew</i>	59
SG05	The PEVs on Balance load in Distribution System <i>Y. Kongjeen and K. Bhumkittipich</i>	64
SG06	Modeling and Analysis of Temporary Fault Simulation in Self-Excited Induction Generator System Applied for fixed-Speed Wind Turbine <i>J. Saijai, N. Thanomsat, M. Krueger and B. Plangklang</i>	69
SG07	Preliminary Study of Voltage Stability <i>W. Boonphen and K. Bhumkittipich</i>	75
SG08	Programming Package for Solar PV Farm Operations and Preventive Maintenance in Thailand <i>A. Jutitree, W. Pimphanitchakarn, M. Treekijjanon, K. Buayai, and K. Kerdechuen</i>	79
SG09	Control of Low Frequency Oscillation on 59 Buses Power System using TCSC <i>W. Junlakan and K. Bhumkittipich</i>	83
SG10	Case Study of Power Loss in Solar Power Plant Area Nakhon Nayok Province <i>R. Kongnok and B. Plangklang</i>	84
SG11	Optimal Mixture Experiment Design Using Neural Network <i>D. Buntam, P. Surin and W. Permpoonsinsub</i>	89
SG12	Comparison of Edge Detection Techniques for Identifying Water Level In Irrigation Canal <i>Y. Chatwaranon, W. Permpoonsinsup and S. Udomsiri</i>	94
SG13	ICS-Based Optimal PIDD <sup>2</sup> Controller Design for Brushless DC Motor Speed Control with Back EMF Detection <i>D. Kumpanya, C. Kiree, S. Tomyasrirut and D. Puangdownreong</i>	99

# Control of Low Frequency on 59 buses Power System using TCSC

Wannawit Junlakan  
 Department of Electrical Engineering  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Phatum Thani, Thailand  
 1156704210094@mail.rmutt.ac.th

Krischonme Bhunkittipich  
 Department of Electrical Engineering  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Phatum Thani, Thailand  
 krischonme.b@en.rmutt.ac.th

**Abstract**— This paper presents the analysis and compensation oscillations of low frequency in the power system with the controller power flexible (Flexible AC Transmission System, FACTS) in the low frequency power system using the PSAT to help determine value stability in the 59 bus radial system of PEA when the motor transients in power systems by simulation of the 59 bus radial system of PEA as a case study. Equipment used to control the oscillation frequency will control power flexibility to type a serial is the TCSC analysis to display the second form is compared to the time (Time Domain), and the resulting value. Eigen (Eigen Value) of the results of simulation work to see that the power control flexibility can compensate for the low frequency oscillations in power systems.

**Keywords**— stability; transients; TCSC; Eigen value; low frequency oscillations

## I. INTRODUCTION

The main function of power system is to convert energy from one of the naturally available forms to electricity and transport it through grids to points of consumption. As electrical energy cannot be destroyed like any other forms of energy, whatever produced from generators should be utilized or stored. However, technology for storing electricity in large quantities has not yet matured. Thus many equipment and controllers have been used to maintain the balance between what is being demanded and generated in a reliable manner with high degree of quality.

In modern power systems, apart from a large number of generators and associated controllers, there are many types of load, ranging from a simple resistive load to more complicated loads with electronic controllers. The influx of more and more controllers and loads, increase the complexity and nonlinearity of power systems. As a result, power systems are viewed as complex nonlinear dynamical system that shows a number of instability problems. Instability problems in power systems that can lead to partial or full blackout can be broadly classified into three main categories, namely voltage, phase angle and frequency related problems. Though instability eventually blackout or collapse never happened in a pure form of voltage or phase angle or frequency problems, the initial part of the incident can be clearly related to one of the categories.

If one looked back the history of power system since its evolution, operation engineers faced with transient instability problem and researchers struggled to find counter measures to overcome it [1]. Transient instability problem, considered as part of the phase angle related problem, is defined as the ability of power system to maintain synchronism when subjected to large disturbances. When the system faces large disturbances such as large load increase, loss of tie lines, loss of generating units, maintaining constant electrical speed among all the generators were challenging as some machines speed up while some other slow down to adjust to post disturbance situation. If there is no control mechanism to keep the speeding up or slowing down generators within the allowable speed limits, there is a good chance that these generators would fall out of the grid by losing synchronism. Hence, fast exciter or Automatic Voltage Regulators (AVR) was introduced in the system as one of the remedial measures to solve the problem. The introduction of fast AVR was able to give the "coarse adjustment" to keep electrical speed of synchronous generators within the limits and successful in maintaining synchronism by controlling the first swing. However, the fast AVR could not do the "fine adjustment" to control oscillation in the speed. Then, Power System Stabilizer (PSS) was introduced in generator to give that fine adjustment to damp out power oscillations that are referred to as electromechanical or low frequency oscillations (LFO) [1-2].

Apart from the fast exciter there are a number of other sources that contribute to oscillation in modern power system such as frequency load dependency, network characteristics and negative interaction of controllers.

Though oscillations are inherent in power system if not properly controlled could lead to partial or full blackout of the system as it happened in many practical power systems. Hence a complete understanding of the problem would help in finding effective remedial measures, ways and means to control them.

Rest of the paper is organized as follows. Following introduction, the paper describes what low frequency oscillation is. Some noteworthy oscillation related incidents and lesson learned is covered next. Then the methodologies

available for power system oscillation studies are described along with general power system modeling. Most widely used methodology for low frequency oscillation study, eigenvalue analysis is presented in details in the methodology section. A simple case study showing the effect of different controllers on power system oscillation modes in a systematic way is also presented in the paper with some discussion. Finally, conclusions and contributions of the paper are summarized.

## II. THEORY

### A. Low Frequency Oscillation

Low frequency oscillations are generator rotor angle oscillations having a frequency between 0.1 -2.0 Hz and are classified based on the source of the oscillation [1]. The root cause of electrical power oscillations is the unbalance between power demand and available power at a period of time. In the earliest era of power system development, the power oscillations are almost non observable because generators are closely connected to loads, but nowadays, large demand of power to the farthest end of the system that forces to transmit huge power through a long transmission line, which results an increasing power oscillations.

### B. Power System Modeling

Dynamic modeling of power system includes a set of differential and algebraic equations (DAE). Low frequency oscillation studies can be done in two ways depending on the interest. If the interest is to capture the local behavior related to an area or particular power plant, then that area of power plant can be modeled in details and 4 the rest of the system with simple models. If the interest is to capture both local and global modes such as inter areas mode each and every machine in the system and their associated controllers should be modeled in details. It is important to include loads, controllers and other power system components that would influence the LFO. A general mathematical model of power system is given by (1).

$$\dot{x} = f(x, y, l, p) \quad (1)$$

$$0 = g(x, y, l, p) \quad (2)$$

Where  $x$  is a vector of state variable;  $y$  is a vector of algebraic variables;  $l$  and  $p$  are uncontrollable and controllable parameters, respectively. Machine and control dynamics will be included in the differential equations while basic load flow and other network equations will be included in algebraic equations.

### C. Eigenvalue Analysis

The small signal stability or LFO study of the system can be determined by system eigenvalues at an operating point. The relative participation of state variables and their contribution in certain oscillation mode are given by the corresponding elements in the right and left eigenvectors. Hence, combination of left and right eigenvectors yield participation factor matrix. The participation factor matrix can

be used to identify the dominant state variable in a particular mode.

### D. Time domain analysis

Time domain analysis involves no approximation in the DAE model and considered as the most accurate way to study LFO problem. However, pertinent information such as various weak modes, the dominant states variable associated with those modes and sensitivity of those modes to parameter variation and other details cannot be obtained using time domain simulation. Hence, eigenvalue and time domain analyses can be used as complementary solutions to support each other and verify the results. In time domain analyses, mode is perturbed and the behavior of state variable is calculated by solving differential equations in (1) using some numerical integration techniques with the known initial values [3-4]. The initial values in this case, are the initial equilibrium point.

### E. TCSC Theory

A thyristor-controlled series compensation (TCSC) is a series-controlled capacitive reactance controller that can provide continuous control of power on transmission line. The basic TCSC module consists of a series capacitor  $C$  in parallel with a TCR as shown in Fig.1. The TCR is controlled such that its current increase the effective voltage across the fixed series capacitor. This enhanced voltage changes the effective value of the series capacitive reactance with respect to the same line current. An actual TCSC module also includes protective equipment normally installed with series capacitors, such as metal oxide varistor (MOV), circuit breaker (CB), and an ultrahigh speed contact (UHSC) across the valve [5].

There are basically three modes of TCSC operation described in the following. [6-7]

1. Bypassed-thyristor mode: The thyristors are fully conducting with a conduction angle of 180o, and the TCSC module behaves like a parallel combination of capacitor and inductor.

2. Blocked-thyristor mode: In this mode, the firing pulse to thyristor valves are blocked and the thyristors turn off as soon as the current through them goes through a zero. The TCSC module is thus reduced to a fixed series capacitor and the net TCSC reactance is capacitive.

3. Partially conducting thyristor mode or Vernier mode: This mode of operation allows the TCSC to behaves either as a continuously controllable capacitive reactance or as a continuously controllable inductive reactance. It is achieved by varying the thyristor pair firing angle  $\alpha$  in an appropriate range as depicted in Fig. 2. The impedance of the TCSC is that of a parallel LC circuit, consisting of a fixed capacitive impedance,  $X_C$ , and a variable inductive impedance,  $X_L(\alpha)$ , that is,

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (3)$$

Where,

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha}, X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (4)$$

$X_L = \omega L$ , and  $\alpha$  is the delay angle measured from the crest of the capacitor voltage

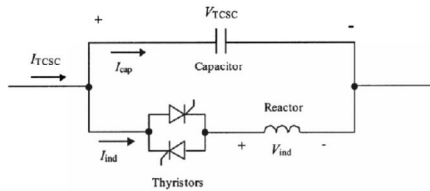


Fig. 1. Equivalent circuit of TCSC

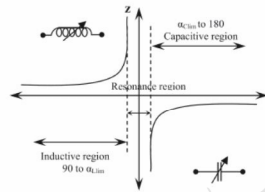


Fig. 2. Impedance vs firing angle characteristic curve

### III. METHODOLOGY

A 59 buses power system is used in the study to show LFO behavior, shows the modes from various dynamics of the system and the impact of various controllers on the critical mode.

In order to study LFO phenomena in power systems, first eigenvalue analysis is carried out with only machine in the system. Here, a generator model with six ordinary differential equations (6<sup>th</sup> order model).

Base case system is 22kV power system has 59 buses. 1 source generating 10 MVA. 1 diesel generator 5 MVA connected at Bus#34 as show in Fig. 3.

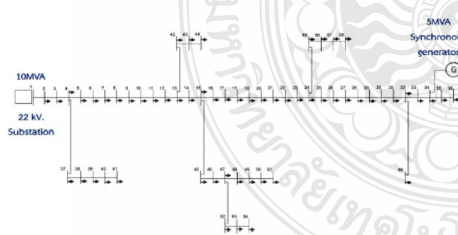


Fig. 3. 59 bused power system

#### A. Case 1

Simulate the 3 phase fault occurs at bus#55 and critical fault clearing time is 0.083 sec.

#### B. Case 2

Adding the TCSC to the system between Bus#31 and Bus#32 show in Fig.4.

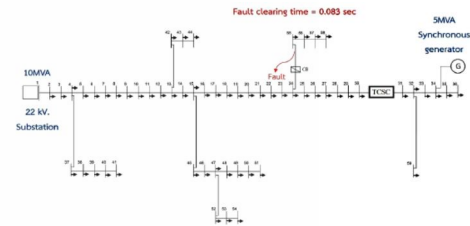


Fig. 4. 59 bused power system with TCSC

### IV. SIMULATION AND RESULTS

Comparison between the power system without TCSC case show the damping ratio on the critical mode is higher with TCSC case show in Fig. 5.

Time domain simulation is performed for a small perturbation in mechanical power to the machine in case of with and without TCSC.

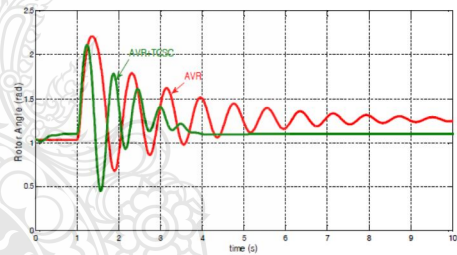


Fig. 5. Rotor Angle of Generator from 2 case study

On s-domain. The eigenvalue plot of the system without TCSC is show in Fig 6. The eigenvalue is far away from the imaginary axis than the system with TCSC show in Fig 7.

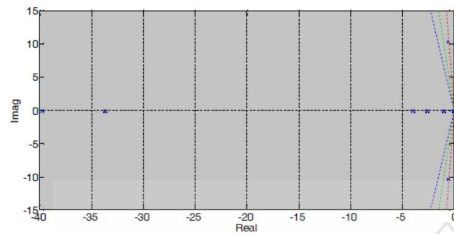


Fig. 6. Eigen value of system without TCSC

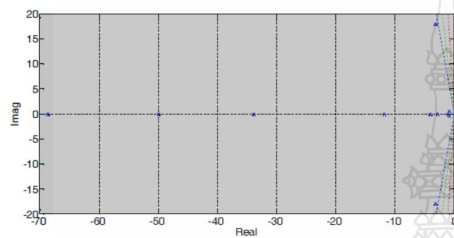


Fig. 7. Eigen value of system with TCSC

On z-domain. The eigenvalue plot of the system without TCSC is given show in Fig 8, the eigenvalue is far away from the center axis than the system with TCSC show in Fig 9.

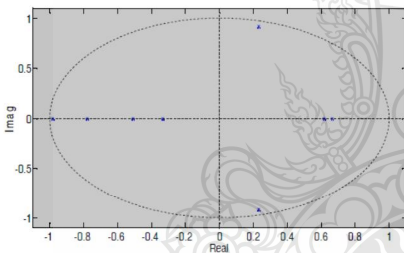


Fig. 8. Eigen value of system without TCSC

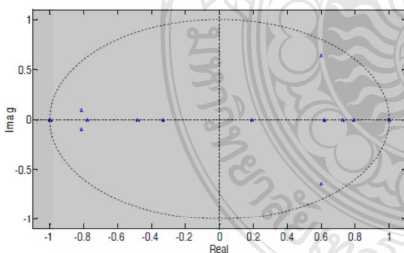


Fig. 9. Eigen value of system with TCSC

To maintain small signal stability TCSC are installed. The advantage of the proposed approach is that eigenvalues are shifted from positive real axis to negative real axis. It gives more damping to reduce oscillations and high precision results in determining the stability of the system. The results for installing TCSC devices are compared in Table 1, from the results the positive eigenvalues are reduced and negative eigenvalues are increased. Therefore, the system is maintained stable by installing TCSC devices.

TABLE I. EIGENVALUE ANALYSIS OF THE SYSTEM WITH AND WITHOUT TCSC

Eigen Value Type	Without TCSC	With TCSC
Dynamic Order	12	20
Buses	59	59
Positive Eigens	1	0
Negative Eigens	12	18
Complex Pairs	1	1
Zero Eigens	0	1

### V. CONCLUSION

The paper presents a comprehensive low frequency oscillation study in 59 buses power system to capture local electromechanical mode. Base case system shows an electromechanical mode with low damping ratio and the introduction of AVR push the critical mode towards the imaginary axis by adding negative damping on it. Adding TCSC of the series FACTS controllers to help system improving the damping which got reduced due to AVR. The eigenvalue results have been corroborated with the helping of time domain simulations.

### REFERENCES

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, (McGraw-Hill: New York, 1994).
- [2] G. Rogers, *Power System Oscillations*, (Kluwer: Massachusetts, 2000).
- [3] F. Milano, "An Open Source Power System Analysis Toolbox", *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), (August 2005), 1199-1206.
- [4] F. Milano, PSAT: Power System Analysis Toolbox, version 2.0.0-beta, (March 2007).
- [5] *Power System Stability and Control*, 3rd ed., The Electric Power Engineering Handbook, Leonard L. Grigsby, ed. CRC Press, 2012.
- [6] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, 2000.
- [7] S. Meikandasivam, Rajesh Kumar Nema and Shailendra Kumar Jain "Behavioral Study of TCSC Device - A MATLAB/Simulink Implementation", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* Vol:2, No:9, 2008



The 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network  
of Rajamangala University of Technology

งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

# EENET 2017

"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"  
Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture

2-4 May 2017, K.P. Grand Hotel Chanthaburi

## Conference Topics

- Electrical Power (PW)
- Power Electronics (PE)
- Energy and Energy Saving (ES)
- Control Systems and Instrumentation (CT)
- Computer and Information Technology (CP)
- Electric Communication (CM)
- Electronics (EL)
- Digital Signal Processing (DS)
- Innovation and Invention (IN)
- General Electrical Engineering (GN)



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธา จินดาเพชร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนต์ชัย กุลรวรานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา สาครรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช อินต๊ะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลีวันกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ราชู พันธธลาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤกษ์ชัย พูประทีปศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รองศาสตราจารย์ ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ลาวินัยวิสุทธิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ อุดมทรงราษฎร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ พรหมพิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย สุขสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.เสถียร ธีญาศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ บุญเลิศ สือเฉย	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติเดช บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ อ่างแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทิพัทธ์ สกฤตเมธพิทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์ณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นชรัตน์ ราชบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล เมธีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพพร พัทธประภคิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐธิดา รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาดยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรกรณ์เกียรติ์ เสวตเมธิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภัศรีชกรณ อารีย์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ ปวงกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค ให้อ่องคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณัยภัทร ภูมิภาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนน ดุสิตถาวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพบุสย์ เกียรติสุขคณาธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเที่ยรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณพร ทีเ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชร วงศ์ปัญญา	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันไชย คำแสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันวิสา ชัยวงษ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูรย์ พรหมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย ใจกล้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ปงลังกา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดา สมกุล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ วรรณธราเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ศรีสกุลเดี่ยว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ ทองกุลภักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจิ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ อินท่าไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิเรก จันตะคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณพล ป้อมสถิตย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวาริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เด่น คอกพิมาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิติพงษ์ สมไชยวงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประหยัด กอสงุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พกิจ สุวิทย์	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิณิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิภาวัลย์ นาคทรัพย์	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วุฒิชัย สว่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย แดงเอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธินันท์ ต้นโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อดิศักดิ์ รมพุฒตาส	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุชิต เจริญ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาญชัย เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชำนาญ ปัญญาใส	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ดร.กัญญา สิทธิสงวน	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ดร.กฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.กัญจนา ชัยอมฤต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.กิตติวัฒน์ นิ่มเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.คมกฤษ บุญยั้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.จรินทร์ศักดิ์ แซ่เตี่ยว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.จักรกฤษ ธรรมกานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร.ชวรงค์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ดร.ณรงค์ เมตไตรพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ดร.ณัฐพงศ์ หัตถิ	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ดร.ณัฐทิ ถึงสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
ดร.ดนุชา ประเสริฐสม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ณอม โลมาศ	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.ธีระศักดิ์ สมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
ดร.นพดล มณีเขี้ยว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.นิติกรณ์ ศิลปศิริวานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.นิติศักดิ์ เจริญรูป	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บัญชา เหลือแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.ประจวบ อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีอีสาน
ดร.ปรัชญา มงคลไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.พงษ์เทพ รักผกาวงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ดร.พรพิมล วิทยุชาคริต	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.พลกฤษณ์ ทุนคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
ดร.พิชัย อยู่เปล่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.พิเชษฐ์ เหมยคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ดร.พีรพล จันทร์หอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.พุทธพร เสวตสกุลานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร.ไพวรรณ เกิดตรวจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.มงคล มีลุน	กรมสอบสวนคดีพิเศษ(DSI)
ดร.มดี นรารมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.มาลีญา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ยอด สุขะมงคล	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ดร.ยุทธพงศ์ ทัพผดุง	บริษัท ทีอีโอ เอ็นคอม อินเทอร์เน็ตเซ็นทรัล จำกัด
ดร.รัศมี สิทธิอินแก้ว	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ดร.วทีญญา รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.วรินทร์ สุดคั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.วฤทธิ์ วิชกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.วุฒิพร เลิศวาสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร.ศรีัญญา ปะสะกะวี	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
ดร.ศรีสุดา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สมพร ศรีวัฒน์พล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สิัญญา วรรคิต	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ดร.สันติ นุราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.สุธาสินี คุปตะบุตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ดร.สมณชา เกษมวิลาศ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.สุลักษณ์า มงคล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ดร.เสกสรร พลสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.อนนท์ นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ดร.อรพิน ชาญน้ำสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.อรรถ พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
ดร.อุมารินทร์ แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.เอกสิทธิ์ นกุลเจริญลาภ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญ

บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง (PW)		หน้า
PW01	การใช้เทคนิคการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งในการแก้ปัญหา การจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบ จิรพันธ์ ทาแกง <sup>1</sup> วันไชย คำแสน <sup>2</sup> และ อภินันท์ อูโรโสภณ <sup>3</sup> <sup>1,2</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี <sup>3</sup> มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	1
PW02	Optimal Network Reconfiguration using Binary Particle Swarm Optimization Watcharakorn Pinthurat <sup>1</sup> and Amrit Pauldel <sup>2</sup> <sup>1</sup> Rajamangala University of Technology Tawan-Ok <sup>2</sup> Nanyang Technological University	2
PW03	การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ฟิวเตอร์แบบพาสซีฟเพื่อแก้ไขฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง บทความ อนาคตดี เพ็ชรเจริญ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สากร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ตีพิมพ์ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	3
PW04	การศึกษาจำลองผลกระทบการเกิดฟ้าผ่าบนเสาไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 22 kV และ 115 kV ด้วย ATP-EMTP บทความ พิณิจ จิตจริง จักรกรวิช นวลปลั่ง และ อนันต์ ตั้งจิตรกษาร ชมเชย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	7
PW05	การวิเคราะห์ต้นตอสาเหตุความชำรุดของสวิตช์เกียร์แรงสูง 115 เควี บทความ โสภา แซ่เฮ้ง <sup>1</sup> และ อรุโอร หนูหอม <sup>2</sup> ชมเชย <sup>1</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ <sup>2</sup> มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	11
PW06	การค้นคว้าพื้นที่ไร้การตรวจจับในการป้องกันการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดซิงโครนัส มานพ อังรัมย์ <sup>1</sup> และ เฉลิมพล วรรณสิงห์ <sup>2</sup> <sup>1</sup> มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ <sup>2</sup> ฝ่ายก่อสร้างระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	15
PW07	การประมาณการสถานีประจุมั่วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ยุทธนา คงจีน <sup>1</sup> วรรณวิจิ จุลกัลป์ และ กฤษณ์ชานม์ ภูมิภักดีพิชญ์ <sup>2</sup> <sup>1</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี <sup>2</sup> การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต1 (ภาคกลาง) จ.พระนครศรีอยุธยา	19
PW08	การควบคุมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสองเครื่องในระบบแยกเดี่ยว กฤษณ์ชานม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ธาสนดา ผิวนวน สุภคม สุภกมล และ ชรศักดิ์ พลสายชุมพล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	23

## บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



# การประมาณการสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า Estimation of Quick Charging Station for Electric Vehicles

ยุทธนา ทองจีน<sup>1</sup>, วรณวิช จุฑกัณฑ์<sup>2</sup>, และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิทิทธิพิชญ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>หน่วยวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก 5 ค.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี โทรศัพท์ 02-549-3613 E-mail: yuttana\_k@mail.mutt.ac.th

<sup>2</sup>กองวิศวกรรมและวางแผน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต1 (ภาคกลาง) จ.พระนครศรีอยุธยา

## บทคัดย่อ

บทความนำเสนอวิธีการประมาณการสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าโดยคำนวณจาก พื้นฐานข้อมูล ขนาดพื้นที่ ความหนาแน่นของจำนวนประชากร สัดส่วนของประชากรที่มีรถยนต์ส่วนบุคคลต่อจำนวนประชากรในพื้นที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของจำนวนประชากรจาก 1 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์และสัดส่วนการมีรถยนต์ส่วนบุคคลของประชากรในพื้นที่จาก 0.01 ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ นั้นพบว่า จำนวนสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำการทดสอบในระบบจำหน่ายสถานีประจุที่สายป้อน 1 ทำการสุ่มเพิ่มสถานีประจุจาก 1 ถึง 4 สถานีเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบพบว่ามีการสูญเสียเพิ่มขึ้น 18 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในอนาคตจึงจำเป็นต้องพิจารณาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีประจุในระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ: สถานีประจุเร็ว, ยานยนต์ไฟฟ้า, การบริหารจัดการพลังงาน

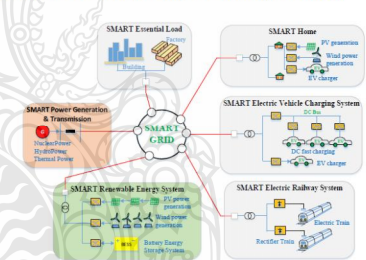
## Abstract

This paper presents a methodology to estimate of quick charging station for Electric Vehicles (EVs) based on area data, population density data, and proportion of EVs owner per the number of population in area data for computing the number of quick charging station. When vary the population density data and proportion of EVs owner per the number of population in area data from 1 to 6 % and 0.01 to 0.8 % showed that the number of EVs station increased and random selected Feeder No.1 of TYA to install the EVs station No.1 to No.4 for solving the total real power loss. The results shown that the total real power loss increased 18%. Therefore, In future should be considered the optimal size and site of EVs station in an electrical power system.

Keywords: Quick Charging Station, Electric Vehicles, Energy Management System.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ประกอบกับกระแสด้านต้องการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิบรรยากาศโดยรวมของโลก ทำให้ในหลายประเทศเริ่มมีการส่งเสริมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น[1] ทำให้ส่งผลกระทบต่อความต้องการพลังงานของระบบไฟฟ้าอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ถึงแม้ว่าจะมีการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆมาเสริมหรือเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้าทำให้ระบบการบริหารจัดการพลังงาน(Energy Management System :EMS)มีความสำคัญเช่นกันส่งผลทำให้เกิดการจัดการพลังงานภาพรวมหรือระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ(Smart Grid System: SGS)



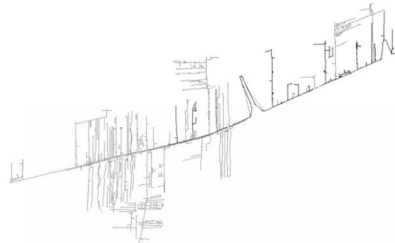
รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ[1]

งานวิจัยที่ซึ่งให้เห็นผลของการเพิ่มขึ้นของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ[2] การเพิ่มขึ้นของสถานีประจุเร็วขึ้นส่งผลต่อการสูญเสียรวมของระบบไฟฟ้า(Total real power loss) การจัดการระบบประจุจึงจำเป็นต้องมีการจัดการรูปแบบยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับสถานีประจุเร็ว ในหลายงานวิจัยได้นำเสนอรูปแบบต่างๆ เช่น แบบคงตัว(Static Load), แบบที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงแรงดัน(Voltage Dependency Load: VDL),แบบโวลติโนมิชโหลด(ZIP) และการพิจารณาแบบมอนติคาโร(Monte Carlo) ของช่วงเวลา เป็นต้น

