

การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาซบเซงโครนัสเรโซแนนซ์โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมแบบปรับค่าได้



นายพรศักดิ์ พงษ์ทิพย์พิทักษ์

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY FOR SOLVING SUB-SYNCHRONOUS RESONANCE PROBLEM  
USING THYRISTOR-CONTROLLED SERIES CAPACITORS



Mr. Pornsak Pongthippitak

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาหับซิง โครนัสเร โชนแนซโดยใช้ตัวเก็บประจุ อนุกรมแบบปรับค่าได้
โดย	นายพรศักดิ์ พงษ์ทิพย์พิทักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ฉิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออากรณ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

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

  
..... กรรมการ  
(ดร.ธนชัย ลิ้มปสุวรรณ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายพรศักดิ์ พงษ์ทิพย์พิทักษ์ : การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาซบซิงโครนัสเรโซแนนซ์โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมแบบปรับค่าได้. (A STUDY FOR SOLVING SUB-SYNCHRONOUS RESONANCE PROBLEM USING THYRISTOR-CONTROLLED SERIES CAPACITORS)  
 อ. ที่ปรึกษา : คร.แนบบุญ หุนเจริญ, จำนวนหน้า 130 หน้า.

ตัวเก็บประจุอนุกรมสามารถนำมาใช้เพิ่มสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีระยะทางระหว่างโรงไฟฟ้ากับศูนย์กลางโหลดค่อนข้างไกลจากกัน แต่การใช้งานอุปกรณ์ชนิดนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาซบซิงโครนัสเรโซแนนซ์ (Subsynchronous resonance : SSR) ในระบบ ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติเกิดขึ้นที่เพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ซบซิงโครนัสเรโซแนนซ์ อันเนื่องมาจากการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าเจาะจงของแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ทำให้เป็นเชิงเส้น พร้อมทั้งตรวจสอบผลโดยการจำลองพฤติกรรมของระบบที่ภาวะชั่วคราว เปรียบเทียบผลที่ได้กับระบบที่ติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมปรับค่าได้ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor controlled series capacitor : TCSC) แทน ทั้งในแบบที่มีและไม่มี การควบคุมเชิงพลวัตเพื่อลดผลการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power oscillation damping : POD) โดยใช้ระบบทดสอบเป็นระบบ 11 บัส สายส่ง 14 เส้น ที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทย ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับสายส่งจากบัสบางสะพานไปยังบัสสุราษฎร์ธานี ซึ่งเป็นสายส่งเส้นที่มีความสำคัญต่อการส่งกำลังไฟฟ้า และยังเป็นสายส่งเส้นที่ยาวที่สุด ผลจากการศึกษาพบว่า TCSC สามารถลดผลกระทบของปรากฏการณ์ซบซิงโครนัสเรโซแนนซ์ได้ ทำให้สามารถเพิ่มระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 49% เทียบกับรีแอคแตนซ์ของสายส่งเส้นนั้น สำหรับกรณีที่ติดตั้งชุดควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าพบว่าสามารถลดผลการแกว่งได้และไม่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดการชดเชยอันเนื่องมาจากปัญหาซบซิงโครนัสเรโซแนนซ์

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... นวรัตน์ พงษ์ทิพย์พิทักษ์.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2549.....

## 4670400521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: SUB-SYNCHRONOUS RESONANCE / THYRISTOR-CONTROLLED SERIES CAPACITOR / TCSC / THAILAND TRANSMISSION SYSTEM

PORNSAK PONGTHIPPITAK : A STUDY FOR SOLVING SUB-SYNCHRONOUS RESONANCE PROBLEM USING THYRISTOR-CONTROLLED SERIES CAPACITORS.

THESIS ADVISOR : MR.NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 130 pp.

Series capacitors have been used to increase the capacity of an existing power system, especially in the case of the system with long distance between power plants and load centers. However, this application may cause a subsynchronous resonance (SSR) problem in which damage of the shaft connecting between the turbines of the generator prime mover may occur due to its natural frequencies being excited.

This thesis studies the SSR phenomenon caused by the employment of fixed series capacitors in a transmission system. Eigenvalue analysis of a linearized power system model, as well as time-domain simulation, are applied to examine and compare between the results from a test system with series capacitor to those from a respective system with thyristor-controlled series capacitor (TCSC). Additionally, performance of an auxiliary control for power oscillation damping (POD) has been examined. The main test system used here is a 11-bus and 14-line Central-Southern transmission system of Thailand. The series-capacitor compensation is applied to the Bangsapan-Suratthani transmission line, which is the longest and most crucial for transmitting power from the Central to the South. The results of this thesis show that TCSC can mitigate the SSR problem where the series compensation can be increased from 10% to 49% with respect to the line reactance. When POD control is applied, the result shows that it can help damp power oscillation with no significant impact on the line compensation limit by SSR.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....*Pornsak Pongthippitak*.....  
 Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....*Naebboon Hoonchareon*.....  
 Academic year .....2006.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ หากขาดความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้โอกาสทางการศึกษา อบรมเลี้ยงดู และคอยให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบพระคุณ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยมาโดยตลอด ทั้งยังให้โอกาสทำงานพิเศษเพื่อเป็นค่าใช้จ่ายระหว่างเรียน

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ซึ่งมีส่วนสำคัญในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และ ดร.ชนชัย ลิ้มปสุวัฒน์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการตรวจสอบแก้ไข รวมทั้งให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นลงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ที่จำเป็นต่อการศึกษาค้นคว้า อีกทั้งครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าเรื่อยมา ตลอดจน พี่ น้อง และ เพื่อนๆ ทุกคน ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งทำให้การทำงานวิจัยเป็นไปด้วยความราบรื่น และการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ที่เอื้อเพื่อข้อมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ .....	3
2. ชับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ .....	5
2.1 สาเหตุการเกิดชับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ .....	5
2.2 การแยกประเภทของชับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ .....	8
2.3 การวิเคราะห์ชับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ .....	10
3. การใช้งาน TCSC และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12
3.1 องค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะการทำงานของ TCSC .....	12
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ TCSC .....	15
3.3 พิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ TCSC .....	19
3.4 การใช้งาน TCSC ในระบบไฟฟ้ากำลัง .....	20
3.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
4. การพัฒนาแบบจำลองของระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า .....	23
4.1 แบบจำลองชุดกักเก็บของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	23
4.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	25
4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง .....	26
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับระบบทดสอบ IEEE Benchmark ..	32

บทที่	หน้า
4.4.1 ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model : FBM .....	32
4.4.2 ระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model : SBM .....	46
4.5 สรุปผลการตรวจสอบ .....	56
5. การศึกษาผลของการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมแบบคงที่เมื่อติดตั้งกับระบบ ส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทย .....	57
5.1 การวิเคราะห์ค่าเงาเงจของระบบภาคใต้ .....	58
5.2 การจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบภาคใต้ .....	59
5.3 สรุปผลกระทบของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อระบบภาคใต้ .....	76
6. การเพิ่มขีดจำกัดการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้า เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ด้วย TCSC .....	77
6.1 การวิเคราะห์ค่าเงาเงจของระบบภาคใต้ .....	78
6.2 การจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบภาคใต้ .....	81
6.3 แบบจำลองการควบคุมเชิงพลวัตเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (POD) สำหรับ TCSC .....	98
6.4 ผลการทดสอบด้วยชุดควบคุม POD .....	100
7. สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	110
7.1 สรุปผลการวิจัย .....	110
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	111
รายการอ้างอิง .....	112
ภาคผนวก .....	115
ภาคผนวก ก. ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE .....	116
ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ...	120
ภาคผนวก ค. การคำนวณจุดเริ่มต้นของแบบจำลอง .....	125
ภาคผนวก ง. แบบจำลองการควบคุมเชิงพลวัตเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (POD) สำหรับ TCSC .....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	130



## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากับระดับการชดเชย ด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม .....	7
4.1	เปรียบเทียบค่าเจาะจงของแบบจำลอง IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 50% .....	33
4.2	เปรียบเทียบค่าเจาะจงของแบบจำลอง IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 53% .....	34



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ระบบเรเดียอย่างง่ายเมื่อพิจารณาร่วมกับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม .....	6
2.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรกลแบบเหนี่ยวนำ .....	9
3.1 องค์ประกอบหลักของอุปกรณ์ TCSC .....	13
3.2 การทำงานของ TCSC ในโหมดยับยั้ง .....	13
3.3 การทำงานของ TCSC ในโหมดลัดผ่าน .....	14
3.4 การทำงานของ TCSC ในโหมดควบคุม .....	14
3.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม TCSC และกระแสทรินสเตอร์ .....	15
3.6 กราฟคุณลักษณะของ TCSC .....	18
3.7 กราฟพิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเทียบกับกระแสไฟฟ้าในสายของ TCSC .....	19
3.8 กราฟพิกัดรีแอกแตนซ์เทียบกับกระแสไฟฟ้าในสายของ TCSC .....	20
4.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับวิเคราะห์ปรากฏการณ์ SSR .....	23
4.2 ตัวอย่างโครงสร้างของระบบพลาเชื่อมโยงของชุดกักกันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	23
4.3 ระบบกักกันชุดที่ $i^{th}$ .....	24
4.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกนอ้างอิง dq .....	26
4.5 สายส่งที่ไม่มีตัวเก็บประจุอนุกรม .....	27
4.6 สายส่งเส้นที่มีตัวเก็บประจุอนุกรม .....	28
4.7 โหลดและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัส .....	28
4.8 โครงสร้างการเชื่อมต่อของชุดกักกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้ากำลัง .....	31
4.9 ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model .....	32
4.10 ส่วนจริงของค่าเจาะจงจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ .....	35
4.11 ส่วนจินตภาพของค่าเจาะจงจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ .....	35
4.12 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	37
4.13 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	37
4.14 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุอนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	38

ภาพประกอบ	หน้า
4.15 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	38
4.16 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	39
4.17 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	39
4.18 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	40
4.19 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	40
4.20 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกรวมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	41
4.21 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	41
4.22 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	42
4.23 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	42
4.24 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25% .....	43
4.25 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25% .....	43
4.26 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกรวมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25% .....	44
4.27 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25% .....	44
4.28 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25% .....	45
4.29 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25% .....	45

ภาพประกอบ	หน้า
4.30 ระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model .....	46
4.31 ส่วนจริงของค่าเจาะจงจากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ .....	47
4.32 ส่วนจินตภาพของค่าเจาะจงจากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ .....	47
4.33 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	48
4.34 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	49
4.35 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุอนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	49
4.36 ค่าความเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	50
4.37 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0% .....	50
4.38 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	51
4.39 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	51
4.40 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุอนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	52
4.41 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	52
4.42 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10% .....	53
4.43 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30% .....	53
4.44 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30% .....	54

ภาพประกอบ	หน้า
4.45 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกรวมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุอนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30% .....	54
4.46 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30% .....	55
4.47 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30% .....	55
5.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ .....	57
5.2 ส่วนจริงของค่าเจาะจงจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจาก 0%-90% ของรีแอกแตนซ์สายส่งบางสะพาน- สุราษฎร์ธานี .....	58
5.3 ส่วนจินตภาพของค่าเจาะจงจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลาง กับภาคใต้ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจาก 0%-90% ของรีแอกแตนซ์สายส่ง บางสะพาน-สุราษฎร์ธานี .....	59
5.4 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0% .....	60
5.5 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0% .....	60
5.6 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 0% .....	61
5.7 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 0% .....	61
5.8 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 0% .....	62
5.9 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0% .....	62
5.10 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0% .....	63
5.11 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0% .....	63

ภาพประกอบ	หน้า
5.12 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% .....	64
5.13 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% .....	64
5.14 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% .....	65
5.15 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 10% .....	65
5.16 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% .....	66
5.17 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% .....	66
5.18 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% .....	67
5.19 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% .....	67
5.20 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% .....	68
5.21 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% .....	68
5.22 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% .....	69
5.23 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 30% .....	69
5.24 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพานถึง ที่ระดับการชดเชย 30% .....	70
5.25 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% .....	70
5.26 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% .....	71

ภาพประกอบ	หน้า
5.27	แรงบิดทางกลบนเพลาคู่มือโยงระหว่างชุดกึ่งหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ..... 71
5.28	ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 72
5.29	มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 72
5.30	ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 73
5.31	ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 73
5.32	ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 74
5.33	ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกึ่งหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 74
5.34	แรงบิดทางกลบนเพลาคู่มือโยงระหว่างชุดกึ่งหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 75
5.35	แรงบิดทางกลบนเพลาคู่มือโยงระหว่างชุดกึ่งหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ..... 75
6.1	แบบจำลองของ TCSC เมื่อติดตั้งกับสายส่งจากบัส k ไปยังบัส m ..... 77
6.2	รีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC เปลี่ยนค่าตามตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ ..... 77
6.3	ส่วนจริงของค่าแฉะจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อปรับค่า $X_{tcsc}$ ในย่านของตัวเก็บประจุจาก 0%-90% ของรีแอกแตนซ์ สายส่ง BSP-SRT ..... 78
6.4	ส่วนจินตภาพของค่าแฉะจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้เมื่อปรับค่า $X_{tcsc}$ ในย่านของตัวเก็บประจุ 0%-90% ของรีแอกแตนซ์ สายส่ง BSP-SRT ..... 79
6.5	เปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุนุกรมค่าคงที่กับรีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC ที่ระดับการชดเชย 30% ในย่านความถี่ 0 Hz-60 Hz ..... 80
6.6	ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC ..... 81

ภาพประกอบ	หน้า
6.7 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	82
6.8 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	82
6.9 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	83
6.10 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	83
6.11 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	84
6.12 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	84
6.13 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC .....	85
6.14 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	85
6.15 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	86
6.16 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	86
6.17 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	87
6.18 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	87
6.19 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	88
6.20 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	88
6.21 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC .....	89



ภาพประกอบ	หน้า
6.22 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	89
6.23 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	90
6.24 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	90
6.25 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	91
6.26 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	91
6.27 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	92
6.28 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	92
6.29 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC .....	93
6.30 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	93
6.31 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	94
6.32 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	94
6.33 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	95
6.34 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	95
6.35 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	96
6.36 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	96

ภาพประกอบ	หน้า
6.37 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC .....	97
6.38 โครงสร้างตัวควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ TCSC .....	98
6.39 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้น .....	99
6.40 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	100
6.41 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	101
6.42 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	101
6.43 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	102
6.44 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน และ $X_{TCSC}$ ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	102
6.45 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	103
6.46 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	103
6.47 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	104
6.48 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	104
6.49 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	105
6.50 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	105
6.51 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD .....	106

ภาพประกอบ	หน้า
6.52 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานีไปยัง บัสบางสะพาน และ $X_{TCSC}$ ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD ..... 106	106
6.53 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD ..... 107	107
6.54 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD ..... 107	107
6.55 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD ..... 108	108
6.56 กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัสสุราษฎร์ธานี-บางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC ของระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งชุด POD ..... 108	108
6.57 กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัสสุราษฎร์ธานี-บางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC ของระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งชุด POD ..... 109	109

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งวัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษาวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ ในตอนท้ายของบทยังกล่าวถึงการจัดเรียงลำดับเนื้อหาในแต่ละบท เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถมองเห็นภาพรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ เป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนกำลังการผลิต และส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศ ซึ่งปัจจุบัน พื้นที่ภาคใต้มีปริมาณโหลดใกล้เคียงกับปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าภายในพื้นที่ และในบางเวลาจำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้าจากภาคกลางรวมถึงการรับซื้อไฟฟ้าจากประเทศมาเลเซีย ผ่านระบบเชื่อมโยงกระแสตรงแรงดันสูง (High-Voltage Direct-Current: HVDC)

จากการศึกษาผลกระทบของตัวเก็บประจุนุกรมต่อขีดความสามารถการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Total Transfer Capability: TTC) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ [1] ของประเทศไทย พบว่าตัวเก็บประจุนุกรมสามารถเพิ่มค่า TTC จากภาคกลางมายังภาคใต้ได้สูงสุดถึง 110 MW เมื่อติดตั้งกับสายส่งเส้นที่ยาวที่สุด ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้าบางสะพานกับสถานีไฟฟ้าสุราษฎร์ธานี อย่างไรก็ตามการใช้งานตัวเก็บประจุนุกรมอาจทำให้เกิดการป้องกันทางความถี่ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความถี่ซิงโครนัส (Subsynchronous Resonance: SSR) เป็นผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัญหาการเกิด SSR เนื่องจากการใช้งานตัวเก็บประจุนุกรมค่าคงที่ในระบบส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงดังกล่าว และได้ศึกษาผลการนำตัวเก็บประจุนุกรมปรับค่าได้ (Thyristor-Controlled Series Capacitors: TCSC) ซึ่งสามารถปรับค่าได้อย่างละเอียดและต่อเนื่อง โดยควบคุมผ่านมุมจุดชนวน (Firing Angle) ของไทรสเตอร์มาใช้เพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงการป้องกันทางความถี่ที่อาจก่อให้เกิดปัญหา SSR

## 1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อศึกษาโอกาสการเกิดปัญหา SSR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทย ในกรณีที่มีการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ในสายส่งเส้นที่ยาวที่สุด
- 2) เพื่อศึกษาการแก้ปัญหาจำกัดการชดเชยแบบอนุกรมอันเนื่องมาจากปัญหา SSR ในสายส่งเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทยโดยใช้ TCSC

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

กรอบการศึกษาที่สำคัญของวิทยานิพนธ์มีดังนี้

- 1) กำหนดการติดตั้ง TCSC ในสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่พิจารณา คือสายส่งจากบึงบางสะพานไปยังบึงสุราษฎร์ธานี
- 2) ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นระบบ 3 เฟสสมดุล และไม่คิดผลกระทบทางด้านฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการทำงานของ TCSC
- 3) ละเอียดผลการห้วงเวลาของชุดควบคุมที่ป้อนสัญญาณจุดชนวนให้กับไทรสเตอร์ของ TCSC
- 4) ในแบบจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ แทนสายส่งเส้นที่วางคู่ขนานกันด้วยสายส่งสมมูลเส้นเดียว และละเอียดผลของรีแอกแตนซ์จากหม้อแปลงในระบบไฟฟ้า

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

การศึกษาวิจัยจะดำเนินไปตามขั้นตอนหลักต่อไปนี้

- 1) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาวิจัย
- 2) ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับนิยามและกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ SSR
- 3) ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำ TCSC มาประยุกต์ใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ รวมทั้งการใช้แก้ปัญหา SSR
- 4) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องรวมทั้งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของชุดกักกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และ TCSC
- 5) สร้างแบบจำลองของระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า และ TCSC รวมถึงการทำให้เป็นเชิงเส้นและการวิเคราะห์ค่าเจาะจงของระบบ
- 6) ตรวจสอบความถูกต้องของค่าเจาะจงและระดับการชดเชยที่ทำให้เกิดปัญหา SSR ในระบบทดสอบมาตรฐาน FBM และ SBM

- 7) ศึกษาพฤติกรรมกรเกิดปัญหา SSR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทยเมื่อมีการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่
- 8) ศึกษาการแก้ปัญหา SSR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทยโดยใช้ TCSC
- 9) วิเคราะห์ผลการศึกษาและสรุปผลงานวิจัย
- 10) เรียบเรียง พิมพ์ผลงานการวิจัย และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการพิจารณา

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สิ่งที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาตามกระบวนการที่นำเสนอข้างต้นสรุปได้ดังนี้

- 1) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมที่ภาวะชั่วคราวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมปรับค่าได้
- 2) ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสามารถนำไปใช้ประกอบเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ให้สูงขึ้นในด้านการวิเคราะห์ผลของ SSR และการเพิ่มขีดความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมแบบปรับค่าได้

### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ที่มาของปรากฏการณ์ คำจำกัดความ การจำแนกประเภท และวิธีในการวิเคราะห์ผลของ SSR

บทที่ 3 อธิบายโครงสร้างและกราฟคุณลักษณะของ TCSC แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการติดตั้งใช้งาน TCSC กับระบบไฟฟ้ากำลังในภูมิภาคต่างๆ ทั่วโลก รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเมื่อนำอุปกรณ์ TCSC ไปแก้ปัญหา SSR

บทที่ 4 นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า โดยระบบผลิตจะประกอบด้วยองค์ประกอบทางกลของชุดกังหันและองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส แล้วตรวจสอบความถูกต้องกับระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model และ IEEE Second Benchmark Model ด้วยวิธีวิเคราะห์ผลของค่าเจาะจง และการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ที่ระดับต่างๆ

บทที่ 5 ทำการศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทยต่อแนวโน้มในการเกิด SSR ด้วยการใชแบบจำลองที่สร้างขึ้น

และวิธีวิเคราะห์ผลของค่าเจาะจง พร้อมทั้งแสดงผลในเชิงพลวัตที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุ  
อนุกรมค่าคงที่ระดับต่างๆ

บทที่ 6 ศึกษาการแก้ปัญหา SSR จากผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมในระบบส่ง  
กำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้จากบทที่ 5 ด้วยการติดตั้ง TCSC เข้าไปแทนที่  
เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถปรับค่าได้อย่างละเอียด และยังคงตอบสนองต่อสภาวะชั่วคราวได้ดี  
รวมทั้งศึกษาผลของการควบคุมเสริมเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

บทที่ 7 สรุปผลที่ได้รับจากการศึกษา ปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทาง  
ในการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ SSR และการประยุกต์ใช้ TCSC ในระบบส่ง  
กำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ซับซิงโครไนส์โรโซแนนซ์

ในบทนี้เป็นารอธิบายถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ SSR ตั้งแต่ คำนิยามของ SSR สาเหตุการเกิดปรากฏการณ์ ตลอดจนการจำแนกประเภท ซึ่งมีความสำคัญต่อความเข้าใจ พฤติกรรมของปรากฏการณ์นี้

#### 2.1 สาเหตุการเกิดซับซิงโครไนส์โรโซแนนซ์

ในบางประเทศที่สถานีผลิตไฟฟ้ากับศูนย์กลางโหลดห่างไกลกันมาก เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา จีน และบราซิล การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องพึ่งสายส่งที่มีความยาวมากๆ ซึ่งมีข้อเสียหลายประการ เช่น การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าตามระยะทางของสายส่ง ความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า และขีดจำกัดด้านเสถียรภาพ ตัวเก็บประจุอนุกรมจึงถูกนำมาติดตั้ง เนื่องจากมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ คือ ความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ความเชื่อถือได้ของระบบ และความคล่องตัวของการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสายส่งที่มีระยะทางไกลๆ

แต่อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุอนุกรมก็ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ซับซิงโครไนส์โรโซแนนซ์ ปรากฏการณ์นี้เคยเกิดขึ้นกับสถานีไฟฟ้า Mohave เมื่อวันที่ 9 ธันวาคม ค.ศ.1970 และอีกครั้งในวันที่ 26 ตุลาคม ค.ศ.1971 [2,3] ซึ่งสร้างความเสียหายต่อเพลาเชื่อมโยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นเพื่อที่จะทำความเข้าใจกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงสาเหตุของปัญหาเพื่อหาหนทางแก้ไขและลดผลของความรุนแรงจากปัญหา SSR

คำจำกัดความของปรากฏการณ์ SSR ตาม IEEE [4] ได้นิยาม SSR ไว้ว่า SSR เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของระบบส่งกำลังไฟฟ้า กับระบบทางกลของชุดกังหันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างระบบทั้งสอง โดยความถี่ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าความถี่ซิงโครไนส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง อาจมีเพียงความถี่เดียวหรือมากกว่านั้นขึ้นกับโครงสร้างของระบบที่พิจารณา

การแลกเปลี่ยนพลังงานของทั้งสองระบบขณะเกิดปรากฏการณ์นี้ เป็นผลจากกระแสที่ไหลในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ซิงโครไนส์ของระบบไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ธรรมชาติของระบบ อันเกิดจากการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม สามารถอธิบายด้วยสมการที่ (2.1)

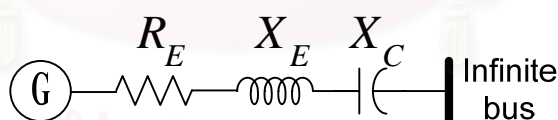
$$i(t) = K[A\sin(\omega_1 t + \psi_1) + Be^{-\zeta\omega_2 t} \sin(\omega_2 t + \psi_2)] \quad (2.1)$$



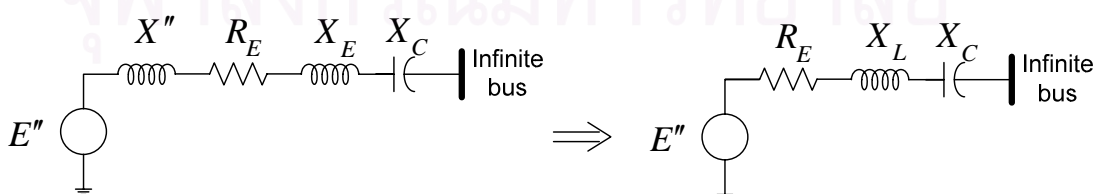
กระแสไฟฟ้าส่วนแรกคือกระแสที่ความถี่ซิงโครนัส ( $\omega_1$ ) และส่วนที่สอง คือ กระแสไฟฟ้าที่ความถี่อื่น ( $\omega_2$ ) อาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าความถี่ซิงโครนัสได้ ขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ในระบบไฟฟ้า โดยพารามิเตอร์อื่นๆ ของสมการเป็นไปตามส่วนประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง

กระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.1) ที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อทำการแปลงโดยใช้การแปลงของพาร์ค (Park's Transformation) จะได้กระแสไฟฟ้าในส่วนของความถี่ซิงโครนัส ( $\omega_1$ ) หากมองจากด้านของโรเตอร์จะเห็นเป็นกระแสตรงที่สภาวะอยู่ตัว สำหรับกระแสไฟฟ้าในส่วนของความถี่อื่น ( $\omega_2$ ) จะถูกแยกออกเป็นส่วนประกอบของกระแสสลับที่เป็นความถี่ผลบวก ( $\omega_1 + \omega_2$ ) และความถี่ผลลบ ( $\omega_1 - \omega_2$ ) ซึ่งความถี่ทั้งสองนี้ อาจเรียกอีกอย่างว่าความถี่ซูปเปอร์ซิงโครนัส (Supersynchronous Frequency) และความถี่ซับซิงโครนัส (Subsynchronous Frequency) ตามลำดับ [3,5] กระแสไฟฟ้าที่ความถี่ซับซิงโครนัส จะก่อให้เกิดแรงบิดกลับไปกลับมา (Pulsating Torque) ที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสั่นของโรเตอร์และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ หากความถี่ดังกล่าวสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของเพลลาเชื่อมโยงชุดกักกัน

โดยปกติเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกักกันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีความถี่ธรรมชาติอยู่ตั้งแต่หนึ่งความถี่ขึ้นไป จำนวนของมันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชุดกักกันที่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นหากกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.1) มีความถี่ซับซิงโครนัสตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบชุดกักกันค่าใดค่าหนึ่ง ก็จะเกิดการสอดคล้องทางความถี่ขึ้น (Resonance) เป็นเหตุให้การสั่นที่เพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกักกันมีความรุนแรงจนเกิดความเสียหายได้



(ก) โครงสร้างของระบบเบรเดี่ยอย่างง่าย



(ข) วงจรสมมูลของระบบเบรเดี่ยอย่างง่าย

รูปที่ 2.1 ระบบเบรเดี่ยอย่างง่ายเมื่อพิจารณาพร้อมกับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม

สำหรับระบบอย่างง่ายในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้า และตัวเก็บประจุอนุกรม ทั้งหมดนี้ต่ออนุกรมกับบัสอ้างอิง และสามารถคำนวณความถี่ธรรมชาติได้ตามสมการที่ (2.2) โดยในที่นี้กำหนดให้ความถี่เชิงโครนัสมีค่าเท่ากับ 60 Hz

$$\omega_{er} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{\omega_b}{\sqrt{(\omega_b L)(\omega_b C)}} = \omega_b \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.2)$$

$$f_{er} = f_b \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

โดยที่  $R_E$  คือ ความต้านทานของสายส่ง (pu.)

$X_E$  คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง (pu.)

$X''$  คือ ซับทรานเซียนส์รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (pu.)

$X_L$  คือ รีแอกแตนซ์สุทธิ (pu.) ( $X_L = X'' + X_E$ )

$X_C$  คือ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุอนุกรม (pu.)

$\omega_b$  คือ ความถี่เชิงโครนัส (rad/s) ( $\omega_b = 2\pi f_b$ )

$\omega_{er}$  คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้า (rad/s) ( $\omega_{er} = 2\pi f_{er}$ )

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากับระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม

เปอร์เซ็นต์การชดเชย ( $X_C / X_L$ ) × 100 (%)	ความถี่ธรรมชาติ $f_{er}$ (Hz)	ความถี่สลิป $60 - f_{er}$ (Hz)
10	18.97	41.03
30	32.86	27.14
50	42.43	17.57
70	50.20	9.80
90	56.92	3.08

จากตารางที่ 2.1 เห็นได้ชัดว่าระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมส่งผลโดยตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้า คือ ความถี่  $f_{er}$  แปรผันตามรากที่สองระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม

## 2.2 การแยกประเภทของ SSR

SSR สามารถแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ การเกิดผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Induction Generator Effect: IGE) และการเกิดปฏิสัมพันธ์ต่อแรงบิด (Torsional Interaction : TI) แต่อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 ประเภทนี้ หากเกิดขณะที่ระบบไม่ถูกรบกวนก็อาจเรียกรวมว่า ผลของการกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self Excitation) ที่ภาวะอยู่ตัว ซึ่งลักษณะของการสั่นที่เพลาชุดกันหันค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในทางกลับกัน หากระบบถูกรบกวนแม้เพียงเวลาสั้นๆ การสั่นที่เพลาชุดกันหันกลับรุนแรงอย่างทันทีทันใด เหตุการณ์นี้เรียกว่า การเกิดแรงบิดที่ภาวะชั่วขณะ (Transient Torque) [5,6]

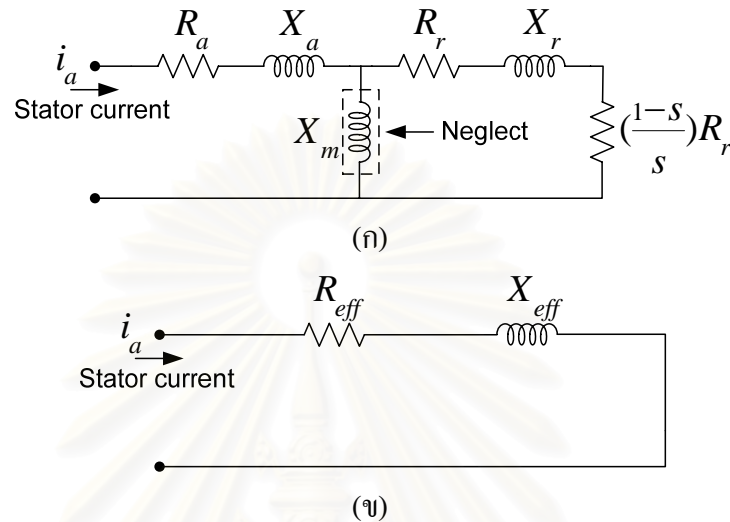
### 1) การเกิดผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายปรากฏการณ์ จึงยุบวงจรขดลวดโรเตอร์เป็นวงจรเดียว และไม่คิดผลของขั้วยื่น (Saliency Effect) ดังรูปที่ 2.2(ก) มีเพียงความต้านทาน ( $R_r$ ) และรีแอกแตนซ์ ( $X_r$ ) ของขดลวดโรเตอร์ เมื่อพิจารณาเฉพาะผลที่ความถี่ซับซิงโครนัส ( $f_{er} < f_b$ ) สลิตีจะมีค่าเป็นลบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงดูเหมือนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส

จากตารางที่ 2.1 ที่ความถี่ธรรมชาติ ( $f_{er}$ ) ทุกค่าจะทำให้ผลรวมความต้านทานสมมูล ( $R_{eff}$ ) ดังรูปที่ 2.2(ข) มีค่าเป็นลบ และอาจมีค่ามากกว่าความต้านทานของสายส่ง ( $R_E$ ) ที่ระดับการชดเชยค่าสูงๆ ได้ หากเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการกระตุ้นด้วยตัวเอง และกระแสไฟฟ้าในส่วนของความถี่ซับซิงโครนัสจะกระตุ้นให้เกิดแรงบิดกลับไปกลับมาที่มีขนาดขยายตัวเพิ่มขึ้น จนเป็นอันตรายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในที่สุด

จากรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของเครื่องจักรกลแบบเหนี่ยวนำในลักษณะวงจรสมมูลของโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ( $R_r$ ) รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ ( $X_r$ ) ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_a$ ) และรีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ( $X_a$ ) ดังรูปที่ 2.2(ก) โดยมีผลรวมความต้านทานสมมูล ( $R_{eff}$ ) เท่ากับ  $R_a + \frac{R_r}{s}$  และผลรวมรีแอกแตนซ์สมมูล ( $X_{eff}$ ) เท่ากับ  $X_a + X_r$  ดังรูปที่ 2.2(ข) ตามลำดับ สำหรับค่าความต้านทาน  $R_{eff}$

ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของสลิป ( $s$ ) คือ ผลต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากับความถี่ซิงโครนัสหารด้วยความถี่ซิงโครนัส ( $s = \frac{\omega_{er} - \omega_b}{\omega_{er}}$ )



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรกลแบบเหนี่ยวนำ

## 2) การเกิดปฏิสัมพันธ์ต่อแรงบิด

เมื่อปรับระดับของการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม จนทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้าสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติทางกลของชุดกังหัน ที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง จะเกิดแรงบิดกลับไปกลับมาที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเพลลาเชื่อมโยงของชุดกังหันอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าในส่วนของความถี่ซิงโครนัส

การแกว่งของโรเตอร์ที่ความถี่ซิงโครนัสนี้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สนับสนุนให้กระแสไฟฟ้าที่ความถี่ซิงโครนัสมีขนาดสูงขึ้นเรื่อยๆ เป็นผลให้การสั่นของแรงบิดซึ่งสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้ามีขนาดสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อแรงบิดนี้มีค่ามากกว่าการหน่วงทางกล (Mechanical damping) ระบบเพลลาเชื่อมโยงของชุดกังหันจะยิ่งสั่นจนเกิดความเสียหายขึ้น

## 2.3 การวิเคราะห์ SSR [5]

ปัจจุบันมีวิธีการที่เหมาะสมหลากหลายลักษณะ สำหรับจำลองและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ SSR ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการหลักๆ

### 1) การวิเคราะห์เชิงความถี่

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการเกิดผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ด้วยการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่สอดคล้องกับความถี่ โดยรวมผลของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณาเข้าด้วยกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของอิมพีแดนซ์สมมูลในย่านความถี่ต่ำกว่าความถี่เชิงโรนัส หากค่ารีแอกแตนซ์สมมูลมีค่าเป็นศูนย์และค่าความต้านทานมีค่าเป็นลบที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง จะบ่งบอกถึงการเกิดการสั่นแบบถาวร (Self Sustaining Oscillations) จากผลการเกิดผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์สมมูลเฉพาะระบบไฟฟ้า หากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ในจุดที่มีความถี่ตรงกับชุดกังหัน นั่นก็สามารถบอกได้ว่าเกิดปฏิสัมพันธ์ต่อแรงบิดขึ้น แม้ว่าค่าความต้านทานสมมูลของระบบมีค่าเป็นบวกก็ตาม

แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้พิจารณาได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ละตำแหน่งเท่านั้น และเมื่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง การคำนวณอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อศึกษาผลกระทบในแต่ละความถี่จำเป็นต้องทำใหม่ทุกครั้ง ซึ่งไม่สะดวกต่อการพิจารณาร่วมกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่หลายชุด

### 2) การวิเคราะห์ด้วยค่าเจาะจง

วิธีนี้อาศัยการหาค่าเจาะจงของสมการเชิงเส้นที่ใช้แทนระบบไฟฟ้า ผลที่ได้สามารถบ่งบอกถึงคุณลักษณะของระบบไฟฟ้าที่เป็นอยู่รวมทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในระบบด้วย ได้แก่ ความถี่ของการสั่นและอัตราการหน่วงในแต่ละความถี่ได้อย่างชัดเจน จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าขณะนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดเกิดปัญหา SSR ขึ้น วิธีนี้จึงสะดวกต่อการวิเคราะห์กับระบบทุกขนาด แต่จำเป็นต้องทำระบบเหล่านั้นให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นก่อน

### 3) การวิเคราะห์ด้วยการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัต

ส่วนใหญ่แล้ววิธีนี้มักใช้ศึกษาร่วมกับโปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program) เพื่อจำลองพฤติกรรมของระบบได้ทั้ง 3 เฟส แม้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบจะมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นก็ตาม มันจึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับแรงบิดที่แกนชุดกังหันอันเนื่องมาจากปัญหา SSR แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตัวโปรแกรมต้องการรายละเอียดของอุปกรณ์ที่

ติดตั้งในระบบอย่างละเอียด จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ผล SSR กับระบบเล็กๆ เท่านั้น

การวิเคราะห์ด้วย 2 วิธีแรกนั้น เหมาะสำหรับพิจารณาร่วมกับการรบกวนขนาดเล็ก (Small Signal Analysis) ในเชิงความถี่ (Frequency Domain) ในทางกลับกัน วิธีการสุดท้ายเหมาะสำหรับการศึกษาแรงบิดชั่วคราวที่เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Transient Shaft Torque) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงเวลา (Time domain) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าเจาะจง ร่วมกับการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ เพื่อศึกษาปัญหา SSR ของระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทถัดไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การใช้งาน TCSC และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้อธิบายทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของอุปกรณ์ รูปแบบการใช้งาน TCSC ในระบบส่งไฟฟ้าจริง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะเนื้อหาในหัวข้อสุดท้ายนี้ จะเน้นเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยเพื่อลดผลของปรากฏการณ์ SSR โดยใช้ อุปกรณ์ TCSC

TCSC เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ตระกูล FACTS (Flexible AC Transmission System) ซึ่งพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ให้ผลตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว เพราะไม่ต้องอาศัยส่วนที่เป็นกลไกการเคลื่อนที่เชิงกล อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการทำงานเพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งโดยมากจะทำการควบคุมผ่านทางการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น ไทริสเตอร์ เมื่อติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจึงทำให้สามารถเพิ่มสมรรถนะของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้สูงขึ้น [7-10]

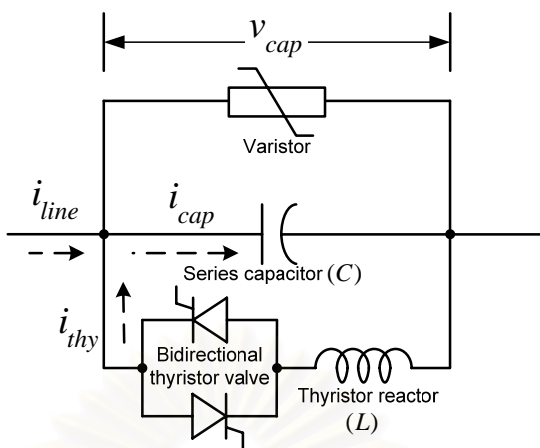
การนำอุปกรณ์ในตระกูล FACTS ไปใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะหลัก กล่าวคือ

- การชดเชยแบบอนุกรม (Series Compensation)
- การชดเชยแบบขนาน (Shunt Compensation)
- การควบคุมมุมเฟส (Phase Angle Control)

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาศักยภาพการชดเชยแบบอนุกรม โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทริสเตอร์หรือ TCSC การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง พูดยกหนึ่งก็คือสามารถปรับได้อย่างละเอียด โดยควบคุมผ่านมุมจุดชนวน (Firing Angle) ของไทริสเตอร์ ทำให้สายส่งเส้นที่ติดตั้งอุปกรณ์ชนิดนี้อยู่คู่คล้ายกับสามารถลดหรือเพิ่มขนาดความยาวของสายส่งออกไปได้อีก เนื่องจากการติด TCSC เข้าไปจะช่วยเพิ่มหรือลดค่ารีแอกแตนซ์สุทธิของสายส่งที่ต่ออนุกรมอยู่นั่นเอง

#### 3.1 องค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะการทำงานของ TCSC

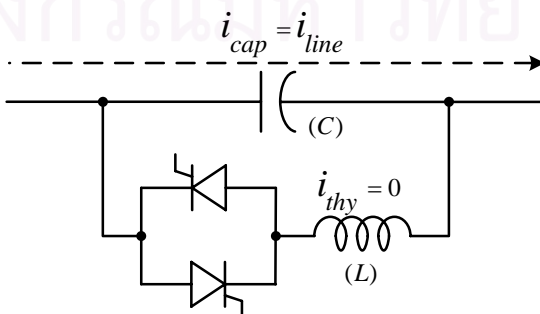
TCSC เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยการชดเชยแบบอนุกรม มีองค์ประกอบดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย ไทริสเตอร์ 2 ตัว ขนานกันแต่สลับทิศทาง ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ทั้งหมดนี้ถูกขนานด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ และมีอุปกรณ์ป้องกัน คือ วาริสเตอร์ต่อขนานกับตัวเก็บประจุเพื่อป้องกันความเสียหายกับ TCSC เนื่องจากการทำงานที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกินกว่าที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบหลักของอุปกรณ์ TCSC

เมื่อทราบถึงโครงสร้างองค์ประกอบของ TCSC แล้ว ต่อไป จะกล่าวถึงการทำงานของ TCSC ในแต่ละโหมดที่สามารถเป็นได้ทั้งตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุที่ปรับค่าได้จาก องค์ประกอบของ TCSC ในรูปที่ 3.1 หากตัดไทรสเตอร์ออกไป ค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของ วงจรขนานระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งไม่สามารถปรับค่าได้ แต่เมื่อ ทำการติดตั้งไทรสเตอร์เข้าไปและทำการควบคุมมุมจุดชนวนของมัน จะสามารถควบคุมและ ปรับเปลี่ยนผลของรีแอกแตนซ์ให้แสดงเป็นรีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) หรือรีแอกแตนซ์ ของตัวเก็บประจุ ( $X_C$ ) ได้ดังนี้

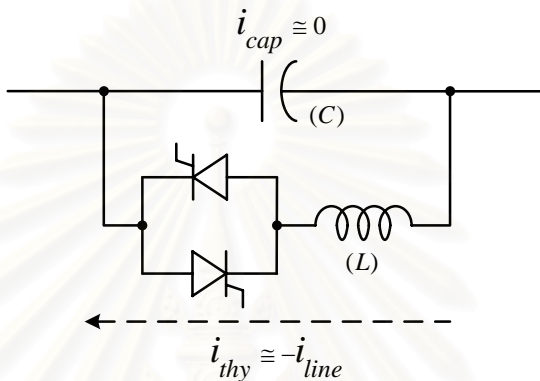
- 1) โหมดขั้วขั้ว (Block Mode) คือ ไม่ป้อนสัญญาณจุดชนวนให้กับไทรสเตอร์ จึง เหมือนกับว่าขณะนี้ไทรสเตอร์เปิดวงจร ( $i_{thy} = 0$ ) กระแสไฟฟ้าในสายส่งจึงไหลผ่าน ส่วนของตัวเก็บประจุทั้งหมด ( $i_{cap} = i_{line}$ ) ดังรูปที่ 3.2 การทำงานในโหมดขั้วขั้วค่ารี- แอกแตนซ์ของ TCSC จะอยู่ในรูปรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุเพียงอย่าง เดียว ( $X_{TCSC} = X_C$ )



รูปที่ 3.2 การทำงานของ TCSC ในโหมดขั้วขั้ว



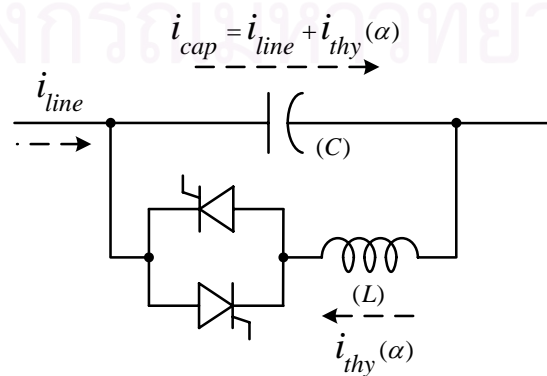
- 2) โหมดลัดผ่าน (Bypass Mode) คือ ป้อนสัญญาณจุดชนวนให้มิกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไทรสเตอร์ตลอดเวลา ( $i_{thy} \cong -i_{line}$ ) ดังรูปที่ 3.3 ในที่นี้สามารถละเลยผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุได้ เนื่องจากโดยทั่วไปค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุมาก ( $X_L \ll X_C$ ) ดังนั้นในโหมดลัดผ่านนี้ค่ารีแอคแตนซ์ของ TCSC สามารถประมาณให้อยู่ในรูปรีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว ( $X_{TCSC} \cong X_L$ )



รูปที่ 3.3 การทำงานของ TCSC ในโหมดลัดผ่าน

- 3) โหมดควบคุม (Control Mode) คือ การควบคุมสัญญาณจุดชนวนให้ไทรสเตอร์ทำงานที่มุมต่างๆ ในช่วง 90 องศา ถึง 180 องศา ซึ่งวัดจากจุดที่รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_{cap}$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์และกำลังจะเป็นบวก กระแสไฟฟ้าในส่วน of ตัวเหนี่ยวนำจึงเปลี่ยนไปตามมุมจุดชนวน ( $i_{thy}(\alpha)$ ) ส่งผลให้ค่ารีแอคแตนซ์สุทธิเปลี่ยนตามมุมที่จุดชนวน ( $X_L(\alpha)$ ) เช่นกัน ดังรูปที่ 3.4 ค่ารีแอคแตนซ์ของ TCSC หาได้จากสมการด้านล่างนี้

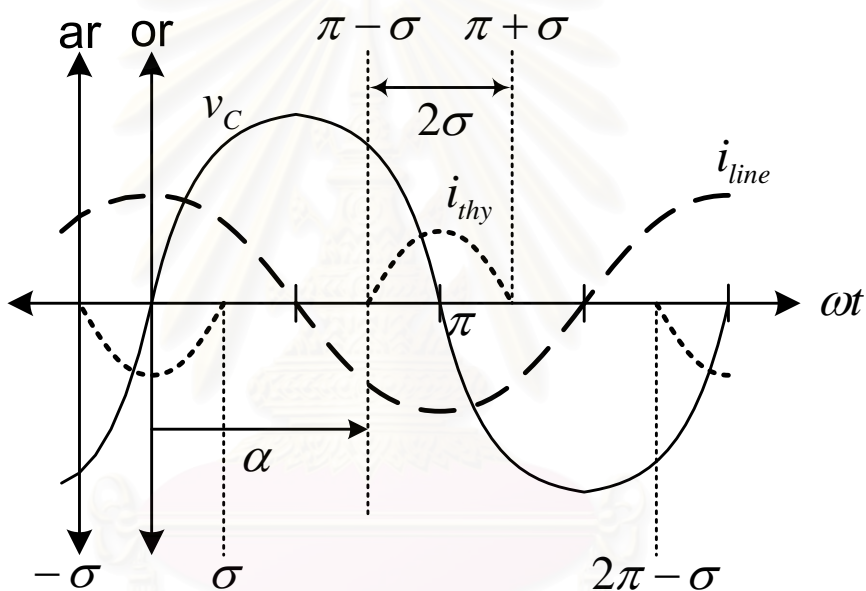
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.4 การทำงานของ TCSC ในโหมดควบคุม

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ TCSC

ในที่หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ TCSC โดยเริ่มจากโครงสร้างที่เป็นวงจรขนานระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 3.4 เมื่อกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ( $i_{line}$ ) มีลักษณะเป็นไซน์ซอซอด้และมีขนาดหนึ่งหน่วย ( $I = 1 p.u.$ ) ดังสมการที่ (3.2) กำหนดให้ไทรสเตอร์ทำงานที่มุมจุดชนวนค่าๆ หนึ่ง จะได้กราฟกระแสไทรสเตอร์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม TCSC ดังรูปที่ 3.5 เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์กระแสไทรสเตอร์ ย้ายแกนอ้างอิงไปที่ ar [11] ดังนั้นสมการกระแสที่ไหลในสายส่งจะเปลี่ยนเป็นสมการที่ (3.3)



รูปที่ 3.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม TCSC และกระแสไทรสเตอร์

ar : auxiliary time reference

or : original time reference

บนแกน or 
$$i_{line} = I \cos \omega t \tag{3.2}$$

บนแกน ar 
$$i_{line} = I \cos(\omega t - \sigma) = I \cos \omega t \cos \sigma + I \sin \omega t \sin \sigma \tag{3.3}$$

$$\sigma = \pi - \alpha \tag{3.4}$$

จากรูปที่ 3.4 จะได้สมการของกระแสไฟฟ้าตามกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff Current law, KCL) ดังนี้

$$i_{line} = i_{cap} - i_{thy} \tag{3.5}$$

ขณะที่ TCSC ทำงาน แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุประมาณเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ นั่นคือ

$$v_{ind} = v_{cap} \quad (3.6)$$

$$-L \frac{di_{thy}}{dt} = \frac{1}{C} \int i_{cap} dt + v_{cap}^0 \quad (3.7)$$

โดยที่  $v_{cap}^0$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุขณะที่ไทรสเตอร์เริ่มนำกระแส

เมื่อทำการแปลงสมการ (3.3), (3.5), และ (3.7) ให้อยู่ในโดเมนของความถี่โดยใช้การแปลงลาปลาซ และหาค่ากระแสที่ไหลผ่านไทรสเตอร์ จะได้ว่า

$$I_{thy}(s) = \left( \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \right) \left[ \cos \sigma_a \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) + \sin \sigma_a \left( \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) + C v_{cap}^0 \right] \quad (3.8)$$

$$\text{โดยที่ } \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

เปลี่ยนสมการ (3.8) ให้อยู่ในรูปโดเมนเวลาด้วยวิธีแปลงผกผันลาปลาซ จะได้สมการกระแสไทรสเตอร์  $i_{thy}(t)$  ในช่วง  $[-\sigma, \sigma]$  ดังนี้

$$i_{thy}(t) = A \cos(\omega t - \sigma) - A \cos \sigma \cos \omega_0 t - B \sin \sigma \sin \omega_0 t + D V_{cap}^0 \sin \omega_0 t \quad (3.9)$$

$$\text{โดยที่ } A = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 + \omega^2}, B = \frac{\omega_0 \omega}{\omega_0^2 + \omega^2}, \text{ และ } D = \omega_0 C$$

ย้าย  $i_{thy}(t)$  กลับมาอยู่ในแกนอ้างอิง or ด้วยการแทน  $t = t + \frac{\sigma}{\omega}$

$$i_{thy}(t) = A \cos \omega t + (-A \cos \sigma \cos \varpi \sigma - B \sin \sigma \sin \varpi \sigma + D V_{cap}^0 \sin \varpi \sigma) \cos \omega_0 t + (A \cos \sigma \sin \varpi \sigma - B \sin \sigma \cos \varpi \sigma + D V_{cap}^0 \cos \varpi \sigma) \sin \omega_0 t \quad (3.10)$$

$$\text{โดยที่ } \varpi = \frac{\omega_0}{\omega}$$

สมการ (3.10) มีค่าอยู่ในช่วง  $[-\sigma, \sigma]$  ซึ่งรูปคลื่นของกระแสทรินสเตอร์จะมีความสมมาตรเมื่อเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวทำให้  $v_{cap}^0$  มีค่าคงที่ สัมประสิทธิ์หน้าเทอมของ  $\sin \omega_0 t$  จึงมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากนั้นแทนสมการ (3.11) ในสมการ (3.10) จะได้กระแสทรินสเตอร์ในช่วง  $[-\sigma, \sigma]$  และ  $[2\pi - \sigma, 2\pi + \sigma]$  เท่ากับสมการที่ (3.12)

$$v_{cap}^0 = \frac{B}{D} \sin \sigma - \frac{A}{D} \cos \sigma \tan \varpi \sigma \quad (3.11)$$

$$i_{thy}(t) = A \cos(\omega t) - A \frac{\cos(\sigma)}{\cos(\varpi \sigma)} \cos(\varpi \omega_0 t) \quad (3.12)$$

สมมติว่ากระแสฮาร์โมนิกส่วนต่างๆ ถูกกำจัดออกไป ดังนั้นกระแสทรินสเตอร์จะแสดงผลที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) เพียงอย่างเดียว โดยสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ฟูเรียร์เพื่อแยกผลของฮาร์โมนิกอื่น ๆ ออกไป ซึ่งจะได้กระแสทรินสเตอร์ที่ความถี่มูลฐานดังนี้

$$I_{thy(1)} = A \left( \frac{2\sigma + \sin(2\sigma)}{\pi} \right) - 4A \frac{\cos^2(\sigma)}{(\omega^2 - 1)} \left( \frac{\varpi \tan(\varpi \sigma) - \tan(\sigma)}{\pi} \right) \quad (3.13)$$

และ 
$$i_{thy(1)} = I_{thy(1)} \cos(\omega t) \quad (3.14)$$

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาด้วยกฎของโอห์ม (Ohm's Law) จะได้ค่ารีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC ที่ความถี่มูลฐาน ( $X_{TCSC(1)}$ ) ในรูปของผลหารระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน TCSC ความถี่มูลฐานซึ่งพิจารณาเป็นเฟสเซอร์ (Phasor) ดังสมการที่ (3.15) และสมการที่ (3.16) ตามลำดับ

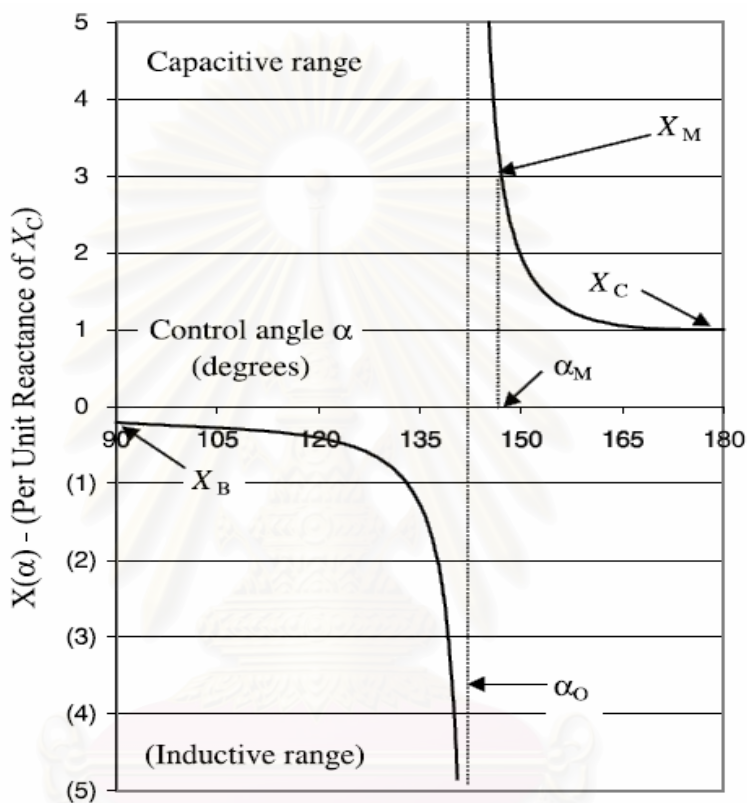
$$X_{TCSC(1)} = \frac{V_{TCSC(1)}}{I_{line}} = \frac{-jX_c I_{cap(1)}}{I_{line}} = -jX_c (1 - I_{thy(1)}) \quad (3.15)$$

$$X_{TCSC(1)} = -X_c + C_1 \{2(\pi - \alpha) + \sin[2(\pi - \alpha)]\} + C_2 \cos^2(\pi - \alpha) \{\varpi \tan[\varpi(\pi - \alpha)] - \tan(\pi - \alpha)\} \quad (3.16)$$

โดยที่ 
$$C_1 = \frac{X_c + X_{LC}}{\pi}, \text{ และ } C_2 = \frac{-4X_{LC}^2}{\pi X_L}, \text{ และ } X_{LC} = \frac{X_c X_L}{X_c - X_L}$$

สมการที่ (3.16) ใช้สำหรับการทำงานในช่วงที่เรียกว่าโหมคควบคุม แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดังรูปที่ 3.6 คือ

- มุมจตุชนวนระหว่าง  $90^\circ < \alpha < \alpha_0$  แสดงผลเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive Range)
- มุมจตุชนวนระหว่าง  $\alpha_0 < \alpha < 180^\circ$  แสดงผลเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitive range)



รูปที่ 3.6 กราฟคุณลักษณะของ TCSC [12]

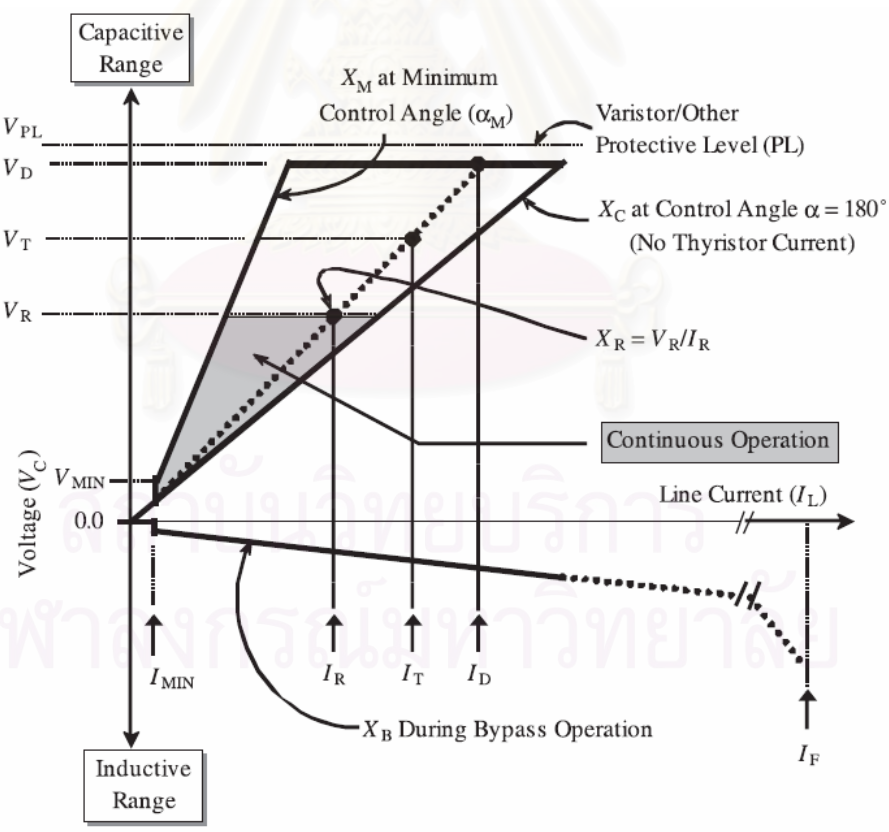
ช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเกิดภาวะเรโซแนนซ์ขึ้น ตามทฤษฎีแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมุมจตุชนวนเข้าใกล้มุม  $\alpha_0$  ในทางปฏิบัติจะควบคุมให้มุมจตุชนวนมีค่าเป็น  $\alpha_M$  เพื่อป้องกันผลจากตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนอาจทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ โดยมุมจตุชนวนที่ทำให้เกิดภาวะเรโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (3.17) เมื่อ  $n$  แทนจำนวนจุดที่เกิดเรโซแนนซ์ แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบยังการทำงานของ TCSC ในช่วงมุมจตุชนวน  $90^\circ$  ถึง  $180^\circ$  นั้น ยอมให้เกิดจุดเรโซแนนซ์ได้เพียงจุดเดียว

$$\alpha_0 = \pi \left( 1 - \frac{(2n-1)\sqrt{X_L/X_C}}{2} \right) \quad ; \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3.17)$$

### 3.3 พิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ TCSC

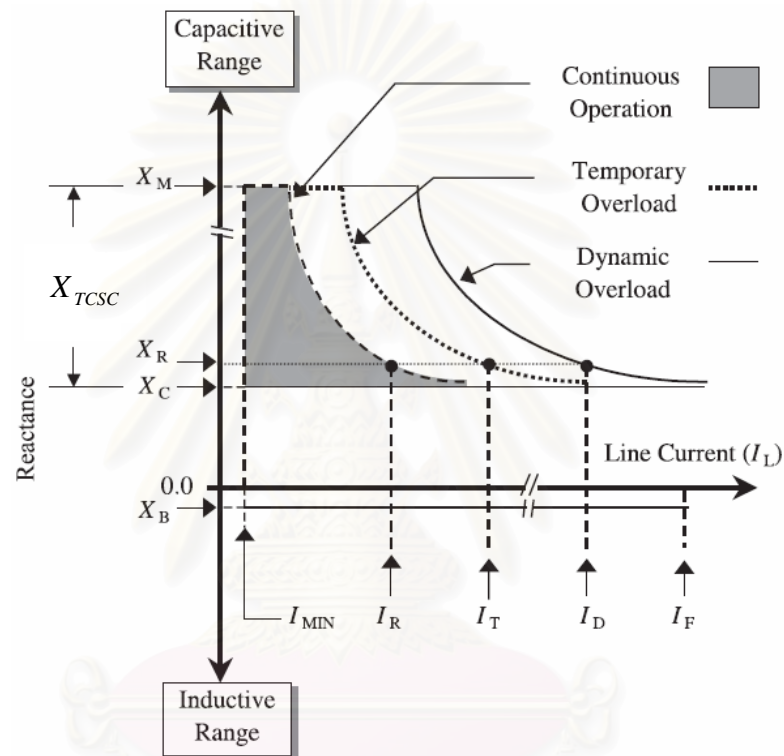
หลักเกณฑ์ในการกำหนดพิกัดการใช้งานของ TCSC ขึ้นอยู่กับการออกแบบให้เหมาะสมกับงานในแต่ละลักษณะ โดยส่วนใหญ่สามารถจำแนกออกตามจุดประสงค์ในการใช้งานได้ เช่น เพื่อแก้ปัญหาซับซ้อน โครนัสเรโซแนนซ์ และ เพื่อหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

การออกแบบ TCSC จำเป็นต้องพิจารณาถึงพิกัดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้งาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 เมื่อมุมจุดชนวนสูงสุดเท่ากับ 180 องศา ซึ่ง TCSC แสดงผลในรูปของตัวเก็บประจุค่าพิกัด  $X_C$  ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไทรสเตอร์ และเมื่อมุมจุดชนวนลดลงทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในส่วนของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ( $X_R > X_C$ ) และเส้นรีแอกแตนซ์ (เส้นประ) หมุนทวนเข็มนาฬิกา จนกระทั่งถึงมุมจุดชนวนต่ำสุด (Minimum control angle,  $\alpha_M$ ) หรือ  $X_M$  มีค่าเป็น 3 เท่าของ  $X_C$  แต่เมื่อ  $V_R$  เพิ่มขึ้นถึง  $V_T$  ชุดควบคุมต้องลด  $X_R$  จนกระทั่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $V_R$  เพื่อป้องกันผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกินจากพิกัด



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงพิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเทียบกับกระแสไฟฟ้าในสายของ TCSC [12]

จากรูปที่ 3.8 ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC ถูกจำกัดให้อยู่ในช่วง  $X_C \leq X_{TCSC} \leq X_M$  ในช่วง Temporary Overload และ Dynamic Overload ถูกกำหนดจากพิกัดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ กราฟนี้แตกต่างจากรูปที่ 3.7 ตรงที่การเปรียบเทียบผลของกระแสไฟฟ้าในสายส่งที่มีต่อพิกัดรีแอกแตนซ์ของ TCSC โดยขณะทำงานหากค่ากระแสไฟฟ้าเกินถึงระดับ  $I_R$  หรือ  $I_D$  ตัวควบคุมต้องลดระดับรีแอกแตนซ์ของ TCSC ลงเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าเกินพิกัด แต่หากถึงระดับ  $I_F$  อุปกรณ์ป้องกันต้องทำหน้าที่ตัด TCSC ออกจากระบบเพื่อป้องกันความเสียหายทันที



รูปที่ 3.8 กราฟพิกัดรีแอกแตนซ์เทียบกับกระแสไฟฟ้าในสายของ TCSC [12]

### 3.4 การใช้งาน TCSC ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอตัวอย่างการใช้งานจริงของ TCSC ในระบบส่งไฟฟ้าภูมิภาคต่างๆ ทั่วโลก ดังต่อไปนี้

- 1) ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.1992 Western Area Power Authority (WAPA) ทำการติดตั้ง TCSC 3 $\phi$ , 230 kV, 330 MVar ที่สถานีย่อย Kayenta ในมลรัฐ Arizona เพื่อเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่าง สถานีย่อย Shiprock ในมลรัฐ New Mexico กับสถานีย่อย Grand Canyon ในมลรัฐ Arizona TCSC ที่ติดตั้งผลิตโดยบริษัท Siemens [9,10]

- 2) ประเทศบราซิลในปี ค.ศ. 1999 ระบบไฟฟ้าของประเทศบราซิลได้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าระหว่างตอนเหนือและใต้ของประเทศเข้าด้วยกันเป็นระยะทาง 1020 กิโลเมตร โดย ABB เป็นผู้ออกแบบ และนำ TCSC เข้ามาติดตั้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ของระบบที่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระยะทางไกลๆ ทำการติดตั้ง TCSC 1 ตัว ขนาด 107.5 MVar, 500 kV อนุกรมกับตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ 5 ตัว ที่สถานีย่อย Imperatriz [13,14]
- 3) ประเทศสวีเดนในปี ค.ศ. 1999 ABB ติดตั้ง TCSC เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของสวีเดนเข้ากับระบบไฟฟ้าประเทศฟินแลนด์ เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าในช่วง 800-1100 MW และลดผลกระทบของ SSR พิกัดของอุปกรณ์ใช้ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 400 kV, 1500 A, 439 MVar ผลการชดเชยโดยรวมทั้งหมด 70% ซึ่งเป็นการชดเชยแบบคงที่ 49% และแบบปรับค่าได้ (TCSC) 21% [8,15]
- 4) ประเทศจีนในปี ค.ศ. 2000 TCSC ถูกติดตั้งเข้ากับระบบ 500 kV ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของจีน เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 2200 MW จากสถานี Yimin ไปยังสถานี Fengtun ในมองโกเลียและต่อไปยังภาคกลางของประเทศจีนเป็นระยะทาง 1300 กิโลเมตร [16]

### 3.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดผลของปรากฏการณ์ SSR โดยใช้ TCSC เป็นสำคัญ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) K. Ahlgren และคณะ [15] ศึกษาผลของ TCSC ต่อการเกิด SSR โดยการวิเคราะห์เชิงความถี่ เมื่อติดตั้ง TCSC เข้ากับสถานี Stöde ในประเทศสวีเดน เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการหน่วงในย่านความถี่ซับซิงโครนัสของระบบที่สภาวะปกติกับระบบที่เกิดการรบกวนและสายส่งบางเส้นถูกตัดออกไป ผลจากการศึกษาพบว่าขณะที่สายส่งบางเส้นถูกตัดออกไป อัตราการหน่วงมีค่าเป็นลบในจุดที่เกิดการสอดคล้องทางความถี่ขึ้นจึงเกิดปัญหา SSR แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อติดตั้ง TCSC กลับทำให้ไม่มีปัญหา SSR โดยอัตราการหน่วงในย่านความถี่ดังกล่าวมีค่าเป็นบวก และยังทำให้ระบบที่สภาวะปกติมีอัตราการหน่วงดีขึ้นด้วย
- 2) H.A. Othman และ L. Ängquist [17] เปรียบเทียบผลทางด้านเสถียรภาพด้วยวิธีหาค่าเจาะจงของระบบ ระหว่างระบบที่ติดตั้ง TCSC และระบบที่ติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ ผลการศึกษาสรุปว่า TCSC มีลักษณะเฉพาะและให้ผลเป็นที่น่าพอใจในเชิงพลวัตมากกว่าตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ปกติ



- 3) R. Rajaraman และคณะ [18] ได้ใช้วิธีหาค่าเจาะจงเพื่อดูอัตราการหน่วงในแต่ละโหนดของชุดกึ่งตันจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่มีมุนำกระแสไฟฟ้ตรีสเตอร์ ( $\sigma$ ) ของ TCSC ตั้งแต่ 0 ถึง 50 องศา พร้อมจำลองการทำงานองระบบด้วยโปรแกรม EMTP ผลที่ได้คือ หาก TCSC มีมุนำกระแสไฟฟ้ตรีสเตอร์ในช่วง 35 ถึง 40 องศา ค่าอัตราการหน่วงองชุดกึ่งตันมีค่าเป็นบวกระบบจึงมีเสถียรภาพ



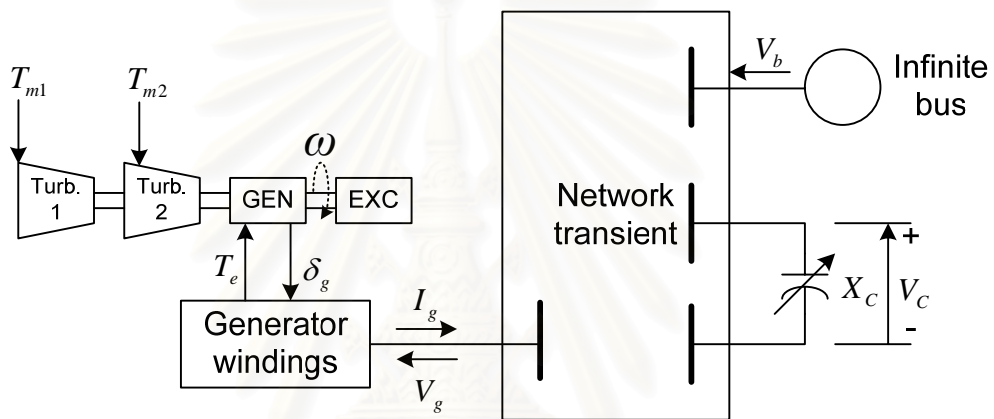
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การพัฒนาแบบจำลองของระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการสร้างแบบจำลองของชุดกังหัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้า เพื่อใช้จำลองพฤติกรรมเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ SSR

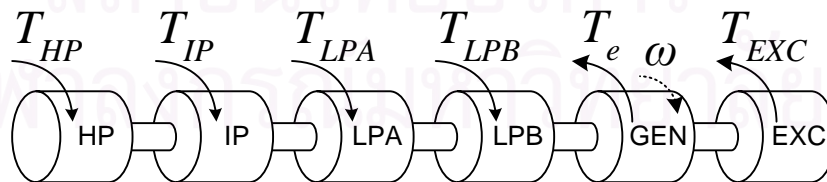
โครงสร้างโดยรวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ SSR อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้ากำลัง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับวิเคราะห์ปรากฏการณ์ SSR

#### 4.1 แบบจำลองชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

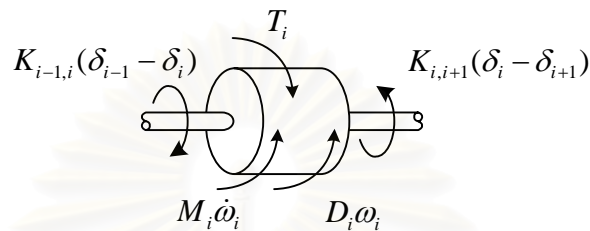
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าออกมา ด้วยการเปลี่ยนพลังงานกลจากชุดกังหันเป็นพลังงานไฟฟ้า ชุดกังหันอาจประกอบด้วยกันหลายชุด ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างโครงสร้างของระบบเพลาคื่อมโยงของชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของชุดกังหัน ประกอบด้วย ชุดกังหันแรงดันสูง (High-pressure : HP) ชุดกังหันแรงดันปานกลาง (Intermediate-pressure : IP) ชุดกังหันแรงดันต่ำ 2 ชุด

(Low-pressure : LPA, LPB) โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator : GEN) และ โรเตอร์ของระบบกระตุ้น (Exciter : EXC) ตามลำดับ จากโครงสร้างของระบบเพลาเชื่อมโยงของชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อพิจารณาชุดกังหันแต่ละชุดแทนด้วย Spring-Mass Model ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น  $m$  ชุด เชื่อมต่อกัน จะได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลที่กระทำต่อกังหันดังรูปที่ 4.3 [19]



รูปที่ 4.3 ระบบกังหันชุดที่  $i^{th}$

โดยที่  $T_i$  คือ แรงบิดทางกลที่ป้อนให้กับกังหันชุดที่  $i^{th}$

$\delta_i$  คือ มุมโรเตอร์ของกังหันชุดที่  $i^{th}$

$M_i$  คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของกังหันชุดที่  $i^{th}$

$D_i$  คือ สัมประสิทธิ์การหน่วงของกังหันชุดที่  $i^{th}$

$K_{i-1,i}$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเพลาเชื่อมโยงระหว่างกังหันชุดที่  $i-1$  และกังหันชุดที่  $i$

$K_{i,i+1}$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเพลาเชื่อมโยงระหว่างกังหันชุดที่  $i$  และกังหันชุดที่  $i+1$

จากรูปที่ 4.3 เมื่อกำหนดให้ทิศทางของแรงบิดทางกลที่ป้อนให้กับกังหันชุดที่  $i^{th}$  ( $T_i$ ) และแรงบิดที่แกนเชื่อมโยงด้านซ้ายมือ ( $K_{i-1,i}(\delta_{i-1} - \delta_i)$ ) มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งตรงข้ามกับแรงบิดเร่ง (Accelerating Torque) ( $M_i \dot{\omega}_i$ ) แรงบิดหน่วง (Damping Torque) ( $D_i \omega_i$ ) และแรงบิดที่แกนเชื่อมโยงด้านขวามือ ( $K_{i,i+1}(\delta_i - \delta_{i+1})$ ) จะได้สมการอนุพันธ์เชิงเส้นของกังหันชุดที่  $i^{th}$  ดังนี้

$$M_i \dot{\omega}_i = T_i - D_i \omega_i + K_{i-1,i}(\delta_{i-1} - \delta_i) - K_{i,i+1}(\delta_i - \delta_{i+1}) \quad (4.1)$$

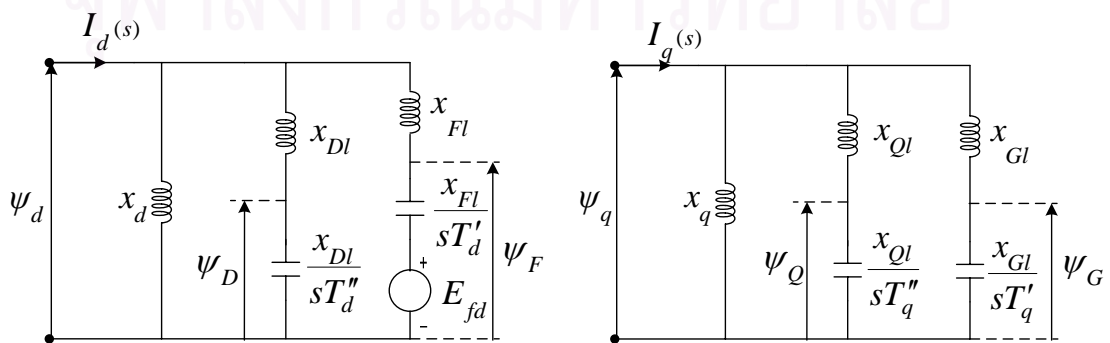
โดยที่  $K_{i-1,i}|_{i=1} = 0$ ,  $K_{i,i+1}|_{i=m} = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$

หากสมมติให้โครงสร้างของระบบเฟลาเชื่อมโยงชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นดังรูปที่ 4.2 จากสมการที่ (4.1) จัดให้อยู่ในรูปสมการสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega}_{HP} &= \frac{1}{M_{HP}} [T_{HP} - D_{HP}\omega_{HP} - K_{HP,IP}(\delta_{HP} - \delta_{IP})] \\
 \dot{\delta}_{HP} &= \omega_b \omega_{HP} \\
 \dot{\omega}_{IP} &= \frac{1}{M_{IP}} [T_{IP} - D_{IP}\omega_{IP} + K_{HP,IP}(\delta_{HP} - \delta_{IP}) - K_{IP,LPA}(\delta_{IP} - \delta_{LPA})] \\
 \dot{\delta}_{IP} &= \omega_b \omega_{IP} \\
 \dot{\omega}_{LPA} &= \frac{1}{M_{LPA}} [T_{LPA} - D_{LPA}\omega_{LPA} + K_{IP,LPA}(\delta_{IP} - \delta_{LPA}) - K_{LPA,LPB}(\delta_{LPA} - \delta_{LPB})] \\
 \dot{\delta}_{LPA} &= \omega_b \omega_{LPA} \\
 \dot{\omega}_{LPB} &= \frac{1}{M_{LPB}} [T_{LPB} - D_{LPB}\omega_{LPB} + K_{LPA,LPB}(\delta_{LPA} - \delta_{LPB}) - K_{LPB,GEN}(\delta_{LPB} - \delta_{GEN})] \\
 \dot{\delta}_{LPB} &= \omega_b \omega_{LPB} \\
 \dot{\omega}_{GEN} &= \frac{1}{M_{GEN}} [-T_e - D_{GEN}\omega_{GEN} + K_{LPB,GEN}(\delta_{LPB} - \delta_{GEN}) - K_{GEN,EX}(\delta_{GEN} - \delta_{EXC})] \\
 \dot{\delta}_{GEN} &= \omega_b \omega_{GEN} \\
 \dot{\omega}_{EXC} &= \frac{1}{M_{EXC}} [-T_{EXC} - D_{EXC}\omega_{EXC} + K_{GEN,EXC}(\delta_{GEN} - \delta_{EXC})] \\
 \dot{\delta}_{EXC} &= \omega_b \omega_{EXC}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

#### 4.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานี้ ถูกสร้างขึ้นโดยใช้แกนอ้างอิง dq สำหรับวงจรทางด้านโรเตอร์ประกอบด้วย ขดลวดสนาม (Field winding : F) ขดลวดหน่วง (Damper winding : D) บนแกน d และขดลวดหน่วง 2 ชุด (Damper winding : G,Q) บนแกน q ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 [5]



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกนอ้างอิง dq

$$\text{โดยที่ } X_{Fl} = \frac{X_d X'_d}{X_d - X'_d}, \quad X_{Dl} = \frac{X'_d X''_d}{X'_d - X''_d}, \quad T'_d = \frac{X'_d}{X_d} T'_{do}, \quad T''_d = \frac{X''_d}{X'_d} T''_{do}$$

$$X_{Gl} = \frac{X_q X'_q}{X_q - X'_q}, \quad X_{Ql} = \frac{X'_q X''_q}{X'_q - X''_q}, \quad T'_q = \frac{X'_q}{X_q} T'_{qo}, \quad T''_q = \frac{X''_q}{X'_q} T''_{qo}$$

จากรูปที่ 4.4 สมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปของพารามิเตอร์มาตรฐาน และสมการทางไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้าและแรงบิดทางไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_d &= -\omega_b \psi_q - \omega_b R_a i_d - \omega_b v_d \\ \dot{\psi}_F &= \frac{1}{T'_{do}} \left[ \left( \frac{X_d}{X'_d} \right) \psi_d - \left( \frac{X_d}{X'_d} \right) \psi_F + \left( \frac{X_d}{X_d - X'_d} \right) E_{fd} \right] \\ \dot{\psi}_D &= \frac{1}{T''_{do}} \left[ \left( \frac{X'_d}{X''_d} \right) \psi_d - \left( \frac{X'_d}{X''_d} \right) \psi_D \right] \\ \dot{\psi}_q &= \omega_b \psi_d - \omega_b R_a i_q - \omega_b v_q \\ \dot{\psi}_G &= \frac{1}{T'_{qo}} \left[ \left( \frac{X_q}{X'_q} \right) \psi_d - \left( \frac{X_q}{X'_q} \right) \psi_G \right] \\ \dot{\psi}_Q &= \frac{1}{T''_{qo}} \left[ \left( \frac{X'_q}{X''_q} \right) \psi_d - \left( \frac{X'_q}{X''_q} \right) \psi_Q \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

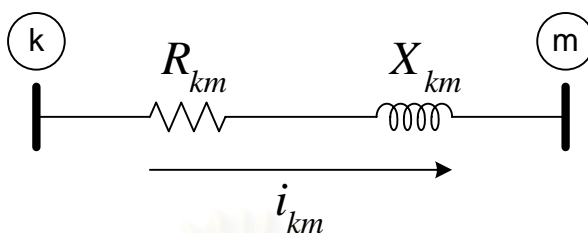
$$\begin{aligned} i_d &= \left( \frac{1}{X''_d} \right) \psi_d - \left( \frac{X_d - X'_d}{X_d X'_d} \right) \psi_F - \left( \frac{X'_d - X''_d}{X_d X''_d} \right) \psi_D \\ i_q &= \left( \frac{1}{X''_q} \right) \psi_q - \left( \frac{X_q - X'_q}{X_q X'_q} \right) \psi_G - \left( \frac{X'_q - X''_q}{X_q X''_q} \right) \psi_Q \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d$$

### 4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

จากความรู้ในบทที่ 2 เมื่อเกิดปรากฏการณ์ SSR ขึ้น จะทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างระบบพลาเชื่อมโยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าคือตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานเหล่านี้ได้ ดังนั้นแบบจำลองของสายส่งซึ่งมีลักษณะเป็นสมการทางพีชคณิต (Algebraic equations) หรือ  $(\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V})$  ซึ่งใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไป จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ แบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมจึงต้องจัดให้อยู่ในรูปของสมการสถานะระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกรวมตัวเก็บประจุ [5]

1) สมการสถานะของสายส่งชนิดที่ไม่มีตัวเก็บประจุอนุกรม

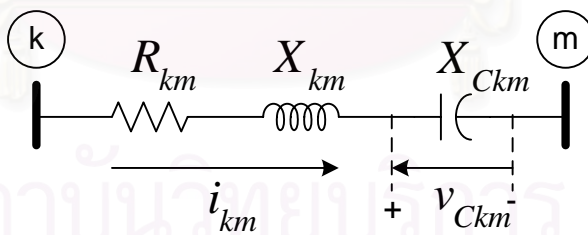


รูปที่ 4.5 สายส่งเส้นที่ไม่มีตัวเก็บประจุอนุกรม

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 จะได้สมการสถานะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส k ไปยังบัส m ในรูปแกนอ้างอิง dq ดังนี้

$$\begin{aligned} i_{km}^D &= -\left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)R_{km}i_{km}^D - \omega_b i_{km}^Q + \left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)(v_k^D - v_m^D) \\ i_{km}^Q &= -\left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)R_{km}i_{km}^Q + \omega_b i_{km}^D + \left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)(v_k^Q - v_m^Q) \end{aligned} \quad (4.5)$$

2) สมการสถานะของสายส่งชนิดที่มีตัวเก็บประจุอนุกรม

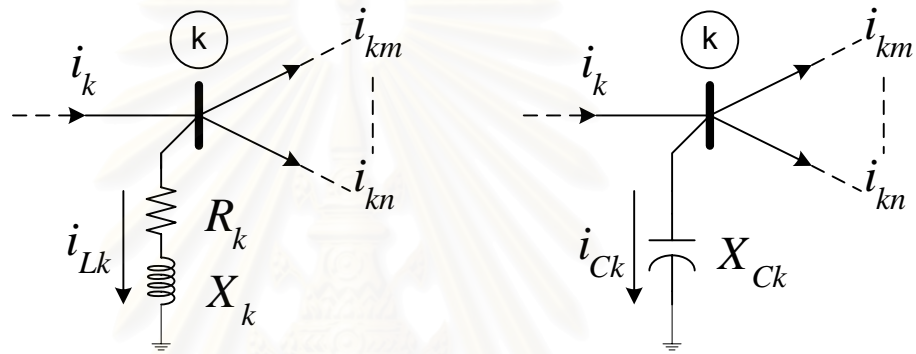


รูปที่ 4.6 สายส่งเส้นที่มีตัวเก็บประจุอนุกรม

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 จะได้สมการสถานะมีทั้งส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส k ไปยังบัส m และส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรม ในรูปแกนอ้างอิง dq ดังนี้

$$\begin{aligned}
i_{km}^D &= -\left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)R_{km}i_{km}^D - \omega_b i_{km}^Q + \left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)(v_k^D - v_m^D - v_{Ckm}^D) \\
i_{km}^Q &= -\left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)R_{km}i_{km}^Q + \omega_b i_{km}^D + \left(\frac{\omega_b}{X_{km}}\right)(v_k^Q - v_m^Q - v_{Ckm}^Q) \\
\dot{v}_{Ckm}^D &= -\omega_b v_{Ckm}^Q + \omega_b X_{Ckm} i_{km}^D \\
\dot{v}_{Ckm}^Q &= \omega_b v_{Ckm}^D + \omega_b X_{Ckm} i_{km}^Q
\end{aligned} \tag{4.6}$$

3) สมการสถานะของโหลดและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัส



รูปที่ 4.7 โหลดและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัส

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการสถานะของโหลดที่บัสใดๆ ในที่นี้จะแทนด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรม สำหรับสมการสถานะของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัสซึ่งเกิดจากแบบจำลองสายส่งเป็นแบบ  $\pi$  นั้น จะรวมผลของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเข้ากับบัสที่ต่อกับสายส่งเส้นนั้นๆ ซึ่งจะได้สมการสถานะของกระแสโหลด และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสในรูปแบบแองอิง dq ดังนี้

$$\begin{aligned}
i_{Lk}^D &= -\left(\frac{\omega_b}{X_k}\right)R_k i_{Lk}^D - \omega_b i_{Lk}^Q + \left(\frac{\omega_b}{X_k}\right)v_k^D \\
i_{Lk}^Q &= -\left(\frac{\omega_b}{X_k}\right)R_k i_{Lk}^Q - \omega_b i_{Lk}^D + \left(\frac{\omega_b}{X_k}\right)v_k^Q \\
\dot{v}_{Ck}^D &= -\omega_b v_{Ck}^Q + \omega_b X_{Ck} i_{Ck}^D \\
\dot{v}_{Ck}^Q &= \omega_b v_{Ck}^D + \omega_b X_{Ck} i_{Ck}^Q
\end{aligned} \tag{4.7}$$

โดยที่  $i_{Ck} = i_k - i_{km} - \dots - i_{kn}$

หลังจากได้สมการอนุพันธ์เชิงเส้นของส่วนต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ ชุดกังหัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบส่งไฟฟ้า ในลำดับต่อไปจะอธิบายถึงการเชื่อมต่อส่วนต่างๆ เหล่านี้ เข้าด้วยกัน

ชุดกังหัน : จำนวนสมการสถานะขึ้นอยู่กับจำนวนชุดกังหัน ซึ่งชุดกังหันแต่ละชุด ประกอบด้วยสมการสถานะ 2 ตัว คือ อนุพันธ์ของความเร็วโรเตอร์ และ อนุพันธ์ของมุมโรเตอร์ สามารถแสดงในรูปของเมตริกซ์ดังสมการที่ (4.8) มีอินพุทเป็นแรงบิดทางกลที่ป้อนให้กับชุดกังหันแต่ละชุด และเอาต์พุทเป็นมุมโรเตอร์

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}_{\text{Turbine}} &= \mathbf{A}_{\text{Turbine}} \mathbf{X}_{\text{Turbine}} + \mathbf{B}_{\text{Turbine}} \mathbf{U}_{\text{Turbine}} \\ \mathbf{Y}_{\text{Turbine}} &= \mathbf{C}_{\text{Turbine}} \mathbf{X}_{\text{Turbine}}\end{aligned}\quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}\text{โดยที่ } \dot{\mathbf{X}}_{\text{Turbine}} &= [\dot{\omega}_{HP}, \dots, \dot{\omega}_{EX}, \dot{\delta}_{HP}, \dots, \dot{\delta}_{EX}]^T \\ \mathbf{U}_{\text{Turbine}} &= [T_{HP}, \dots, T_{EX}, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ \mathbf{Y}_{\text{Turbine}} &= \delta_{GEN}\end{aligned}$$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า : ประกอบด้วยสมการสถานะของขดลวดโรเตอร์ซึ่งอ้างอิงบนแกน dq มีด้วยกันทั้งสิ้น 6 ตัว ดังสมการที่ (4.9) มีอินพุทเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเอาต์พุทเป็นแรงบิดทางไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิต

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}_{\text{Generator}} &= \mathbf{A}_{\text{Generator}} \mathbf{X}_{\text{Generator}} + \mathbf{B}_{\text{Generator}} \mathbf{U}_{\text{Generator}} \\ \mathbf{Y}_{\text{Generator}} &= \mathbf{C}_{\text{Generator}} \mathbf{X}_{\text{Generator}}\end{aligned}\quad (4.9)$$

$$\begin{aligned}\text{โดยที่ } \dot{\mathbf{X}}_{\text{Generator}} &= [\dot{\psi}_d, \dot{\psi}_F, \dot{\psi}_D, \dot{\psi}_q, \dot{\psi}_G, \dot{\psi}_Q]^T \\ \mathbf{U}_{\text{Generator}} &= [v_t^d, v_t^q, E_{fd}]^T \\ \mathbf{Y}_{\text{Generator}} &= [i_t^d, i_t^q, T_e]^T\end{aligned}$$

ระบบส่งไฟฟ้ากำลัง : สมการสถานะที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยสมการสถานะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่และกระแสไฟฟ้าโหลดที่บัสต่างๆ ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรม ดังสมการที่ (4.10) มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง อนันต์และกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอินพุทและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่เป็นเอาต์พุท



$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}_{\text{Network}} &= \mathbf{A}_{\text{Network}} \mathbf{X}_{\text{Network}} + \mathbf{B}_{\text{Network}} \mathbf{U}_{\text{Network}} \\ \mathbf{Y}_{\text{Network}} &= \mathbf{C}_{\text{Network}} \mathbf{X}_{\text{Network}}\end{aligned}\quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}\text{โดยที่ } \dot{\mathbf{X}}_{\text{Network}} &= [\dot{v}_{ci}^D, \dot{v}_{ci}^Q, \dot{i}_{Li}^D, \dot{i}_{Li}^Q, \dot{i}_{km}^D, \dot{i}_{km}^Q, \dot{v}_{ckm}^D, \dot{v}_{ckm}^Q]^T \\ & i = 1, \dots, n \text{ (จำนวนบัส)} \\ & km = 1, \dots, m \text{ (จำนวนกิ่ง)} \\ \mathbf{U}_{\text{Network}} &= [v_\infty^D, v_\infty^Q, i_t^D, i_t^Q]^T \\ \mathbf{Y}_{\text{Network}} &= [v_t^D, v_t^Q]^T\end{aligned}$$

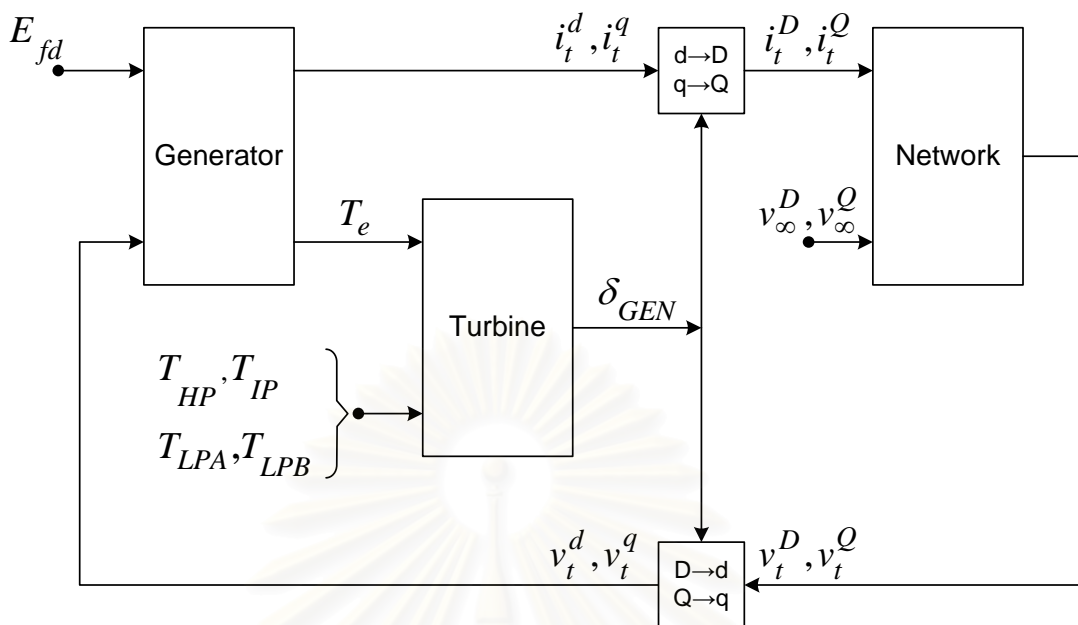
ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้ากำลังทำการคำนวณในกรอบอ้างอิงต่างกัน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าคำนวณบนกรอบอ้างอิงโรเตอร์ (Rotor Reference Frame) ใช้สัญลักษณ์ด้วย "d, q" และระบบส่งไฟฟ้ากำลังคำนวณบนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (Stator Reference Frame) ใช้สัญลักษณ์ด้วย "D, Q" ดังนั้น เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อทั้งสองระบบเข้าด้วยกันจึงต้องทำการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยสมการที่ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ เปลี่ยนกรอบอ้างอิงจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_{GEN}) & -\sin(\delta_{GEN}) \\ \sin(\delta_{GEN}) & \cos(\delta_{GEN}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ Q \end{bmatrix}\quad (4.11)$$

เปลี่ยนกรอบอ้างอิงจากโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์

$$\begin{bmatrix} D \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_{GEN}) & \sin(\delta_{GEN}) \\ -\sin(\delta_{GEN}) & \cos(\delta_{GEN}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}\quad (4.12)$$

เมื่อทราบรายละเอียดเกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของแต่ละส่วนแล้ว หลังจากนั้นสร้างแบบจำลองของสมการสถานะในส่วนต่างๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังแสดงโครงสร้างของการเชื่อมต่ออย่างคร่าวๆ ในรูปที่ 4.8 ซึ่งใช้ความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตจากสมการที่ (4.8) ถึง (4.12)



รูปที่ 4.8 โครงสร้างการเชื่อมต่อของชุดกังหัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

การสร้างสมการสถานะของส่วนประกอบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วตอนต้นด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ไม่เพียงสะดวกต่อการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัต แต่ยังสามารถใช้วิเคราะห์ค่าเงาของระบบได้อีกด้วย โดยสร้างแบบจำลองเชิงเส้นจากสมการอนุพันธ์ของระบบ ที่ทำการศึกษาด้วยการใช้คำสั่ง  $[A_{System}, B_{System}, C_{System}, D_{System}] = \text{lin mod}('System')$  ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของสมการสถานะของอนุพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (4.13) ในที่นี้กำหนดให้เอาที่พหุเป็นมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากนั้นสามารถวิเคราะห์ค่าเงาของระบบจากเมตริกซ์  $A_{System}$  ของระบบด้วยคำสั่ง  $[Eigenvalues] = \text{eig}(A_{System})$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{System} &= \mathbf{A}_{System} \mathbf{X}_{System} + \mathbf{B}_{System} \mathbf{U}_{System} \\ \mathbf{Y}_{System} &= \mathbf{C}_{System} \mathbf{X}_{System} \end{aligned} \quad (4.13)$$

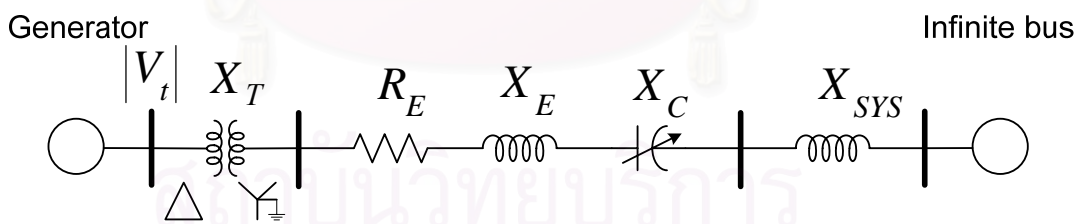
$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \dot{\mathbf{X}}_{System} &= [\dot{\mathbf{X}}_{Turbine}, \dot{\mathbf{X}}_{Generator}, \dot{\mathbf{X}}_{Network}]^T \\ \mathbf{U}_{System} &= [T_{HP}, T_{IP}, T_{LPA}, T_{LPB}, E_{fd}, v_\infty^D, v_\infty^Q]^T \\ \mathbf{Y}_{System} &= \delta_{GEN} \end{aligned}$$

**4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยระบบทดสอบ IEEE Benchmark**

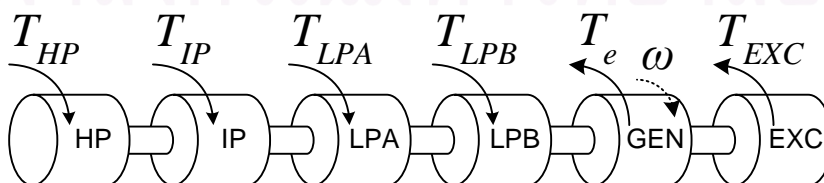
ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับปัญหา SSR มากขึ้น โดยมากทำการทดสอบด้วยระบบ IEEE FBM [20] และ SBM [23] ซึ่งเป็นระบบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ทั้งนี้อาจศึกษาในลักษณะของการลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ SSR ด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่เดิมในระบบ เช่น ระบบกระตุ้น (Excitation System) สำหรับเนื้อหาในหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากสมการข้างต้นของชุดกังหัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบส่งกำลังไฟฟ้า ด้วยการพิจารณาจากค่าเจาะจงของระบบทดสอบที่จัดให้อยู่ในรูปเชิงเส้น ที่ระดับการชดเชยค่าต่างๆ ด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ หลังจากนั้นจึงจำลองเหตุการณ์ผิดปกติภายในระบบเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลงชั่วขณะ เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบในจุดที่ตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ก่อให้เกิดปัญหา SSR

**4.4.1 ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model : FBM [20,21]**

ระบบทดสอบแรกเป็นระบบทดสอบอย่างง่าย มีเพียงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับบัสอ้างอิงอนันต์ผ่านสายส่งเพียงเส้นเดียว ดังรูปที่ 4.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัดอยู่ที่ 892.4 MVA และระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่ 500 kV สำหรับข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง ตลอดจนชุดกังหัน สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก.1 และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับเอกสารอ้างอิงของ Padiyar [5] และ Ong [22] ด้วยการเปรียบเทียบค่าเจาะจง โดยกำหนดจุดทำงานเริ่มต้นที่  $P_g = 0.9 pu, PF = 0.9 (lag), |V_t| = 1.0 pu$



(ก) แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ IEEE FBM



(ข) โครงสร้างชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE FBM

รูปที่ 4.9 ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model [20]

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าเจาะจงของแบบจำลอง IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 50%

#		ค่าเจาะจงจากเอกสารอ้างอิง [5]		ค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น	
		ส่วนจริง (1/s)	ส่วนจินตภาพ (rad/s)	ส่วนจริง (1/s)	ส่วนจินตภาพ (rad/s)
1	Rotor Circuit	-41.2955	0.00	-33.4630	0.00
2		-25.4111	0.00	-21.4450	0.00
3		-0.9480	0.00	-3.6657	0.00
4		-0.7758	0.00	-0.31037	0.00
5,6	Mode 0	-1.2180	±10.60	-0.6041	±10.219
7,8	Mode 1	0.0782	±99.71	0.0454	±100.06
9,10	Mode 2	0.0785	±127.16	0.1031	±127.31
11,12	Mode 3	0.0409	±160.39	0.0624	±160.09
13,14	Mode 4	0.0023	±202.86	0.0094	±202.66
15,16	Mode 5	-0.0000	±298.18	-0.0000	±298.18
17,18	Electrical	-5.5411	±136.98	-3.0428	±136.41
19,20	Network	-41.2955	±616.53	-4.6939	±616.50

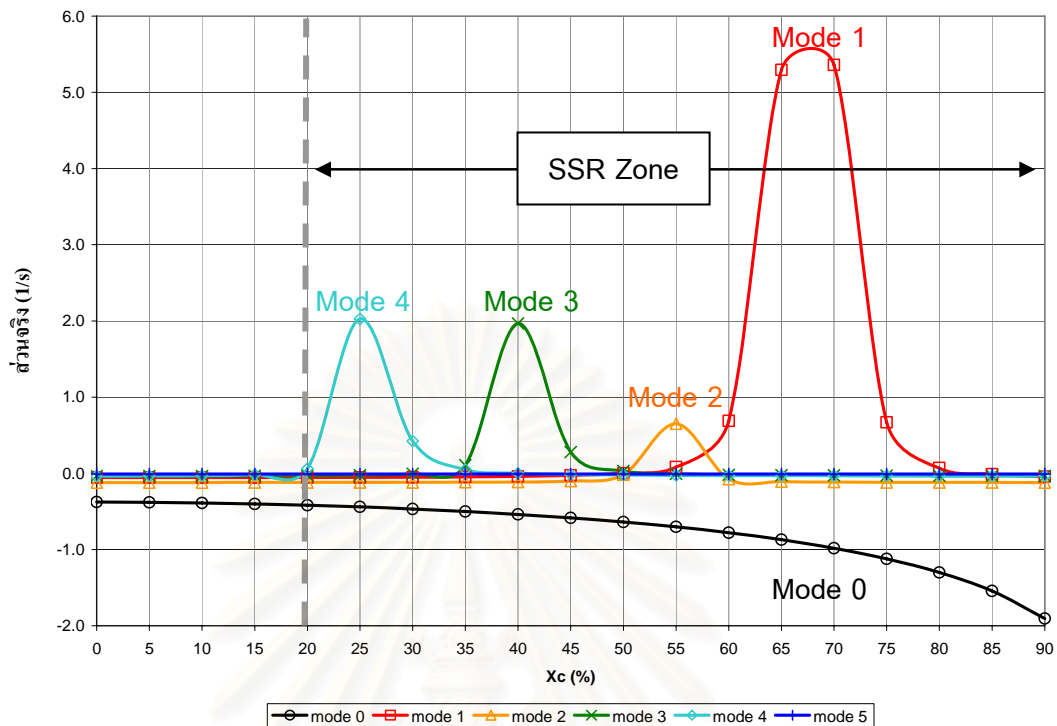
ค่าเจาะจงจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ วงจรไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ ชุด กังหัน และระบบไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบค่าเจาะจงที่ได้ทั้งจากเอกสารอ้างอิง [5] และ [20] และแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ปรากฏว่าจากตารางที่ 4.1 ที่ระดับการชดเชย 50% นั้น ค่าเจาะจงค่อนข้างต่างกันมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเทคนิคและวิธีการสร้างแบบจำลองของเอกสารอ้างอิง [5] ค่อนข้างแตกต่างกัน เช่น กรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นทำการแปลงพารามิเตอร์มาตรฐานกลับไปอยู่ในรูปอินดักแตนซ์ของตัวเองและอินดักแตนซ์ร่วม (Self and Mutual Inductance) รวมทั้งเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลเป็นแบบเกาจีงทำให้ผลแตกต่างกัน แต่สิ่งที่เหมือนกันซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการบอกว่าระดับการชดเชยใดเกิดปรากฏการณ์ SSR คือ เครื่องหมายของค่าเจาะจงในส่วนจำนวนจริงตรงกัน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าเจาะจงของแบบจำลอง IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 53%

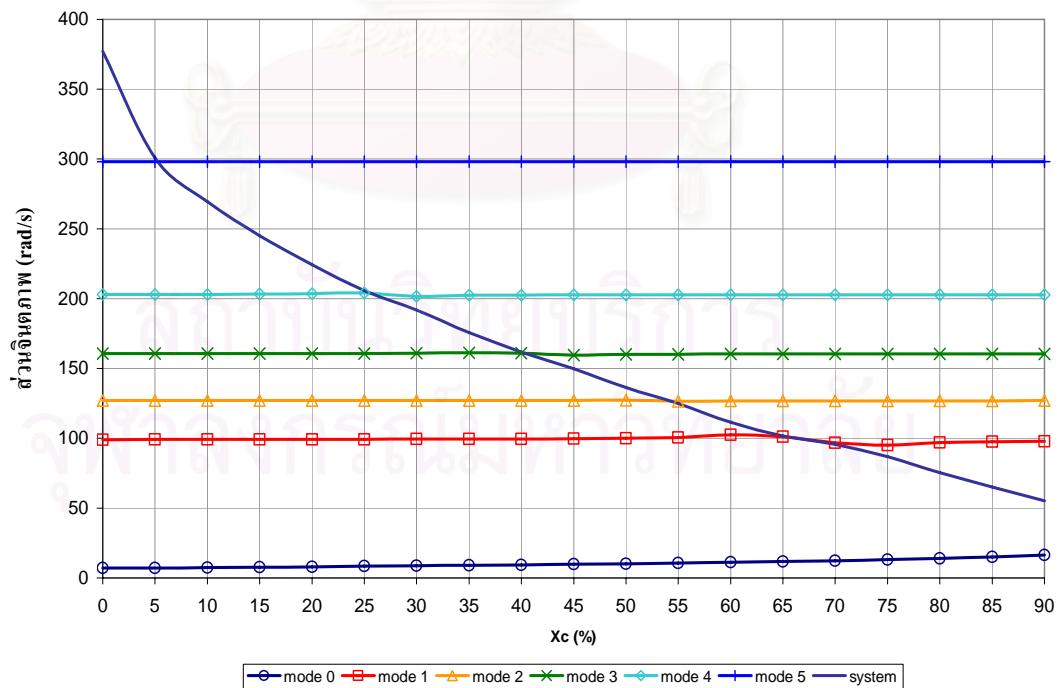
#		ค่าเจาะจงจากเอกสารอ้างอิง [22]		ค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น	
		ส่วนจริง (1/s)	ส่วนจินตภาพ (rad/s)	ส่วนจริง (1/s)	ส่วนจินตภาพ (rad/s)
1	Rotor Circuit	-33.0230	0.00	-33.5360	0.00
2		-20.4430	0.00	-21.4630	0.00
3		-3.9080	0.00	-3.7275	0.00
4		-0.3279	0.00	-0.3247	0.00
5,6	Mode 0	-0.6430	±10.49	-0.6760	±10.50
7,8	Mode 1	0.0323	±100.02	0.0360	±100.36
9,10	Mode 2	0.4024	±127.37	0.6975	±127.40
11,12	Mode 3	-0.0140	±160.34	0.0034	±160.19
13,14	Mode 4	-0.0285	±202.80	-0.0248	±202.68
15,16	Mode 5	0.0000	±298.18	-0.0107	±298.18
17,18	Electrical	-3.6326	±128.79	-3.2777	±129.30
19,20	Network	-4.7160	±623.64	-4.7004	±623.59

สำหรับกรณีการชดเชย 53% ของตารางที่ 4.2 ผลของค่าเจาะจงค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในส่วนจินตภาพหรือค่าความถี่ของการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบ ในที่นี้ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า (17,18) มีความถี่เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของชุดกังหันในโหมดที่ 2 (9,10) จึงทำให้ส่วนจริงของค่าเจาะจงในโหมดดังกล่าวมีค่าเป็นบวกมากที่สุด สำหรับความแตกต่างในส่วนของโหมดที่ 3 และ 5 นั้น อาจเนื่องมาจากการใช้เครื่องมือในการคำนวณค่าเจาะจงหรือวิธีการสร้างแบบจำลองที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าเจาะจง เมื่อเปรียบเทียบผลของทั้งตารางที่ 4.1 และ 4.2 เห็นได้ชัดว่าผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.2 มากกว่า ตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นเอกสารอ้างอิงที่เก่ากว่าอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ จึงถือว่าผลจากตารางที่ 4.2 ให้ผลแบบจำลองที่ถูกต้องสามารถนำไปวิเคราะห์กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ต่อไป

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง FBM แล้ว ทำการปรับระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมจาก 0%-90% ของค่ารีแอคแตนซ์สุทธิของระบบทดสอบโดยมีจุดทำงานที่ภาวะอยู่ตัวที่  $P_g = 0.9 pu$ ,  $PF = 0.9 (lag)$  และ  $|V_t| = 1.0 pu$  เพื่อศึกษาโอกาสเกิดการสอคล้องทางความถี่ที่ระดับการชดเชยค่าใดบ้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ส่วนจริงของค่าเฉพาะจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ



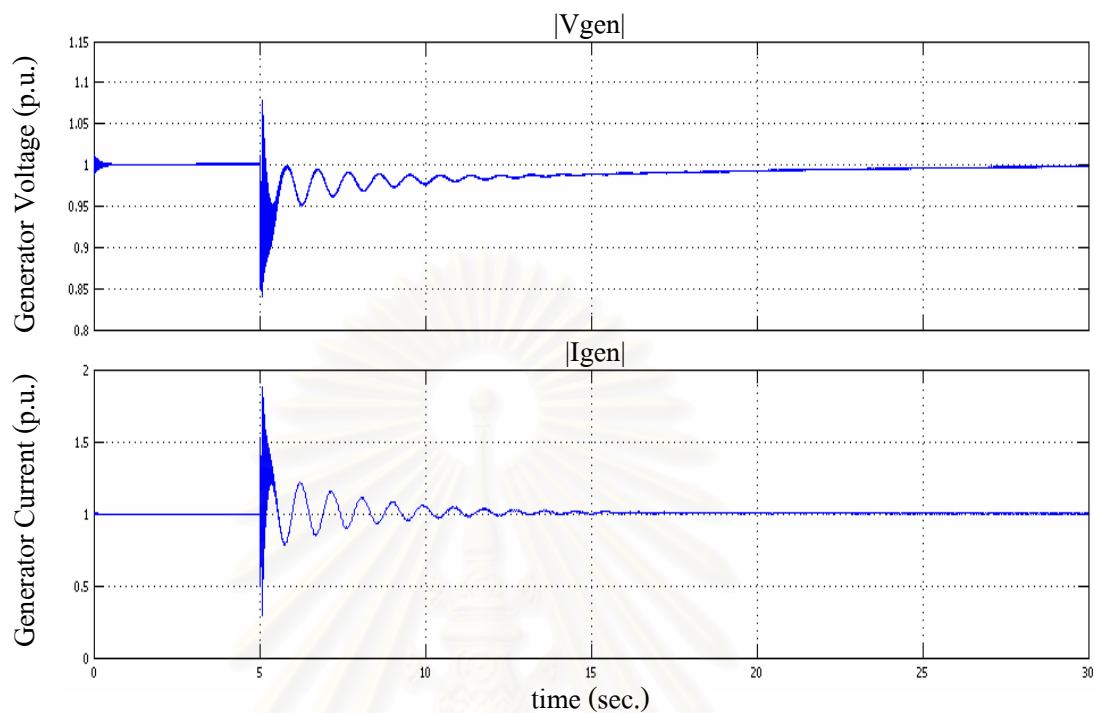
รูปที่ 4.11 ส่วนจินตภาพของค่าเฉพาะจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กัน โดยสังเกตจากส่วนจริงของค่าเจาะจงที่เป็นบวกสูงสุดในแต่ละช่วง กับความถี่ที่สอดคล้องกันระหว่างความถี่ของระบบไฟฟ้า (System) และความถี่ของชุดกังหัน ซึ่งพบว่ามีจุดตัดกันทั้งสิ้น 5 จุด ดังรูปที่ 4.11 แต่จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเกิดการสอดคล้องทางความถี่เพียง 4 จุด ทั้งนี้เนื่องจากการหน่วงของชุดกังหันทำให้โหมดที่ 5 ไม่ได้รับผลกระทบจากตัวเก็บประจุอนุกรม โดยโหมดที่ 1 มีระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ SSR สูงสุด ตามมาด้วย โหมดที่ 4, 3 และ 2 ที่ระดับการชดเชย 70%, 25%, 40% และ 55% ตามลำดับ

ลำดับต่อไปจะทดลองจำลองเหตุการณ์ผิดปกติภายในระบบอันเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลงชั่วขณะ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลง 50% ณ เวลา 5 วินาที เป็นเวลา 0.075 วินาที หลังจากนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจึงกลับมาเป็นปกติ เพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อการสอดคล้องทางความถี่อันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุอนุกรม ในที่นี้จะแสดงผลที่กรณีฐาน คือ ระดับการชดเชยเป็น 0% และที่ระดับการชดเชย 10% ซึ่งเป็นจุดที่ไม่เกิด SSR และกรณีสุดท้ายเมื่อเกิด SSR ที่ระดับการชดเชย 25% โดยอ้างอิงจากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นหลัก

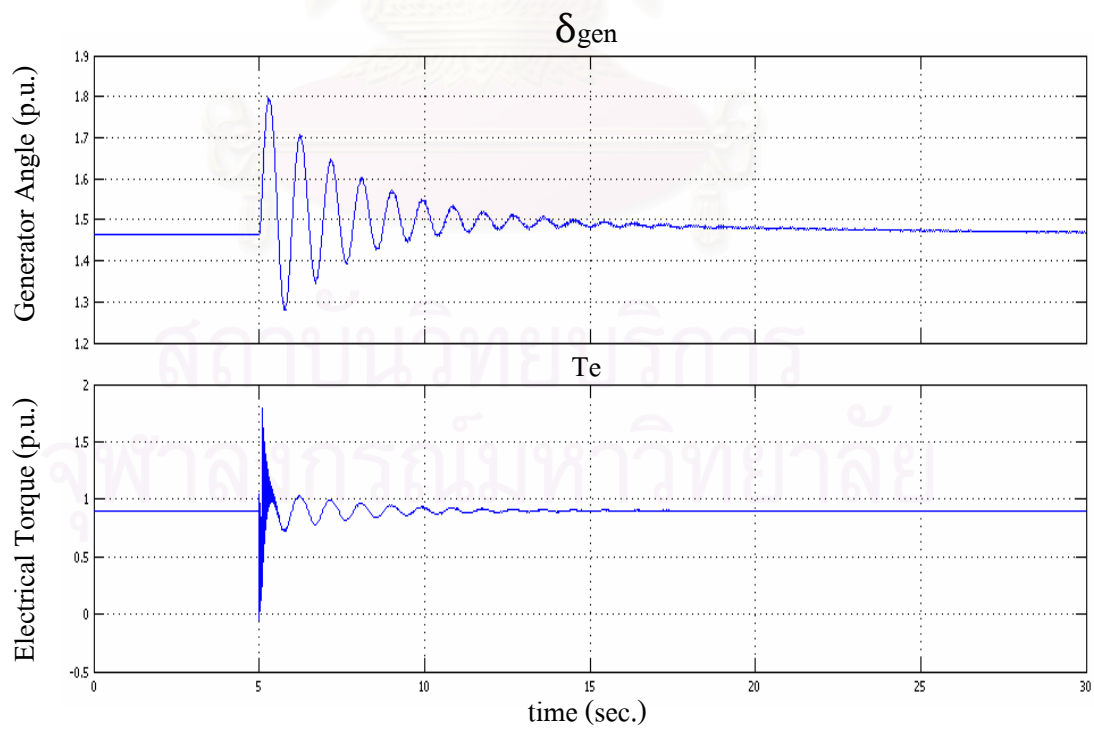
รูปที่ 4.12 ถึง 4.29 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ IEEE FBM ก่อนและหลังการถูกรบกวนชั่วขณะที่เวลา 5 วินาที ของปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ของระบบไฟฟ้าและปริมาณแรงบิดทางกลซึ่งเป็นแรงบิดต้านระหว่างชุดกังหันทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับการวัดแรงบิดต้านระหว่างชุดกังหันอาศัยจากสมการที่ (4.2) คือ แรงบิดระหว่างชุดกังหันจากชุดกังหันแรงดันสูง (HP) ถึงแอกไซเตอร์ (EXC) วัดจากสมการ  $K_{HP,IP}(\delta_{HP} - \delta_{IP})$ ,  $K_{IP,LPA}(\delta_{IP} - \delta_{LPA})$ ,  $K_{LPA,LPB}(\delta_{LPA} - \delta_{LPB})$ ,  $K_{LPB,GEN}(\delta_{LPB} - \delta_{GEN})$  และ  $K_{GEN,EXC}(\delta_{GEN} - \delta_{EXC})$  ตามลำดับ

กรณี 1 ที่ระดับการชดเชย 0 % (กรณีฐาน)



รูปที่ 4.12 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

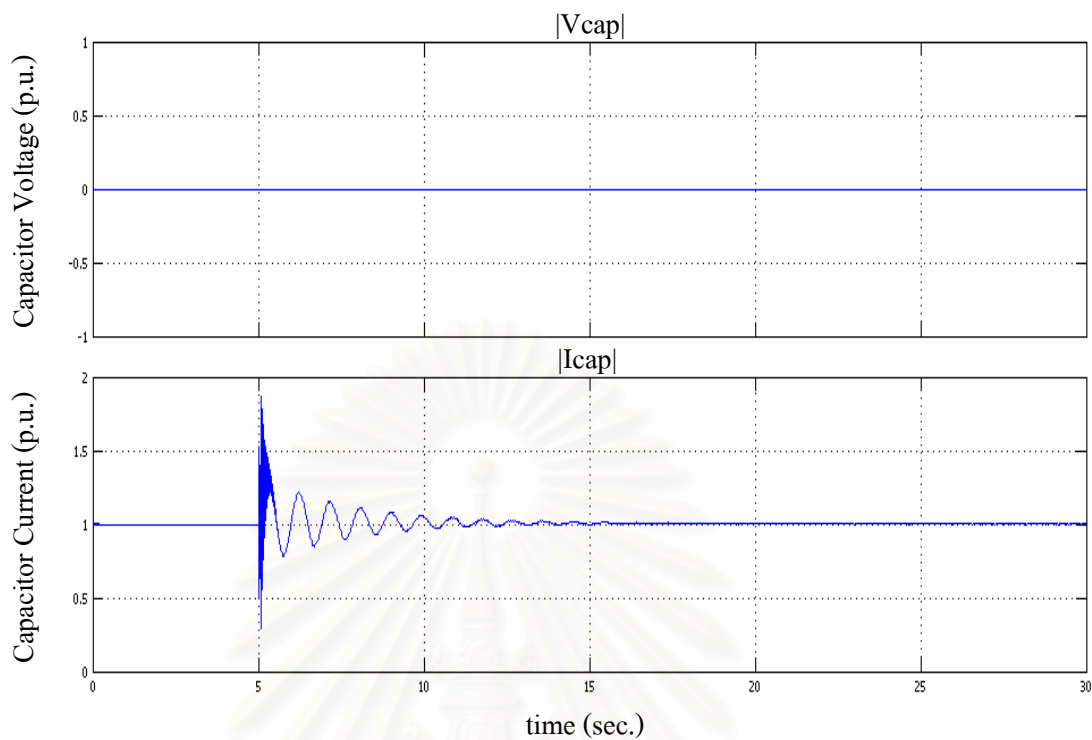
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0%



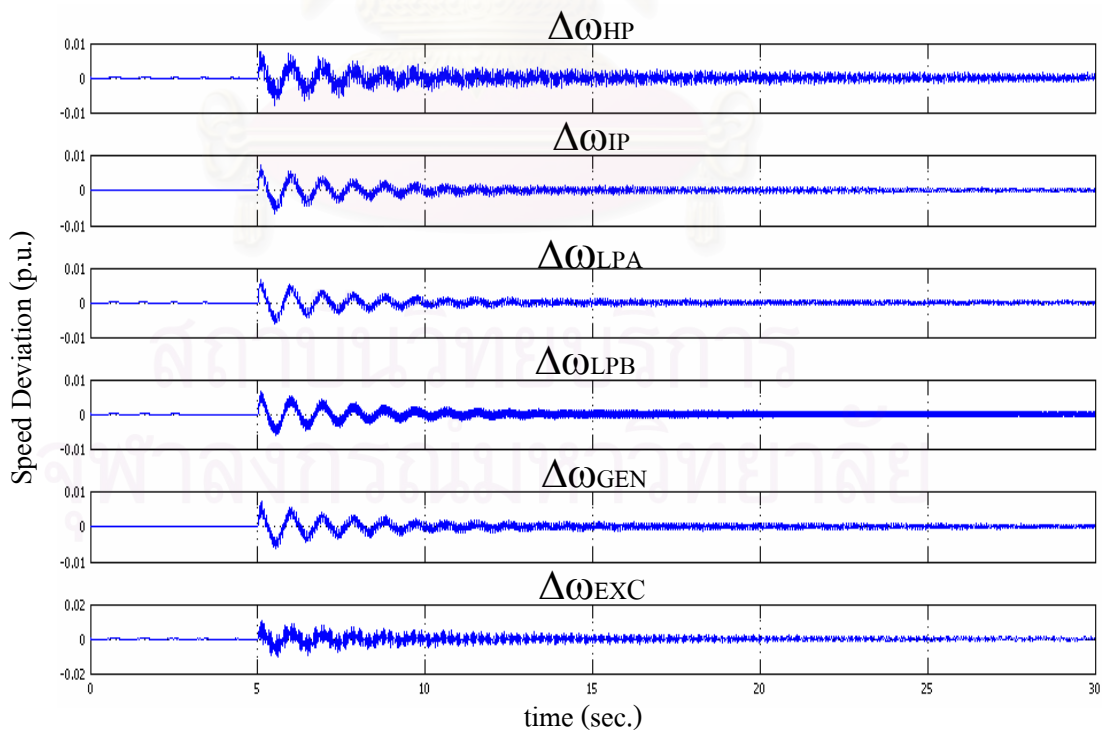
รูปที่ 4.13 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0%

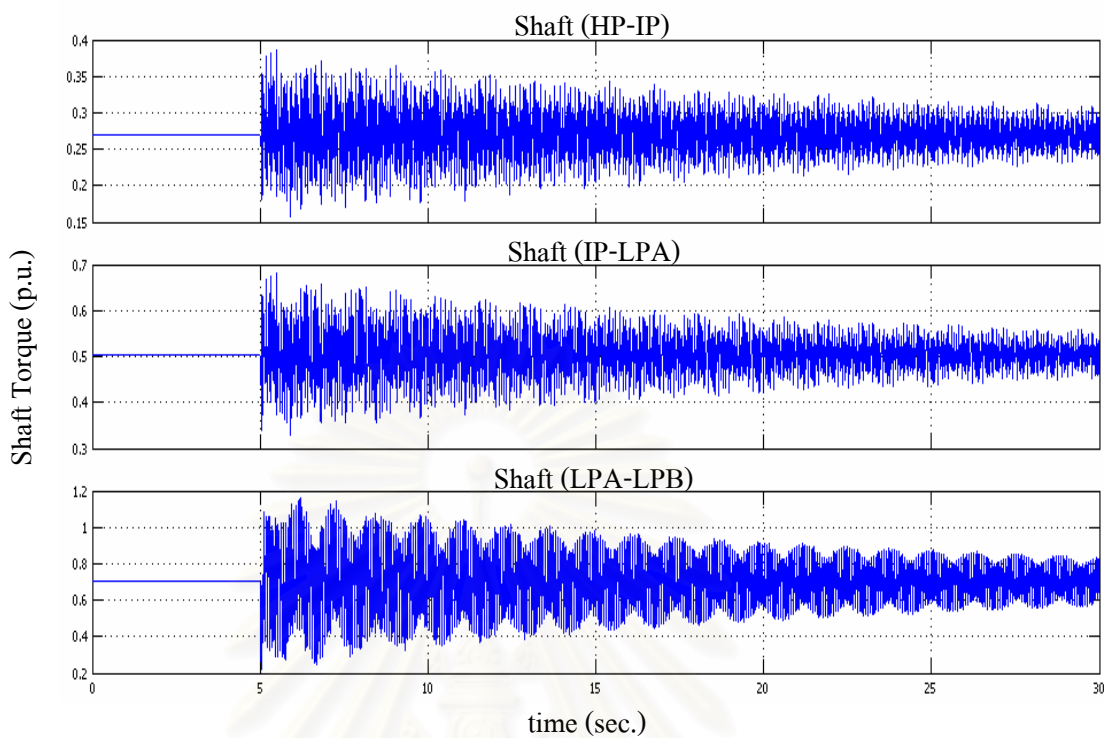




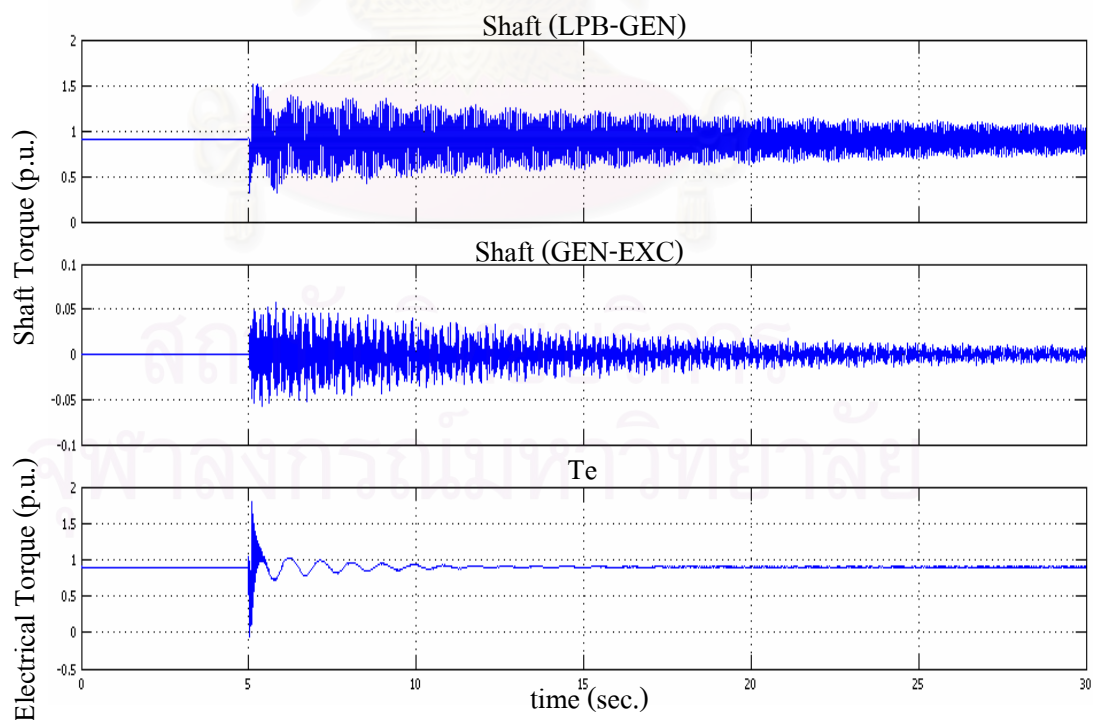
รูปที่ 4.14 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าคกร้อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้งตัวเก็บประจุนุกรมจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0%



