ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยใช้การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

Wide Area Robust TCSC Controller using Phase-plane Fuzzy Logic Control

นามผู้วิจัย นางสาวเหนือนภา วิฑิฐานนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(อาจารย์คมสันต์ หงษ์สมบัติ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยใช้การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

Wide Area Robust TCSC Controller using Phase-plane Fuzzy Logic Control

โดย

นางสาวเหนือนภา วิฒิฐานนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เหนือนภา วิฒิฐานนท์ 2556: การควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยใช้การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์คมสันต์ หงษ์สมบัติ, Ph.D. 71 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการควบคุมตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทริสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC) แบบคงทนโดยใช้เฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อปรับปรุงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในพื้นที่กว้าง ในขั้นตอนแรกได้ทำการติดตั้ง TCSC อนุกรมกับสายส่งของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ จากนั้นเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน และเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้าเนื่องจากความไม่แน่นอนของการประวิงเวลาของระบบควบคุมในพื้นที่กว้าง ประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมที่ได้นำเสนอถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลังที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมโดยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม (GA) ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอสามารถทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพสูงและคงทนมากกว่าตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลังที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมภายใต้สภาวะการประวิงเวลาจากระบบสื่อสารข้อมูลและสภาวะทำงานต่างๆที่แตกต่างกัน

_____ _____ __ / __ / __

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Nuernapha Vititanont 2013: Wide Area Robust TCSC Controller using Phase-plane Fuzzy Logic Control. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Komsan Hongesombut, Ph.D. 71 pages.

This thesis proposes a robust control method of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) using phase-plane fuzzy logic to improve the power oscillation damping of a wide-area power system. First, the TCSC is installed in series with transmission lines of two-area four-machine interconnected power system. Then, the phase-plane fuzzy logic control is adopted so as to control the power oscillations robustly and to improve the power system stability due to uncertainty from the delay time of wide area control. The performance of the proposed controller is compared with the lead-lag compensator tuned by GA. The simulation results reveal that the proposed phase-plane fuzzy logic control can achieve higher performance and more robustness than the optimally tuned lead-lag compensator under different delay times and operating conditions.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์คมสันต์ หงษ์สมบัติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนทำการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์ให้กับข้าพเจ้า และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิศวกรรมไฟฟ้า และบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์นาตยา คล้ายเรือง และผู้ช่วยศาสตราจารย์สมยศ เกียรติวนิชวิไล ที่เป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้คำแนะนำเป็นอย่างดีมาตลอด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาจมีข้อผิดพลาดอยู่บ้างไม่มากก็น้อย ผู้วิจัยจึงขออภัยและน้อมรับคำติชมไว้ ณ ที่นี้ และด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบคุณความดีนี้ให้แก่บิดาและมารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกด้านและให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนเพื่อนทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยฉบับนี้บรรลุผลสำเร็จ

เหนือนภา วิฒิฐานนท์

เมษายน 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	40
ผล	40
วิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	48
สรุป	48
ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	51
ภาคผนวก	53
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	71

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนการดำเนินงาน	4
2	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร	29
3	ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	33
4	ค่าคงที่ของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	36
5	ผลการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น	41
6	รูปแบบการรบกวนที่ใช้ในการทดสอบ	41

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การไหลของกำลังไฟฟ้า	6
2	การแบ่งชนิดอุปกรณ์ FACTS และการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้มาแต่ดั้งเดิม	8
3	โพลและซีโร่ของตัวชดเชยแบบนำหน้า	13
4	โพลและซีโร่ของตัวชดเชยแบบล้าหลัง	14
5	แบบจำลองระบบควบคุมของตัวชดเชยแบบนำหน้าและล้าหลัง	14
6	เฟสเพลน	16
7	ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม θ	17
8	ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของระยะ Dr	17
9	ช่วงของการค้นหา	23
10	การค้นหาจุดต่ำสุดโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น	23
11	แผนภาพการค้นหาค่าที่ดีที่สุดโดยวิธีโกลเด้นเซกชั่น	25
12	ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่กับการติดตั้ง TCSC อนุกรมกับสายส่ง	28
13	วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	30
14	แบบจำลองสองแกน	31
15	บล็อกไดอะแกรมของ AVR	34
16	บล็อกไดอะแกรมของ PSS	35
17	บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	36
18	โครงสร้างของ TCSC กับตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง	37
19	ตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกของ TCSC	38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัส 7) กับค่าประวิงเวลา ที่ 400 ms	42
21	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัส 7) กับค่าประวิงเวลา ที่ 700 ms	43
22	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัส 7) กับค่าประวิงเวลา ที่ 1000 ms	43
23	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8) กับค่าประวิงเวลาที่ 400 ms	44
24	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8) กับค่าประวิงเวลาที่ 700 ms	44
25	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8) กับค่าประวิงเวลาที่ 1000 ms	45
26	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัส 9) กับค่าประวิงเวลา ที่ 400 ms	45
27	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัส 9) กับค่าประวิงเวลา ที่ 700 ms	46
28	ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟส ที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัส 9) กับค่าประวิงเวลา ที่ 1000 ms	46

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

D	=	ค่าคงที่ของการหน่วงโหลด (Load-damping constant)
E'_d	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ในแนวแกนแม่เหล็ก (Transient electro-motive force d-axis)
E'_q	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ในแนวแกนตั้งฉากกับแกนแม่เหล็ก (Transient electro-motive force q-axis)
H	=	ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
i_d	=	กระแสในแนวแกนแม่เหล็ก (d-axis current)
i_q	=	กระแสในแนวแกนตั้งฉากกับแกนแม่เหล็ก (q-axis current)
P_m	=	กำลังงานกลอินพุท (Mechanical input), (pu.)
P_e	=	กำลังทางไฟฟ้าด้านเอาท์พุท (Electrical power output), (pu.)
r_a	=	ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Resistance of the armature winding), (pu.)
T'_{do}	=	ค่าคงที่ทางเวลาเปิดวงจรของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กในแนวแกนแม่เหล็ก (d-axis open circuit time constant of the field)
T'_{qo}	=	ค่าคงที่ทางเวลาเปิดวงจรของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้งฉากกับแกนแม่เหล็ก (q-axis open circuit time constant of the field)
V_d	=	แรงดันในแนวแกนแม่เหล็ก (d-axis voltage)
V_q	=	แรงดันในแนวแกนตั้งฉากกับแกนแม่เหล็ก (q-axis voltage)
X_d	=	ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแนวแกนแม่เหล็ก (d-axis synchronous reactance)
X_q	=	ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแนวแกนตั้งฉากกับแกนแม่เหล็ก (q-axis synchronous reactance)
X'_d	=	รีแอคแตนซ์ที่สภาวะชั่วครู่ในแนวแกนแม่เหล็ก (d-axis transient reactance)
X'_q	=	รีแอคแตนซ์ที่สภาวะชั่วครู่ในแนวแกนตั้งฉากกับแกนแม่เหล็ก (q-axis transient reactance)
X_l	=	รีแอคแตนซ์รั่วไหลของอาร์เมเจอร์ (Armature leakage reactance), (pu.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยใช้การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

Wide Area Robust TCSC Controller using Phase-plane Fuzzy Logic Control

คำนำ

พลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งถ่ายจากโรงไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยที่ตั้งอยู่ใกล้กับศูยน์กลางโหลด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทำให้ระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ต้องการโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกันแบบมีความยืดหยุ่นมากและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การควบคุมระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนมากขึ้น โดยปกติพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากจะถูกส่งถ่ายจากโรงไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านสายส่งผ่านระยะทางไกล นอกจากนี้ภายใต้สภาพแวดล้อมใหม่ของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะยังสามารถเชื่อมต่อกับแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนขนาดใหญ่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้นปัญหาของการแกว่งที่ความถี่ต่ำจึงเลวร้ายลงและเหตุการณ์นี้จะนำไปสู่ปัญหาการขาดเสถียรภาพ

การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำเกิดจากการที่ระบบไฟฟ้ามีการหน่วงไม่เพียงพอ ปัจจุบันมีงานวิจัยต่างๆมากมายได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหานี้ เช่น การใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) ร่วมกับตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer : PSS) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับการพัฒนาไปอย่างมาก ทำให้การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณสูงๆสามารถทำได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานแบบไดนามิก เทคโนโลยีที่กล่าวมาข้างต้นรู้จักในชื่อของอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission System : FACTS) TCSC เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ FACTS ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถนำมาชดเชยแบบอนุกรม ทำให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกลและสามารถนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swam Optimization : PSO) ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมการหน่วงของ TCSC การออกแบบตัวควบคุมการหน่วงของ TCSC เพื่อปรับปรุงการหน่วงของการแกว่งระหว่างพื้นที่โดยใช้สัญญาณขนาดแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสาย ณ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เป็นสัญญาณควบคุม มีงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อื่นๆที่ใช้ GA สำหรับปรับพารามิเตอร์เพื่อรักษาเสถียรภาพในพื้นที่กว้างโดยนำความไม่แน่นอนเนื่องจากการประวิงเวลาในการสื่อสารมาพิจารณา อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นใช้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างแบบตายตัวเท่านั้น โครงสร้างที่ตายตัวมีข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันเมื่อเงื่อนไขการทำงานถูกปรับไปอยู่ในช่วงที่กว้างเกินไป เนื่องจากระบบไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงเป็นการยากที่จะปรับแต่งพารามิเตอร์ของโครงสร้างตัวควบคุมแบบตายตัวให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในย่านทำงานที่กว้าง ในทางตรงกันข้าม การปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากไม่จำเป็นที่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่แม่นยำ ดังนั้นการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจึงตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นในเงื่อนไขการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งได้เป็นอย่างดี

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบความสำเร็จในการนำการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมาแก้ไขปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเป็นหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การควบคุมการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้ฟัซซี่ลอจิกอย่างง่าย การทดลองตรวจสอบประสิทธิภาพที่แท้จริงของการควบคุมแบบฟัซซี่แสดงให้เห็นโดยการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกมาใช้ใน TCSC เพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยจะเพิ่มสมรรถนะของการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกให้ดีขึ้นด้วยการปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น

โครงงานวิจัยนี้จึงถูกนำเสนอขึ้นเพื่อศึกษา และปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ โดยตัวอย่างวิธีที่จะนำเสนอ คือ การนำวิธีโกลเด้นเซกชั่นมาใช้เป็นตัวชี้วัดในการหาค่าคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดให้กับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อนำไปควบคุม Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ภายใต้การจำลองสถานการณ์การเกิดสิ่งรบกวนที่แตกต่างกัน และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในภายภาคหน้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ เพื่อศึกษา และปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ โดยการนำวิธีโกลเด้นเซกชั่นมาใช้เป็นตัวชี้วัดในการหาค่าคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดให้กับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อนำไปควบคุม Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

โดยสามารถแจกแจงวัตถุประสงค์หลักได้ดังนี้

1. ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการใช้อุปกรณ์ชดเชยตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทริสเตอร์ (TCSC) ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง

2. นำเสนอการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกมาเป็นตัวช่วยในการควบคุม TCSC เพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมระบบไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

3. นำเสนอวิธีโกลเด้นเซกชั่นเพื่อนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดในการหาค่าคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดให้กับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แผนการดำเนินโครงงาน

วิทยาพนธ์ฉบับนี้เป็นผลจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจหลักทฤษฎี ตลอดจนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งดำเนินการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังนี้

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	เดือน											
	ธ.ค		ม.ค		ก.พ		มี.ค		เม.ย		พ.ค	
1. ศึกษาขอบเขตของงานวิจัยจากบทความต่างประเทศ												
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น												
3. ศึกษาโปรแกรม และทดลองสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าจากโปรแกรม Dymola												
4. ศึกษาโปรแกรม และทดลองสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB												
5. ศึกษาการใช้วิธีแบบโกลเด้นเซกชั่นมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้กับการควบคุมเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อนำไปควบคุมอุปกรณ์ TCSC												
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง												
7. นำเสนอวิทยานิพนธ์ในการสอบสัมภาษณ์ขั้นสุดท้าย												
8. การปรับปรุงแก้ไข การพิมพ์วิทยานิพนธ์และเข้ารูปเล่ม												

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถจำลองพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เพื่อดูผลตอบสนองกรณีที่มีการเกิดความผิดพร่องในระบบได้

2. สามารถใช้ TCSC ที่นำเสนอมาควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง ในกรณีที่เกิดความผิดพร่องในระบบให้เข้าสู่เสถียรภาพได้

3. สามารถนำการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกมาเป็นตัวช่วยในการควบคุม TCSC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

4. สามารถนำวิธีโกลเด้นเซกชั่นมาเป็นตัวช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้กับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

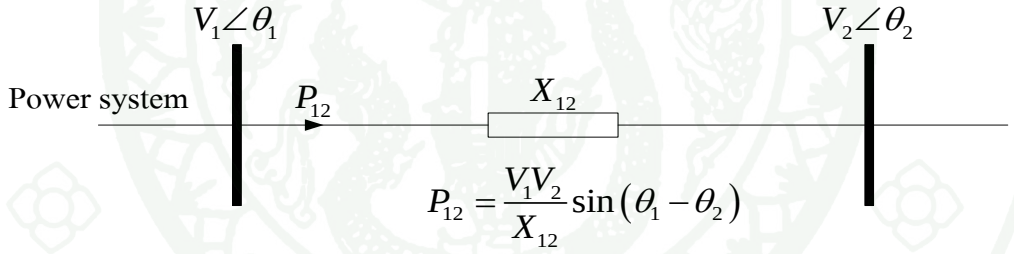
5. เป็นการนำเสนอแนวทางตัวอย่างในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ TCSC เพื่อประโยชน์ในทางวิศวกรรม เพื่อเป็นต้นแบบและแนวคิดในการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

6. สามารถจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง และผลตอบสนองจากการเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลัง และการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใดลงบนคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้เราสามารถรู้ถึงปัญหาเพื่อที่จะวางแนวทางการแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้อง สะดวก และประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังในความเป็นจริงได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

Kundur (1994) ได้พยายามทำการศึกษาวิจัยมาเป็นเวลานานหลายปีแล้วที่จะควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นทำงานได้ดีที่สุดทั้งสภาวะคงตัว และสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับอิมพิแดนซ์ของสายส่ง ขนาด และมุมของแรงดัน พิจารณาภาพที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้า (P_{12}) นั้นขึ้นอยู่กับรีแอคแตนซ์ของสายส่ง (X_{12}) ขนาดของแรงดันที่บัส (V_1 และ V_2) และขนาดของมุมที่บัส (θ_1 และ θ_2) ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ก็จะสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ ถ้านำอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ไปติดตั้งไว้เพื่อลดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใกล้กับพิกัดสูงสุด และเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัดสูงสุดมากๆ ก็จะทำให้ไม่ต้องสร้างสายส่งขึ้นมาใหม่ซึ่งก็อาจจะกล่าวได้ว่าวิธีดังกล่าวนี้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยไม่ต้องสร้างระบบไฟฟ้ากำลังขึ้นมาใหม่



ภาพที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้า

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม การขยายตัวภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง พลังงานไฟฟ้าเข้าไปมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมให้มีความรุดหน้าทั้งในด้านของการสร้างความสะดวกสบาย ใช้เป็นพลังงานหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ จึงมิอาจปฏิเสธได้ว่าพลังงานไฟฟ้าได้เป็นสิ่งจำเป็นของประเทศ ส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และจะต้องพยายามรักษาเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและมีมาตรฐานในการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากแรงดันตกในสายทำให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟและต่อการไฟฟ้าเอง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าระหว่างสายเพื่อควบคุมการหน่วงของการแกว่งความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพ

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์แฟคทส์

อิสระชัย (2553) ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ส่วนมากจะใช้อุปกรณ์ทางกลในการควบคุมการควบคุมรีแอคเตอร์ คาปาซิเตอร์ และหม้อแปลง เพื่อควบคุมรีแอคแตนซ์ของสายส่ง ขนาดของแรงดันไฟฟ้า และมุมของแรงดัน ซึ่งวิธีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์ทางกลใช้ได้กับสภาวะคงตัว แต่ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทั้งแบบไดมามิคส์ และแบบชั่วขณะได้ ประมาณช่วงปี 1980 ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์กำลังที่มีความไวสูงจำพวกไทริสเตอร์มาใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยกลุ่มนักวิจัยจาก Electric Power Research Institute (EPRI) โดยเรียกให้คำจำกัดว่า ระบบสายส่งที่ควบคุมได้ (Flexible Alternating Current Transmission System) หรือแฟคทส์ (FACTS) ซึ่งอุปกรณ์แฟคทส์นี้จะใช้ไทริสเตอร์ที่มีความไวสูงในการทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม tap ของหม้อแปลง รีแอคเตอร์ และคาปาซิเตอร์ ซึ่งสามารถแบ่งอุปกรณ์ FACTS ตามลักษณะการติดตั้งในระบบได้ 4 ชนิด ดังนี้

1. อุปกรณ์อนุกรม (series devices) คือ อุปกรณ์ที่ต่ออนุกรมกับสายส่ง ได้แก่ ตัวเก็บประจุหรือรีแอคเตอร์ซึ่งปรับค่าได้ และแหล่งจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้ซึ่งประกอบขึ้นจากเครื่องแปลงผัน หลักการควบคุมของอุปกรณ์ชนิดนี้คือจ่ายแรงดันด้านออก (V_{out}) ไปเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ในกรณีของตัวเก็บประจุหรือรีแอคเตอร์ แรงดันที่จ่ายออกไปมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านคูณกับค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ ในกรณีที่มุมเฟสของแรงดันด้านออกตั้งฉากกับกระแสในสายส่ง จะส่งผลให้อุปกรณ์นี้แลกเปลี่ยน (รับหรือจ่าย) กำลังไฟฟ้าเสมือนกับระบบ

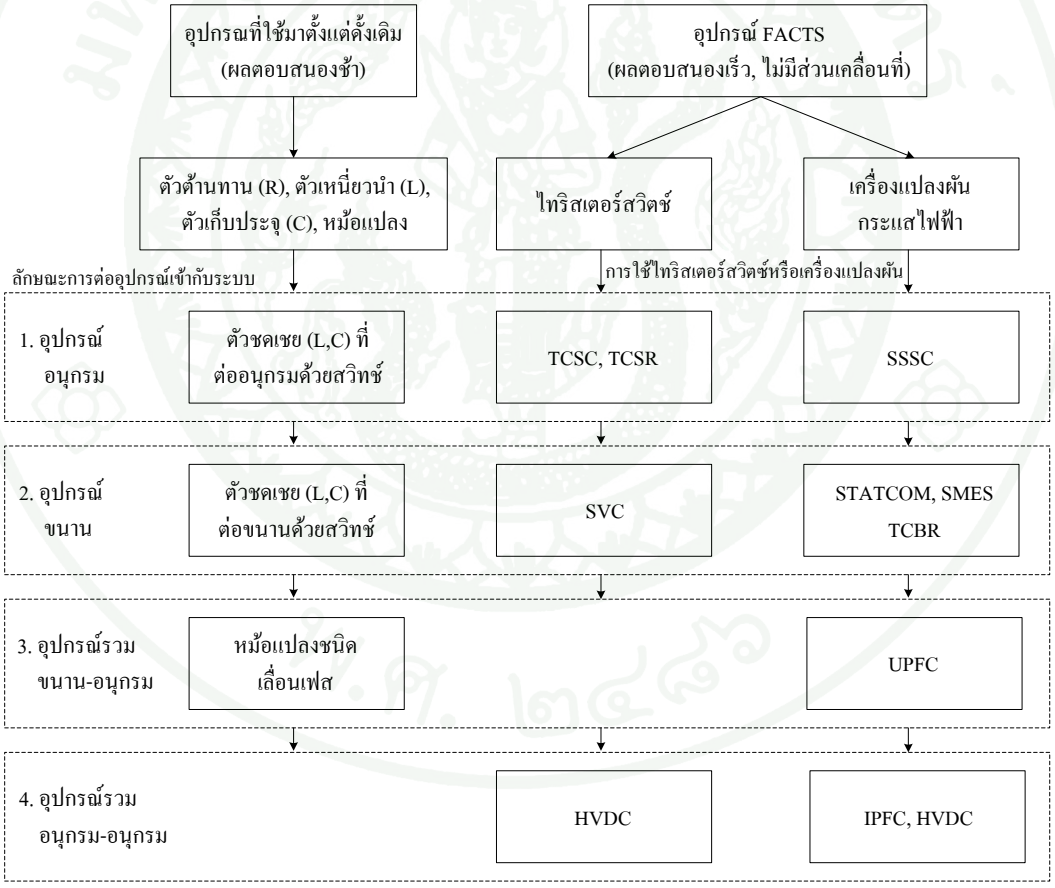
2. อุปกรณ์ขนาน (shunt devices) คือ อุปกรณ์ที่ต่อขนานกับบัส ได้แก่ ตัวเก็บประจุหรือรีแอคเตอร์ซึ่งปรับค่าได้ด้วยการควบคุมการนำกระแสของไทริสเตอร์ และแหล่งจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้ซึ่งประกอบขึ้นจากเครื่องแปลงผันและแหล่งสะสมพลังงาน หลักการควบคุมของอุปกรณ์ชนิดนี้คือจ่ายกระแส (i_{out}) ที่ปรับค่าได้ออกไปให้ระบบ เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. อุปกรณ์รวมขนาน-อนุกรม (combined series-shunt devices) ประกอบด้วยอุปกรณ์ FACTS ที่มีเครื่องแปลงผันซึ่งต่ออนุกรมกับสายส่งและขนานกับบัสซึ่งใช้แหล่งเก็บสะสมพลังงานด้านไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน

4. อุปกรณ์รวมอนุกรม-อนุกรม (combined series-series devices) ประกอบด้วยอุปกรณ์ FACTS ที่มีเครื่องแปลงผันซึ่งต่ออนุกรมกับสายส่งแต่ละเส้นมากกว่าสองตัวและใช้แหล่งเก็บสะสมพลังงานด้านกระแสตรงร่วมกัน

การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ FACTS พร้อมเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้มาตั้งแต่เดิมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 ดังนี้



ภาพที่ 2 การแบ่งชนิดอุปกรณ์ FACTS และการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้มาแต่ดั้งเดิม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายชื่อย่อของอุปกรณ์ FACTS ที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถแสดงได้ดังนี้

TCSC: Thyristor Controlled Series Capacitor	SVC: Static Var Compensator
TCBR: Thyristor Controlled Braking Resistor	TCSR: Thyristor Controlled Series Reactor
SSSC: Static Synchronous Series Compensator	UPFC: Unified Power Flow Controller
SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage	HVDC: High Voltage Direct Current
STATCOM: Static Synchronous Compensator	IPFC: Inter Line Power Flow Controller

Gyugyi (1995) นำเสนอตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเป็นอุปกรณ์สำหรับสำหรับควบคุมแบบ Real-Time และการชดเชยแบบพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีฟังก์ชั่นการทำงานหลายฟังก์ชั่น สามารถแก้ปัญหาของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ โดยสามารถควบคุมพารามิเตอร์ ที่มีผลกระทบกับการไหลของกำลังไฟฟ้าทุกค่าพร้อมกันได้ หรือสามารถเลือกควบคุมค่าใดค่าหนึ่งได้ ตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวมที่ใช้ประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์อนุกรมที่ใช้อุปกรณ์คาปาซิเตอร์อนุกรมควบคุมด้วยไทริสเตอร์ (Thyristor-Controlled Series Capacitor : TCSC) ต่อร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ขนานที่ใช้อุปกรณ์ตัวควบคุมมุมเฟสด้วยไทริสเตอร์ (Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator; TCPAR)

ทฤษฎีการออกแบบกลยุทธการควบคุมอุปกรณ์แฟคทส์ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นเหมาะสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดเล็ก ซึ่งยากที่จะนำไปใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่นั้นมีความซับซ้อน และมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมาก การจะออกแบบการควบคุมที่ต้อง linearize ระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เพื่อทำให้เป็นเชิงเส้นนั้นมีความซับซ้อนมาก การใช้การควบคุมแบบฟัซซี่ (fuzzy) ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการนำไปออกแบบการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น การควบคุมแบบฟัซซี่นั้นอยู่บนพื้นฐานของการจัดลำดับความมากน้อยของสมาชิก ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานการตัดสินใจของผู้ออกแบบ ซึ่งกฎการควบคุมจะไม่ตายตัวสามารถปรับเปลี่ยนไปตามความพอใจของผู้ออกแบบได้ นอกจากนี้ควบคุมแบบฟัซซี่ จัดว่าเป็นการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเหมาะสำหรับระบบที่มีการปลี่ยนแปลงสูง

Mak *et al*. (1995) ได้นำเสนอการควบคุมแบบฟัซซี่มาประยุกต์ใช้กับ STATCOM เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้เสนอวิธีการออกแบบกฎของฟัซซี่เพื่อให้ได้ผลของการปรับปรุงที่ดีที่สุดซึ่งมีชื่อเรียกว่า adaptive network based fuzzy inference system ใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานวิจัยนี้ได้นำการออกแบบการควบคุมของ TCSC และได้ทำการจำลองกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดหลายตัว ซึ่งผลของการจำลองพบว่า TCSC นั้นสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้

เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

อิสระชัย (2553) เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังในการกลับคืนสู่จุดทำงานที่สมดุลหลังเกิดการรบกวนในระบบ สาเหตุของการรบกวนได้แก่ ภัยธรรมชาติ เช่น ลม พายุ และฟ้าผ่า เป็นต้น การรบกวนเหล่านี้ทำให้เกิดความผิดพร่องหรือลัดวงจร (short circuit) ของสายส่งในระบบความผิดพลาดของระบบป้องกันและความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติการระบบ เป็นต้น ผลกระทบคือถ้าระบบสูญเสียเสถียรภาพไปจะส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ต่างๆที่เป็นไปได้ เช่น การตัดแบบต่อเรียงกัน (cascade tripping) การสูญเสียภาวะซิงโครไนซ์ (loss of synchronism) ไฟฟ้าดับบางส่วน (partial blackout) และไฟฟ้าดับบริบูรณ์ (complete blackout) เป็นต้น

การแบ่งประเภทเสถียรภาพระบบ สามารถแบ่งได้ตามตัวแปรหลักสามตัวในระบบ คือ มุมโรเตอร์ แรงดัน และความถี่ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งเสถียรภาพระบบเป็นสามประเภท ได้แก่ เสถียรภาพมุมโรเตอร์ เสถียรภาพความถี่ และเสถียรภาพแรงดัน สามารถอธิบายได้ดังนี้

เสถียรภาพมุมโรเตอร์

เสถียรภาพมุมโรเตอร์ คือ ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้ากำลังที่จะรักษาภาวะซิงโครไนซ์หลังเกิดการรบกวนในระบบ เสถียรภาพมุมโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างแรงบิดทางกลและแรงบิดทางไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้หรือไม่นั้นพิจารณาจากการแกว่งของมุมโรเตอร์ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (power oscillation) ที่ไหลในสายส่ง ถ้าการแกว่งของมุมโรเตอร์ค่อยๆลดลงจนเข้าหาจุดทำงานที่สมดุลเดิมหรือที่สมดุลใหม่ แสดงว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ ดังนั้นในการศึกษาเสถียรภาพมุมโรเตอร์จะเน้นการวิเคราะห์พลศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับการแบ่งประเภทของเสถียรภาพมุมโรเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากขนาดของการรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. เสถียรภาพการรบกวนขนาดเล็ก (small disturbance stability) หรือเสถียรภาพพลวัติ (dynamic stability) คือ ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งหมดในระบบที่จะรักษาภาวะซิงโครไนซ์หลังเกิดการรบกวนขนาดเล็กขึ้นมาในระบบ คำว่า “ขนาดเล็ก” หมายถึงการรบกวนที่มีขนาดเล็กเพียงพอจนสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ด้วยการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของกำลังการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กอย่างฉับพลัน เป็นต้น ดังนั้นอาจจะเรียกเสถียรภาพชนิดนี้ว่า เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small signal stability)

2. เสถียรภาพการรบกวนขนาดใหญ่ (large disturbance stability) หรือเสถียรภาพชั่วครู่ คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังในการรักษาภาวะซิงโครไนซ์หลังเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ คำว่า “ขนาดใหญ่” หมายถึงการรบกวนนั้นมีขนาดใหญ่จนไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ระบบได้ด้วยการทำให้เป็นเชิงเส้น เช่น การลัดวงจรสามเฟส การปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ และการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่เชิงเส้นด้วยวิธีคำนวณเชิงตัวเลขและด้วยการจำลองระบบทางเวลาเพื่อให้ได้เส้นโค้งการแกว่ง (swing curve) ของมุมโรเตอร์

เสถียรภาพความถี่

เสถียรภาพความถี่ คือ ความสามารถในการรักษาความถี่ซิงโครนัสของระบบไฟฟ้ากำลังให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เมื่อเกิดการรบกวนในระบบขึ้น เป็นผลให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้าที่โหลดต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่

เสถียรภาพแรงดัน

เสถียรภาพแรงดัน คือ ความสามารถในการรักษาแรงดันของทุกบัสในระบบให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติและหลังจากที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบ โดยทั่วไปปัญหาเสถียรภาพแรงดันมักจะเกิดขึ้นที่บัสโหลด เมื่อโหลดมีความต้องการไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้กระแสที่ไหลจาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โรงไฟฟ้าไปยังโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงดันตกในสายส่งเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงดันที่โหลดจึงลดลง ถ้ากำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงเกินกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่บัสโหลดรับได้ จะทำให้แรงดันที่บัสโหลดตกลงอย่างรวดเร็ว เรียกเหตุการณ์นี้ว่าการพังทลายของแรงดัน (voltage collapse) ส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันให้คงตัวในระบบส่งหรือที่บัสโหลด

ตัวชดเชยแบบนำหน้าและล้าหลัง (Lead-lag compensator)

1. ตัวชดเชยแบบนำหน้า (Lead compensator)

การปรับปรุงคุณสมบัติของระบบด้วยการใช้ตัวชดเชยแบบนำหน้าโดยใช้ผลการตอบสนองความถี่จะนำเอาตัวชดเชยแบบนำหน้ามาช่วยเพิ่มค่ามุมเฟสของระบบควบคุม ทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพดีขึ้น การชดเชยระบบควบคุมโดยใช้ผลการตอบสนองเชิงความถี่เหมาะสำหรับระบบควบคุมที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ คือ เพิ่มอัตราขยายสุดท้ายและมุมเฟสสุดท้าย ลดความคลาดเคลื่อนต่างของระบบควบคุม และปรับปรุงการตอบสนองชั่วขณะ

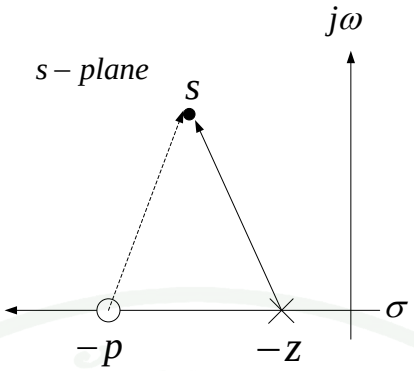
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบนำหน้า มีรูปแบบดังนี้

$$G_c(s) = K_c\alpha\frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = K_c\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}} \qquad (1)$$

เมื่อ K_c คือ อัตราขยายควบคุม

α, T คือ ค่าคงที่จากองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่นำมาสร้างตัวชดเชย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 โพลและซีโร่ของตัวชดเชยแบบนำหน้า

เมื่อ z คือ ซีโร่

p คือ โพล

2. ตัวชดเชยแบบล้าหลัง (Lag compensator)

ตัวชดเชยแบบล้าหลัง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นงานที่ต้องการค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวต่ำมากๆ ซึ่งจะกำหนดความต้องการในรูปค่าคงตัวความผิดพลาด จะกล่าวถึงการชดเชยด้วยตัวชดเชยอันดับที่ 1 โดยมีโพลของตัวชดเชยอยู่ใกล้จุดกำเนิดของระนาบ S ดังที่แสดงในภาพที่ 4

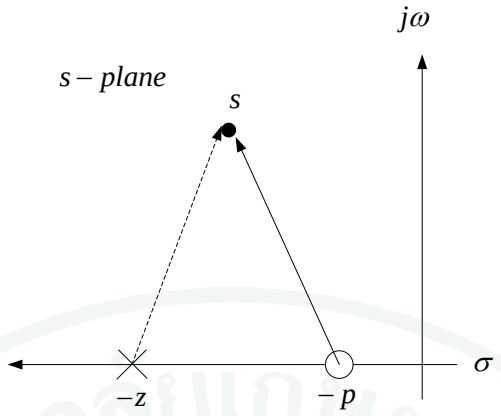
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสตามหลัง มีรูปแบบดังนี้

$$G_c(s) = K_c\alpha\frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = K_c\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}} \qquad (2)$$

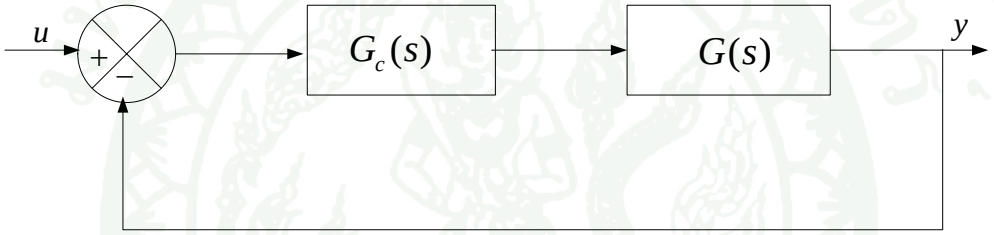
เมื่อ K_c คือ อัตราขยายควบคุม

α, T คือ ค่าคงที่จากองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่นำมาสร้างตัวชดเชย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 โพลและซีโร่ของตัวชดเชยแบบล้าหลัง



ภาพที่ 5 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวชดเชยแบบนำหน้าและล้าหลัง

การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

Phorang (2002) ในปัจจุบันทฤษฎีฟัซซี่ได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมและคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย จึงเป็นแรงจูงใจให้วิศวกรไฟฟ้ากำลังได้ศึกษาและนำทฤษฎีนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวในการแก้ปัญหา การใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญอย่างเช่น ฟัซซี่ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกหยิบยกขึ้นมา

ตัวควบคุมของฟัซซี่จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมให้กับอุปกรณ์ควบคุมเดิม (Hiyama, 1994; Hiyama and Yoshiteru, 1997) ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความสามารถในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพภายหลังจากเกิดการแกว่งไกวอันเนื่องมาจากการรบกวนบางอย่างได้รวดเร็วขึ้น ตัวควบคุมฟัซซี่จะมีบทบาท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คล้ายกับตัวควบคุมเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (PSS) แต่จะมีกระบวนการสร้างสัญญาณควบคุมเสริมที่แตกต่างกัน โดย PSS อาจใช้การควบคุมแบบพีไอดี หรือแบบเกนปรับค่าได้ซึ่งจะยุ่งยากโดยเฉพาะในกรณีของระบบที่มีความซับซ้อน ส่วนฟัซซี่จะเป็นการควบคุมด้วยกฎอย่างง่ายเพียงไม่กี่กฎซึ่งได้มาจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญแต่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังไม่ต้องอาศัยการคำนวณที่ยุ่งยากจึงใช้เวลาน้อยในการสร้างสัญญาณควบคุม

โดยทั่วไปกฎของฟัซซี่จะถูกสร้างขึ้นจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญในสาขาต่างๆ ดังนั้นสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง กฎฟัซซี่จะถูกสร้างโดยอาศัยพื้นฐานจากกฎพื้นที่เท่ากันซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพทรานเซียนส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง การสร้างกฎของฟัซซี่สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังจะเริ่มต้นจากการพิจารณาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเครื่องจักรที่ถูกต่อเข้ากับอินฟินิทบัส ระบบจะถูกควบคุมด้วย GOV และ AVR โดยมีสัญญาณควบคุมเสริมสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัว แต่พบว่าวิธีนี้ยากที่จะสร้างกฎควบคุมให้เหมาะสมกับระบบต่างๆด้วยการลองผิดลองถูก ดังนั้นจึงได้มีการสร้างเฟสเพลน (Hiyama and Miyazaki, 1996; Ortmayer and Hiyama, 1995) ของ $\Delta\omega_{(t)}$ และ $\Delta\omega'_{(t)}$ สำหรับการควบคุมขึ้น โดยให้ $\Delta\omega_{(t)}$ เป็นแกนนอนและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ $\Delta\omega_{(t)}$ ซึ่งได้แก่ $\Delta\omega'_{(t)}$ เป็นแกนตั้ง ซึ่งเฟสเพลนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการควบคุมแบบเร่ง และส่วนของการควบคุมแบบหน่วง

สำหรับสัญญาณเร่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า : $\Delta\omega'_{(t)}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

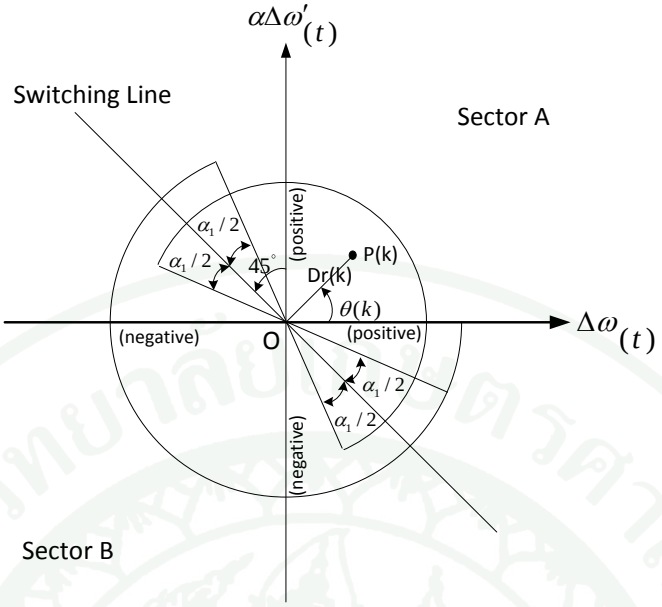
$$\Delta\omega'_{(t)} = \left[\Delta\omega_{(t)} - \Delta\omega_{(t-1)}\right] / \Delta T \tag{3}$$

โดยที่ t = 1, 2, 3,…, n ; T คือ เวลาสุ่ม, n คือ จำนวนข้อมูล

$\Delta\omega'_{(t)}$ ที่คำนวณได้จะถูกคูณกับแฟกเตอร์ปรับสเกล (α) เป็น $\alpha\Delta\omega'_{(t)}$ ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้จะเป็นคู่ลำดับของจุด $p(k)$ บนเฟสเพลน ณ เวลาสุ่มใดๆนั่นเอง

$$p(k) = \left[\Delta\omega_{(t)}, \alpha\Delta\omega'_{(t)}\right] \tag{4}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 เฟสเพลน

จากข้อมูลอินพุทเบื้องต้นสามารถแปลงความหมายจากเฟสเพลนได้ดังนี้

$$p(k) = Dr(k) < \theta(k) \tag{5}$$

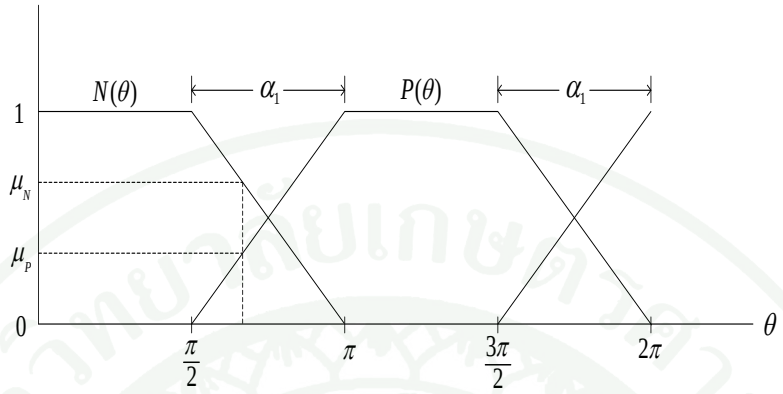
$$Dr(k) = \sqrt{\left[\Delta\omega(t)\right]^2 + \left[\alpha\Delta\omega'(t)\right]^2} \tag{6}$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}\left[\frac{\alpha\Delta\omega'(t)}{\Delta\omega(t)}\right] \tag{7}$$

จุด O เป็นจุดที่ระบบสมดุล ดังนั้นจุดประสงค์ของการควบคุมด้วยวิธีนี้ก็คือ พยายามเลื่อนตำแหน่งของจุด $p(k)$ ให้เข้าสู่จุดกำเนิด O ให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พื้นที่บนเฟสเพลนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ A และพื้นที่ B โดยถ้าจุด $p(k)$ อยู่ในบริเวณพื้นที่ A แล้ว TCSC จะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แต่ถ้าจุด $p(k)$ อยู่ในบริเวณพื้นที่ B แล้ว TCSC จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ สำหรับบริเวณที่มีการซ้อนทับของพื้นที่ทั้ง 2 ซึ่งอยู่ในบริเวณของจตุภาคที่ 2 และ 4 และถูกกำหนดด้วย α_1 นั้นจะเรียกว่าบริเวณของฟัซซี่ โดยมีสวิตซ์ชิ่งไลน์ซึ่งทำมุม 45^o ทวนเข็มนาฬิกา

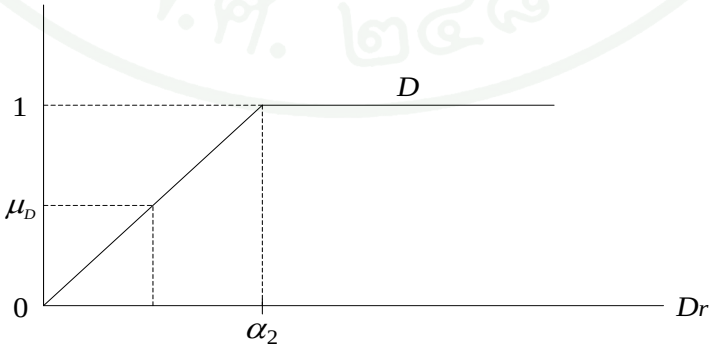
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กับแกนตั้ง จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ $\theta(k)$ จะเป็นตัวที่กำหนดว่าจุด $p(k)$ จะอยู่ในส่วนของพื้นที่ใด โดยสามารถเขียนฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม $\theta(k)$ ได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม θ

μ_N และ μ_P คือ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ θ ถ้ามุม θ อยู่ในบริเวณ N หมายความว่า TCSC ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบเพื่อให้เกิดการควบคุมแบบหน่วง แต่ถ้ามุม θ อยู่ในบริเวณ P หมายความว่า TCSC จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบเพื่อให้เกิดการควบคุมแบบเร่ง สำหรับปริมาณของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จะจ่ายหรือรับจากระบบนั้นจะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ Dr ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวน กล่าวคือ ถ้า Dr อยู่ห่างจากจุด O มากการรบกวนก็จะรุนแรง ดังนั้นการเลื่อนจุด $p(k)$ กลับมายังจุด O นั้น ต้องใช้สัญญาณควบคุมเสริมที่มีความแรงมากขึ้นด้วย ความแรงของสัญญาณควบคุมเสริมนี้จะถูกกำหนดโดยค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ Dr ซึ่งก็คือ μ_D ในภาพที่ 8 โดยมี α_2 เป็นแฟกเตอร์ปรับสเกล



ภาพที่ 8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของระยะ Dr

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สัญญาณควบคุมเสริมซึ่งเป็นสัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมฟัซซี่นั้นจะถูกกำหนดโดย

1. ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม $\theta(k)$ คือ μ_N และ μ_P หรือกล่าวอีกนักหนึ่งก็คือตำแหน่งของจุด $p(k)$ บนเฟสเพลน ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่าสัญญาณควบคุมเสริมที่สร้างขึ้นจะควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ TCSC

2. ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ $Dr(k)$ คือ μ_D หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือระยะทางระหว่างจุด $p(k)$ และจุด O ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกความแรงของสัญญาณที่จะถูกสร้างขึ้นว่าการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะมีปริมาณมากน้อยเพียงใด

จากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่กล่าวมาจะสามารถหาสัญญาณควบคุมเสริม U_{TCSC} ได้โดยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง

$$U_{TCSC} = \frac{[\mu_N - \mu_P]\mu_D U_{\max}}{\mu_N + \mu_P} \tag{8}$$

โดย $U_{\max}$ คือ ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด

และจากความสัมพันธ์

$$\mu_P = 1 - \mu_N \tag{9}$$

จะได้

$$U_{TCSC} = (2\mu_N - 1)\mu_D U_{\max} \tag{10}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดย

$$\mu_D = \frac{Dr}{\alpha_2} \quad \text{เมื่อ} \quad Dr \leq \alpha_2 \tag{11}$$

$$\mu_D = 1 \qquad \text{เมื่อ} \quad Dr > \alpha_2 \tag{12}$$

μ_D จะเปรียบเสมือนเกนเฟกเตอร์ ทำให้ได้การควบคุมที่สามารถปรับค่าเกนได้โดยจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการรบกวนซึ่งก็คือระยะ $Dr(k)$ นั่นเอง

ทฤษฎีทางด้านการหาค่าความเหมาะสม

เอกวิทย์ (2550) ได้นำเสนอไว้ว่าการหาค่าความเหมาะสมเป็นสาขาวิชาหนึ่งของคณิตศาสตร์ประยุกต์ ซึ่งเราสามารถนำศาสตร์ของวิชาการหาค่าความเหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายสาขาวิชา โดยการกำหนดปัญหาที่ต้องการคำตอบในรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ และใช้เทคนิคการแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีการหาค่าความเหมาะสมโดยผ่านขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เป็นการจำลองตัวเลขแทนสถานการณ์จากความจริงที่เกิดขึ้น แทนด้วยสมการที่อธิบายฟังก์ชัน ซึ่งประกอบไปด้วยค่าคงที่ ตัวแปร และ พารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อแทนค่าแล้วจะให้คำตอบใดคำตอบหนึ่งตามสมการวัตถุประสงค์ที่กำหนดขึ้น

2. ขั้นตอนจำลองสถานการณ์ (Model Simulation) เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกกำหนดสมการที่อธิบายฟังก์ชัน ตรงตามวัตถุประสงค์แล้ว การทดลองเปลี่ยน ค่าคงที่ ตัวแปร และพารามิเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตัวแปรตัดสินใจต่างๆที่ส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ตามสมการวัตถุประสงค์ หลายๆครั้งซ้ำแล้วซ้ำอีก เพื่อค้นผลลัพธ์ฯ ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นเรื่องยากและใช้เวลามากที่จะกำหนดหรือคาดหมายตัวแปรตัดสินใจต่างๆ ด้วยวิธีลองผิดลองถูก จึงต้องมีระเบียบวิธีค้นหา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ขั้นตอนหาค่าความเหมาะสม (Optimization) จากการจำลองสถานการณ์เพื่อค้นผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งต้องกำหนดหรือคาดหมายตัวแปรตัดสินใจต่างๆ จึงต้องมีระเบียบวิธีค้นหา ซึ่งมีกลวิธีต่างๆมากมายตามแต่ลักษณะปัญหา เพื่อการค้นพบเป้าหมายคำตอบอย่างชาญฉลาดและใช้เวลาไม่นาน

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบการหาค่าความเหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธีที่ไม่สามารถกำหนดสมการวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่มีค่าคงที่ ค่าตัวแปร และค่าพารามิเตอร์ ที่อธิบายความสัมพันธ์เป็นสมการได้ชัดเจน หรือที่เรียกว่าแบบ Stochastic แล้วนำมาจำลองสถานการณ์ สุดท้ายนำมาหาระเบียบวิธีเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดค่าคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด มีระเบียบวิธีที่นำมาพิจารณามากมาย และตัดสินใจเลือกใช้เป็นเครื่องมือศึกษาดังนี้

1. Ant colony optimization (ACO) เป็นระเบียบวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมการหาแหล่งอาหารของมดจากแหล่งที่อยู่อาศัยคือรังมด โดยใช้สารที่ปล่อยจากก้นเป็นเส้นทางเดิน (agents) เมื่อเข้าใกล้หรือเจอเป้าหมายมดจะปล่อยสารจากก้นจำนวนมากขึ้นและถี่ขึ้น เมื่อนำพฤติกรรมการหาเป้าหมายอาหารของมดมาหาเป้าเชิงเลข ระเบียบวิธีนี้ จะให้ผลดีในค่าคำตอบเหมาะสมปรากฏเฉพาะที่ (Local Optimal) มีข้อจำกัดการประยุกต์ใช้ที่การกำหนดข้อจำกัด หากฟังก์ชันมีค่า Local Optimal จำนวนมาก และเป็นค่าที่เท่าๆกันหรือใกล้เคียงกัน อาจจะไม่เจอ Global Optimal เช่นเดียวกับพฤติกรรมมดที่เจออาหารในขนาดปริมาณที่เท่าๆกันหลายจุด มดจะตอมเฉพาะจุดที่เจอก่อนเป็นจำนวนมาก แทนที่จะตอมในปริมาณที่เท่าๆกัน ต่อเมื่อใช้รอบการค้นมากพอก็จะเจอ Global Optimal ได้เช่นกัน จึงเป็นวิธีที่ต้องระมัดระวังในการใช้พารามิเตอร์ต่างๆค่อนข้างมาก

2. Bacteriologic Algorithms (BA) เป็นระเบียบวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมสภาพแวดล้อมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย รวมถึงการปรับตัวของแบคทีเรีย มีเป้าหมายเฉพาะที่ซึ่งแบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดี ก็จะพัฒนาจำนวนไปในทิศทางนั้น นำมาประยุกต์ใช้หาค่าคำตอบเหมาะสมเชิงเลขในสิ่งแวดล้อมทั้งหมดที่กว้างเกินจะหาเจอได้ นับเป็น Global Search Techniques ประเภทหนึ่ง ที่ได้มีผู้ประยุกต์ใช้กับการวางเสาอากาศเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ, การศึกษาการกระจายความเจริญชุมชนเมือง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. Interactive genetic algorithms (IGA) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้หลักของ genetic algorithms แต่มาประยุกต์ใช้กับพฤติกรรมความรู้สึกตอบสนองทางด้านสุนทรีภาพ (aesthetic) ของมนุษย์ ซึ่งยากมากที่จะแปลงค่าเชิงเลขลงในระบบคอมพิวเตอร์ ยกตัวอย่างเช่นความนิยมในรูปภาพความชอบในดนตรี เพื่อพัฒนาผลงานด้านศิลปที่มนุษย์ชื่นชอบมากที่สุด ซึ่งต้องพัฒนาโดยการโต้ตอบกับความรู้สึกของมนุษย์

4. Simulated annealing (SA) เป็นระเบียบวิธีหาค่าความเหมาะสมแบบ Stochastic ที่ใช้แนวคิดจากการหล่อหลอมโลหะ อะตอมของโลหะจะอยู่ในข่ายที่มีพลังงานศักย์ต่ำสุดเมื่ออุณหภูมิเย็นถึงจุดเยือกแข็ง และการที่อะตอมจำนวนมากและความเป็นไปได้ในการจัดเรียงตัวของอะตอมทำให้สภาวะสุดท้ายมีพลังงานต่ำสุดเฉพาะที่ แทนที่ทุกอะตอมจะอยู่ในสภาวะพลังงานต่ำสุดทั้งหมด โดยวิธีการเพิ่มความร้อนทีละน้อยและทำให้เย็นลงอย่างช้าๆจะทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะพลังงานต่ำสุดทั้งหมด นำมาประยุกต์สภาวะสุดท้ายที่โลหะมีพลังงานต่ำสุดเฉพาะเชิงเลขแทนเป็นการค้นหาค่าความเหมาะสมที่สุด

5. Tabu search (TS) เป็นระเบียบวิธีที่คล้ายกันกับ Simulated Annealing คือเป็นระเบียบวิธีประเภทเชิงเรียนรู้ประสบการณ์ Tabu Search ซึ่งใช้วิธีหาคำตอบที่ดีกว่าโดยจดจำและป้องกันค่าเดิมๆที่แย่กว่า ใน Tabu list ซึ่งจะช่วยทำการปรับปรุงรอบการค้นต่อๆไปจนกว่าจะถึงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่วิธีนี้อาศัยหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องค่อนข้างมาก ทำให้มีการทำงานที่ยุ่งยากซับซ้อน

6. Particle Swarm Optimization (PSO) เป็นระเบียบวิธีการหาค่าความเหมาะสมแบบ Stochastic ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการฟุ้งกระจายอนุภาคเป็นกลุ่ม เช่นกลุ่มของฝูงนกที่กำลังบินตามจ่าฝูง กลุ่มของหมู่ปลาในทะเลว่ายน้ำตามจ่าฝูง แม้กระทั่งพฤติกรรมของมนุษย์ในสังคมที่มักจะทำตามผู้นำเพียงไม่กี่คน PSO ประกอบด้วย กลุ่มของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ในหลายมิติ เป็นการค้นหาคำตอบของการแก้ปัญหาบนพื้นฐานจำนวนจริง แต่ละอนุภาคมีตำแหน่งเวคเตอร์ถูกนำมาประยุกต์เชิงเลขความเร็วในเวคเตอร์ถูกเก็บในหน่วยความจำ เปรียบเทียบกับอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน (neighbor particle) แล้วคัดเลือกศึกษาอนุภาคที่มีศักยภาพความเร็วและเวคเตอร์ที่เป็นเวคเตอร์นำ เคลื่อนตัวไปในทิศทางใหม่ๆ จนกว่าจะได้เวคเตอร์คำตอบครอบคลุม (Global Solution Vector)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. Genetic Algorithms (GAs) เป็นระเบียบวิธีการหาค่าความเหมาะสมแบบ stochastic โดยมีแนวคิดสมมุติฐานเชิงพันธุกรรม เลียนแบบขั้นตอนการวิวัฒนาการทางธรรมชาติ (Natural Evolution) ตั้งอยู่บนพื้นฐานแนวคิดการคัดเลือกเผ่าพันธุ์ตามธรรมชาติ ได้ถูกนำมาประยุกต์เชิงเลขในการค้นหาคำตอบของปัญหาการตัดสินใจที่มีความสลับซับซ้อน มีตัวแปรและเงื่อนไขจำนวนมากได้ดี

8. Golden Section Search (GS) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของฟังก์ชันฐานนิยมเดียว (Unimodal function) วิธีนี้ถูกคิดค้นขึ้นในปี 1953 โดย Kiefer วิธีการพิจารณาคือ จะเริ่มพิจารณาข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในช่วงความไม่แน่นอนเริ่มต้น (Initial interval of uncertainty) จากนั้นจะแบ่งข้อมูลเป็น 2 ช่วง แล้วทำการเปรียบเทียบค่าของข้อมูลในแต่ละช่วง ซึ่งจะตัดข้อมูลในช่วงที่ไม่สนใจทิ้งออกไปแล้วทำซ้ำเดิม คือ แบ่งช่วงของข้อมูลที่สนใจออกเป็น 2 ช่วงใหม่ และทำการเปรียบเทียบจนกว่าจะเหลือช่วงความไม่แน่นอนที่พอยอมรับได้ กล่าวได้ว่าในช่วงความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นสุดท้ายนั้นจะมีจุด optimal เกิดขึ้น ซึ่งถ้าฟังก์ชันของข้อมูลที่สนใจไม่ได้เป็นฟังก์ชันฐานนิยมเดียวแล้ว จุดที่เกิดขึ้นจะเป็นจุดที่ทำให้เกิด Local optimal แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าข้อมูลที่สนใจเป็นฟังก์ชันฐานนิยมเดียวแล้ว จุดที่เกิดขึ้นจะเป็นจุดที่ทำให้เกิด Global optimal แม้ว่าวิธีการค้นหาค่าความเหมาะสมจะสามารถใช้ได้กับฟังก์ชันทุกประเภท แต่ฟังก์ชันที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการค้นหา คือ ฟังก์ชันฐานนิยมเดียว จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เลือกใช้ระเบียบวิธีนี้ในการศึกษาครั้งนี้

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น (GS)

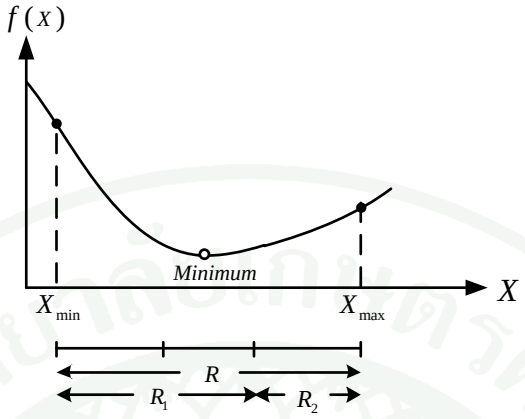
วิธีการค้นหาแบบโกลเด้นเซกชั่น เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถใช้สำหรับค้นหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดอย่างต่อเนื่องโดยลดช่วงของการค้นหาลง ลำดับขั้นตอนในการค้นหาค่าสำหรับสามจุดที่มีระยะห่างแบบอัตราส่วนทอง จากภาพที่ 9 การค้นหาช่วง R สามารถแสดงได้ดังนี้

$$R = R_1 + R_2 \tag{13}$$

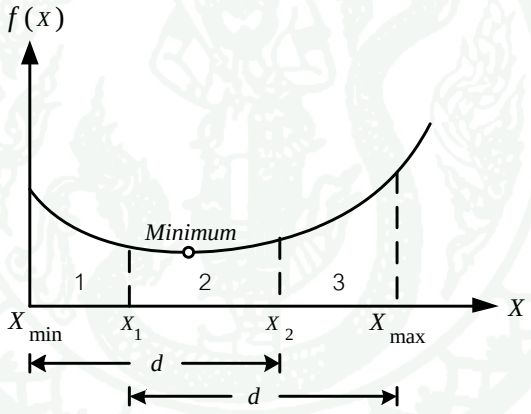
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R} = 0.6180 \tag{14}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขณะที่ 0.6180 คือ ค่าคงที่อัตราส่วนทอง



ภาพที่ 9 ช่วงของการค้นหา



ภาพที่ 10 การค้นหาจุดต่ำสุดโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น

ภาพที่ 10 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการค้นหาจุดต่ำสุดโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ โกลเด้นเซกชั่น ขอบเขตใหม่ของ x_1 และ x_2 คำนวณโดย

$$d = 0.618 \times (X_{\max} - X_{\min}) \tag{15}$$

$$x_1 = X_{\max} - d \tag{16}$$

$$x_2 = X_{\min} + d \tag{17}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขณะที่ $X_{\max}$ คือ ค่าสูงสุด

$X_{\min}$ คือ ค่าต่ำสุด

โดยสรุป วิธีการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าต่ำสุดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณช่วงเวลาเริ่มต้น $X_{\max} - X_{\min}$ ว่าค่าต่ำสุดยังคงอยู่ภายในช่วงเวลา

ขั้นตอนที่ 2: แบ่งช่วงเวลาที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปถึงขั้นตอนที่ 3 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 8

ขั้นตอนที่ 3: ประเมินผลการทำงานที่จุดสองจุดภายในที่ได้จาก (16) และ (17) จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขที่ว่า

ถ้า $f(x_1) > f(x_2)$ แล้วค่าต่ำสุดอยู่ระหว่าง x_2 และ $X_{\max}$ สร้างช่วงเวลาใหม่ในการค้นหาที่แคบลงโดยการตั้งค่า $X_{\min} = x_2$

ถ้า $f(x_1) < f(x_2)$ แล้วค่าสูงสุดอยู่ระหว่าง $X_{\min}$ และ x_1 สร้างช่วงเวลาใหม่ในการค้นหาที่แคบลงโดยการตั้งค่า $X_{\max} = x_1$

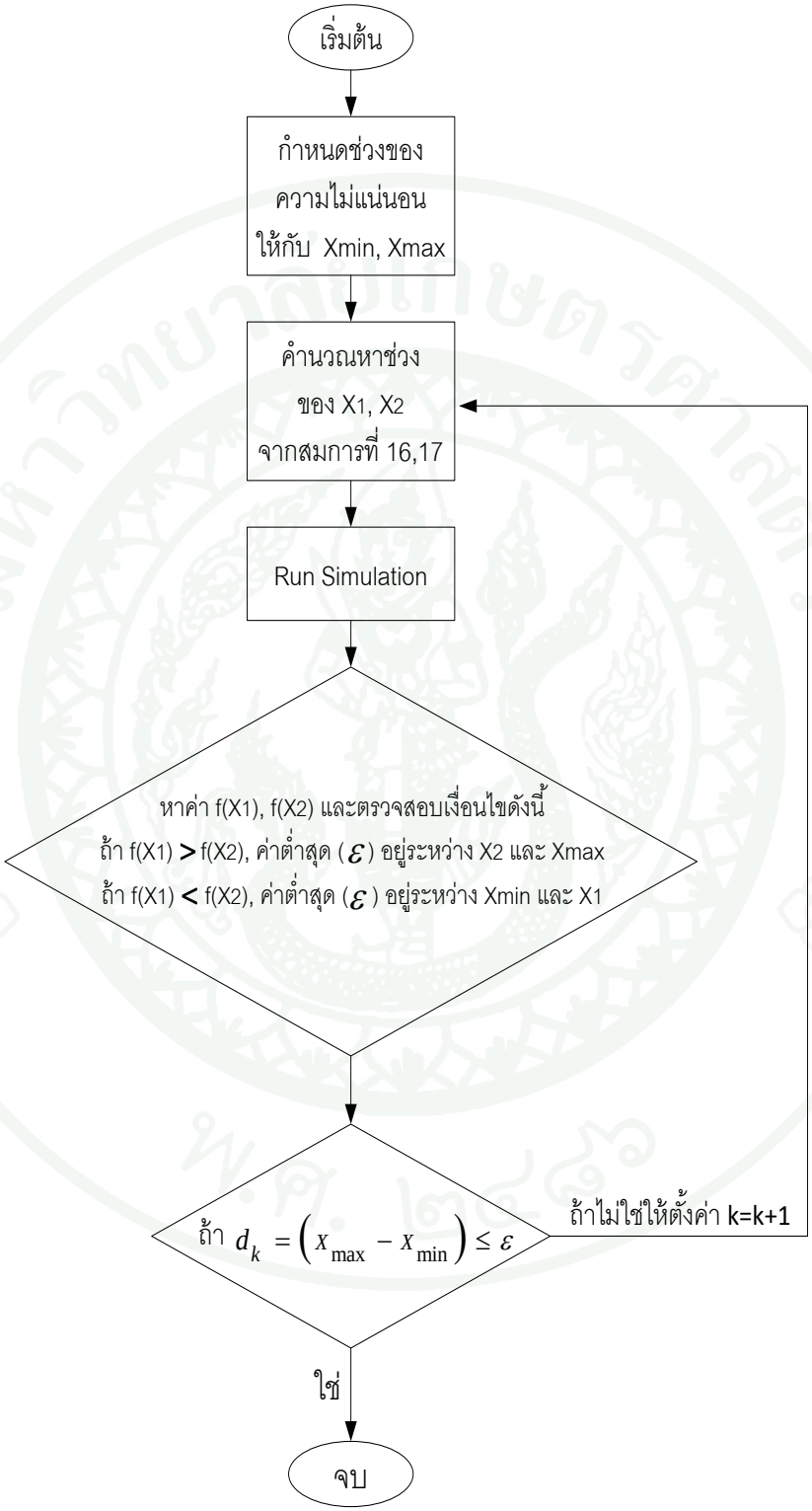
ขั้นตอนที่ 4: คำนวณ

$$\varepsilon = (1 - 0.618) \cdot (X_{\max} - X_{\min}) \tag{18}$$

ขั้นตอนที่ 5: ดำเนินการจนกระทั่งค่า ε น้อยกว่าขอบเขตที่จำกัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 11 แสดงให้เห็นถึงแผนภาพของการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีโกลเด้นเซกชั่น



ภาพที่ 11 แผนภาพการค้นหาค่าที่ดีที่สุดโดยวิธีโกลเด้นเซกชั่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

2. ระบบปฏิบัติการ Windows XP

3. โปรแกรม Dymola, MATLAB 7.0

4. โปรแกรม MATLAB 7.0

วิธีการ

1. ศึกษาระบบจำลอง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย

1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

1.2 อุปกรณ์ควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทริสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitor; TCSC)

2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และหลักการของการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการต่างๆ

3. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และการประยุกต์ใช้งานการควบคุมเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

4. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น

5. เขียนแบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้าที่สนใจ โดยใช้การควบคุมอ้างอิงจากโปรแกรม Dymola

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เขียนแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่สนใจ โดยนำอุปกรณ์ TCSC ทั่วไปเข้าไปต่อเพิ่มในระบบไฟฟ้ากำลังหลัก

7. พัฒนาแบบจำลองในข้อ 6 โดยนำการควบคุมเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกไปควบคุม TCSC ในระบบไฟฟ้ากำลังหลักเพื่อดูผลตอบสนองต่อการควบคุม

8. บันทึกผลเพื่อเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำการแก้ไขและปรับปรุง

9. ปรับปรุงและแก้ไขแบบจำลองที่เขียนขึ้นจากผลการวิเคราะห์ในข้อ 8

10. ทดสอบ และบันทึกผลแบบจำลองที่แก้ไข และปรับปรุงครั้งสุดท้าย

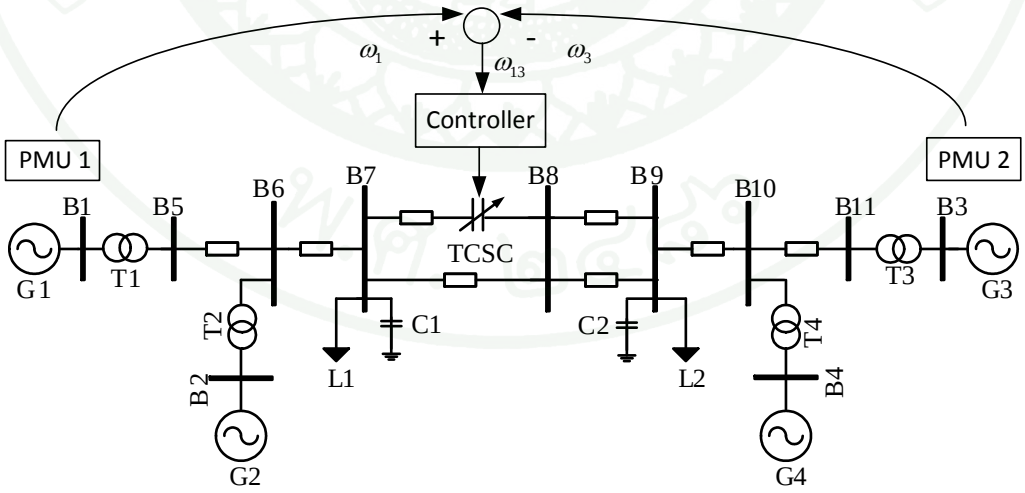
11. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