**บทความวิชาการ**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



รูปที่ 2 ระบบจำหน่ายและสายป้อนสถานีวิทยุรีขนาด 90MVA

บทความนี้นำเสนอการประมาณการสถานีประจําเร็วสำหรับ อำเภอ วิทยุบุรี จังหวัดปทุมธานี ประกอบด้วยชนิดของยานยนต์ไฟฟ้า โหมดการ ประจําสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โหมดยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์ ระบบไฟฟ้ากำลัง กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม การประมาณการจำนวนสถานี ประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ผลการทดสอบ และบทสรุปดังนี้

**2. สถานประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า**

**2.1 ชนิดของยานยนต์ไฟฟ้า**

จากการขยายตัวทางด้านเทคโนโลยีจะเห็นได้ว่าการจำแนกประเภท ของยานยนต์นั้นไม่ได้รวมเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วย เทคโนโลยีแบตเตอรี่ส่วน แต่รวมถึงการนำเทคโนโลยีอื่นมาผสมด้วยทำให้สามารถแยกประเภทยานยนต์ไฟฟ้าได้ 4 ประเภทดังนี้[3]

- ก) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด(Hybrid Electric Vehicle, HEV) ประกอบด้วยตัวเครื่องยนต์ฟอสซิลหลัก และ มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องส่งกำลังรอง ใช้พลังงานที่เก็บไว้ที่แบตเตอรี่ผสมผสานการทำงานกับกรเก็บพลังงานกล
- ข) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดปลั๊กอิน(Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV) เป็นการพัฒนาคือยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด ที่ประจําพลังงานเข้าแบตเตอรี่จาก 2 แหล่งทำให้สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่วิ่งได้ระยะทางเพิ่มขึ้น
- ค) ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่(Battery Electric Vehicle, BEV) เป็นยานยนต์ที่มีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้า ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่
- ง) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV ) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง(Fuel cell) โดยตรงจากไฮโดรเจน มีขนาดความจุสูงกว่าแบตเตอรี่

ในขอบเขตการนำเสนอที่ทำการพิจารณาประเภทของยานยนต์ในประเภท ข) และ ค) เท่านั้นที่มีความเป็นไปได้ที่จะมีการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าเพื่อการประจําของแบตเตอรี่

**2.2 การประจําสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า**

เนื่องจากความสามารถในการวิ่งของยานยนต์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น จำนวนขนาดแก็คของแบตเตอรี่, ความเร็ว,ลักษณะการขับที่นำหนักบรรทุก และสภาพการจราจร เป็นต้น ซึ่งระยะเวลาในการประจําของยานยนต์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโหมดในการประจําซึ่งสามารถสรุปเบื้องต้นได้ 2 มาตรฐานคือ

ตารางที่ 1 การประจําสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน SAE[4]

ระบบไฟฟ้า	เฟส	แรงดันที่ขั้ว(V)	กระแสประจํา(A)	กำลังไฟฟ้าที่ขั้ว(kW)
AC Level 1	1	120	12-16	1.4-1.9
AC Level 2	1	208-240	32-80	2.5-19.2
AC Level 3	1,3	240	More than Level2	20-43
DC Level 1	-	200-450	80	36
DC Level 2	-	200-450	200	90
DC Level 3	-	200-600	400	240

ตารางที่ 2 การประจําสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC61851-1 [3]

โหมดการประจํา	ใช้หัวประจําเฉพาะ	ประเภทการประจํา	กระแสประจํา (A)	กำลังไฟฟ้าที่ขั้ว(kW)
Mode1	ไม่	ขั้ว(AC)	16	3.7-11
Mode2	ไม่	ขั้ว(AC)	32	3.7-22
Mode3	ใช้	ขั้วหรือทั้งเร็ว (AC 1,3Phase)	ขึ้นอยู่กับขนาดของหัวประจํา	ขึ้นอยู่กับขนาดของหัวประจํา
Mode4	ใช้	เร็ว (DC)	ขึ้นอยู่กับขนาดของหัวประจํา	ขึ้นอยู่กับขนาดของหัวประจํา

การพิจารณาการติดตั้งสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้านั้น นอกจากพิจารณาในขนาดที่เหมาะสมของสถานีกับขนาดแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าแล้วนั้นจำเป็นต้องพิจารณาข้อกำหนดในด้านมาตรฐาน สหรัมนอก เช่นมาตรฐาน IEC-61000-3-4 เรื่องข้อกำหนดพิคกกระแสแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับบริบททางไฟฟ้าที่มีขนาดกระแสต่อเฟสมากกว่า 16 A ซึ่งขนาดของสถานีประจําเร็วจัดอยู่ในประเภท Class A หรือปฏิบัติตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์สหรัมนอก เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมของการไฟฟ้าโดยกำหนดให้ขีดจำกัดกระแสและแรงดันสหรัมนอก ณ จุดต่อร่วม(Point of Common Coupling, PCC) ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

**บทความวิชาการ**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



**2.3 โหลดยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับกรวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง**

เนื่องจากการประจุแบตเตอรี่นั้นส่งผลต่อลักษณะของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่โวลเตจยานยนต์ไฟฟ้าประจุที่ระดับความจุต่างๆของแบตเตอรี่ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันของโวลเตจ (Voltage Dependency Load, VDL) ดังนั้นจึงใช้รูปแบบโพลีโนเมียลโวลเตจ (ZIP) สำหรับการวิเคราะห์การไหลในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) เมื่อ '0' เป็นตัวแทนจุดการทำงานของแรงดันระบบในสภาวะคงตัว

$$P_i = P_0 \left( aP \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-aP}} + bP \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-bP}} + (1-aP-bP) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-cP}} \right) \tag{1}$$

$$Q_i = Q_0 \left( aQ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-aQ}} + bQ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-bQ}} + (1-aQ-bQ) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-cQ}} \right) \tag{2}$$

เมื่อ  $[1-aP-bP=1, 1-aQ-bQ=1]$  ,  $e_{-XX}$  คือ จำนวนยานยนต์ไฟฟ้า  $V$  คือแรงดันที่บัส (p.u.) ตัวชี้กำลัง  $(e_{-XX})$  ใช้แทนรูปแบบพฤติกรรมโวลเตจในแต่ละแบบซึ่งประกอบไปด้วย 3 แบบ คือ โวลเตจกำลังไฟฟ้า(constant power) โวลเตจกระแส(constant current) และ โวลเตจอิมพีแดนซ์(constant impedance)[4]. โดยค่าองค์ประกอบของค่า  $(aP, bP, cP, aQ, bQ, cQ)$  สามารถนำเสนอได้ใน[5].

**2.5 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม(Total real power loss)**

การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณหาโดยใช้สมการ (3) [4].

$$|\text{Real power loss}| = \sum_{i=1}^N I_i^2 R_i \tag{3}$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนสายส่งในระบบไฟฟ้า.  $I$  คือกระแสไหลในสายส่ง และ  $R$  คือค่าความต้านทานในสายส่งกำลังไฟฟ้า

**2.6 การประมาณการจำนวนสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า**

ในการประมาณการจำนวนสถานีประจุเร็ว ( $nfstation$ ) นั้นใช้หลักการจากจำนวนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนประชากร ขนาดพื้นที่ สัดส่วนของการประมาณการจำนวนประชากรที่มีรถยนต์ส่วนบุคคลสามารถนำเสนอได้สมการที่ (4) ดังนี้[6]

$$nfstation \geq \frac{A \times pdensity \times pBEV}{sh \times ncp \times nst} \tag{4}$$

เมื่อ  $A$  คือขนาดพื้นที่ ( $sq.km^2$ ),  $pdensity$  คือความหนาแน่นของประชากร ( $man / km^2$ ),  $pBEV$  คือ สัดส่วนของประชากรที่มีรถยนต์ส่วนบุคคลต่อจำนวนประชากรในพื้นที่,  $ncp$  คือจำนวนหัวจ่ายประจุเร็วในสถานีประจุ,  $nst$  คือ เลื่อนจำนวนที่สามารถประจุใน 1 ชั่วโมง(12 ครั้งใน 1 ชั่วโมงหรือ 5 นาทีต่อครั้ง) และ  $sh$  คือ จำนวนชั่วโมงที่ให้บริการของสถานีประจุเร็วใน 1 วัน

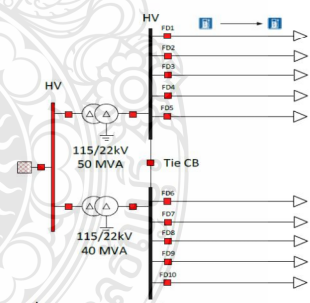
การประมาณการสัดส่วนของประชากรที่มีรถยนต์ส่วนบุคคลต่อจำนวนประชากรในพื้นที่นั้นสามารถทำการประมาณค่าได้จากสมการ (5) ดังนี้[3]

$$\ln \left( \frac{VO}{0.812 - VO} \right) = 1.3558 \ln GDPpCap - 18.1253 \tag{5}$$

เมื่อ  $VO$  คือ Vehicle Owner มีค่าเป็นจำนวนต่อประชากร,  $GDPpCap$  คือรายได้ประชากรต่อจำนวนประชากร

**3. ผลการจำลอง**

ทำการจำลองการประมาณการจำนวนสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลของอำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ในการคำนวณหาจำนวนสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยทำการพิจารณา 2 เงื่อนไขประกอบกัน 2 อย่างคือ ความหนาแน่นของประชากรเพิ่มขึ้นจาก 1 - 6 เปอร์เซนต์และพิจารณาสัดส่วนของประชากรที่มีรถยนต์ส่วนบุคคลต่อจำนวนประชากรในพื้นที่จาก 0.01-0.8 เปอร์เซนต์



รูปที่ 3 รูปแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าสำหรับอำเภอธัญบุรี

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่อาจส่งผลต่อระบบไฟฟ้าในอนาคต ทำการจำลองติดตั้งสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ อำเภอธัญบุรีสายป้อนวงจรที่ 1(FD1) ขนาด 2,000kW pE.0.9 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยการสุ่ม เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสามารถนำเสนอได้ดังตารางที่ 3

**บทความวิชาการ**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์
<i>A</i>	112.124	<i>VO</i>	138,535
<i>Population</i>	190,163	<i>pPEV</i>	138.54
<i>pdensity</i>	1,696.01	<i>nep</i>	8
<i>sh</i>	24	<i>nst</i>	12
ขนาดหม้อแปลง ( <i>nep</i> x 250kW x 1.25)	2,500kVA		

ตารางที่ 4 ผลการประมาณจำนวนสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

Vary pdensity	1%									
Vary EV owner	0.01%	0.05%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%
nfStation	0.011	0.057	0.114	0.229	0.343	0.457	0.572	0.686	0.8	0.915
มีเตชษยััน	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Vary pdensity	2%									
Vary EV owner	0.01%	0.05%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%
nfStation	0.023	0.114	0.229	0.457	0.686	0.915	1.143	1.372	1.601	1.829
มีเตชษยััน	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2

Vary pdensity	3%									
Vary EV owner	0.01%	0.05%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%
nfStation	0.034	0.172	0.343	0.686	1.029	1.372	1.715	2.058	2.401	2.744
มีเตชษยััน	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3

Vary pdensity	4%									
Vary EV owner	0.01%	0.05%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%
nfStation	0.046	0.229	0.457	0.915	1.372	1.829	2.287	2.744	3.202	3.659
มีเตชษยััน	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4

Vary pdensity	5%									
Vary EV owner	0.01%	0.05%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%
nfStation	0.057	0.286	0.572	1.143	1.715	2.287	2.859	3.43	4.002	4.574
มีเตชษยััน	1	1	1	2	2	3	3	4	5	5

Vary pdensity	6%									
Vary EV owner	0.01%	0.05%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%
nfStation	0.069	0.343	0.686	1.372	2.058	2.744	3.43	4.116	4.802	5.488
มีเตชษยััน	1	1	1	2	3	3	4	5	5	6

ผลการประมาณการค่าจำนวนสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในตารางที่ 4 นั้นพบว่าอิทธิพลของขนาดหม้อแปลงของจำนวนประชากรและสัดส่วนการมีรถยนต์ส่วนบุคคลนั้น มีผลต่อจำนวนสถานีประจําเร็วเพิ่มขึ้นรวมถึงหากพิจารณาอัตราได้ผลดีของประชากรในพื้นที่เพิ่มขึ้น ก็มีผลทำให้สถานีประจําเร็วที่ประมาณการมีการเปลี่ยนแปลงได้

ตารางที่ 5 ค่าพลังงานสูญเสียสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

	Base Case	1 Station	2 Station	3 Station	4 Station
Node	-	601_2757179	601_2754854	601_275693	601_5267467
Power Loss (MW)	3.0017	3.041	3.417	3.521	3.542
%	0%	1.3%	13.84%	17.30%	18%

จากตารางที่ 5 แสดงผลการคิดตั้งสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจำนวน 1 ถึง 4 สถานี นั้นพบว่าค่าพลังงานสูญเสียของระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนสถานีที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อภาพรวมของค่าพลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีประจําเร็วไปติดตั้งอยู่

**4. สรุป**

การประมาณการสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่อำเภอชัยบุรี จังหวัดพุมธานี โดยใช้ความสัมพันธ์ของ ขนาดพื้นที่ ความหนาแน่นของจำนวนประชากรและสัดส่วนการมีรถยนต์ส่วนบุคคลของประชากรในพื้นที่นั้นพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของจำนวนประชากร จาก 1 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์และสัดส่วนการมีรถยนต์ส่วนบุคคลของประชากรในพื้นที่จาก 0.01 ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ นั้นพบว่าจำนวนสถานีประจําเร็ว นั้นเพิ่มขึ้นจาก 1 สถานีเป็น 6 สถานี เมื่อทำการถ่วงดุลสถานีประจําเร็วในสายป้อนวงจรที่ 1(FD1) จำนวน 1 ถึง 4 สถานีพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของสถานีเพิ่มขึ้นจาก 3.0017 MW เป็น 3.542MW คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 18 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการติดตั้งสถานีประจําเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้ามีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาอย่างเหมาะสม

ในงานวิจัยในลำดับถัดไป จะพิจารณาการติดตั้ง ขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของสถานีประจําเร็วในระบบไฟฟ้ากำลัง

**5. กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณ “การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค” ในความอนุเคราะห์การทดสอบในบทความวิจัยที่นำเสนอในครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Yuttana Kongjeen and Krischoune Blumkittipich, “Electric Vehicle Loads for Power Flow Analysis,” IEEET- International Electrical Engineering Transactions, VOL.2, No. 1 (2) JAN-JUN 2016, pp. 18-22.
- [2] C.H.Dharamakeerthi, N.Mithulananthan N. and T.K. Saha, “Impact of electric vehicle fast charging on power system voltage stability,” Electrical Power and Energy Systems,2013.
- [3] ชยพจน์ ตออ่อนนวลและคณะ “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบต่อที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย” สนง.พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, พ.ศ.2558.
- [4] Hadi Saadat, “Power System analysis book” third edition
- [5] ยุทธนา คงจีน และ กฤษณ์ชานันท์ ภูมิภักดีพิชญ์, “การควบคุมการแกว่งความถี่ในระบบไฟฟ้าโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของ PSS ด้วยเทคนิค PSO กรณีโหนดสถานีประจําเร็วไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า,” The 39<sup>th</sup> Electrical Engineering, 2-4 พฤศจิกายน 2559.
- [6] Prakomchai Phonrattanasak and Nopbhorn Leeprechanon, “Development of Fast Charging Station for Thailand” International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol.3, No.6, December 2012.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายวรรณวิษ จุลกัลป์
วัน เดือน ปีเกิด	6 มีนาคม 2527
ที่อยู่	110/13 หมู่ที่ 9 ต.ขุนทะเล อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรไฟฟ้า บริษัท แม็กซิม อินทริเกรดเต็ด โพรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด วิศวกร การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 1 (ภาคกลาง) จ.พระนครศรีอยุธยา ตั้งแต่ พ.ศ. 2553 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-9474-2355
อีเมล	1156704210094@mail.rmutt.ac.th