รูปที่ 4.15 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0%

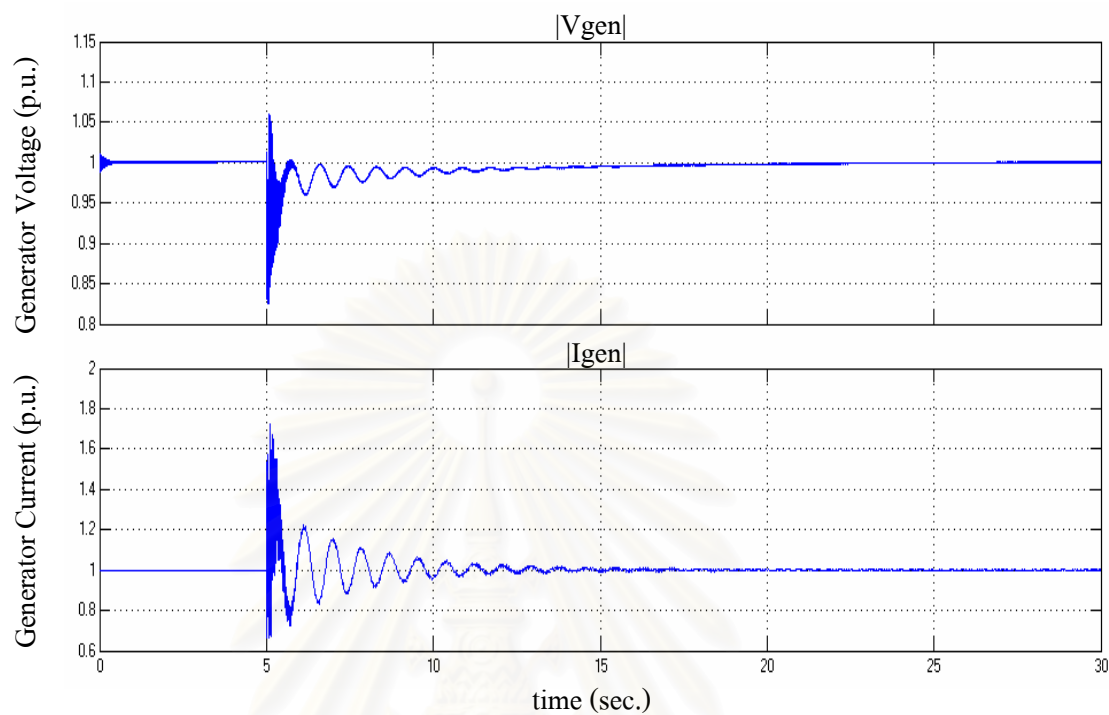


รูปที่ 4.16 แรงบิดทางกลบนเพลารวมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0%

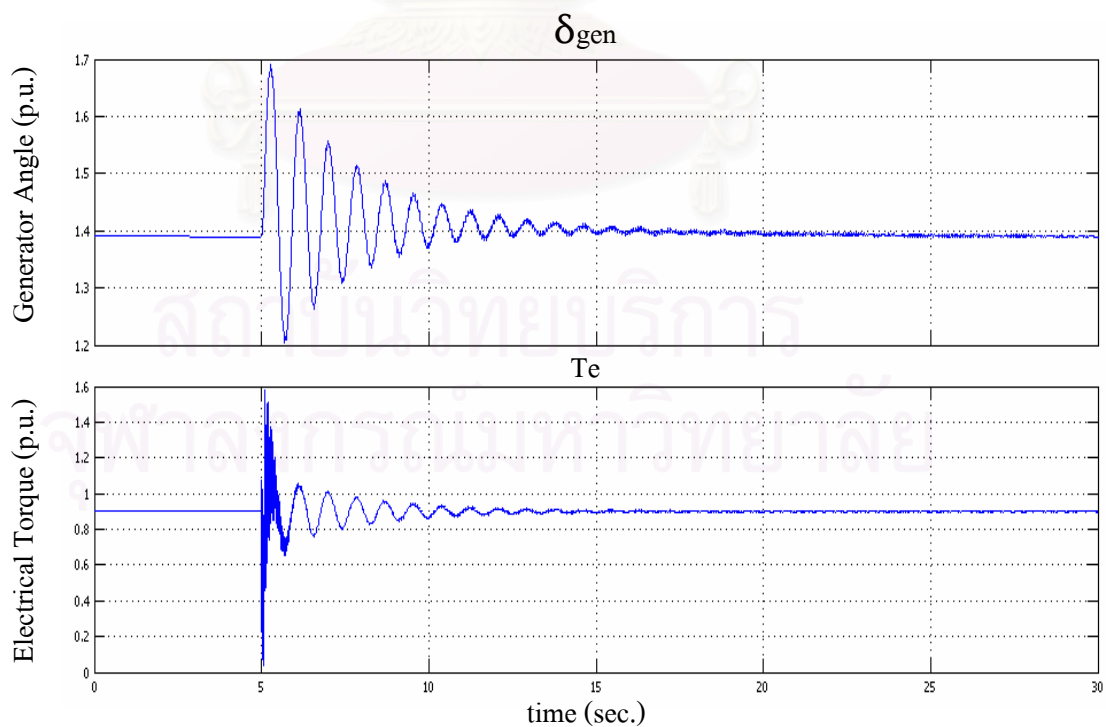


รูปที่ 4.17 แรงบิดทางกลบนเพลารวมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 0%

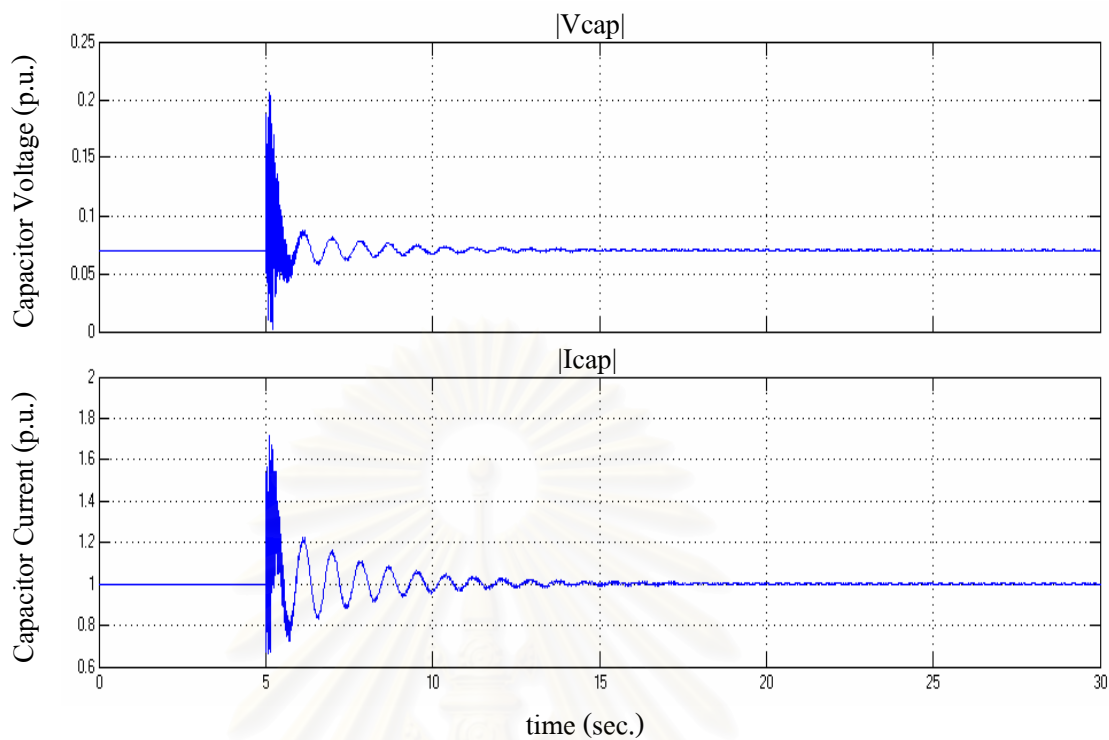
กรณี 2 ที่ระดับการชดเชย 10%



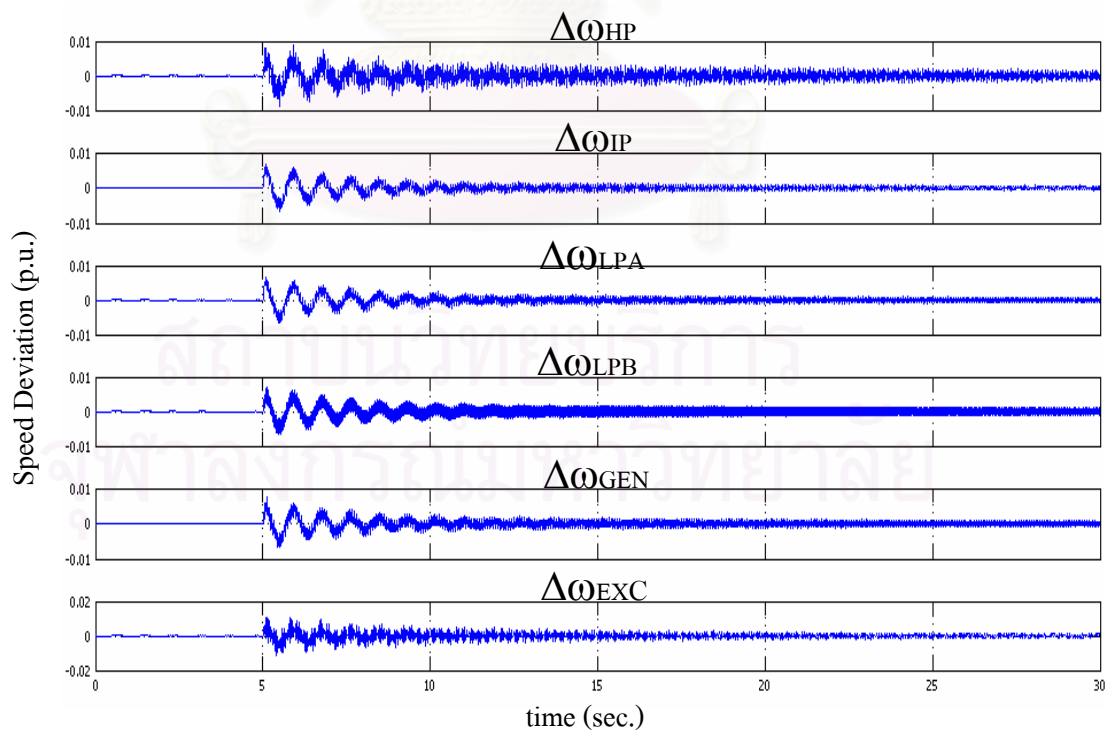
รูปที่ 4.18 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10%



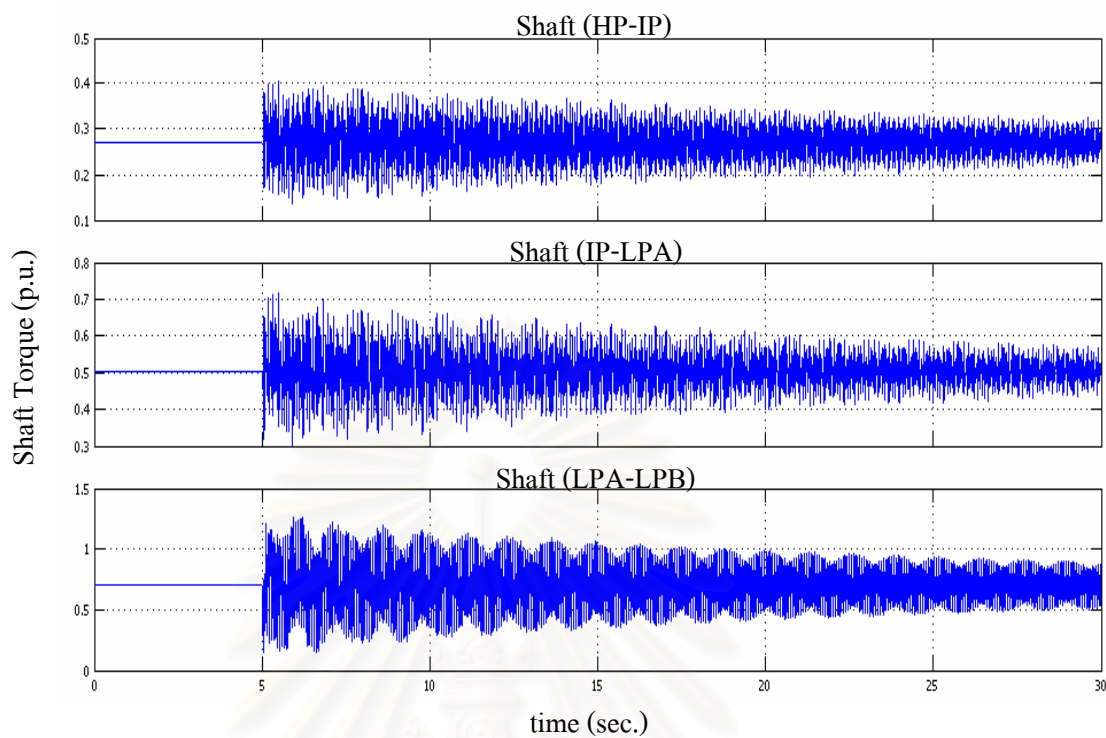
รูปที่ 4.19 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10%



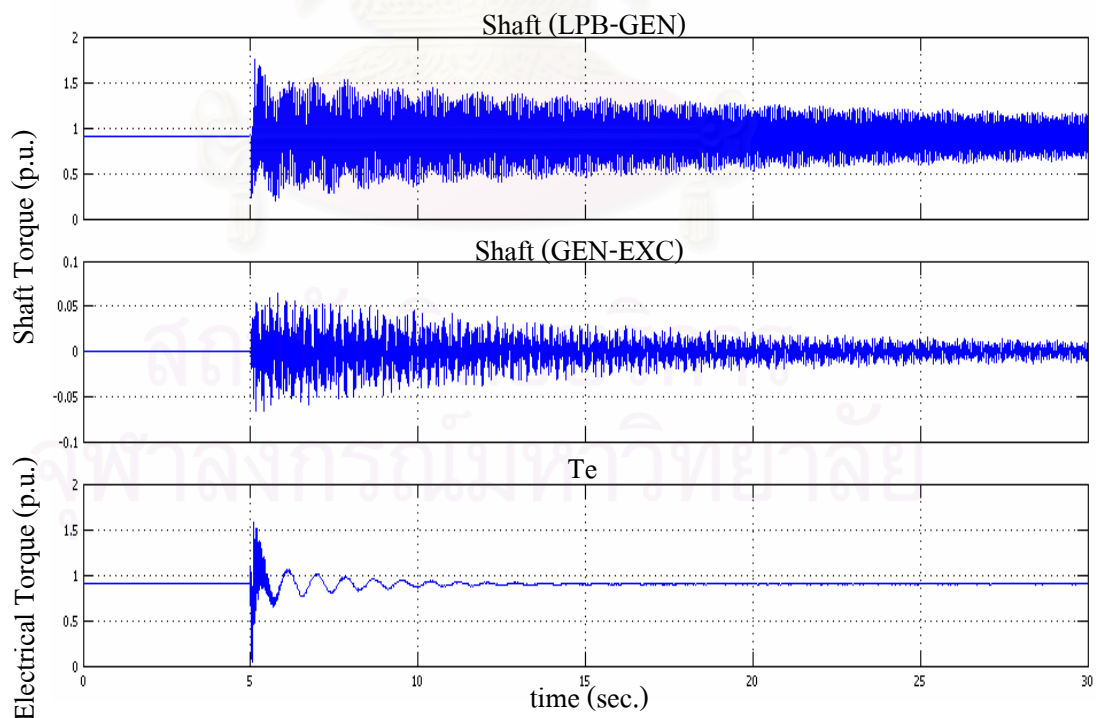
รูปที่ 4.20 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้งตัวเก็บประจุนุกรมจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10%



รูปที่ 4.21 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10%

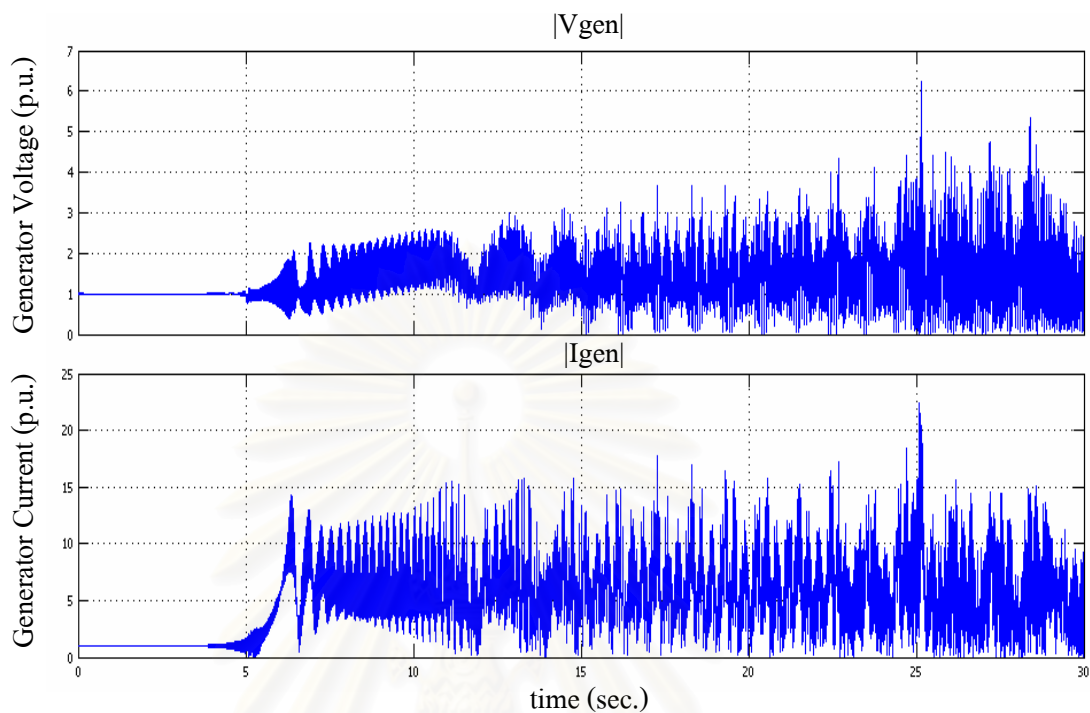


รูปที่ 4.22 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10%

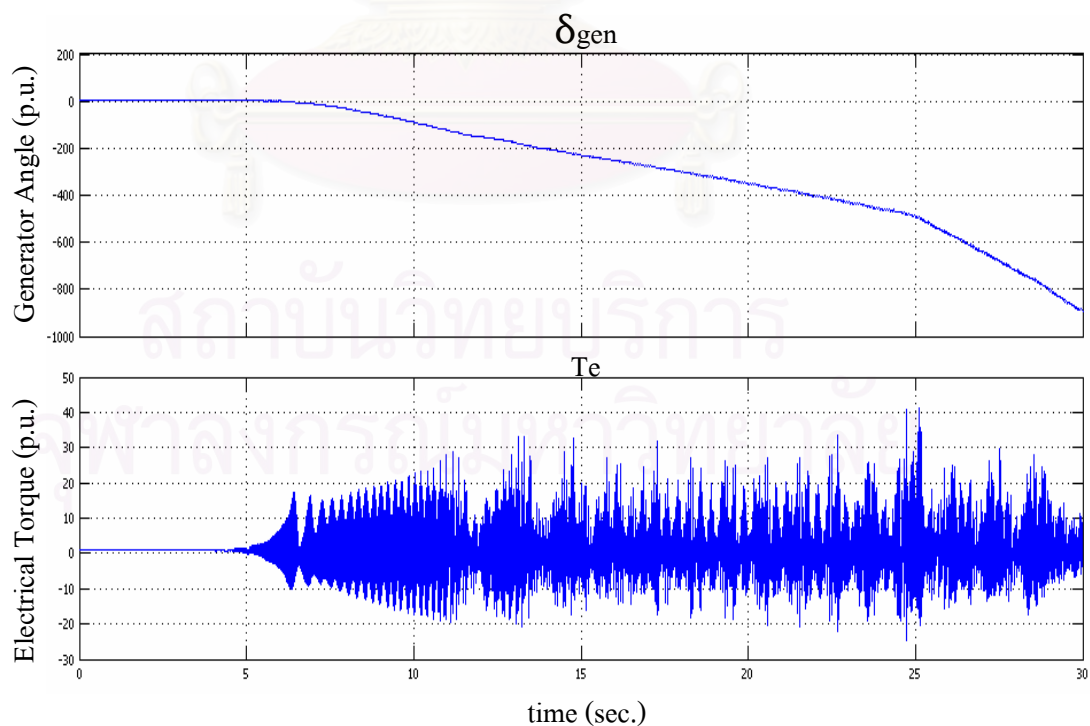


รูปที่ 4.23 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 10%

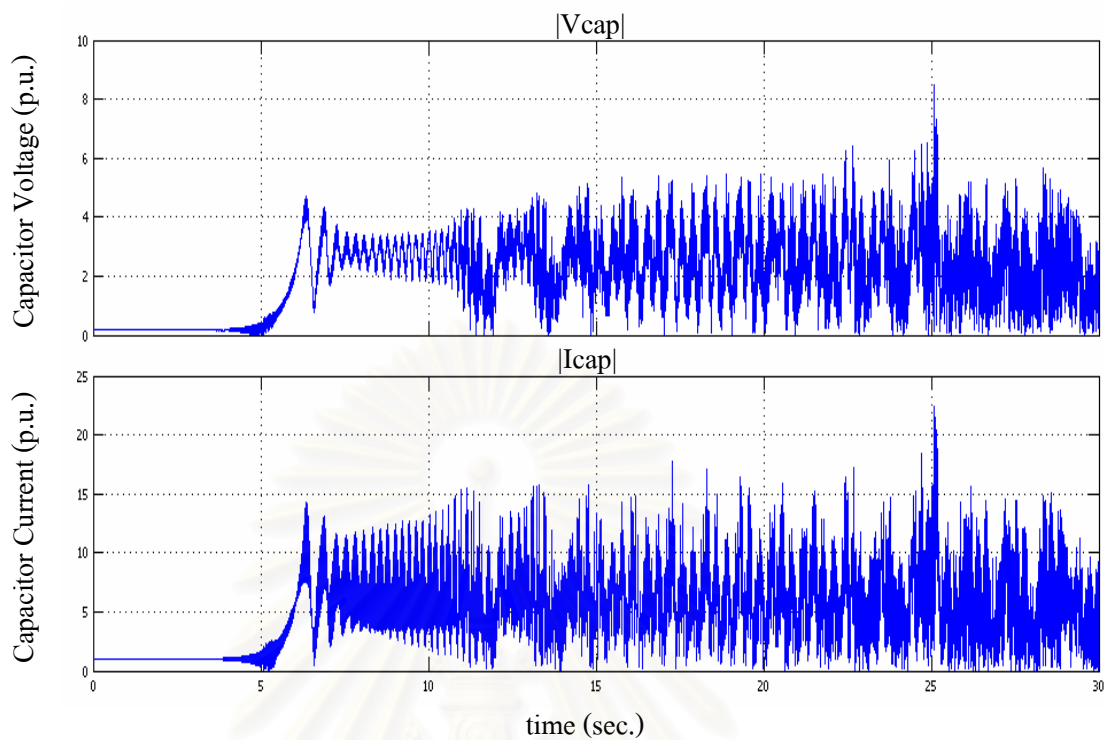
กรณี 3 ที่ระดับการชดเชย 25%



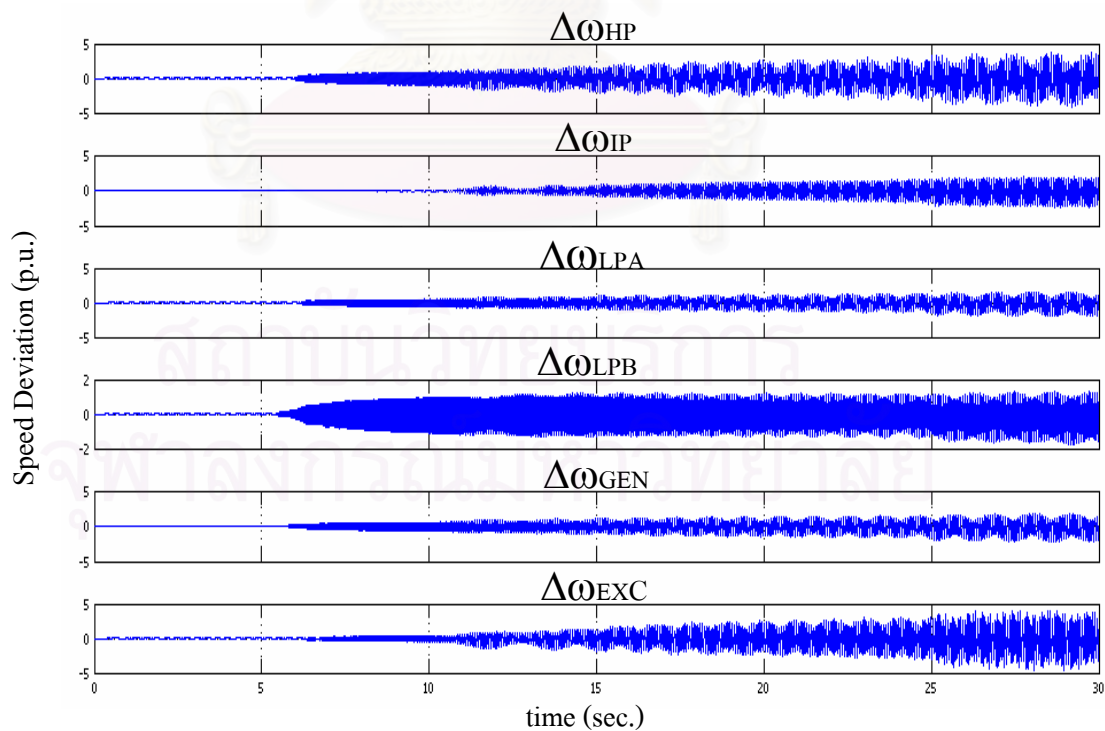
รูปที่ 4.24 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25%



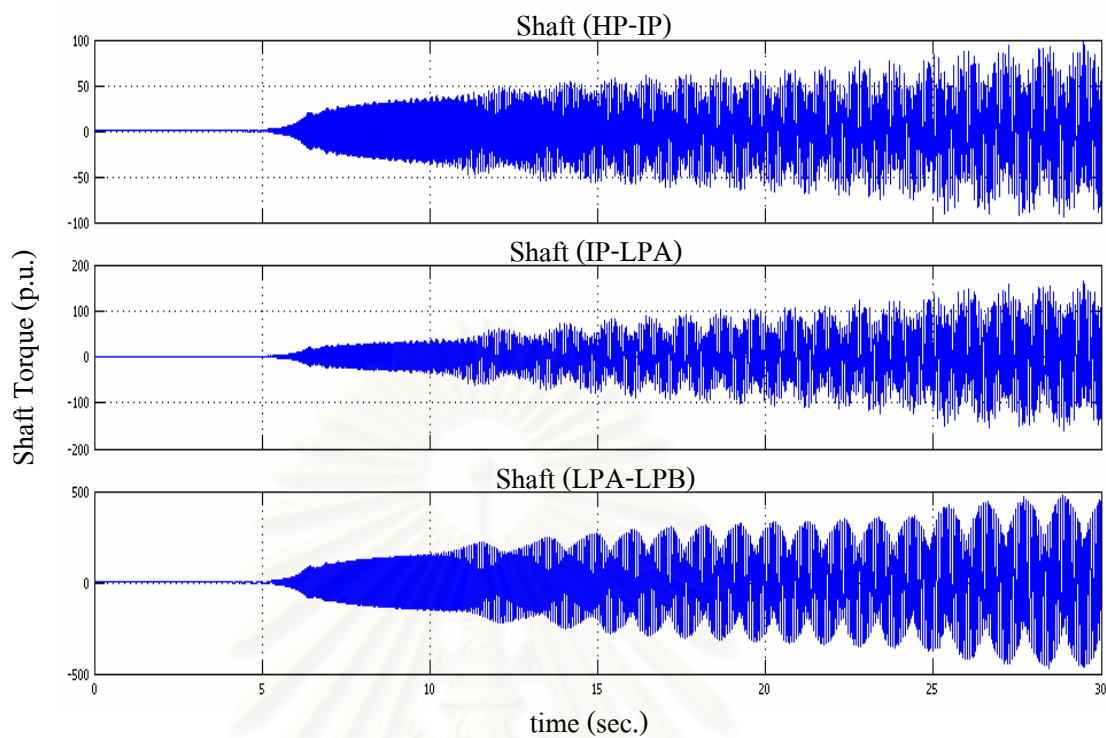
รูปที่ 4.25 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25%



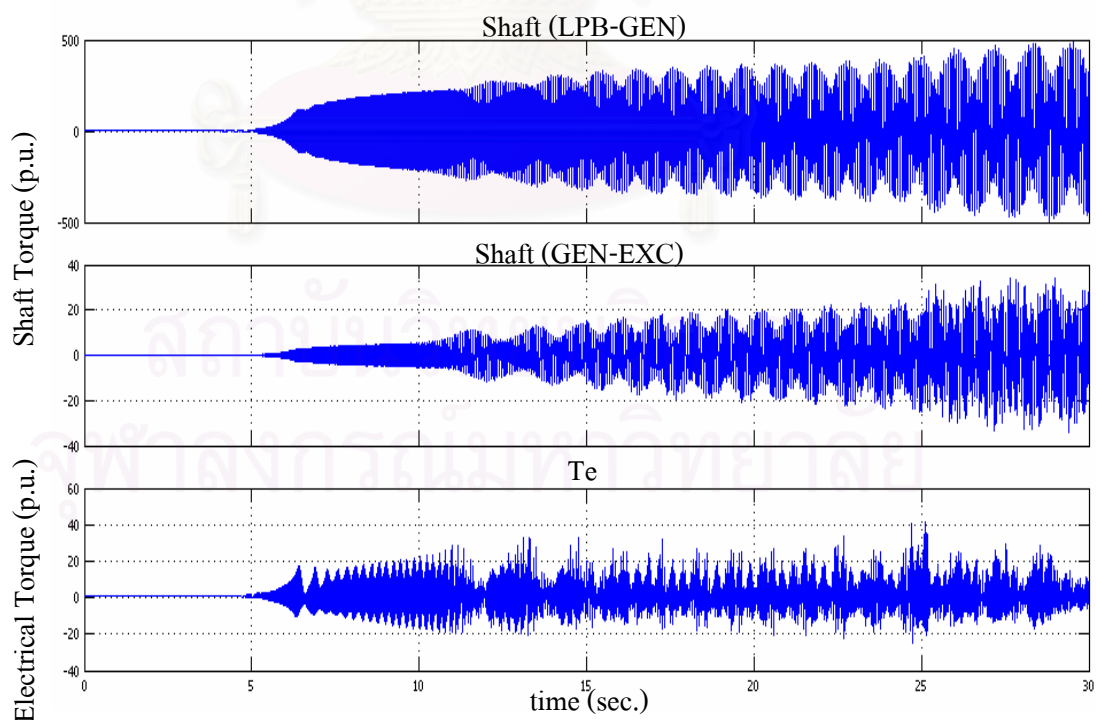
รูปที่ 4.26 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้งตัวเก็บประจุนุกรมจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25%



รูปที่ 4.27 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกึ่งนำแต่ละชุดจากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25%



รูปที่ 4.28 แรงบิดทางกลบนเพลารวมเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25%



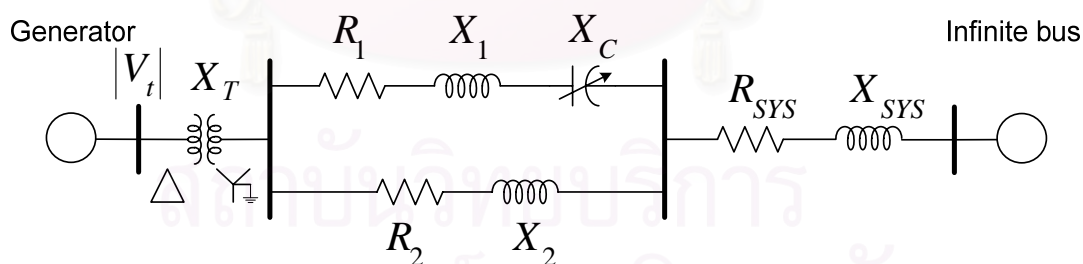
รูปที่ 4.29 แรงบิดทางกลบนเพลารวมเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC  
จากระบบทดสอบ IEEE FBM ที่ระดับการชดเชย 25%



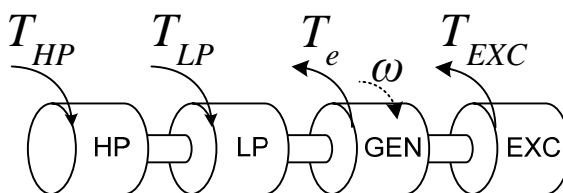
จากการจำลองผลทั้ง 3 กรณี จะเห็นได้ชัดว่ากรณีที่ 1 และ 2 นั้น ปริมาณต่างๆ ที่ทำการวัด หลังการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตั้งแต่รูปที่ 4.12-4.23 สามารถกลับสู่สภาวะปกติ แต่สำหรับกรณีที่ 3 ที่ระดับการชดเชย 25% ดังรูปที่ 4.24-4.29 เป็นระดับการชดเชยที่ทำให้เกิดการสอดคล้องทาง ความถี่กับชุดกังหันในโหมดที่ 4 ผลปรากฏว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพ สังเกตจากมุม โรเตอร์ในรูป ที่ 4.25 ซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากระบบถูกรบกวน และปริมาณต่างๆ ที่ทำการศึกษามี ขนาดของการแกว่งที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยเฉพาะแรงบิดทางกลระหว่างเพลาชื่อมของ ชุดกังหันดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 สิ่งนี้เป็นผลจากการแลกเปลี่ยนพลังงานที่เกิดขึ้น ระหว่างระบบ ไฟฟ้าและระบบทางกลอันเนื่องมาจากการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมดัง ได้กล่าวไว้แล้วในบท ที่ 2 ซึ่งทำให้เกิดการสอดคล้องทางความถี่ขึ้น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปรากฏการณ์ SSR นั่นเอง

**4.4.2 ระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model : SBM [23,24]**

ระบบทดสอบชุดที่ 2 เป็นระบบทดสอบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งต่อกับบัสอ้างอิงอนันต์ แต่โครงสร้างของระบบค่อนข้างซับซ้อนกว่าระบบ IEEE FBM โดยมีสายส่งขนานเข้ามาอีกเส้น ดัง รูปที่ 4.30 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามียกกำลังอยู่ที่ 600 MVA และระบบส่งกำลังไฟฟ้ามียกระดับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่ 500kV สำหรับข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง ตลอดจนชุดกังหัน สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก.2 และเมื่อทำการปรับระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม จาก 0%-90% ของค่ารีแอคแตนซ์สายส่งที่ตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยมีจุดทำงานที่ภาวะอยู่ตัว ที่  $P_g = 0.9 pu$ ,  $PF = 0.9(lag)$  และ  $|V_t| = 1.0 pu$  เพื่อศึกษาว่าโอกาสเกิดการสอดคล้องทาง ความถี่ที่ระดับการชดเชยค่าใดบ้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ

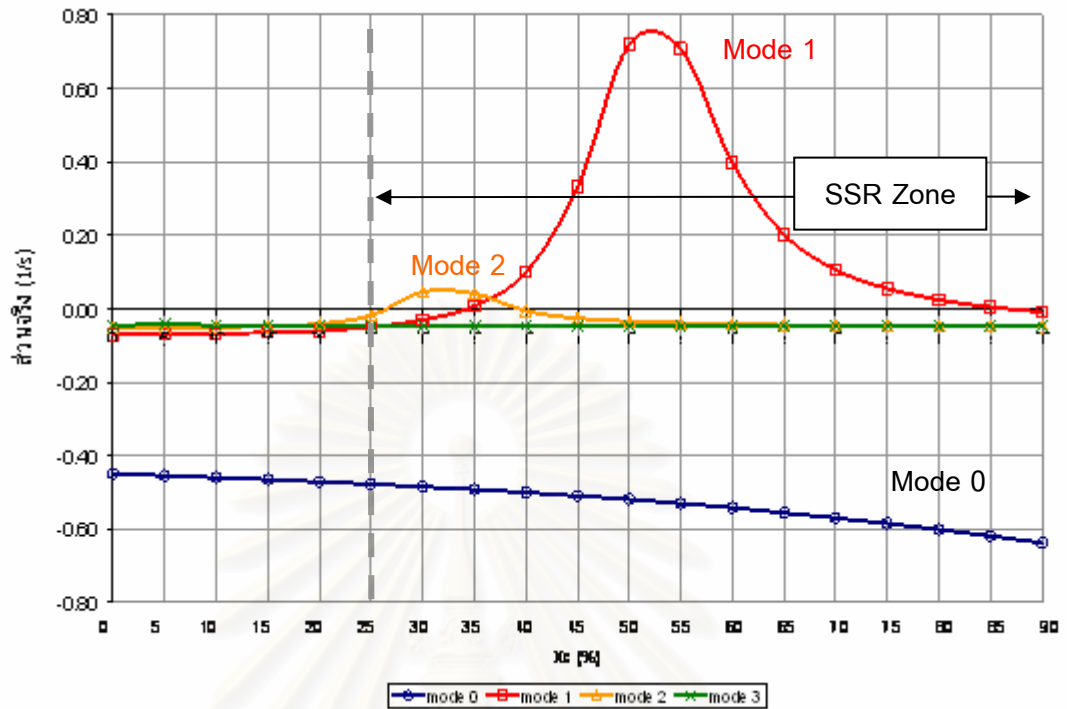


(ก) แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ IEEE SBM

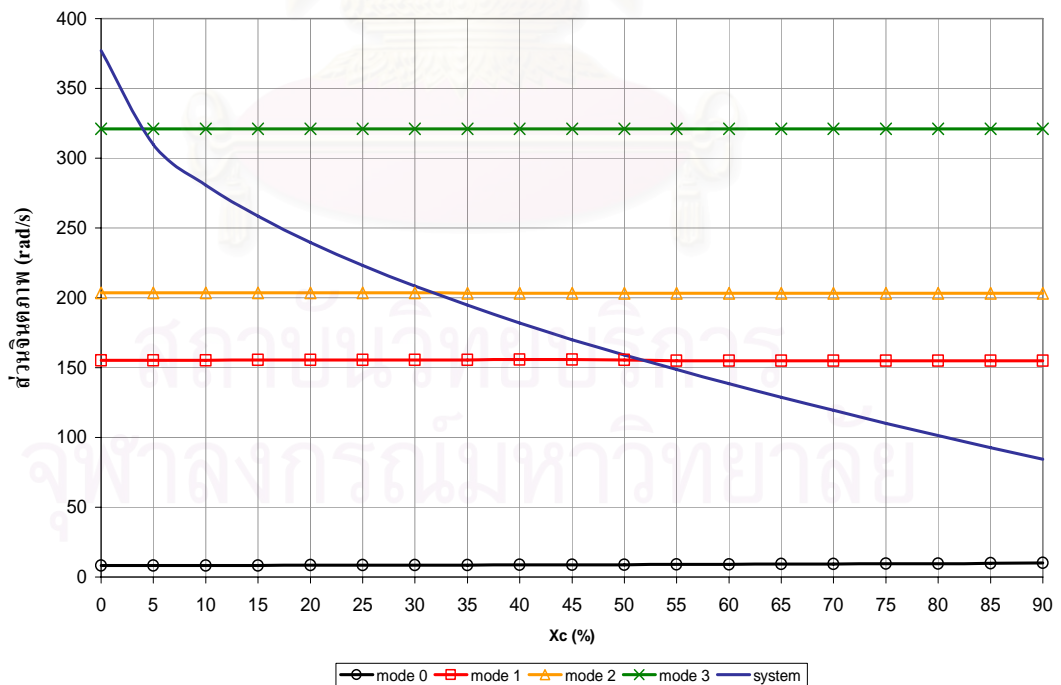


(ข) โครงสร้างชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE SBM

รูปที่ 4.30 ระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model [23]



รูปที่ 4.31 ส่วนจริงของค่าเฉพาะจากระบบทดสอบ IEEE SBM  
ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ

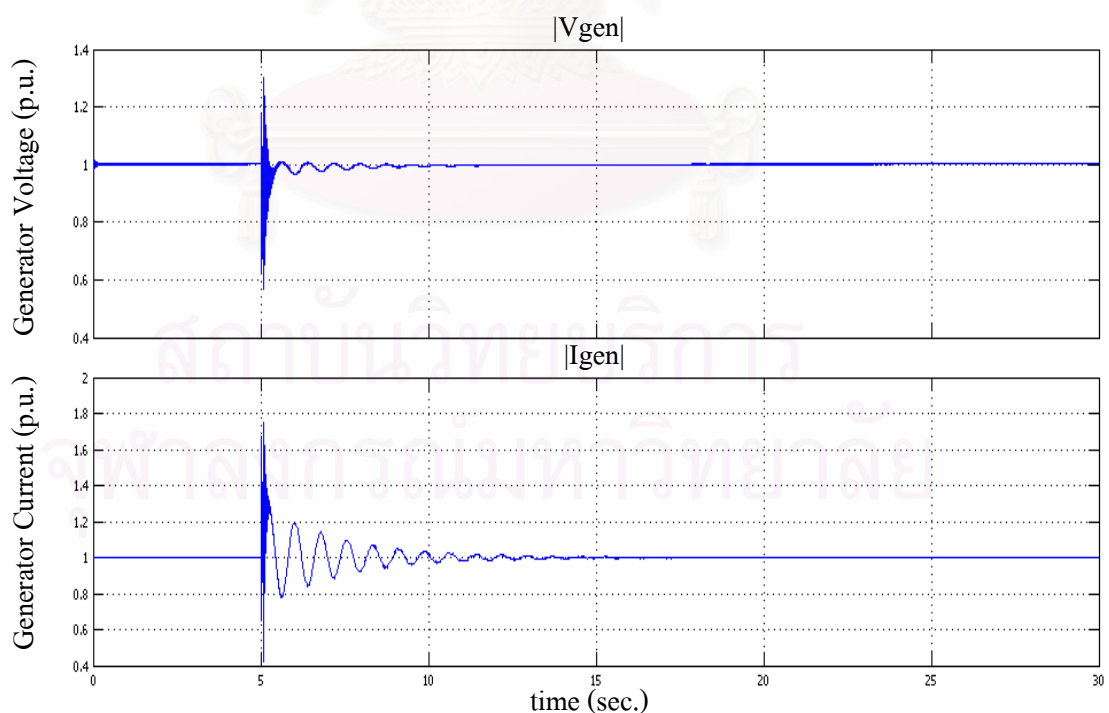


รูปที่ 4.32 ส่วนจริงของค่าเฉพาะจากระบบทดสอบ IEEE SBM  
ที่ระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 จะเห็นว่าปรากฏการณ์การเกิด SSR มีความสัมพันธ์กันเช่นเดียวกับระบบทดสอบ IEEE FBM แต่มีจำนวนโหมคความถี่ธรรมชาติของชุดกังหันน้อยกว่าเนื่องจากมีจำนวนชุดกังหันเพียง 4 ชุด และเกิดการสอดคล้องทางความถี่เพียง 2 จุด ทั้งนี้เนื่องจากค่าการหน่วงของชุดกังหันทำให้โหมคที่ 3 ไม่ได้รับผลกระทบจากตัวเก็บประจุอนุกรม โดยโหมคที่ 1 มีระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ SSR สูงสุด ตามมาด้วย โหมคที่ 2 ที่ระดับการชดเชย 55% และ 30% ตามลำดับ

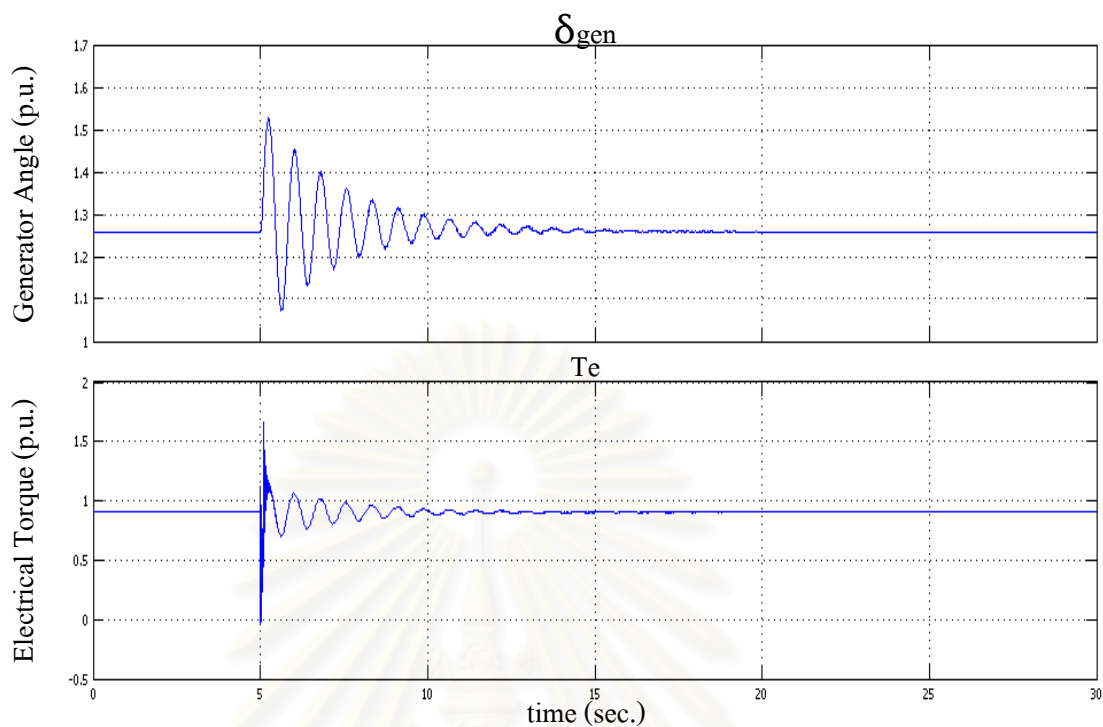
ลำดับต่อไปจะทดลองจำลองเหตุการณ์ผิดปกติภายในระบบอันเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลงชั่วขณะ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลง 50 % ณ เวลา 5 วินาที เป็นเวลา 0.075 วินาที หลังจากนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจึงกลับมาเป็นปกติ เพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อการสอดคล้องทางความถี่อันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุอนุกรม ในที่นี้จะแสดงผลที่กรณีฐาน คือ ระดับการชดเชยเป็น 0% ที่ระดับการชดเชย 10% ซึ่งเป็นจุดที่ไม่เกิด SSR และกรณีสุดท้ายเมื่อเกิด SSR ที่ระดับการชดเชย 30% ผลจากการจำลองเชิงพลวัตแสดงไว้ดังรูปที่ 4.33 ถึง 4.37 ตามลำดับ

#### กรณีที่ 1 ที่ระดับการชดเชย 0 % (กรณีฐาน)

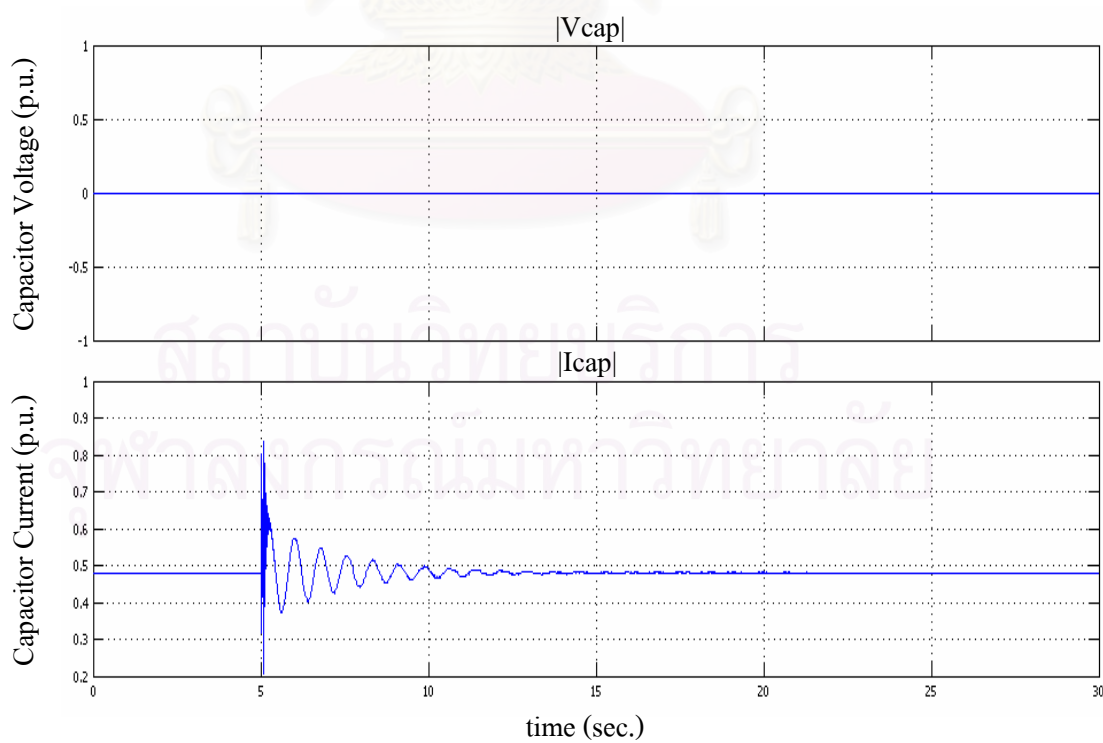


รูปที่ 4.33 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

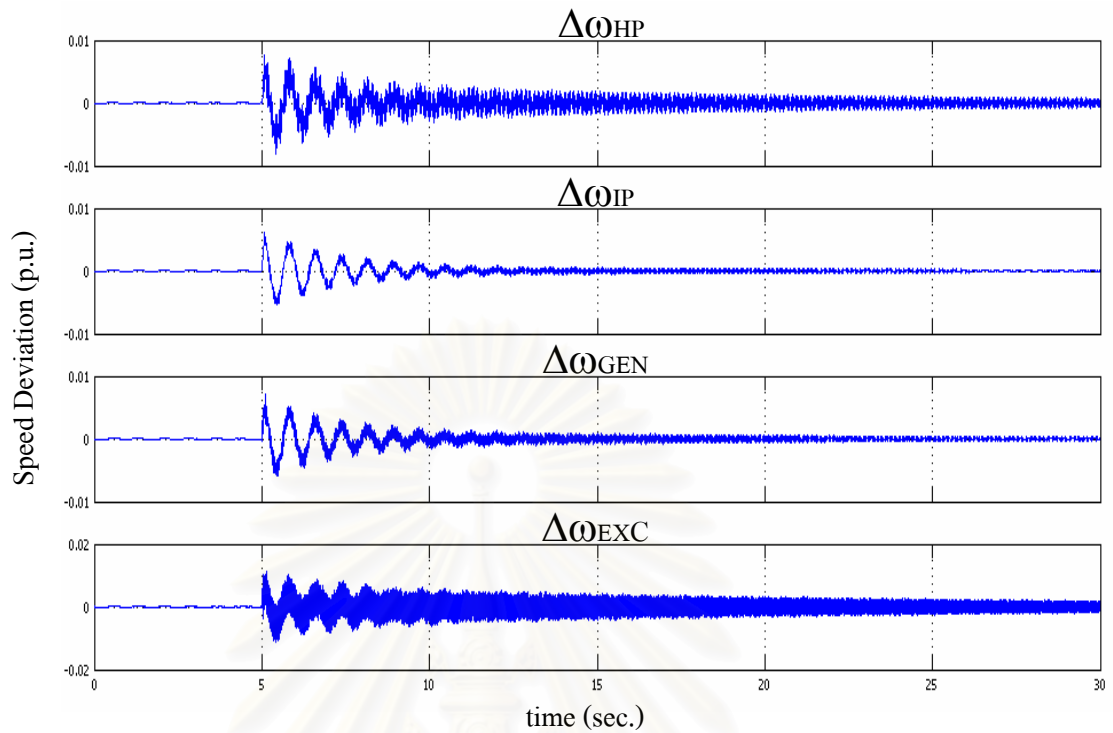
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0%



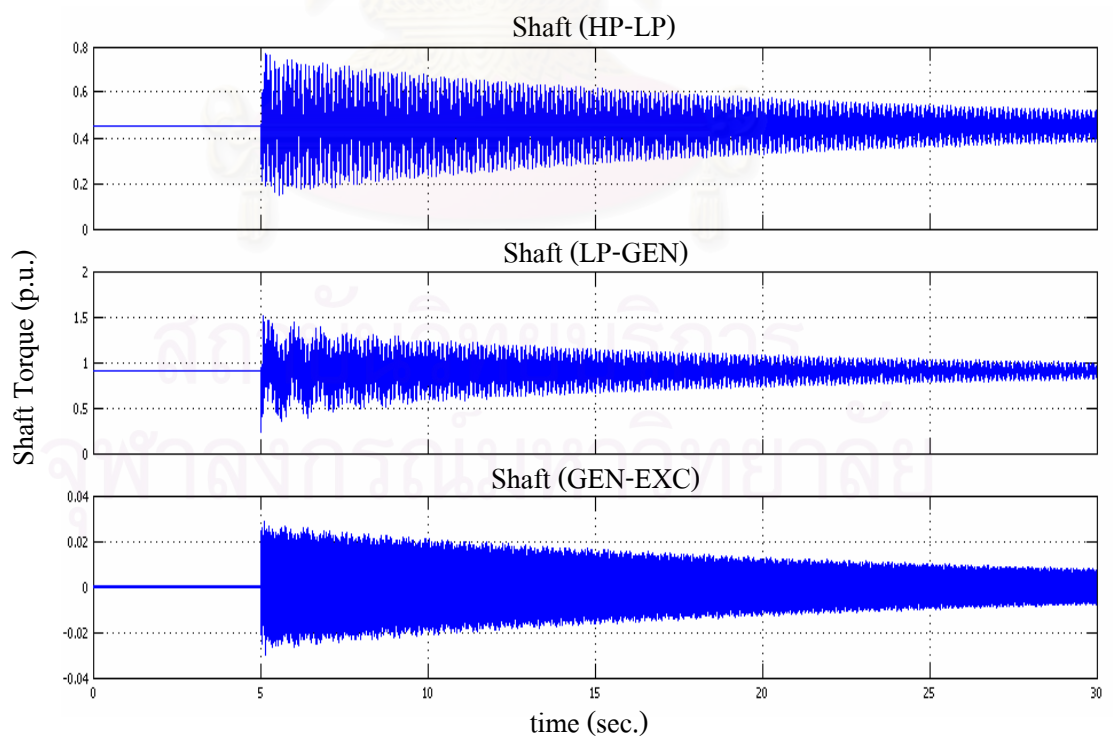
รูปที่ 4.34 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0%



รูปที่ 4.35 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง  
ตัวเก็บประจุนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0%

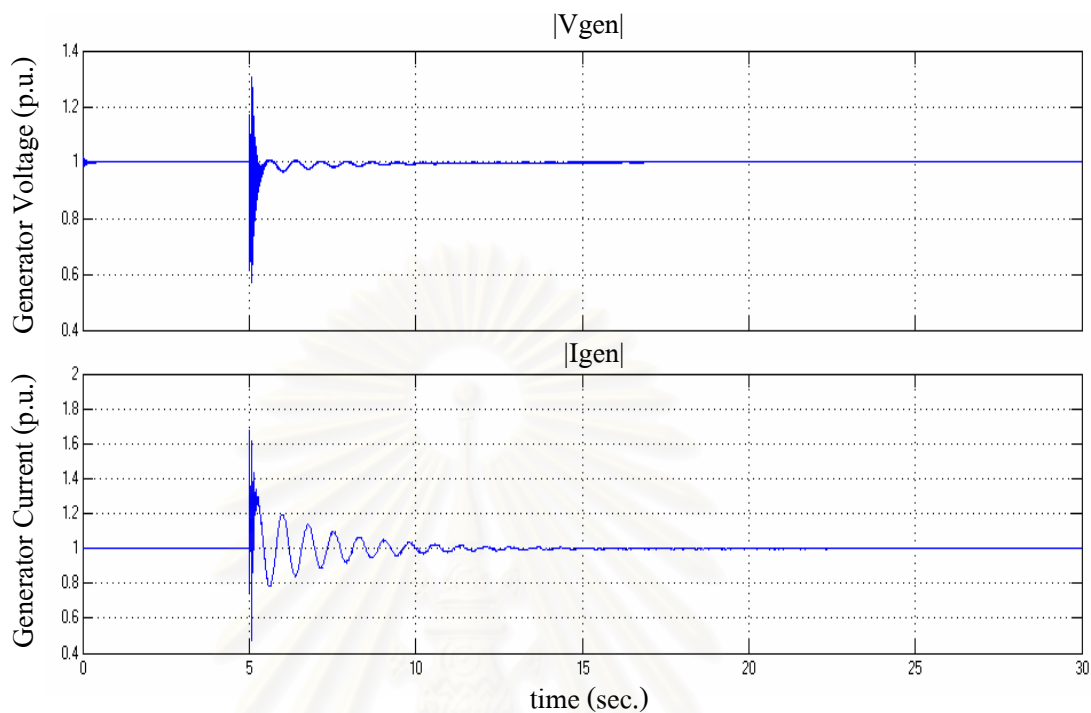


รูปที่ 4.36 ค่าความเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0%

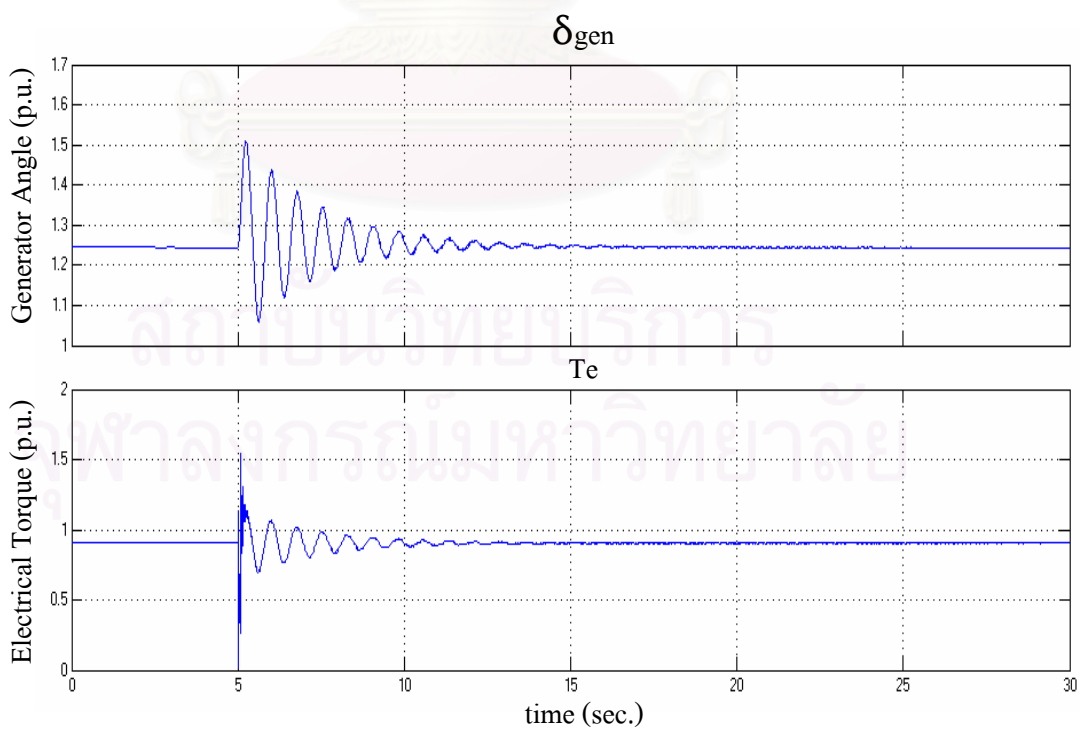


รูปที่ 4.37 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมต่อโยระหว่างชุดกังหัน HP ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 0%

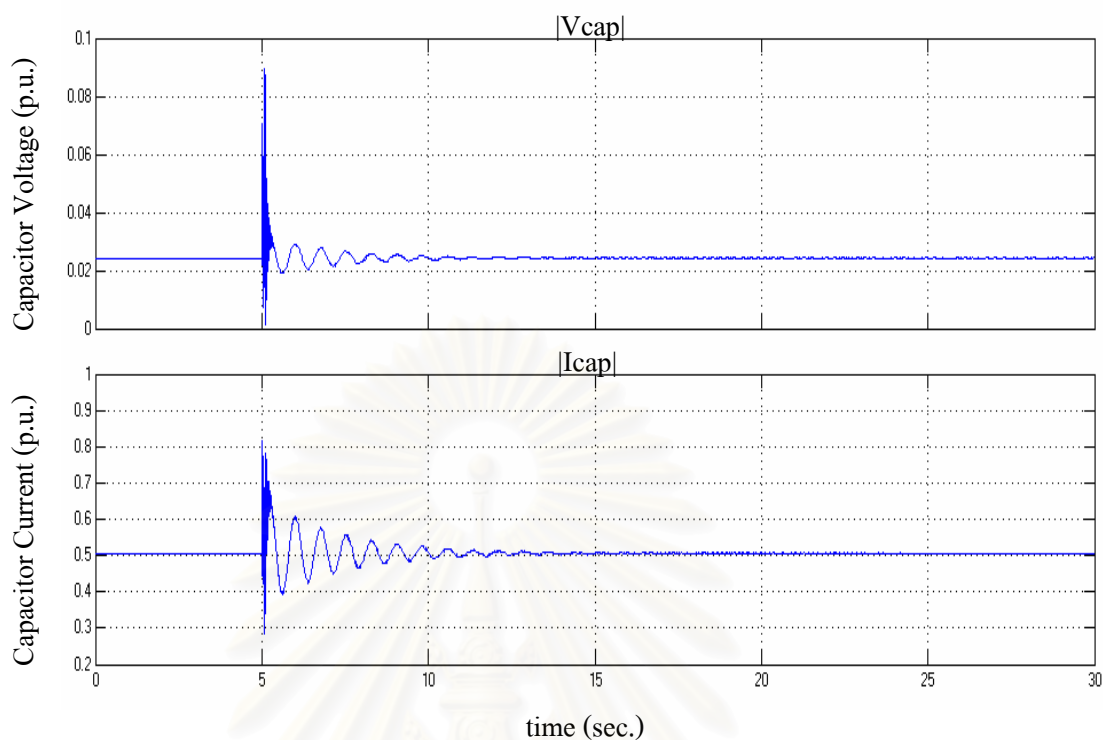
กรณี 2 ที่ระดับการชดเชย 10%



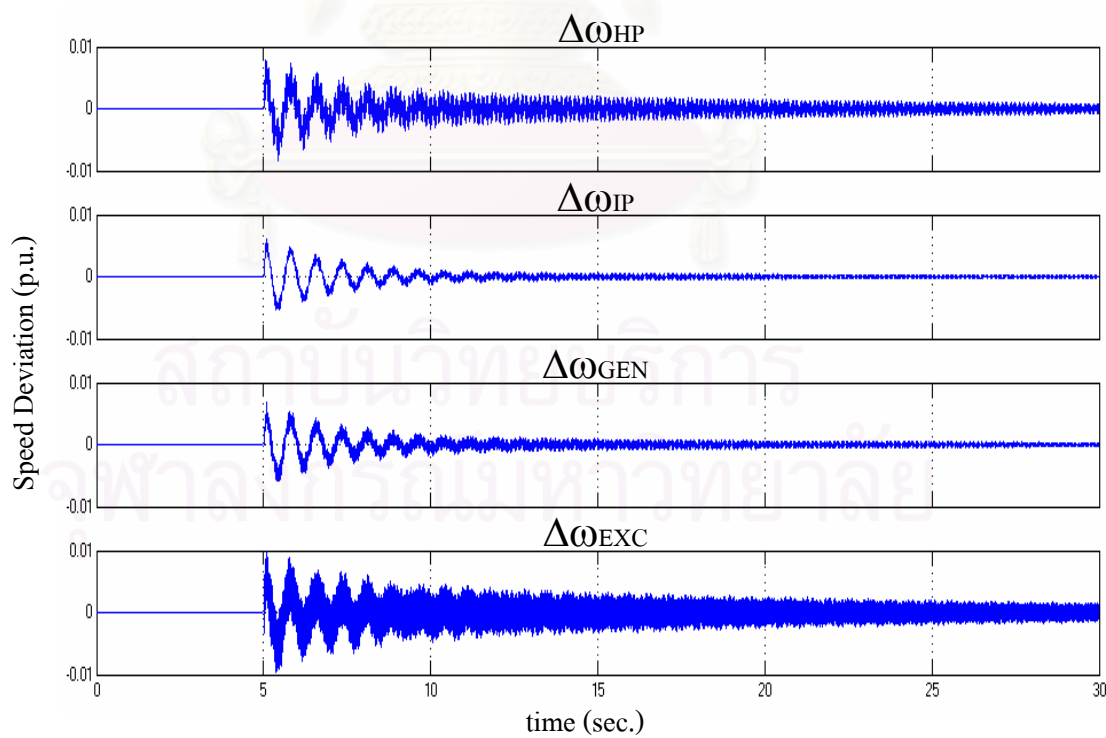
รูปที่ 4.38 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10%



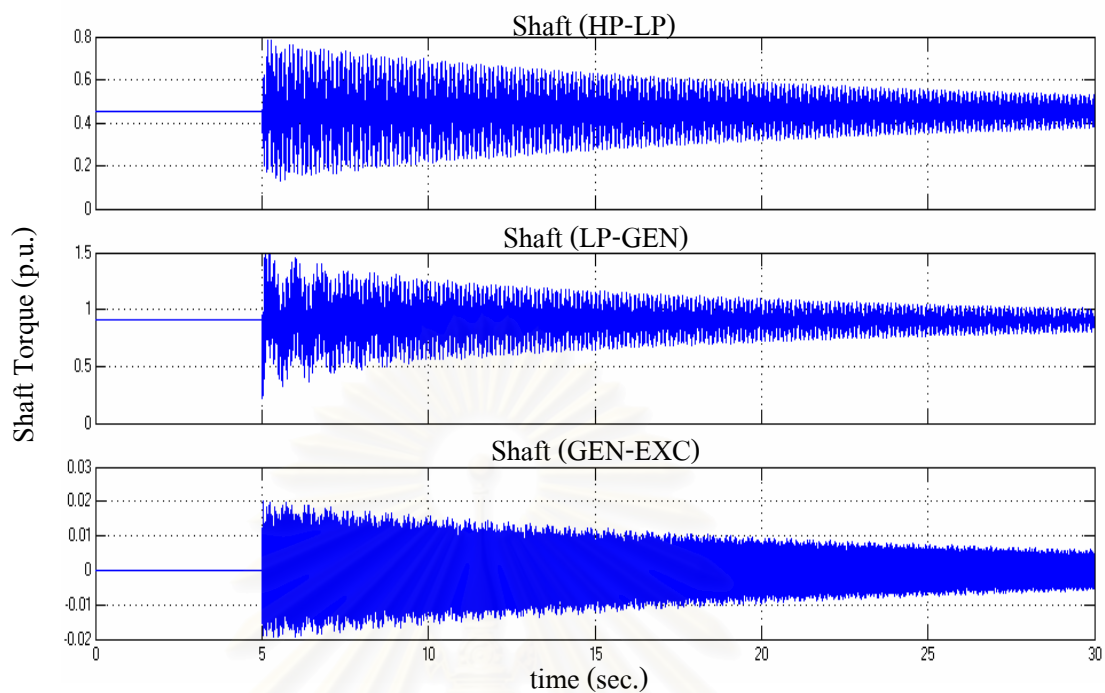
รูปที่ 4.39 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10%



รูปที่ 4.40 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10%

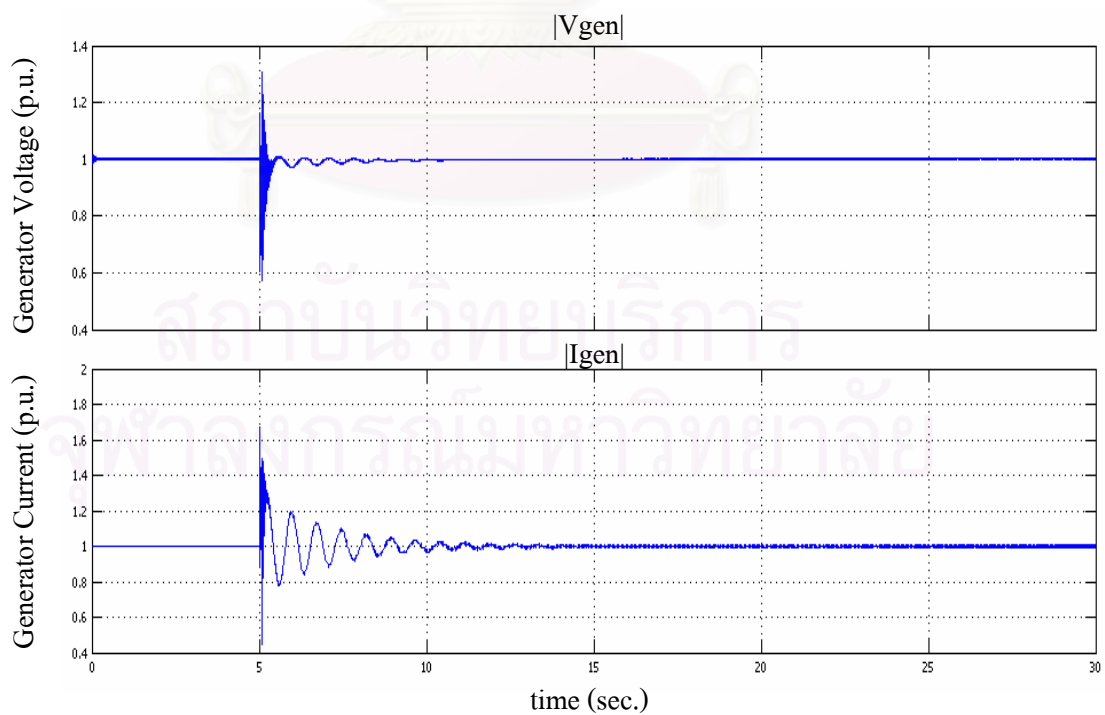


รูปที่ 4.41 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10%



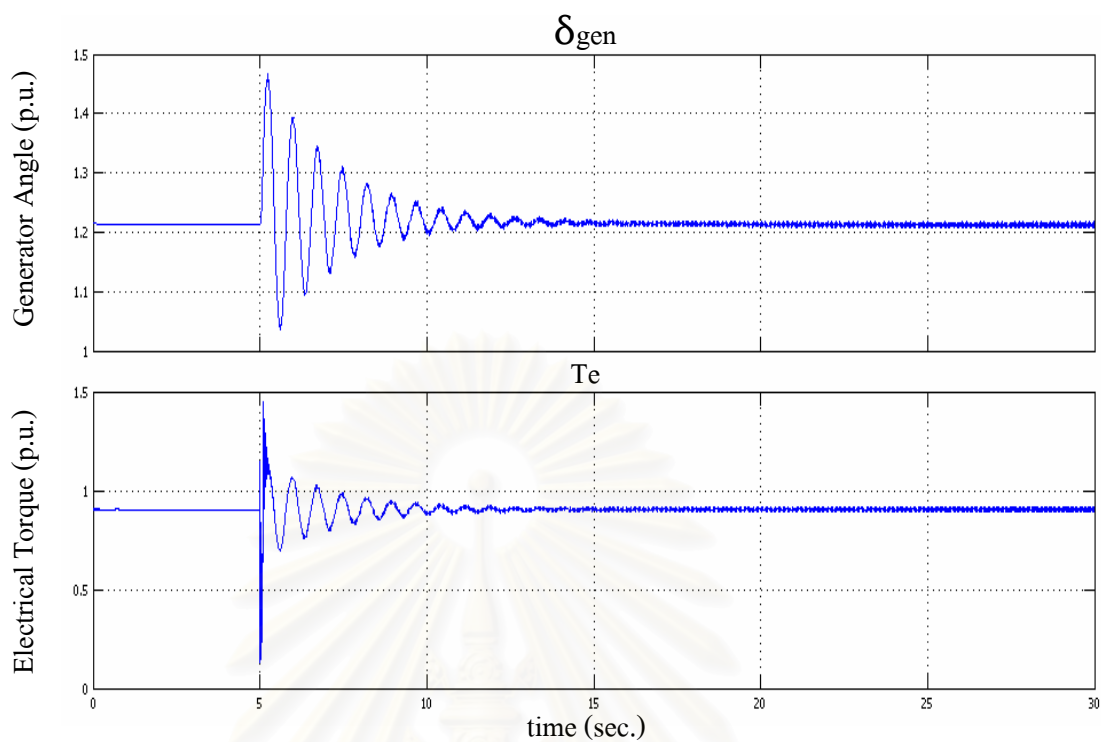
รูปที่ 4.42 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง EXC  
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 10%

กรณีที่ 3 ที่ระดับการชดเชย 30%

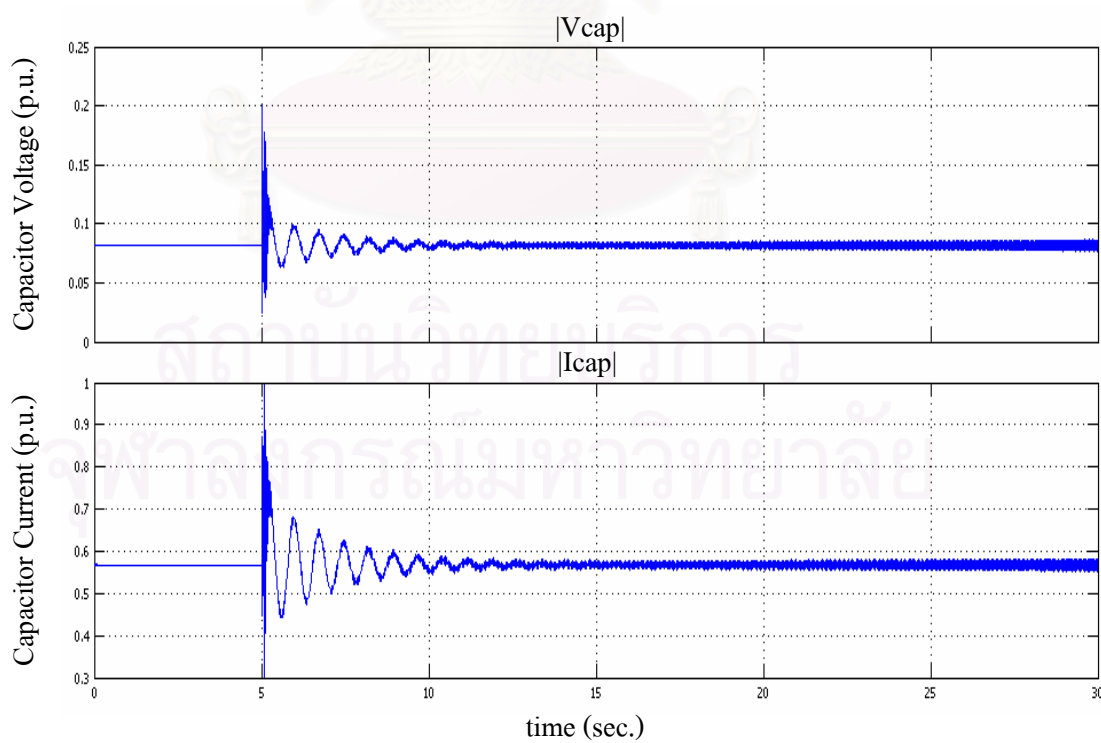


รูปที่ 4.43 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30%

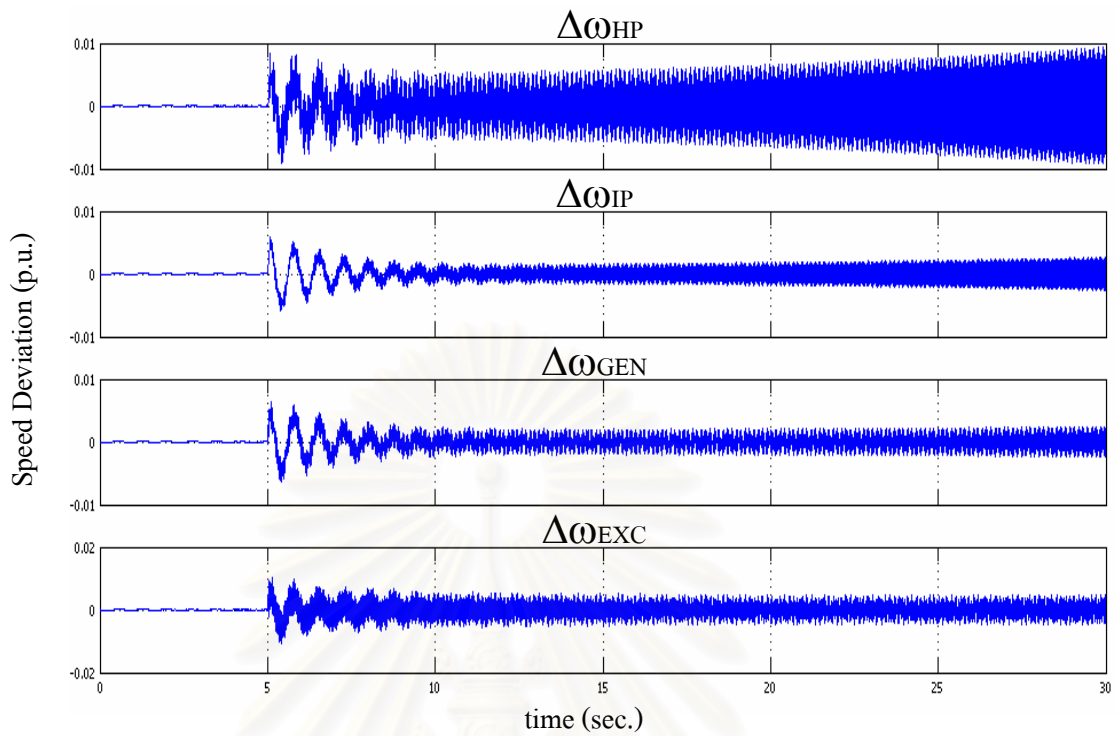




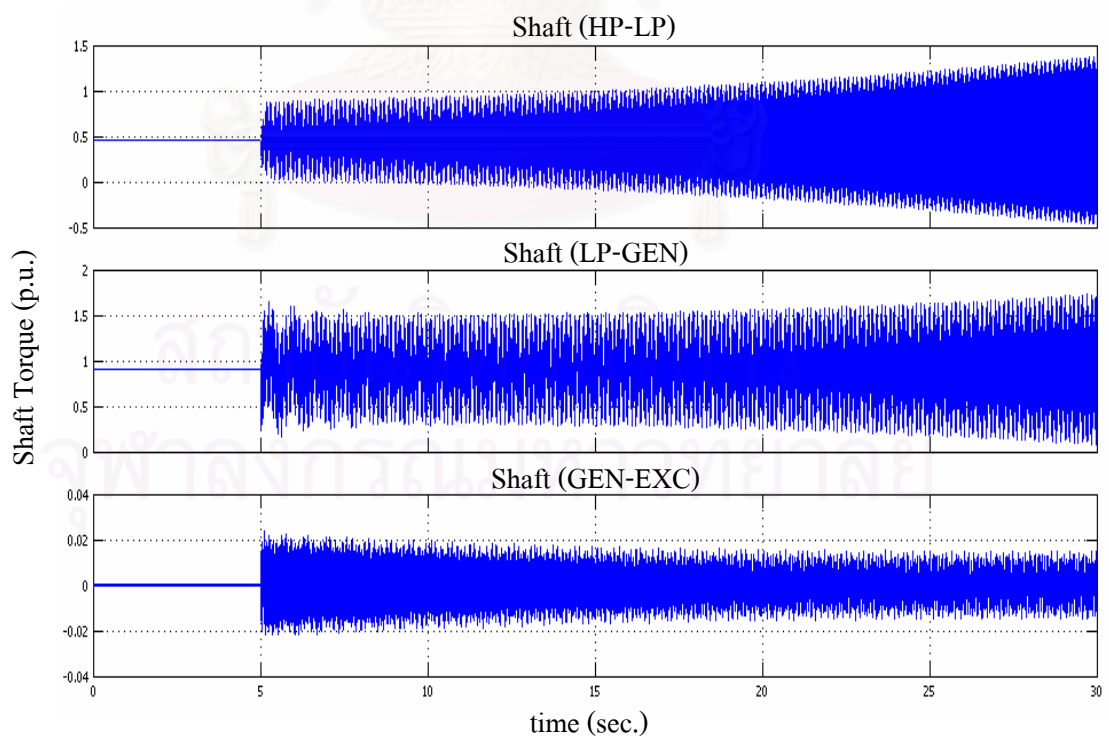
รูปที่ 4.44 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30%



รูปที่ 4.45 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง  
ตัวเก็บประจุนุกรม จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30%



รูปที่ 4.46 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุด จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30%



รูปที่ 4.47 แรงบิดทางกลบนเพลาร่วมโยระหว่างชุดกังหัน HP ถึง EXC จากระบบทดสอบ IEEE SBM ที่ระดับการชดเชย 30%

ผลจากการจำลองทั้ง 3 กรณี เห็นได้ชัดว่ากรณีที่ 1 และ 2 นั้น ปริมาณต่างๆ ที่ทำการวัด หลังการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตั้งแต่รูปที่ 4.33 ถึง 4.42 สามารถกลับสู่สภาวะปกติได้ แต่สำหรับกรณีที่สุดท้ายที่ระดับการชดเชย 30% หากมองเฉพาะปริมาณทางไฟฟ้าในช่วงเวลาไม่ยาวมาก อาจสรุปว่าระบบกลับสู่สภาวะปกติได้ แต่เมื่อพิจารณาผลในช่วงเวลาที่ยาวขึ้น ผลปรากฏว่าปริมาณเหล่านั้นมีอัตราขยายที่แกว่งมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นระดับการชดเชยที่ทำให้เกิดการสอดคล้องทางความถี่กับชุดกังหันในโหมดที่ 2 โดยเฉพาะปริมาณแรงบิดทางกลระหว่างเพลลาเชื่อมของชุดกังหันในรูปที่ 4.46 และ 4.47 สามารถสังเกตเห็นได้ชัดกว่าปริมาณอื่น ซึ่งบอกได้ว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพ หลังจากถูกรบกวน ซึ่งเป็นผลจาก SSR สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าเจาะจงในรูปที่ 4.31 และ 4.32

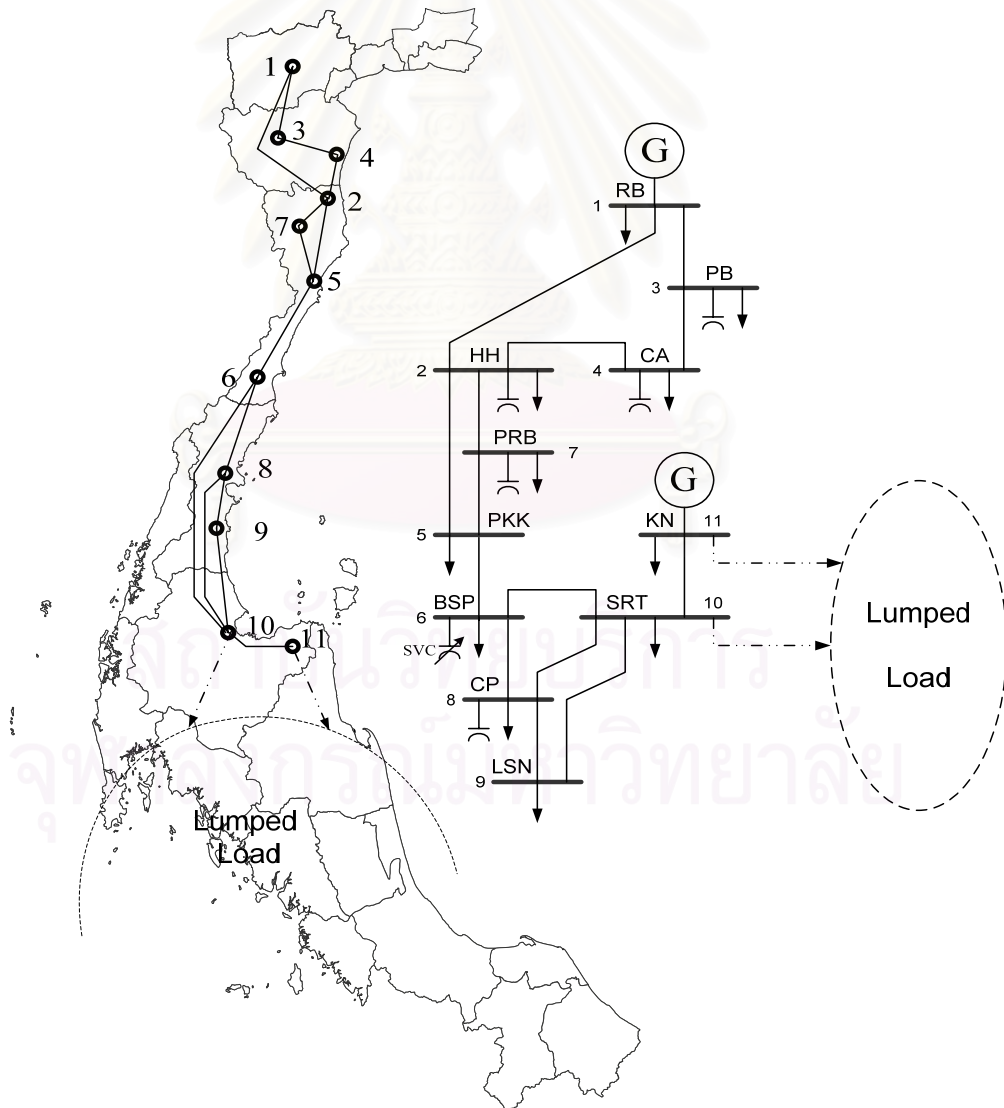
#### 4.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการเปรียบเทียบค่าเจาะจงและการจำลองพฤติกรรมที่สภาวะชั่วขณะ พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง และทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ ระบบไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของความถี่ใกล้เคียงกับโหมดความถี่ทางกลของชุดกังหัน จะกระตุ้นให้เกิดการสั่นของเพลลาเชื่อม โยงชุดกังหันได้ และเมื่อระบบถูกรบกวนเพียงระยะเวลาสั้นๆ ขนาดแรงบิดดังกล่าวจะเพิ่มขนาดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้นจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อเพลลาเชื่อม โยงชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้น จากผลที่ได้จึงเห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์ SSR กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนต่อไปได้

## บทที่ 5

### การศึกษาผลของการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมแบบคงที่เมื่อติดตั้งกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทย

ระบบทดสอบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นระบบเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย [25] ต่อไปนี้จะเรียกว่าระบบไฟฟ้ากำลังภาคใต้ ซึ่งในการศึกษาจะเลือกพื้นที่ตั้งแต่โรงไฟฟ้าราชบุรี (บัสที่ 1) ลงมาถึงโรงไฟฟ้าขนอม (บัสที่ 11) ดังรูปที่ 5.1 ที่แสดงถึงแผนภาพเส้นเดียวของระบบภาคใต้ มีข้อมูลของระบบ คือ บัสเชื่อมต่อจำนวน 11 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 1 ตัว สายส่งจำนวน 14 เส้น โดยมีรายละเอียดของโหลดตลอดจนพารามิเตอร์ของสายส่ง และการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในภาคผนวก ข.



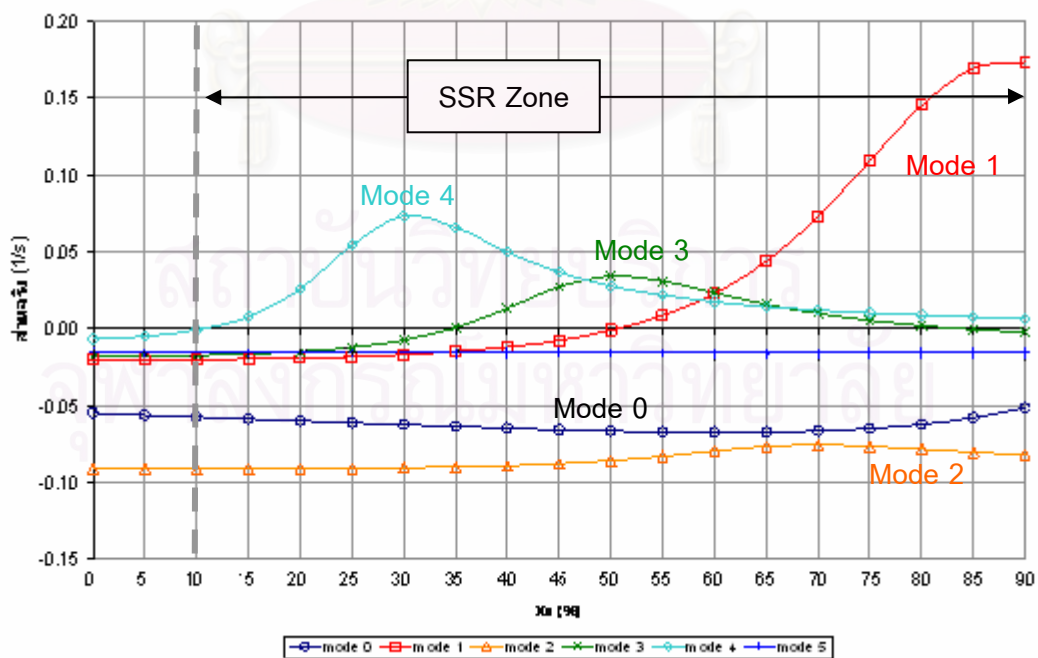
รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ [25]

### 5.1 การวิเคราะห์ค่าเงาของระบบภาคใต้

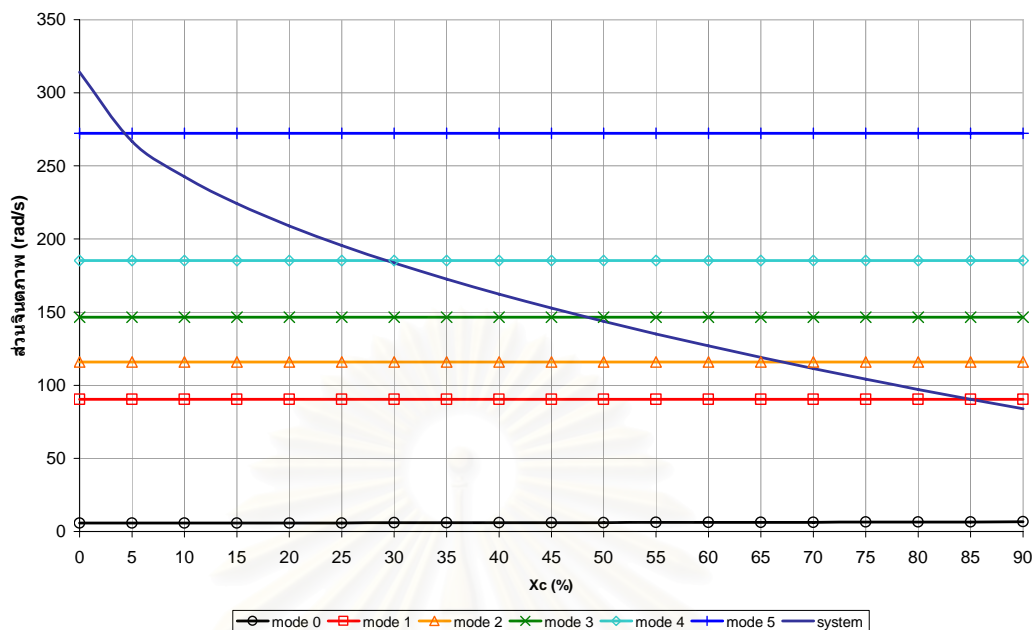
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในเอกสาร [1] พบว่าเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่เชื่อมโยงระหว่างบัสไฟฟ้าบางสะพาน (บัสที่ 6) กับบัสไฟฟ้าสุราษฎร์ธานี (บัสที่ 10) ซึ่งเป็นสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดของระบบที่ทำการศึกษา สามารถเพิ่มการส่งกำลังไฟฟ้าจากภาคกลางลงภาคใต้ได้สูงสุดถึง 110 MW ดังนั้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดจุดติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นดังกล่าว เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ SSR ขึ้น

หลังจากสร้างแบบจำลองและทดสอบความถูกต้องในบทที่ 4 แล้ว ต่อไปจะทำการศึกษากับระบบภาคใต้โดยการปรับระดับการชดเชยจาก 0%-90% ของสายส่งเส้นที่เชื่อมโยงระหว่างบัสไฟฟ้าบางสะพานกับบัสไฟฟ้าสุราษฎร์ธานี แล้ววิเคราะห์ผลของค่าเงาเพื่อหาจุดที่ตัวเก็บประจุอนุกรมอาจทำให้เกิดการสอดคล้องทางความถี่ขึ้น ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์โดยแยกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพเทียบกับระดับการชดเชยดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

ผลจากการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับระบบที่ใช้ศึกษานี้ ด้วยการวิเคราะห์ผลของค่าเงาปรากฏว่า สามารถเพิ่มระดับการชดเชยได้ไม่เกิน 10% เนื่องจากตัวเก็บประจุอนุกรมที่ใส่เข้าไปก่อให้เกิดการสอดคล้องทางความถี่กับความถี่ธรรมชาติของชุดกังหันด้วยกันถึง 3 โหมด ได้แก่ โหมดที่ 1, 3 และ 4 ที่ระดับการชดเชย 30%, 50% และ 90% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าจะมีเพียง 3 จุดที่เกิดความถี่สอดคล้อง แต่เมื่อพิจารณาถึงส่วนจริงที่เป็นบวกของค่าเงาจะพบว่า แต่ละโหมคมีช่วงที่เป็นบวกค่อนข้างกว้าง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด SSR จึงทำให้เพิ่มระดับการชดเชยได้ไม่เกิน 10%



รูปที่ 5.2 ส่วนจริงของค่าเงาจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจาก 0%-90% ของรีแอกแตนซ์สายส่งบางสะพาน-สุราษฎร์ธานี

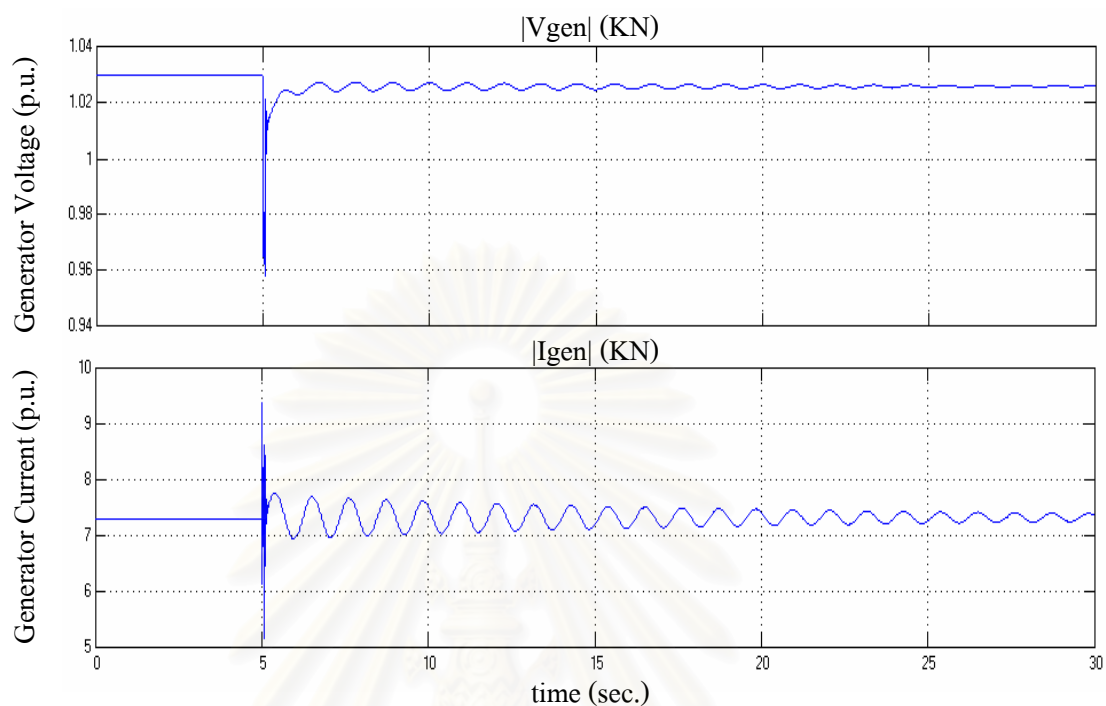


รูปที่ 5.3 ส่วนจินตภาพของค่าเจาะจงจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจาก 0%-90% ของรีแอคแตนซ์สายส่งบางสะพาน-สุราษฎร์ธานี

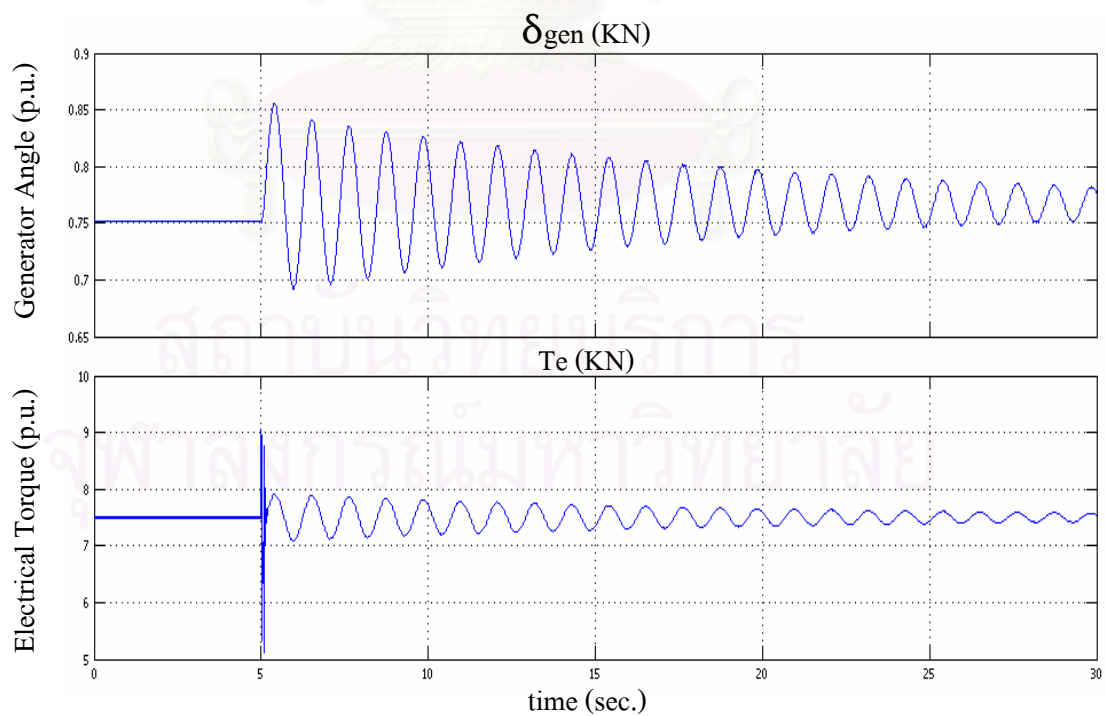
## 5.2 การจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบภาคใต้

การวิเคราะห์ผลในด้านการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบมีความสำคัญอย่างมาก เพราะสามารถเห็นพฤติกรรมของระบบได้อย่างชัดเจนทั้งที่สภาวะอยู่ตัว ขณะเกิดการรบกวนขึ้นภายในระบบและหลังจากการรบกวนถูกกำจัดออกไป จึงช่วยให้การวิเคราะห์ผลเป็นไปอย่างถูกต้อง หลังจากทำการวิเคราะห์ค่าเจาะจงซึ่งสามารถหาจุดที่ตัวเก็บประจุอนุกรมก่อให้เกิดปัญหา SSR ลำดับต่อไปจะจำลองเหตุการณ์ผิดปกติภายในระบบอันเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงอันดับตกลด 50% ที่เวลา 5 วินาที เป็นเวลา 0.075 วินาที หลังจากนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงอันดับจึงกลับมาเป็นปกติ เพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อการสอดคล้องทางความถี่อันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุอนุกรม ในที่นี้จะแสดงผลที่กรณีฐานคือระดับการชดเชยเป็น 0% และที่ระดับการชดเชย 10% ซึ่งเป็นจุดที่ไม่เกิด SSR และกรณีที่เกิด SSR ที่ระดับการชดเชย 30% และ 50%

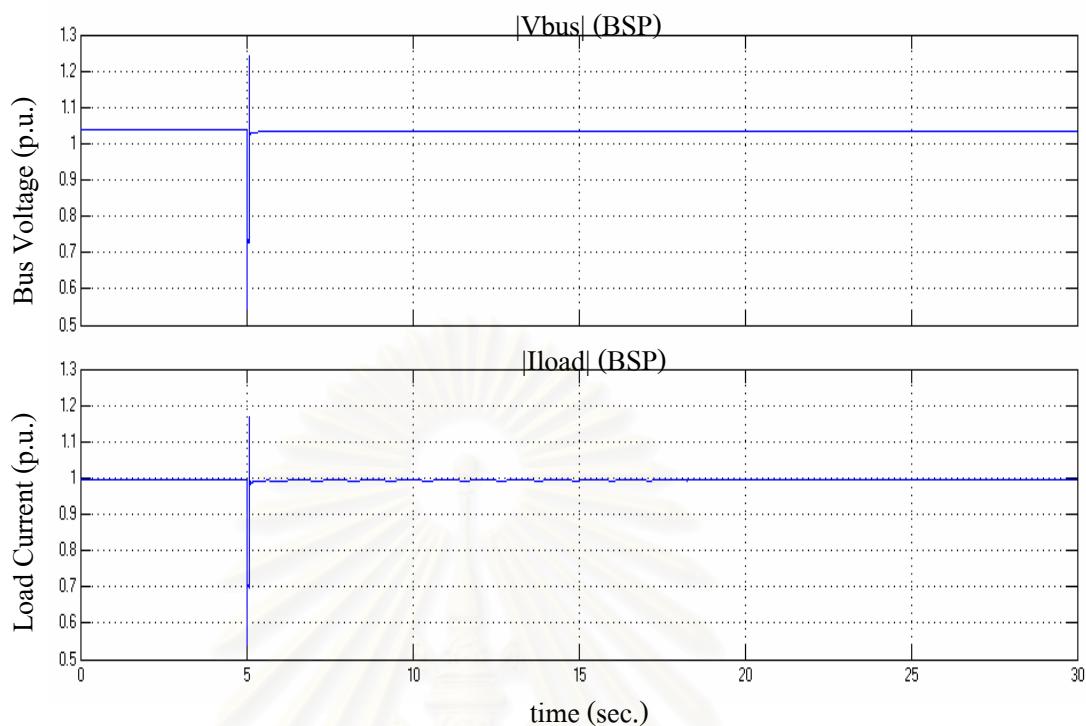
กรณี 1 ที่ระดับการชดเชย 0 % (กรณีฐาน)



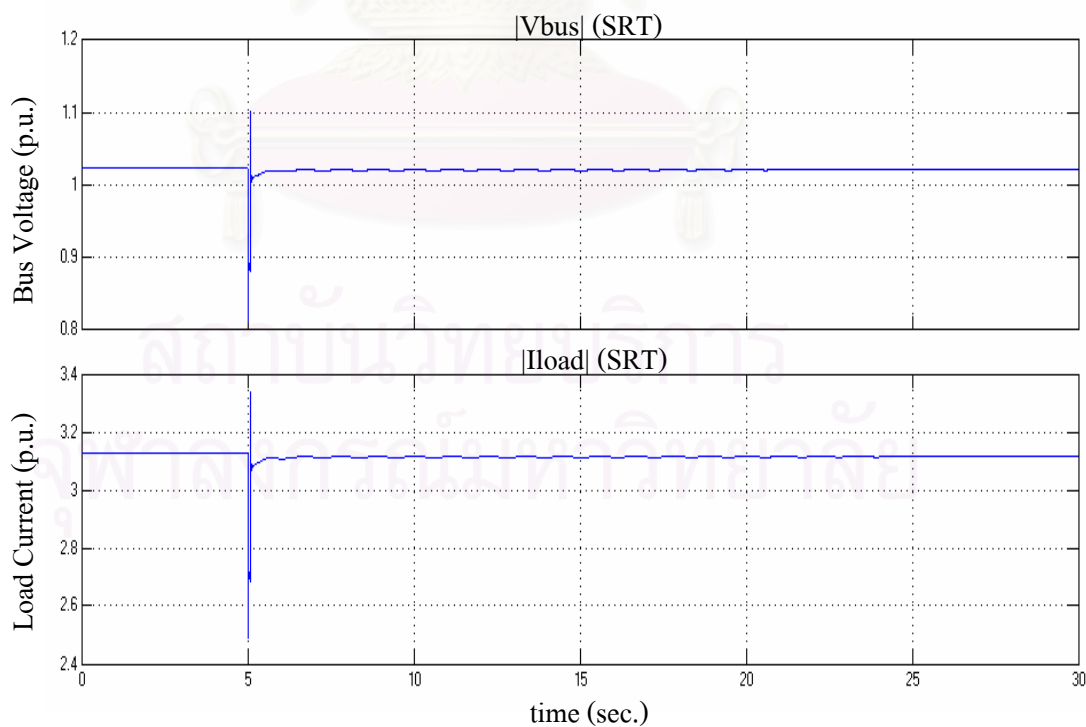
รูปที่ 5.4 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 0%



รูปที่ 5.5 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 0%

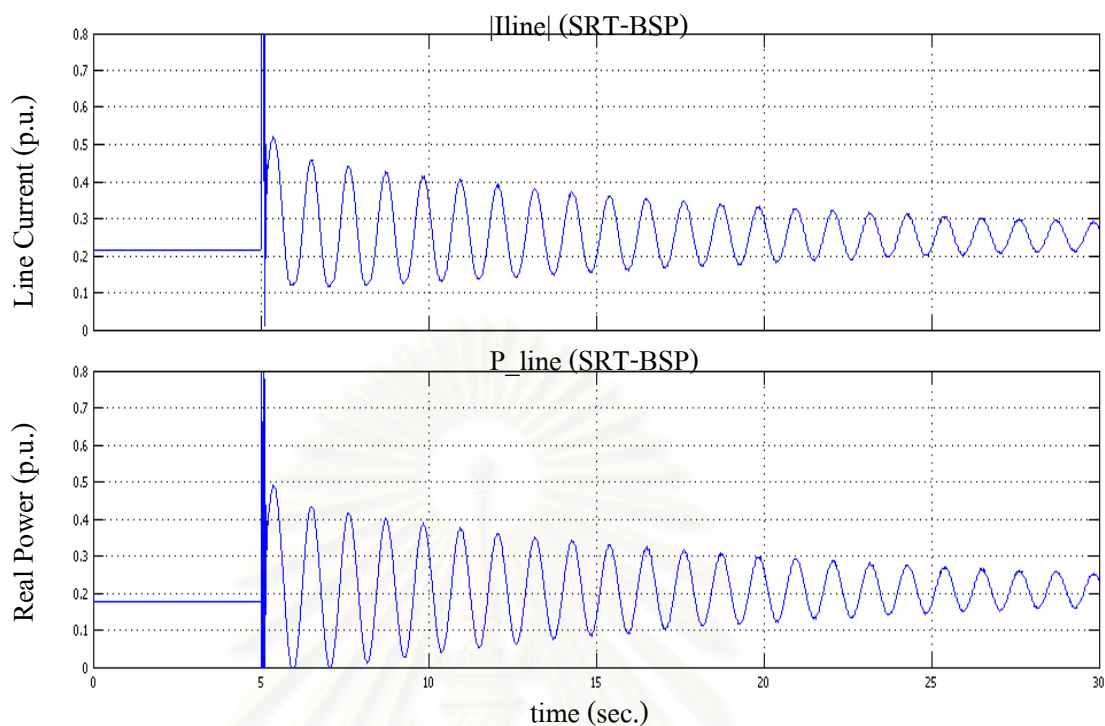


รูปที่ 5.6 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 0%

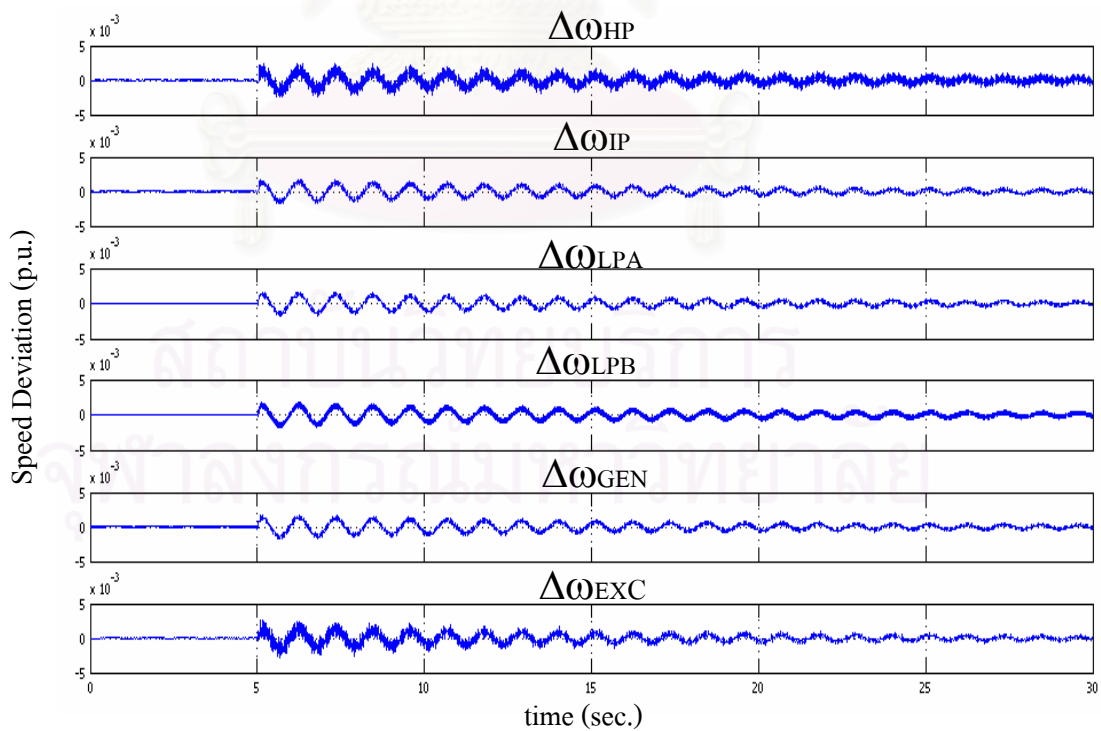


รูปที่ 5.7 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 0%

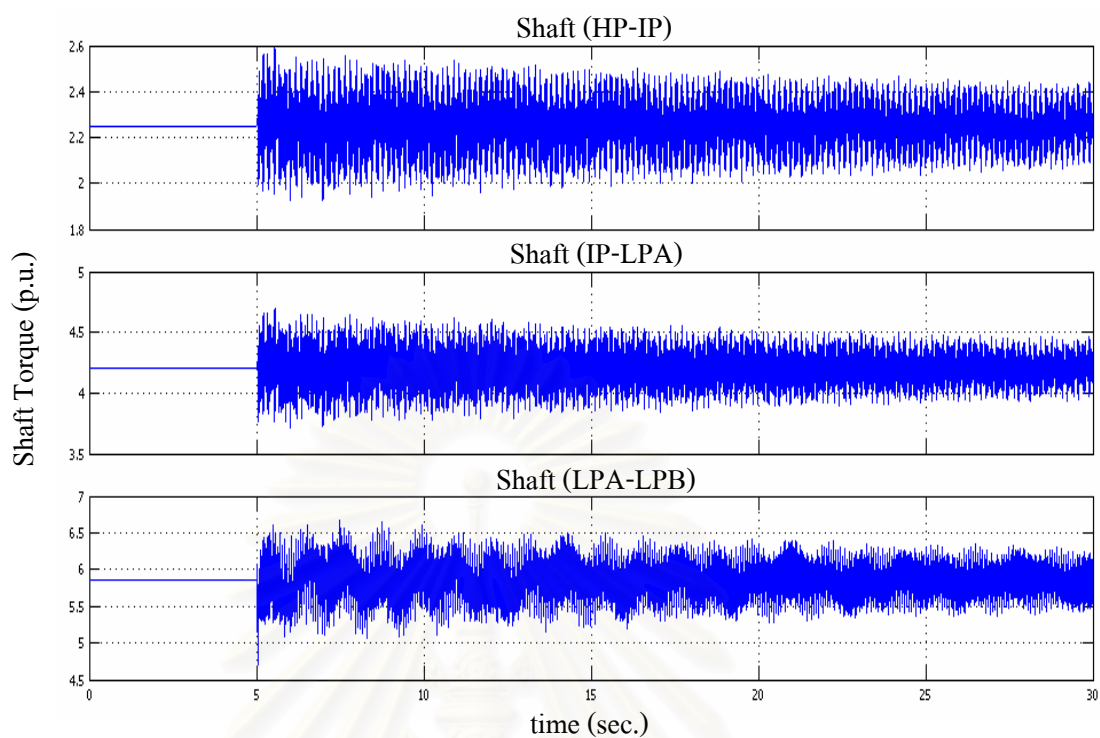




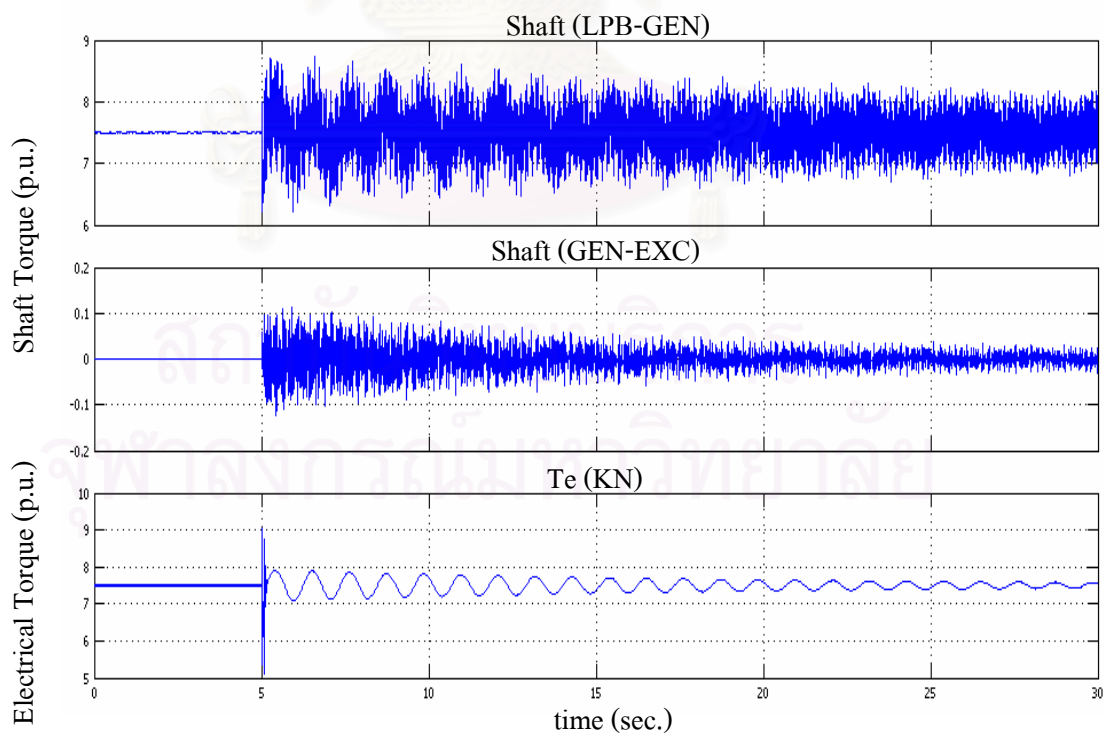
รูปที่ 5.8 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพานที่ระดับการชดเชย 0%



รูปที่ 5.9 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0%

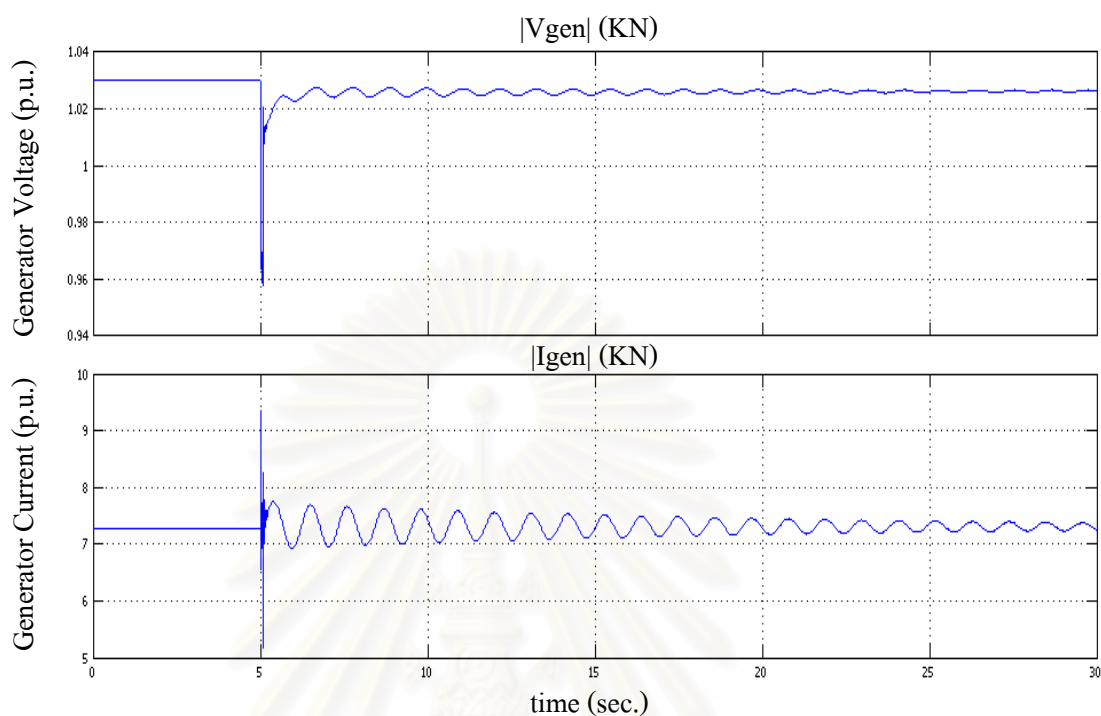


รูปที่ 5.10 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0%

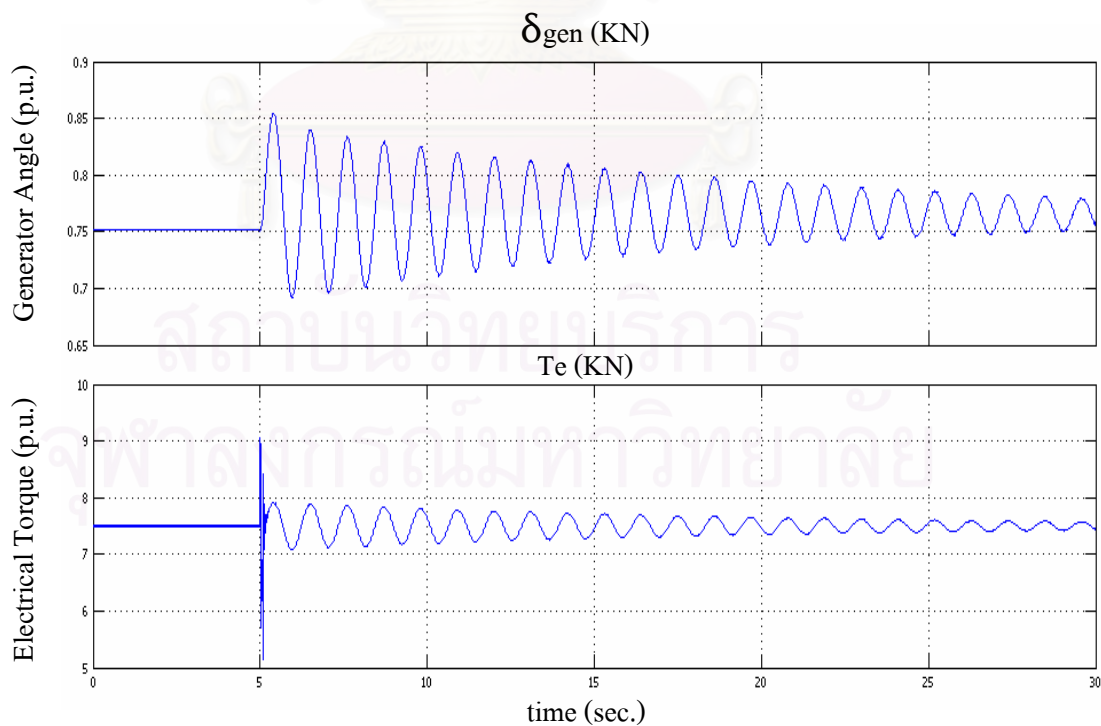


รูปที่ 5.11 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 0%

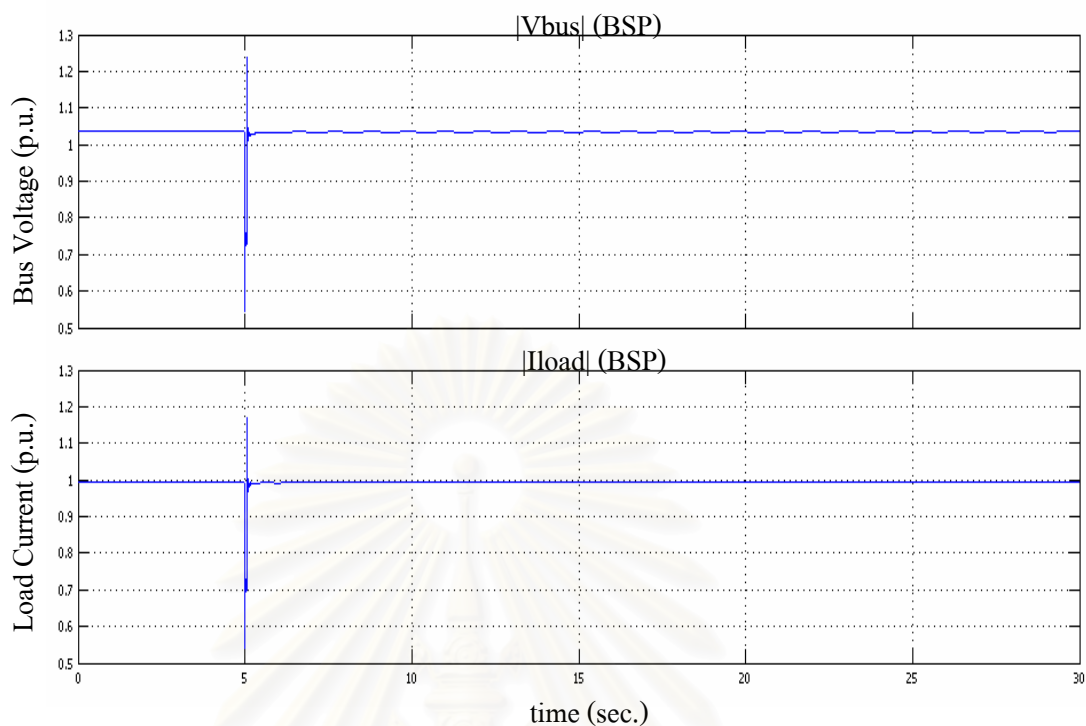
กรณี 2 ที่ระดับการชดเชย 10%



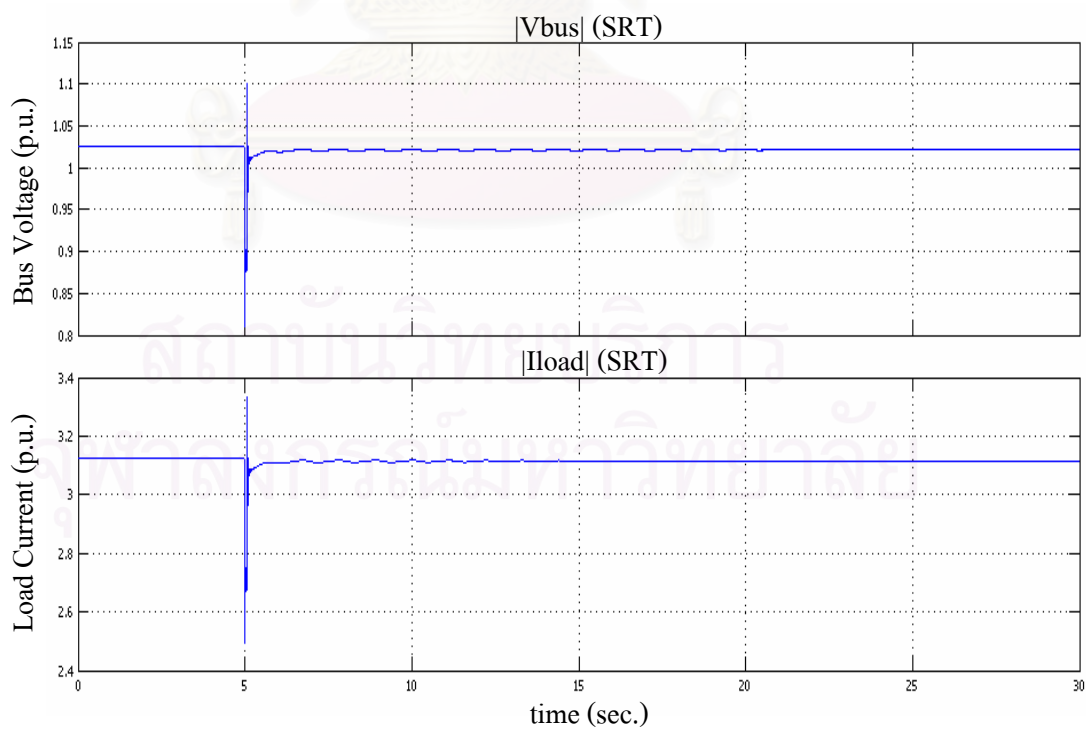
รูปที่ 5.12 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10%



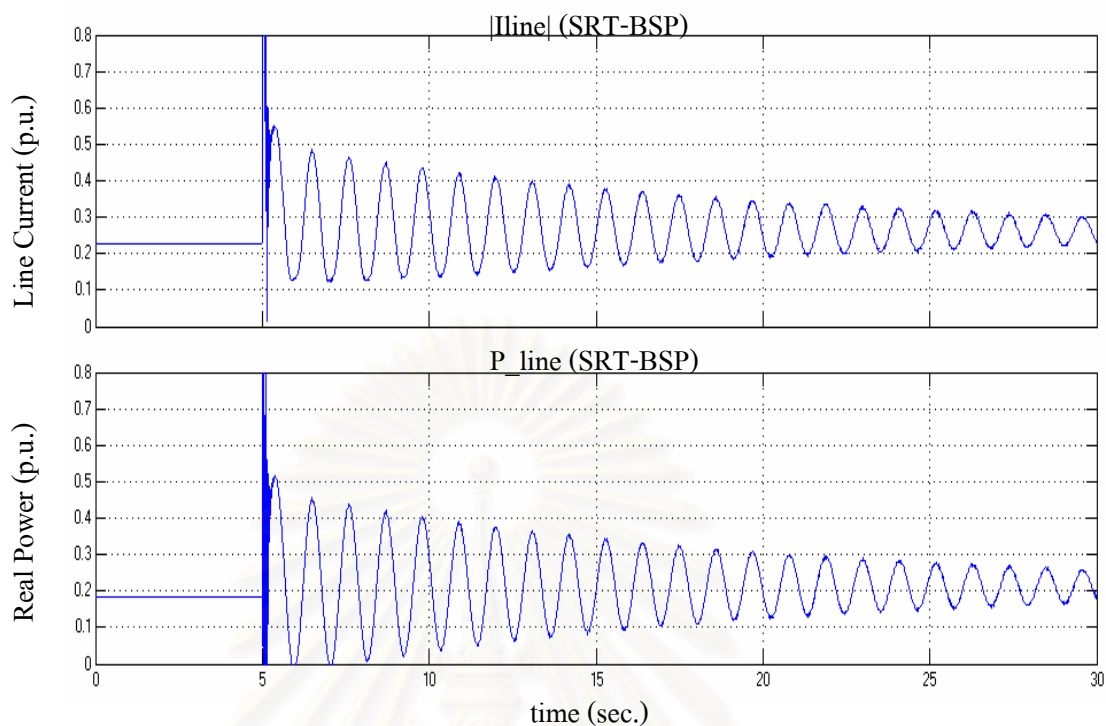
รูปที่ 5.13 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10%



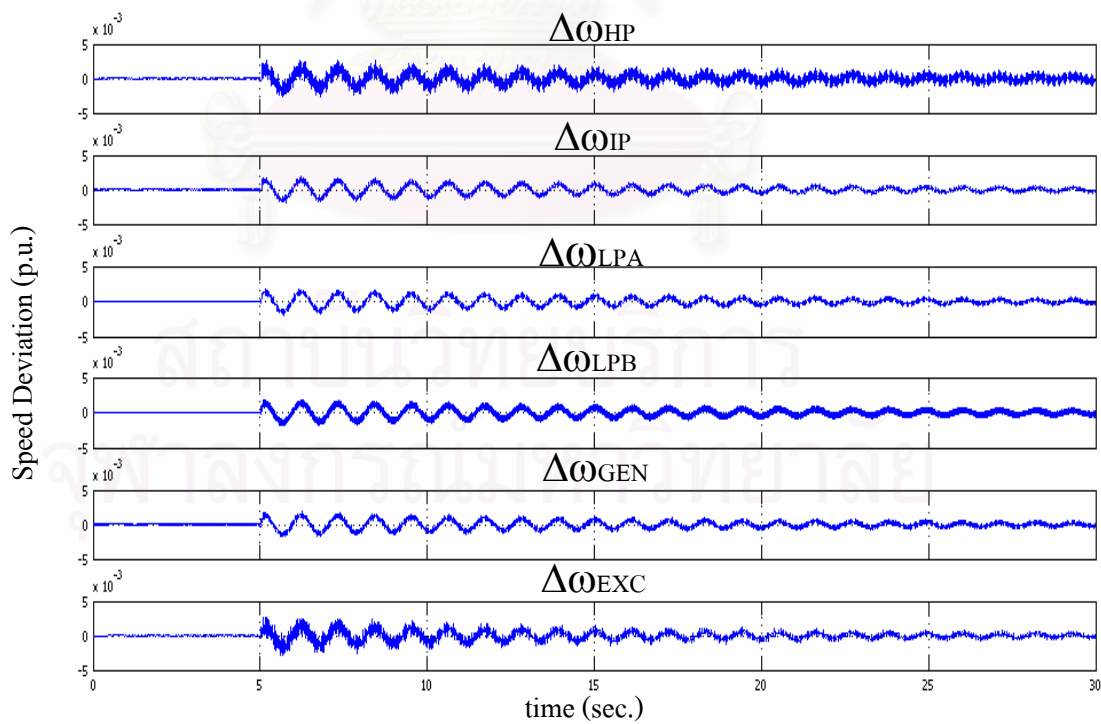
รูปที่ 5.14 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 10%



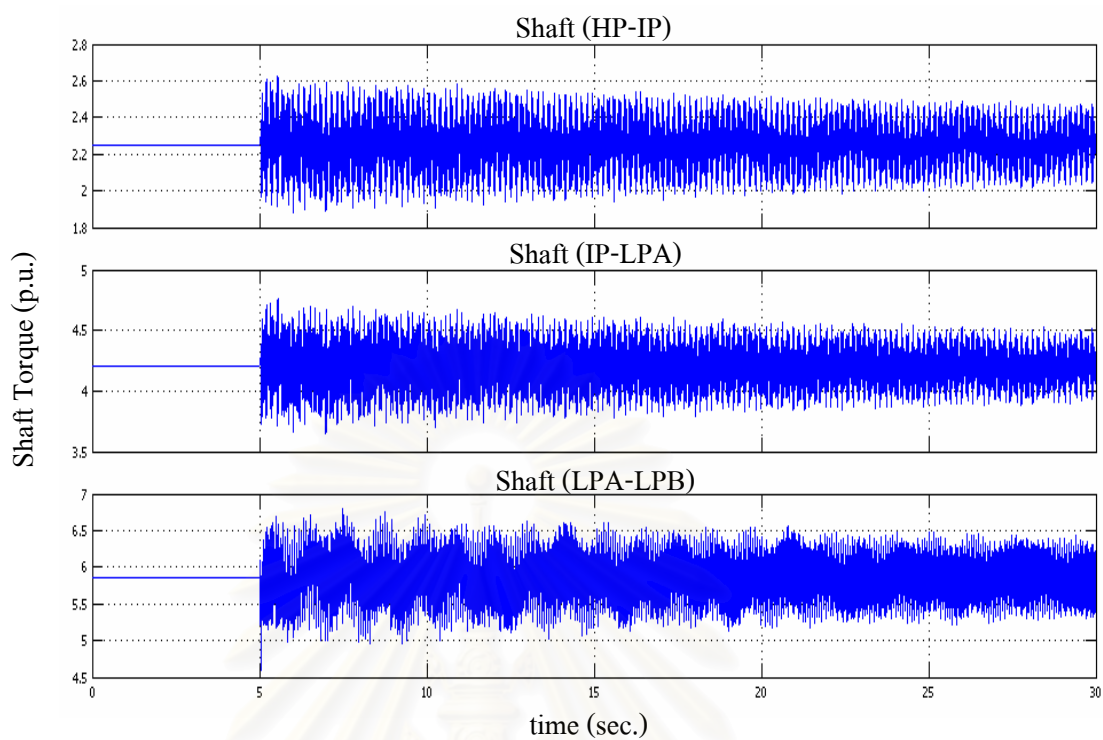
รูปที่ 5.15 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 10%



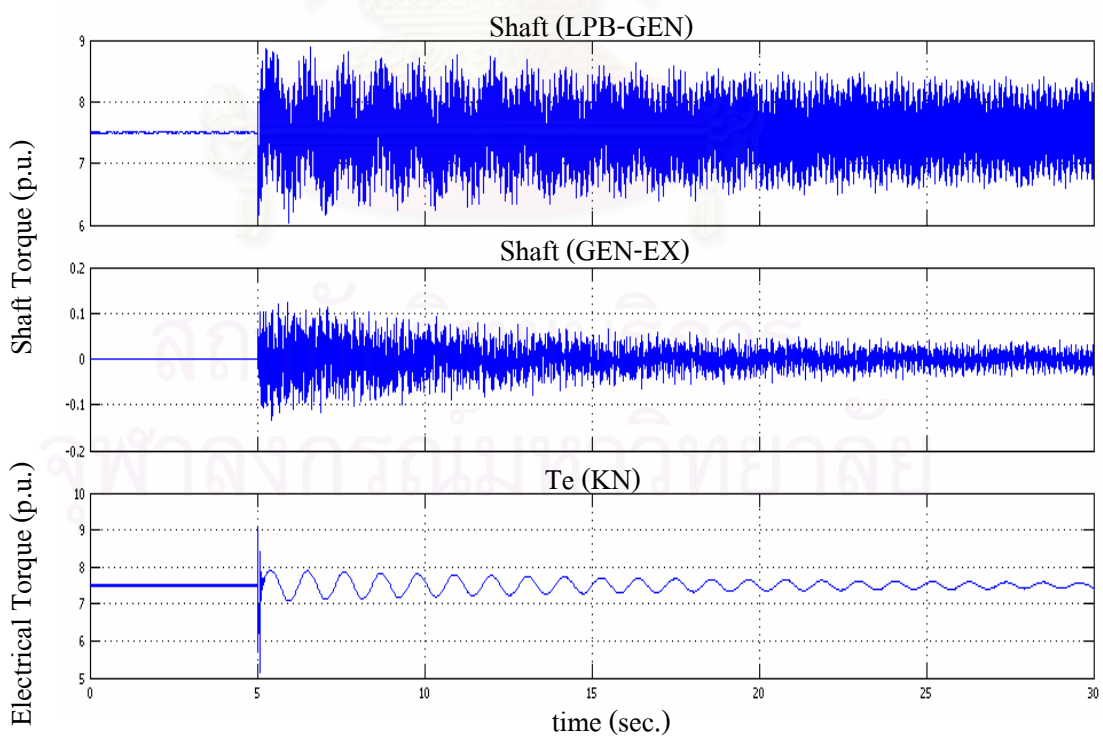
รูปที่ 5.16 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10%



รูปที่ 5.17 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10%

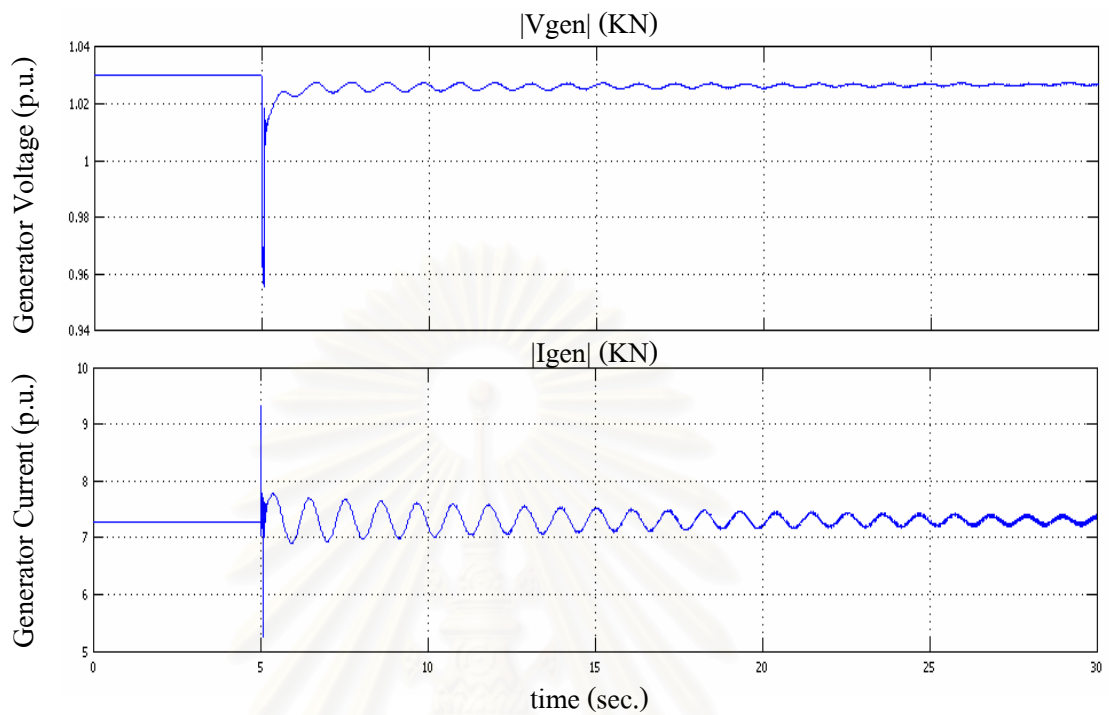


รูปที่ 5.18 แรงบิดทางกลบนเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10%

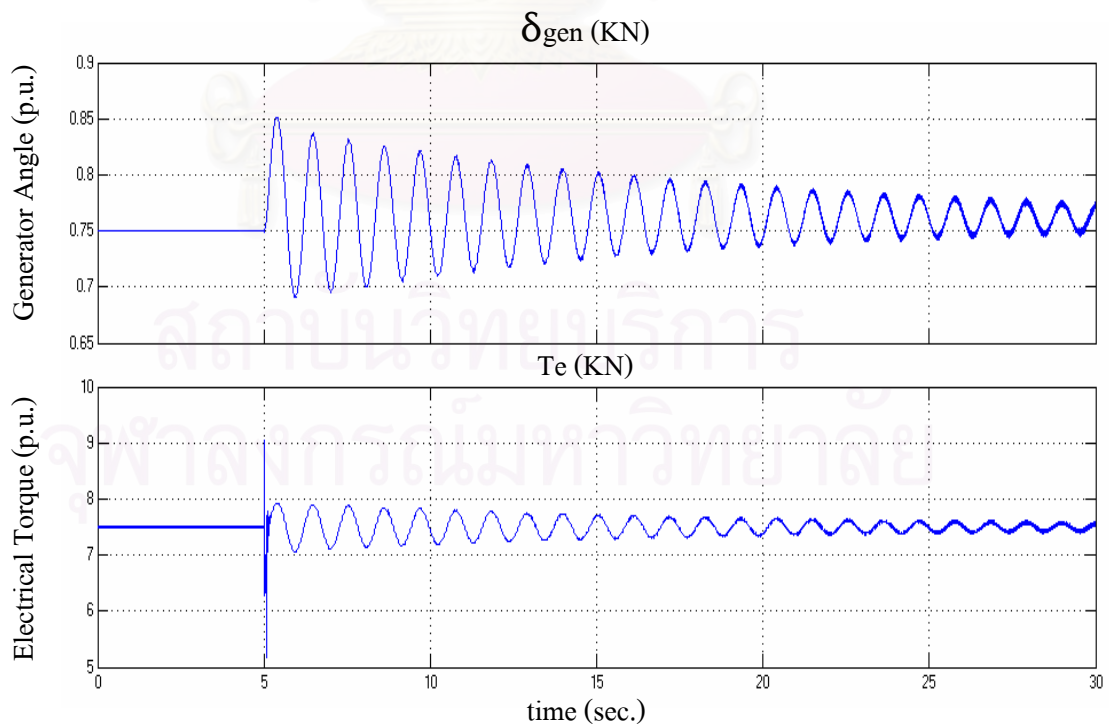


รูปที่ 5.19 แรงบิดทางกลบนเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10%

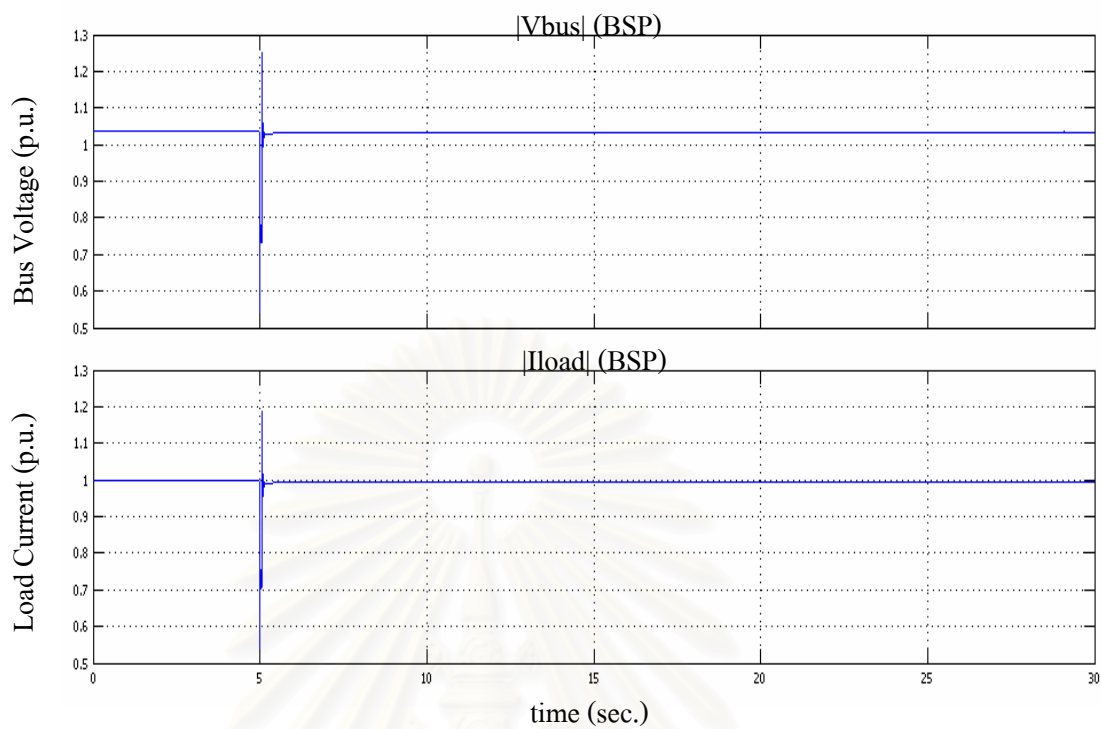
กรณี 3 ที่ระดับการชดเชย 30%



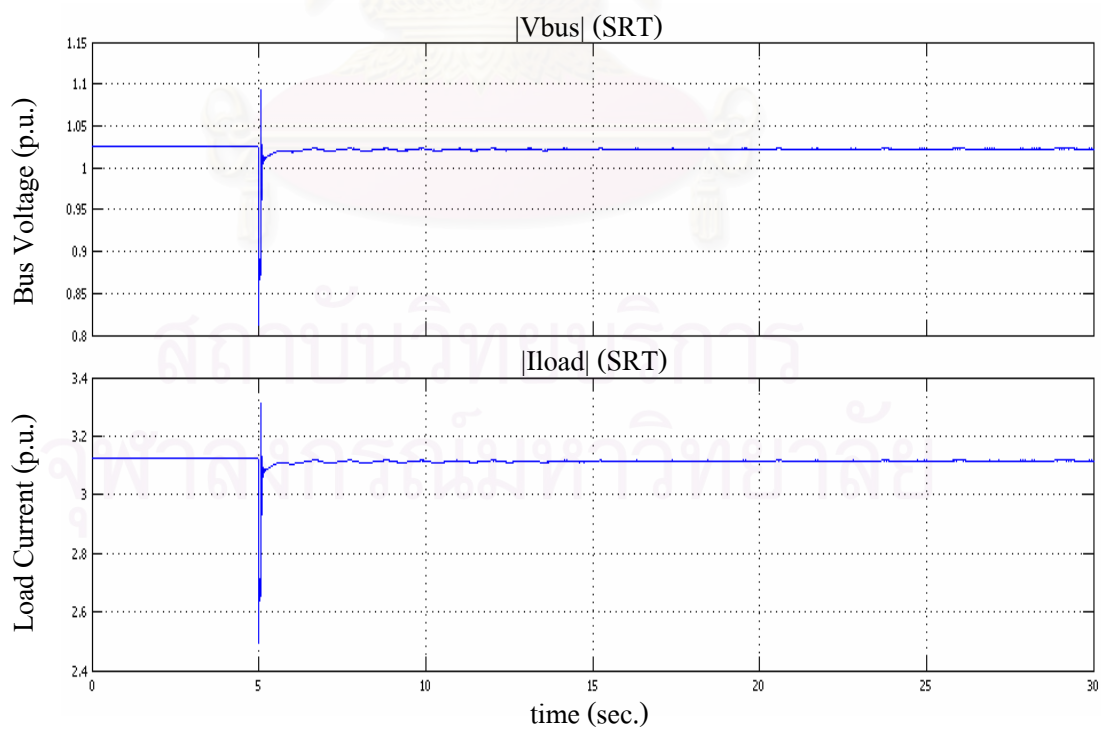
รูปที่ 5.20 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 30%



รูปที่ 5.21 มุมโรเตอร์ และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 30%

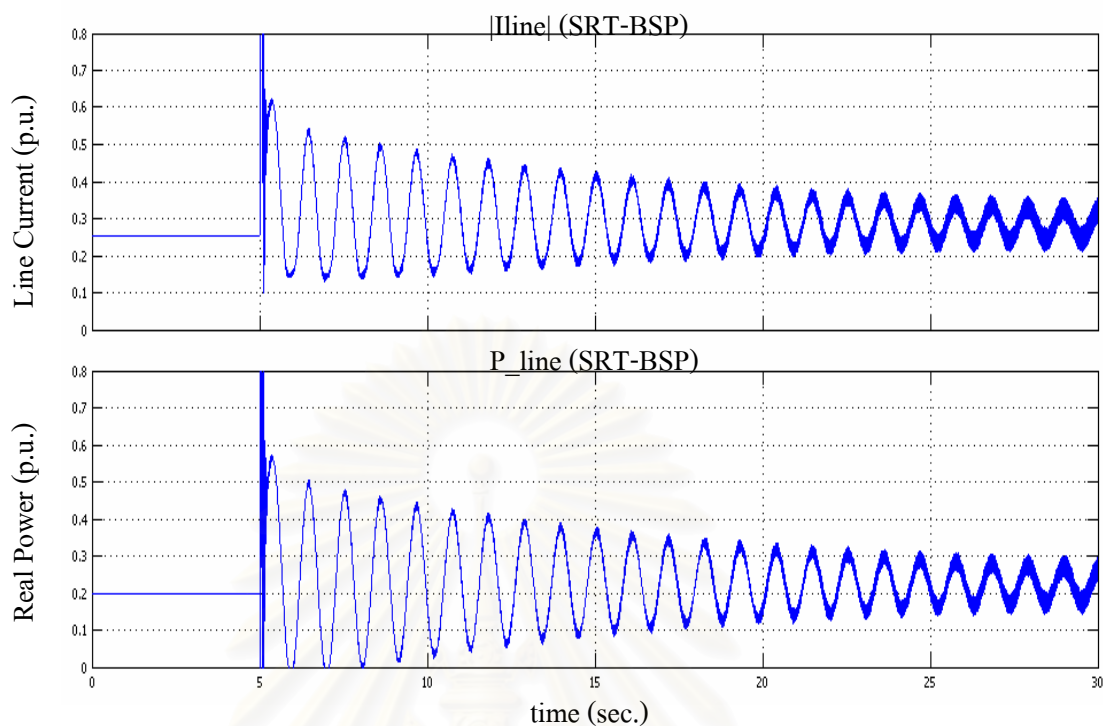


รูปที่ 5.22 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 30%

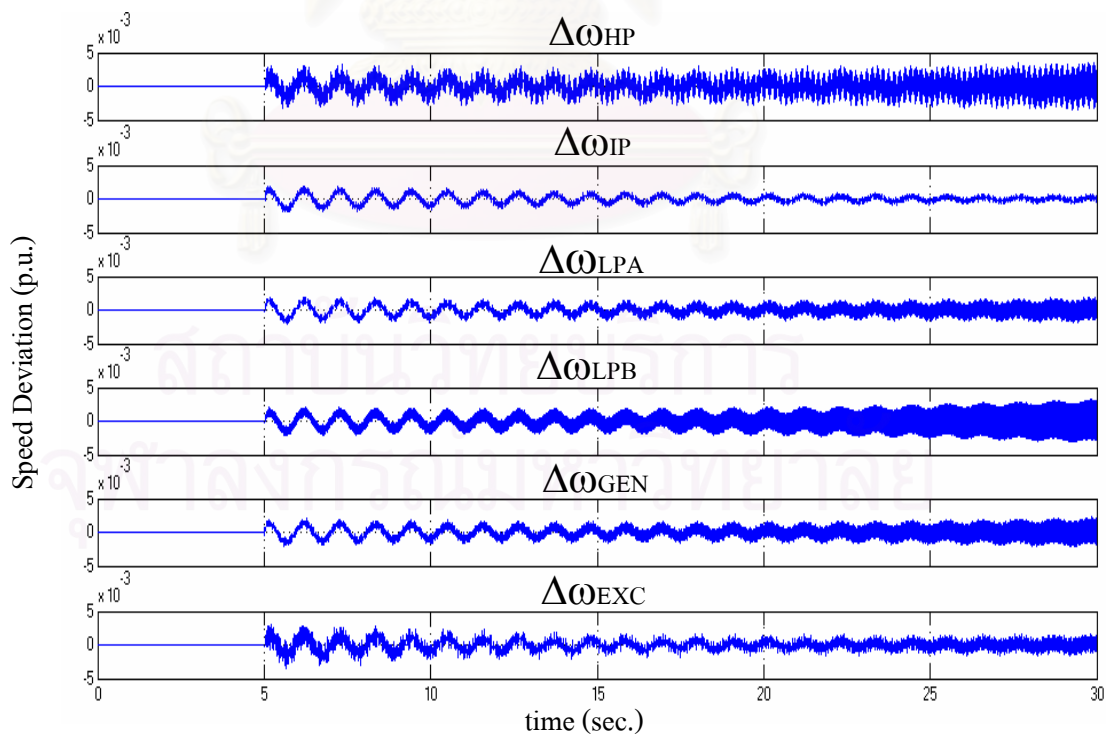


รูปที่ 5.23 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 30%

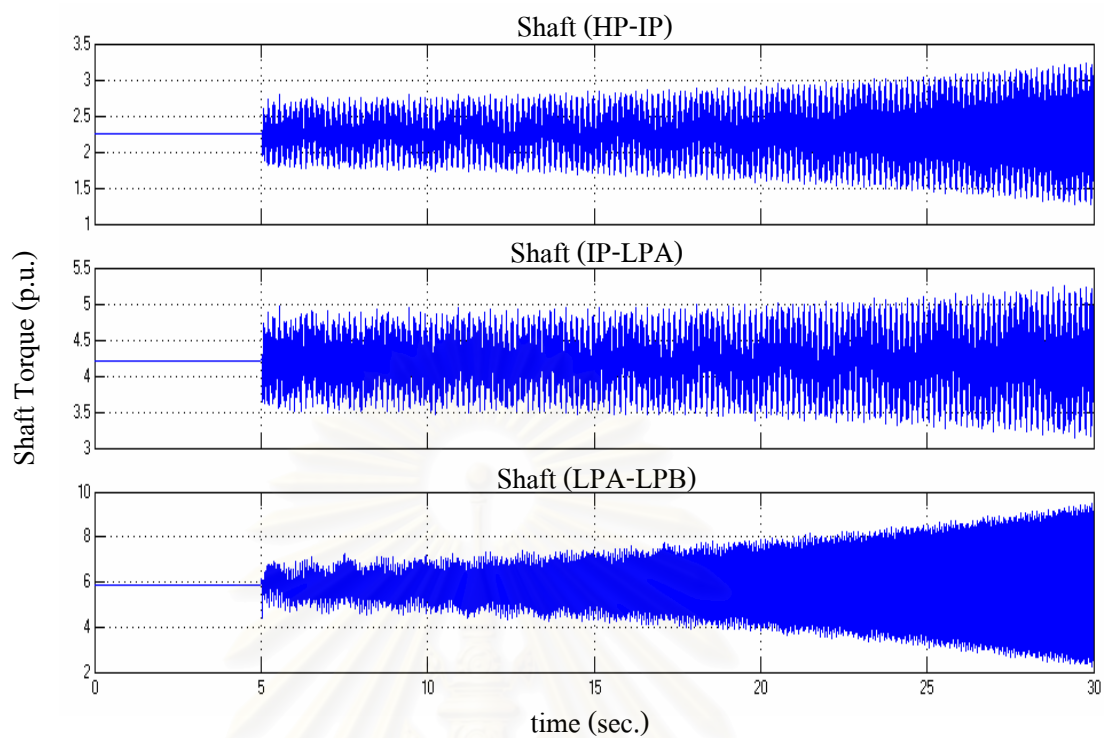




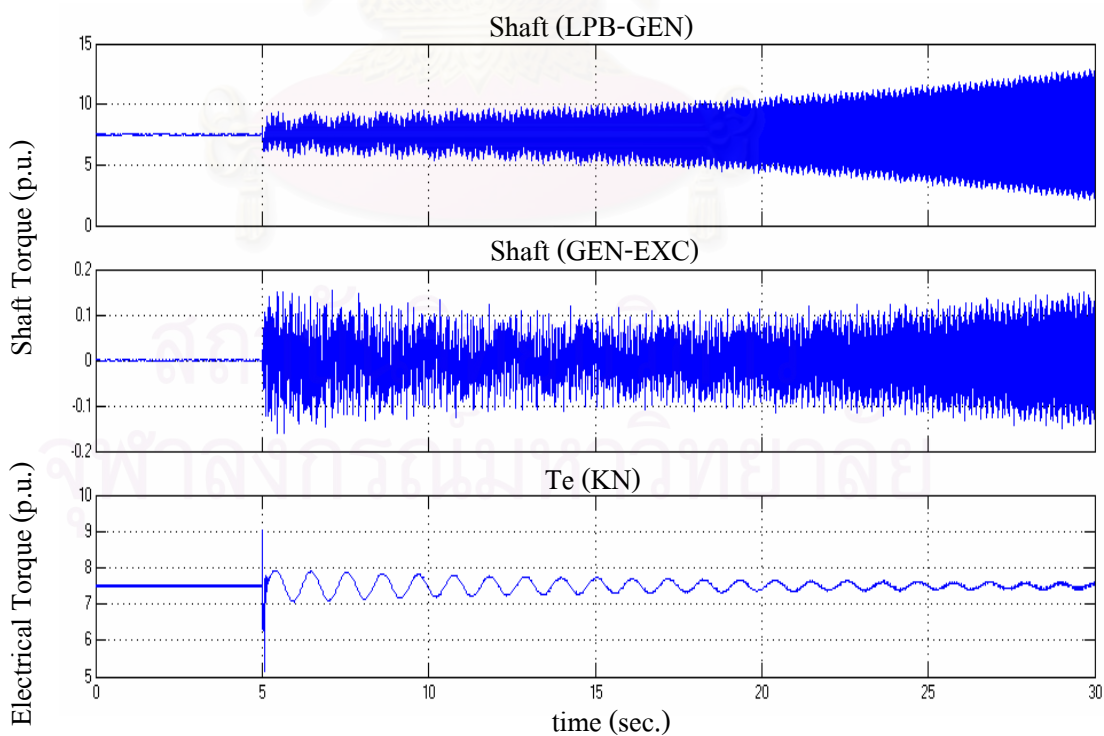
รูปที่ 5.24 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30%



รูปที่ 5.25 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30%

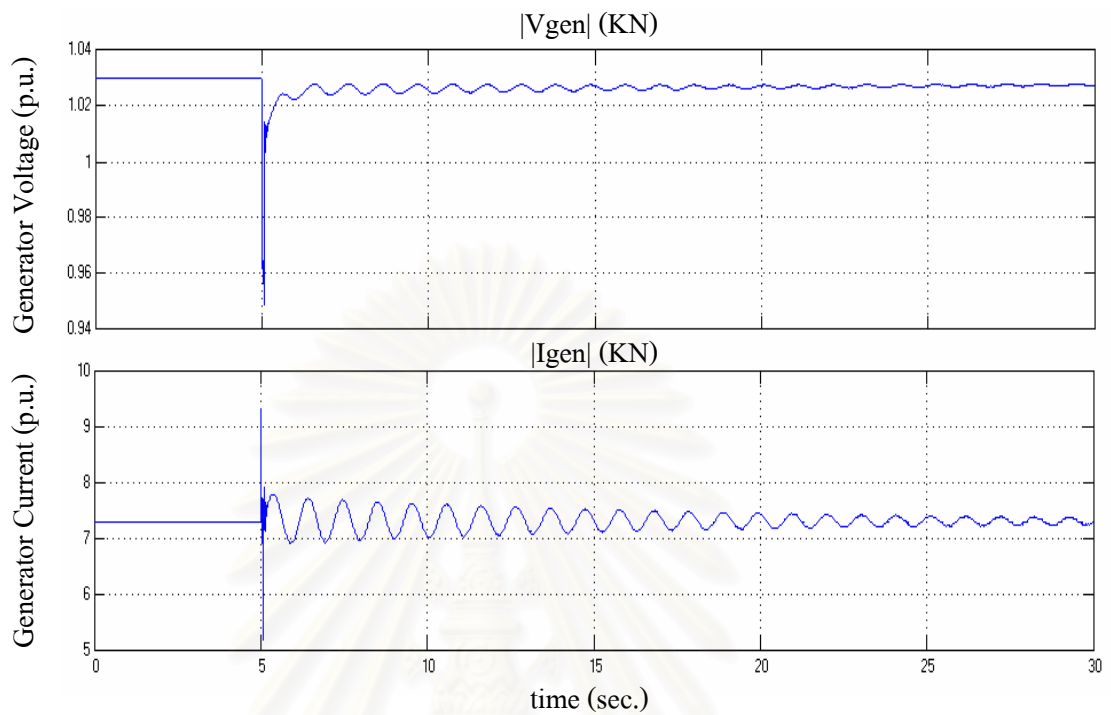


รูปที่ 5.26 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30%

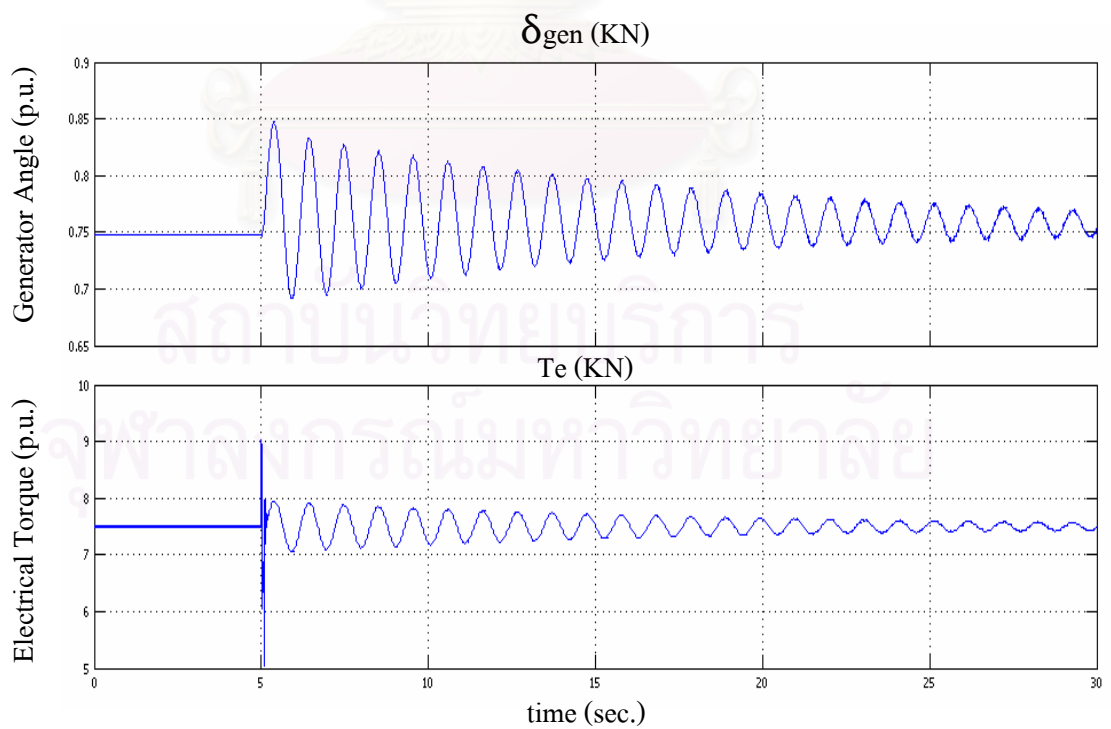


รูปที่ 5.27 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30%

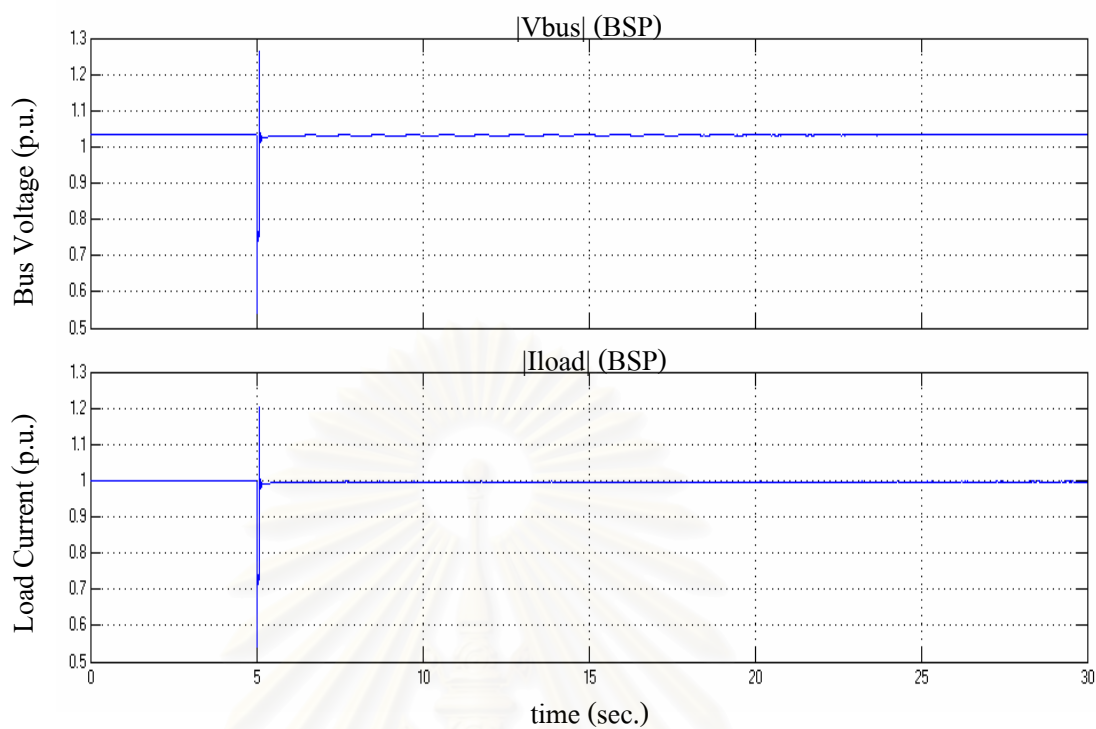
กรณี 4 ที่ระดับการชดเชย 50%



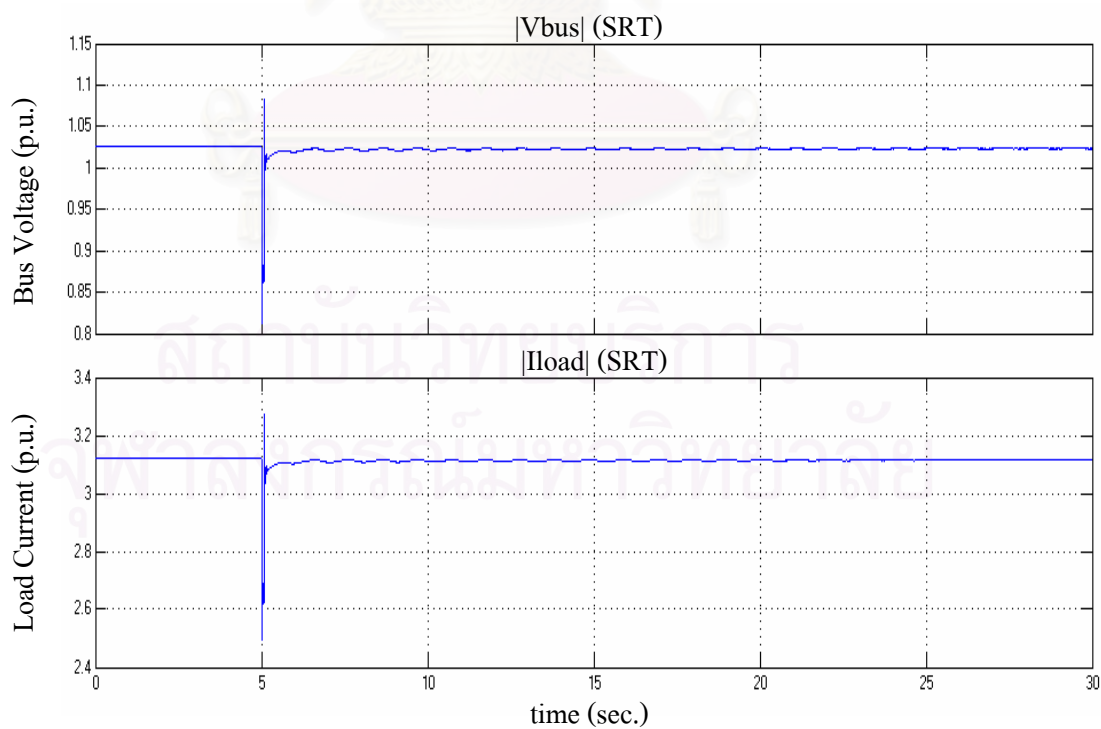
รูปที่ 5.28 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 50%



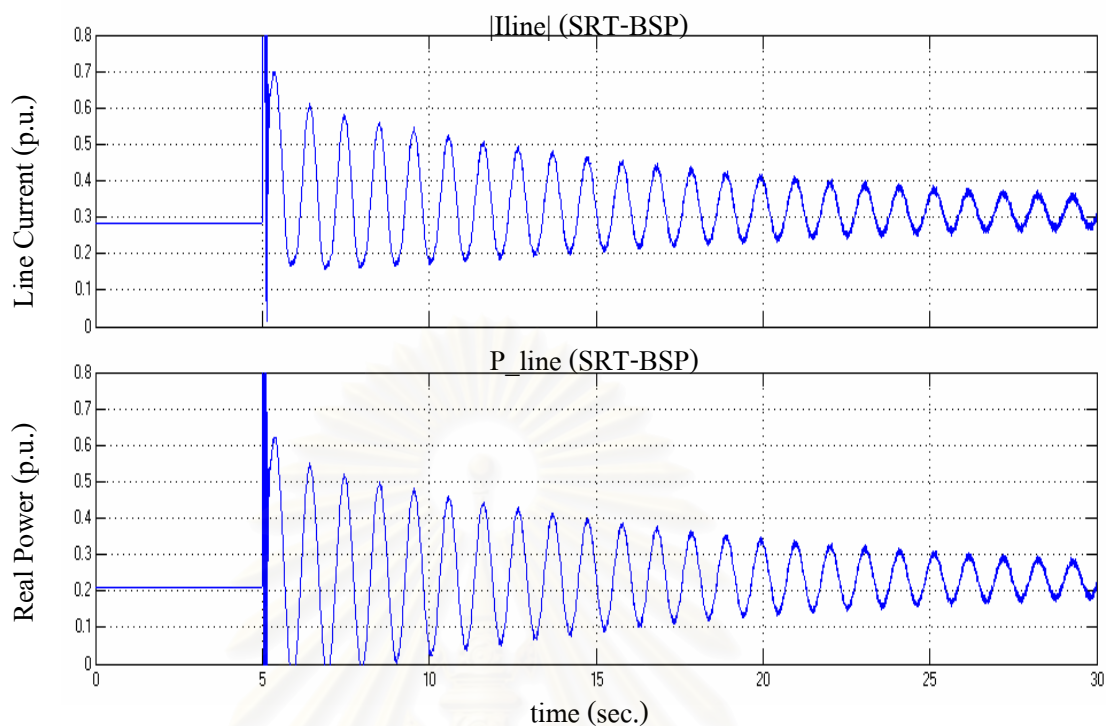
รูปที่ 5.29 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 50%



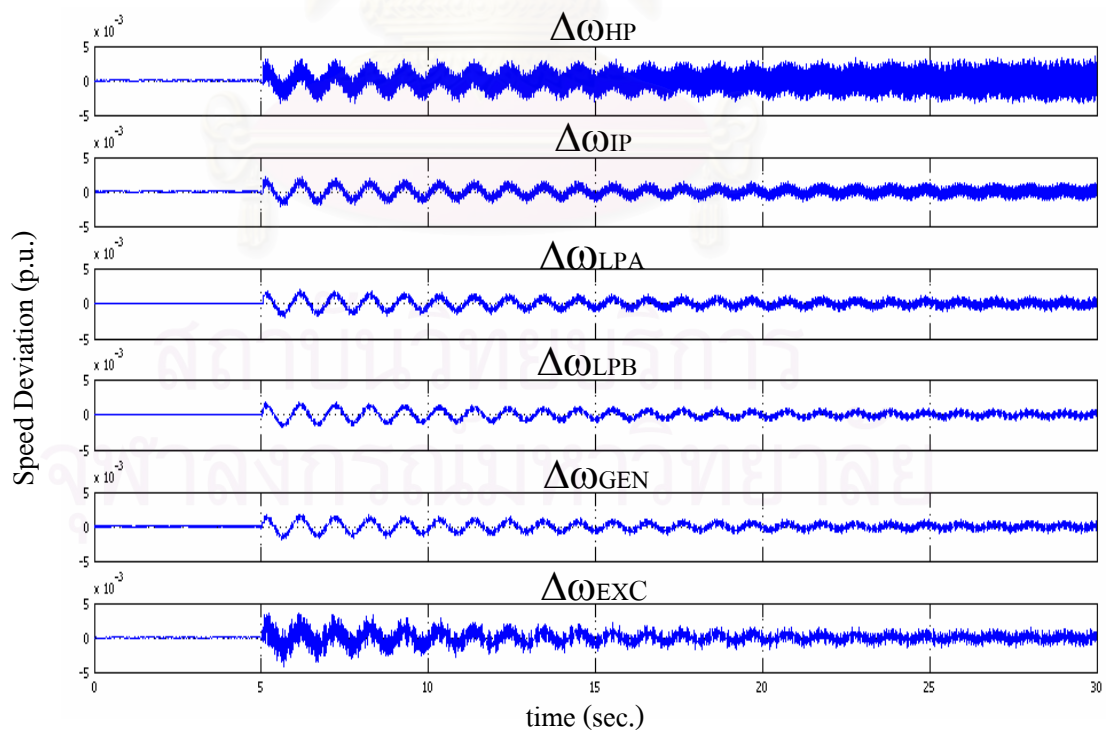
รูปที่ 5.30 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 50%



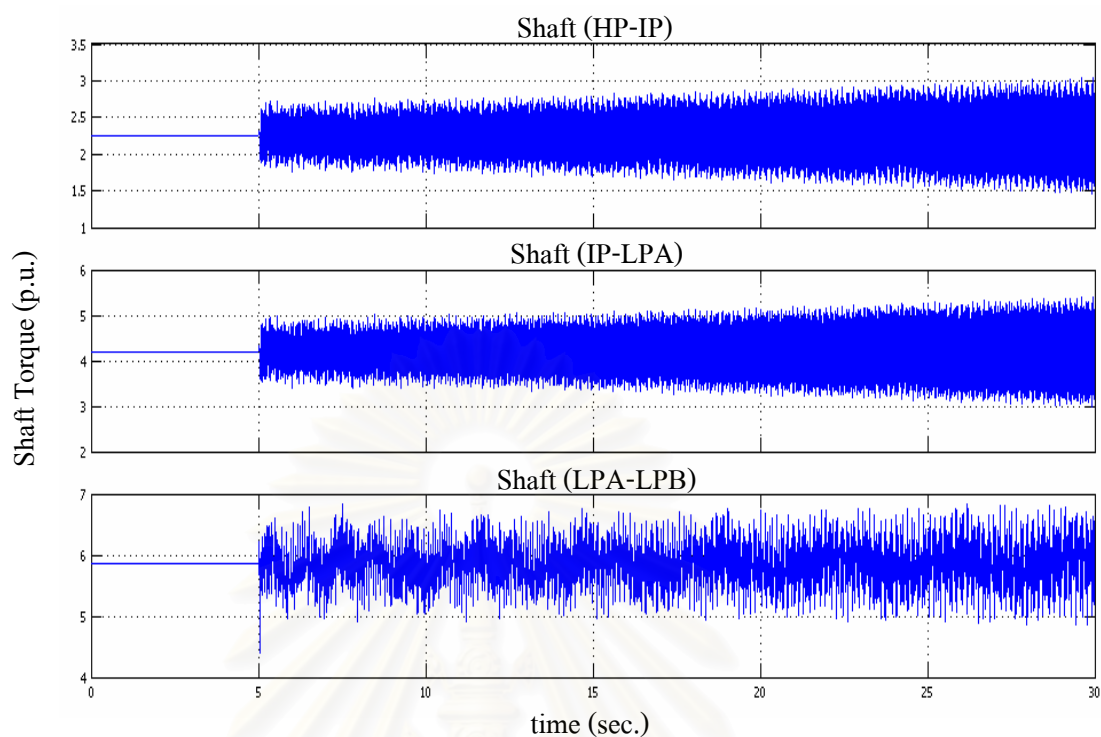
รูปที่ 5.31 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 50%



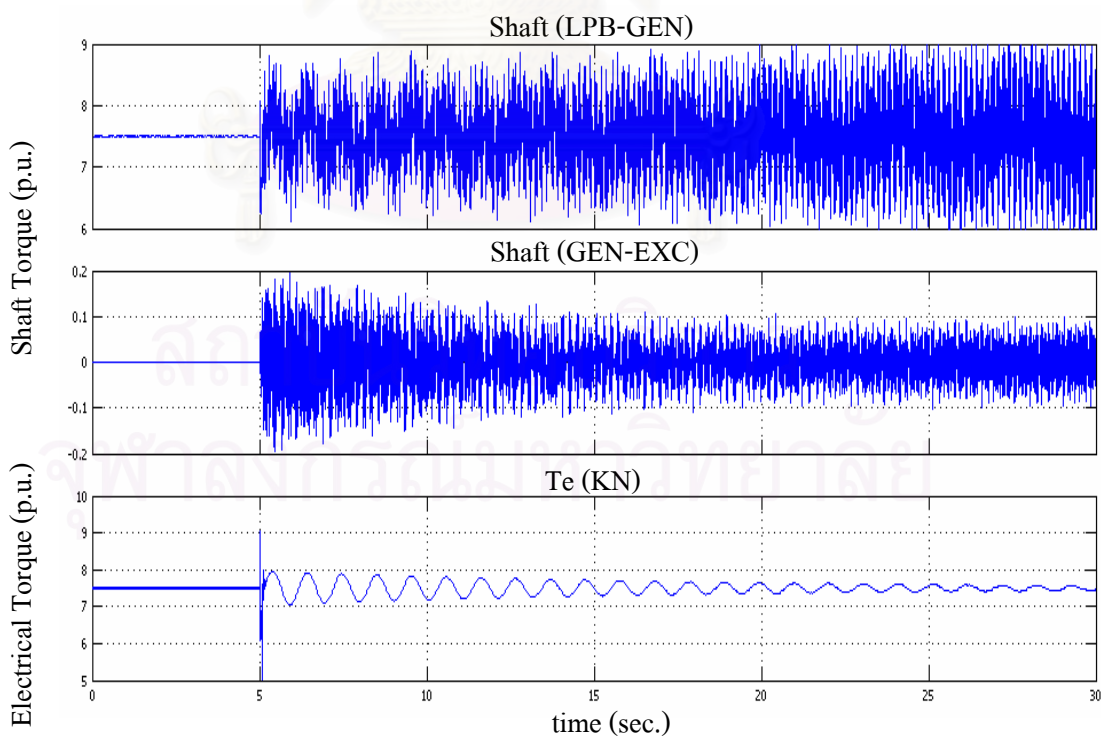
รูปที่ 5.32 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง  
จากบัสสุราษฎร์ธานีไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 50%



รูปที่ 5.33 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 50%



รูปที่ 5.34 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50%



รูปที่ 5.35 แรงบิดทางกลบนเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50%

การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมที่ระดับการชดเชย 0% ถึง 10% ไม่ก่อให้เกิดปัญหา SSR ดังเหตุได้จากค่าเจาะจงและการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตเมื่อระบบถูกรบกวนขึ้นที่บัสอ้างอิง ปรากฏว่าไม่มีการขยายของแรงบิดทางกลของชุดกังหันซึ่งโดยปกติแล้วหากเกิดปัญหา SSR ขึ้น ขนาดแรงบิดทางกลเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อระดับการชดเชยมากกว่า 10% ปัญหา SSR ปรากฏขึ้นให้เห็น แต่ผลที่เกิดขึ้นในแต่ละโหมดมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการศึกษากับระบบทดสอบ IEEE FBM ดังนั้นอัตราขยายของแรงบิดทางกลระหว่างเพลาชื่อมโยงชุดกังหันจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ดังเหตุได้จากรูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 สำหรับการศึกษาระดับการชดเชย 30% และรูปที่ 5.34 และรูปที่ 5.35 สำหรับการศึกษาระดับการชดเชย 50% ซึ่งระดับการชดเชยเหล่านี้เป็นจุดที่ค่าเจาะจงมีค่าเป็นบวกสูงสุดในแต่ละโหมด สำหรับปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ นั้นไม่กล่าวถึงเพราะเป็นปริมาณที่ ดังเหตุได้ยากหรือมีการขยายของสัญญาณต่ำเมื่อเกิด SSR ขึ้น

### 5.3 สรุปผลกระทบของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อระบบภาคใต้

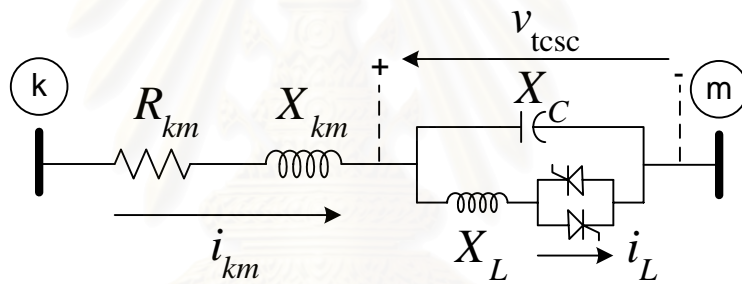
ผลการวิเคราะห์ด้วยค่าเจาะจงและการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบภาคใต้ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่เข้ากับสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดจากบัสบางสะพานไปยังบัส สุราษฎร์ธานี โดยใช้ข้อมูลชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบทดสอบ IEEE FBM พบว่าไม่สามารถเพิ่มระดับการชดเชยได้สูงกว่า 10% เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ SSR ขึ้น โดยเกิดเวลาที่สอดคล้องกับชุดกังหันด้วยกันถึง 3 โหมด ที่ความถี่ 90.4 rad/s, 146.6 rad/s และ 185.3 rad/s ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังระบบถูกรบกวนทั้งปริมาณทางไฟฟ้าและปริมาณทางกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณทางกลของแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างเพลาชื่อมโยงชุดกังหันดังรูปที่ 5.26, 5.27, 5.35 และ 5.35 มีการสั่นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นส่วนที่ส่งผลต่อความสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

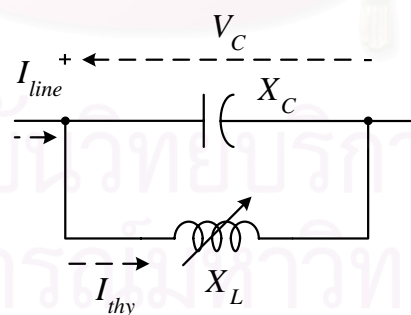
## บทที่ 6

### การเพิ่มขีดจำกัดการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้า เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ด้วย TCSC

ในบทนี้ทำการศึกษาระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อทำการติดตั้ง TCSC แทนที่ตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่ระดับการชดเชยค่าต่างๆ ที่ตัวเก็บประจุอนุกรมก่อให้เกิดปัญหา SSR จากเนื้อหาในบทที่ 3 ได้อธิบายถึงโครงสร้างของ TCSC อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุต่อขนานกับส่วนของตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่ออนุกรมกับชุดไทรสเตอร์ ดังรูปที่ 6.1 เมื่อทำการติดตั้ง TCSC อนุกรมกับสายส่งที่เชื่อมโยงจากบัส  $k$  ไปยังบัส  $m$  เมื่อทำการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ที่มุมต่างๆ ทำให้รีแอคแตนซ์สุทธิของ TCSC เปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้อีกทางหนึ่งว่าตัวเหนี่ยวนำของ TCSC สามารถปรับค่าได้ ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 แบบจำลองของ TCSC เมื่อติดตั้งกับสายส่งจากบัส  $k$  ไปยังบัส  $m$



รูปที่ 6.2 รีแอคแตนซ์สุทธิของ TCSC เปลี่ยนค่าตามตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้

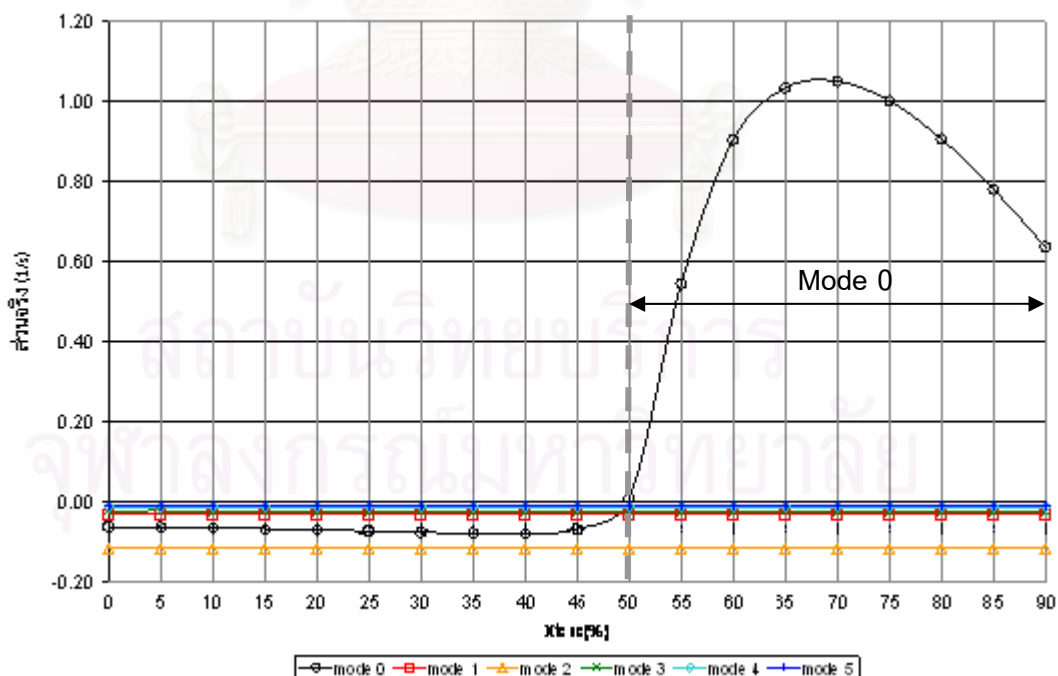
จากรูปที่ 6.2 เมื่อละเลยผลของชุดควบคุมมุมจุดชนวน แต่มองตัวเหนี่ยวนำให้เป็นส่วนที่สามารถปรับค่าได้ จะได้สมการสถานะของ TCSC ในแกนอ้างอิง dq อันประกอบด้วยสมการสถานะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ และสมการสถานะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม TCSC ในแกน dq ดังสมการที่ (6.1)



