

การชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง
ด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น
Compensation of Low Frequency Oscillation on Power System
using Flexible AC Transmission Systems Devices

อมร อ้นกรอง และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์^{1*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นในระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำโดยใช้โปรแกรม PSAT เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพในระบบเมื่อเกิดสภาวะทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้จำลองระบบตามมาตรฐาน IEEE 14 บัสเป็นกรณีศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแกว่งของความถี่จะเลือกอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นมา 2 ชนิดเป็นแบบอนุกรมและแบบขนาน ผลการวิเคราะห์จะแสดงผลออกมา 2 รูปแบบ คือ เทียบกับเวลา (Time Domain) และดูผลของค่าไอเก้น (Eigen Value) ของระบบ จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นสามารถชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบกำลังไฟฟ้าได้

Abstract

This paper presents a study of low-frequency oscillations in compensated electric power systems with Flexible AC Transmission System of the power system frequency using PSAT Tool box To assist in the analysis of the stability of the system. When the power transients in power systems is simulated By using standard IEEE 14 bus system as a case study. The Equipment that used to control the swing frequency of the is a flexible electrical power control devices or FACTS are two kinds of serial and parallel. The analysis showed that two models are compared with the time (Time Domain) and see the effect of the Eigen (Eigen Value) of the simulation results show work to see that controls are electrical flexible compensation. of low frequency oscillations in power systems in acceptable coordinates

คำสำคัญ : เสถียรภาพ สภาวะทรานเซียนต์ อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น การแกว่งของ ความถี่ต่ำ

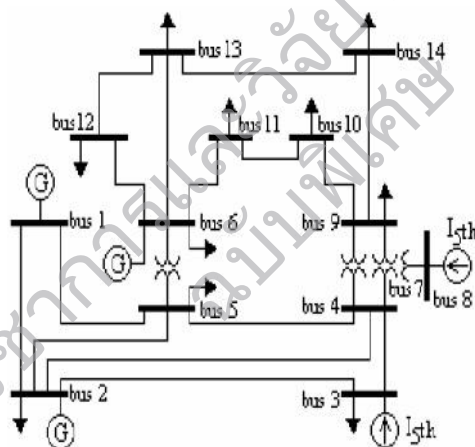
Keywords : Stability , transients , power control devices , of low frequency Oscillations

*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ krischonme.b@en.rmutt.ac.th โทร. 0 2549 3571

1. บทนำ

ปัจจุบันการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจะเกิดการแกว่งของระบบไฟฟ้าขึ้น โดยที่ระบบไฟฟ้าเป็นระบบไม่เชิงเส้น จึงทำให้ไม่มีความแน่นอนในระบบถ้าเกิดสภาวะทรานเซียนต์ขึ้นในระบบเช่น การเกิดฟลัดในระบบ การเกิดแรงดันตก ช่วงของการเกิดสัญญาณรบกวนฮามอนิกส์ จะทำให้ระบบล่มและเกิดไฟฟ้าดับได้โดยแบ่งออกเป็นสามกรณี ความถี่แรงดันและมุมเฟส การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว คือการวิเคราะห์ที่สำคัญในการทำงานของระบบไฟฟ้าเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นบนเครือข่ายระบบไฟฟ้าเป็นหนึ่งในหลักเป้าหมายของการวิเคราะห์นี้คือการรวบรวมข้อมูลที่สำคัญเช่นเวลาว่างที่สำคัญของเบรกเกอร์วงจรสำหรับความผิดปกติในระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวได้กลายเป็นหนึ่งของการวิเคราะห์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าเพื่อให้มั่นใจเสถียรภาพของระบบที่จะทนต่อการรบกวนที่สำคัญ ผลของการชั่วคราวปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่ความผิดปกติของอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า

บทความนี้จะศึกษาผลการเกิดทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น 2 ชนิดคือ 1. ระบบเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า(Power System Stabilizer,PSS) 2. ตัวเก็บประจุควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitors ,TCSC) โดยการวิเคราะห์การแกว่งของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน โดยใช้วิธีการไหลอย่างต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้า(Power Flow) ในระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของไฟฟ้ากำลังและองค์ประกอบของโหลด ดังข้อสรุปและข้อเสนอแนะต่างสำหรับงานวิจัยที่จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 1 ระบบ 14 บัส

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแกว่งของระบบไฟฟ้า

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อถูกสัญญาณรบกวนในสภาวะ ทรานเซียนต์ เช่น การเกิดฟลัดในระบบ โรเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต (Dynamic motation) โดยจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดมีความเร่งและการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า การแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง (Swing Equation) และที่สภาวะคงตัว (Stedy State Condition) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยที่ไม่คิดค่าสูญเสียภายในเครื่องกำเนิดจะพบว่าระบบไฟฟ้าจะสมดุลย์ เมื่อแรงบิด (Torque) ทางกลจะเท่ากับทางกำลังไฟฟ้างดงามการ

$$T_e = T_m \quad (1)$$

T_e = แรงบิดทางไฟฟ้า T_m คือ แรงบิดทางกล

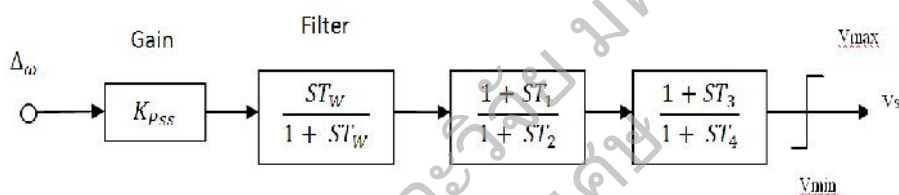
เมื่อมีการรบกวนในระบบจะพิจารณาแล้วพบว่า $T_e \neq T_m$ ขึ้นอยู่กับลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นและมีแรงบิดที่ (Accelerating Torque, T_a) เกิดขึ้นที่บนโรเตอร์ แบ่งเป็น Accelerating ($T_m > T_e$) และ Decelerating ($T_m < T_e$)

$$T_a = T_m - T_e \quad (2)$$

$$j \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} T_a = T_m - T_e \quad (3)$$

2.2 ระบบเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer, PSS)

ระบบเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าใช้สำหรับใช้ในการปรับปรุงพลังงานความเสถียรของระบบคือบล็อกเพิ่มเติมในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการควบคุมการกระตุ้นที่ช่วยปรับปรุงระบบไฟฟ้าโดยรวมประสิทธิภาพการทำงานแบบไดนามิกโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมของแนบแน่นไฟฟ้า PSS ใช้เสริมเสถียรภาพสัญญาณเช่นความเร็วเพลา ความถี่ชั่วหรืออำนาจเป็นด้านเข้าส่งสัญญาณ PSS ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ส่งออกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ควบคุมค่าการกระตุ้นและลดการแกว่งอำนาจอย่างรวดเร็ว โดยการแกว่งของมุมเฟส แรงดัน และความถี่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของโรเตอร์



รูปที่ 2 การจำลองตัวเสถียรภาพในระบบ

PSS เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้กับตัวปรับแรงดันโดยอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator, AVR) ในการแกว่งของระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ (0.2 – 2.0 Hz) หากเกิดการล่มสลายในระบบจะไม่สามารถควบคุม PSS ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของสมการนี้

$$T(s) = K_s \frac{1sT_1}{1sT_2} \quad (4)$$

ถ้าที่เวลาคงที่ T_1 และ T_2 เป็นตัวชดเชยสำหรับการแกว่งนำหน้าหรือล่าช้าเป็นการกระตุ้นดังอธิบายสมการของดังนี้

$$V_W = \frac{1}{T_W} [-V_W + S_m] \quad (5)$$

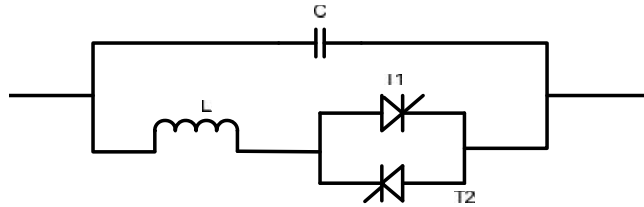
$$V_s = \frac{1}{T_2} \left[-V_s + K_s \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) u_1 \right] \quad (6)$$

เมื่อ V_s และ V_W เป็นตัวแปรผกผันโดยตรงเมื่อเกิดการลัดวงจรและชดเชยการเปลี่ยนแปลง

2.3 ตัวเก็บประจุควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitors ,TCSC)

การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของความต้านทานสายส่ง และเป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง การแกว่งระหว่างพื้นที่ และการปรับปรุงเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับบัสอนันต์ ควบคุมด้วย TCSC เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบไปด้วยความผันผวนและโรเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันภายในเครื่อง รูปแบบคำสั่งนี้มีสามรับที่ต้องการในการศึกษาความถี่ต่ำเพราะความเรียบง่าย ความต้านทานสายคือ $Z = R +$

jX และกลางรบบสื่อกฎเกณฑ์โหลดต้องถ่วงกับการรับเข้าของ $Y = G + jB$ แก้วโรเตอร์และเครื่องแรงดันภายในสามารถตามทีระบุไว้



รูปที่ 3 เก้าประจุควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitors TCSC)

1.) สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับบัสอนันต์ควบคุมด้วย TCSC มีดังนี้

$$\dot{d} = w_n \Delta w \quad (7)$$

$$\dot{w} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \quad (8)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{do}} (-E_q + E_{fd}) \quad (9)$$

$$\dot{E}_{fd} = \left(K_A (V_{ref} - V_t + U_{PSS}) - E_{fd} \right) / T_A \quad (10)$$

$$P_e = V_{td} I_d + V_{tq} I_q \quad (11)$$

$$V_t = V_{td} + j V_{tq} \quad (12)$$

$$V_{td} = X_q I_q \quad (13)$$

$$V_{tq} = E'_q - E'_d I_d \quad (14)$$

2.) สมการที่เป็นเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับบัสอนันต์

$$\Delta \dot{d} = w_n \Delta w \quad (15)$$

$$\Delta \dot{w} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta w}{M} \quad (16)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{\Delta E_{fd} - (X_d - X'_d) \Delta i_d - \Delta E'_d}{t_{do}} \quad (17)$$

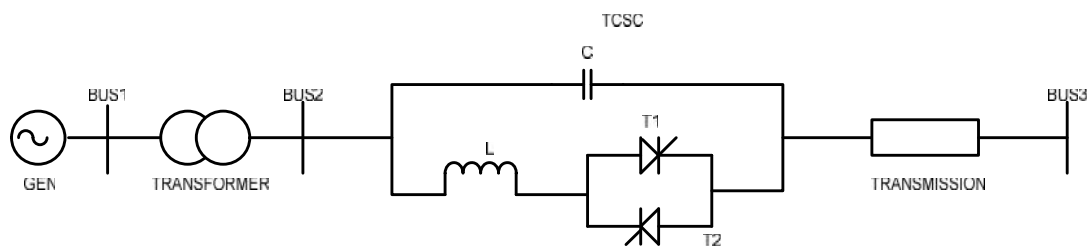
$$\Delta \dot{E}_{fd} = \left(K_A (\Delta V_{ref} - \Delta V_t + U_{PSS}) - \Delta E_{fd} \right) / T_A \quad (18)$$

$$\Delta I_q = C_7 \Delta d + C_8 \Delta X_{TCSC} \quad (19)$$

$$\Delta I_d = C_9 \Delta d + C_{10} \Delta E'_q + C_{11} \Delta X_{TCSC} \quad (20)$$

$$\Delta P_e = K_1 \Delta d + K_2 \Delta E'_q + K_3 \Delta X_{TCSC} \quad (21)$$

$$\Delta V_t = K_4 \Delta d + K_5 \Delta E'_q + K_6 \Delta X_{TCSC} \quad (22)$$



รูปที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับบัสสื่อนั้นต์ควบคุมด้วย TCSC

2.4 ระบบที่ออกแบบ

การออกแบบระบบใช้ตามมาตรฐาน IEEE 14 บัสดังแสดงในรูปที่ 1 จะใช้สำหรับการศึกษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้า โดยการทดสอบวิจัยจะพิจารณาจากที่มีและไม่มีอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขในการศึกษาที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดสภาวะทรานเซียนต์บัสที่ 1 ในระบบไฟฟ้าและปฏิกิริยาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในระบบมี 20 สาขา 14 บัส

ตารางที่ 1 ข้อมูลระบบ IEEE 14 BUS

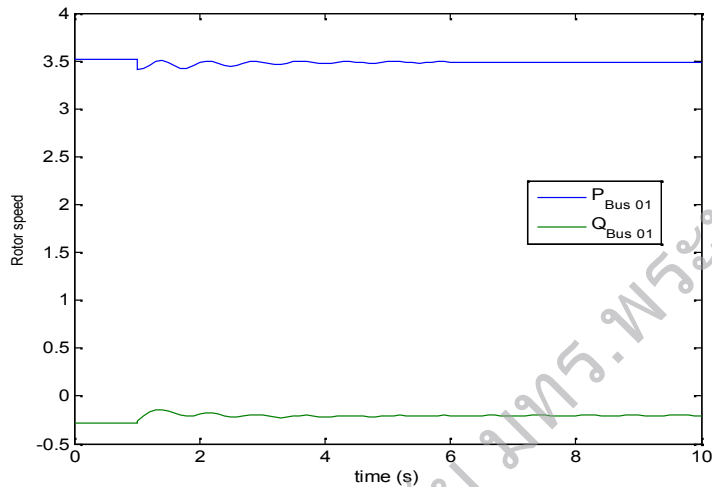
Line	From bus	To bus	Line (P.U)		Half Line (P.U)	MVA
			Re	Ra		
1	1	2	0.019	0.059	0.026	120
2	1	5	0.054	0.223	0.021	65
3	2	3	0.046	0.197	0.018	36
4	2	4	0.058	0.176	0.024	65
5	2	5	0.056	0.173	0.017	50
6	3	4	0.067	0.171	0.017	65
7	4	5	0.013	0.024	0.006	45
8	4	7	0	0.209	0	55
9	4	9	0	0.556	0	32
10	5	6	0	0.252	0	45
11	6	11	0.094	0.198	0	11
12	6	12	0.122	0.255	0	32
13	6	13	0.066	0.130	0	32
14	7	8	0	0.176	0	32
15	7	9	0	0.110	0	32
16	9	10	0.031	0.084	0	32
17	9	14	0.127	0.270	0	32
18	10	11	0.082	0.192	0	12
19	12	13	0.220	0.199	0	12
20	13	14	0.170	0.348	0	12

ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 5 ตัวโดยที่มีเครื่องกำเนิด 3 ตัวใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ แบบจำลอง PQ โดยทั่วไปจะใช้สำหรับการโหลดและซิด จำกัด ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดสมการ

เมื่อ P_0 และ Q_0 มีการใช้งานและปฏิกิริยาโหลดฐานในขณะที่ P_L และ Q_L มีโหลดการใช้งานและปฏิกิริยาที่บัส โหลด สำหรับจุดปฏิบัติการปัจจุบันตามที่กำหนดไว้โดย I

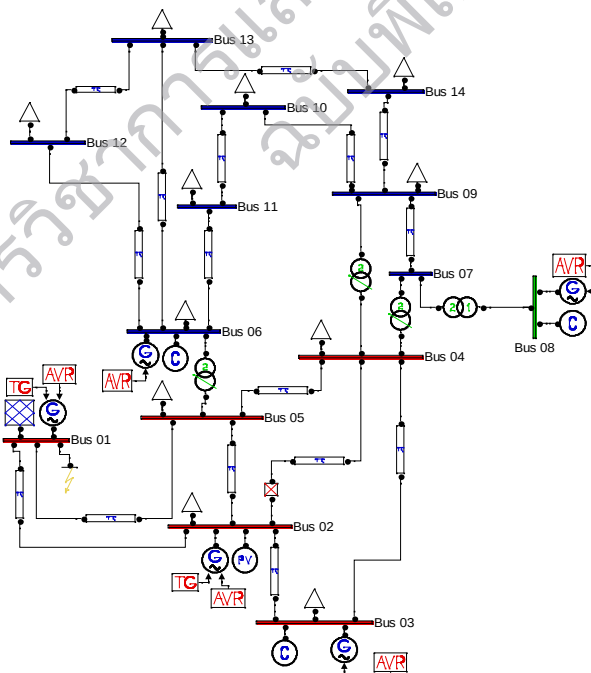
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองโดยการจำลองการทำงานของระบบใช้โปรแกรม Psat ทำงานกับโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรม Psat สามารถจำลองและวิเคราะห์หาค่าของระบบได้หลายรูปแบบ เช่น นิวตัน-ราฟส์ฟ(NR) การไหลของกระแสไฟฟ้า(CPF)

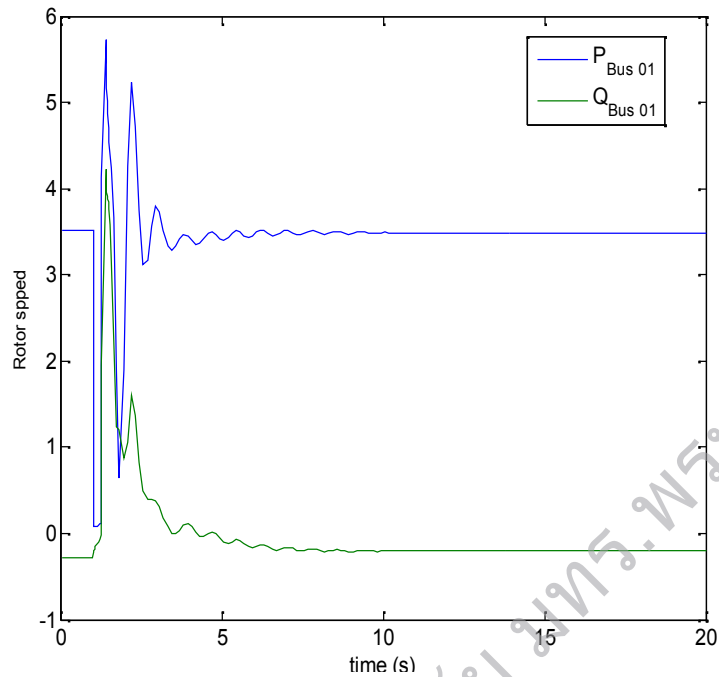


รูปที่ 4 ความเร็วเชิงมุมเมื่อยังไม่เกิดฟอลต์ในระบบ

โดยการทดสอบของระบบจะทดสอบโดยการเกิดฟอลต์ในระบบ 14 บัส ในบัสที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5

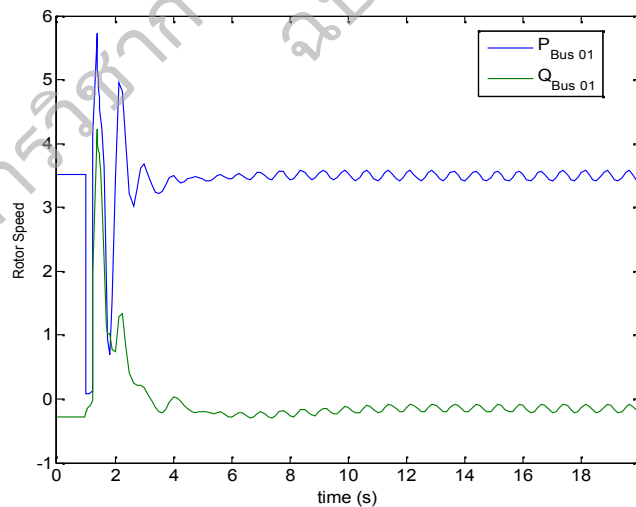


รูปที่ 5 การเกิดฟอลต์ในระบบ 14 บัส

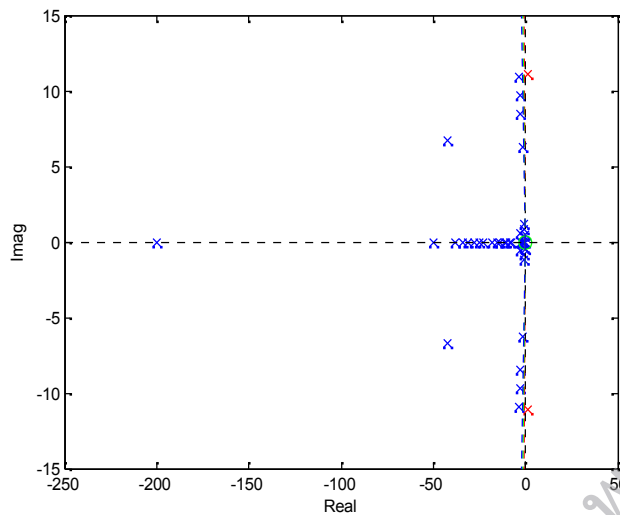


รูปที่ 6 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความไม่เสถียรภาพของระบบเมื่อเกิดฟอลต์ในบัสที่ 1 ทำให้เกิดแรงดันเกินที่บัส 1 ขึ้นโดย ผลของโรเตอร์จะเกิดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง จึงทำให้ต้องมีอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

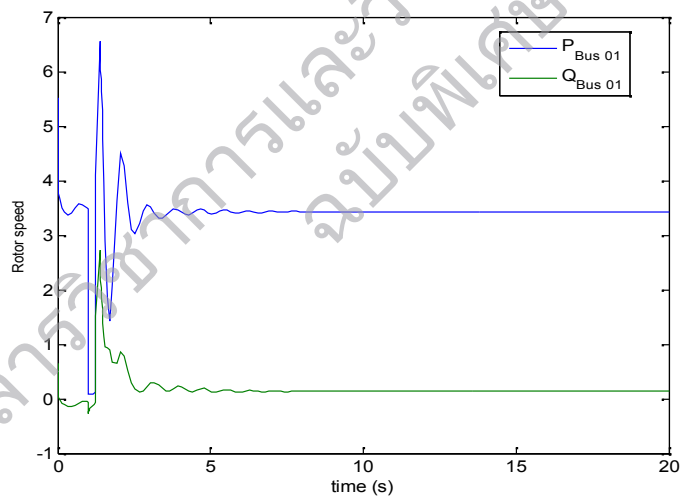


รูปที่ 7 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ อุปกรณ์ เมื่อติดตั้ง PSS

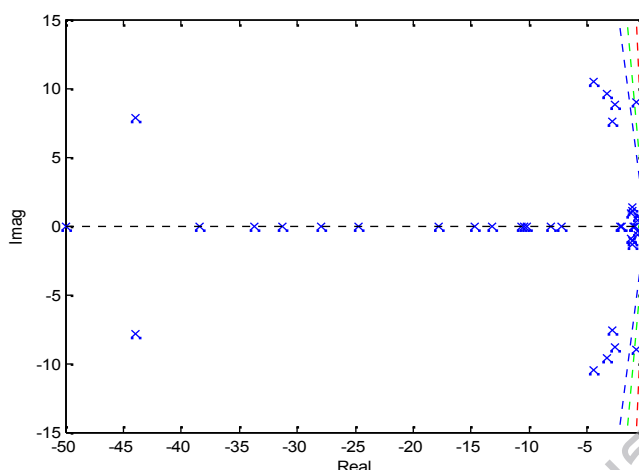


รูปที่ 8 ค่าไอเก้น (Eigen Value) ของระบบเมื่อเกิดฟอลต์ควบคุมเป็น PSS

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และ 8 เป็นการวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์ควบคุม PSS ระบบจะยังไม่เสถียรภาพ เนื่องจาก ค่าไอเก้น (Eigen Value) บน S-Plan ของระบบยังไม่เข้าสู่ศูนย์



รูปที่ 9 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ อุปกรณ์ควบคุมเป็น TCSC



รูปที่ 10 ค่าไอเก้น (Eigen Value) ของระบบเมื่อเกิดฟอลต์ เมื่อติดตั้ง TCSC

จากรูปที่ 9 ถึง 10 จากการวิเคราะห์การเสถียรภาพเมื่อระบบเกิดฟอลต์ ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้ การควบคุมอุปกรณ์แบบยืดหยุ่นแบบ TCSC จะสามารถควบคุมได้ดีกว่าระบบ PSS เมื่อมีการเกิดฟอลต์ในระบบเนื่องจากว่าระบบโหลดเป็นสมการไม่เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรม PSAT ช่วยในการวิเคราะห์ ดังแสดงผลในตาราง

ตารางที่ 1 เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ

อุปกรณ์	ค่าเจาะจง	ความถี่	อัตราการหน่วง
AVR	-0.55757 ± 8.912	1.4212	1.4184
PSS	1.0926 ± 11.0994	1.7751	1.7665
TCSC	0.71666 ± 8.9615	1.4308	1.4263

4. สรุป

บทความนี้เป็นบทวิเคราะห์การศึกษาค้นคว้าการชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นในระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำเมื่อเกิดฟอลต์หรือทรานเซียนต์ในระบบ ผลการทดสอบดังตารางที่ 1 คือ เมื่อต่ออุปกรณ์ควบคุม PSS เข้าไปในระบบ จะมีอัตราการหน่วงที่ 1.7665 P.U และเมื่อต่ออุปกรณ์ควบคุม TCSC เข้าไปในระบบจะมีอัตราการหน่วงที่ 1.4263 P.U จะเห็นได้ว่าระบบที่ต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบจะสามารถควบคุมการแกว่งของระบบและมีเสถียรภาพมากกว่าระบบที่ต่ออุปกรณ์แบบ PSS

5. เอกสารอ้างอิง

G. Rogers, Power System Oscillations, (Kluwer: Massachusetts, 2000).

กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. (1 ธันวาคม 2553), ISBN 978-616-7326-20-7.

A vinash Srivastava and S. Dawnee Performance Analysis and Tuning of FACTS Controllers in Tandem with PSS in a Power System Network. 28-30 Sept. 2011 , Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE), 2011 International Conference and, (28-30 Sept. 2011).

- Saeid jalilzadeh , Reza noroozian, M.Reza Safari Tirtashi and Peyman Farhang Comparison of TCSC and PSS State Feedback controller Performances on Damping of Power System Oscillation usind PS00.in Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on (17-19 May 2011).
- T.R.Jyothsna, *Member, IEEE*, and K. Vaisakh, *Member, IEEE* MOEP Based Design of PSS and FACTS for Transient Stability Improvement under Symmetrical and Unsymmetrical Fault Conditions.in TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference” (19-21 Nov. 2008).
- P. Kundur, *Power System Stability and Control*, (McGraw-Hill: New York, 1994).
- F. Milano An Open Source Power System AnalysisToolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), (August 2005), 1199-1206.
- Arfah Marini Mohamad Transient Stability Analysis on Sarawak’s Grid using Power System Simulator for Engineering (PSS/E). Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2011 IEEE Symposium on (Date of Conference: 25-28 Sept. 2011).
- N. Hashim, N. Hamzah, M.F. Abdul Latip Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS), 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation (Date of Conference: 8-10 Feb. 2012).
- G Naveen Kumar, Dr M Surya Kalavathi CPF, TDS based Voltage Stability Analysis using Series, Shunt and Series–Shunt FACTS controllers for Line Outage Contingency. Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on (Date of Conference: 22-24 Dec. 2011).