การศึกษาผลตอบสนองของระบบไฟฟ้ากำลังต่อสิ่งรบกวนจะกระทำโดยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ โดยจะต้องมีการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, TCSC, ตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก รวมทั้งแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร สำหรับแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแบบจำลองที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ และมีบัสทั้งหมด 11 บัส โดยบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ต่างๆจะเป็นบล็อกมาตรฐาน ซึ่งมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในบทความของ IEEE ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่มีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการแกว่งไกวได้สะดวกมากขึ้น จึงได้มีการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายขึ้นมา โดยแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรนี้ ได้พัฒนาขึ้นโดยคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัย โตรอนโต ประเทศแคนนาดา ดังนั้นจึงได้มีการกล่าวถึงสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งบล็อกไดอะแกรมต่างๆที่จำเป็น เพื่อที่จำนำมาสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร และนำไปใช้ในการสร้างเป็นโปรแกรมเพื่อทดสอบวิธีการควบคุมแบบต่างๆ



ภาพที่ 12 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่กับการติดตั้ง TCSC อนุกรมกับสายส่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 12 ระบบไฟฟ้ากำลังนี้ เป็นระบบแบบ 4 เครื่องจักร 11 บัส โดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ และถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันด้วยสายส่งระยะไกล แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 6 ลำดับถูกนำไปใช้สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว และมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) แบบ 1 ลำดับ โดยปราศจากตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (PSS) ตัวควบคุมความเร็ว (Governor) เป็นแบบ 1 ลำดับอย่างง่าย TCSC ถูกติดตั้งอนุกรมกับสายส่งระหว่าง B7 และ B8 สำหรับการควบคุมแบบพื้นที่กว้าง หน่วยวัดเฟสเซอร์ (Phasor Measurement Units : PMUs) 2 ตัวจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง G1 และ G3 ตามลำดับเพื่อวัดความแตกต่างทางความเร็วระหว่างสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงสัญญาณการแกว่งระหว่างพื้นที่ (inter- area oscillations) ในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาผลจากการประวิงเวลาของระบบสื่อสารต่อการควบคุมแบบพื้นที่กว้าง สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรจะแสดงไว้ในตารางที่ 2

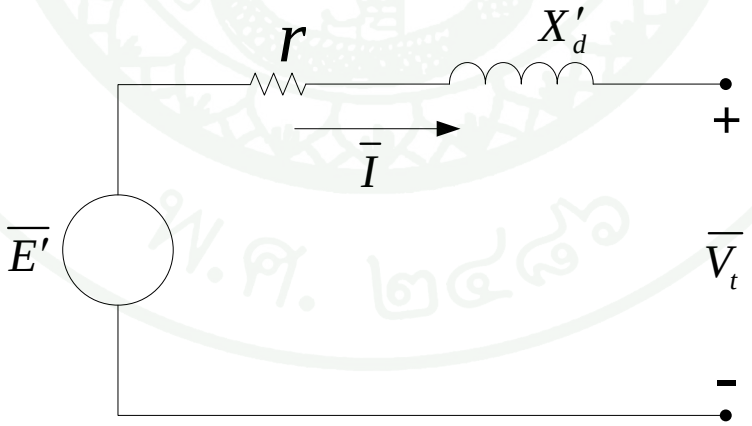
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
KVbase	230	KV
MVAbase	100	MVA
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง X_{T1}	0+j0.0167	pu.
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง X_{T2}	0+j0.0167	pu.
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง X_{T3}	0+j0.0167	pu.
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง X_{T4}	0+j0.0167	pu.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง	0.0001+j0.001	pu./km
ซัสเซบแตนซ์ของสายส่ง	0.00175	pu./km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส (5,6)	25	km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส (6,7)	25	km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส (7,8)	110	km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส (8,9)	110	km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส (9,10)	10	km
ความยาวของสายส่งระหว่างบัส (10,11)	25	km

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

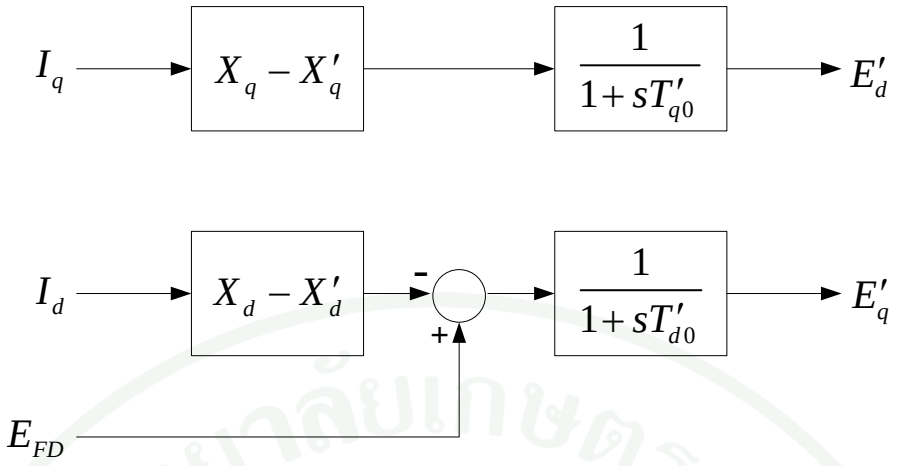
สมการเครื่องไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละตัวในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกแทนด้วยชุดของสมการดิฟเฟอร์เรนเทียลแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 สมการ และส่วนของสมการสวิงจำนวน 2 สมการ นอกจากนี้ยังมีสมการพีชคณิตอื่นๆที่ช่วยให้การคำนวณมีความสมบูรณ์ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าในกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จะมีชุดของสมการที่ต้องใช้ในการคำนวณหลายสมการ เพราะนอกจากมีสมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวแล้วยังต้องมีสมการของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆด้วย ทำให้ต้องมีการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลามาก จึงจำเป็นต้องมีการลดทอนจำนวนของสมการลงเพื่อลดความซับซ้อนและทำให้เวลาในการจำลองเร็วขึ้น จึงทำให้เกิดแบบจำลองมาตรฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น โดยในแต่ละแบบจำลองจะใช้จำนวนของสมการสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งได้แก่แบบจำลองคลาสสิเคิล (Classical), แบบจำลองหนึ่งแกน (One Axis), แบบจำลองสองแกน (Two Axis) และแบบจำลองซับทรานส์เซียน โดยจะมีความซับซ้อนเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยแบบจำลองสองแกน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการศึกษาสภาวะไดนามิกส์ทางไฟฟ้า-กล โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทรานส์เซียนดังรูปภาพที่ 13 และบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองแบบสองแกนดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 แบบจำลองสองแกน

จากภาพที่ 14 สามารถเขียนสมการของแรงดันแหนี่ยวนำในแนวแกน d และ q ได้ดังนี้

$$T'_{q0}\frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + \left(x_q - x'_q\right) I_q \tag{19}$$

$$T'_{d0}\frac{dE'_q}{dt} = E_{FD} - E'_q + \left(x_d - x'_d\right) I_d \tag{20}$$

สำหรับสมการพีชคณิตที่เกี่ยวข้องได้แก่

$$\left[I_{qi}\right] = \left[M\right]\left[V_{qi}\right] - \left[N\right]\left[V_{di}\right] \tag{21}$$

$$\left[I_{di}\right] = \left[N\right]\left[V_{qi}\right] - \left[M\right]\left[V_{di}\right] \tag{22}$$

โดย

$$M_{ii} = G_{ii} \tag{23}$$

$$M_{ik} = G_{ik}\left(\cos\delta_{ik}\right) + B_{ik}\left(\sin\delta_{ik}\right) \tag{24}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$N_{ii} = B_{ii} \tag{25}$$

$$N_{ik} = B_{ik}\left(\cos\delta_{ik}\right) + G_{ik}\left(\sin\delta_{ik}\right) \tag{26}$$

โดย G+jB = Y = บัสแอดมิทแตนซ์เมตริกแบบลดรูป

$$V_d = E'_d - r_a i_q + x'_d i_q \tag{27}$$

$$V_q = E'_q - r_a i_d + x'_d i_d \tag{28}$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \tag{29}$$

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \tag{30}$$

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \tag{31}$$

สำหรับส่วนของสมการสวิง ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกลอินพุท, กำลังงานไฟฟ้าเอาท์พุท และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \tag{32}$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \left(P_m - P_e\right) \times \frac{\pi f}{H} \tag{33}$$

ส่วนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงในตารางที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

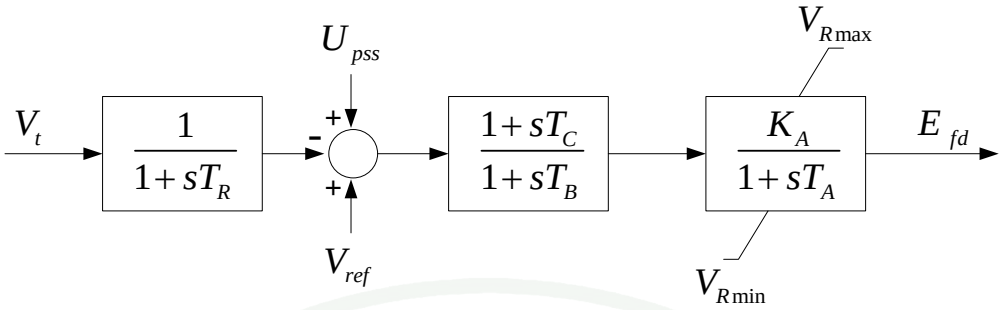
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส									
	r_a	x_l	X_d	X'_d	X_q	X'_q	T'_{d0}	T'_{q0}	H	D
GEN 1 :	0.0025	0.15	1.8	0.3	1.7	0.55	8	0.4	6.5	0
GEN 2 :	0.0025	0.15	1.8	0.3	1.7	0.55	8	0.4	6.5	0
GEN 3 :	0.0025	0.15	1.8	0.3	1.7	0.55	8	0.4	6.175	0
GEN 4 :	0.0025	0.15	1.8	0.3	1.7	0.55	8	0.4	6.175	0

แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ AVR และ PSS โดยอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator, AVR) นั้นจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการควบคุมปริมาณของกระแสเอ็กไซเตอร์ที่จ่ายให้กับขดลวดฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมีขั้นตอนการทำงาน คือ วัดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าระดับแรงดันที่ต้องการ ซึ่งจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันออกมา ค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะถูกนำไปผ่านวงจรขยายแล้วนำไปเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสของขดลวดฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ถูกกำจัดออกไป ผลก็คือทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของ AVR ตามมาตรฐาน IEEE ซึ่งเป็นแบบสเตติกเอ็กไซต์ และมีบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 15 โดยบล็อกไดอะแกรมของ AVR จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ ส่วนของทรานส์ดิวเซอร์, ส่วนของฟังก์ชันนำ-ตาม และส่วนของวงจรขยาย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 บล็อกไดอะแกรมของ AVR

จากบล็อกไดอะแกรมจะมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

$$\frac{dV_{tr}}{dt} = \frac{V_t - V_{tr}}{T_R} \tag{34}$$

$$\frac{dV_{as}}{dt} = \frac{V_{ref} - V_{tr} + U_{PSS} - V_{as}}{T_B} \tag{35}$$

$$V_{aa} = \frac{T_C}{T_B}\left(V_{ref} - V_{tr} + U_{PSS}\right) + \left(1 - \frac{T_C}{T_B}\right)V_{as} \tag{36}$$

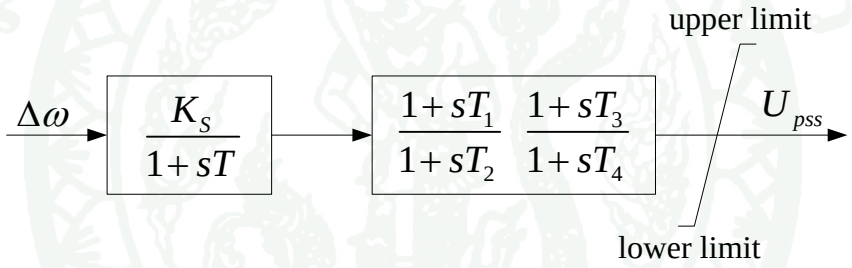
$$\frac{dE_{FD}}{dt} = \frac{V_{aa}k_A - E_{FD}}{T_A} \tag{37}$$

จากภาพที่ 15 จะสังเกตเห็นสัญญาณ U_{PSS} ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมเสริมที่ออกจาก PSS โดยสัญญาณนี้จะถูกรวมเข้ากับค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าแรงอ้างอิงและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PSS จะถูกนำมาใช้ร่วมกับ AVR ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะช่วยในการสร้างความหน่วงของการแกว่งไกวในระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก AVR จะสร้างการหน่วงแบบลบขึ้น โดยจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสของขดลวดหน่วง ทำให้การหน่วงที่เกิดจากขดลวดหน่วงมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของระบบสายส่งระยะไกลหรือกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายโหลดมากๆ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ AVR ที่มีค่าเกนสูงเพื่อรักษาระดับแรงดันให้ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตามต้องการ ก็ยิ่งทำให้เกิดการหน่วงแบบลบมากขึ้นตามไปด้วยทำให้ความสามารถในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพลดลง จนอาจทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสูญเสียเสถียรภาพไปเลยก็ได้ วิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหานี้ก็คือ การชดเชยด้วยลูปควบคุมเสริมโดยการใช้ PSS นั่นเอง

PSS จะไม่ทำงานในกรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัว คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมมีค่าเป็นศูนย์ โดยจะปล่อยให้ AVR ทำหน้าที่ในการศึกษาแรงดันไปตามปกติ แต่เมื่อระบบอยู่ในสภาวะทรานส์เซียน หรือความเร็วโรเตอร์ไม่คงที่จะส่งผลให้ PSS ส่งสัญญาณเสริมให้กับ AVR เพื่อลดการแกว่งไกวของแรงดันและเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ โดยทั่วไปสามารถนำสัญญาณความเร็วเชิงมุม ความถี่ หรือกำลังไฟฟ้ามาเป็นสัญญาณอินพุทของ PSS ได้ แต่ในที่นี้จะเลือกใช้สัญญาณความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น โดยบล็อกไดอะแกรมของ PSS จะแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 บล็อกไดอะแกรมของ PSS

บล็อกไดอะแกรมของ PSS จะประกอบไปด้วยส่วนของวงจรวอชเอาท์ และส่วนของวงจรชดเชยเฟส โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

$$Z_1 = \frac{(\omega - PSS1)}{T} \tag{38}$$

$$\frac{dPSS1}{dt} = Z_1 \tag{39}$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 K T_1}{T_2} + PSS2 \tag{40}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\frac{dPSS2}{dt} = \left[1 - \frac{T_1}{T_2}\right] KZ_1 - \frac{PSS2}{T_2} \tag{41}$$

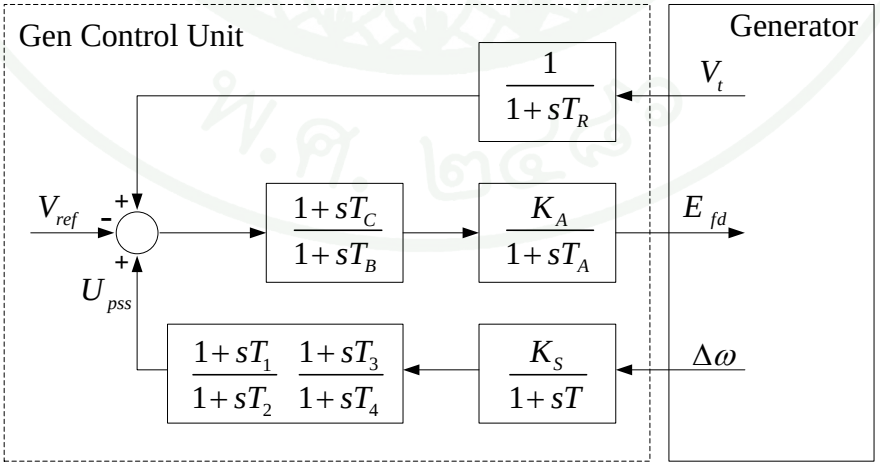
$$\frac{dPSS3}{dt} = \left[1 - \frac{T_3}{T_4}\right] Z_2 - \frac{PSS3}{T_4} \tag{42}$$

$$U_{PSS} = \frac{Z_2 T_3}{T_4} + PSS3 \tag{43}$$

สำหรับค่าคงที่ต่างๆของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงในตารางที่ 4 และภาพรวมของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแสดงดังภาพที่ 17

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์ควบคุม	ค่าคงที่ของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า					
	K	T	T_1	T_2	T_3	T_4
AVR :	200	0.01	0	0	0	0
PSS :	300	20	0.06	0.04	0.08	0.04

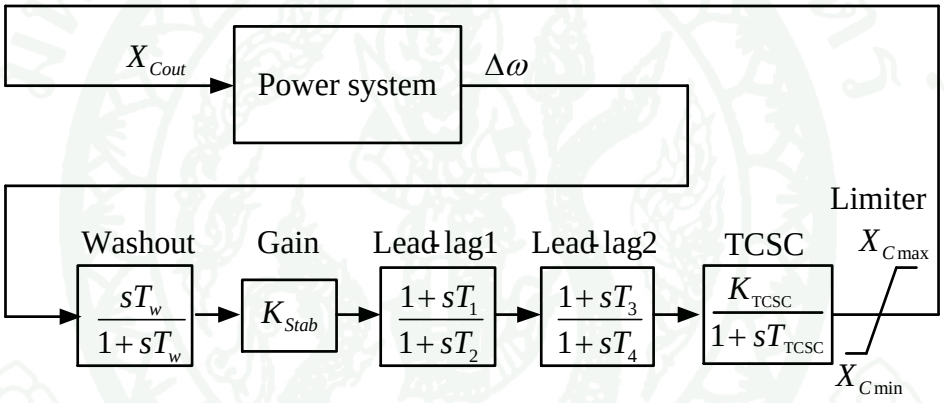


ภาพที่ 17 บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โครงสร้างของ TCSC กับตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง

หน้าที่ของ TCSC ที่มีการควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง คือ สร้างการหน่วงเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการแกว่ง ซึ่งการแกว่งเหล่านี้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงย่านความถี่ 0.1 ถึง 3 Hz ภาพที่ 18 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองของ TCSC กับตัวควมคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง แบบจำลองประกอบไปด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (K_{Stab}) กับค่าคงตัวทางเวลาของวงจรกรองความถี่สูง (T_w) ตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลัง 2 ชุดที่มีค่าคงตัวทางเวลา T_1, T_2, T_3 และ T_4 ตามลำดับ แบบจำลอง TCSC แบบ 1 ลำดับที่มีค่าอัตราขยายของ TCSC (K_{TCSC}) และค่าคงตัวทางเวลา (T_{TCSC}) และค่าสูงสุดของ TCSC ($X_{C\max}$) และค่าต่ำสุดของ TCSC ($X_{C\min}$) สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง คือ $\Delta\omega$ และเอาท์พุทของ TCSC คือ X_{COut}

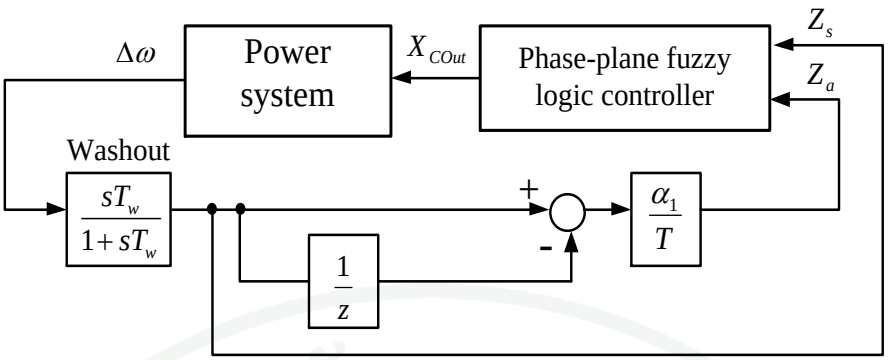


ภาพที่ 18 โครงสร้างของ TCSC กับตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง

โครงสร้างของ TCSC กับตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

โครงสร้างของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกจะถูกนำเสนอในภาพที่ 19 วิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกถูกนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรการควบคุมการหน่วงของ TCSC สัญญาณอินพุทเป็นค่าเบี่ยงเบนความเร็ว $\Delta\omega$ ซึ่งสามารถวัดได้โดย PMUs สัญญาณ Z_s เป็นตัวชี้วัดค่าเบี่ยงเบนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสัญญาณ Z_a เป็นตัวชี้วัดความเร่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยสัญญาณ $\Delta\omega_{(t)}$ (Z_s) และ $\Delta\omega'_{(t)}$ (Z_a) บนเฟสเพลนดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 6 ขณะที่ Z_s และ Z_a ได้มาจากความแตกต่างทางความเร็วของสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านวงจรกรองความถี่สูงและหน่วยประวิงเวลา (unit delay) พารามิเตอร์ α_1 เป็นตัวประกอบที่ปรับค่าได้และ T เป็นเวลาในการสุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 ตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกของ TCSC

จากภาพที่ 6 สภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประมาณโดยจุด $P(k)$ ในเฟสเพลน โดยจุดนี้จะถูกกำหนดด้วยคู่ลำดับของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความเร็ว $\Delta\omega_{(t)}(Z_s)$ และความเร่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\Delta\omega'_{(t)}(Z_a)$ ตำแหน่งต่างๆบนเฟสเพลนจะมีความหมายที่แตกต่างกันไป เช่น พื้นที่ในช่วงครึ่งบนของเฟสเพลนจะแสดงถึงความเร่งที่เป็นบวก ส่วนครึ่งล่างจะแสดงถึงความเร่งที่เป็นลบ ซึ่งก็คือ ความหน่วงพื้นที่ทางขวามือแสดงถึงความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ส่วนพื้นที่ทางซ้ายจะแสดงถึงความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส จุดกำเนิดของเฟสเพลนจะแสดงถึงจุดสมดุลย์ ซึ่งจุดประสงค์ของการควบคุมก็คือ ทำให้จุด $P(k)$ เคลื่อนเข้าสู่จุดกำเนิดให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พื้นที่บนเฟสเพลนจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของพื้นที่ A ซึ่งระบบมีความเร่งจึงต้องการการควบคุมแบบหน่วง และส่วนของพื้นที่ B ซึ่งระบบมีความหน่วงจึงต้องการการควบคุมแบบเร่ง ส่วนพารามิเตอร์ α_2 คือมุมที่ซ้อนทับกันระหว่างสองส่วน

สภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอธิบายโดยข้อมูลเชิงขั้ว คือ จะถูกกำหนดโดยรัศมี $D(k)$ และมุมเฟส $\theta(k)$ ที่สามารถคำนวณได้โดย

$$D(k) = \sqrt{Z_s^2 + (\alpha_1 Z_a)^2} \tag{44}$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 Z_a}{Z_s}\right) \tag{45}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอาท์พุทของ TCSC แสดงโดย

$$X_{COut} = (2\mu_N - 1) \cdot \mu_D \cdot U_{\max} \cdot \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \tag{46}$$

ขณะที่ $U_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

การประยุกต์ใช้วิธี GS ในการปรับหาพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น (GS) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับหาค่าพารามิเตอร์ 3 ค่าสำหรับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอไว้ คือ α_1, α_2 และ α_3 โดยแต่ละตัวจะมีบทบาท คือ α_1 (แฟกเตอร์ปรับสัดส่วน) จะเป็นสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดขนาดของความเร่งของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า α_2 (มุมทับซ้อน) จะเป็นสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดขนาดของพื้นที่ กล่าวคือเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ θ ส่วน α_3 (แฟกเตอร์ระยะทาง) จะเป็นสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดความรุนแรงของสัญญาณการรบกวน กล่าวคือเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ D_r ซึ่งการปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาจาก สมการดัชนีการทำงาน (Performance Index : J)

$$J = \sum_{k=1}^{N} \left(|\delta(k)| t_k \right) \tag{47}$$

โดย J จะถูกคำนวณจากผลตอบสนองของระบบเมื่อเกิดการรบกวนคือ การลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ซึ่งถือว่าเป็นการรบกวนแบบรุนแรง

ดัชนีการทำงาน J จะเป็นค่าที่ใช้เป็นตัวตัดสินผลตอบสนองที่ดีที่สุด โดยผลตอบสนองที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ทั้ง 3 ทำให้ได้ J ที่มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเสถียรภาพจากผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส : δ คูณกับเวลาในขณะนั้นๆ ซึ่งเป็นการให้น้ำหนักของเวลาไม่เท่ากัน โดยจะเป็นการให้น้ำหนักในช่วงแรกต่ำกว่าช่วงหลัง (ค่าของเวลา t_k ที่นำมาคูณกับ δ_k ในช่วงแรกจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงหลัง) เพื่อเลือกผลตอบสนองที่มีการแกว่งไกวในช่วงแรกและกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในตอนท้าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

ความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรนั้น จะถูกพิจารณาจากผลตอบสนองของผลต่างทางความเร็วระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่องซึ่งจะเกิดการแกว่งไกว (oscillation) เมื่อระบบถูกรบกวน ถ้าระบบมีเสถียรภาพและมีความหน่วงที่มากพอ ขนาดของการแกว่งไกวจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งหยุดนิ่งที่ค่าๆหนึ่งในที่สุด โดยอุปกรณ์ควบคุมเสถียรภาพต่างๆที่ติดตั้งให้กับระบบมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความหน่วงของการแกว่งไกวที่เกิดขึ้น เพื่อทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ ระบบการศึกษาของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ได้ถูกนำมาใช้ TCSC ถูกติดตั้งอนุกรมกับสายส่ง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง TCSC ที่มีการปรับหาค่าที่ดีที่สุดด้วยตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลังแสดงให้เห็นใน (48) และอีกหนึ่งวิธีคือการปรับหาค่าที่ดีที่สุดของการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น (GS) เนื่องจากในบทความนี้มีพารามิเตอร์เพียง 3 ค่าเท่านั้นที่ต้องการค้นหา จึงเลือกวิธี GS มาเป็นตัวช่วยในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพราะวิธี GS สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ง่ายไม่ซับซ้อน และใช้จำนวนรอบในการค้นหาไม่นานเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ เช่น PSO, GA เป็นต้น

$$K_{RTCSC}(s) = 4.435\left(\frac{1+0.763s}{1+0.539s}\right)\left(\frac{1+0.706s}{1+0.159s}\right) \tag{48}$$

การปรับหาค่าที่ดีที่สุดของการควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลังใน (48) ได้มาจากงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งถูกออกแบบโดยพิจารณาค่าประวิงเวลาของการสื่อสาร ซึ่งตัวควบคุมแบบคงทนนี้เรียกว่า RTCSC ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่นถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับหาค่าพารามิเตอร์ 3 ค่าสำหรับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ นั่นคือ แฟกเตอร์ปรับสัดส่วน (α_1) มุมทับซ้อน (α_2) และแฟกเตอร์ระยะทาง (α_3) ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงผลการปรับตั้งค่าของพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 ผลการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น

α_1	α_2	α_3
0.048	0	0.004

สำหรับการรบกวนที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ การลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน โดยจะสมมุติให้เกิดขึ้นเมื่อเวลาในการจำลองผ่านไป 2 วินาที และถูกกำจัดในเวลา 0.05 วินาทีต่อมาด้วยการปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรออกไปจากระบบ โดยจะจำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆต่อไปนี้

1. สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัสที่ 7)
2. ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8)
3. สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัสที่ 9)

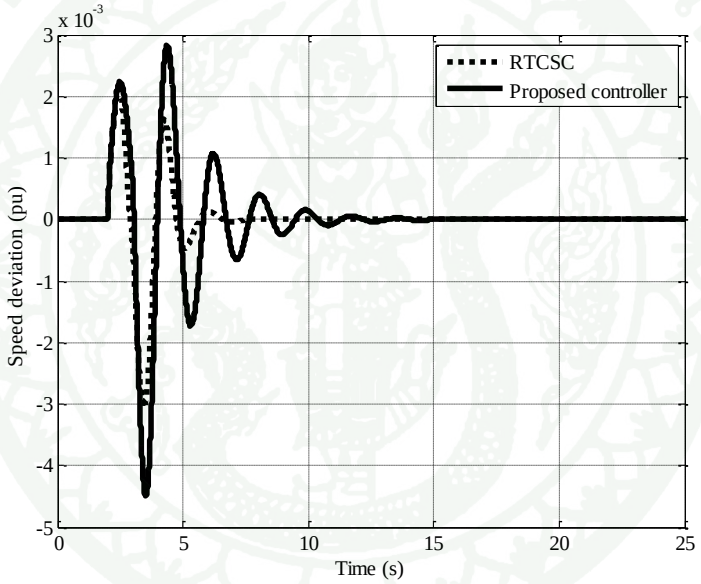
ตารางที่ 6 รูปแบบการรบกวนที่ใช้ในการทดสอบ

กรณี	เหตุการณ์	P_{tie} (pu)	การประวิงเวลา (ms)
1	เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ที่เวลา = 2 วินาที สายส่งที่เกิดการลัดวงจรจะถูกปลดออกจากระบบที่เวลา = 2.05 วินาที	7	400
2	เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ที่เวลา = 2 วินาที สายส่งที่เกิดการลัดวงจรจะถูกปลดออกจากระบบที่เวลา = 2.05 วินาที	7	700
3	เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ที่เวลา = 2 วินาที สายส่งที่เกิดการลัดวงจรจะถูกปลดออกจากระบบที่เวลา = 2.05 วินาที	7	1000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

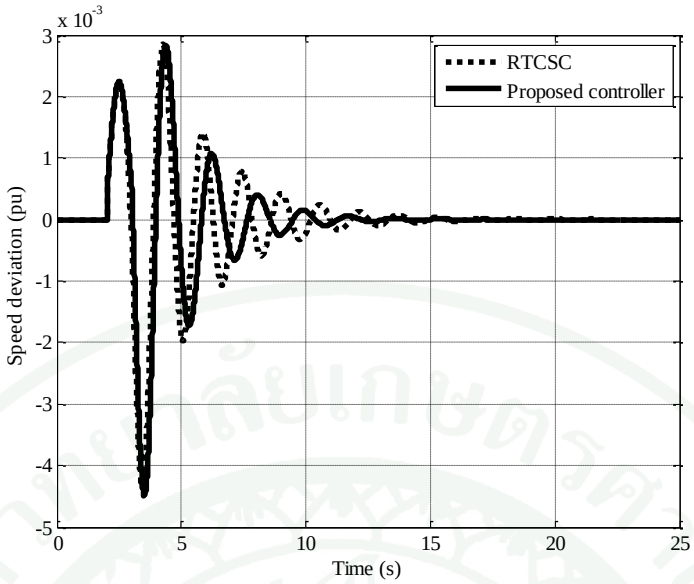
การจำลองสถานการณ์ 3 กรณีได้ถูกเลือกขึ้นมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากเป็นสภาวะที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก และเกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรง ทำให้เกิดความเสียหายค่อนข้างมาก การศึกษาโดยทั่วไปจะพิจารณาการประวิงเวลาทางการสื่อสารอยู่ในช่วงประมาณ 100-700 ms แยกตามประเภทของการสื่อสาร แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาไปถึงการประวิงเวลาที่ 1000 ms เพราะต้องการศึกษาว่าถ้ามีเหตุการณ์ที่รุนแรงมากกว่าปกติ ถึงแม้จะเกิดขึ้นน้อยมากก็ตาม ระบบที่ทำการศึกษานี้ยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพให้ดีขึ้นได้

ผลการทดสอบในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัสที่ 7)

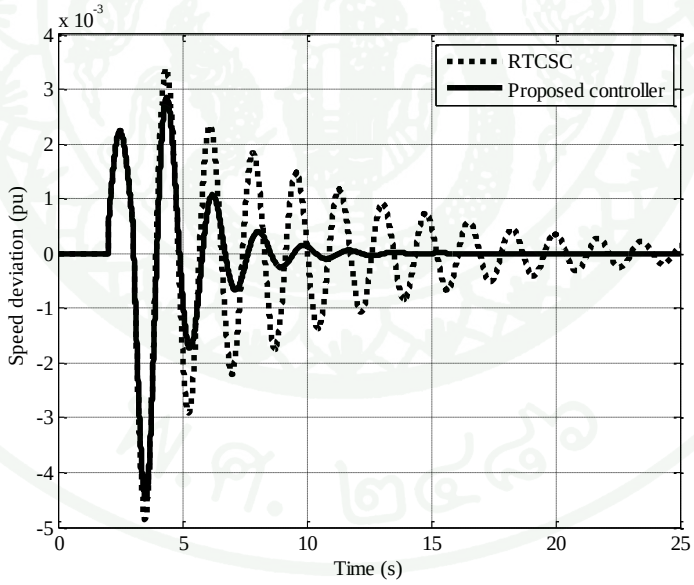


ภาพที่ 20 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัสที่ 7) กับค่าประวิงเวลาที่ 400 ms

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



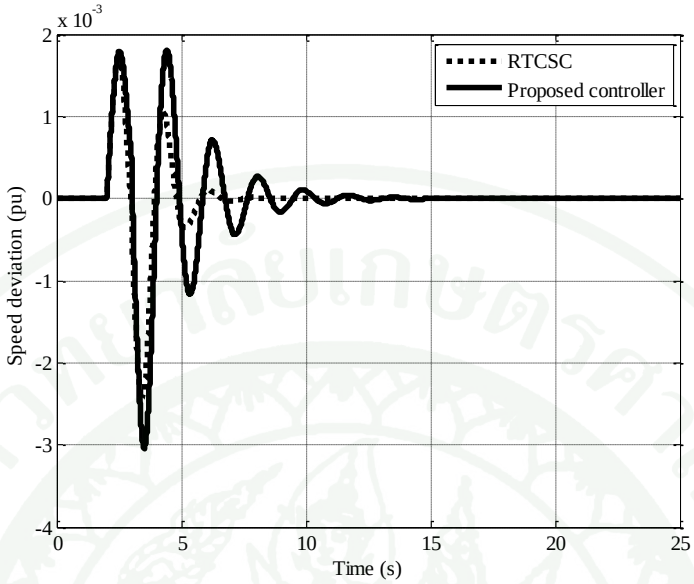
ภาพที่ 21 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณี เกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัสที่ 7) กับค่าประวิงเวลาที่ 700 ms



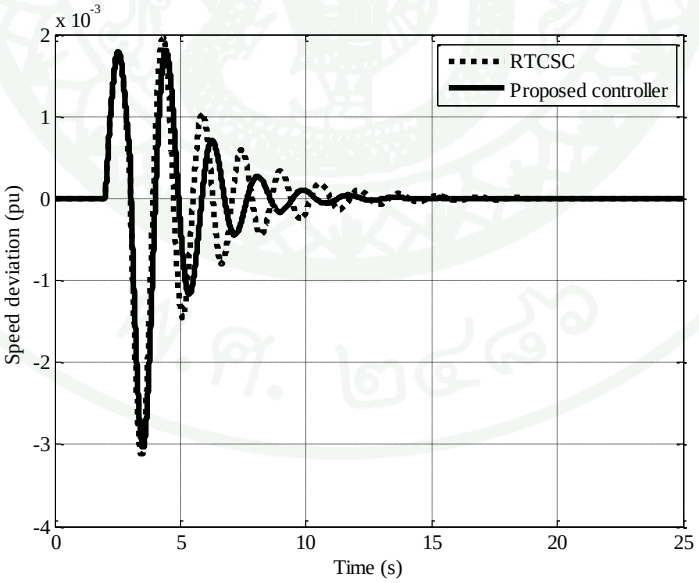
ภาพที่ 22 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านส่ง (บัสที่ 7) กับค่าประวิงเวลาที่ 1000 ms

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดสอบในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8)

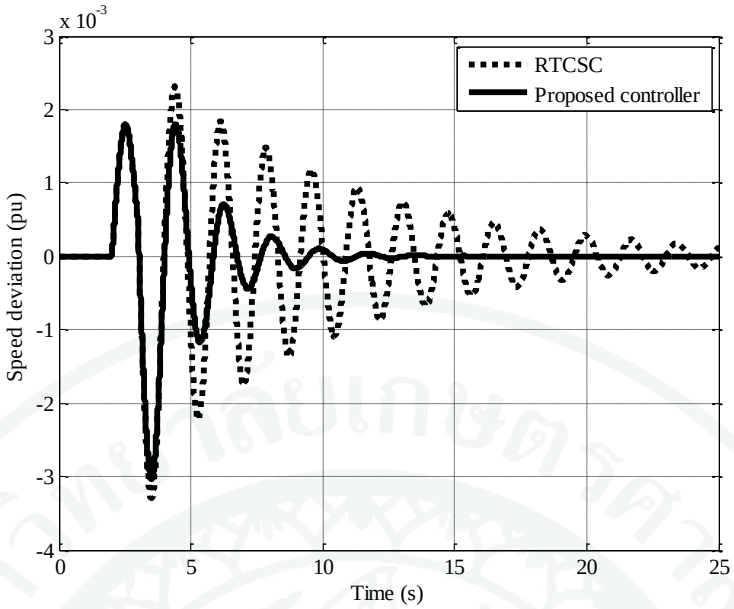


ภาพที่ 23 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8) กับค่าประวิงเวลาที่ 400 ms



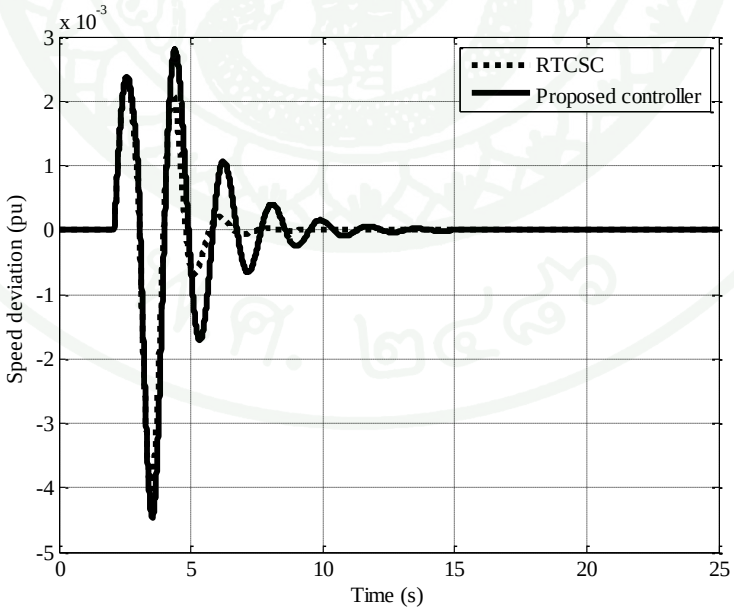
ภาพที่ 24 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8) กับค่าประวิงเวลาที่ 700 ms

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



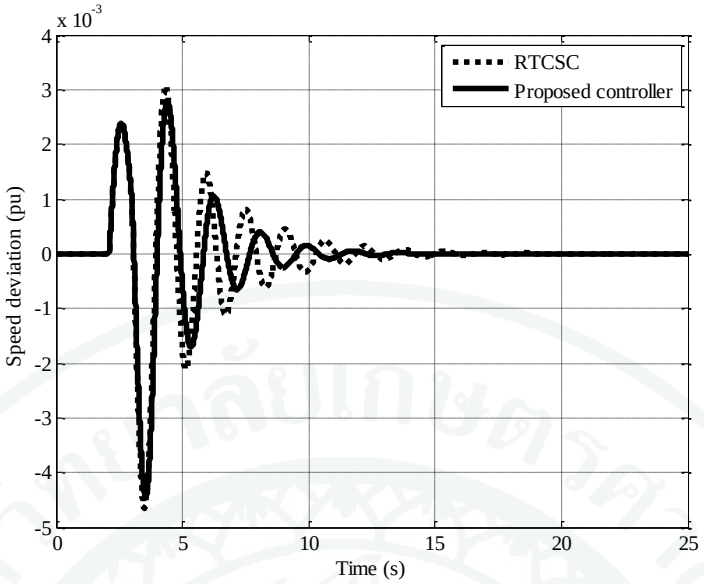
ภาพที่ 25 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (บัสที่ 8) กับค่าประวิงเวลาที่ 1000 ms

ผลการทดสอบในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัสที่ 9)

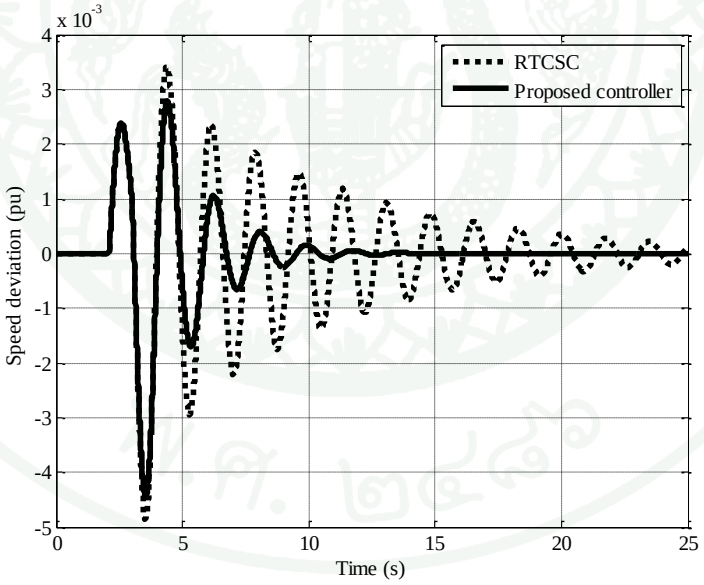


ภาพที่ 26 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัสที่ 9) กับค่าประวิงเวลาที่ 400 ms

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัสที่ 9) กับค่าประวิงเวลาที่ 700 ms



ภาพที่ 28 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีเกิดการลัดวรจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระยะไกล ณ ตำแหน่งใกล้กับบัสทางด้านรับ (บัสที่ 9) กับค่าประวิงเวลาที่ 1000 ms

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าพารามิเตอร์สำหรับ 3 กรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่าง G1 และ G3 แสดงให้เห็นการแกว่งระหว่างพื้นที่ จากการทดสอบครั้งนี้พบว่าทุกตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน คือ ในกรณีที่ 1 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 20,23,26 การแกว่งสามารถแกว่งแบบหน่วงได้ทั้ง RTCSC หรือตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ ประสิทธิภาพการทำงานของ RTCSC ดีกว่าตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนออยู่เล็กน้อย ในกรณีที่ 2 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 21,24,27 ผลกระทบการหน่วงของ RTCSC น้อยกว่าของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ ขณะที่ประสิทธิภาพของของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอเกือบจะทำงานได้ดีเท่ากัน ในกรณีที่ 3 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 22,25,28 ผลกระทบการหน่วงของ RTCSC แย่ลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอสามารถลดการแกว่งระหว่างพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีความคงทนที่มากกว่าต่อการประวิงเวลาทางการสื่อสารที่นานขึ้น

วิจารณ์

จากการจำลองเพื่อศึกษาดูถึงผลของการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก สามารถวิจารณ์ผลการจำลองได้ดังต่อไปนี้

1. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกกับการควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง จากการศึกษาพบว่าการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงของการประวิงเวลาที่นานได้ดีดว่า

2. การใช้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น (GS) มาช่วยในการค้นหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมนั้น สามารถหาค่าตัวแปรที่มีค่าความเหมาะสมต่อระบบได้ดีและยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ รวมทั้งใช้เวลาในการประเมินหาค่าตัวแปรน้อยกว่าวิธีการแบบจีเนติกอัลกอริทึม (GA)

3. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำแนวคิดและวิธีการต่างๆไปต่อยอดงานวิจัยใหม่ๆได้เพื่อนำไปปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่ต้องมีการสนับสนุนจากหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน และต้องมีการทำงานวิจัยอย่างต่อเนื่องและจริงจัง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากปัญหาโหมดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำระหว่างพื้นที่ ที่เกิดจากการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่เข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดคุณลักษณะการหน่วงที่แย่ลง ด้วยสาเหตุที่ว่านี้ การทำงานของระบบในช่วงโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่มีโอกาสสูญเสียเสถียรภาพหากมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด หรือเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเพราะว่าระบบไม่สามารถที่จะจ่ายไฟฟ้าได้

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังงานให้กับโหลด ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไปจะเรียกว่าระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังอาจทำได้โดยการติดตั้ง PSS เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตใดยูนิตหนึ่งหรือทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความหน่วงเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสายส่งระยะไกลพบว่า PSS จะไม่สามารถสร้างความหน่วงที่ดีได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ TCSC ซึ่งเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ FACTS ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถนำมาชดเชยแบบอนุกรม ทำให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกลและสามารถนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพียงแต่การใช้ TCSC ซึ่งมีเพียงลูปควบคุมแรงดันนั้นจะไม่สามารถสร้างความหน่วงได้ จำเป็นต้องสร้างสัญญาณควบคุมแสริมให้กับลูปควบคุมแรงดันเพื่อเพิ่มความหน่วงให้กับระบบโดยนำการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกมาใช้ โดยที่มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่นมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับการควบคุมในครั้งนี้

การทดสอบเสถียรภาพในงานงานวิจัยนี้จะเป็นการจำลองบนคอมพิวเตอร์ โดยจะใช้แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 พื้นที่ และถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยสายส่งระยะไกลดังภาพที่ 12 โดยในแต่ละพื้นที่จะประกอบด้วยเคครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 2 เครื่อง ซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดในพื้นที่ของตัวเอง และจะมีกำลังงานไฟฟ้าบางส่วนไหลผ่านสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ทั้ง 2 ด้วย การรบกวนจะเกิดขึ้นโดยการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ที่เวลา 2 วินาทีของการจำลอง และการรบกวนจะถูกกำจัดภายในเวลา 0.05 วินาทีต่อมาโดยการปลดสายส่งที่เกิดการลัดวงจรออกไปจากระบบ เสถียรภาพจะพิจารณาจาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 เทียบกับเครื่องที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบของเครื่องที่ 1 ด้วยสายส่งระยะไกลและอยู่ห่างออกไปจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 มากที่สุดนั่นเอง ผลการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพระหว่างเงื่อนไขการควบคุมในแบบต่างๆมีดังต่อไปนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยนำความไม่แน่นอนของการประวิงเวลามาพิจารณา การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกถูกนำมาใช้ในการควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ และเพื่อปรับปรุงความคงทนของตัวควบคุม TCSC ต่อการประวิงเวลาที่ไม่แน่นอน ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับการปรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลังด้วยวิธี GA จากผลการจำลองทำให้เห็นชัดเจนว่าการปรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลังให้เสถียรภาพที่ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอภายใต้ช่วงที่กว้างของการประวิงทางเวลา ผลการจำลองยืนยันว่าตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอมีสมรรถนะสูงกว่าและคงทนมากกว่าภายใต้การประวิงเวลาของระบบสื่อสารสำหรับการควบคุมแบบพื้นที่กว้าง

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่มีความสนใจเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งอาจจะใช้ข้อมูลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยของท่านเอง มีดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นระบบที่มีมาตรฐานถูกต้องเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการศึกษาเสียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งระยะไกล ข้อมูลต่างๆที่จำเป็นสำหรับการศึกษาเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้ถูกรวบรวมไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว ผู้ที่สนใจสามารถใช้ข้อมูลค่าคงที่ของอุปกรณ์เหล่านี้ ศึกษาเสียรภาพภายใต้เงื่อนไขของการควบคุมแบบอื่นๆกับระบบที่ใช้ในการทดสอบได้อีก เช่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1 ตรวจสอบผลตอบสนองของอุปกรณ์ FACTS ชนิดอื่นๆ เช่น STATCOM, SMES หรือ UPFC เป็นต้น

1.2 ตรวจสอบผลตอบสนองในกรณีของโหลดชนิดอื่นๆ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือซิงโครนัสมอเตอร์ เป็นต้น

2. การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่นำเสนอ เป็นวิธีง่ายแต่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ จึงมีความเป็นไปได้ที่อาจจะทดลองใช้วิธีการนี้กับตัวควบคุมอื่นๆในระบบบ้าง เช่น ใช้ในกรณีของ PSS

3. วิธีฟัซซี่เฟสเพลนที่นำเสนอนี้ยังคงมีแกนของเฟสเพลนคงที่ การปรับให้แกนในแนวตั้งและแนวนอนของเฟสเพลนเคลื่อนที่ได้อย่างเหมาะสม อาจจะช่วยให้ได้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น

4. จากผลการทดลอง สามารถใช้สนับสนุนได้ว่าวิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกสามารถปรับปรุงเสถียรภาพในช่วงของการประวิงเวลาที่นานได้ดีกว่าการควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง แต่ไม่ได้หมายความว่าการควบคุมแบบนี้จะเหมาะสมกับทุกๆระบบ เพราะในทางปฏิบัตินอกจากจะพิจารณาจากผลการตอบสนองที่ดีแล้วยังต้องพิจารณาถึงงบประมาณด้วย ดังนั้นจึงควรทำการทดลองกับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรรูปแบบอื่นๆบ้าง เช่น ระบบ 3 เครื่องจักร 9 บัสซึ่งข้อมูลของระบบเหล่านี้สามารถหาได้จากเอกสารของ IEEE หรือจากอินเตอร์เน็ต จากนั้นจึงทำการสรุปและเปรียบเทียบว่า วิธีการใดเหมาะสมกันกับระบบรูปแบบใดมากที่สุด เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

อิสระชัย งามหรู. 2553. **พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง**. ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

เอกวิทย์ จรประดิษฐ์. 2550. **การวางแผนการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างเหมาะสมในระบบเกษตรทฤษฎีใหม่ด้วยวิธีดิฟเฟอร์เรนเชียลอิโวลูชั่น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Akhtaruzzaman, M., A.A. Shafie, T. Ahsan, M.S. Alam, M.K. Hasan and M.B. Haider**.** 2011. Golden Ratio, the Phi, and Its Geometrical Substantiation. **IEEE Student Conference on Research and Development, Dec 2011.**

Basu, M. 2007. Optimal power flow with FACTS devices using differential evolution. **Electr. Power Energy Syst, 2007.**

Gyugyi, L. 1995. The Unifield Power Flow Controller A New Approach To Power Transmission Control. **IEEE Transactions on Power Delivery**.

Hiyama, T. 1994. Robustness of Fuzzy Logic Power System Stabilizers Applied to Multimachine Power System. **IEEE Trans. on Energy Conversion.**

Hiyama, T. and K. Miyazaki. 1996. A Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power System with Multi-Mode Oscillation. **IEEE Trans. on Energy Conversion.**

Hiyama, T. and U. Yoshiteru. 1997. Integrated Fuzzy logic Generator Controller for Stability Enhancement. **IEEE Trans. on Energy Conversion.**

Kundur, P. 1994. Inter-Area Oscillations in Power system, Inter-Area Oscillations Power system. **IEEE Publication.11**

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kundur, P. 1994. **Power system stability and control**. Mc Graw-Hill, New York.

Liu, U., D. McSwiggan, T.B. Littler and J. Kennedy. 2010. Measurement-based method for wind farm power system oscillations monitoring. **IET Renewable Power Generation, vol. 4, issue 2, pp. 198–209, Mar 2010.**

Mak,L.O., Y.X. Ni and C.M. Shen. 1995. STATCOM with Fuzzy Controllers for Interconnected Power Systems**. Electric Power System Research.**

Marzan,A.I., S. Masashi. and O. Yasuyuki. 1993. On Fuzzy Control Based Static Var Compensator for Power System Stability Control. **ANNPS'93, Proc. of the 2nd International Forum on Applications of Neural Networks to Power system.**

Ortmayer, T.H. and T. Hiyama. 1995. Frequency Response Characteristic of the Fuzzy Polar Power System Stabilizer. **IEEE Trans. on Energy Conversion.**

Phorang,K., M. Leelajindakraireak. and Y. Mizutani. 2002. Damping Improvement of Oscillation in Power System by Fuzzy Logic Based SVC Stabilizer. **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific.**

Saejia, M. and I. Ngamroo. 2010. Wide Area Robust TCSC Controller Design Considering Communication Delay Uncertainty. **IEEE Conference Publications.**

Shayeghi,H., A. Safari. and H.A. Shayanfar. 2010. PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system. **Energy Conversion and Management 51 (2010) 2930-2937**.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยใช้การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

Wide Area Robust TCSC Controller using Phase-plane Fuzzy Logic Control

เหนือนภา วิฑิฐานนท์ และ คมสันต์ หงษ์สมบัติ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร. 0-2549-3429, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422
E-mail: nuernapha.v@gmail.com, fengksh@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทริสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC) แบบคงทน โดยใช้เฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อปรับปรุงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในพื้นที่กว้าง ในขั้นตอนแรกได้ทำการติดตั้ง TCSC อนุกรมกับสายส่งของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ จากนั้นเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเพื่อควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน และเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้าเนื่องจากความไม่แน่นอนของการประวิงเวลาของระบบควบคุมในพื้นที่กว้าง ประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมที่ได้นำเสนอถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลังที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมโดยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม (GA) ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอสามารถทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพสูงและคงทนมากกว่าตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลังที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมภายใต้สภาวะการประวิงเวลาจากระบบสื่อสารข้อมูลและสภาวะทำงานต่างๆที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก, ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทริสเตอร์, การควบคุมแบบคงทน, การควบคุมในพื้นที่กว้าง

Abstract

This paper proposes a robust control method of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) using phase-plane fuzzy logic to improve the power oscillation damping of a wide-area power system. First, the TCSC is installed in series with transmission lines of two-area four-machine interconnected power system. Then, the phase-plane fuzzy logic control is adopted so as to control the power oscillations robustly and to improve the power system stability due to uncertainty from the delay time of wide area control. The performance of the proposed controller is compared with the lead-lag compensator tuned by GA. The simulation results reveal that the proposed phase-plane fuzzy logic control can achieve higher performance and more robustness than the optimally tuned lead-lag compensator under different delay times and operating conditions.

Keywords: Phase-Plane Fuzzy Logic Control, Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), Robust Control, Wide Area Control

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. คำนำ

พลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งถ่ายจากโรงไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยที่ตั้งอยู่ใกล้กับศูนย์กลางโหลด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทำให้ระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ต้องการโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกันแบบมีความยืดหยุ่นมากและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การควบคุมระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนมากขึ้น โดยปกติพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากจะถูกส่งถ่ายจากโรงไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านสายส่งผ่านระยะทางไกล นอกจากนี้ภายใต้สภาพแวดล้อมใหม่ของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะยังสามารถเชื่อมต่อกับแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนขนาดใหญ่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้นปัญหาของการแกว่งที่ความถี่ต่ำจึงเลวร้ายลงและเหตุการณ์นี้จะนำไปสู่ปัญหาการขาดเสถียรภาพ [1]

การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำเกิดจากการที่ระบบไฟฟ้ามีการหน่วงไม่เพียงพอ ปัจจุบันมีงานวิจัยต่างๆ มากมายได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหานี้ เช่น การใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) ร่วมกับตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer : PSS) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับการพัฒนาไปอย่างมาก ทำให้การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณสูงๆ สามารถทำได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานแบบไดนามิก เทคโนโลยีที่กล่าวมาข้างต้นรู้จักในชื่อของอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission System : FACTS) TCSC เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ FACTS ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถนำมาชดเชยแบบอนุกรม ทำให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกลและสามารถนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swam Optimization : PSO) ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมการหน่วงของ TCSC การออกแบบตัวควบคุมการหน่วงของ TCSC เพื่อปรับปรุงการหน่วงของการแกว่งระหว่างพื้นที่โดยใช้สัญญาณขนาดแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสาย ณ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เป็นสัญญาณควบคุม [3] งานวิจัยอื่นๆที่ใช้ GA สำหรับปรับพารามิเตอร์เพื่อรักษาเสถียรภาพในพื้นที่กว้างได้เสนอไว้ในเอกสาร [4] จากเอกสาร [4] ความไม่แน่นอนเนื่องจากการประวิงเวลาในการสื่อสารถูกนำมาพิจารณาอย่างไรก็ตามบทความที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นใช้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างแบบตายตัวเท่านั้น โครงสร้างที่ตายตัวมีข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันเมื่อเงื่อนไขการทำงานถูกปรับไปอยู่ในช่วงที่กว้างเกินไป เนื่องจากระบบไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงเป็นการยากที่จะปรับแต่งพารามิเตอร์ของโครงสร้างตัวควบคุมแบบตายตัวให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในย่านทำงานที่กว้าง ในทางตรงกันข้ามการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากไม่จำเป็นที่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่แม่นยำ ดังนั้นการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจึงตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นในเงื่อนไขการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งได้เป็นอย่างดี

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบความสำเร็จในการนำการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมาแก้ไขปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกเป็นหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การควบคุมการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชิงโครนัสโดยใช้ฟัซซี่ลอจิกอย่างง่ายนี้นำเสนอในเอกสาร [5] การทดลองตรวจสอบประสิทธิภาพที่แท้จริงของการควบคุมแบบฟัซซี่แสดงให้เห็นโดยการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกมาใช้ใน TCSC เพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยจะเพิ่มสมรรถนะของการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกให้ดีขึ้นด้วยการปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น

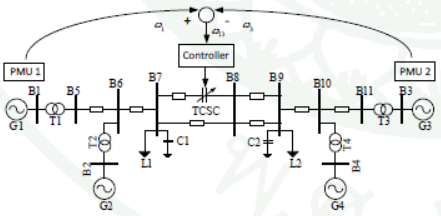
บทความนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ส่วนแรก คือ การแนะนำเกี่ยวกับปัญหาของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และการนำ TCSC มาประยุกต์ใช้งานเพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ส่วนที่ 2 อธิบายถึงโครงสร้างของระบบไฟฟ้าที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทำการศึกษา ส่วนที่ 3 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกสำหรับ TCSC นอกจากนี้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกจะใช้การปรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น (Golden Section) เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ส่วนที่ 4 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองของตัวควบคุมที่ได้นำเสนอและนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการปรับที่เหมาะสมสูงสุดของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง ในตอนท้ายส่วนที่ 5 จะเป็นบทสรุป

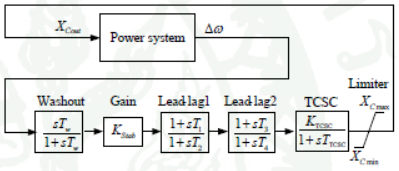
2. โครงสร้างระบบไฟฟ้าที่ศึกษา

ภาพที่ 1 แสดงรูปแบบของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา [6] ระบบนี้ประกอบด้วยสองพื้นที่เชื่อมต่อกันโดยผ่านสายส่งระยะไกล แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 6 ลำดับถูกนำไปใช้สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว และมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) แบบ 1 ลำดับ โดยปราศจากตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (PSS) ตัวควบคุมความเร็ว (Governor) เป็นแบบ 1 ลำดับอย่างง่าย TCSC ถูกติดตั้งอนุกรมกับสายส่งระหว่าง B7 และ B8 สำหรับการควบคุมแบบพื้นที่กว้าง หน่วยวัดเฟสเซอร์ (Phasor Measurement Units : PMUs) 2 ตัวจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง G1 และ G3 ตามลำดับเพื่อวัดความแตกต่างทางความเร็วระหว่างสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงสัญญาณการแกว่งระหว่างพื้นที่ (inter- area oscillations) ในบทความนี้มีการพิจารณาผลจากการประวิงเวลาของระบบสื่อสารต่อการควบคุมแบบพื้นที่กว้าง



ภาพที่ 1 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ กับการติดตั้ง TCSC อนุกรมกับสายส่ง

หน้าที่ของ TCSC ที่มีการควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง คือ สร้างการหน่วงเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการแกว่ง ซึ่งการแกว่งเหล่านี้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงย่านความถี่ 0.1 ถึง 3 Hz ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองของ TCSC กับตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง แบบจำลองประกอบไปด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (K_{Stab}) กับค่าคงตัวทางเวลาของวงจรกรองความถี่สูง (T_w) ตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลัง 2 ชุดที่มีค่าคงตัวทางเวลา T_1, T_2, T_3 และ T_4 ตามลำดับ แบบจำลอง TCSC แบบ 1 ลำดับที่มีค่าอัตราขยายของ TCSC (K_{TCSC}) และค่าคงตัวทางเวลา (T_{TCSC}) และค่าสูงสุดของ TCSC ($X_{C\max}$) และค่าต่ำสุดของ TCSC ($X_{C\min}$) สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง คือ $\Delta\omega$ และเอาท์พุทของ TCSC คือ X_{COut}



ภาพที่ 2 โครงสร้างของ TCSC กับตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลัง

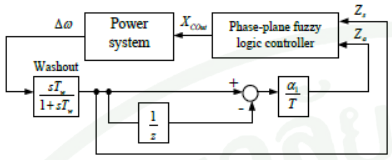
3. เสนอวิธีการควบคุม

3.1 การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

โครงสร้างของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกจะถูกนำเสนอในภาพที่ 3 วิธีการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกถูกนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรการควบคุมการหน่วงของ TCSC สัญญาณอินพุทเป็นค่าเบี่ยงเบนความเร็ว $\Delta\omega$ ซึ่งสามารถวัดได้โดย PMUs สัญญาณ Z_s เป็นตัวชี้วัดค่าเบี่ยงเบนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสัญญาณ Z_a เป็นตัวชี้วัดความเร่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยสัญญาณ Z_s และ Z_a บนเฟสเพลนดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4 ขณะที่ Z_s และ Z_a ได้มาจากความแตกต่างทางความเร็วของสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านวงจรกรองความถี่สูงและหน่วยประวิงเวลา (unit delay)

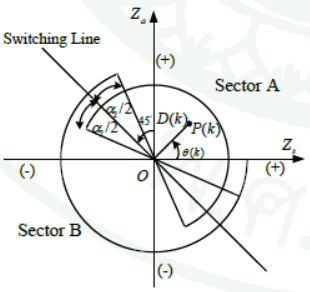
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พารามิเตอร์ α_1 เป็นตัวประกอบที่ปรับค่าได้และ T เป็นเวลาในการสุ่ม

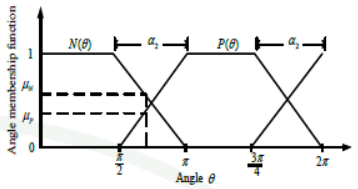


ภาพที่ 3 ตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกของ TCSC

จากภาพที่ 4 สภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประมาณโดยจุด $P(k)$ ในเฟสเพลน โดยจุดนี้จะถูกกำหนดด้วยคู่ลำดับของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความเร็ว Z_s และความเร่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Z_a ตำแหน่งต่างๆบนเฟสเพลนจะมีความหมายที่แตกต่างกันไป เช่น พื้นที่ในช่วงครึ่งบนของเฟสเพลนจะแสดงถึงความเร่งที่เป็นบวก ส่วนครึ่งล่างจะแสดงถึงความเร่งที่เป็นลบ ซึ่งก็คือ ความหน่วงพื้นที่ทางขวามือแสดงถึงความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ส่วนพื้นที่ทางซ้ายจะแสดงถึงความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส จุดกำเนิดของเฟสเพลนจะแสดงถึงจุดสมดุลย์ ซึ่งจุดประสงค์ของการควบคุมก็คือ ทำให้จุด $P(k)$ เคลื่อนเข้าสู่จุดกำเนิดให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พื้นที่บนเฟสเพลนจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของพื้นที่ A ซึ่งระบบมีความเร่งจึงต้องการการควบคุมแบบหน่วง และส่วนของพื้นที่ B ซึ่งระบบมีความหน่วงจึงต้องการการควบคุมแบบเร่ง [7] ส่วนพารามิเตอร์ α_2 คือมุมที่ซ้อนทับกันระหว่างสองส่วน

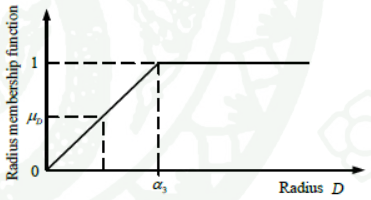


ภาพที่ 4 เฟสเพลนของการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก



ภาพที่ 5 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของมุม

พื้นที่ A และ B บนเฟสเพลนสามารถแทนด้วยฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $N(\theta)$ และ $P(\theta)$ ของมุมดังภาพที่ 5 และสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ ถ้าระบบมีความเร่ง (θ คือ N) แล้วควบคุมความหน่วงหรือถ้าระบบมีความหน่วง (θ คือ P) แล้วควบคุมความเร่ง ส่วนฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของรัศมี สามารถบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวน กล่าวคือ ถ้า $D(k)$ อยู่ห่างจากจุดสมดุลย์ (จุด O) มากการรบกวนก็จะรุนแรง ดังนั้นการเลื่อนจุด $P(k)$ กลับมายังจุด O ก็ต้องใช้สัญญาณควบคุมเสริมที่มีความแรงมากขึ้นด้วย ความแรงของสัญญาณควบคุมเสริมนี้จะถูกกำหนดโดยค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของรัศมี ซึ่งก็คือ μ_D ในภาพที่ 6 โดยมี α_3 เป็นเวกเตอร์ปรับสเกล



ภาพที่ 6 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของรัศมี

สภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอธิบายโดยข้อมูลเชิงขั้ว คือ จะถูกกำหนดโดยรัศมี $D(k)$ และมุมเฟส $\theta(k)$ ที่สามารถคำนวณได้โดย

$$D(k) = \sqrt{Z_s^2 + (\alpha_1 Z_a)^2} \quad (1)$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 Z_a}{Z_s}\right) \quad (2)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอาท์พุทของ TCSC แสดงโดย

$$X_{COut} = (2\mu_N - 1) \cdot \mu_D \cdot U_{\max} \cdot \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \quad (3)$$

ขณะที่ $U_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

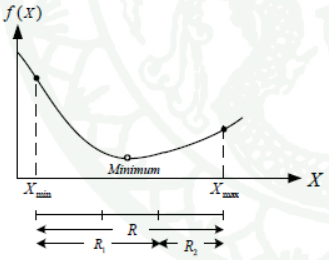
3.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น

วิธีการค้นหาแบบโกลเด้นเซกชั่น เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถใช้สำหรับค้นหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดอย่างต่อเนื่องโดยลดช่วงของการค้นหาลง [9] ลำดับขั้นตอนในการค้นหาค่าสำหรับสามจุดที่มีระยะห่างแบบอัตราส่วนทอง จากภาพที่ 7 การค้นหาช่วง R สามารถแสดงได้ดังนี้

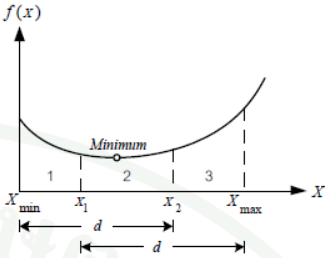
$$R = R_1 + R_2 \quad (4)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R} = 0.6180 \quad (5)$$

ขณะที่ 0.6180 คือ ค่าคงที่อัตราส่วนทอง



ภาพที่ 7 ช่วงของการค้นหา



ภาพที่ 8 การค้นหาจุดต่ำสุดโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลเด้นเซกชั่น

ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการค้นหาจุดต่ำสุดโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ โกลเด้นเซกชั่น ขอบเขตใหม่ของ x_1 และ x_2 คำนวณโดย

$$d = 0.618 \times (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

$$x_1 = X_{\max} - d \quad (7)$$

$$x_2 = X_{\min} + d \quad (8)$$

ขณะที่ $X_{\max}$ คือ ค่าสูงสุด

$X_{\min}$ คือ ค่าต่ำสุด

โดยสรุป วิธีการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าต่ำสุดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณช่วงเวลาเริ่มต้น $X_{\max} - X_{\min}$ ว่าค่าต่ำสุดยังคงอยู่ภายในช่วงเวลา

ขั้นตอนที่ 2: แบ่งช่วงเวลาที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปถึงขั้นตอนที่ 3 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 8

ขั้นตอนที่ 3: ประเมินผลการทำงานที่จุดสองจุดภายในที่ได้จาก (7) และ (8) จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขที่ว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถ้า $f(x_1) > f(x_2)$ แล้วค่าต่ำสุดอยู่ระหว่าง x_2 และ X_{max} สร้างช่วงเวลาใหม่ในการค้นหาที่แคบลงโดยการตั้งค่า $X_{min} = x_2$

ถ้า $f(x_1) < f(x_2)$ แล้วค่าสูงสุดอยู่ระหว่าง X_{min} และ x_1 สร้างช่วงเวลาใหม่ในการค้นหาที่แคบลงโดยการตั้งค่า $X_{max} = x_1$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณ

$$\varepsilon = (1-0.618)\cdot(X_{max} - X_{min}) \qquad (9)$$

ขั้นตอนที่ 5: ดำเนินการจนกระทั่งค่า ε น้อยกว่าขอบเขตที่จำกัด

4. ผลการจำลอง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการควบคุมแบบเฟส เพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ ระบบการศึกษาของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ได้ถูกนำมาใช้ TCSC ถูกติดตั้งอนุกรมกับสายส่ง ดังนั้นบทความนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่าง TCSC ที่มีการปรับหาค่าที่ดีที่สุดด้วยตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล้าหลังแสดงให้เห็นใน (10) และอีกหนึ่งวิธีคือการปรับหาค่าที่ดีที่สุดของการควบคุมแบบเฟส เพลนฟัซซี่ลอจิกด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น เนื่องจากในบทความนี้มีพารามิเตอร์เพียง 3 ค่าเท่านั้นที่ต้องการค้นหา จึงเลือกวิธีการนี้มาเป็นตัวช่วยในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพราะวิธีโกลเด้นเซกชั่นสามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และใช้จำนวนรอบในการค้นหาไม่นานเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ เช่น PSO, GA เป็นต้น

$$K_{RTCSC}(s) = 4.435\left(\frac{1+0.763s}{1+0.539s}\right)\left(\frac{1+0.706s}{1+0.159s}\right) \qquad (10)$$

การปรับหาค่าที่ดีที่สุดของการควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลังใน (10) ได้มาจากเอกสาร [4] ซึ่งถูกออกแบบโดยพิจารณาค่าประวิงเวลาของการสื่อสาร ซึ่งตัวควบคุมแบบคงทนนี้เรียกว่า RTCSC ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่นถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับหาค่าพารามิเตอร์ 3 ค่าสำหรับการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ นั่นคือ แฟกเตอร์ปรับสัดส่วน (α_1) มุมทับซ้อน (α_2) และแฟกเตอร์ระยะทาง (α_3) ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงผลการปรับตั้งค่าของพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก

ตารางที่ 1 ผลการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโกลเด้นเซกชั่น

α_1	α_2	α_3
0.048	0	0.004

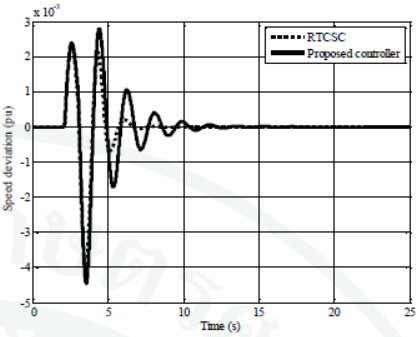
ตารางที่ 2 รูปแบบการรบกวนที่ใช้ในการทดสอบ

กรณี	เหตุการณ์	P_{tie} (pu)	การประวิงเวลา (ms)
1	เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระหว่างบัส 8 และบัส 9 ที่เวลา = 2 วินาที สายส่งที่เกิดการลัดวงจรจะถูกปลดออกจากระบบที่เวลา = 2.05 วินาที	7	400
2	เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระหว่างบัส 8 และบัส 9 ที่เวลา = 2 วินาที สายส่งที่เกิดการลัดวงจรจะถูกปลดออกจากระบบที่เวลา = 2.05 วินาที	7	700
3	เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่สายส่งระหว่างบัส 8 และบัส 9 ที่เวลา = 2 วินาที สายส่งที่เกิดการลัดวงจรจะถูกปลดออกจากระบบที่เวลา = 2.05 วินาที	7	1000

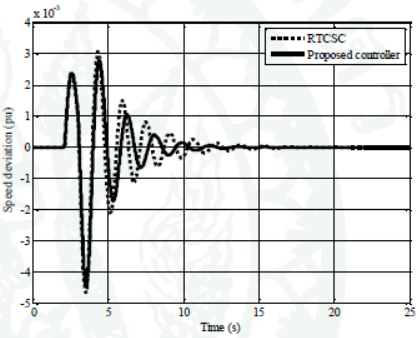
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การจำลองสถานการณ์ 3 กรณีได้ถูกเลือกขึ้นมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากเป็นสภาวะที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าปริมาณมากและเกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรง ทำให้เกิดความเสียหายค่อนข้างมาก การศึกษาโดยทั่วไปจะพิจารณาการประวิงเวลาทางการสื่อสารอยู่ในช่วงประมาณ 100-700 ms แยกตามประเภทของการสื่อสารสามารถดูได้จากเอกสาร [10] แต่ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาไปถึงการประวิงเวลาที่ 1000 ms เพราะต้องการศึกษาว่าถ้ามีเหตุการณ์ที่รุนแรงมากกว่าปกติถึงแม้จะเกิดขึ้นน้อยมากก็ตาม ระบบที่ทำการศึกษานี้ยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพให้ดีขึ้นได้

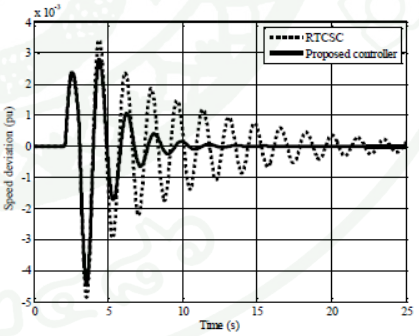
ค่าพารามิเตอร์สำหรับ 3 กรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่าง G1 และ G3 แสดงให้เห็นการแกว่งระหว่างพื้นที่ ในกรณีที่ 1 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 9 การแกว่งสามารถแกว่งแบบหน่วงได้ทั้ง RTCSC หรือตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ ประสิทธิภาพการทำงานของ RTCSC ดีกว่าตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนออยู่เล็กน้อย ในกรณีที่ 2 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 10 ผลกระทบการหน่วงของ RTCSC น้อยกว่าของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอ ขณะที่ประสิทธิภาพของของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอเกือบจะทำงานได้ดีเท่ากัน ในกรณีที่ 3 ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 11 ผลกระทบการหน่วงของ RTCSC แย่ลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอสามารถลดการแกว่งระหว่างพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีความคงทนที่มากกว่าต่อการประวิงเวลาทางการสื่อสารที่นานขึ้น



ภาพที่ 9 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณี 1 กับค่าประวิงเวลาที่ 400 ms



ภาพที่ 10 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณี 2 กับค่าประวิงเวลาที่ 700 ms



ภาพที่ 11 ผลต่างของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณี 3 กับค่าประวิงเวลาที่ 1000 ms

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอการควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยนำความไม่แน่นอนของการประวิงเวลามาพิจารณา การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกถูกนำมาใช้ในการควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่และเพื่อปรับปรุงความคงทนของตัวควบคุม TCSC ต่อการประวิงเวลาที่ไม่แน่นอน ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับการปรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลังด้วยวิธี GA จากผลการจำลองทำให้เห็นชัดเจนว่าการปรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบนำหน้า-ล้าหลังให้เสถียรภาพที่ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบเฟส เพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอภายใต้ช่วงที่กว้างของการประวิงทางเวลา ผลการจำลองยืนยันว่าตัวควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิกที่ได้นำเสนอมีสมรรถนะสูงกว่าและคงทนมากกว่าภายใต้การประวิงเวลาของระบบสื่อสารสำหรับการควบคุมแบบพื้นที่กว้าง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Liu X. et al., (2010), **"Measurement-based method for wind farm power system oscillations monitoring"**. IET Renewable Power Generation, vol. 4, no. 2, pp. 198–209

[2] Basu M., (2007), **"Optimal power flow with FACTS devices using differential evolution"**. *Electr. Power Energy Syst*, 2007.

[3] Shayeghi H., Safari A., and Shayanfar H.A., (2010), **"PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system"**. Energy Conversion and Management 51 (2010) 2930-2937

[4] Saejia M., Ngamroo I., (2010), **"Wide area robust TCSC controller design considering communication delay uncertainty"**. Proc. of ECTI-CON 2010, pp. 996-1000

[5] Hiyama T., Miyazaki K., and Satoh H., (1996), **"A fuzzy logic excitation system for stability enhancement of power systems with multi-mode oscillations"**. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 11, no. 2, pp. 449-454

[6] Kundur P., (1994) **"Power System stability and control"**. McGraw-Hill, 1994.

[7] Phorang K., Leelajindakraireak M., and Mizutani Y., (2002), **"Damping Improvement of Oscillation in Power System by Fuzzy Logic Based SVC Stabilizer"**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific.

[8] Marzan A.I., Masashi S., and Yasuyuki O., (1993), **"On Fuzzy Control Based Static Var Compensator for Power System Stability Control"**. ANNPS'93, Proc. of the 2nd International Forum on Applications of Neural Networks to Power system.

[9] Akhtaruzzaman M. et al., (2011), **"Golden Ratio, the Phi, and Its Geometrical Substantiation"**. *IEEE Student Conference on Research and Development*, Dec 2011.

[10] Naduvathuparambil B., Valenti M.C., and Ali F., (2002), **"Communication Delays in Wide Area Measurement Systems"**. Proc. of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory, 2002, pp. 118-122

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wide Area Robust TCSC Controller Using Phase-Plane Fuzzy Logic Control

Nuernapha Vititanont and Komsan Hongesombut
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
50 Phaholyothin Road, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand. Tel. 0-2797-0999 Ext. 1577
E-Mail: nuernapha.v@gmail.com, fengksh@ku.ac.th,

ABSTRACT

This paper presents a robust control of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) using the phase-plane fuzzy logic to improve the power oscillation damping of a wide-area power system. First, the TCSC is installed in series with transmission lines of two-area four-machine interconnected power system. Then, the phase-plane fuzzy logic control is adopted so as to control the power oscillations robustly and to improve the power system stability due to uncertainty from the delay time of a wide area control. The performance of the proposed phase-plane fuzzy logic controller is compared with the lead-lag compensator optimally tuned by GA. The simulation results reveal that the proposed phase-plane fuzzy logic control can achieve higher performance and more robustness under the large communication delay.

Keywords: Phase-Plane Fuzzy Logic Control, Thyristor Controlled Series Capacitor, Robust Control, Wide Area Control

1. Introduction

Electric power is transferred from power plants to substations located near demand centers. With the increasing of electric power demand recently, modern power system will require networks to be interconnected more flexibly and efficiently and thus make power system control becomes more complicated. Typically, bulk electric power is transferred from the power plants to the loads with transmission lines over long distances. In addition, under new environment of smart grids, the grids can also incorporate large renewable energy sources in operations at high voltage levels. Therefore, the situation of low-frequency power oscillations has become worse and eventually lead to instability problems [1].

The low frequency oscillations of electrical power usually come from a lack of sufficient damping of power in the power system. Many different approaches have been introduced, such as the application of automatic voltage regulator (AVR) equipped with the power system stabilizer (PSS). However, power electronic technologies have recently been developed that are more effective in increasing amounts of transmitted power, controlling the precise route of power flow and improving the dynamic performance. These technologies are referred to use Flexible AC Transmission System (FACTS) in power systems. TCSC is one of the most cost-effective FACTS devices for series compensation that enables more power to be transmitted over a long distance and can be used to damp the power oscillations effectively.

A method based on the particle swam optimization (PSO) technique is proposed to tune the parameters of damping controller of a TCSC. A robust design of a TCSC damping controller to improve the damping of inter-area oscillations is proposed that uses local measurements such as the voltage magnitude and the tie-line power. Another research work that uses genetic algorithm (GA) to tune the controller parameters for a wide area stabilization is proposed in Ref. [2]. In Ref. [2], the uncertainty due to communication delay is considered. However, the above mentioned papers are only based on the fixed structure controller. The fixed structure approach has the limitation in abruptly changing when operating conditions are shifted over a wide range. Because a power system is highly nonlinear, it is difficult to tune the parameters of fixed structure controllers. In contrast, the tuning of fuzzy logic controller is simple since there is no need for exact knowledge of power system mathematical model. Therefore, the fuzzy logic controller is independent due to nonlinear changes in operating conditions of generators and transmission lines.

There is a large number of successful applications of the fuzzy logic control to power system problems. The phase-plane fuzzy logic control is one of them that has been proved to work in many power system applications. For example, the implementation of a simple fuzzy logic excitation control of a synchronous generator is discussed in [3]. The experimental verification of performance of fuzzy control is shown by comparing to the conventional power system stabilizers. Until recently, there is no implementation of the phase-plane fuzzy logic control in a TCSC. For studies related to the power system stabilization, the performance of the phase-plane fuzzy logic control should be studied and verified.

This paper is divided into 5 sections. The first section is the introduction mentioning about the problem of power oscillations and the adoption of a TCSC to solve the power oscillation problems. Section 2 describes the configuration of the study power system. Section 3 presents the design of the phase-plane fuzzy logic controller for a TCSC. Furthermore, the parameters of the

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

phase-plane fuzzy logic controller are optimally tuned using a golden section optimization method for better performance. Section 4 reveals the simulation results of the proposed controller and compares its performance with the optimally tuned lead-lag controller. Finally, conclusions are drawn in section 5.

2. Study Power System

Figure 1 shows the configuration of the study power system. This system consists of two areas connected by a weak tie-line. The 6th order generator model is used for each generator and is equipped with 1st order automatic voltage regulator (AVR) without power system stabilizer (PSS). The governor is simple 1st order model. The TCSC is installed in series with the transmission line between B7 and B8. For wide area control, two phasor measurement units (PMUs) are installed at G1 and G3 respectively to measure the speed difference between two generators that represents the inter-area oscillation mode. The control system includes the time delay due to the communication.

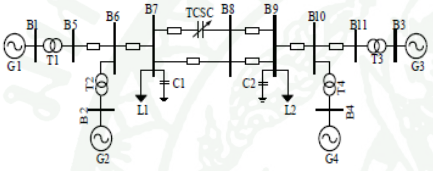


Figure 1. Two-area four-machine interconnected power system with a TCSC installed in series with the transmission line.

The function of a TCSC with the lead-lag controller is to provide damping to the oscillations of concerns. These oscillations are typically in the frequency range of 0.1 to 3 Hz. Figure 2 illustrates the TCSC model with the lead-lag controller. The model consists of a stabilizer gain K_{Stab}, a washout high-pass filter with time constant T_w, two set of lead-lag compensators with time constants T_1, T_2, T_3 and T_4 respectively, the 1st order TCSC model with gain K_{TCSC} and time constant T_{TCSC} and a limiter with upper limit $X_{C\max}$ and lower limit $X_{C\min}$. The input signal to the lead-lag controller is $\Delta\omega$ and the output of TCSC is X_{COut}.

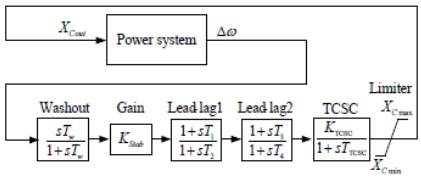


Figure 2. The structure of a TCSC with the lead-lag controller.

3. The Proposed Control Method

3.1 Phase-Plane Fuzzy Logic Control

The structure of the phase-plane fuzzy logic controller is presented in Figure 3. The phase-plane fuzzy logic control scheme is applied to the damping control loop of TCSC. The input signal is the generator speed difference $\Delta\omega$ between two areas that can be measured by PMUs. The signal Z_s is the measured signal of the generator speed deviation and the signal Z_a is the measured signal of the generator acceleration. The state of the generator is represented by the signals Z_s and Z_a on the phase-plane as shown in Figure 4, where Z_s and Z_a are derived from speed difference of two generators through the washout high-pass filter and the unit delay. The parameter α_1 is an adjustable scaling factor and T is the sampling time.

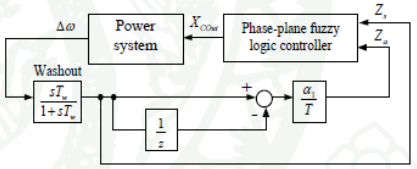


Figure 3. The phase-plane fuzzy logic controller of a TCSC.

From Figure 4, the state of generator is approximated by the point $P(k)$ in the phase-plane. The phase-plane can be divided into 2 sectors, i.e. sector A and sector B. The parameter α_2 is the overlapping angle between two sectors.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

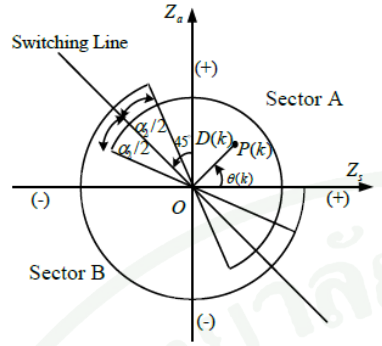


Figure 4. The phase-plane of fuzzy logic control.

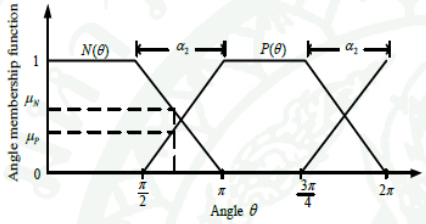


Figure 5. The angle membership function.

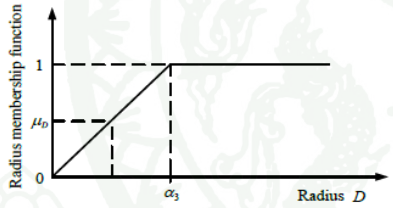


Figure 6. The radius membership function.

The generator state representing by the polar information is determined by the radius $D(k)$ and the phase angle $\theta(k)$ that can be calculated by:

$$D(k) = \sqrt{Z_s^2 + (\alpha_1 Z_a)^2} \quad (1)$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 Z_a}{Z_s}\right) \quad (2)$$

By using the angle and radius membership functions shown in Figure 5 and Figure 6 respectively, the output of a TCSC is given by:

$$X_{COut} = (2\mu_N - 1)\cdot \mu_D \cdot U_{\max} \cdot \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \quad (3)$$

Where $U_{\max}$ is the maximum value of the output signal of the phase-plane fuzzy logic controller.

3.2 Golden Section Optimization

The golden section search is an optimization technique that can be used for finding the minimum or maximum values by successively narrowing the searching range. The algorithm maintains the searching values for triple of points whose distances form a golden ratio. From Figure 7, the searching interval R can be expressed as:

$$R = R_1 + R_2 \quad (4)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R} = 0.6180 \quad (5)$$

Where 0.6180 is the golden ratio.

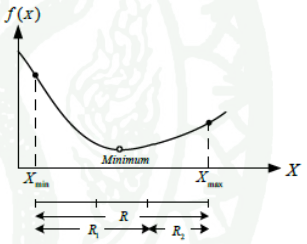


Figure 7. Searching interval.

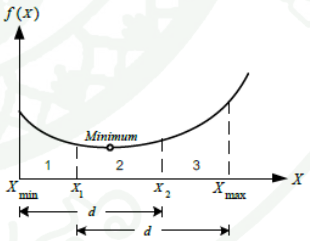


Figure 8. Finding the minimum point by using the golden section optimization.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Figure 8 shows an example of finding the minimum point by using the golden section optimization The new ranges of x_1 and x_2 are calculated by

$$d = 0.618 \times (X_{max} - X_{min}) \quad (6)$$

$$x_1 = X_{max} - d \quad (7)$$

$$x_2 = X_{min} + d \quad (8)$$

Where X_{max} is the maximum value,

X_{min} is the minimum value.

In summary, this method can be applied to search for the minimum value by taking the following steps:

Step 1: Calculate the starting interval $X_{max} - X_{min}$ that a minimum lies inside the interval.

Step 2: Divide the interval obtained by Step 1 into 3 sections as shown in Figure 8.

Step 3: Evaluate the function at the two internal points obtained by (7) and (8). Then check the condition that

If $f(x_1) > f(x_2)$ then the minimum lies between x_2 and X_{max}. Construct a new narrower search interval by setting $X_{min} = x_2$.

If $f(x_1) < f(x_2)$ then the minimum lies between X_{min} and x_1. Construct a new narrower search interval by setting $X_{max} = x_1$.

Step 4: Calculate the error representing the absolute precision to the minimum value by

$$\varepsilon = (1 - 0.618) \cdot (X_{max} - X_{min}) \quad (9)$$

Step 5: Carry out until ε is less than the tolerance limit.

4. Simulation results

In order to demonstrate the efficiency of the proposed phase-plane fuzzy logic controller, the study system of two-area four-machine interconnected power system is used. The TCSC is installed in series with the transmission line. Then, this paper makes the comparison between the TCSC with optimal tuning of the lead-lag compensator shown as a transfer function in (10) and another one with golden section tuning of the phase-plane fuzzy logic controller.

$$K_{RTCSC}(s) = 4.435\left(\frac{1+0.763s}{1+0.539s}\right)\left(\frac{1+0.706s}{1+0.159s}\right) \quad (10)$$

The optimally tuned lead-lag controller in (10) is obtained from [2] which is designed by considering the time delay of the communication. The benchmarking robust controller is referred as RTCSC. The golden section optimization is applied to tune three parameters of the proposed phase-plane fuzzy logic controller that are the scaling factor α_1, the overlapping angle α_2 and the distance factor α_3. Table 1 shows the tuning result of the parameters used in the phase-plane fuzzy logic controller.

Table 1. Control parameters used in the phase-plane fuzzy logic controller.

α_1	α_2	α_3
0.048	0	0.004

Table 2. Case studies

Case	Event	P_{tie} (pu)	Time delay (ms)
1	A 3 phase fault occurs at one transmission line between Bus 8 and Bus 9 at time = 2 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s.	7	400
2	A 3 phase fault occurs at one transmission line between Bus 8 and Bus 9 at time = 2 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s.	7	700
3	A 3 phase fault occurs at one transmission line between Bus 8 and Bus 9 at time = 2 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s.	7	1,000

Then, the non-linear simulations of three case studies under applied disturbances as given in Table 2 are performed. Comparisons of the generator speed difference between G1 and G3 which represents the inter-area oscillation between the RTCSC and the proposed phase-plane fuzzy logic controller are provided as follows. In case 1, as shown in Figure 9, the oscillation can be damped out by either the RTCSC or the proposed phase-plane fuzzy controller. The performance of the RTCSC is slightly better than the proposed phase-plane fuzzy logic controller. In case 2, as shown in Figure 10, the damping effect of RTCSC is much less that of the proposed phase-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

plane fuzzy logic controller while the performance of the proposed phase-plane fuzzy logic controller is almost the same. In case 3, as shown in Figure 11, the damping effect of the RTCSC is completely deteriorated. The proposed phase-plane fuzzy logic controller is successfully capable of damping out the inter-area oscillation effectively. It can be concluded that the proposed controller provides more robustness against the large communication delay.

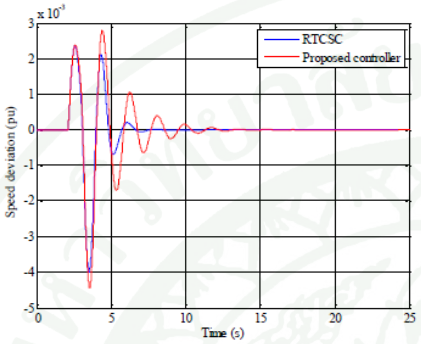


Figure 9. The generator speed difference in case 1 with the time delay of 400 ms.

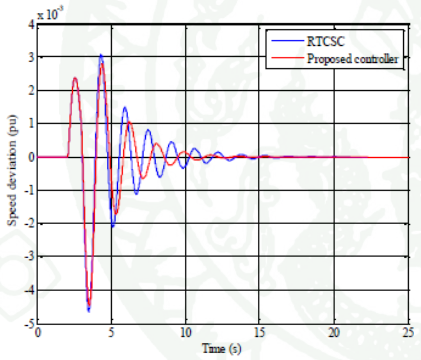


Figure 10. The generator speed difference in case 2 with the time delay of 700 ms.

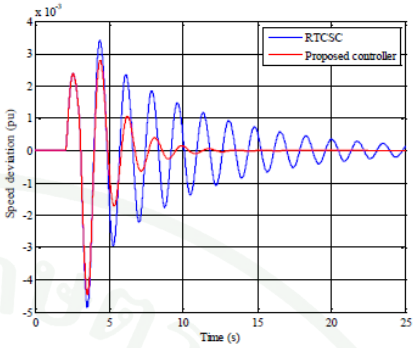


Figure 11. The generator speed difference in case 3 with the time delay of 1,000 ms.

5. Conclusions

This paper proposes the wide area robust TCSC controller considering the time delay as an uncertainty. The phase-plane fuzzy logic control is adopted to control the inter-area power oscillations robustly and to improve the robustness of the TCSC controller against the delay uncertainty. The performance of the proposed phase-plane fuzzy logic controller is compared with the optimally tuned lead-lag controller based on GA. It is obvious that the optimally tuned lead-lag controller gives poorer stability under a wide range of time delay than the proposed phase-plane fuzzy logic controller. The simulation results have confirmed that the proposed phase-plane fuzzy logic control can achieve higher performance and more robustness under the large communication delay.

References

[1] X. Liu, D. McSwiggan, T. B. Littler and J. Kennedy, "Measurement-based method for wind farm power system oscillations monitoring", IET Renewable Power Generation, vol. 4, issue 2, pp. 198–209, Mar. 2010.

[2] M. Saejia and I. Ngamroo, "Wide area robust TCSC controller design considering communication delay uncertainty", Proc. of 2010 International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), pp. 996-1000, May. 2010.

[3] T. Hiyama, K. Miyazaki and H. Satoh, "A fuzzy logic excitation system for stability enhancement of power systems with multi-mode oscillations", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 11, issue 2, pp. 449-454, Jun. 1996.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

TCSC Based on Phase-Plane Fuzzy Logic Control for Wide-Area Power System Stabilization

Nuernapha Vititanont[1] and Komsan Hongesombut[2]
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

50 Phaholyothin Road, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand. Tel. 0-2797-0999 Ext. 1577
E-Mail: [1]nuernapha.v@gmail.com, [2]fengksh@ku.ac.th,

Abstract— This paper proposes a Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) based on the phase-plane fuzzy logic control to improve the power oscillation damping of a wide-area power system control. The proposed phase-plane fuzzy logic control is applied to the two-area four-machine interconnected power system where the TCSC is installed in series with the transmission line. The objective of the proposed controller is to make the power oscillations more stable and robust due to uncertainty from the delay time of the communication system in a wide-area control. In order to verify the performance of the proposed control, the proposed controller is compared with the lead-lag compensator optimally tuned by GA. The simulation results demonstrate that the proposed controller can enhance the controller performance and robustness under the large communication delay time and various operating conditions.

Keywords: Phase-Plane Fuzzy Logic Control, Thyristor Controlled Series Capacitor, Robust Control, Wide Area Control

I. INTRODUCTION

Recently, with the increasing of electric power demand, modern power system requires networks to be interconnected more flexibly and efficiently and thus make power system control becomes more complicated. Basically, the bulk electric power is transferred from the power plants to the loads with transmission lines over the long distance. With the advent of the smart grid, the grid can integrate large renewable energy sources in operations. Therefore, the issue of low-frequency power oscillations has become worse and eventually lead to instability conditions [1].

The low frequency oscillations of electrical power are due to an inadequate damping of power in the power system. Many different techniques have been introduced, such as the application of automatic voltage regulator (AVR) equipped with the power system stabilizer (PSS). However, at present, power electronic technologies have been developed. They are more effective in increasing the amount of transmitted power with improving the dynamic performance and more precise to control the route of the power flow. These technologies are referred to use Flexible AC Transmission System (FACTS) in power systems. The TCSC is considered to be one of the most cost-effective FACTS devices for series compensation. It enables more power to be transmitted over a long distance and can be used to damp out the power oscillations effectively.

Many research works have been introduced to tune the parameters of the damping controller of a TCSC. The objective of control design is to obtain the good performance and robustness. A design of a robust TCSC damping controller to improve the damping of inter-area oscillations is proposed. Most of the previous researches in the past decades use the local measurements such as the voltage magnitude and the tie-line power. Until recently, the robust control design that uses genetic algorithm (GA) to tune the fixed structure controller parameters for a wide-area stabilization control is proposed [2]. In this paper, the uncertainty due to communication delay is considered. The fixed structure controller has the limitation when the operating condition is shifted over a wide range. Due to the highly nonlinear power system, tuning the parameters of the fixed structure controller is not easy. In contrast, the tuning of fuzzy logic controller is much simple because there is no need to know the exact mathematical models of power systems. The fuzzy logic controller is therefore independent to nonlinear changes in operating conditions of generators and transmission lines.

The phase-plane fuzzy logic control is one of successful applications of the fuzzy logic control to power systems that has been implemented in real power system applications [3]. Until recently, there is no implementation of the phase-plane fuzzy logic control in a TCSC. For studies related to the power system stabilization, the performance of the phase-plane fuzzy logic control should be studied and verified.

This paper is divided into five sections. The first section is the introduction mentioning about the problem of power oscillations and the adoption of a TCSC to solve the power oscillation issues. Section II describes the configuration of the study power system. Section III presents the design of the phase-plane fuzzy logic controller for a TCSC. Furthermore, the parameters of the phase-plane fuzzy logic controller are optimally tuned using a golden section optimization method to obtain better performance and robustness. Section IV shows the simulation results of the proposed controller and the comparison results with the optimally tuned lead-lag controller. Finally, it ends with the conclusions in section V.

II. STUDY POWER SYSTEM

Fig. 1 shows the configuration of the study power system. This system consists of two areas connected by a weak tie-line. The 6th order generator model is used for each

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

generator and is equipped with a 1st order automatic voltage regulator (AVR) without power system stabilizer (PSS). The governor is a simple 1st order model. The TCSC is installed in series with the transmission line between B7 and B8. For wide-area control, two phasor measurement units (PMUs) are installed at G1 and G3 respectively to measure the speed difference between two generators representing the inter-area oscillation mode. The control system includes the delay time due to the communication system of the wide-area control.

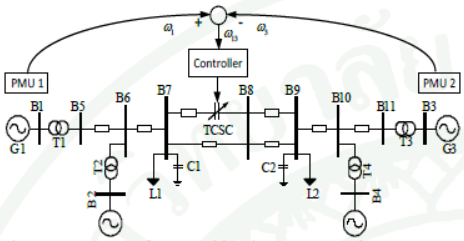


Fig. 1. Two-area four-machine interconnected power system with a TCSC installed in series with the transmission line.

The function of a TCSC with the lead-lag controller is to provide the supplementary damping to the oscillations of concerns. These oscillations are typically in the frequency range of 0.1 to 3 Hz. Fig. 2 shows the TCSC model with the lead-lag controller. The model consists of a stabilizer gain K_{Stab}, a washout high-pass filter with time constant T_w, two set of lead-lag compensators with time constants T_1, T_2, T_3 and T_4 respectively, the 1st order TCSC model with gain K_{TCSC} and time constant T_{TCSC} and a limiter with upper limit $X_{C\max}$ and lower limit $X_{C\min}$. The input signal to the lead-lag controller is $\Delta\omega$ and the output of TCSC is X_{COut}.

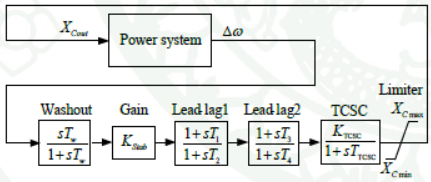


Fig. 2. The structure of a TCSC with the lead-lag controller.

III. THE PROPOSED CONTROL METHOD

A. Phase-Plane Fuzzy Logic Control

The structure of the phase-plane fuzzy logic controller is presented in Fig. 3. The phase-plane fuzzy logic control scheme is applied to the damping control loop of TCSC. The input signal is the generator speed difference $\Delta\omega$ between two areas that can be measured by two PMUs. The signal Z_s is the measured signal of the generator speed deviation and the signal Z_a is the measured signal of the generator acceleration. The state of the generator is represented by the signals Z_s and Z_a on the phase-plane as shown in Fig. 4, where Z_s and Z_a are derived from speed difference of two generators through the washout high-pass filter and the unit delay. The parameter α_1 is an adjustable scaling factor and T is the sampling time.

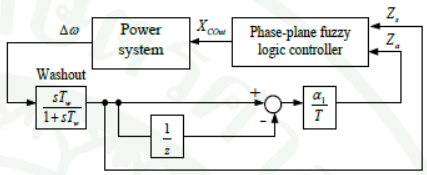


Fig. 3. The phase-plane fuzzy logic controller of a TCSC.

From Fig. 4, the state of generator is approximated by the point $P(k)$ in the phase-plane. The phase-plane can be divided into 2 sectors, i.e. sector A and sector B. The parameter α_2 is the overlapping angle between two sectors.

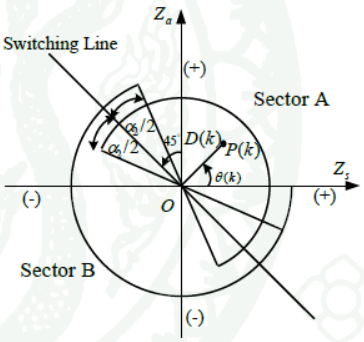


Fig. 4. The phase-plane of fuzzy logic control.

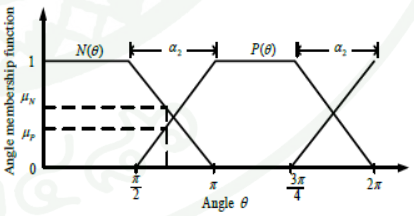


Fig. 5. The angle membership function.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

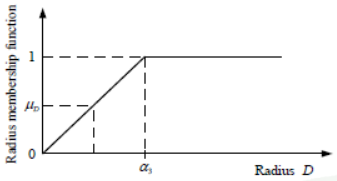


Fig. 6. The radius membership function.

The generator state representing by the polar information is determined by the radius $D(k)$ and the phase angle $\theta(k)$ that can be calculated by:

$$D(k) = \sqrt{Z_s^2 + (\alpha_1 Z_a)^2} \tag{1}$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 Z_a}{Z_s}\right) \tag{2}$$

By using the angle and radius membership functions shown in Fig. 5 and Fig. 6 respectively, the output of a TCSC is calculated by:

$$X_{COut} = (2\mu_N - 1)\cdot \mu_D \cdot U_{\max} \cdot \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \tag{3}$$

Where $U_{\max}$ is the maximum value of the output signal of the phase-plane fuzzy logic controller.

B. Golden Section Optimization

The golden section search is an optimization technique that can be used for finding the minimum value by successively narrowing the searching range. The algorithm maintains the searching values for triple of points whose distances form a golden ratio.

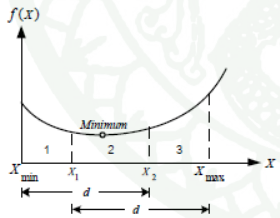


Fig. 7. The minimum point by using the golden section optimization.

Fig. 7 shows an example of finding the minimum point by using the golden section optimization. The new ranges of x_1 and x_2 are calculated by the following equations:

$$d = 0.618 \times (X_{\max} - X_{\min}) \tag{4}$$

$$x_1 = X_{\max} - d \tag{5}$$

$$x_2 = X_{\min} + d \tag{6}$$

Where $X_{\max}$ is the maximum value,

$X_{\min}$ is the minimum value.

This method can be applied to search for the minimum value by taking the following steps:

Step 1: Calculate the starting interval $X_{\max} - X_{\min}$ that a minimum lies inside the interval.

Step 2: Divide the interval obtained by Step 1 into 3 sections as shown in Fig. 8.

Step 3: Evaluate the function at the two internal points obtained by (5) and (6). Then check the condition that

If $f(x_1) > f(x_2)$ then the minimum lies between x_2 and $X_{\max}$. Construct a new narrower search interval by setting $X_{\min} = x_2$.

If $f(x_1) < f(x_2)$ then the minimum lies between $X_{\min}$ and x_1. Construct a new narrower search interval by setting $X_{\max} = x_1$.

Step 4: Calculate the error representing the absolute precision to the minimum value by (7).

$$\varepsilon = (1 - 0.618)\cdot(X_{\max} - X_{\min}) \tag{7}$$

Step 5: Carry out until ε is less than the tolerance limit.

IV. SIMULATION RESULTS

This paper makes the comparison between the TCSC with optimal tuning of the lead-lag compensator shown as a transfer function in (8) and another one with the golden section tuning of the phase-plane fuzzy logic controller.

$$K_{RTCSC}(s) = 4.435\left(\frac{1 + 0.763s}{1 + 0.539s}\right)\left(\frac{1 + 0.706s}{1 + 0.159s}\right) \tag{8}$$

The optimally tuned lead-lag controller in (8) is referred as RTCSC. It is designed by considering the delay time of the communication system. The golden section optimization is applied to tune three parameters of the proposed phase-plane fuzzy logic controller that are the scaling factor α_1, the overlapping angle α_2 and the distance factor α_3. Table I shows the tuning result of the parameters used in the phase-plane fuzzy logic controller.

TABLE I.
CONTROL PARAMETERS USED IN THE PHASE-PLANE FUZZY LOGIC CONTROLLER

α_1	α_2	α_3
0.048	0	0.004

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

TABLE II.
EVENTS FOR CASE STUDIES

Case	Event	P_{ss} (MW)	Delay time (ms)
1	A 3 phase fault occurs at one transmission line between Bus 8 and Bus 9 at time = 2 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s.	700	400
2	A 3 phase fault occurs at one transmission line between Bus 8 and Bus 9 at time = 2 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s.	700	700
3	A 3 phase fault occurs at one transmission line between Bus 8 and Bus 9 at time = 2 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s.	700	1,000

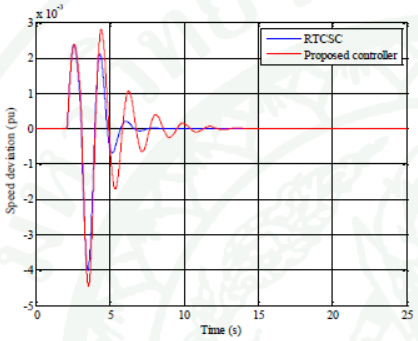


Fig. 8. The generator speed difference in case 1 with the delay time of 400 ms.

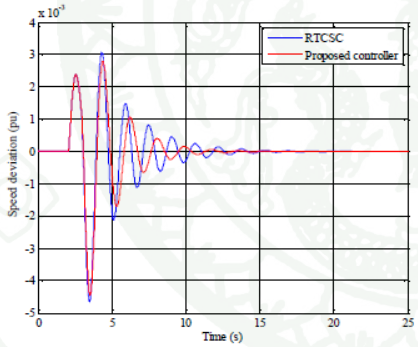


Fig. 9. The generator speed difference in case 2 with the delay time of 700 ms.

The non-linear simulations of three case studies under applied disturbances as given in Table II are performed. In case 1, as shown in Fig. 8, the oscillation can be damped out by either the RTCSC or the proposed phase-plane fuzzy controller. The performance of the RTCSC is slightly better than the proposed phase-plane fuzzy logic controller. In case 2, as shown in Fig. 9, the damping effect of RTCSC is much less that of the proposed phase-plane fuzzy logic controller while the performance of the proposed phase-plane fuzzy logic controller is almost the same. In case 3, as shown in Fig. 10, the damping effect of the RTCSC is completely deteriorated. The proposed phase-plane fuzzy logic controller is successfully capable of damping out the inter-area oscillation effectively. It can be concluded that the proposed controller provides more robustness against the large communication delay.

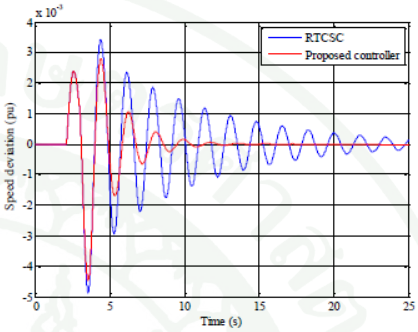


Fig. 10. The generator speed difference in case 3 with the delay time of 1,000 ms.

V. CONCLUSIONS

This paper proposes a robust TCSC controller considering the delay time of the communication system as an uncertainty for a wide-area power system control. The phase-plane fuzzy logic control is applied to control the inter-area power oscillations robustly and to improve the robustness of the TCSC controller against the uncertainty from delay time of the communication system. The performance of the proposed controller is compared with the optimally tuned lead-lag controller based on GA. It is obvious that the optimally tuned lead-lag controller gives poorer stability under a wide range of delay time than the proposed controller. The simulation results demonstrate that the proposed controller can enhance the controller performance and robustness under the large communication delay time and various operating conditions.

REFERENCES

[1] X. Liu, D. McSwiggan, T. B. Littler and J. Kennedy, "Measurement-based method for wind farm power system oscillations monitoring", IET Renewable Power Generation, vol. 4, issue 2, pp. 198–209, Mar. 2010.

[2] M. Saejia and I. Ngamroo, "Wide area robust TCSC controller design considering communication delay uncertainty", Proc. of 2010 International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), pp. 996-1000, May. 2010.

[3] T. Hiyama, K. Miyazaki and H. Satoh, "A fuzzy logic excitation system for stability enhancement of power systems with multi-mode oscillations", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 11, issue 2, pp. 449-454, Jun. 1996.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวเหนือนภา วิติฐานนท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
งานวิจัย	เสถียรภาพไฟฟ้ากำลังและการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

บทความวิจัยในระดับชาติและนานาชาติ

1. เหนือนภา วิติฐานนท์, คมสันต์ หงษ์สมบัติ. 2556. การควบคุม TCSC แบบคงทนในพื้นที่กว้างโดยใช้การควบคุมแบบเฟสเพลนฟัซซี่ลอจิก. **วารสารวิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.** ได้รับการพิจารณาเห็นสมควรรับตีพิมพ์

2. N. Vititanont, K. Hongesombut, “Wide Area Robust TCSC Controller using Phase-plane Fuzzy Logic Control”, **Proc. on the 6th International Association of Science and Technology for Development (IASTED)**. 10-12 Apr 2013. (Accepted)

3. N. Vititanont, K. Hongesombut, “TCSC Based on Phase-Plane Fuzzy Logic Control for Wide-Area Power System Stabilization”, **Proc. on the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-2013).** 15-17 May 2013. (Accepted)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์