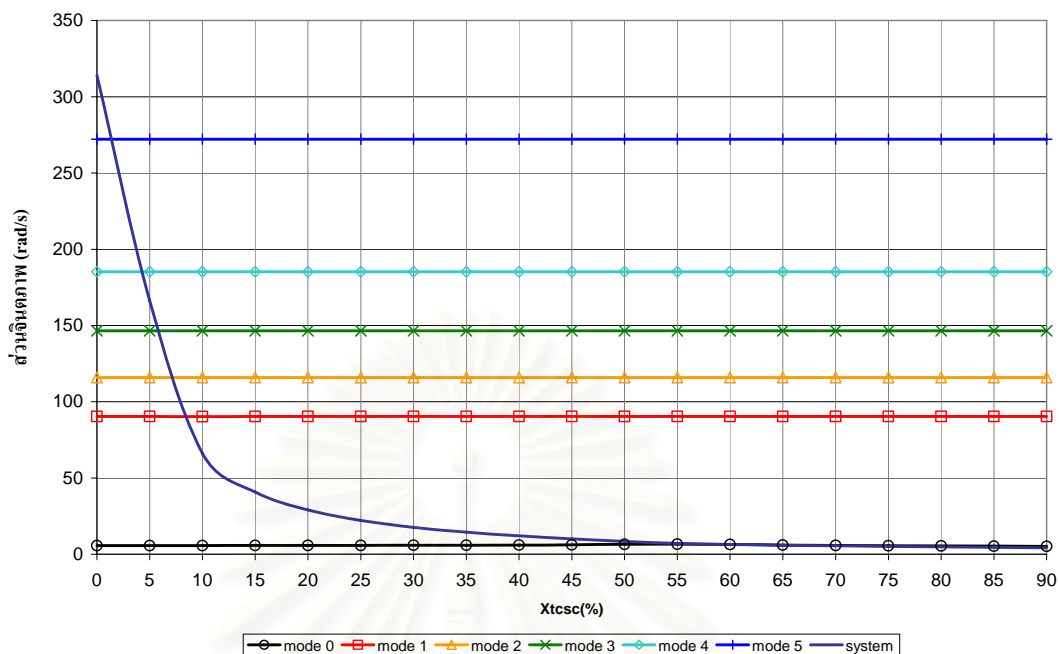
$$\begin{aligned}
 i_{thy}^D &= -\omega_b i_{thy}^Q + \left(\frac{\omega_b}{X_L}\right) v_C^D \\
 i_{thy}^Q &= \omega_b i_{thy}^D + \left(\frac{\omega_b}{X_L}\right) v_C^Q \\
 \dot{v}_C^D &= -\omega_b v_C^Q + \omega_b X_C (i_{Line}^D - i_{thy}^D) \\
 \dot{v}_C^Q &= \omega_b v_C^D + \omega_b X_C (i_{Line}^Q - i_{thy}^Q)
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

### 6.1 การวิเคราะห์ค่าเจาะจงของระบบภาคใต้

เมื่อนำแบบจำลองของ TCSC ในสมการที่ 6.1 ติดตั้งกับแบบจำลองระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบทที่ 5 โดยไม่คำนึงถึงผลตอบสนองทางพลวัตของ TCSC ผลปรากฏว่าสามารถปรับระดับการชดเชยได้ถึง 49% โดยไม่เกิดปัญหา SSR ดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 ซึ่งแสดงส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าเจาะจงจากระบบภาคใต้ตามลำดับ แต่จะเกิดปัญหาเกี่ยวกับโหมดที่เรียกว่า โหมดการสั่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Local plant mode) หรือ โหมด 0 มีความถี่อยู่ในช่วง 0.7-2.0 Hz (4.40-12.57 rad/s) [6] และไม่เกี่ยวข้องกับโหมดความถี่ของชุดกักกัน ในระบบที่ทำการศึกษานี้มีค่าเฉลี่ยของโหมดดังกล่าวอยู่ที่ 5.9 rad/s (0.94 Hz) เนื่องจากในการศึกษาไม่พิจารณาผลตอบสนองเชิงพลวัตของ Excitation, AVR และ PSS จึงทำให้ Synchronizing torque coefficient ไม่เพียงพอระบบจึงมีค่าเจาะจงเป็นบวกที่โหมดดังกล่าว



รูปที่ 6.3 ส่วนจริงของค่าเจาะจงจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อปรับค่า Xtsc ในย่านของตัวเก็บประจุจาก 0%-90% ของรีแอคแตนซ์สายส่ง BSP-SRT



รูปที่ 6.4 ส่วนจินตภาพของค่าเจาะจงจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เมื่อปรับค่า  $X_{tcsc}$  ในย่านของตัวเก็บประจุ 0%-90% ของรีแอคแตนซ์สายส่ง BSP-SRT

เหตุที่ทำให้ TCSC ไม่ก่อให้เกิดปัญหา SSR แม้ว่าระดับการชดเชยจะเท่ากับตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ตรงจุดที่เกิดปัญหา เนื่องจากโครงสร้างของ TCSC มีลักษณะเป็นการขนานระหว่างตัวเก็บประจุค่าคงที่กับตัวเหนี่ยวนำที่ปรับค่าได้ ดังรูปที่ 6.2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของรีแอคแตนซ์ที่ขานความถี่ต่ำกว่าความถี่เชิงโครนัส (50 Hz) จึงทำให้รีแอคแตนซ์สุทธิของ TCSC แสดงผลเป็นตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว [2,8] ต่างจากตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่โดยรีแอคแตนซ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลของตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียวไม่ว่าจะพิจารณาที่ความถี่ใดก็ตามดังสมการที่ (6.2) และ (6.3) ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ตัวห้อย FC แทนตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่

รีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่

$$X_{FC}(f) = 1/(2\pi f C_{FC}) \quad (6.2)$$

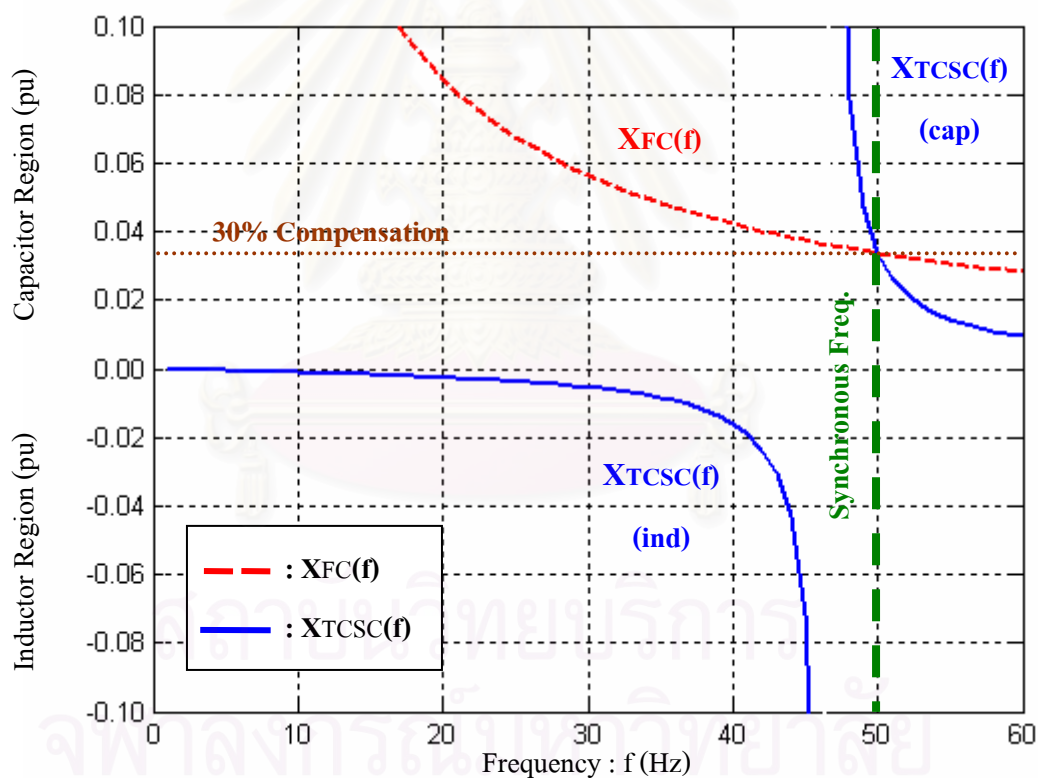
รีแอคแตนซ์ของ TCSC

$$X_{TCSC}(f) = \frac{X_C(f)X_L(f)}{X_L(f) - X_C(f)} \quad (6.3)$$

โดยที่  $X_C(f) = 1/(2\pi f C)$

$$X_L(f) = 2\pi f L$$

จากสมการที่ (6.2) เห็นได้ชัดว่าค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าสูงที่ความถี่ต่ำๆ และลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น สำหรับสมการที่ (6.3) ผลของรีแอกแตนซ์สุทธิต่อการขนานกันของตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุแปรผกผันกับความถี่ เช่นเดียวกับสมการที่ (6.2) เมื่อต่อขนานกับรีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ ผลของรีแอกแตนซ์สุทธิจึงมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ซิงโครนัสและมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุเมื่อความถี่มากกว่าหรือเท่ากับความถี่ซิงโครนัส ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดความถี่สอคล้องกับชุดกึ่งหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุนุกรมค่าคงที่จึงไม่อาจเกิดขึ้น ดังรูปที่ 6.5 เปรียบเทียบผลรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุนุกรมค่าคงที่กับรีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC ที่ระดับการชดเชย 30% ในย่านความถี่ต่างๆ ในที่นี้กำหนดให้ผลของตัวเก็บประจุเป็นค่าบวก

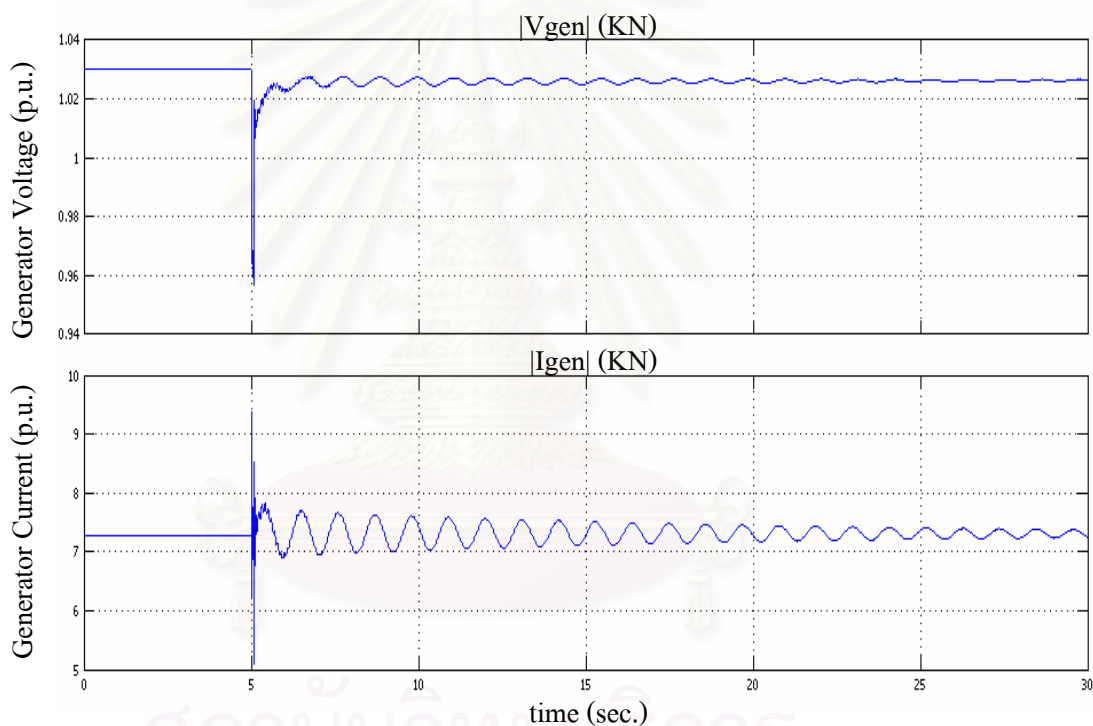


รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุนุกรมค่าคงที่กับรีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC ที่ระดับการชดเชย 30% ในย่านความถี่ 0Hz - 60Hz

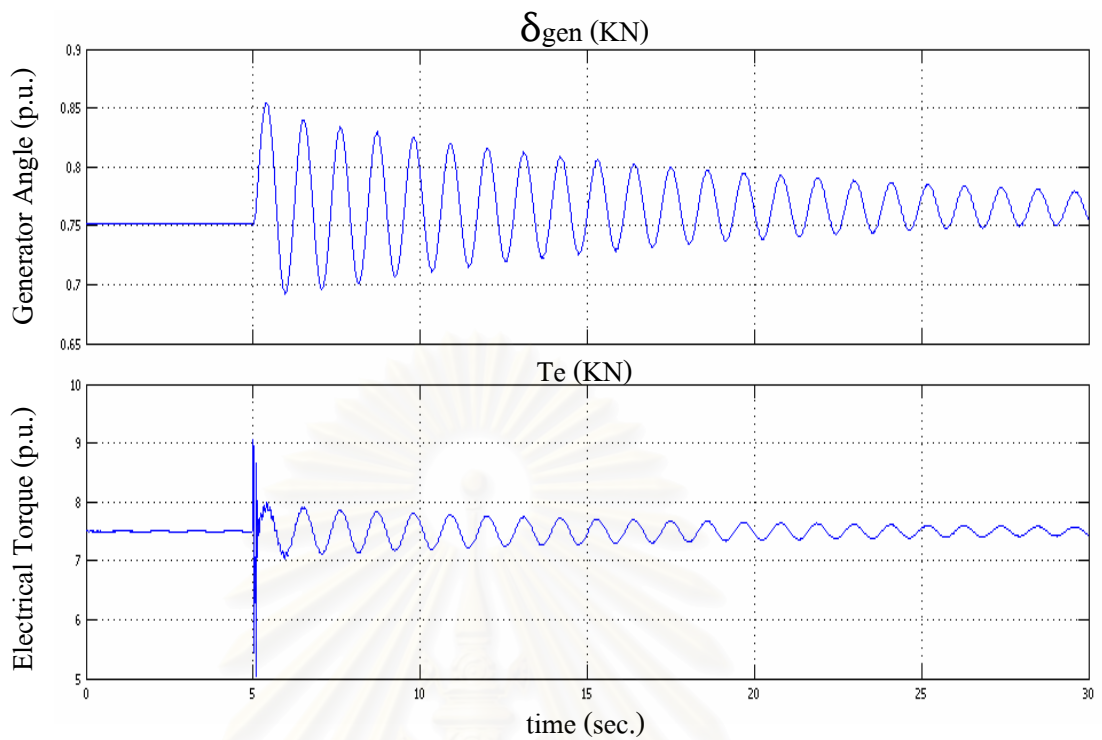
## 6.2 การจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบภาคใต้

หลังจากทำการวิเคราะห์ค่าเจาะจงของระบบเมื่อทำการชดเชยแบบอนุกรมด้วย TCSC ลำดับต่อไปจะจำลองเหตุการณ์ผิดปกติภายในระบบอันเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลงชั่วขณะ ที่ระดับการชดเชย 10%, 30% และ 50% เพื่อเปรียบเทียบผลกับบทที่ 5 ซึ่งกรณีแรกเป็นระดับการชดเชยที่ไม่เกิดปัญหา SSR และกรณีถัดมาเกิดปัญหา SSR เมื่อชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม โดยกำหนดให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงตกลง 50% ณ เวลา 5 วินาที เป็นเวลา 0.075 วินาที หลังจากนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจึงกลับมาเป็นปกติ

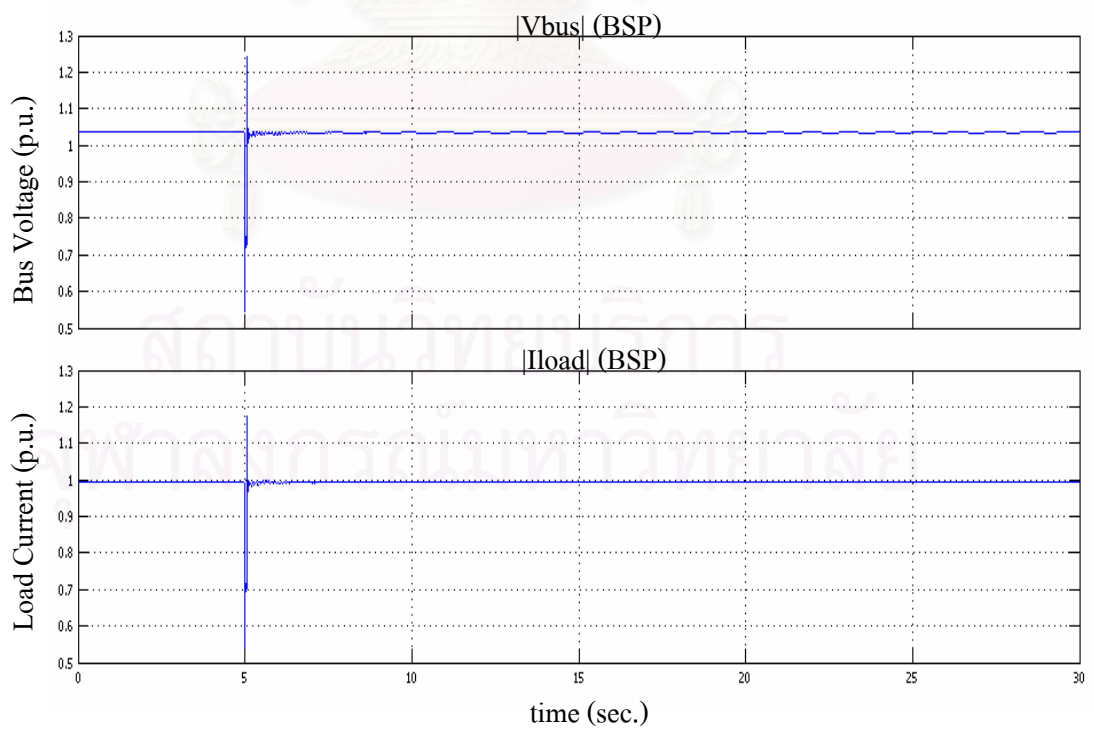
### กรณีที่ 1 ที่ระดับการชดเชย 10%



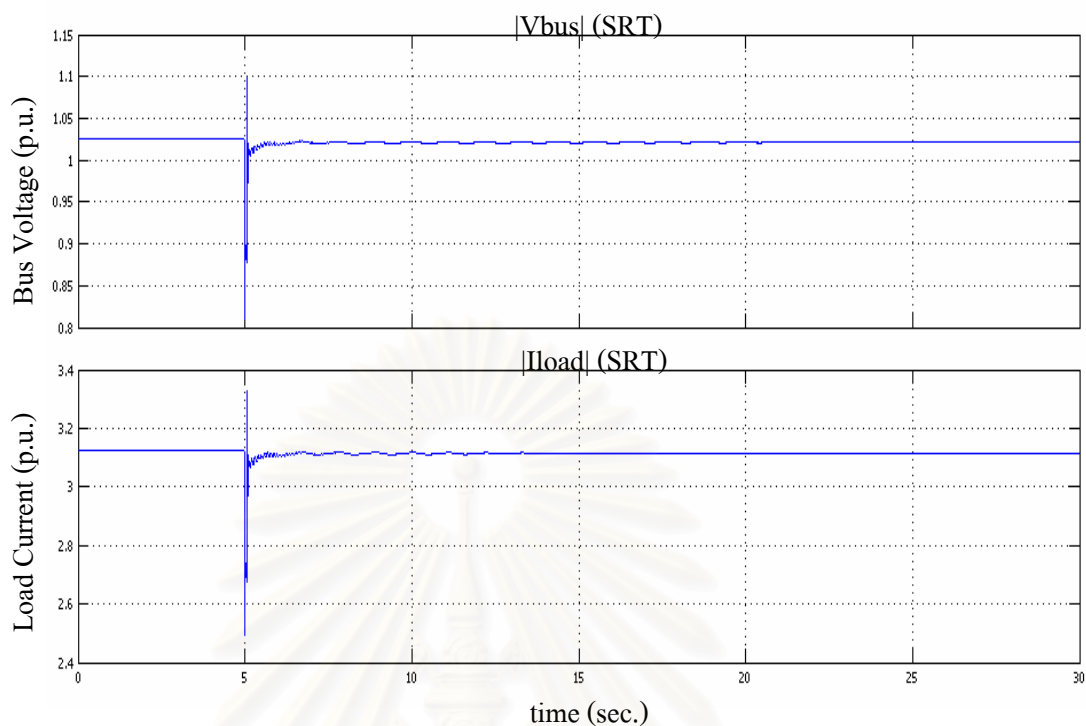
รูปที่ 6.6 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC



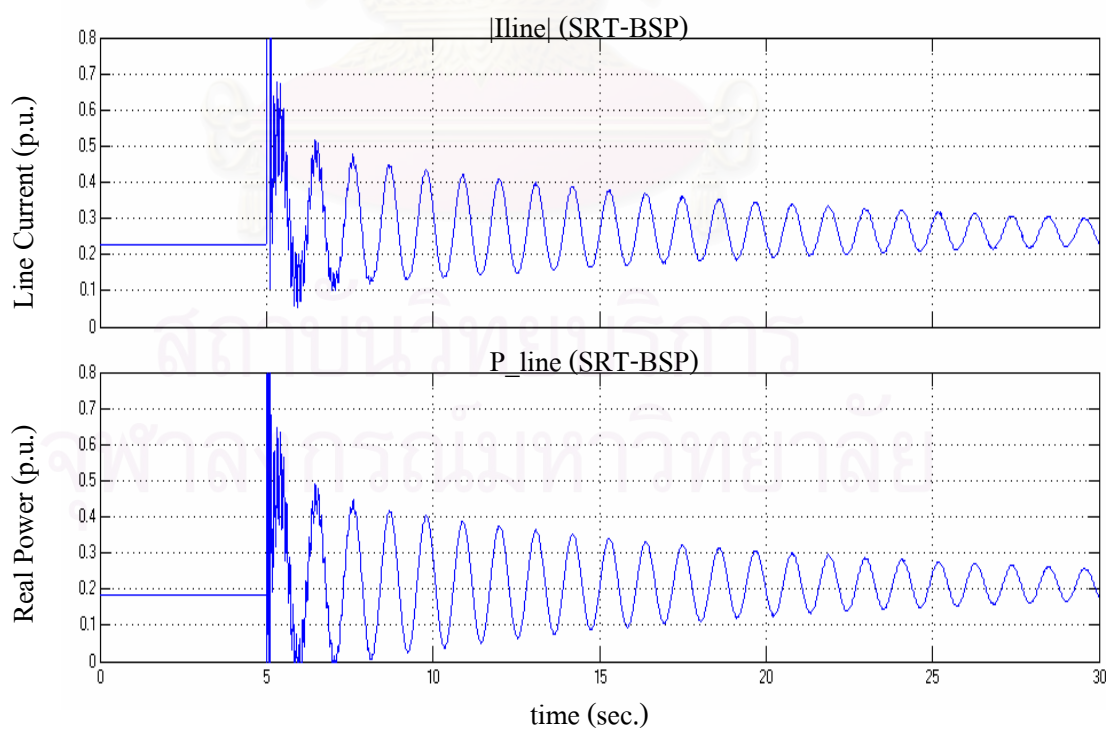
รูปที่ 6.7 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC



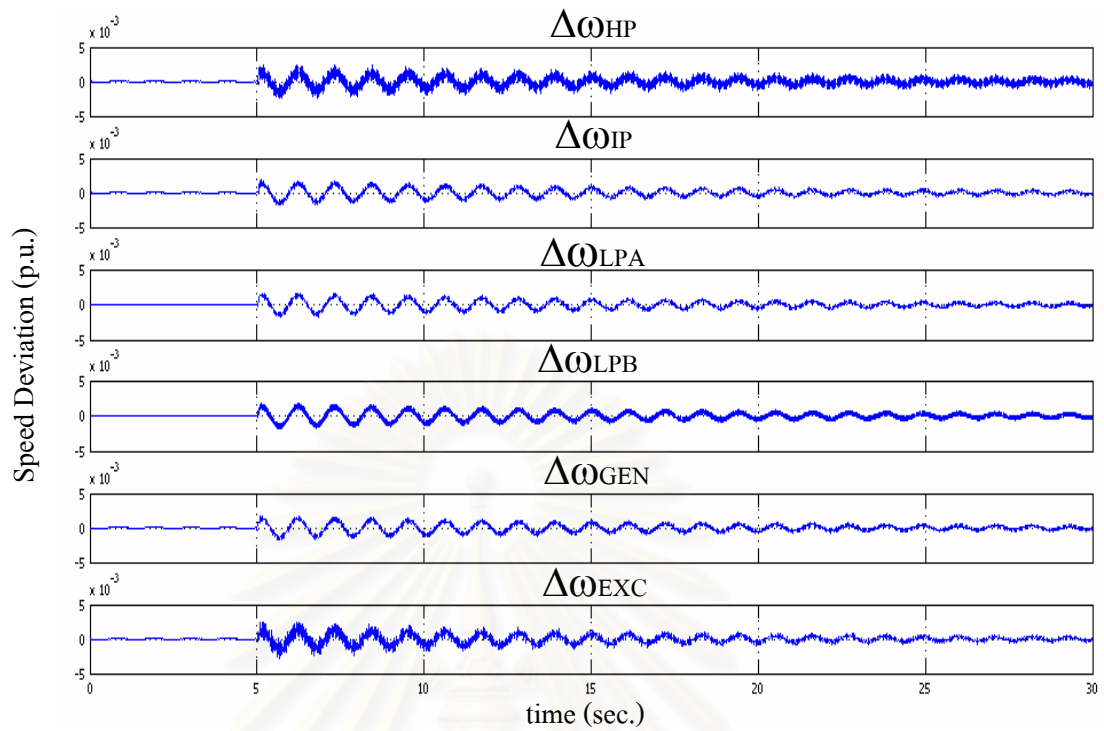
รูปที่ 6.8 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC



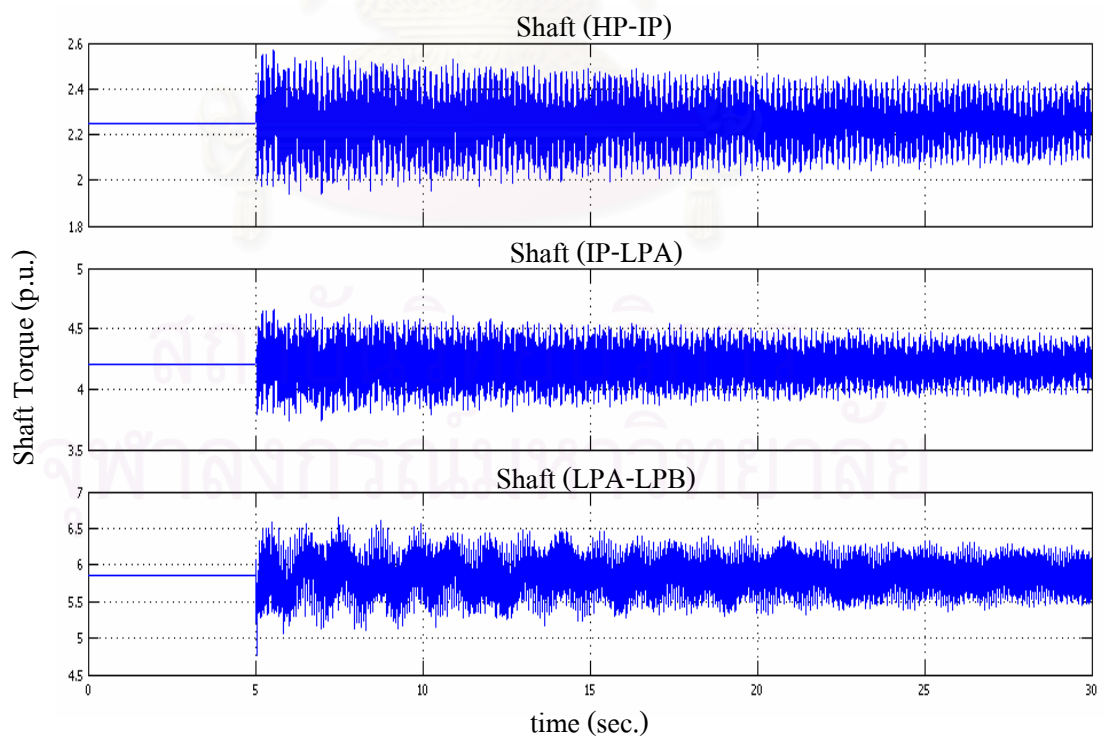
รูปที่ 6.9 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC



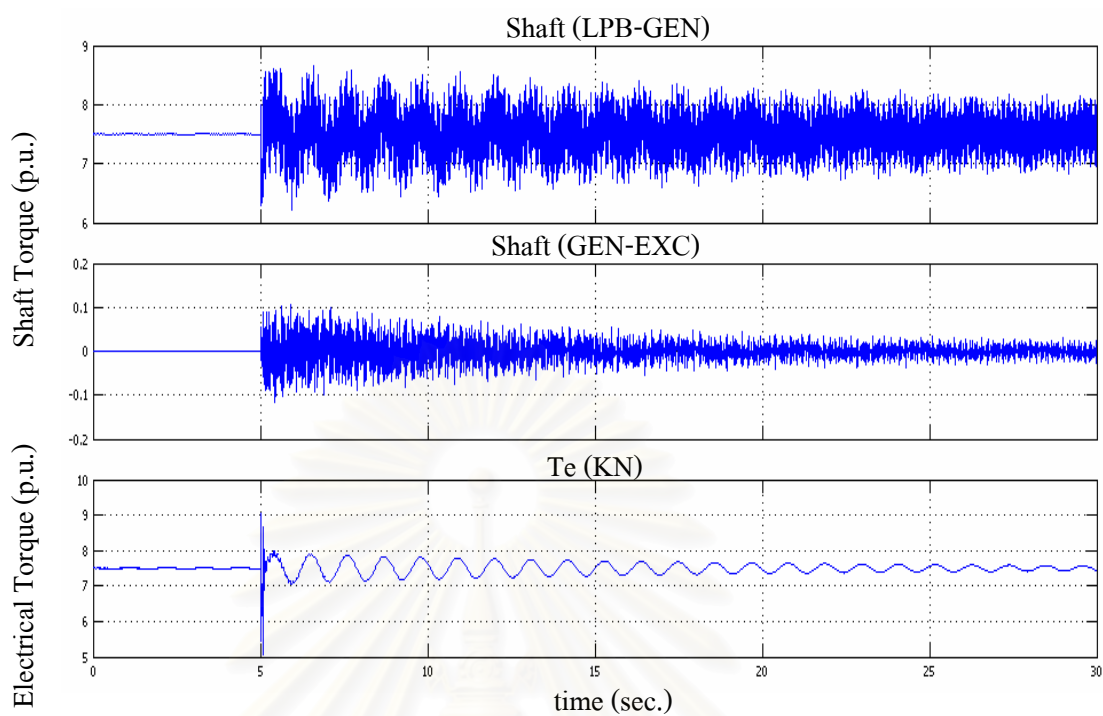
รูปที่ 6.10 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี  
ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC



รูปที่ 6.11 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC

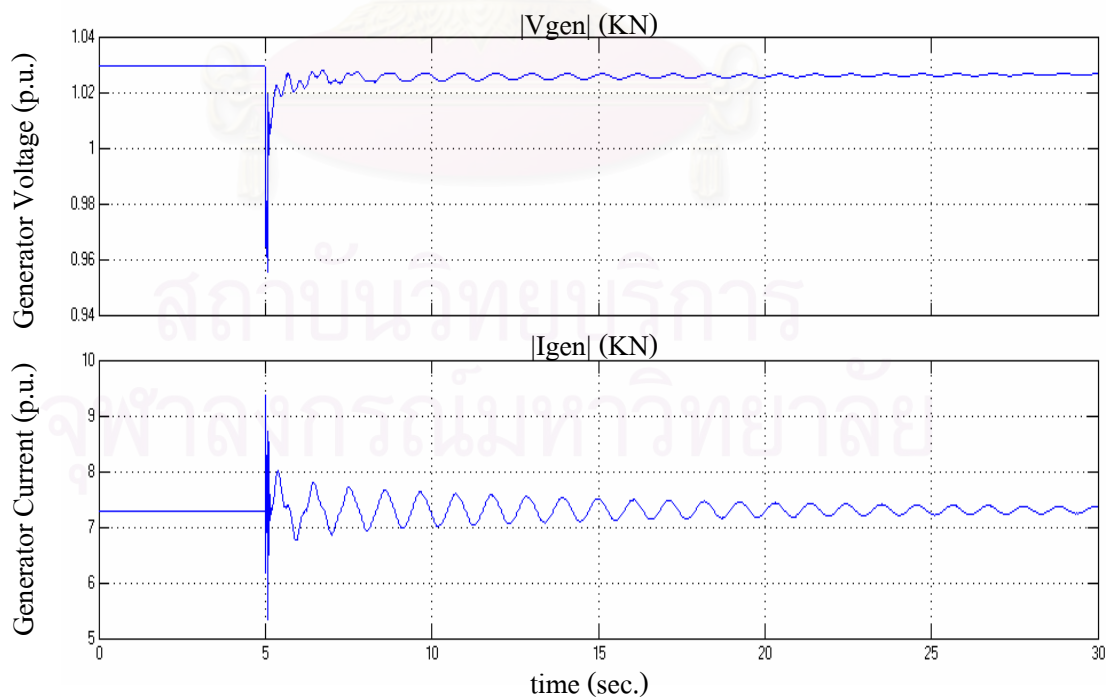


รูปที่ 6.12 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB  
จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC



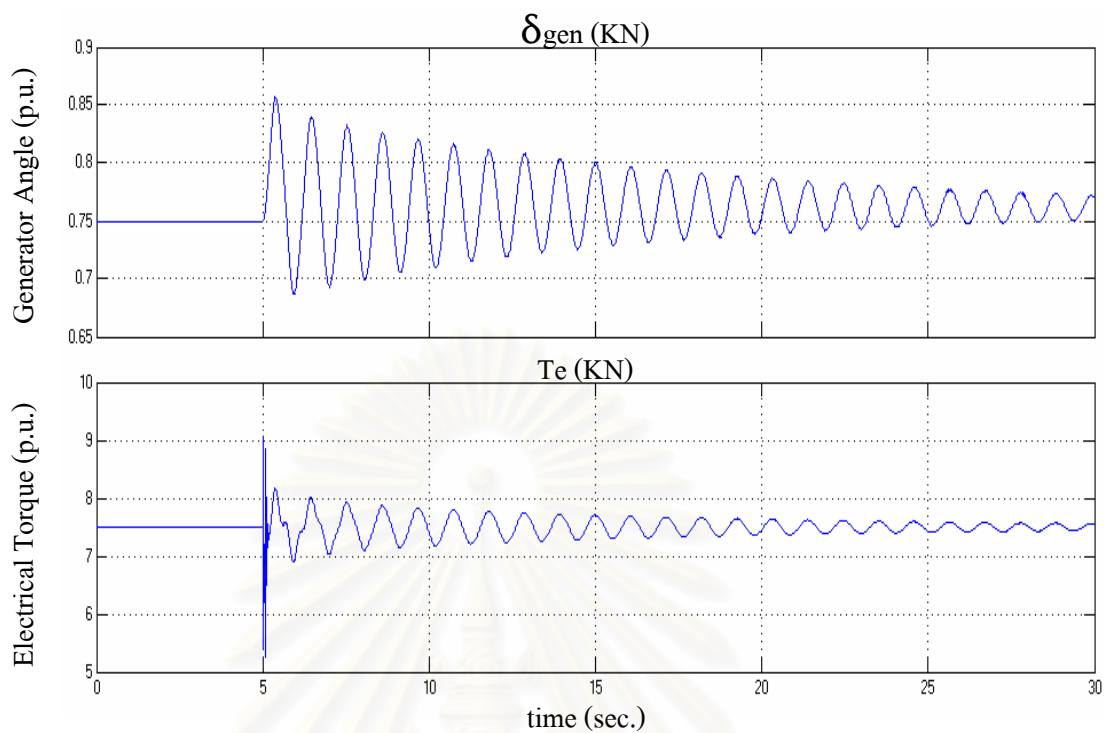
รูปที่ 6.13 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC

กรณีที่ 2 ที่ระดับการชดเชย 30%

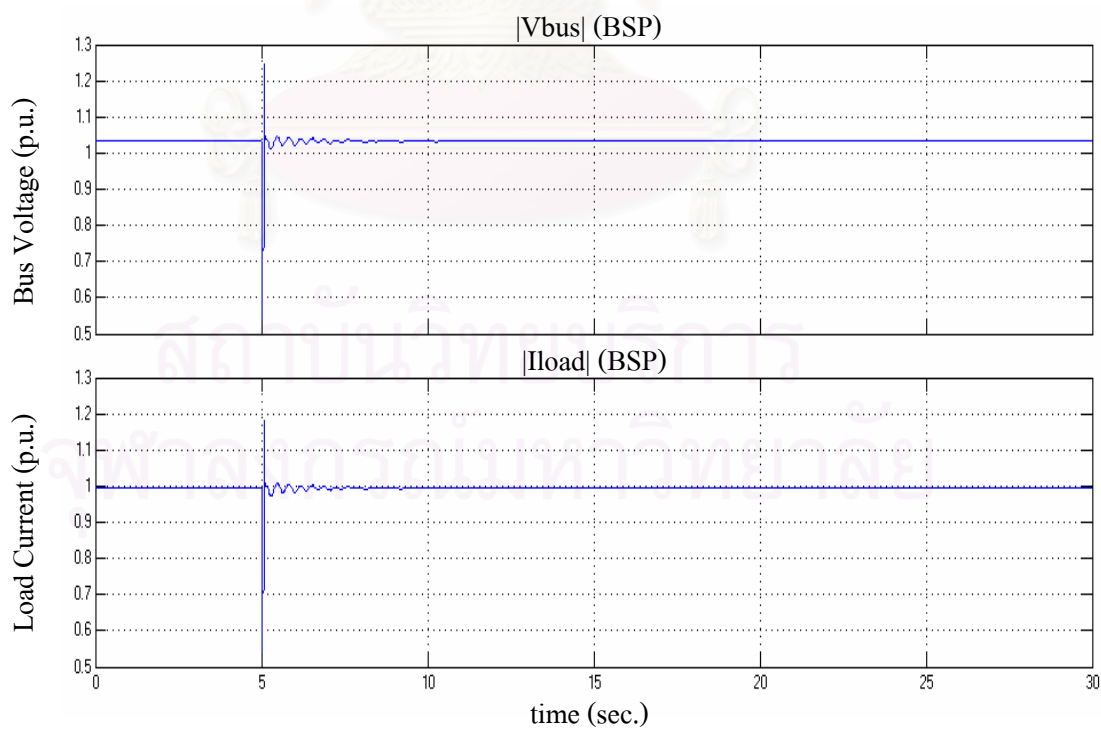


รูปที่ 6.14 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC

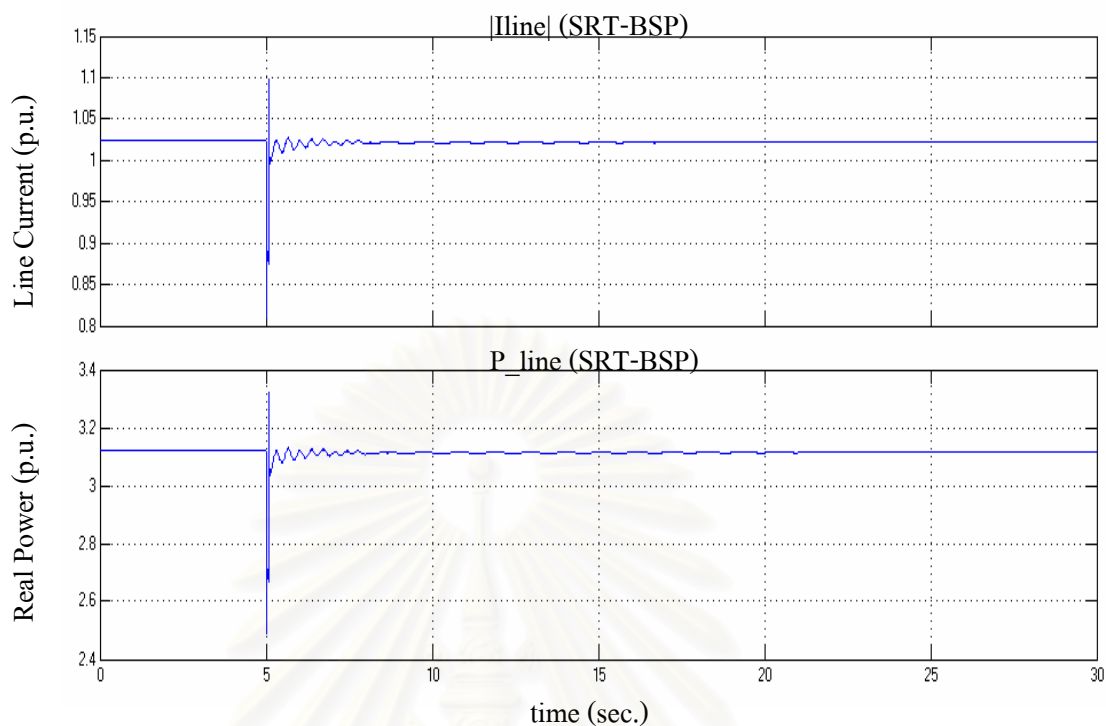




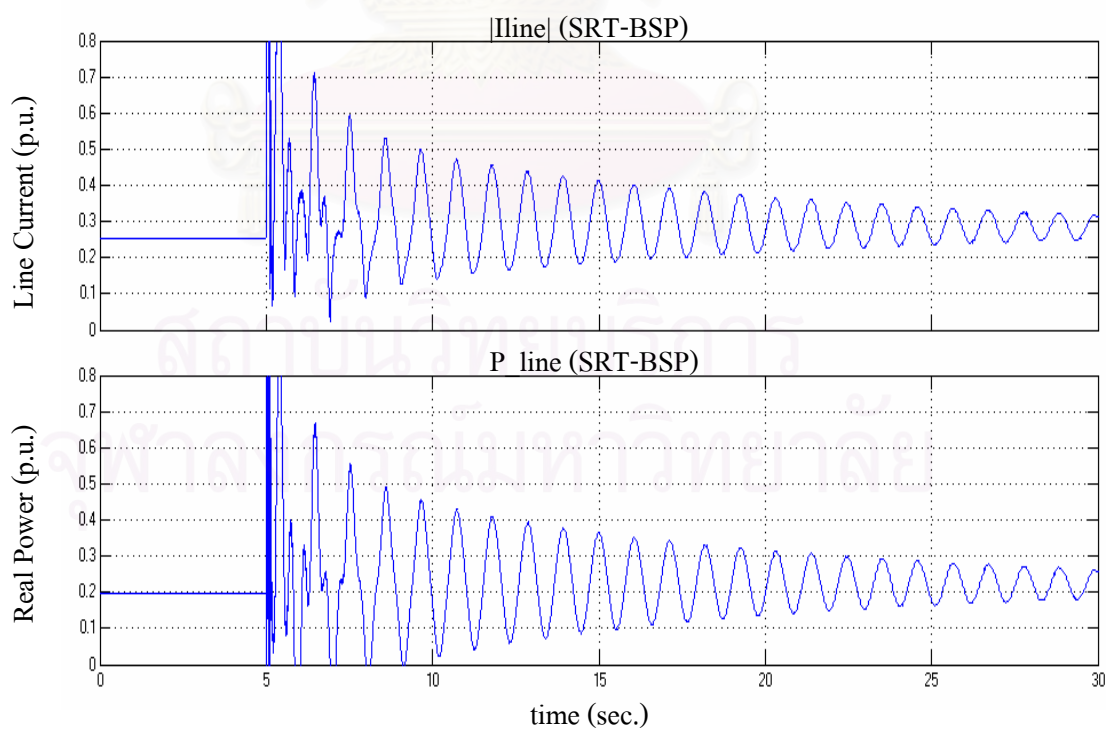
รูปที่ 6.15 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC



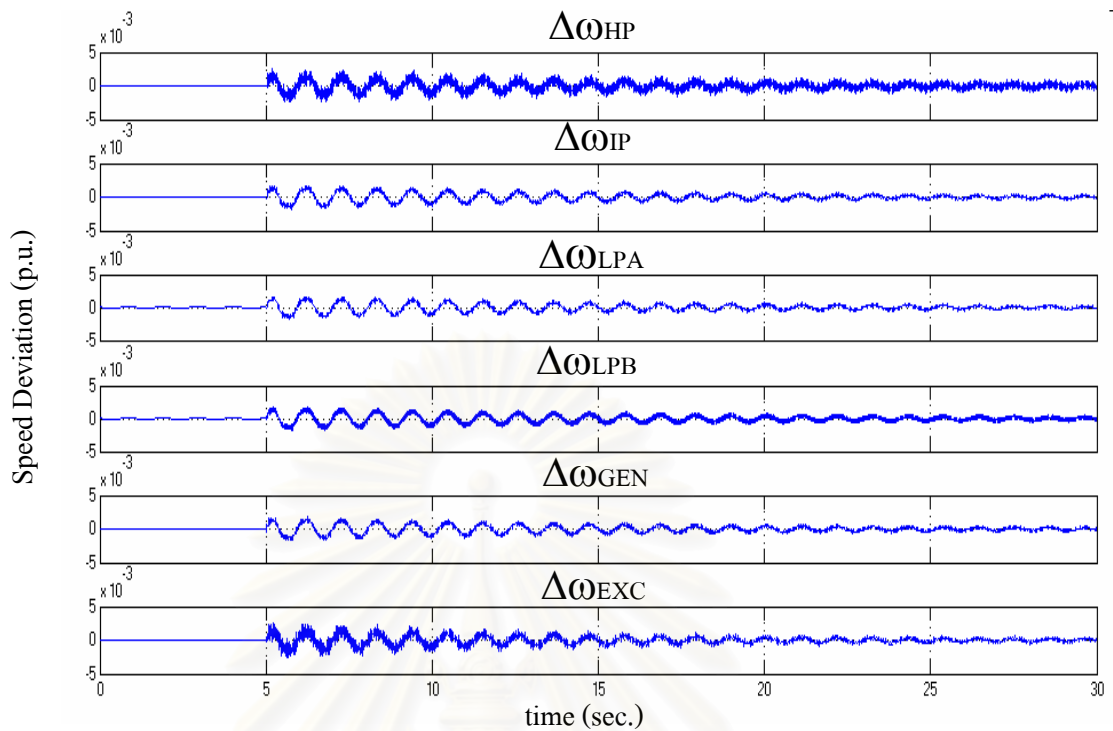
รูปที่ 6.16 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC



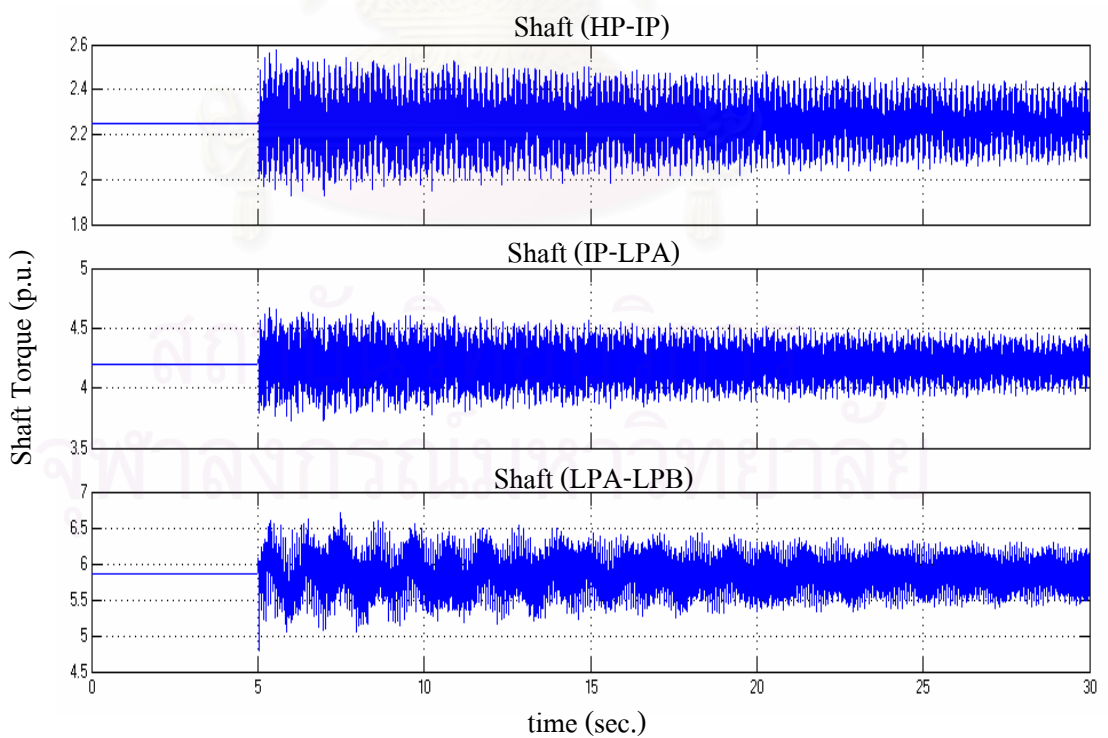
รูปที่ 6.17 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC



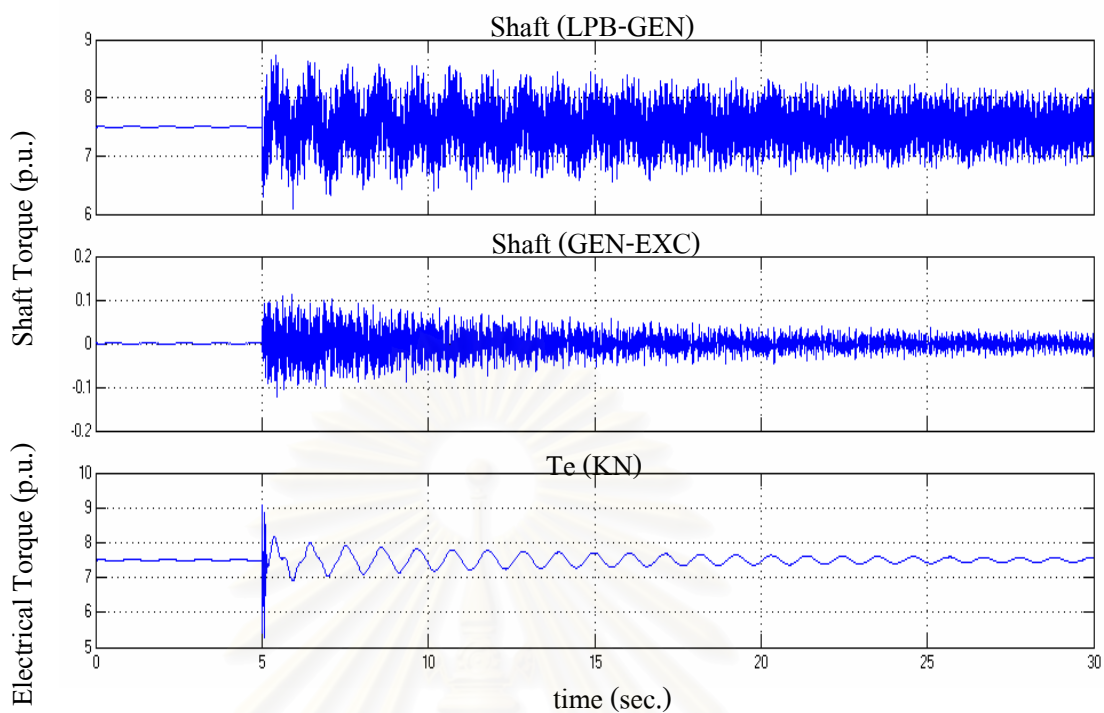
รูปที่ 6.18 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี  
ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC



รูปที่ 6.19 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC

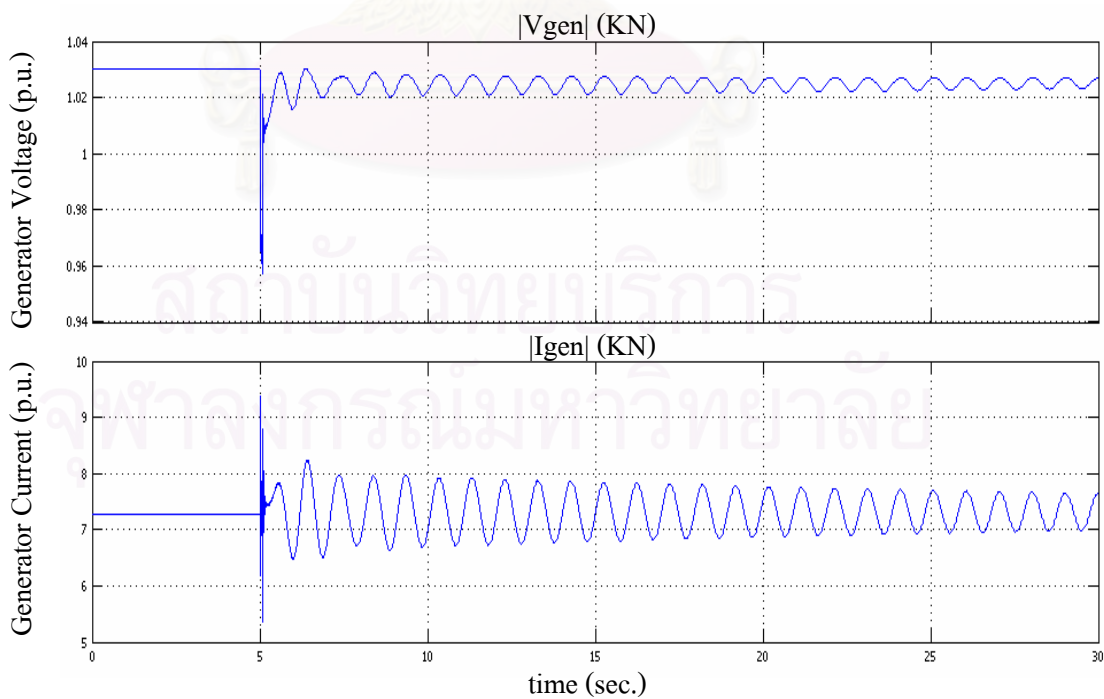


รูปที่ 6.20 แรงบิดทางกลบนเพลาร่วมโยระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB  
จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC

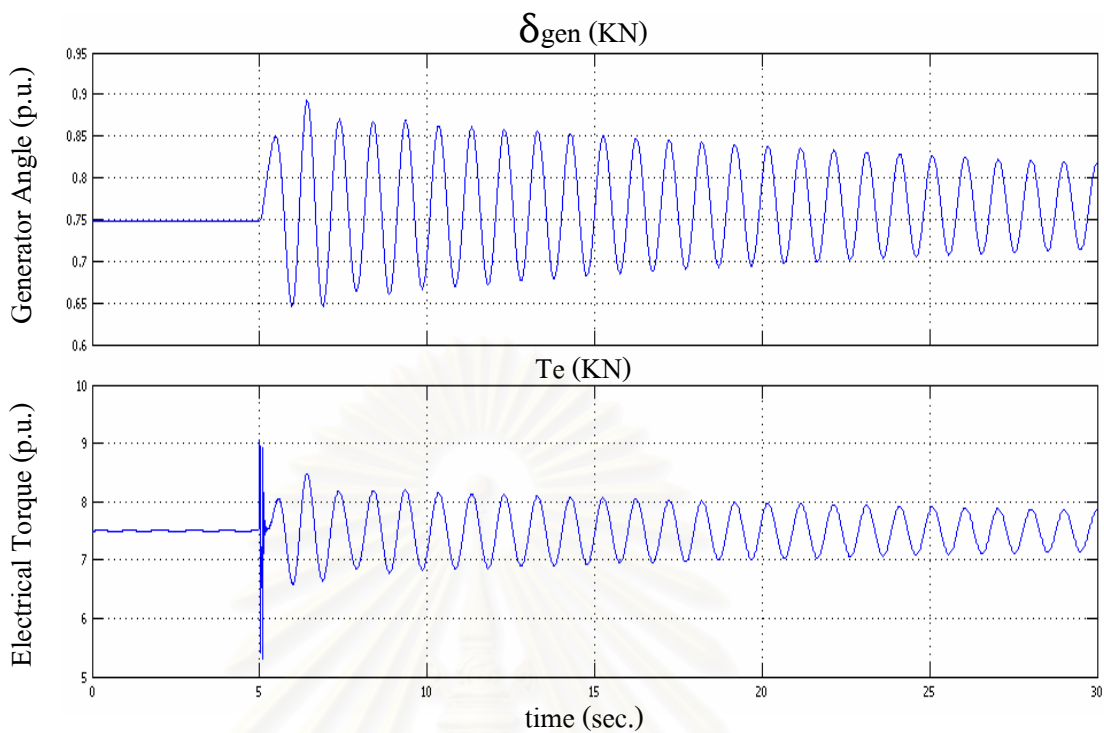


รูปที่ 6.21 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC

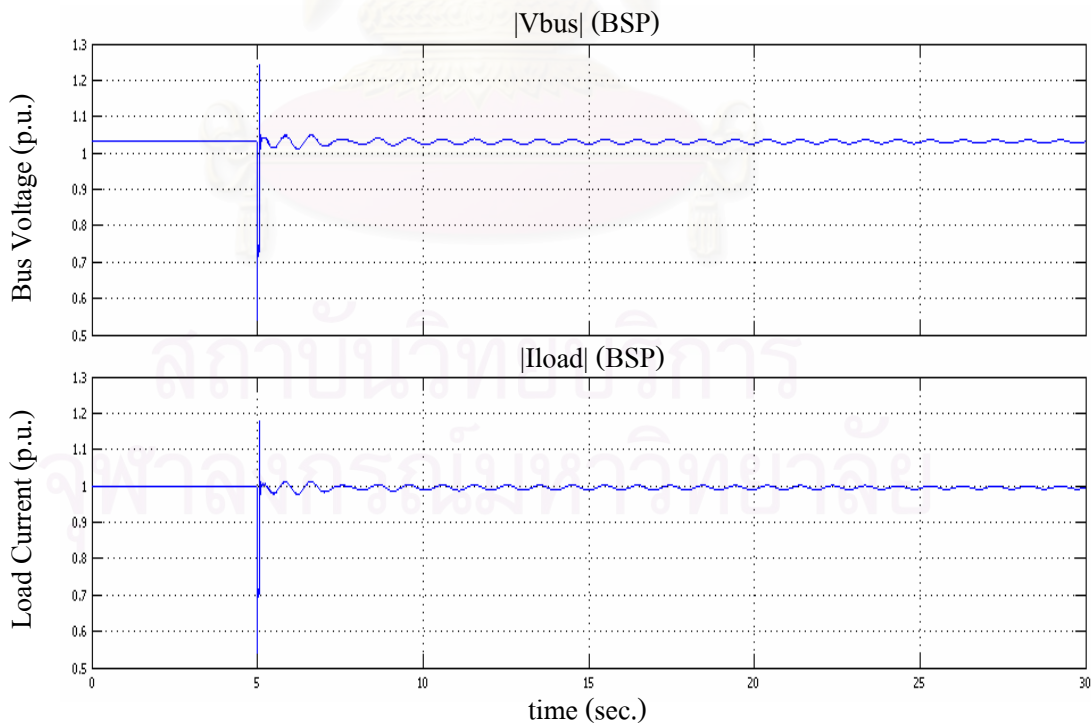
กรณีที่ 3 ที่ระดับการชดเชย 49%



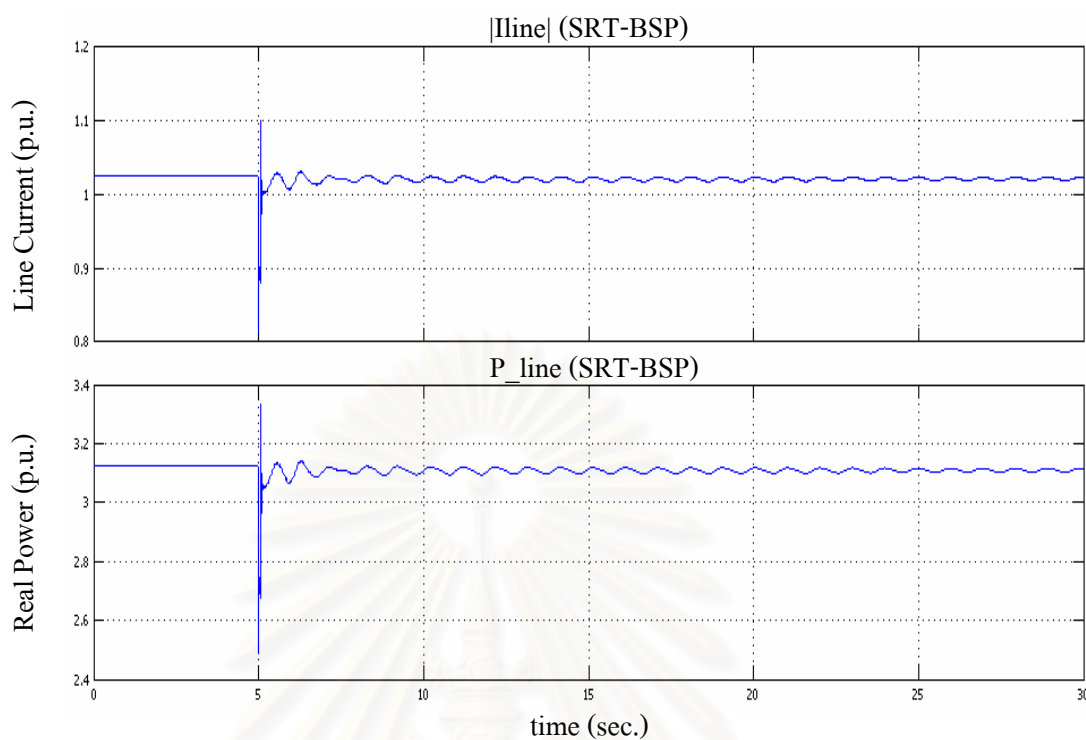
รูปที่ 6.22 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC



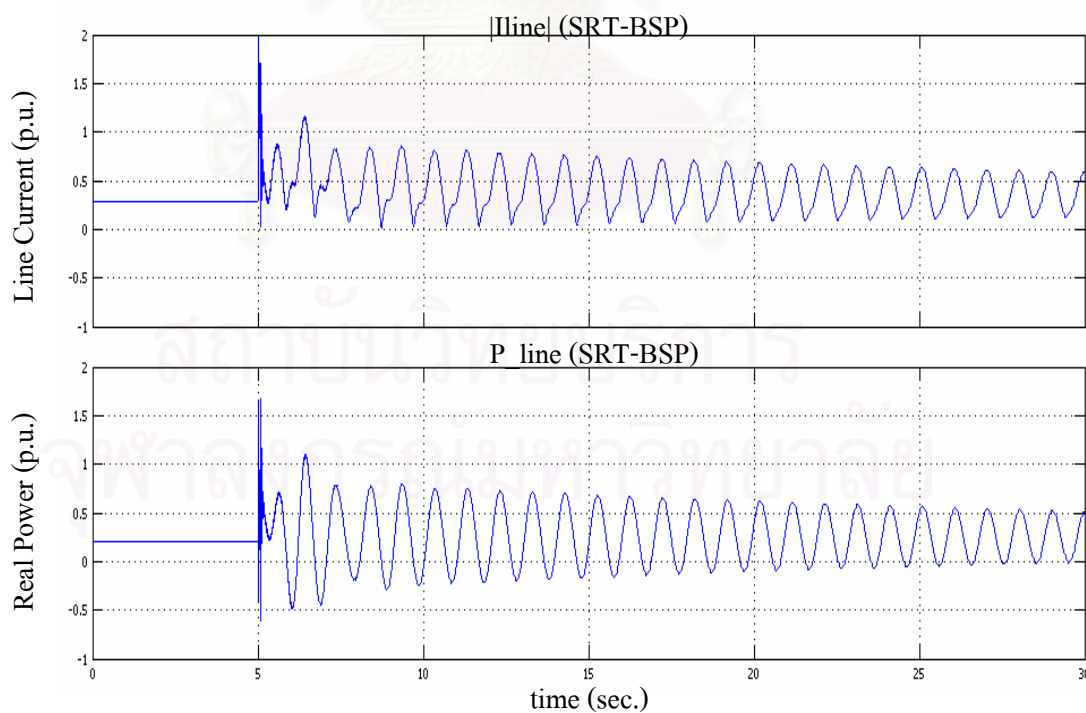
รูปที่ 6.23 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC



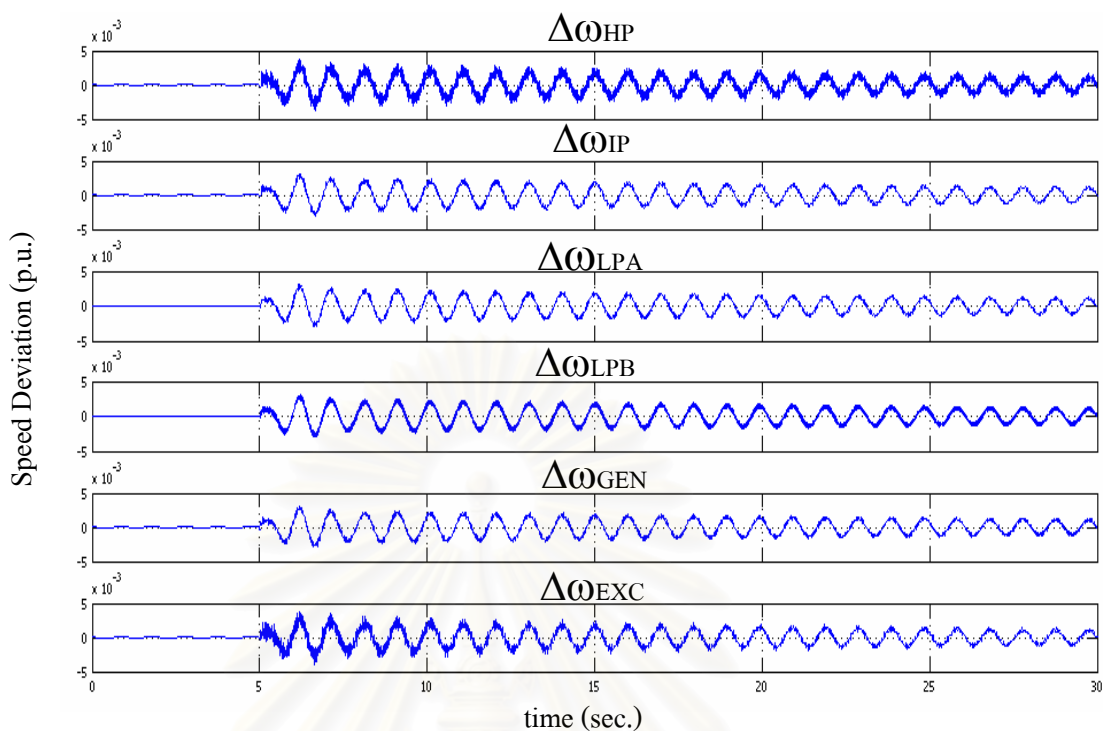
รูปที่ 6.24 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC



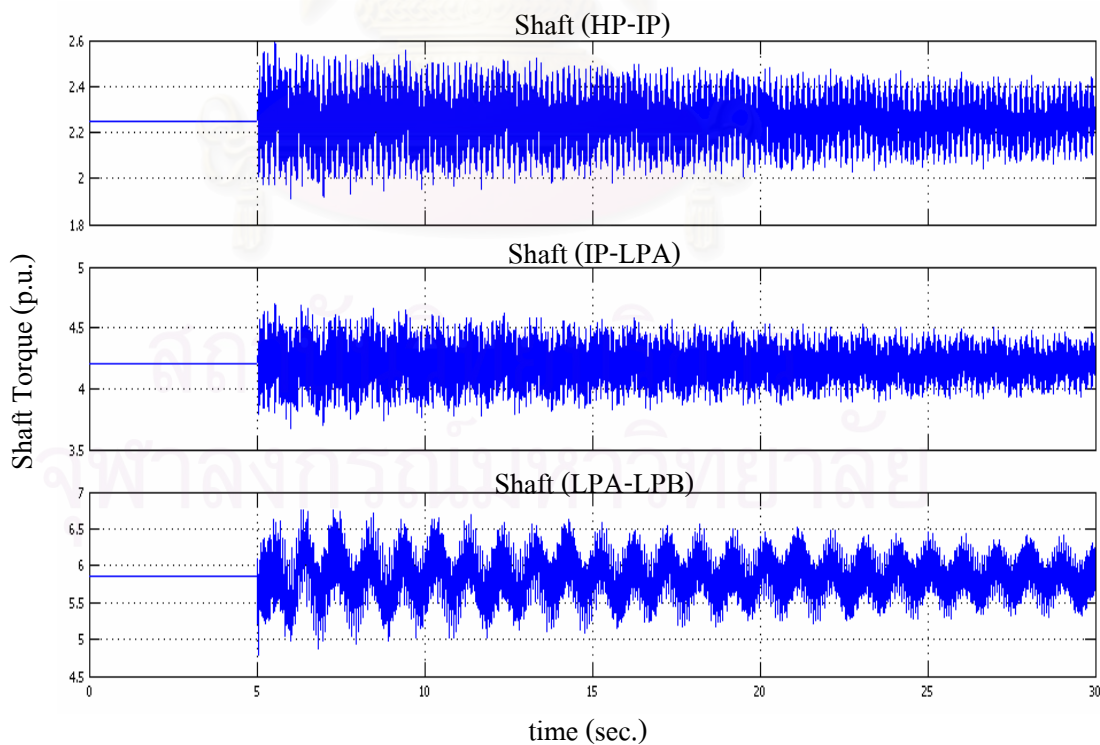
รูปที่ 6.25 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC



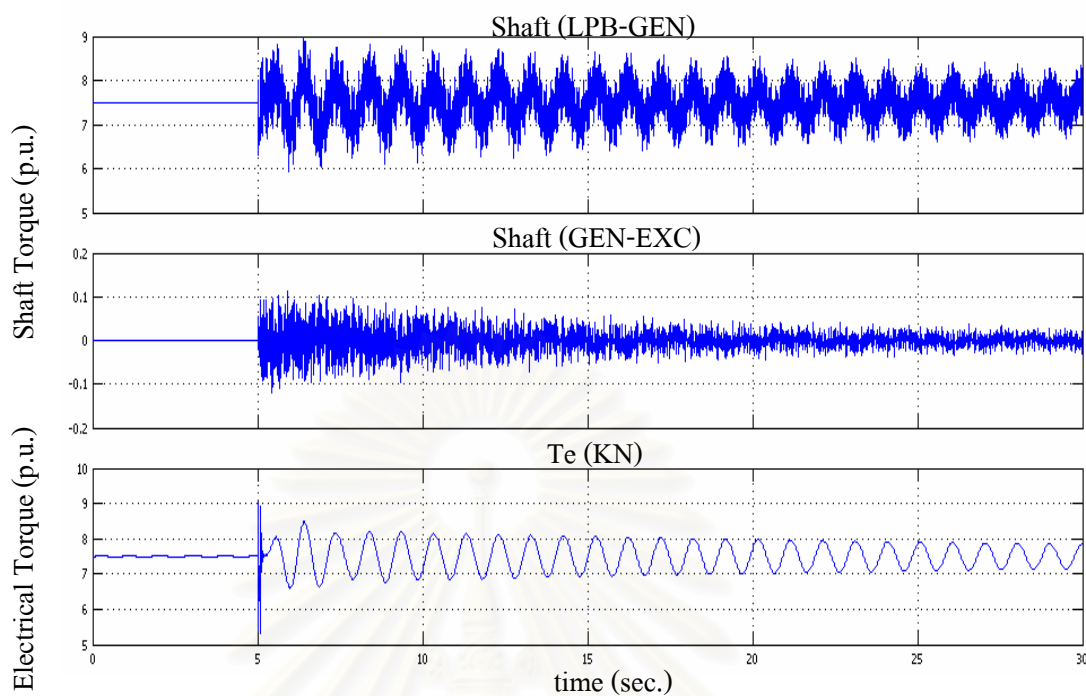
รูปที่ 6.26 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี  
ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC



รูปที่ 6.27 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC

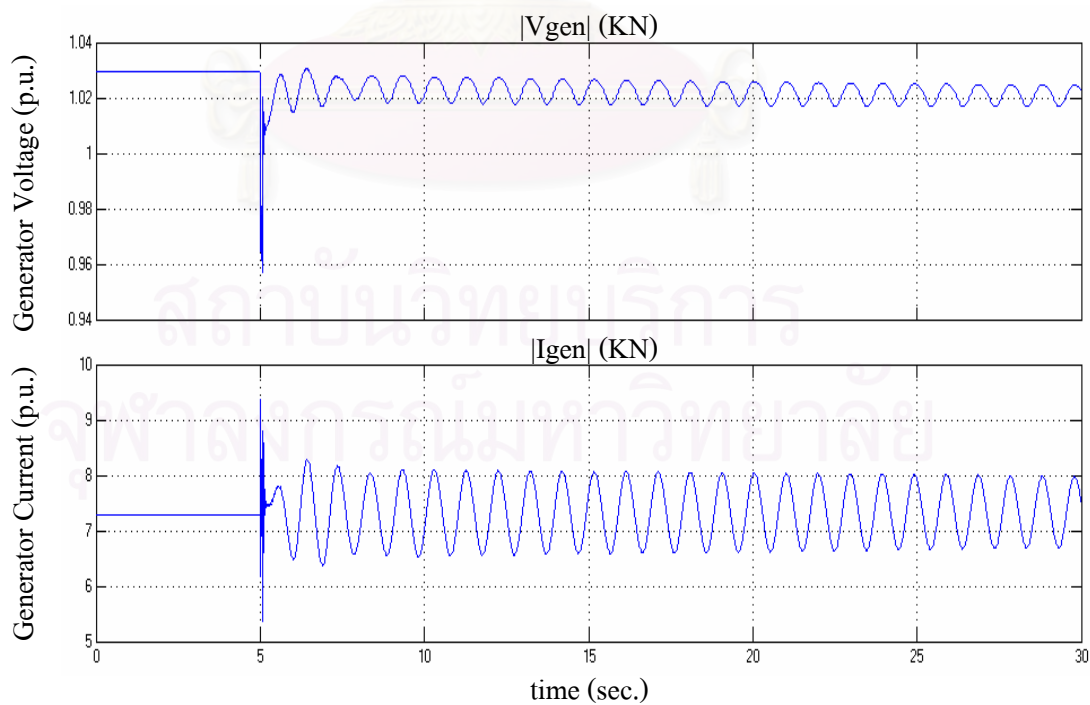


รูปที่ 6.28 แรงบิดทางกลบนเพลาร่วมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB  
จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC



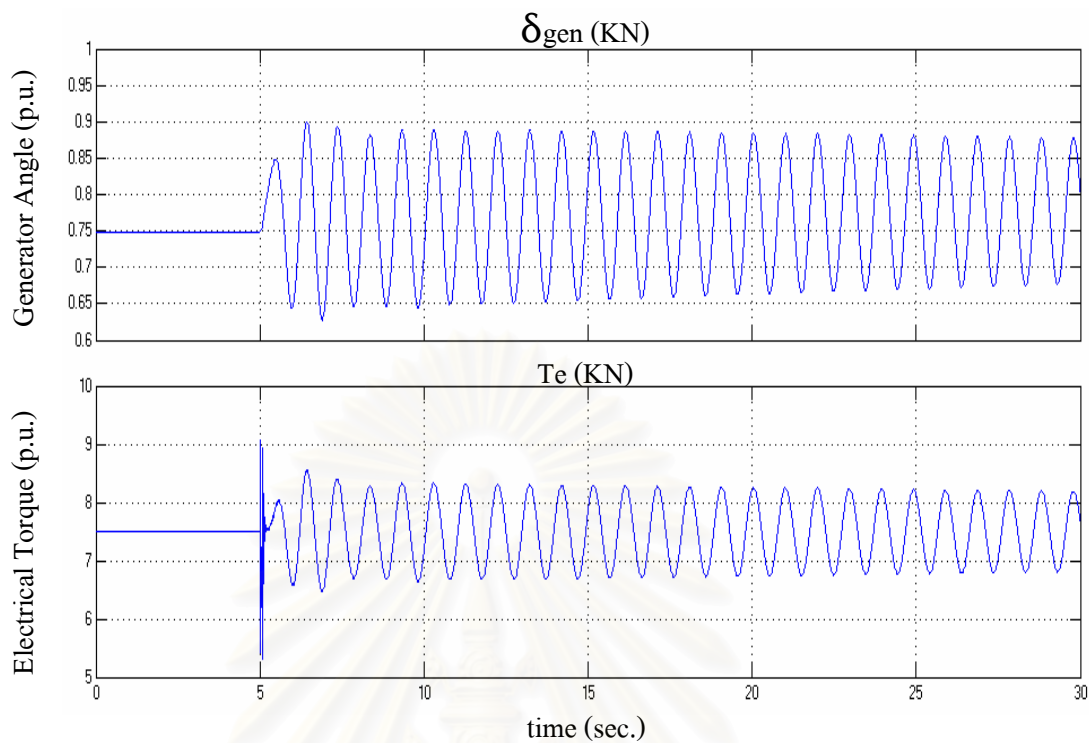
รูปที่ 6.29 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 49% ด้วย TCSC

กรณีที่ 4 ที่ระดับการชดเชย 50%

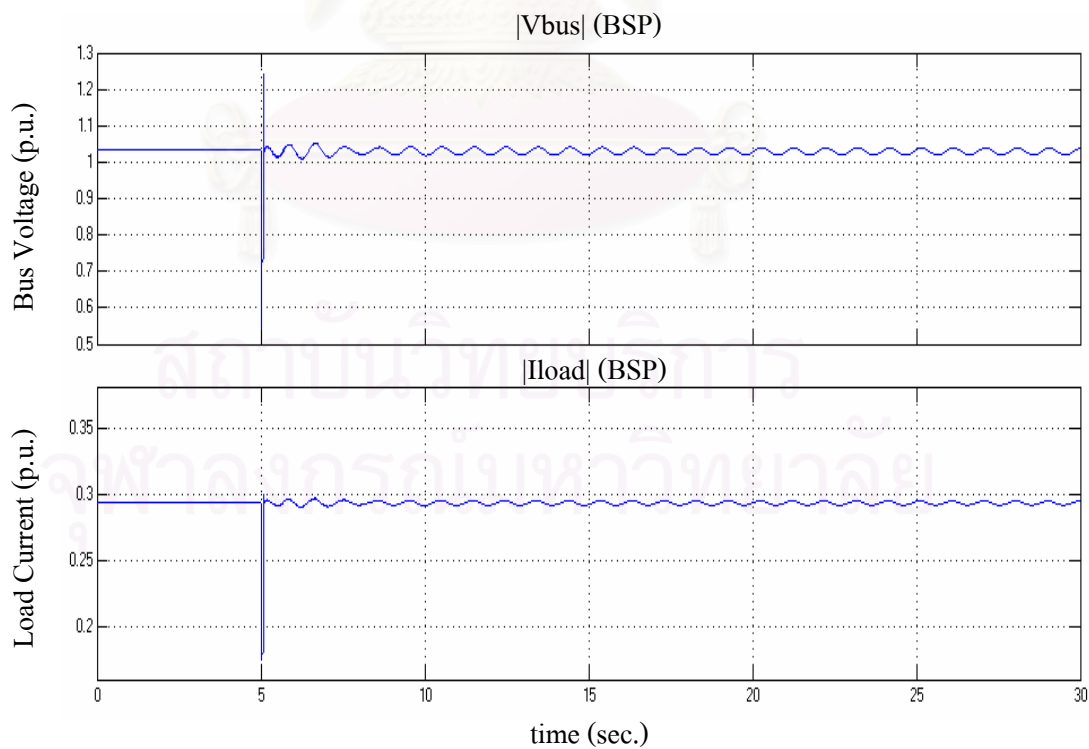


รูปที่ 6.30 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC

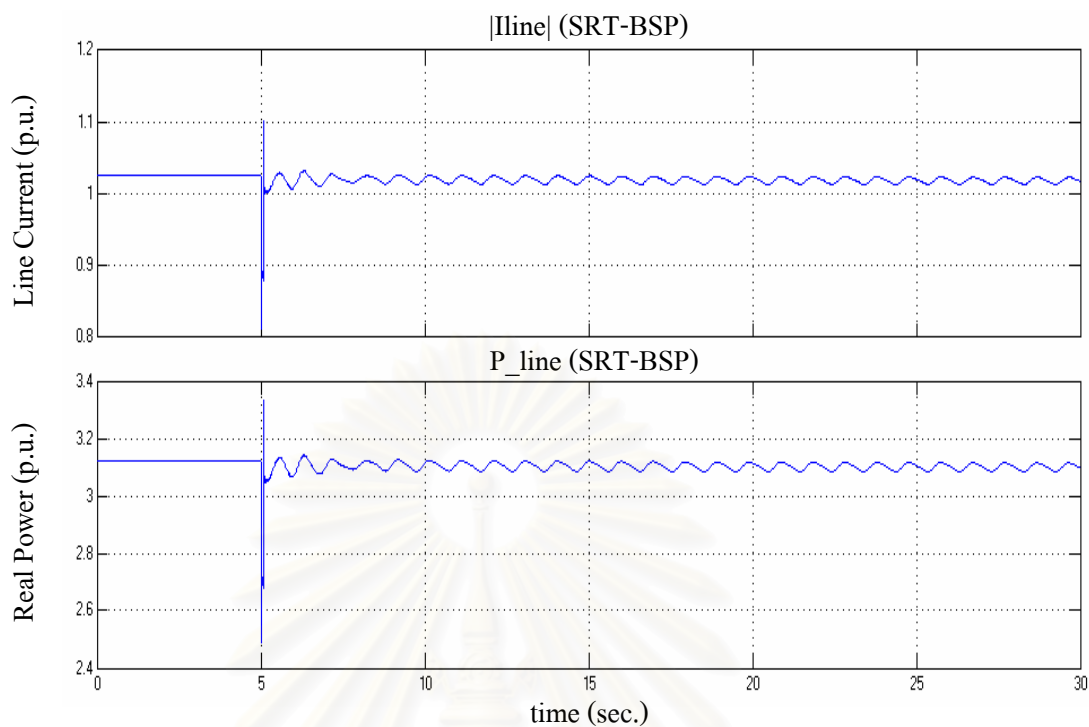




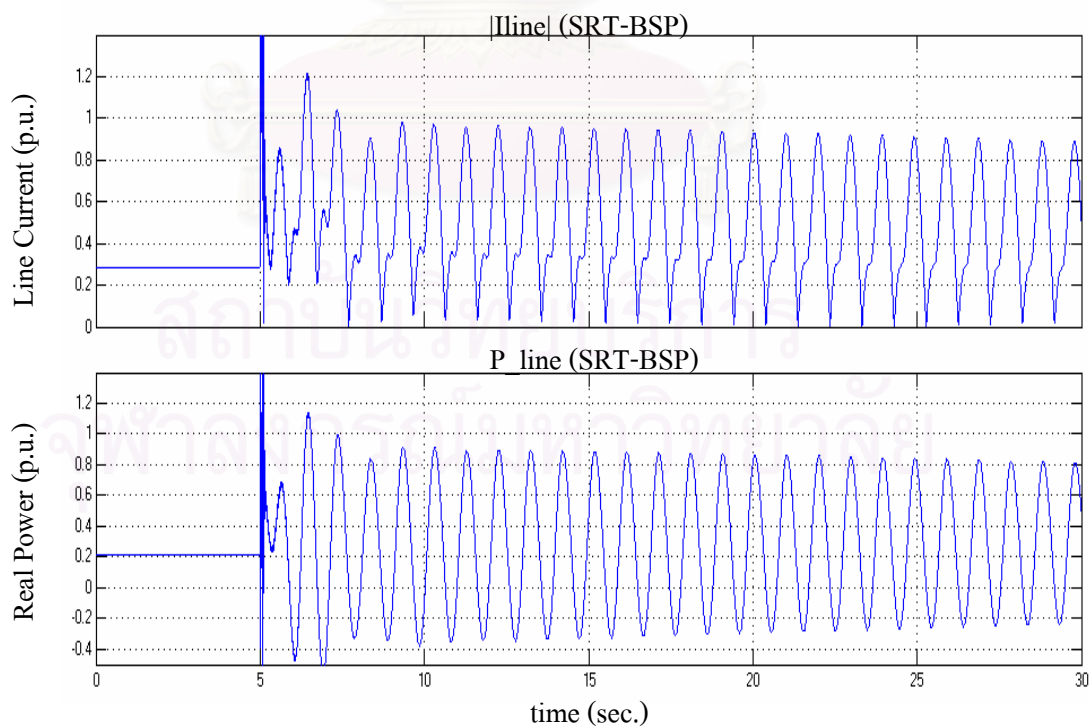
รูปที่ 6.31 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC



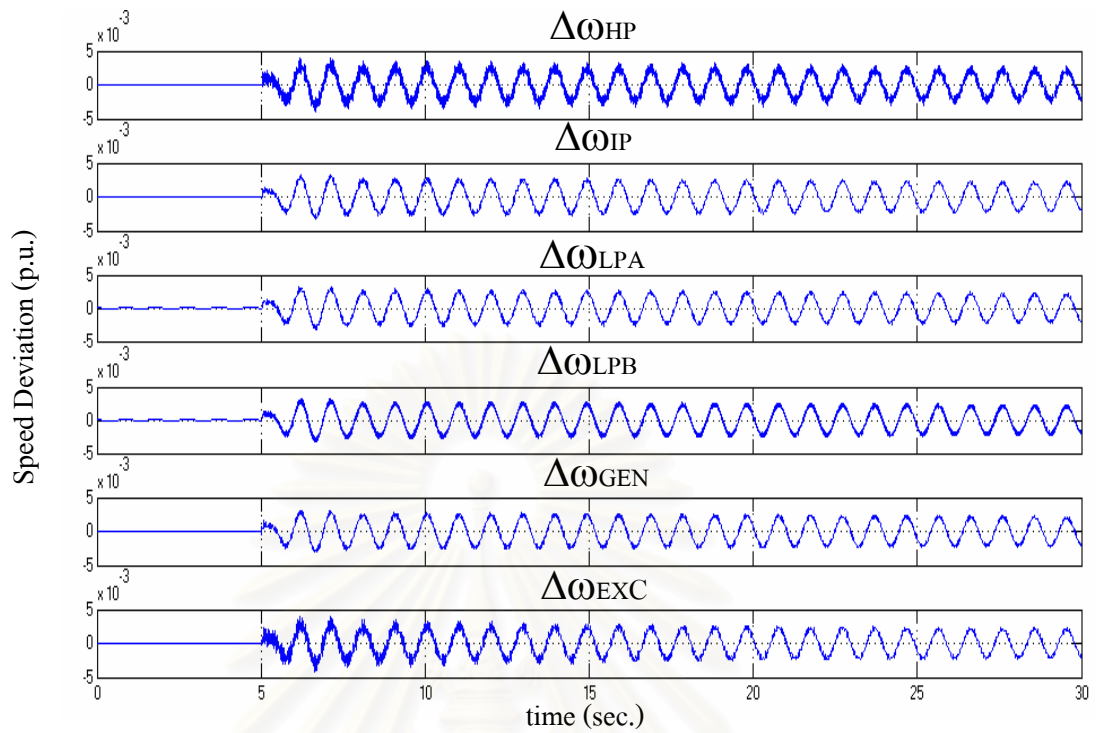
รูปที่ 6.32 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC



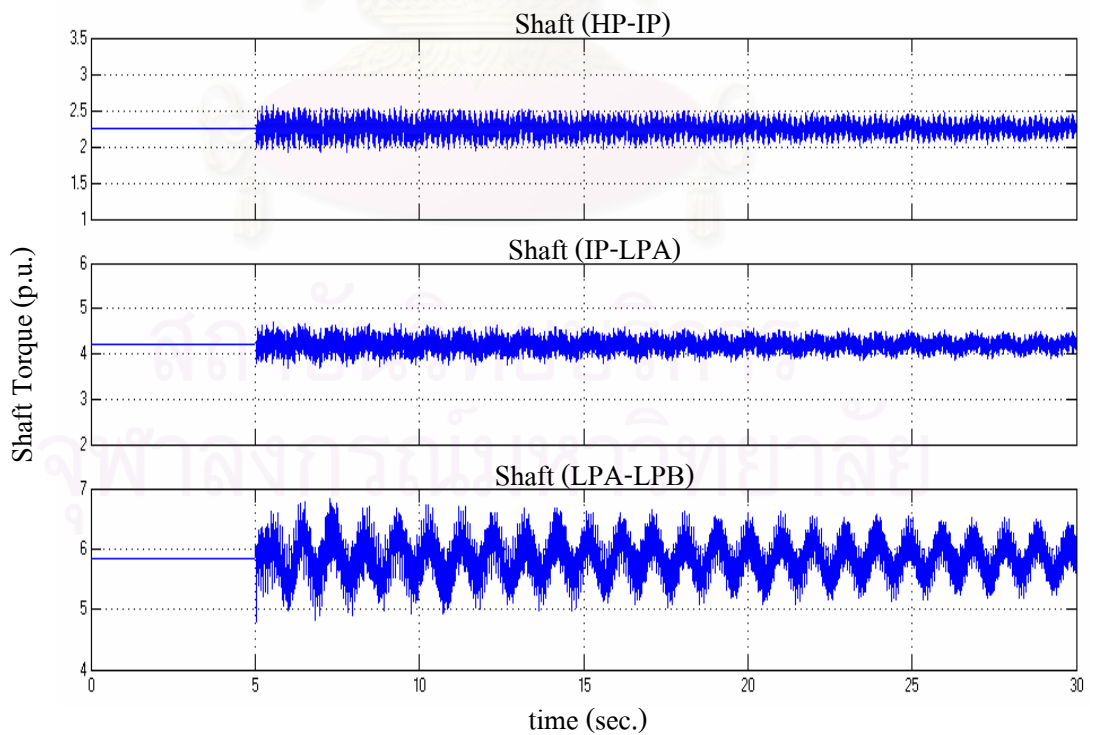
รูปที่ 6.33 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC



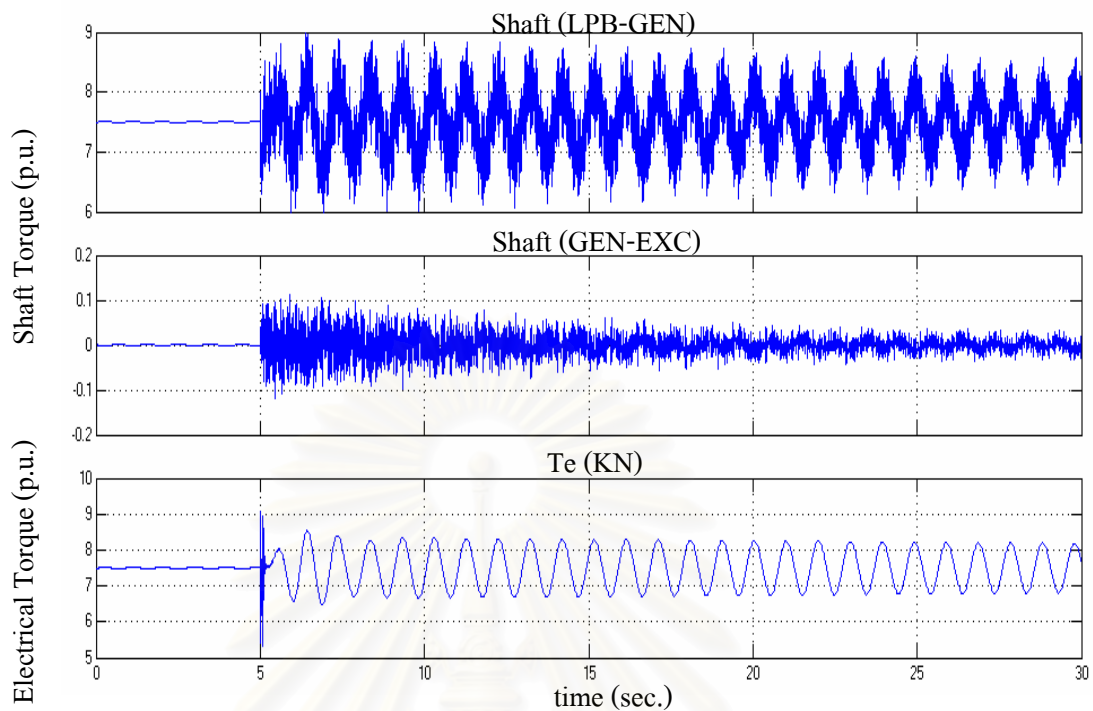
รูปที่ 6.34 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานี  
ไปยังบัสบางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC



รูปที่ 6.35 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC



รูปที่ 6.36 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC



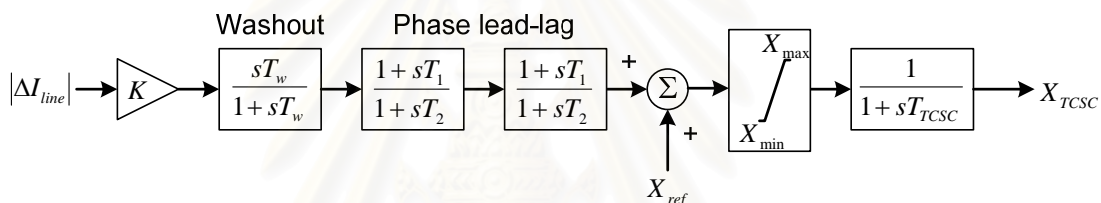
รูปที่ 6.37 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าปั๊มน้ำมัน ที่ระดับการชดเชย 50% ด้วย TCSC

การชดเชยแบบอนุกรมด้วย TCSC สามารถเพิ่มระดับการชดเชยได้ถึง 49% จากเดิมที่ทำได้เพียง 10% เมื่อติดตั้งด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหา SSR เนื่องจากในย่านความถี่ซับซิงโครนัสคาร์รีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC แสดงสถานะเป็นตัวเหนี่ยวนำจึงไม่มีโอกาสเกิดความสอดพ้องทางความถี่ระหว่างระบบไฟฟ้ากับความถี่ของชุดกังหันได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ถึง 6.29 ซึ่งทำการชดเชยด้วย TCSC ที่ 10%, 30 % และ 49% ตามลำดับ ผลคือ หลังถูกรบกวนระบบสามารถกลับเข้าสู่ภาวะปกติได้โดยไม่สูญเสียเสถียรภาพ แม้ว่ากรณี 49% ระบบกลับเข้าสู่ภาวะปกติช้ากว่ากรณีอื่นก็ตาม

เมื่อทำการชดเชยเพิ่มจาก 49% เป็น 50% ดังรูปที่ 6.30 ถึง 6.37 หลังระบบถูกรบกวนปรากฏว่า ปริมาณปริมาณไฟฟ้ามีการแกว่งอย่างรุนแรงซึ่งมีความถี่ของการสั่นอยู่ที่โหมด 0 หรือประมาณ 1 Hz แม้ว่าปริมาณทางกลในรูปที่ 6.35 ถึง 6.37 จะใกล้เคียงกับกรณี 49% ในรูปที่ 6.27 ถึง 6.29 ก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับการชดเชย 50 % เป็นจุดที่ระบบเริ่มสูญเสียเสถียรภาพเมื่อวิเคราะห์จากค่าเงาเงงในรูปที่ 6.3 ซึ่งส่วนจริงของค่าเงาเงงมีค่าต่ำมาก จึงไม่สามารถสังเกตเห็นการขยายของปริมาณทางไฟฟ้าในช่วงเวลาหลังถูกรบกวนถึงเวลา 30 วินาทีได้

6.3 แบบจำลองการควบคุมเชิงพลวัตเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (POD) สำหรับ TCSC

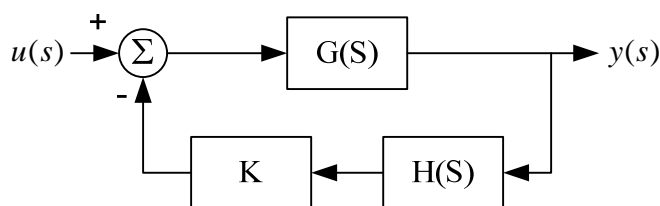
เมื่อ TCSC ไม่ก่อให้เกิดปัญหา SSR แต่เกิดปัญหาเฉพาะโหมด 0 ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตวัตถุประสงค์ของการศึกษา ในที่นี้จึงพิจารณาเฉพาะชุดควบคุมเสริมเพื่อให้ TCSC สามารถตอบสนองที่สถานะชั่วขณะหลังเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ โดยชุดควบคุมดังกล่าวนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Oscillation Damping: POD) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของชุดควบคุมที่นิยมใช้กับ TCSC ดังรูปที่ 6.38 [8] ประกอบด้วย Washout และแบบชดเชยเฟสนำหน้า-ล่าช้า (Phase lead-lag compensation) ซึ่งหน้าที่หลักของ Washout คือลดผลกระทบเนื่องจากส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Component) ของสัญญาณป้อนเข้า และการชดเชยนำหน้า-ล่าช้า (Phase Lead-Lag Compensation) เพื่อชดเชยความถี่ที่ต้องการควบคุม สำหรับการตอบสนองของ TCSC มีค่าคงที่ ( $T_{TCSC}$ ) ประมาณ 15-20 ms



รูปที่ 6.38 โครงสร้างตัวควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ TCSC

สัญญาณป้อนเข้าชุดควบคุมสำหรับ TCSC สามารถใช้ได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Active power flow) หรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายเส้นที่ติดตั้งอุปกรณ์ตัวนี้ หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม TCSC ในการศึกษาี้เลือกสัญญาณป้อนเข้าเป็นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่างบัสบางสะพานและบัสสุราษฎร์ธานี ในที่นี้ได้ศึกษาวิธีคำนวณพารามิเตอร์ของชุดควบคุม POD ด้วยวิธีหาค่าเรซิดิว (Residue method) [26,27] จากการแยกเศษส่วนย่อยของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นใดๆ ดังรูปที่ 6.39 เมื่อ  $G(s)$  คือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นที่พิจารณา,  $H(s)$  คือฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุม และ  $K$  คือค่าอัตราขยายของชุดควบคุม สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นสามารถแสดงในรูปของการแยกเศษส่วนย่อยดังสมการที่ (6.4)

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_i}{(s - \lambda_i)} \right] \tag{6.4}$$



รูปที่ 6.39 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้น

จากสมการที่ (6.4) องค์ประกอบของส่วนต่างๆ หลังการแยกเศษส่วนย่อยประกอบด้วยค่าเรซิดิว ( $R_i$ ) ในโหมดที่  $i^{th}$  และโพลของเรซิดิวซึ่งสัมพันธ์กับค่าเจาะจง ( $\lambda_i$ ) ของโหมดที่  $i^{th}$  ในการศึกษาี้ทำการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในโหมด 0 ดังนั้นเทอมที่พิจารณาสำหรับการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับชุดควบคุมคือ  $\frac{R_0}{(s - \lambda_0)}$  เพื่อเพิ่มอัตราการหน่วงในโหมดดังกล่าวด้วยชุดควบคุม POD และสามารถแสดงวิธีการออกแบบเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดควบคุมดังสมการที่ (6.5) และสมการที่ (6.6) ตามลำดับ [27] โดยปกติแล้วการออกแบบชุดควบคุมชดเชยเฟสนำหน้า-ล่าหลัง จะแบ่งออกเป็นชุดควบคุมย่อย ( $m$ ) ซึ่งกำหนดให้แต่ละชุดทำการควบคุมไม่เกิน 60 องศา [26] รายละเอียดการคำนวณพารามิเตอร์ของชุดควบคุม POD แสดงในภาคผนวก ง.

$$KH(s) = K \frac{sT_w}{1 + sT_w} \left[ \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right]^m \quad (6.5)$$

$$K = \frac{|\lambda_{0,des} - \lambda_0|}{|R_0 H(\lambda_0)|} \quad (6.6)$$

โดยที่

$$\phi = 180^\circ - \arg(R_0), \quad \tau = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1 - \sin(\phi/m)}{1 + \sin(\phi/m)}, \quad T_1 = \tau \cdot T_2, \quad T_2 = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{\tau}}$$

เมื่อ  $\arg(R_0)$  คือ มุมเฟสของเรซิดิวในโหมด 0

$\omega_0$  คือ ความถี่ของค่าเจาะจงโหมดที่ 0 ( $\lambda_0 = \sigma_0 \pm j\omega_0$ )

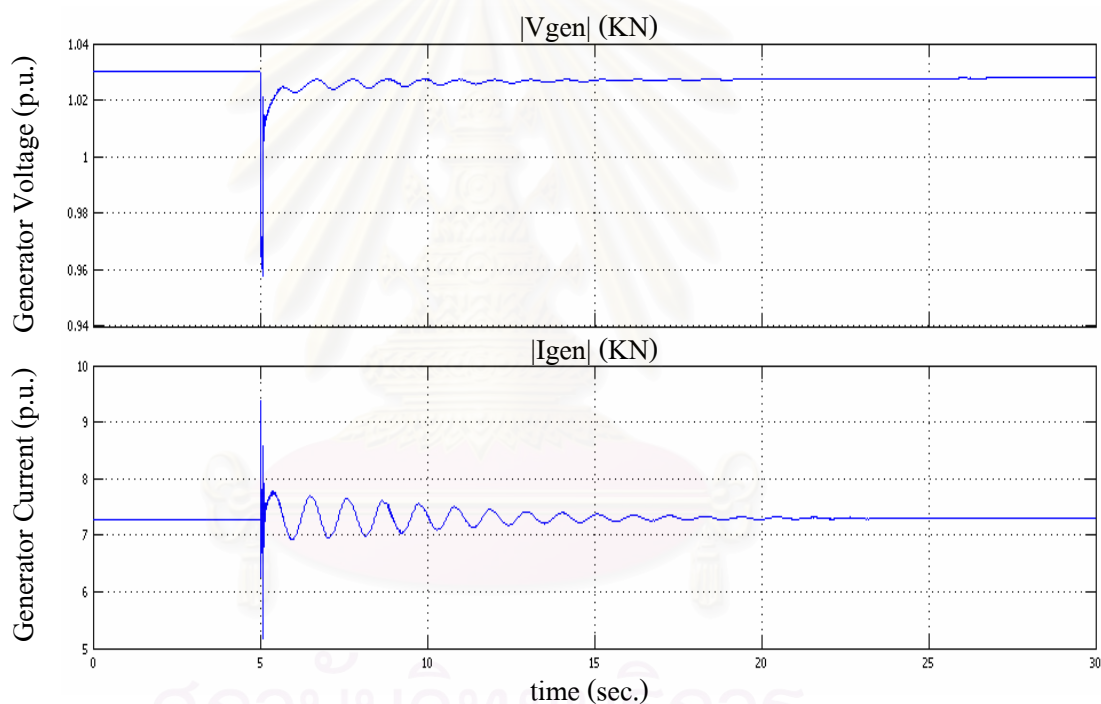
$m$  คือ จำนวนชุดควบคุมชดเชยเฟสนำหน้า-ล่าหลัง

$\lambda_{0,des}$  คือ ตำแหน่งค่าเจาะจงที่ออกแบบเพื่อทำการควบคุมในโหมด 0

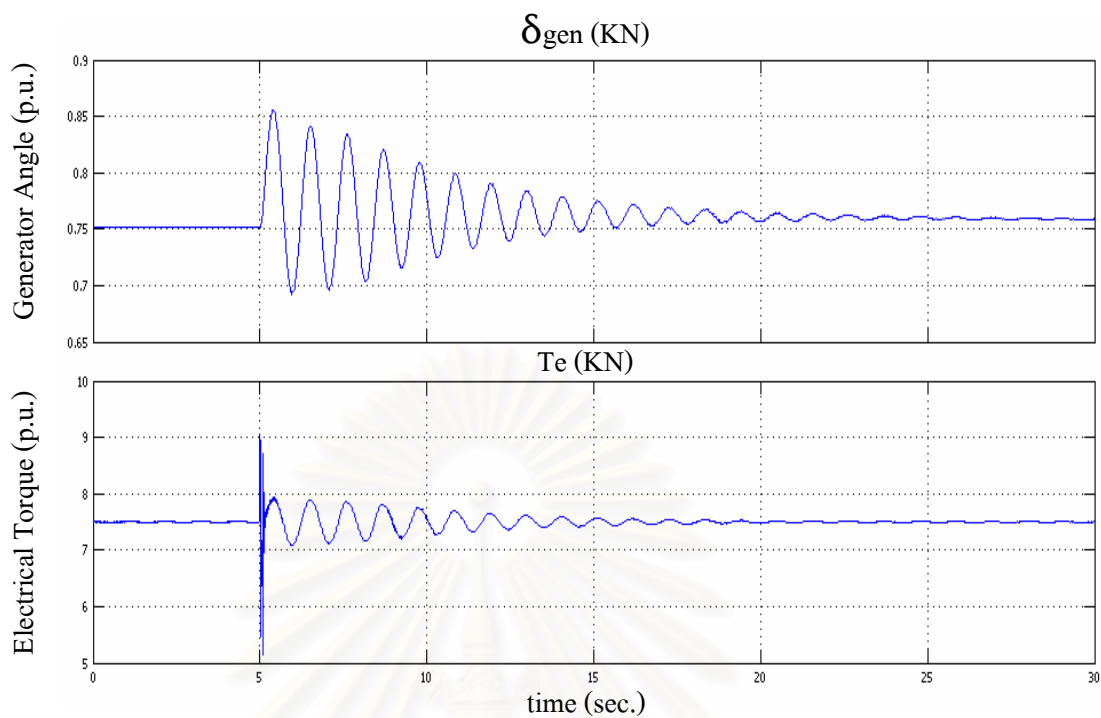
#### 6.4 ผลการทดสอบด้วยชุดควบคุม POD

การศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตเมื่อติดตั้ง TCSC กับระบบภาคได้นั้น ทำการศึกษาที่ระดับการชดเชยเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ ตั้งแต่ระดับการชดเชยที่ไม่เกิดปัญหา SSR คือ ที่ระดับการชดเชย 10% และระดับการชดเชยที่เกิดปัญหา SSR คือ 30% สำหรับกรณีระดับการชดเชยอื่นๆ ไม่นำมาพิจารณา เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของสัญญาณต่างๆ ในระบบไฟฟ้าและระบบทางระหว่างตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่กับ TCSC ที่กระทบต่อชุดกักกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอมเป็นสำคัญ

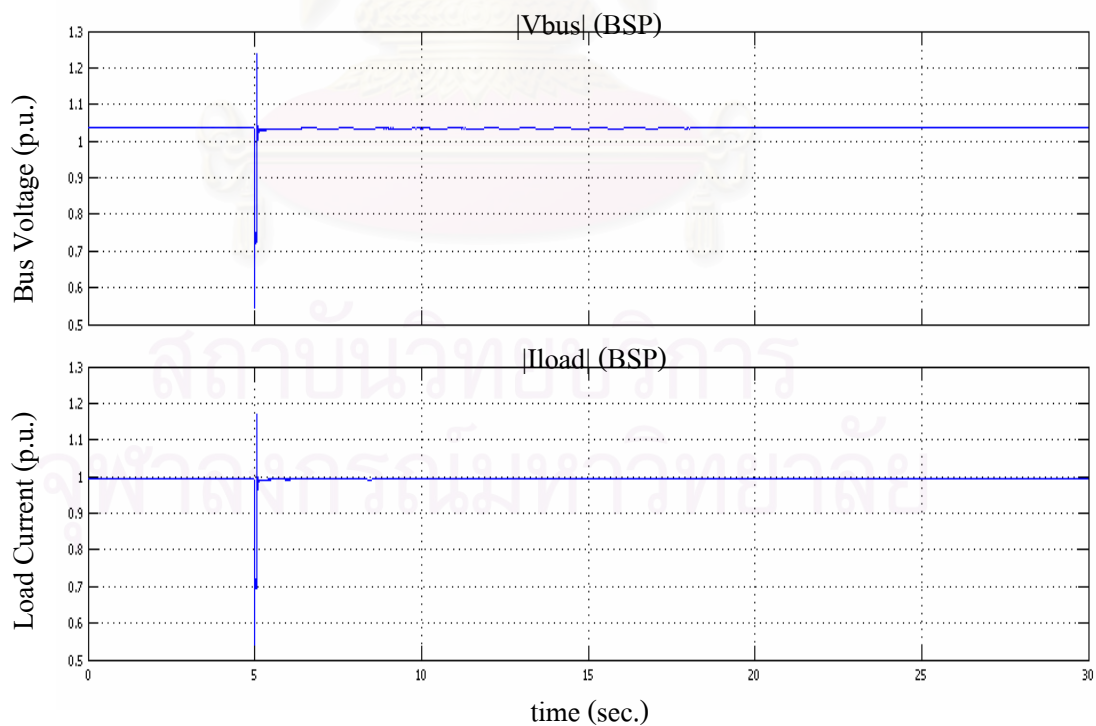
##### กรณีที่ 1 ที่ระดับการชดเชย 10%



รูปที่ 6.40 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD

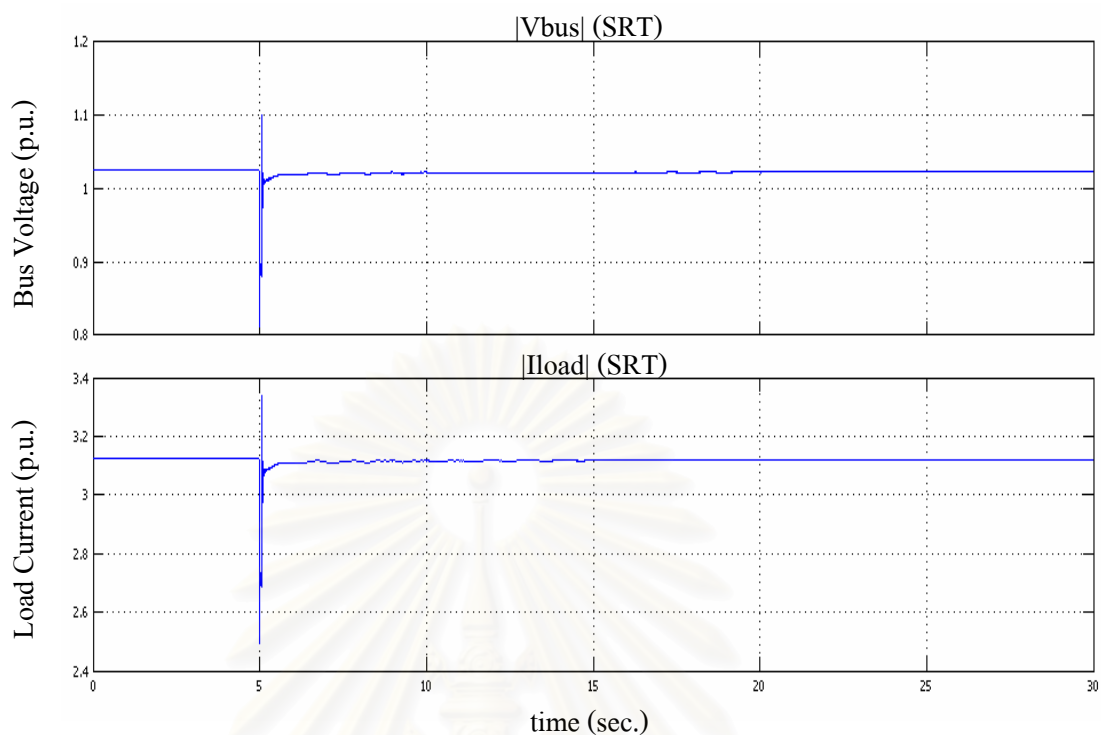


รูปที่ 6.41 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD

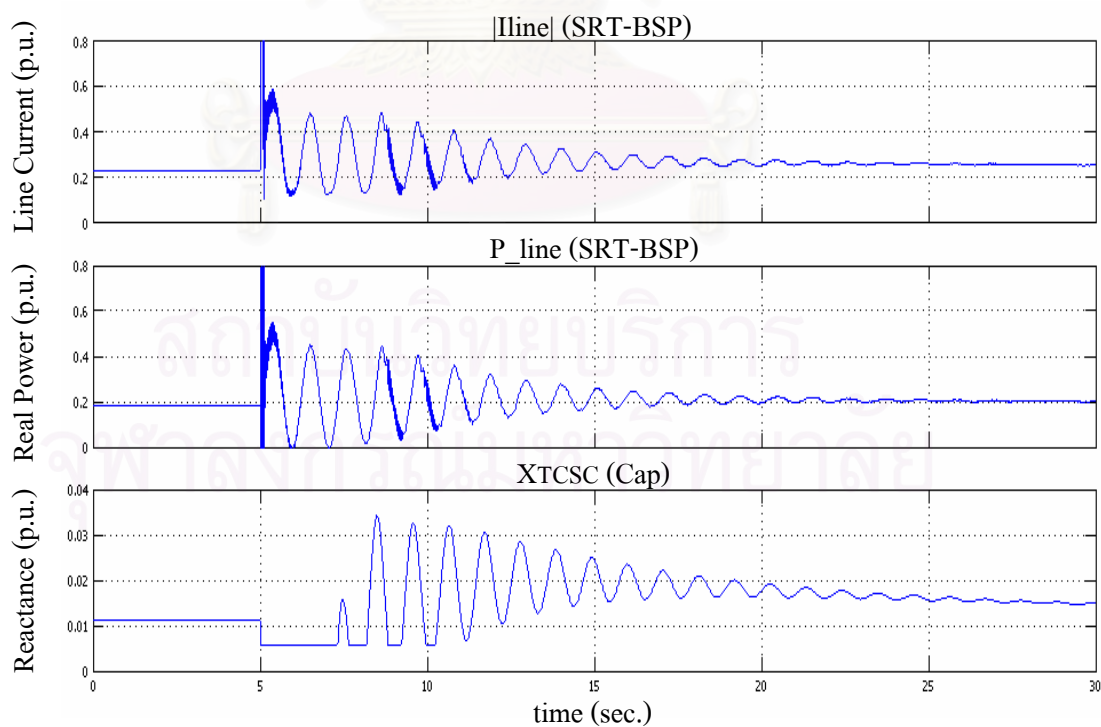


รูปที่ 6.42 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD

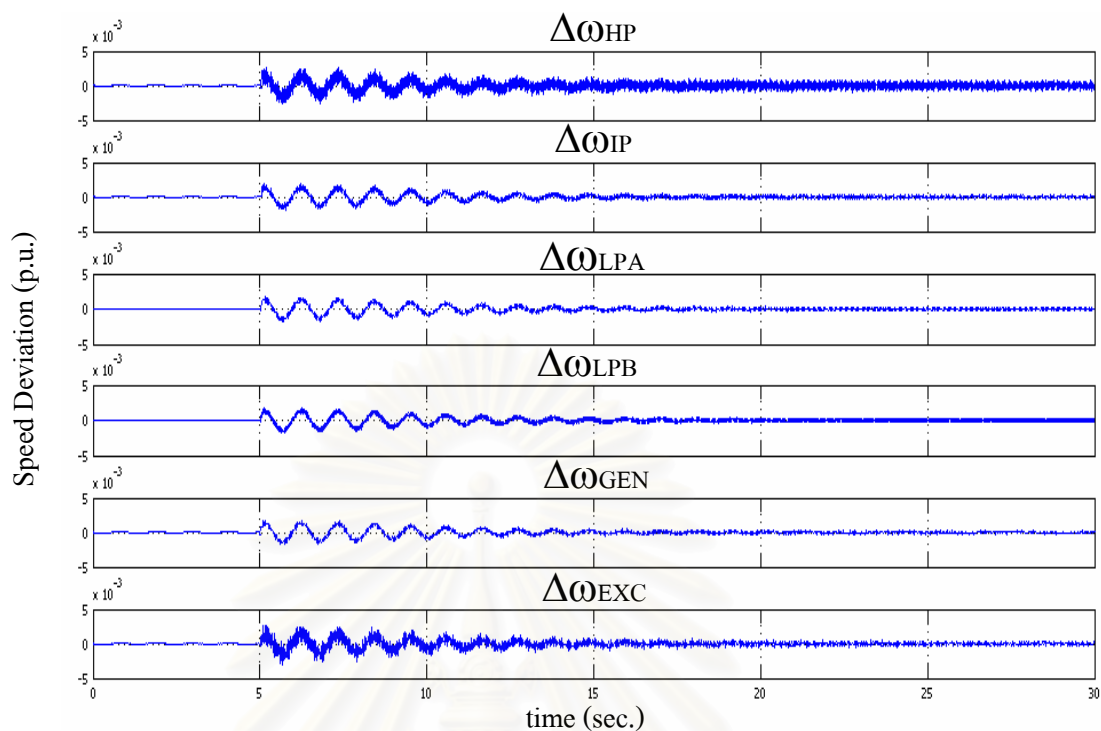




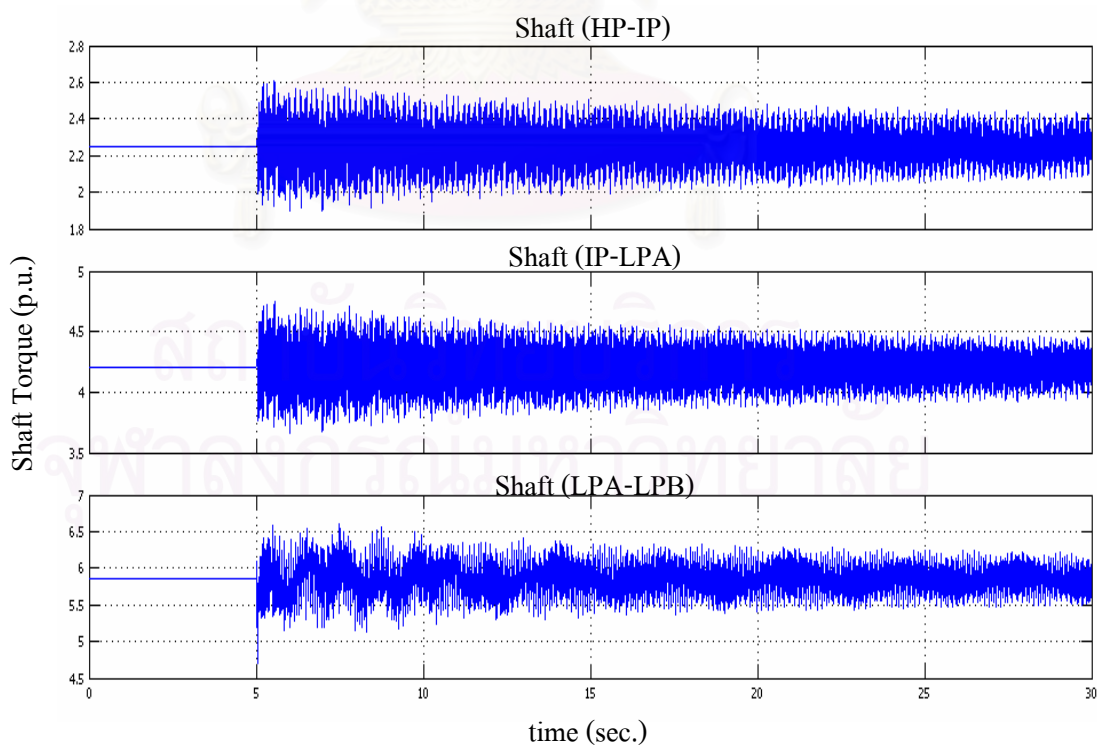
รูปที่ 6.43 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



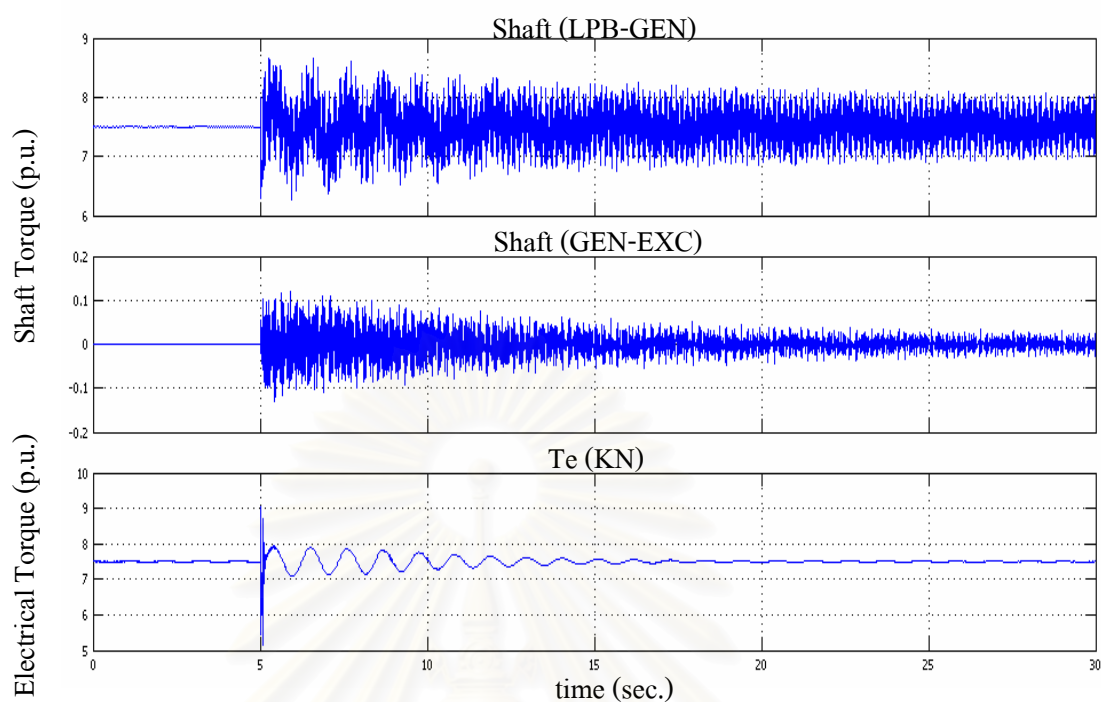
รูปที่ 6.44 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานีไปยังบัส  
บางสะพาน และ  $X_{TCSC}$  ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



รูปที่ 6.45 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD

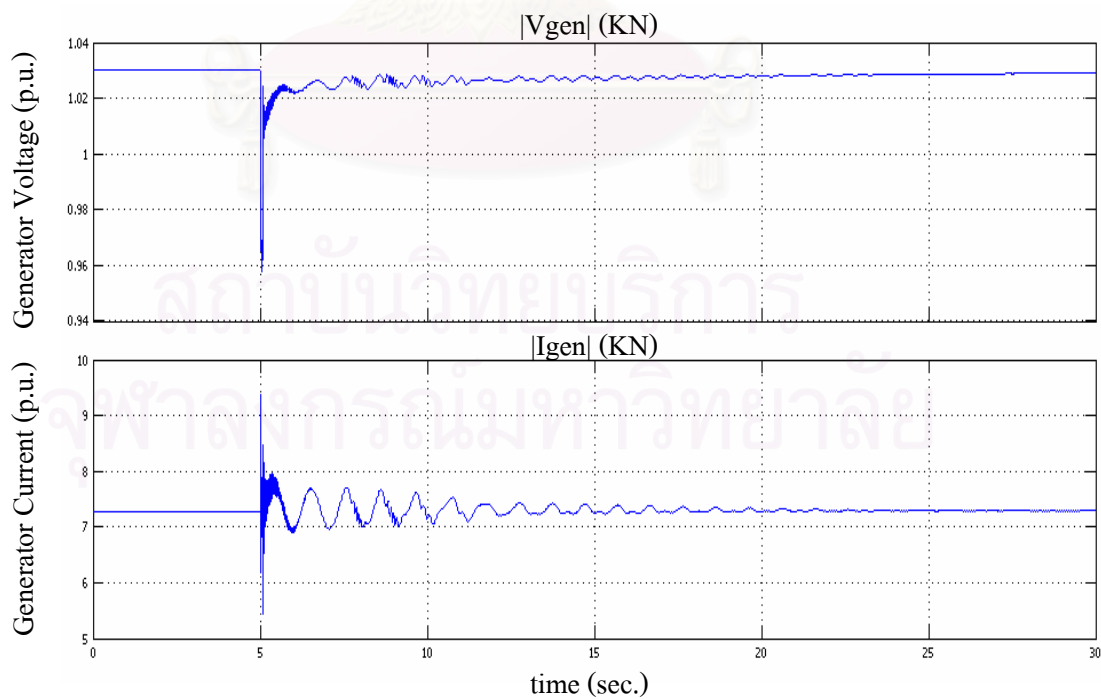


รูปที่ 6.46 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
บัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD

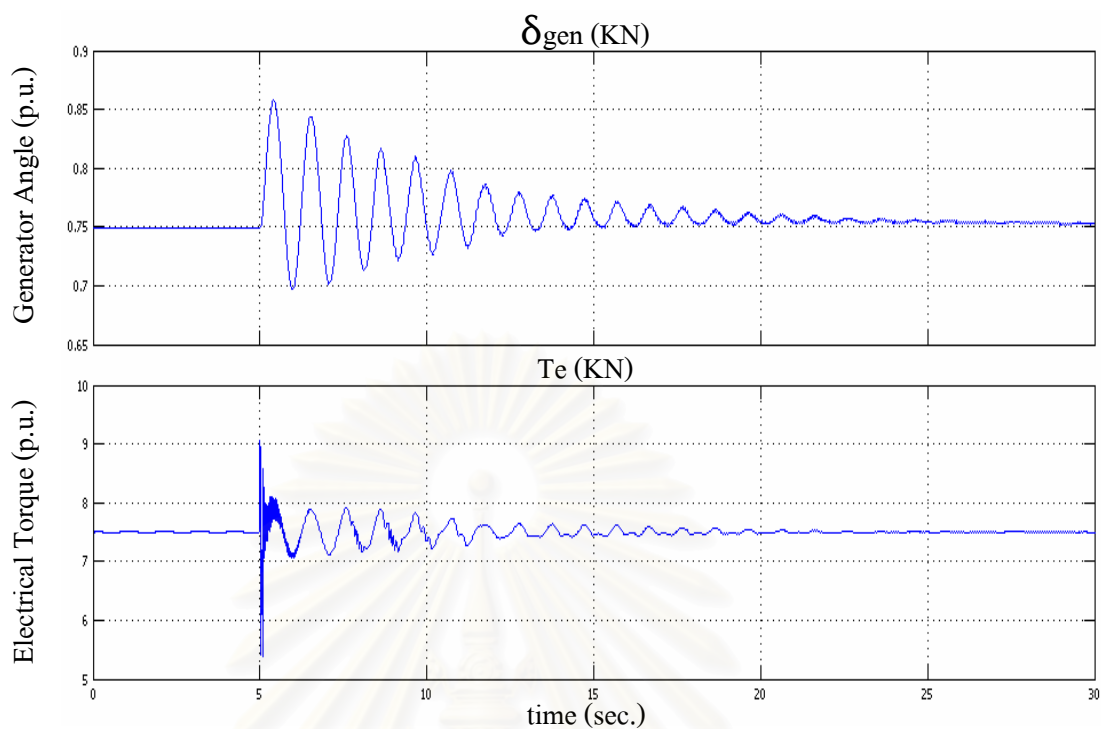


รูปที่ 6.47 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 บัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 10% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD

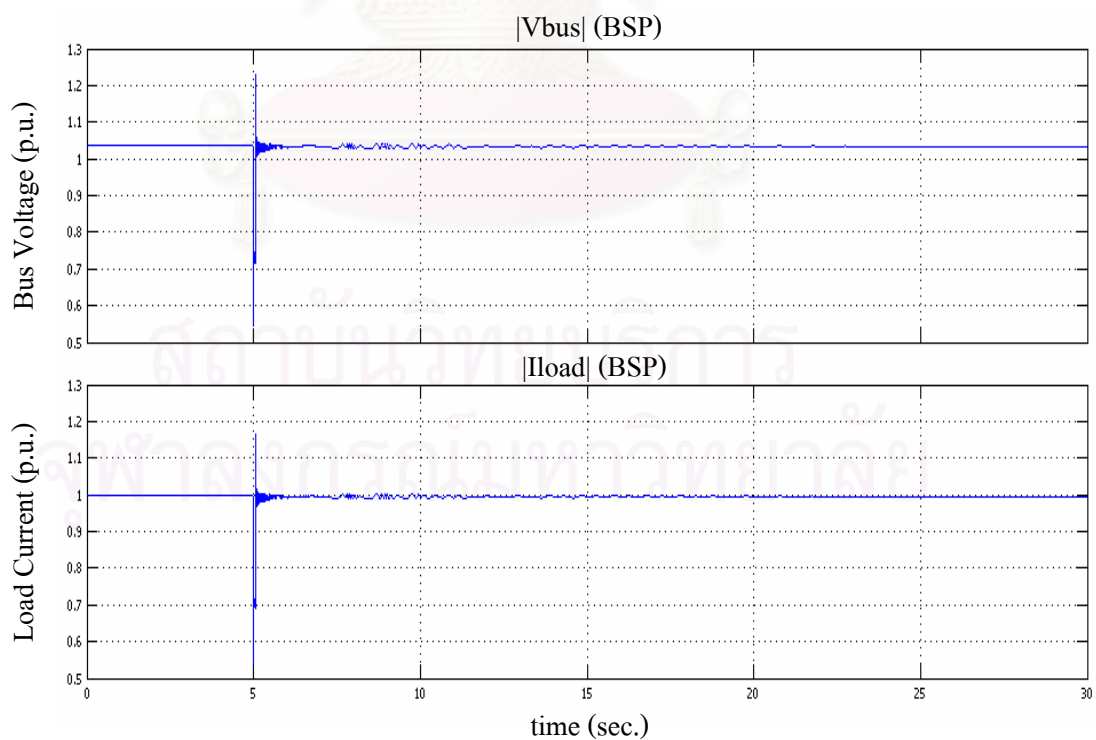
กรณีที่ 2 ที่ระดับการชดเชย 30%



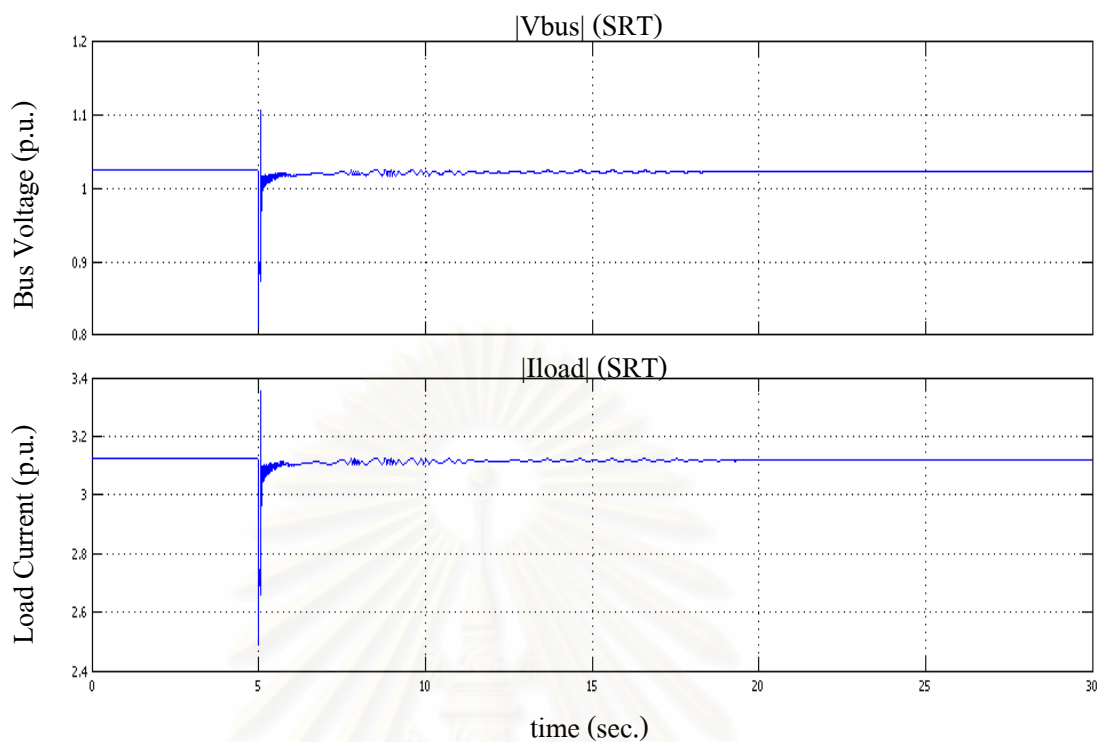
รูปที่ 6.48 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
 ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



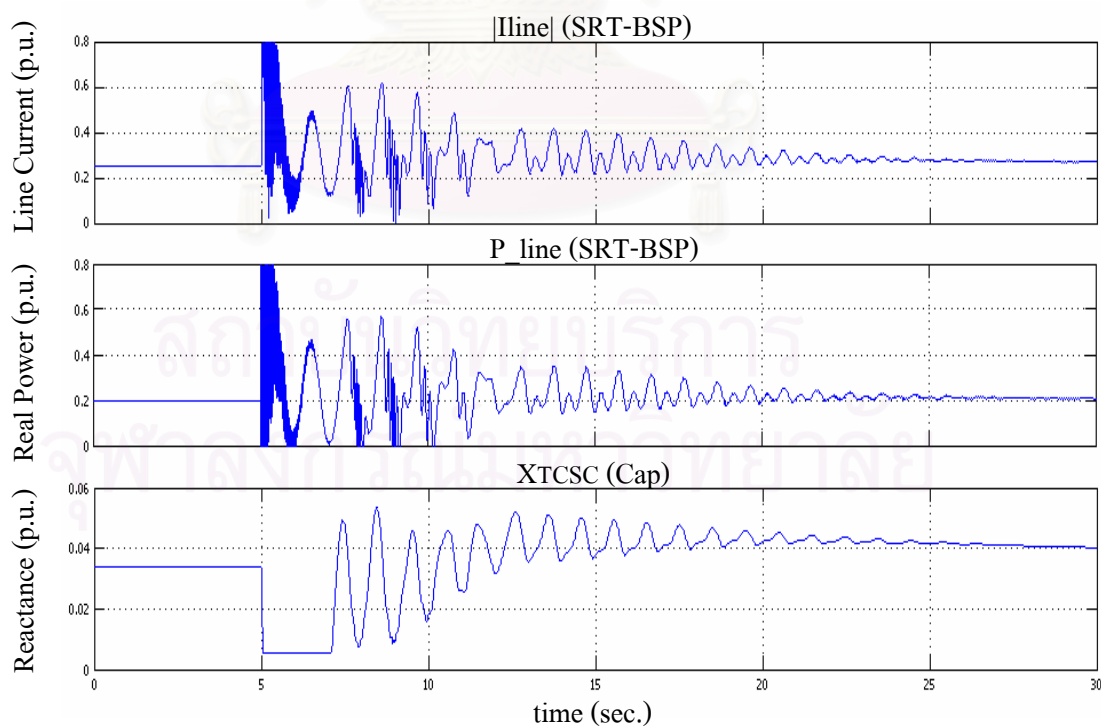
รูปที่ 6.49 มุมโรเตอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



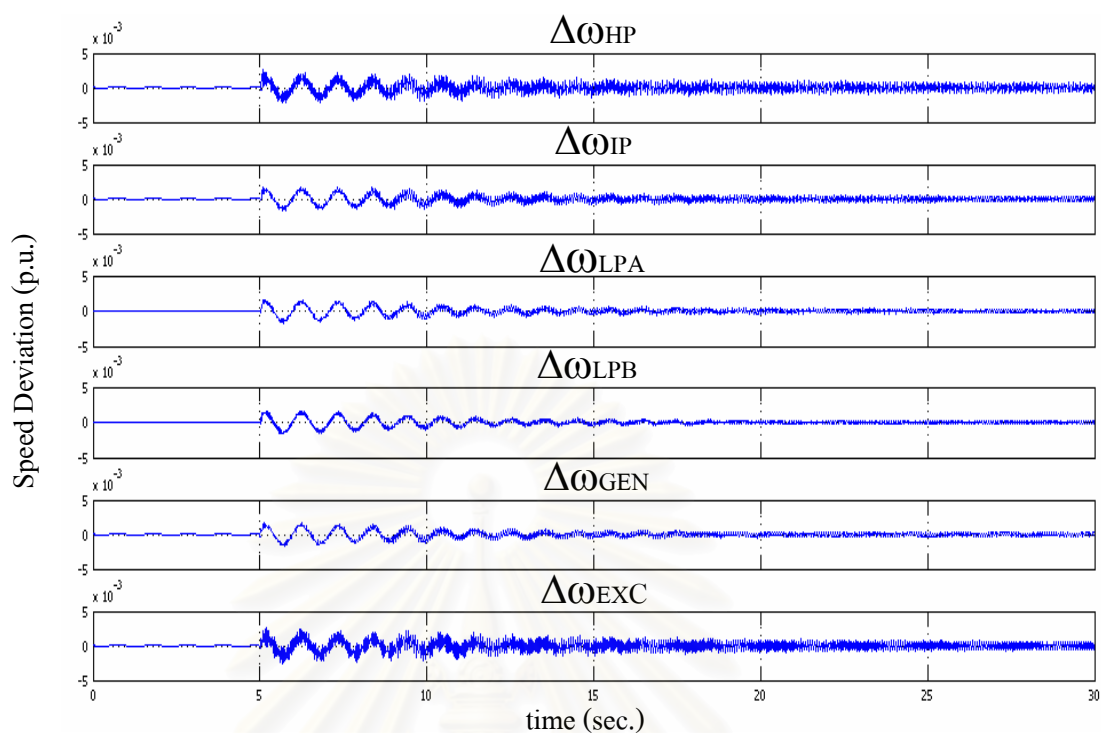
รูปที่ 6.50 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโหลดของบัสบางสะพาน  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



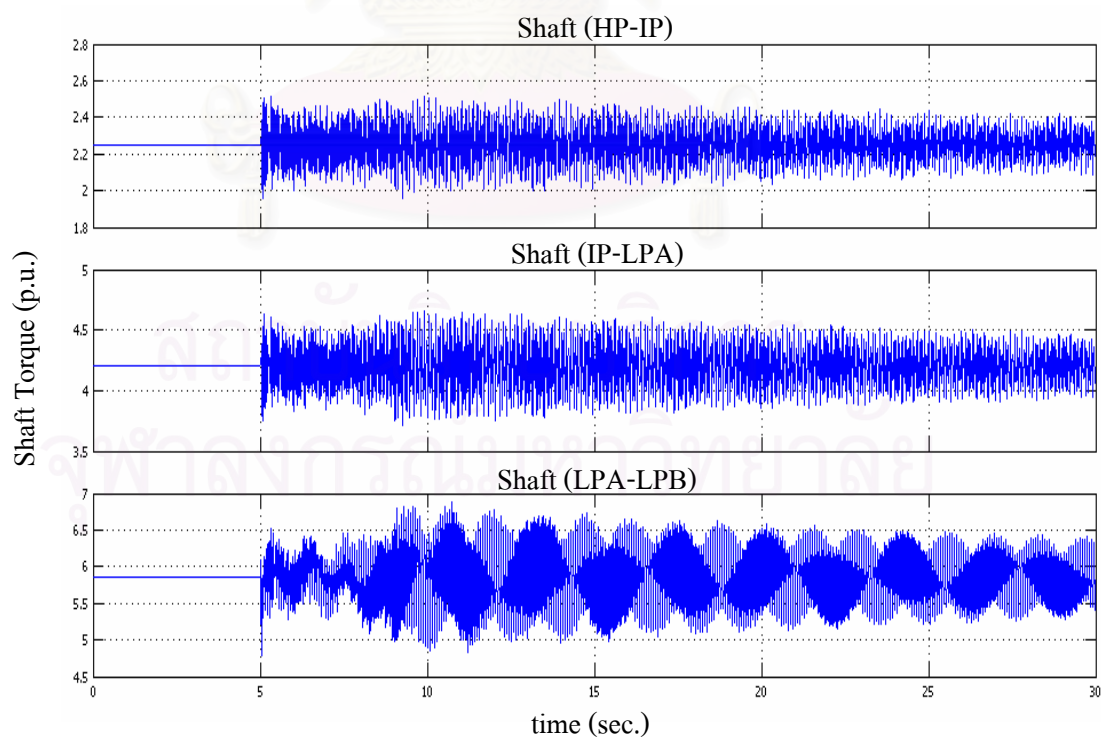
รูปที่ 6.51 ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโหลดบัสสุราษฎร์ธานี  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



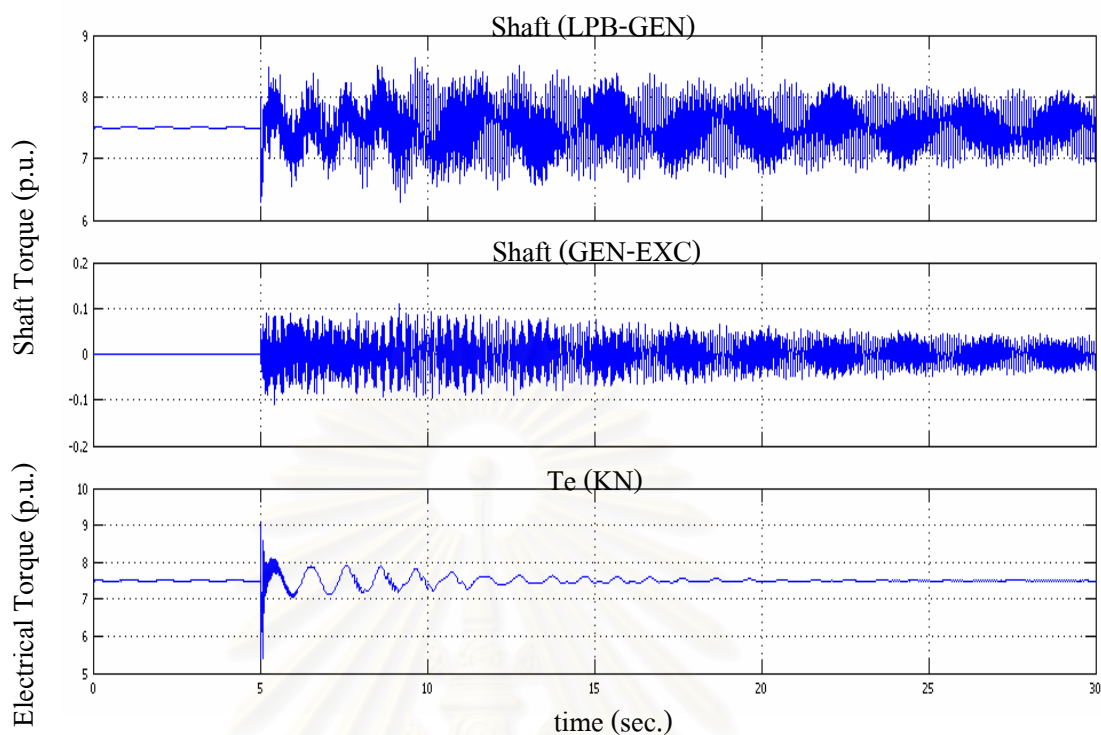
รูปที่ 6.52 ขนาดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจากบัสสุราษฎร์ธานีไปยังบัส  
บางสะพาน และ  $X_{TCSC}$  ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



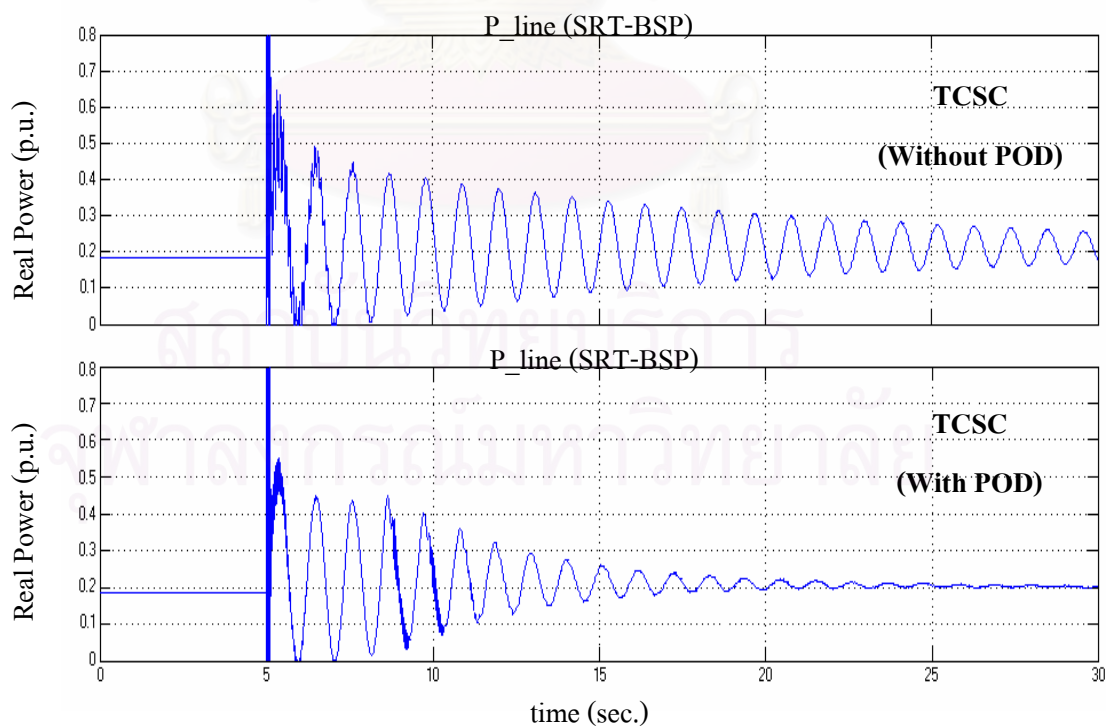
รูปที่ 6.53 ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของชุดกังหันแต่ละชุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสขนอม  
ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



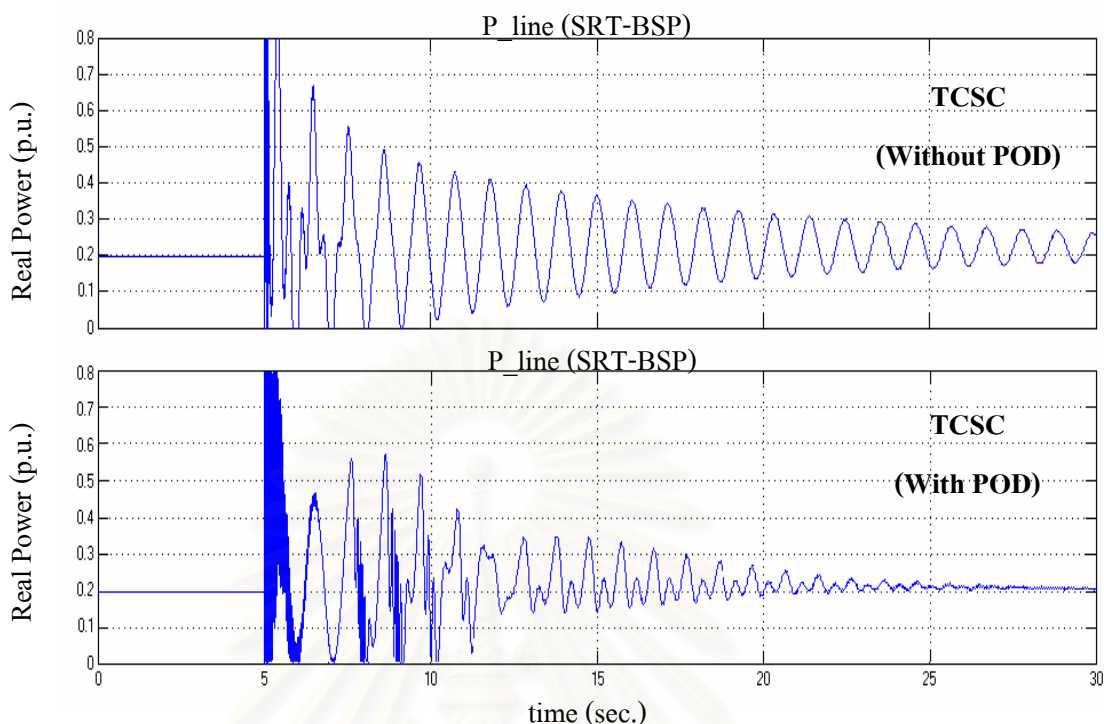
รูปที่ 6.54 แรงบิดทางกลบนเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน HP ถึง LPB จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
บัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



รูปที่ 6.55 แรงบิดทางกลบนเพลาคู่มือเชื่อมโยระหว่างชุดกังหัน LPB ถึง EXC จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 บัสขนอม ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC สำหรับชุดควบคุม POD



รูปที่ 6.56 กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัสสุราษฎร์ธานี-บางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 10%  
 ด้วย TCSC ของระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งชุด POD ตามลำดับ



รูปที่ 6.57 กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัสสุราษฎร์ธานี-บางสะพาน ที่ระดับการชดเชย 30% ด้วย TCSC ของระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งชุด POD

กรณีศึกษาที่ระดับการชดเชย 10% และ 30% ด้วย TCSC และใช้ชุดควบคุม POD เพื่อหาว่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าพบว่าสามารถลดขนาดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ ได้ดีสังเกตจากรูปที่ 6.56 และ 6.57 ตามลำดับ ปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง TCSC เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที หลังเกิดการรบกวนถูกกำจัดออกไป ระบบที่ติดตั้งชุดควบคุม POD สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระบบที่ปราศจากชุดควบคุม แม้ว่าการแกว่งของสัญญาณในช่วงแรกจะใกล้เคียงกันก็ตาม

สำหรับปริมาณแรงบิดทางกลระหว่างเพลาลูกเบี้ยวของชุดกังหันนั้น ผลของชุดควบคุมแทบไม่มีผล เพราะลักษณะของกราฟเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีและมีชุดควบคุม POD กราฟมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจวิเคราะห์ได้ว่าชุดควบคุม POD สามารถควบคุมปริมาณไฟฟ้าได้ดีกว่าปริมาณทางกลของชุดกังหัน เนื่องจากในการศึกษาละเลยชุดควบคุมของชุดกังหันจึงทำให้ปริมาณทางกลมีการตอบสนองช้ามาก หากการศึกษามีการเพิ่มรายละเอียดเกี่ยวกับชุดควบคุมนี้เข้าไปผลของการตอบสนองทางกลน่าจะรวดเร็วกว่า



## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ต่อการเกิดปัญหา SSR ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่กับสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดคือ สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบึงบางสะพานและสุราษฎร์ธานี ด้วยการวิเคราะห์ค่าเจาะจง และการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บึงบางสะพานซึ่งใช้เป็นบัสอ้างอิงตกลงชั่วขณะ และเปรียบเทียบผลการศึกษากับกรณีติดตั้ง TCSC ที่สายส่งเส้นเดียวกันเพื่อศึกษาผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับระบบที่ระดับการชดเชยค่าเดียวกัน

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่กับสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบึงบางสะพานและบึงสุราษฎร์ธานีอาจส่งผลให้เกิดปัญหาฮับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้าได้ เมื่อระดับการชดเชยแบบอนุกรมมีค่ามากกว่า 10% ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ ณ บึงขนอมเสียหายได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อนชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมทั้งจุดทำงานก่อนการเกิดการรบกวน โดยในวิทยานิพนธ์นี้สมมุติให้พารามิเตอร์ของชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าตามระบบทดสอบ IEEE FBM และจุดทดสอบที่จุดทำงานขณะมีโหลดสูงสุดในช่วงบ่าย (Evening Peak Load) ของเดือนเมษายน พ.ศ.2548
2. ช่วงความถี่ธรรมชาติของชุดกังหันที่กว้างเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการจำกัดระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม เนื่องจากชุดกังหันที่ใช้มีความถี่ธรรมชาติอยู่ระหว่าง 15.7Hz ถึง 47.45Hz ซึ่งถือได้ว่าครอบคลุมความถี่ในย่านฮับซิงโครไนส์เกือบทั้งหมด ดังนั้น ขีดจำกัดของระดับการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่จึงมีค่าต่ำ
3. การชดเชยแบบอนุกรมด้วย TCSC ไม่ก่อให้เกิดปัญหา SSR ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มระดับการชดเชยได้ถึง 49% ที่ค่าพารามิเตอร์และจุดทำงานของระบบเดียวกัน เนื่องจากในย่านความถี่ฮับซิงโครไนส์ที่ระดับการชดเชยใดๆ ก็ตาม รีแอกแตนซ์สุทธิของ TCSC แสดงสถานะเป็นตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวจึงไม่มีโอกาสเกิดความสอดคล้องทางความถี่ระหว่างระบบไฟฟ้ากับความถี่ของชุดกังหันได้
4. ผลจากการแสดงสถานะเป็นตัวเหนี่ยวนำของ TCSC ในย่านความถี่ฮับซิงโครไนส์ ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งเส้นที่ทำการชดเชยมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อ Synchronizing Torque Coefficient ในระบบให้ลดลง โดยเฉพาะโหมด 0 หรือ โหมดการสั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(Local Plant Mode) มีความถี่อยู่ในช่วง 0.7-2.0 Hz เป็นย่านความถี่ที่ TCSC แสดงสถานะเป็นตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าย่านความถี่ซบซิงโครนัสในโหมดอื่นๆ

5. การใช้ชุดควบคุมเสริมสำหรับ TCSC เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (POD) หลังเกิดการรบกวนขึ้นภายในระบบ โดยเลือกขนาดของกระแสไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ติดตั้ง TCSC เป็นสัญญาณขาเข้าชุดควบคุม ปรากฏว่าชุดควบคุมสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ติดตั้ง TCSC ได้ดี นอกจากนี้ยังช่วยลดการแกว่งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภายในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการสั้นของแรงบิดทางกลระหว่างชุดกักกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสขนอมนั้น ชุดควบคุม POD ส่งผลต่อการลดการสั้นทางกลได้น้อยมาก เนื่องจากในการศึกษานี้ละเลยผลของชุด Governor ซึ่งควบคุมแรงบิดทางกลสำหรับชุดกักกันการตอบสนองของระบบทางกลจึงค่อนข้างช้า

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาวิจัยในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหา SSR ด้วย TCSC ต่อไปในอนาคต ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. ศึกษา SSR ในกรณีที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมค่าคงที่ร่วมกับ TCSC เนื่องจากในทางปฏิบัติการให้ TCSC ทำงานที่ระดับการชดเชยค่าสูงๆ ชุดควบคุมจะต้องมีความแม่นยำอย่างมากเพื่อป้องกันแรงเคลื่อนเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ ดังนั้นการใช้ตัวเก็บประจุค่าคงที่จึงลดความเสี่ยงที่เกิดขึ้น แต่ต้องพิจารณาถึงปัญหา SSR ควบคู่ไปด้วย

2. ศึกษาการออกแบบเพื่อให้ TCSC สามารถทำงานร่วมกับ SVC ที่ติดตั้งจริงอยู่แล้วในระบบภาคใต้ เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้า และการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าของระบบให้สูงขึ้น

3. ศึกษาวิธีการออกแบบชุดควบคุม POD ให้สามารถทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดควบคุมได้อย่างทันทีทันใดเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในระบบไฟฟ้า เช่น การตรวจจุดทำงานต่างๆ ขณะเพื่อเป็นข้อมูลของแบบจำลองเชิงเส้นในการวิเคราะห์ค่าเจาะจง นำไปสู่การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมที่เหมาะสมกับระบบ ณ จุดทำงานที่เวลาจริง

4. ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนติดตั้ง TCSC เพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าของระบบ ทดแทนการสร้างระบบส่งกำลังไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้าเพิ่มเติม

## รายการอ้างอิง

- [1] บดินทร์ โกศลพิศิษฐ์. การศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและข้อซึ่งโครน์สเตอร์ โซแนนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [2] Anderson, P.M., and Farmer, R.G. Series Compensation of Power Systems. United States of America : PBLSH!, 1996.
- [3] Lei, X., et al. Analysing Subsynchronous Resonance Using a Simulation Program. Proceedings of PowerCon 2000, International Conference on Power System Technology, Perth, Australia, 2000 2 (Dec 2000) : 775-781.
- [4] IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104 (June 1985) : 1326-1334.
- [5] Padiyar, K.R. Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems. New York : IEEE Press, 1990.
- [6] Kundur, P. Power System Stability and Control. United States of America : McGraw-Hill, 1994.
- [7] พิทักษ์ ทางรัตนสุวรรณ. การปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์ FACTS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [8] Song, Y.H., and Johns, A.T. Flexible AC Transmission Systems (FACTS). London : IEE Power and Energy Series, 1999.
- [9] Hingorani, N.G., and Gyugyi, L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York : IEEE Press, 2000.
- [10] LAI, L.L. Power System Restructuring and Deregulation: Trading, Performance and Information Technology. England : John Wiley & Sons, 2001.
- [11] Achai, A., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Pérez, H., and Angeles-Camacho, C. FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks. England : John Wiley & Sons, 2004.
- [12] IEEE Std.1534<sup>TM</sup>-2002. IEEE Recommended Practice for Specifying Thyristor-Controlled Series Capacitors. New York : IEEE Press, 2002.
- [13] Gama, C. Brazilian North-South Interconnection Control-Application and Operating Experience with a TCSC. IEEE Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting 2 (July 1999) : 1103-1108.

- [14] Gama, C., Ängquist, L., Ingeström, G., and Noroozian, M. Commissioning and Operative Experience of TCSC for Damping Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection. Cigré Session Paper 14-104 (2000).
- [15] Ahlgren, K., Holmberg, D., Halvarsson, P., and Ängquist, L. Thyristor Controlled Series Capacitor Used as a Means to Reduce Torsional Interaction Subsynchronous Resonance. Cigré Session SC14 (1997).
- [16] Zhou, X., et al. Analysis and Control of Yimin-Fengtun 500 kV TCSC System. Electrical Power Systems Research 46, 3(September1998) : 157-168.
- [17] Othman, H.A., and Ängquist, L. Analytical Modeling of Thyristor-Controlled Series Capacitors for SSR Studies. IEEE Transactions on Power Systems 11, 1 (February 1996) : 119–127.
- [18] Rajaraman, R., Dobson, I., Lasseter, R.H., and Shern, Y. Computing the Damping of Subsynchronous Oscillations due to a Thyristor Controlled Series Capacitor. IEEE Transactions on Power Delivery 11, 2 (April 1996) : 1120–1127.
- [19] Yu, Y.N. Electric Power System Dynamics. New York : Academic Press, 1983.
- [20] IEEE Committee Report. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-96, 5 (September 1977) : 1565-1572.
- [21] Kakimoto, N., and Phongphanphanee, A. Subsynchronous Resonance Damping Control of Thyristor-Controlled Series Capacitor. IEEE Transactions on Power Delivery 18, 3 (July 2003) : 1051-1059.
- [22] Ong, C.M. Dynamic Simulation of Electric Machinery : Using MATLAB/SIMULINK. New Jersey : Prentice-Hall, 1998.
- [23] IEEE Committee Report. Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104, 5 (May 1985) : 1057-1066.
- [24] Harb, A.M., and Widyan, M.S. Chaos and Bifurcation Control of SSR in the IEEE Second Benchmark Model. Chaos, Solitons & Fractals 21, 3(July 2004) : 537-552.

- [25] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ข้อมูลระบบ และผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย. เมษายน, 2548. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- [26] Yang, N., Lui, Q., and James, D.M. TCSC Controller Design for Damping Interarea Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems 13, 4 (November 1998) : 1304-1310.
- [27] Rusejla, S., Korba, P., and Anderson, G. Application of FACTS Devices for Damping of Power System Oscillations . IEEE PowerTech 2005 Conference (June 2005).



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

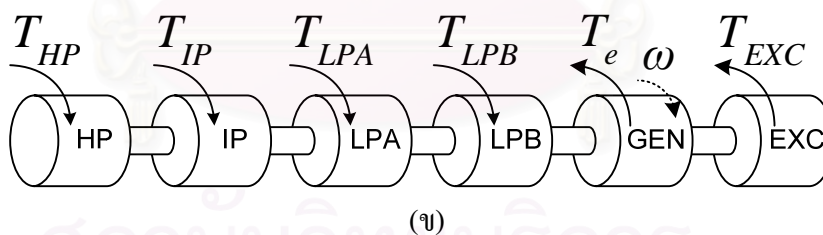
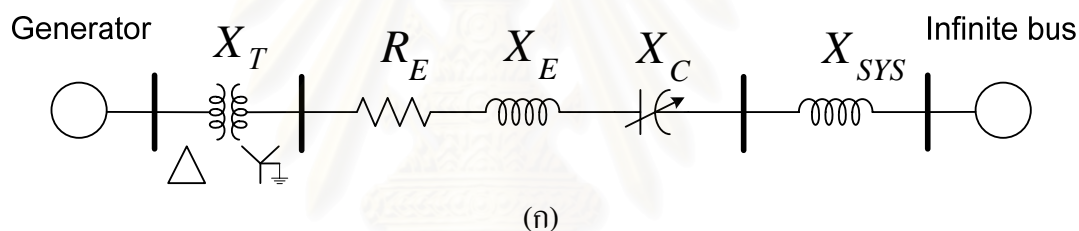
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลระบบทดสอบจากมาตรฐาน IEEE

เนื้อหาของภาคผนวก ก ประกอบด้วยข้อมูลของระบบทดสอบจากมาตรฐาน IEEE 2 ระบบ ซึ่งปกติจะใช้ศึกษาถึงผลกระทบของ SSR ได้แก่ ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model : FBM และระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model : SBM โดยมีข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และชุดกักกัน

## ก.1 ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model : FBM [20,21]



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ IEEE First Benchmark Model

ค่าพารามิเตอร์ต่างของระบบทดสอบ IEEE FBM ในรูปที่ ก.1 อยู่ภายใต้ค่าฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 892.4 MVA

ตารางที่ ก.1.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง FBM

พารามิเตอร์	Pos. seq. (pu.)	Neg. seq. (pu.)
$R_E$	0.02	0.05
$X_T$	0.14	0.14
$X_E$	0.50	1.56
$X_{sys}$	0.06	0.06

ตารางที่ ก.1.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า FBM

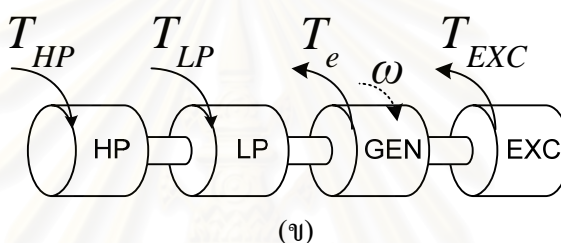
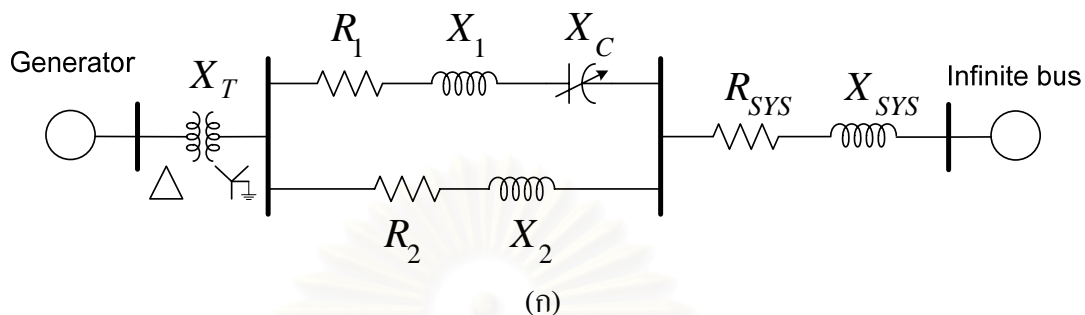
พารามิเตอร์	(pu.)	ค่าคงที่ทางเวลา	(sec.)
$R_a$	0.000	$T'_{d0}$	4.300
$X_a$	0.130	$T'_{q0}$	0.032
$X_d$	1.790	$T''_{d0}$	0.850
$X_q$	0.169	$T''_{q0}$	0.050
$X'_d$	0.135	-	-
$X'_q$	1.710	-	-
$X''_d$	0.228	-	-
$X''_q$	0.200	-	-

ตารางที่ ก.1.3 ค่าพารามิเตอร์ชุดกักหนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า FBM

ชุดกักหน	ค่าคงที่ความเฉื่อย (H : s)	ค่าคงที่การหน่วง (D : pu)	เฟลาเชื่อมโยง	ค่าคงที่สปริง (K : pu T/rad)
HP turbine	0.0928970	0.012	HP - IP	19.303
IP turbine	0.1555890	0.001	IP - LPA	34.929
LPA turbine	0.8586700	0.085	LPA - LPB	52.038
LPB turbine	0.8842150	0.080	LPB - GEN	70.858
Generator	0.8684950	0.200	GEN - EXC	2.822
Exciter	0.0342165	0.018	-	-



ก.2 ระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model : SBM [23,24]



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark Model

ค่าพารามิเตอร์ต่างของระบบทดสอบ IEEE SBM ในรูปที่ ก.2 อยู่ภายใต้ค่าฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 600 MVA

ตารางที่ ก.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า SBM

พารามิเตอร์	Pos. seq. (pu.)	Neg. seq. (pu.)
$R_T$	0.0012	0.0012
$X_T$	0.1200	0.1200
$R_1$	0.0444	0.1320
$X_1$	0.4800	1.4400
$R_2$	0.0402	0.1116
$X_2$	0.4434	1.2600
$R_{sys}$	0.0084	0.0084
$X_{sys}$	0.1800	0.1800

ตารางที่ ก.2.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า SBM

พารามิเตอร์	(pu.)	ค่าคงที่ทางเวลา	(sec.)
$R_a$	0.0045	$T'_{d0}$	4.50
$X_a$	0.14	$T'_{q0}$	0.55
$X_d$	1.65	$T''_{d0}$	0.04
$X_q$	1.59	$T''_{q0}$	0.09
$X'_d$	0.25	-	-
$X'_q$	0.46	-	-
$X''_d$	0.20	-	-
$X''_q$	0.20	-	-

ตารางที่ ก.2.3 ค่าพารามิเตอร์ชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า SBM

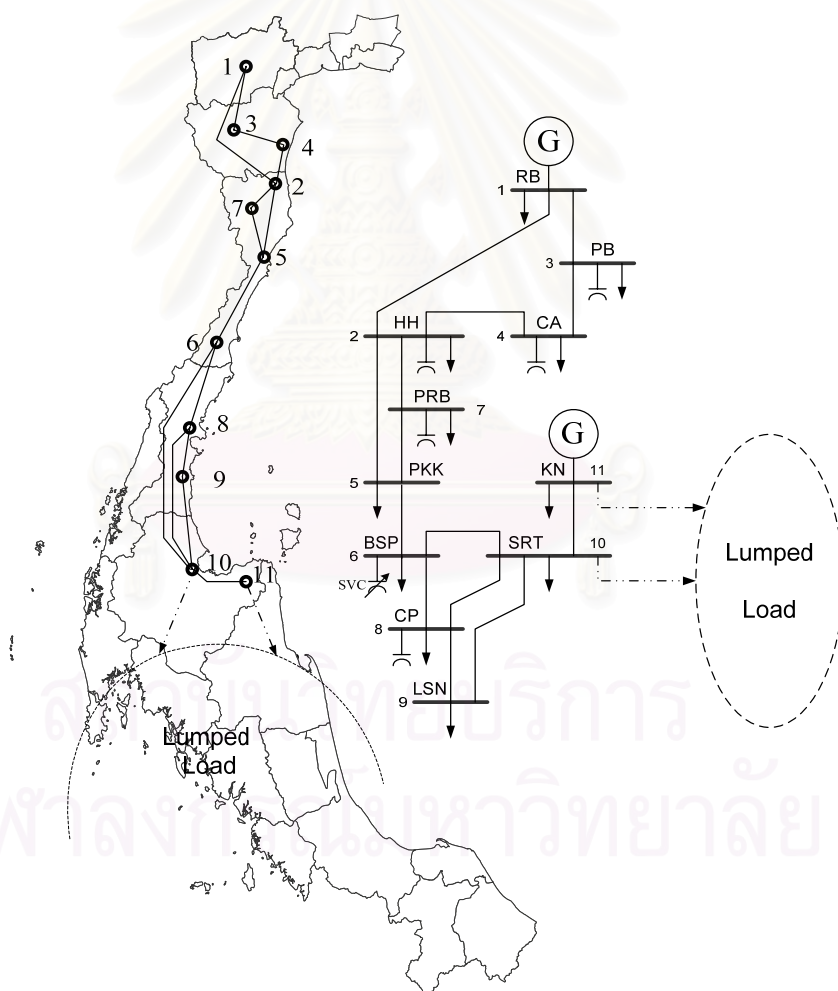
ชุดกังหัน	ค่าคงที่ความเฉื่อย (H : s)	ค่าคงที่การหน่วง (D : pu)	เพลาคู่มือโยง	ค่าคงที่สปริง (K : pu T/rad)
HP turbine	0.4980	0.0498	HP - LP	42.6572
LP turbine	3.1004	0.3100	LP - GEN	83.3823
Generator	1.7581	0.1758	GEN - EXC	3.7363
Exciter	0.0138	0.0014	-	-

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้

เนื้อหาของภาคผนวก ข ประกอบด้วยข้อมูลของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ อันได้แก่ โครงสร้างของระบบ รหัสของบัสไฟฟ้า ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานกรณีฐาน ข้อมูลกำลังการผลิตที่ป้อนเข้าสู่ระบบในกรณีฐาน และค่าพารามิเตอร์ของสายส่งภายในระบบ

#### ข.1 ข้อมูลในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบกรณีฐาน [25]



รูปที่ ข.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ [25]

จากรูปที่ ข.1 หมายเลขบัสไฟฟ้าและรหัสที่เป็นอักษรด้วยภาษาอังกฤษจะบอกถึงรายชื่อ บัสไฟฟ้าที่เป็นภาษาไทยดังตารางที่ ข.1 โดยระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิงที่อ้างอิงไว้ในตารางนี้ กำหนดให้มีระดับอ้างอิงอยู่ที่ 230 kV

ตารางที่ ข.1 ชื่อของบัสไฟฟ้าและขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของระบบ

บัสที่	รหัส	ชื่อบัสไฟฟ้า	ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า
1	RB	ราชบุรี	230 kV
2	HH	หัวหิน	230 kV
3	PB	เพชรบุรี	115 kV
4	CA	ชะอำ	115 kV
5	PKK	ประจวบคีรีขันธ์	230 kV
6	BSP	บางสะพาน	230 kV
7	PRB	ปราณบุรี	115 kV
8	CP	ชุมพร	115 kV
9	LSN	หลังสวน	115 kV
10	SRT	สุราษฎร์ธานี	230 kV
11	KN	ขนอม	230 kV

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลบัสของระบบ ณ กรณีฐาน

ข้อมูลบัส							
บัส ที่	ชนิด บัส	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอคทีฟ (MVAR)	ชัตเซปแดนซ์ ขนาด (MVAR)	แรงเคลื่อน ไฟฟ้าพิกัด (kV)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
1	(swing)	305.9	72.1	0	230	1.05	0.95
2	(P-Q)	101.0	8.0	23.2	230	1.05	0.95
3	(P-Q)	52.0	25.2	11.8	115	1.05	0.95
4	(P-Q)	36.8	17.9	4.4	115	1.05	0.95
5	(P-Q)	29.6	8.3	0.0	230	1.05	0.95
6	(P-Q)	103.0	6.7	9.586	115	1.05	0.95
7	(P-Q)	26.6	13.7	4.1	115	1.05	0.95

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบ ณ กรณีฐาน

ข้อมูลบัส							
บัส ที่	ชนิด บัส	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอคทีฟ (MVAR)	ชั้สเซปแดนซ์ ขนาน (MVAR)	แรงเคลื่อน ไฟฟ้าพิกัด (kV)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
8	(P-Q)	55.7	13.0	6.0	115	1.05	0.95
9	(P-Q)	23.8	9.2	0.0	230	1.05	0.95
10	(P-Q)	319.72	16.69	0.0	230	1.05	0.95
11	(P-V)	52.0	25.2	0.0	230	1.05	0.95

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลกำลังการผลิตที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ กรณีฐาน

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า							
บัส ที่	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิต รีแอคทีฟ (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	ขนาดแรงเคลื่อน ไฟฟ้า (pu)
1	662.02	23.76	5000.0	10.0	3000.0	-3000.0	1.02
11	750.00	12.74	850.0	10.0	500.0	-500.0	1.03

ตารางที่ ข.4 ค่าพารามิเตอร์และขีดจำกัดของสายส่งบนฐาน 100 MVA

ข้อมูลสายส่ง						
เส้น ที่	จากบัสที่	ถึงบัสที่	ความต้านทาน (pu)	รีแอคแตนซ์ (pu)	ชั้สเซปแดนซ์ (pu)	พิกัด (MVA)
1	1	2	0.00551	0.043550	0.32680	860.0
2	1	3	0.00832	0.055455	0.05700	646.8
3	2	4	0.02913	0.085640	0.01100	250.0
4	2	5	0.00431	0.033915	0.25560	858.8
5	2	7	0.02588	0.076090	0.00990	119.5
6	3	4	0.03245	0.096340	0.01200	117.5
7	5	6	0.003098	0.018385	0.21952	858.8
8	5	7	0.06343	0.186490	0.02430	119.5

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์และขีดจำกัดของสายส่งบนฐาน 100 MVA

ข้อมูลสายส่ง						
เส้น ที่	จากบัสที่	ถึงบัสที่	ความต้านทาน (pu)	รีแอกแตนซ์ (pu)	ขีดเซปแดนซ์ (pu)	พิกัด (MVA)
9	6	8	0.027365	0.080460	0.04200	239.0
10	6	10	0.014355	0.112930	0.85120	858.8
11	8	9	0.052830	0.155320	0.02020	119.5
12	8	10	0.051470	0.151320	0.01970	119.5
13	9	10	0.001360	0.004010	0.00050	119.5
14	10	11	0.003815	0.030030	0.22640	858.8

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลบัสจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ณ กรณีฐาน

ข้อมูลบัส					
บัส ที่	ชนิด บัส	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอคทีฟ (MVAR)	ขีดเซปแดนซ์ ขนาน (MVAR)	ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (pu)
1	(swing)	305.9	72.1	0	1.020 $\angle$ -7.900
2	(P-Q)	101.0	8.0	23.2	1.026 $\angle$ -14.186
3	(P-Q)	52.0	25.2	11.8	1.011 $\angle$ -10.873
4	(P-Q)	36.8	17.9	4.4	1.007 $\angle$ -13.464
5	(P-Q)	29.6	8.3	0.0	1.034 $\angle$ -16.610
6	(P-Q)	103.0	6.7	9.586	1.037 $\angle$ -17.687
7	(P-Q)	26.6	13.7	4.1	1.019 $\angle$ -15.601
8	(P-Q)	55.7	13.0	6.0	1.022 $\angle$ -18.279
9	(P-Q)	23.8	9.2	0.0	1.024 $\angle$ -16.593
10	(P-Q)	319.72	16.69	0.0	1.024 $\angle$ -16.504
11	(P-V)	52.0	25.2	0.0	1.030 $\angle$ -9.862

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ณ กรณีฐาน

ข้อมูลสายส่ง								
เส้น ที่	จาก บัสที่	ถึง บัสที่	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ( $I^2 * Z$ )	
			(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)
1	1	2	258.99	49.88	255.38	44.21	3.610	28.53
2	1	3	97.13	1.55	-96.37	-2.39	0.756	5.04
3	2	4	-6.73	24.32	6.92	-24.92	0.184	0.54
4	2	5	127.71	-49.96	-126.99	28.52	0.722	5.68
5	2	7	33.40	-2.13	-33.13	1.90	0.275	0.81
6	3	4	44.37	-10.75	-43.72	11.48	0.658	1.95
7	5	6	103.83	-45.87	-103.48	24.39	0.346	2.05
8	5	7	-6.44	9.04	6.53	-11.34	0.088	0.26
9	6	8	18.14	11.06	-18.01	-15.13	0.129	0.38
10	6	10	-17.66	-31.84	17.73	-58.07	0.068	0.53
11	8	9	-18.05	4.15	18.23	-5.74	0.178	0.52
12	8	10	-19.64	4.25	19.84	-5.72	0.204	0.60
13	9	10	-42.03	-3.46	42.05	3.48	0.023	0.07
14	10	11	-399.34	43.61	405.25	-20.99	5.909	46.51

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณจุดทำงานเริ่มต้นของแบบจำลอง

การคำนวณจุดทำงานเริ่มต้นที่สภาวะอยู่ตัวเริ่มจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะได้ขนาดและมุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว และกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกมา หลังจากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าเริ่มต้นของสมการสถานะของชุดกึ่งนำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าต่อไป [2,6]

- จุดทำงานและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การคำนวณกระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกไปบนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (Stator reference frame) แล้วเปลี่ยนกรอบอ้างอิงไปคำนวณบนกรอบอ้างอิงโรเตอร์ (Rotor reference frame) เพื่อคำนวณค่าเริ่มต้นของปริมาณทางไฟฟ้า และ ฟลักซ์ของขดลวดบนแกน dq ดังต่อไปนี้

โครงร่างอ้างอิงบนสเตเตอร์

$$\begin{aligned}\tilde{I}_t &= \left( \frac{P_t + jQ_t}{\tilde{V}_t} \right)^* \\ \tilde{E}_q &= \tilde{V}_t + (R_a + jX_q)\tilde{I}_t \\ \delta &= \angle \tilde{E}_q\end{aligned}\quad (\text{ก.1})$$

โครงร่างอ้างอิงบนโรเตอร์

$$\begin{aligned}\tilde{i}_t &= \tilde{I}_t e^{-j\delta} = i_q + j i_d \\ \tilde{v}_t &= \tilde{V}_t e^{-j\delta} = v_q + j v_d \\ E_{fd} &= \left| \tilde{E}_q \right| - (X_d - X_q) i_d \\ E'_q &= E_{fd} + (X_d - X'_d) i_d \\ E'_d &= -(X_q - X'_q) i_q\end{aligned}\quad (\text{ก.2})$$

$$\begin{aligned}\psi_d &= X_d i_d + E_{fd} \\ \psi_q &= X_q i_q \\ \psi_F &= \psi_d + \left( \frac{X'_d}{X_d - X'_d} \right) E_{fd}\end{aligned}\quad (\text{ก.3})$$



$$\begin{aligned}
 \psi_D &= \psi_d \\
 \psi_G &= \psi_q \\
 \psi_Q &= \psi_q
 \end{aligned}
 \tag{ก.4}$$

$$T_e = T_m = \psi_d i_q - \psi_q i_d \tag{ก.5}$$

- จุดทำงานและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของชุดกังหัน

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ ก.4 จะสามารถคำนวณแรงบิดของเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน และมุมโรเตอร์เริ่มต้นที่สภาวะอยู่ตัว ซึ่งจะแสดงเพียงสมการของชุดกังหันของระบบ FBM ดังต่อไปนี้

แรงบิดเพลาคื่อมโยงระหว่างชุดกังหันหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 T_{GEN,EX} &= 0 \\
 T_{LPB,GEN} &= T_e \\
 T_{LPA,LPB} &= T_{LPB,GEN} - T_{LPB} \\
 T_{IP,LPA} &= T_{LPA,LPB} - T_{LPA} \\
 T_{HP,IP} &= T_{IP,LPA} - T_{IP}
 \end{aligned}
 \tag{ก.6}$$

มุมโรเตอร์ของชุดกังหัน เมื่อกำหนดให้มุมโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นจุดอ้างอิง

$$\begin{aligned}
 \delta_{GEN,EX} &= \delta_{GEN} - \delta_{EX} = T_{GEN,EX} / K_{GEN,EX} = 0 \\
 \delta_{LPB,GEN} &= \delta_{LPB} - \delta_{GEN} = T_{LPB,GEN} / K_{LPB,GEN} \\
 \delta_{LPA,LPB} &= \delta_{LPA} - \delta_{LPB} = T_{LPA,LPB} / K_{LPA,LPB} \\
 \delta_{IP,LPA} &= \delta_{IP} - \delta_{LPA} = T_{IP,LPA} / K_{IP,LPA} \\
 \delta_{HP,IP} &= \delta_{HP} - \delta_{IP} = T_{HP,IP} / K_{HP,IP}
 \end{aligned}
 \tag{ก.7}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{HP} &= \delta_{HP} - \delta_{GEN} = \delta_{HP,IP} + \delta_{IP,LPA} + \delta_{LPA,LPB} + \delta_{LPB,GEN} \\
\delta_{IP} &= \delta_{IP} - \delta_{GEN} = \delta_{IP,LPA} + \delta_{LPA,LPB} + \delta_{LPB,GEN} \\
\delta_{LPA} &= \delta_{LPA} - \delta_{GEN} = \delta_{LPA,LPB} + \delta_{LPB,GEN} \\
\delta_{LPB} &= \delta_{LPB} - \delta_{GEN} = \delta_{LPB,GEN} \\
\delta_{GEN} &= \delta_{GEN} \\
\delta_{EX} &= \delta_{GEN}
\end{aligned} \tag{ก.8}$$

- จุดทำงานและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้า

แบ่งออกเป็นการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านกิ่งต่างๆ ของสายส่ง กระแสผ่านโหลด แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ขนานกับแต่ละบัส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุนุกรมจากผลของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส  $k$  ไปยังบัส  $m$  ของกิ่งใดๆ ในระบบไฟฟ้า

$$\tilde{I}_{km} = (\tilde{V}_k - \tilde{V}_m)Y_{km} = I_{kmQ} + jI_{kmD} \tag{ก.9}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดที่บัส  $k$

$$\tilde{I}_{Lk} = \left( \frac{P_{Lk} + jQ_{Lk}}{\tilde{V}_k} \right)^* = I_{LkQ} + jI_{LkD} \tag{ก.10}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัส  $k$

$$\tilde{V}_{Ck} = \tilde{V}_k = V_{CkQ} + jV_{CkD} \tag{ก.11}$$

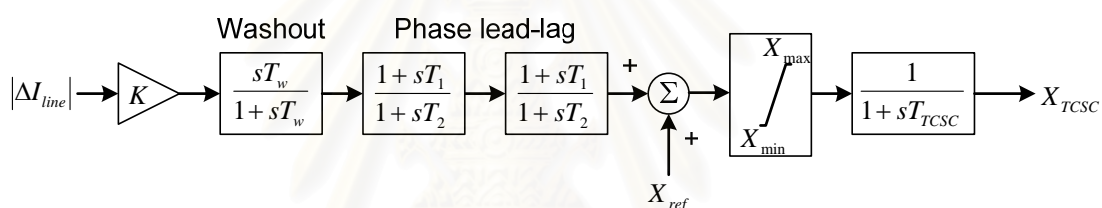
แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุนุกรมระหว่างบัส  $k$  ไปยังบัส  $m$  ของกิ่งใดๆ ในระบบไฟฟ้า

$$\tilde{V}_{Ckm} = -jX_{Ckm}\tilde{I}_{km} = V_{CkQ} + jV_{CkD} \tag{ก.12}$$

## ภาคผนวก ง

### แบบจำลองการควบคุมเชิงพลวัตเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (POD) สำหรับ TCSC

ชุดควบคุมลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Oscillation Damping: POD) ดังรูปที่ ง.1 [8] ประกอบด้วย Washout และแบบชดเชยเฟสนำหน้า-ล่าหลัง (Phase Lead-Lag Compensation) ซึ่งหน้าที่หลักของ Washout คือลดผลกระทบเนื่องจากส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Component) ของสัญญาณป้อนเข้า และการชดเชยนำหน้า-ล่าหลัง (Phase Lead-Lag Compensation) เพื่อชดเชยความถี่ที่ต้องการควบคุม สำหรับการตอบสนองของ TCSC มีค่าคงที่ ( $T_{TCSC}$ ) ประมาณ 15-20 ms และการชดเชยนำหน้า-ล่าหลังแต่ละชุดชดเชยไม่เกิน  $60^\circ$



รูปที่ ง.1 โครงสร้างตัวควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ TCSC

การคำนวณพารามิเตอร์สำหรับชุดควบคุม POD [27] เริ่มจากการวิเคราะห์ค่าเจาะจงและค่าเร-ซิดิวของระบบ เพื่อหาโหมดที่ต้องการควบคุม ในที่นี้ทำการควบคุมโหมด 0 หรือ local mode มีความถี่ในช่วง 4.40-12.57 rad/s ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย ดังตารางที่ ง.ก แสดงค่าเจาะจง อัตราการหน่วง และเรซิดิวในโหมด 0 ที่ระดับการชดเชยจาก 5% - 50% ของรีแอคแตนซ์สายส่งที่ติดตั้ง TCSC ซึ่งจะสังเกตว่าที่ระดับการชดเชย 45% มีขนาดของเรซิดิวสูงสุดและระบบยังคงมีเสถียรภาพ จึงใช้ค่าเรซิดิวที่ระดับการชดเชยนี้เป็นค่าสำหรับออกแบบพารามิเตอร์คือ  $\lambda_0 = 0.069 \pm j6.2303$  และ  $R_0 = 3.932 \angle 62.96^\circ$

ตารางที่ ง.1 เปรียบเทียบค่าเจาะจง อัตราการหน่วง และเรซิดิว ที่โหนด 0 ของระบบภาคใต้

% Xtcsc	Real (1/s)	Imag (rad/s)	%damping	$ R_0 $	$\angle R_0$ (deg.)
5	-0.064	$\pm j 5.71$	1.129	0.961	80.721
10	-0.066	$\pm j 5.74$	1.153	1.051	79.697
15	-0.068	$\pm j 5.77$	1.185	1.162	78.520
20	-0.071	$\pm j 5.81$	1.223	1.301	77.160
25	-0.074	$\pm j 5.86$	1.265	1.484	75.573
30	-0.077	$\pm j 5.92$	1.305	1.735	73.682
35	-0.080	$\pm j 5.99$	1.332	2.106	71.342
40	-0.080	$\pm j 6.08$	1.308	2.716	68.190
45	-0.069	$\pm j 6.23$	1.105	3.933	62.962
50	+0.007	$\pm j 6.50$	-0.105	7.629	46.555

กำหนดให้  $\lambda_{0,des} = -0.5 \pm j6.23$

เมื่อ 
$$H(s) = K \frac{sT_w}{1+sT_w} \left[ \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right]^m = KH_1(s)$$

ดังนั้น

$$\phi = 180^\circ - \arg(R_0) = 117.038^\circ, \quad m = \phi / 60 = 1.95 \approx 2$$

$$\tau = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1 - \sin(\phi/m)}{1 + \sin(\phi/m)} = 0.07944$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{\tau}} = 0.5695, \quad T_1 = \tau \cdot T_2 = 0.0452$$

$$K = \left| \frac{\lambda_{0,des} - \lambda_0}{R_0 H_1(\lambda_0)} \right| = 1.3816$$

นั่นคือ พารามิเตอร์สำหรับชุดควบคุม POD ที่โหนด 0 คือ

$$T_{TCSC} = 0.02s, \quad T_w = 3s, \quad T_1 = 0.0452s, \quad T_2 = 0.5695s, \quad K = 1.3816$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพรศักดิ์ พงษ์ทิพย์พิทักษ์ เกิดวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่จังหวัดภูเก็ต เป็นบุตรของนายบุญชู พงษ์ทิพย์พิทักษ์ และ นางทองใบ อัดโณ สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคภูเก็ต เมื่อปี พ.ศ. 2541 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ เมื่อปี พ.ศ. 2543 และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2546 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย