

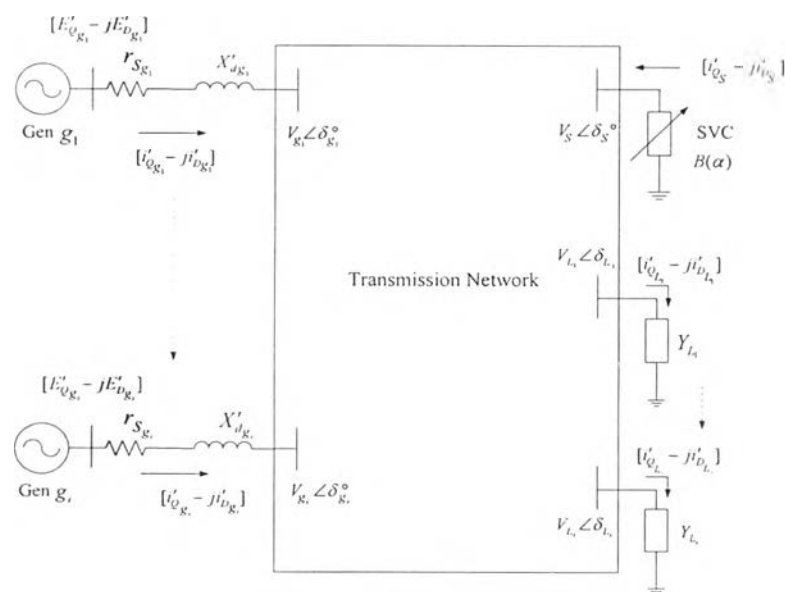
## บทที่ 4

### การพัฒนาแบบจำลองภาวะชั่วคราวของระบบผลิต และส่งกำลังไฟฟ้า

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงแบบจำลองในภาวะชั่วคราวของ SVC ไปแล้ว ในบทนี้ก็จะได้กล่าวถึงเรื่องแบบจำลองของระบบส่ง และผลิตกำลังไฟฟ้า ทั้งของระบบ 9 บัส และระบบเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลด

#### 4.1 องค์ประกอบโดยรวมของระบบ

องค์ประกอบโดยรวมทั้งหมดของระบบ(Overall System) ที่จะนำมาศึกษาผลกระทบของเหตุการณ์ที่เกิดจากการรบกวนขนาดใหญ่ภายใต้ภาวะชั่วคราวที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ SVC ทั้งหมดนี้จะมีลักษณะการเชื่อมต่อดังรูปที่ 4.1 โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กำลังพิจารณาอยู่ก็จะใช้แบบจำลองที่เป็นแบบดั้งเดิม (Classical Model) ที่เรียกว่า voltage behind reactance [16] และระบบส่งกำลังไฟฟ้างี้จะรวมถึงแอดมิตแตนซ์โหลดไปด้วย ส่วน SVC ก็จะทำหน้าที่เสมือนชั้บเซบแดนซ์แบบขนาน ที่สามารถปรับค่าของชั้บเซบแดนซ์ให้เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของระบบเพื่อที่จะรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของแบบจำลองในภาวะชั่วคราวของระบบทดสอบ

ในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอถึงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ที่นำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมในภาวะชั่วคราวของระบบทดสอบ รวมถึงรูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ส่วนแบบจำลองของ SVC ที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันนั้นได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.4

## 4.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ก็จะเป็นแบบจำลองในภาวะชั่วคราวโดยไม่คิดผลของขดลวดหน่วง(Damper winding) และผลของฟลักซ์เชื่อมโยง(Flux Linkages)ระหว่างแกน D และแกน Q ของขดลวดสเตเตอร์ (Stator winding) ที่เป็นเฟรมอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลองแบบนี้มีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน และสามารถให้ผลทางด้านเชิงพลวัตในภาวะชั่วคราวได้ นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังจะประกอบไปด้วยระบบกระตุ้น(Excitation System) ทั้งที่เป็นแบบใช้แรงดันกระแสตรง(DC regulate)และกระแสสลับจ่าย(AC regulate)ให้กับขดลวดสนาม(Field Winding) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแบบจำลองทั้งหมดที่ได้กล่าวไปสามารถเขียนเป็นสมการสถานะ(State Equation) และสมการพีชคณิต(Algebraic Equation) บนโครงร่างอ้างอิง(Reference Frame)ของแกน D และ Q ได้ดังนี้[11] คือ

- สมการขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Stator winding Equations)

$$\begin{aligned} v_q &= -r_s i_q - x'_d i_d + E'_q \\ v_d &= -r_s i_d + x'_q i_q + E'_d \end{aligned} \quad (4.1)$$

- สมการขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Rotor winding Equations)

$$T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = E_{fd} - (x_d - x'_d) i_d \quad (4.2)$$

$$T'_{qo} \frac{dE'_d}{dt} + E'_d = -(x_q - x'_q) i_q \quad (4.3)$$

- สมการแรงบิด(Torque Equation)

$$T_e = -\{E'_q i_q + E'_d i_d + (x'_q - x'_d) i_d i_q\} \quad (4.4)$$

$$T_{damp(pu)} = D(\omega_r - \omega_c) / \omega_b \quad (4.5)$$

- สมการโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Rotor Equations)

$$2H \frac{d\{(\omega_r - \omega_c) / \omega_b\}}{dt} = T_{e(pu)} + T_{mech(pu)} - T_{damp(pu)} \quad (4.6)$$

$$\frac{d\delta_c}{dt} = \omega_r - \omega_c \quad (4.7)$$

- สมการของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Excitation System Equations)[23]

$$\dot{V}_s = \left(\frac{K_F}{\tau_F}\right) \dot{E}_{FD} - \left(\frac{1}{\tau_F}\right) V_s \quad (4.8)$$

$$\dot{E}_{FD} = \left(\frac{1}{\tau_E}\right) V_R - \left[\frac{S_E + K_E}{\tau_E}\right] E_{FD} \quad (4.9)$$

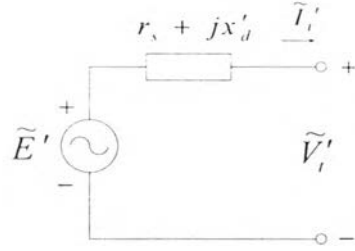
$$\dot{V}_R = \left(\frac{K_A}{\tau_A}\right) (V_{ref} - V_t - V_s) - \left(\frac{1}{\tau_A}\right) V_R, \quad V_R < V_{R\_MAX}, V_R > V_{R\_MIN} \quad (4.10)$$

$$S_E = A_{EX} \cdot e^{B_{EX} \times E_{FD}} \quad (4.11)$$

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เราเรียกว่า voltage behind reactance จะถูกแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยการละเลยผลของซาเลียนซ์ชั่วคราว(Transient Saliency) ทำให้ได้ว่า  $x'_d = x'_q$  และมีสมการในส่วนของสเตเตอร์ คือ

$$v'_q - jv'_d = -(r_s + jx'_d)(i'_q - ji'_d) + (E'_q - jE'_d) \quad (4.12)$$

$$v'_q - jv'_d = \tilde{V}', \quad i'_q - ji'_d = \tilde{I}', \quad E'_q - jE'_d = \tilde{E}' \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของ voltage behind a transient impedance

### 4.3 แบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าทุกระบบในที่นี้ ที่นำมาใช้ในการจำลองเหตุการณ์ของการรบกวนขนาดใหญ่ที่ภาวะชั่วครู่ นั้นถูกนำเสนอให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิต ในรูปแบบดังนี้คือ

$$\tilde{I} = \tilde{Y} * \tilde{E} \quad (4.14)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} i'_{Q1} - ji'_{D1} \\ i'_{Q2} - ji'_{D2} \\ \vdots \\ i'_{Qn} - ji'_{Dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \ddots & & Y_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E'_{Q1} - jE'_{D1} \\ E'_{Q2} - jE'_{D2} \\ \vdots \\ E'_{Qn} - jE'_{Dn} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

โดยที่  $\tilde{E}' = E'_Q - jE'_D = (E'_q - jE'_d)e^{j\delta_m}$ ,  $\tilde{I}' = i'_Q - ji'_D = (i'_q - ji'_d)e^{j\delta_m}$  (4.16)

และ  $\delta_m =$  มุมภายใน (internal angle)

เมื่อตัวห้อย D และ Q ในสมการที่ (4.15) แทนค่าในแกนจริงและค่าจินตภาพ ส่วนตัวห้อย d และ q ในสมการที่ (4.16) แทนค่าในแกนของ D และ Q หรือ โครงร่าง d-q (d-q Reference frame)

นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโหลดคงที่ยังสามารถคำนวณได้จากสมการที่(4.17) และซัพเซบแดนซ์โหลดที่คำนวณได้มานี้ได้ถูกนำไปรวมกับโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว นั่น คือ เมตริกซ์ Y

$$\bar{Y}_{L_i} = P_{L_i} / V_{L_i}^2 - j(Q_{L_i} / V_{L_i}^2) \quad (4.17)$$

เมื่อ  $P_{L_i}$  คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่โหนดบัสในกรณีฐาน (p.u)

$Q_{L_i}$  คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่โหนดบัสในกรณีฐาน (p.u)

$V_{L_i}$  คือ ขนาดของแรงดันที่โหนดบัสในกรณีฐาน (p.u)

เมื่อนำระบบผลิต และส่งกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปที่มีสมการดัง (4.14) มาพิจารณาแล้วพบว่า อินพุตที่จะจ่ายให้แก่ระบบนั้นมีเพียงแบบเดียว คือ ต้องจ่ายเป็นแรงดันเท่านั้น เพราะฉะนั้นอุปกรณ์ทุกตัวที่จะนำมาต่อใช้งานร่วมกับระบบแบบนี้จึงต้องมีเอาต์พุตเป็นสมการของแรงดันด้วยจึงจะมีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมต่อ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการดัดแปลงสมการที่(4.14) ใหม่ทำให้มีความยืดหยุ่นในการที่ระบบจะสามารถรับทั้งอินพุตที่เป็นกระแส หรือ แรงดันก็ได้ ส่วนในทางด้านของเอาต์พุตนั้นก็จะให้ออกมาในรูปแบบกระแส หรือ แรงดันเช่นเดียวกันตามสมการที่ (4.18) โดยที่เมตริกซ์  $H_{mod}$  นี้จะถูกรเรียกว่า เมตริกซ์ลูกผสม(Hybrid Matrix) และตัวอย่างการดัดแปลงสมการที่ (4.14) ตามวิธีดังกล่าวได้ถูกแสดงไว้ดังสมการที่ (4.19)

$$\begin{bmatrix} i'_{Q1} - ji'_{D1} \\ E'_{Q2} - jE'_{D2} \\ \vdots \\ i'_{Qn} - ji'_{Dn} \end{bmatrix} = [H_{mod}] * \begin{bmatrix} E'_{Q1} - jE'_{D1} \\ i'_{Q2} - ji'_{D2} \\ \vdots \\ E'_{Qn} - jE'_{Dn} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

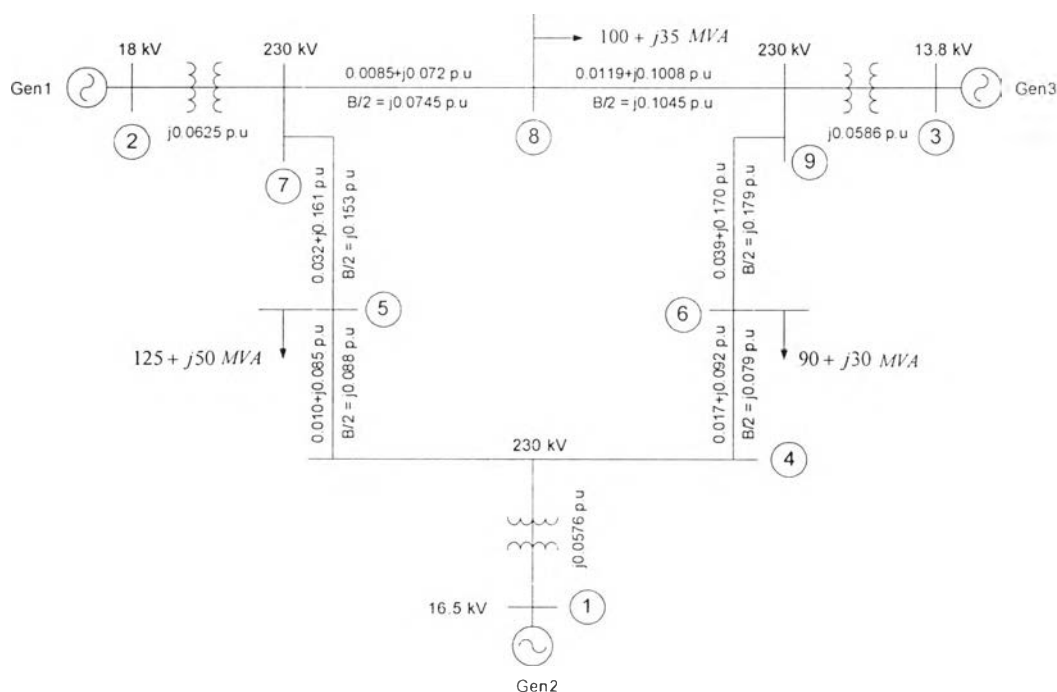
$$\begin{bmatrix} i'_{Q1} - ji'_{D1} \\ i'_{Q2} - ji'_{D2} \\ i'_{Q3} - ji'_{D3} \\ E'_{Q4} - jE'_{D4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} - \frac{Y_{14}Y_{41}}{Y_{44}} & Y_{12} - \frac{Y_{14}Y_{42}}{Y_{44}} & Y_{13} - \frac{Y_{14}Y_{43}}{Y_{44}} & \frac{Y_{14}}{Y_{44}} \\ Y_{21} - \frac{Y_{24}Y_{41}}{Y_{44}} & Y_{22} - \frac{Y_{24}Y_{42}}{Y_{44}} & Y_{23} - \frac{Y_{24}Y_{43}}{Y_{44}} & \frac{Y_{24}}{Y_{44}} \\ Y_{31} - \frac{Y_{34}Y_{41}}{Y_{44}} & Y_{32} - \frac{Y_{34}Y_{42}}{Y_{44}} & Y_{33} - \frac{Y_{34}Y_{43}}{Y_{44}} & \frac{Y_{34}}{Y_{44}} \\ \frac{Y_{41}}{Y_{44}} & \frac{Y_{42}}{Y_{44}} & \frac{Y_{43}}{Y_{44}} & \frac{1}{Y_{44}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E'_{Q1} - jE'_{D1} \\ E'_{Q2} - jE'_{D2} \\ E'_{Q3} - jE'_{D3} \\ i'_{Q4} - ji'_{D4} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

จากสมการที่(4.19) เป็นตัวอย่างของการหาค่าคงที่ในตำแหน่งต่างของเมตริกซ์  $H_{mod}$  ที่มีจำนวนบัสเท่ากับ 4 บัสจะเห็นได้ว่าตำแหน่งบัสที่ 4 นั้นจากแรงดันที่เป็นอินพุตให้กับสมการจะถูกเปลี่ยนเป็นอินพุตที่เป็นกระแส

#### 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองภาวะชั่วคราวของระบบผลิต และส่งกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากข้อมูลของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ที่ได้มาจาก[18] เป็นข้อมูลแบบไม่เป็นทางการ และยังไม่ถูกต้องที่สุด ดังนั้นการที่จะตรวจสอบว่าแบบจำลองของระบบโดยรวม(Overall System)ทั้งหมดนี้ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับระบบของจริง หรือไม่ ในเบื้องต้นจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบที่มีข้อมูลที่ถูกต้องมาตรวจสอบดังนั้นจึงนำเสนอระบบ WSCC(Western System Coordinating Council) 9 บัสจาก [17] เป็นระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลง 3 ตัว โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ 1 มีขนาด 270 MVA, ตัวที่ 2 มีขนาด 192 MVA, ตัวที่ 3 มีขนาด 125 MVA และมีสายส่งจำนวน 6 เส้น แรงดันของระบบขนาด 230 kV ความสามารถในการผลิตกำลังรวมเท่ากับ 498.95 MW กับโหลดรวมของระบบเท่ากับ 315 MW โดยมีลักษณะโครงสร้างของระบบ ดังรูปที่ 4.3

โดยที่การตรวจสอบความถูกต้องนั้นจะนำผลตอบสนองทางเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตลอดจนค่าแรงดัน และมุมเฟส ที่บัสต่าง ๆ ในภาวะอยู่ตัวที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์เชิงพลวัต มาตรวจสอบกับผลของค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีดังกล่าวที่ภาวะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบ 9 บัสกับค่าพารามิเตอร์ของสายส่งบนฐาน 100-MVA

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ 9 บัสบนฐาน 100 MVA ที่ยังไม่ได้รวมค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#	ชนิดบัส	ค่าแรงดัน (p.u)	$P_G$ (p.u)	$Q_G$ (p.u)	$P_L$ (p.u)	$Q_L$ (p.u)
1	(swing)	1.04	0.716	0.27	-	-
2	(P-V)	1.025 $\angle$ 9.279°	1.63	0.0665	-	-
3	(P-V)	1.025 $\angle$ 4.664°	0.85	-0.1086	-	-
4	(P-Q)	1.026 $\angle$ - 2.217°	-	-	-	-
5	(“)	0.996 $\angle$ - 3.989°	-	-	1.25	0.5
6	(“)	1.013 $\angle$ - 3.688°	-	-	0.9	0.3
7	(“)	1.026 $\angle$ 3.719°	-	-	-	-
8	(“)	1.016 $\angle$ 0.727°	-	-	1.00	0.35
9	(“)	1.032 $\angle$ 1.966°	-	-	-	-

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ 9 บัสบนฐาน 100 MVA ที่รวมค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#	ชนิดบัส	ค่าแรงดัน (p.u)	$P_G$ (p.u)	$Q_G$ (p.u)	$P_L$ (p.u)	$Q_L$ (p.u)
1	(swing)	1.067 $\angle$ 3.501°	0.7168	0.3219	-	-
2	(P-V)	1.053 $\angle$ 19.792°	1.6334	0.3726	-	-
3	(P-V)	1.020 $\angle$ 11.185°	0.8522	-0.113	-	-
4	(P-Q)	1.026 $\angle$ - 2.217°	-	-	-	-
5	(“)	0.996 $\angle$ - 3.989°	-	-	1.25	0.5
6	(“)	1.013 $\angle$ - 3.688°	-	-	0.9	0.3
7	(“)	1.026 $\angle$ 3.719°	-	-	-	-
8	(“)	1.016 $\angle$ 0.727°	-	-	1.00	0.35
9	(“)	1.032 $\angle$ 1.966°	-	-	-	-

เมื่อทำวิเคราะห์การไหลการรันโปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะได้ค่าต่างๆ ที่กรณีฐานดังตารางที่ 4.1 โดยจุดทำงานที่คำนวณได้จะยังไม่รวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปด้วย และจุดทำงานที่ได้มานี้จะนำไปใช้เพื่อคำนวณหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะได้ว่าค่าแรงดันหลังอิมพีแดนซ์ที่จุดทำงานนี้มีค่าดังตารางที่ 4.2 ที่มีค่า  $E'_{Q1} - jE'_{D1} = 1.067 \angle 3.501^\circ \text{ p.u.}$  ,  $E'_{Q2} - jE'_{D2} = 1.053 \angle 19.792^\circ \text{ p.u.}$ ,  $E'_{Q3} - jE'_{D3} = 1.02 \angle 11.185^\circ \text{ p.u.}$  โดยที่ค่าเหล่านี้จะใช้เป็นค่าที่คำนวณหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ และจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ

รูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการทดสอบระบบ 9 บัสนี้จะกำหนดให้บัสนี้ 1 เป็นสวิงบัสน์ และอีกสองตัวที่ต่ออยู่ที่บัสน์ 2 และ 3 ตามลำดับจะแทนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดในตอนต้น โดยการกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสามตัวเป็นไปตามแบบจำลองที่กำหนดทั้งหมดเลยก็สามารถทำได้ แต่ในการทดสอบนี้ไม่ได้ทำเนื่องจากว่าเมื่อใส่เข้าไปพร้อมกันแล้วจะทำให้ระบบขาดความมีเสถียรภาพเพราะเนื่องจากระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวนั้นมีระดับการรักษาระดับแรงดันอยู่ในระดับที่สูงมากจึงทำให้มีการแกว่งของสัญญาณทางไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบตลอดเวลาซึ่งรายละเอียดดูกระบวนวิธีใน[8] และเหตุผลนอกจากนี้ก็ยังมีความเสี่ยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ยังไม่มีตัวควบคุมเสถียรภาพ(Power System Stabilizer, PSS) นั้นเอง

#### 4.4.1 การคำนวณหาจุดทำงาน และค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของระบบ 9 บัสน์

การคำนวณหาจุดทำงาน และตัวแปรสถานะเริ่มต้นของระบบที่วิเคราะห์ในเชิงพลวัตจะคำนวณหาได้เฉพาะกับแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบเชิงพลวัต หรือพูดอีกในหนึ่งคือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร(State Derivative Equation) เพราะฉะนั้นแบบจำลองที่นำเสนอไว้ข้างต้นที่เป็นแบบเชิงพลวัตก็ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนแบบจำลองของโครงข่ายระบบ 9 บัสน์เป็นแบบจำลองในภาวะอยู่ตัวเท่านั้น โดยแบบจำลองของโครงข่ายในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เป็นแบบจำลองเชิงพลวัต ในที่นี้จะไม่ได้นำมาใช้แต่จะมีการกล่าวถึงไว้ใน[24]

แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในโดเมนของเวลาถูกแทนด้วยสมการทั่วไปดังสมการที่ (4.20) และสมการที่ (4.21) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \tag{4.20}$$



หรือ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad 0 = g(x, y) \quad (4.21)$$

เมื่อ  $x = [E'_{q1}, E'_{d2} \dots E'_{qi}, E'_{di}, \omega_1 \dots \omega_i, \delta_1 \dots \delta_i, v_R \dots v_{Ri}, v_S \dots v_{Si}, E'_{fd} \dots E'_{fdi}]$   
 $i = 1, 2, 3, \dots$ , จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

และ

$$x(0) = [E'_{q1}(0), E'_{d2}(0) \dots E'_{qi}(0), E'_{di}(0), \Delta\omega_1(0) \dots \Delta\omega_i(0), \delta_1(0) \dots \delta_i(0), \dots, v_R(0) \dots v_{Ri}(0), v_S(0) \dots v_{Si}(0), E'_{fd}(0) \dots E'_{fdi}(0)]$$

เมื่อได้ค่ากระแส และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 4.2 จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วก็จะนำไปคำนวณหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างานนี้

- โครงร่างอ้างอิงบนเสตเตอร์ (Stator reference frame)

$$I'_{te} = \left( \frac{S_{te}}{V'_{te}} \right) \quad (4.22)$$

$$\tilde{E}'_{qc} = \tilde{V}'_t + (r_S + jx_q) \tilde{I}'_t \quad (4.23)$$

$$\delta_m = \angle \tilde{E}'_{qc} \quad (4.24)$$

- โครงร่างอ้างอิงบนโรเตอร์ (Rotor reference frame)

เมื่อ  $x'_d = x'_q$

$$V'_{qr} = |V'_t| \cos(\delta_m), \quad V'_{dr} = |-V'_t| \sin(\delta_m) \quad (4.25)$$

$$I'_{qr} = |I'_t| \cos(\delta_m), \quad I'_{dr} = |-I'_t| \sin(\delta_m) \quad (4.26)$$

$$E'_{qr}(0) = V'_{qr} + x'_d I'_{dr} + r_S I'_{qr}, \quad E'_{dr}(0) = V'_{dr} + x'_d I'_{dr} + r_S I'_{dr} \quad (4.27)$$

$$\delta_r(0) = \delta_m, \quad \Delta\omega(0) = \omega_r - \omega_c = 0 \quad (4.28)$$

เมื่อตัวห้อย r แทนค่าตัวแปรที่อ้างอิงบนโครงร่างเสตเตอร์ และตัวห้อย c แทนค่าตัวแปรที่อ้างอิงบนโครงร่างโรเตอร์ และค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหาได้ดังนี้

$$E_{fd}(0) = E'_{qr} + (x_d - x'_d)I_{dr} \quad (4.29)$$

$$V_R(0) = (K_E + A_{cs} e^{B_{cs} E_{fd}(0)}) E_{fd}(0) \quad (4.30)$$

$$V_S(0) = \frac{E_{fd}(0) \cdot K_F}{T_F(0)} \quad (4.31)$$

เมื่อคำนวณค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะแล้วก็มาทำการคำนวณค่าจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือในที่นี้ก็คือ ค่าอินพุตอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ

$$u = [T_{mech\_1} \dots T_{mech\_i}, v_{ref\_1} \dots v_{ref\_i}] \quad (4.32)$$

$$S_{ir} = (V_{qr} - jV_{dr}) \cdot (I_{qr} - jI_{dr})^* \quad (4.33)$$

$$T_{mech} = \text{Re}\{S_{ir}\} \quad (4.34)$$

เมื่อระบบกระตุ้นเป็นแบบแรงดันกระแสตรง(DC regulated) จะได้ว่า

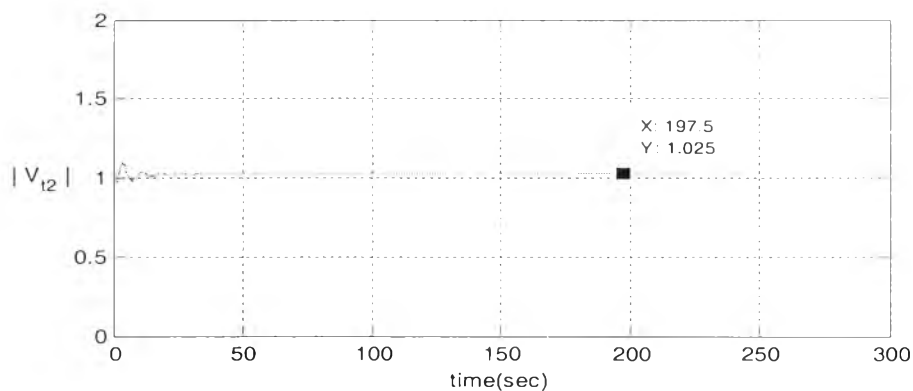
$$v_{ref} = E_{fd}(0) \quad (4.35)$$

แต่ถ้าระบบกระตุ้นเป็นแบบแรงดันกระแสตรง(AC regulated) จะได้ว่า

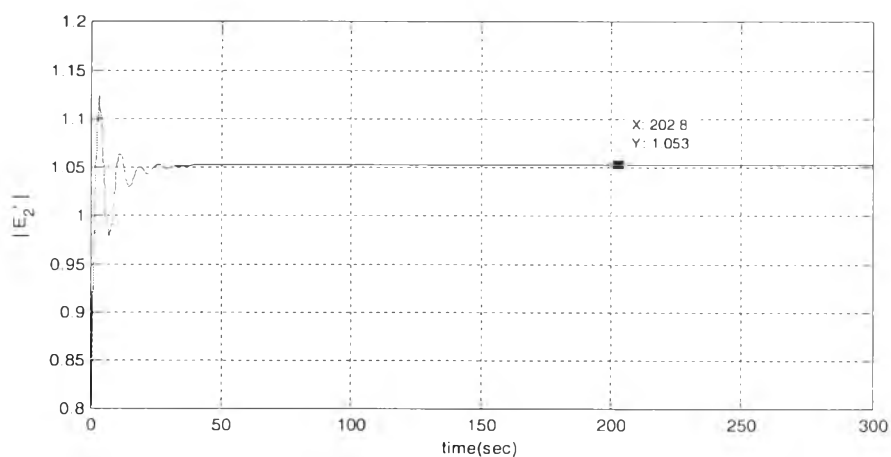
$$v_{ref} = |V'_t| + V_S(0) + \frac{V_R(0)}{K_A} \quad (4.36)$$

#### 4.4.2 ผลตอบสนองที่ภาวะชั่วคราวของระบบ 9 บัส

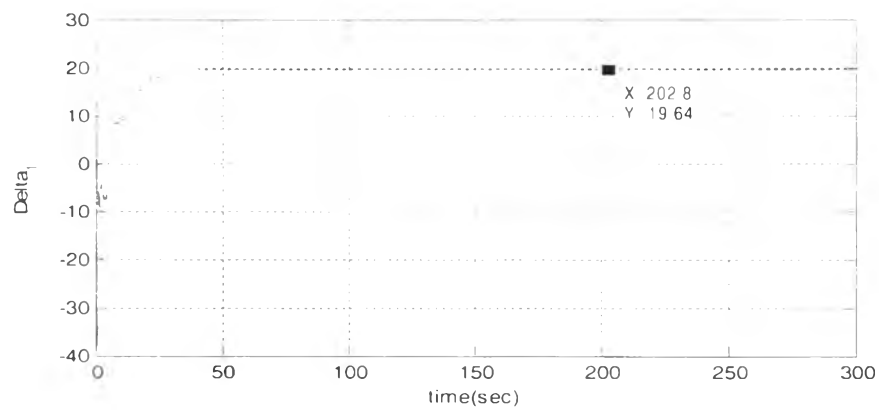
เมื่อกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ จากสมการที่(4.22-4.36) ที่เป็นค่าต่อหน่วยบนค่าฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว และมีการจำลองเหตุการณ์เชิงพลวัตของระบบ WSCC 9 บัสที่ไม่มี การรบกวนขนาดใหญ่เกิดขึ้นในระบบ ผลการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองตัว จะเป็นไปตามรูปที่ 4.4 – 4.13



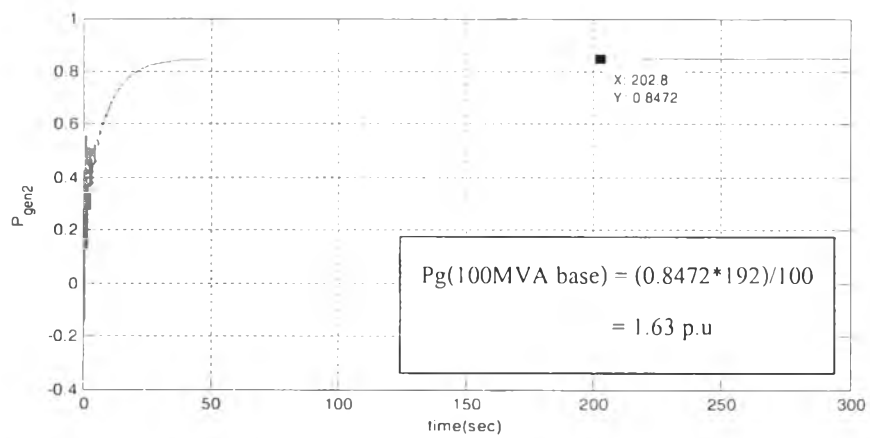
รูปที่ 4.4 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2



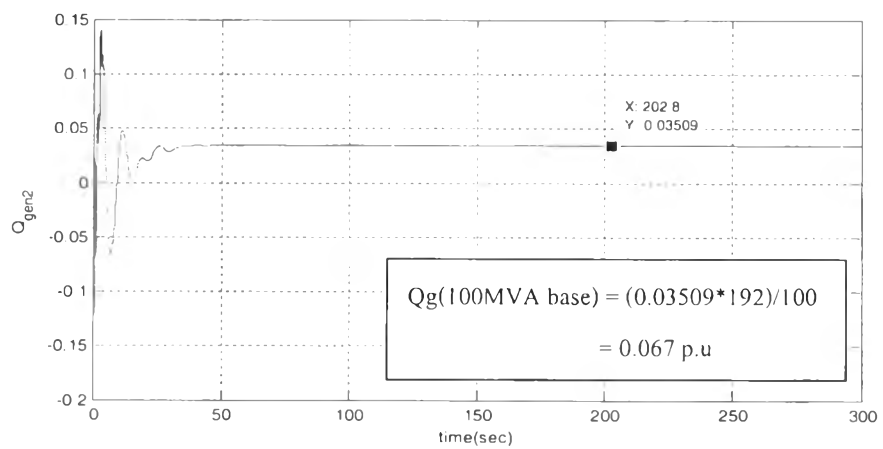
รูปที่ 4.5 แรงดันหลังอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2



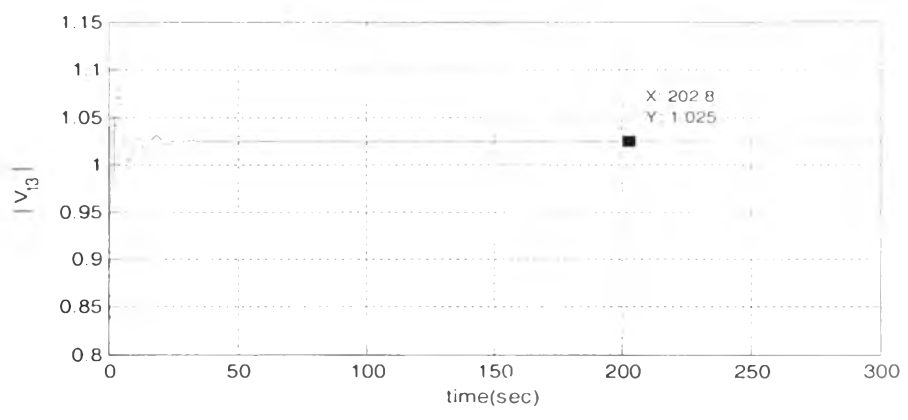
รูปที่ 4.6 ค่ามุมโรเตอร์ทางไฟฟ้าของแรงดันหลังอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2



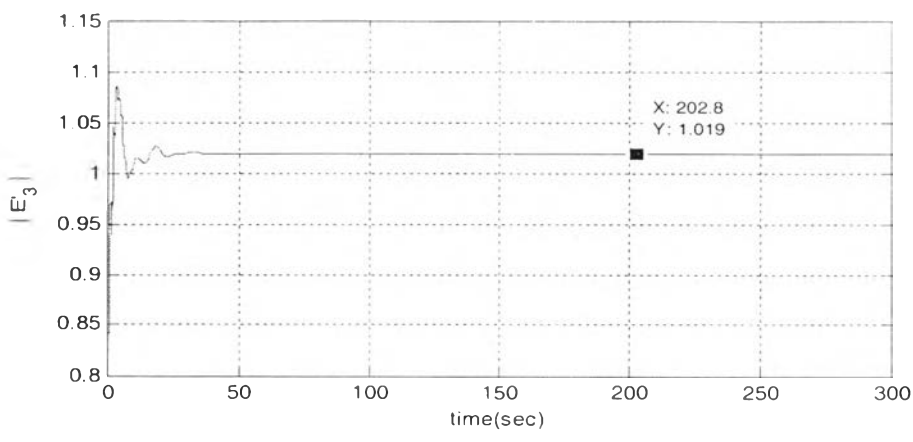
รูปที่ 4.7 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2



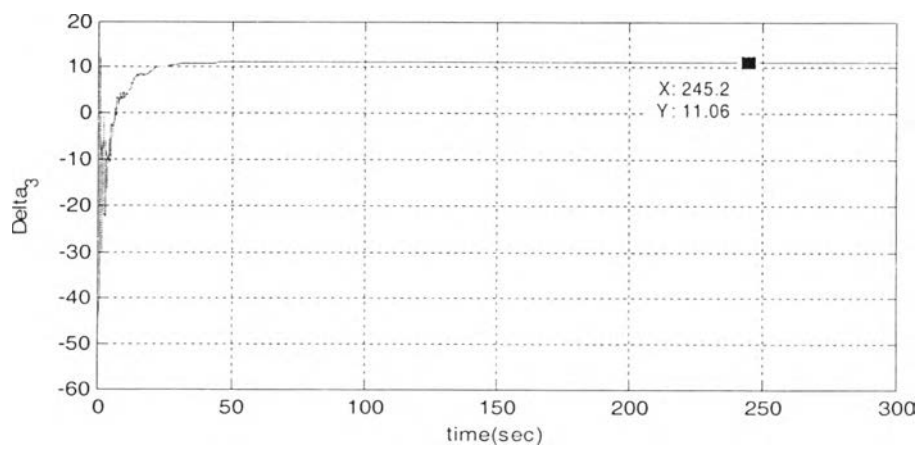
รูปที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2



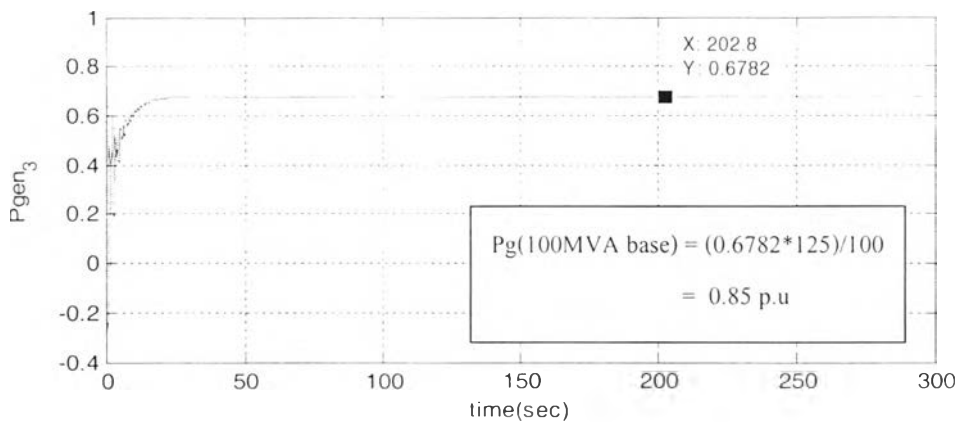
รูปที่ 4.9 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3



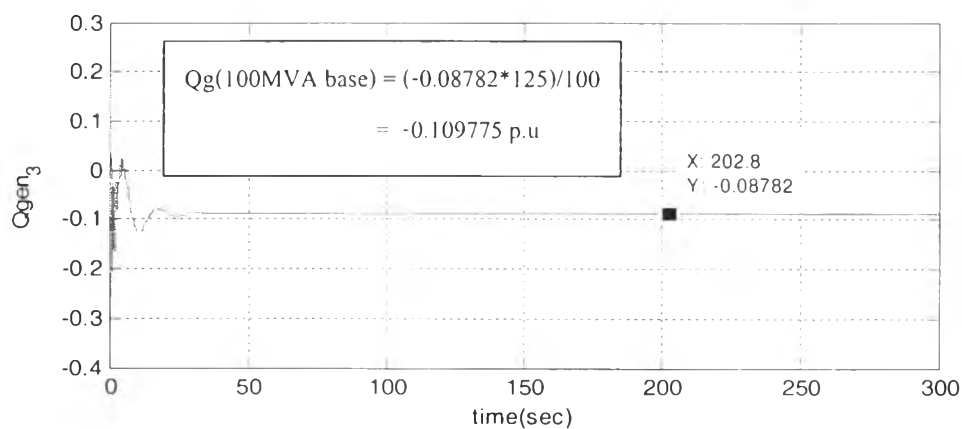
รูปที่ 4.10 แรงดันหลังอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3



รูปที่ 4.11 ค่ามุมโรเตอร์ทางไฟฟ้าของแรงดันหลังอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3



รูปที่ 4.12 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3

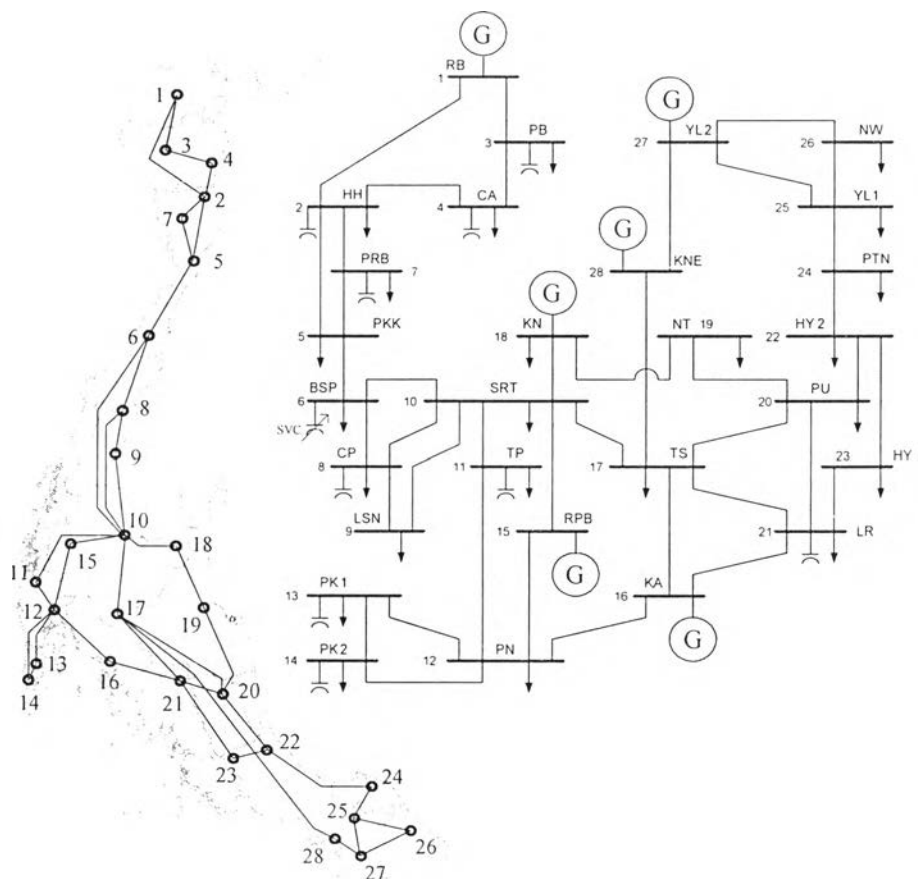


รูปที่ 4.13 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3

เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ 2 และ 3 ที่ภาวะอยู่ตัวจาก รูปที่ 4.4-4.13 กับตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ค่าไม่เท่ากันพอดีและที่สังเกตเห็นว่ามีการแกว่งของสัญญาณตอนเริ่มต้นด้วย เพราะเนื่องมาจากการใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการละเลยผลของชาเลนจ์ชั่วคราว และอีกประเด็นที่สำคัญที่มีผลอย่างมากในการจำลองเหตุการณ์เชิงพลวัต คือวิธีการในแก้สมการหาคำตอบของสมการที่ 4.21 โดยรายละเอียดจะอยู่ใน [11] และ [16] และทั้งหมดนี้จึงเป็นข้อสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้มีความถูกต้องในระดับที่สามารถยอมรับได้ แต่จะไม่เหมือนกับแบบจำลองที่เป็นของจริงที่มีการพิจารณาถึงเรื่องของผลตอบสนองในภาวะชั่วคราวย่อย (Subtransient) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

#### 4.5 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย

ระบบทดสอบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นระบบเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ [18] หรือใช้ชื่อย่อว่า CS-NW มีข้อมูลของระบบ คือ บัสเชื่อมต่อจำนวน 28 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 6 ตัว หม้อแปลงจำนวน 6 ลูก สายส่งจำนวน 40 เส้น ค่าแรงดันพิกัด คือ 230 kV และ 115 kV โดยระบบนี้ลดจำนวนบัสดลงจากระบบจริงที่มีบัสเชื่อมต่อ 52 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 9 ตัว สายส่งจำนวน 112 เส้น แผนภาพเส้นเดียว(Single line diagram) ของระบบดังกล่าวได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.3 แสดงถึงข้อมูลของกำลังการผลิตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่บัสต่างๆ ในระบบที่มีการเดินเครื่องใช้งานในกรณีฐาน(Base Case) [18] SVC ติดตั้งอยู่บน บัสที่ 6 หรือ บัสบางสะพาน โดยมีข้อมูลของ SVC แสดงอยู่ในตารางที่ 4.4 ส่วน โหลดรวมตลอดจนค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง และการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ก)



รูปที่ 4.14 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้แบบลดจำนวนบัส และสายส่ง [18]

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตำแหน่งในระบบ[18]

บัส	รหัส	ขนาดกำลังการผลิต	ชนิดของบัส
1	RB	1635 MW	Infinite
15	RPB	240 MW	GEN
16	KA	300 MW	GEN
18	KN	824 MW	GEN
27	YL2	72 MW	GEN
28	KNE	300 MW	HVDC

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของอุปกรณ์ SVC ที่ต่อกับระบบ[18]

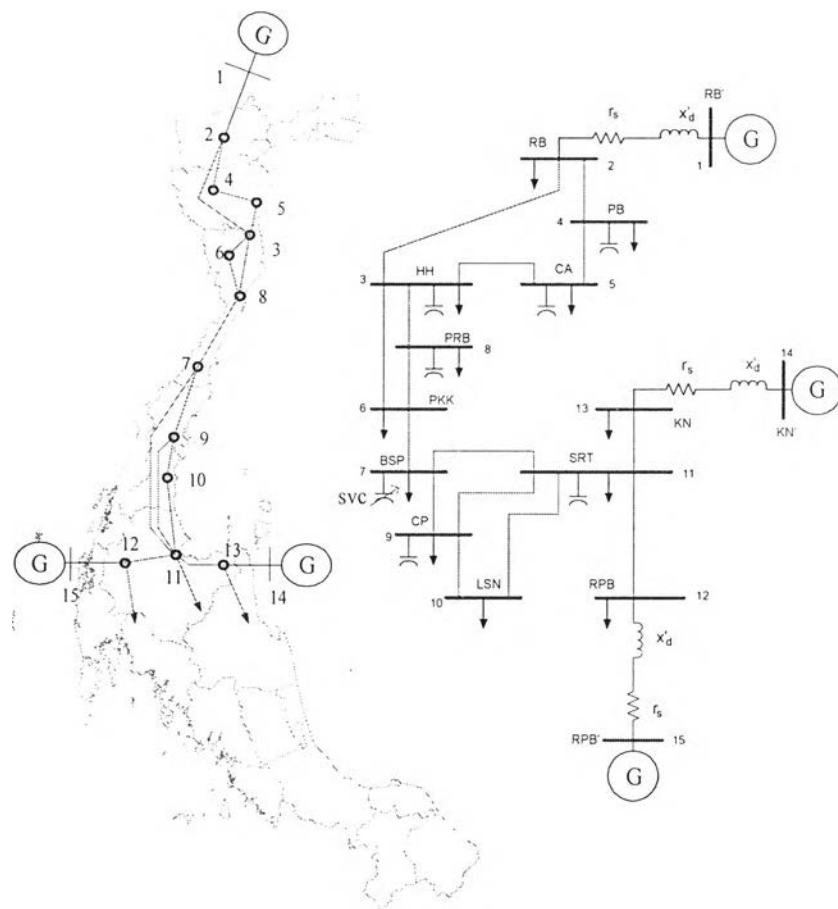
บัส	อุปกรณ์	Type
ลำดับที่	ลำดับที่	
6 (SVC)	1	TCR1 : 150 MVAR 16 KV
	2	TSC1 : 100 MVAR 16 KV
	3	TSC2 : 100 MVAR 16 KV
	4	FC1 : 100 MVAR
	5	Tr : YndI 3x100 MVA 230/16 KV

แบบจำลองที่ใช้งานจริงใน MATLAB Simulink ของการศึกษา และออกแบบการควบคุมเชิงพลวัตของ SVC ที่ติดตั้งที่บัสบางสะพานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพที่ภาวะชั่วคราวให้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ระบบจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนด้านบนจะให้มีโครงสร้างตามปกติ และด้านล่างจะมีลักษณะเหมือนเป็นการรวมโหลด และให้โหลดเหล่านี้เป็นโหลดค่าคงที่ตัวหนึ่ง

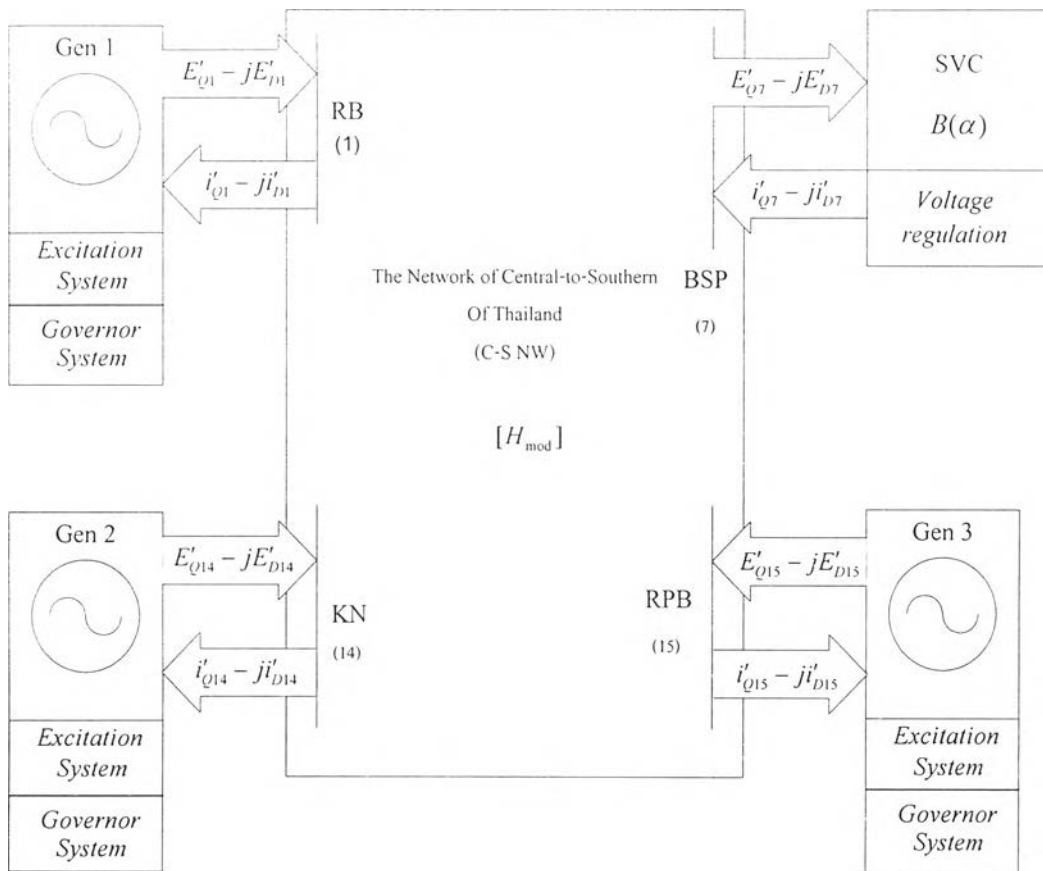
เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการศึกษาถึงผลตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ และที่มีการติดตั้งอยู่ใกล้กับสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ซึ่งมีผลต่อการจ่ายโหลดบริเวณภาคใต้เมื่อมีการรบกวนขนาดใหญ่เกิดขึ้น และการมี SVC นั้นสามารถช่วยให้ระบบเชื่อมโยงระหว่างสองพื้นที่ที่มีสมรรถนะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างกันในแต่ละทิศทางแบบใด ดังนั้นจึงได้จัดองค์ประกอบของระบบใหม่เป็นไปดังรูปที่ 4.15 เพื่อลดความซับซ้อนของระบบลง และข้อดีอีกอย่างหนึ่งในการทำเช่นนี้ คือ สามารถเชื่อมต่อกับแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบบริเวณด้านล่างซึ่งมี HVDC และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหลือติดตั้งอยู่ได้โดยสะดวกผ่านทางเงื่อนไขของเทอร์มินัลเชื่อมโยง



ตามรูปที่ 4.15 กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในแบบจำลอง 3 ที่ด้วยกัน คือ โรงไฟฟ้าราชบุรี โรงไฟฟ้าเขื่อนรัชชประภา และโรงไฟฟ้าขนอม โดยจะกำหนดให้บัสของโรงไฟฟ้าราชบุรีเป็นสวิงบัส สามารถที่จะจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากสมดุลของกำลังการผลิตและโหลดบริเวณภาคใต้ได้ เมื่อนำระบบภาคใต้ไปจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink แล้วจะมีโครงสร้างการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.16 โดยในรูปแบบนี้  $RB'$ ,  $KN'$ ,  $RPB'$  เป็นขั้วจุดต่อภายในของแรงดันหลังอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกรวมเข้าด้วยกัน (Lumped Generator) ในแต่ละโรงไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 แบบจำลองของระบบทดสอบ C-S NW ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.16 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน