

การศึกษาออสซิลเลชันและการหน่วงของออสซิลเลชันของระบบ ไฟฟ้ากำลัง  
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น

9.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ มีลักษณะดังรูปที่ 9.1 ระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่อง จำนวนบัสทั้งหมดมี 10 บัส โดยมีบัสที่ 1 เป็นอินฟินิตบัส ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 9.1 ข้อมูลเกี่ยวกับสายส่งทั้งหมดมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 9.2 ข้อมูลเกี่ยวกับหม้อแปลงมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 9.3 ตารางที่ 9.4 เป็นข้อมูลต่าง ๆ ของบัสแต่ละบัส ข้อมูลของระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 9.5 ระบบเอกไซเตชันทั้งหมดเป็นระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 1 (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 5) เงื่อนไขโหลดโพล้วตาม que ที่แสดงในตารางที่ 9.4 เป็นเงื่อนไขที่จุดทำงาน (operating point) จุดหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ เงื่อนไขดังกล่าวได้รับการกำหนดให้เป็นเบสเคส (base case) ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ในการศึกษาออสซิลเลชันและการหน่วงของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าว ตัวแปรของระบบไฟฟ้ากำลังได้รับการประมาณค่ารอบจุดทำงานข้างต้น เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 5 เครื่อง ดังนั้น ค่าไอเกินซึ่งสัมพันธ์กับออสซิลเลชันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงมีทั้งหมด 5 ค่าด้วยกัน<sup>[3]</sup> เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา หาค่าไอเกินดังกล่าว ได้คำตอบตามที่ได้แสดงในตารางที่ 9.6 จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ค่าไอเกินซึ่งสัมพันธ์กับออสซิลเลชันในโหมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด มีค่าของส่วนจริงเป็นค่าบวก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบขาดเสถียรภาพเชิงไดนามิกที่จุดทำงานเบสเคส ตัวอย่างของคำตอบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น ในแต่ละวงรอบของการค้นหาค่าของค่าไอเกิน มีลักษณะตามที่แสดงในตารางที่ 9.7 ตารางที่ 9.8 เป็นเฟสเซอร์ของความถี่เบี่ยงเบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ภายหลังจากการค้นหาค่าของค่าไอเกิน ประสบผลสำเร็จ

การตรวจสอบว่า ออสซิลเลชันในแต่ละโหมดนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดมีส่วนร่วมกับออสซิลเลชันมากที่สุด ตรวจสอบได้จากลักษณะโหมด (mode shape) ซึ่งก็คือเวกเตอร์ของส่วนจริงของเฟสเซอร์เชิงซ้อน ของความถี่เบี่ยงเบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลัง<sup>[3]</sup> ลักษณะโหมด ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ในแต่ละโหมดของ

ออสซิลเลชัน มีลักษณะตามที่แสดงในตารางที่ 9.9 จากตารางที่ 9.9 จะเห็นได้ว่าออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุดนั้น (สัญญาณโมดที่ 1) ค่าของสมาชิกของสัญญาณโมด มีเครื่องหมายเหมือนกันหมด ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ในโมดดังกล่าว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องสวิตช์ไปด้วยกัน<sup>[3]</sup> เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 (บัสที่ 6) มีส่วนร่วมในออสซิลเลชันมากที่สุด เพราะค่าของความเร็วเบี่ยงเบนของมันมีค่ามากที่สุด ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 จึงมีส่วนทำให้เกิดออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด มากที่สุด

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ไม่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (automatic voltage regulator) ค่าไอเกินซึ่งสมนัยกับออสซิลเลชันในโมดต่าง ๆ มีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 9.10 จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ส่วนจริงของค่าไอเกินทุกค่ามีค่าเป็นลบ รวมทั้งค่าไอเกินซึ่งสมนัยกับออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุดด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบไม่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ มันจะมีเสถียรภาพเชิงไดนามิกที่จุดทำงานในกรณีฐาน และชี้ให้เห็นว่า อุปกรณ์คงค่าแรงดันอัตโนมัติมีส่วนทำให้เสถียรภาพเชิงไดนามิกของระบบไฟฟ้ากำลัง ลดลง

## 9.2 ผลของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่มีต่อเสถียรภาพเชิงไดนามิกของระบบไฟฟ้ากำลัง

ดังได้กล่าวแล้วว่า จากการตรวจสอบสัญญาณโมดตามที่แสดงในตารางที่ 9.9 พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับบัสที่ 6 มีส่วนร่วมในออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด มากที่สุด เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 มีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันในโมดดังกล่าวมากน้อยแค่ไหน รวมทั้งเพื่อเป็นการทดสอบว่า การจัดคอมบิเนชัน (combination) ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ มีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้าในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด อย่างไรบ้าง จึงได้ทำการจัดคอมบิเนชันของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ เพื่อการทดสอบ ตามที่แสดงในตารางที่ 9.10 การจัดคอมบิเนชันดังกล่าว เริ่มตั้งแต่แบบแรกซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องต่างก็มีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ จนถึงแบบสุดท้ายซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องต่างก็ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ ค่าของค่าไอเกินที่สมนัยกับออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุดในแต่ละคอมบิเนชัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 9.10 ด้วยเช่นกัน จากตารางที่ 9.10 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 มีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด มากที่สุด

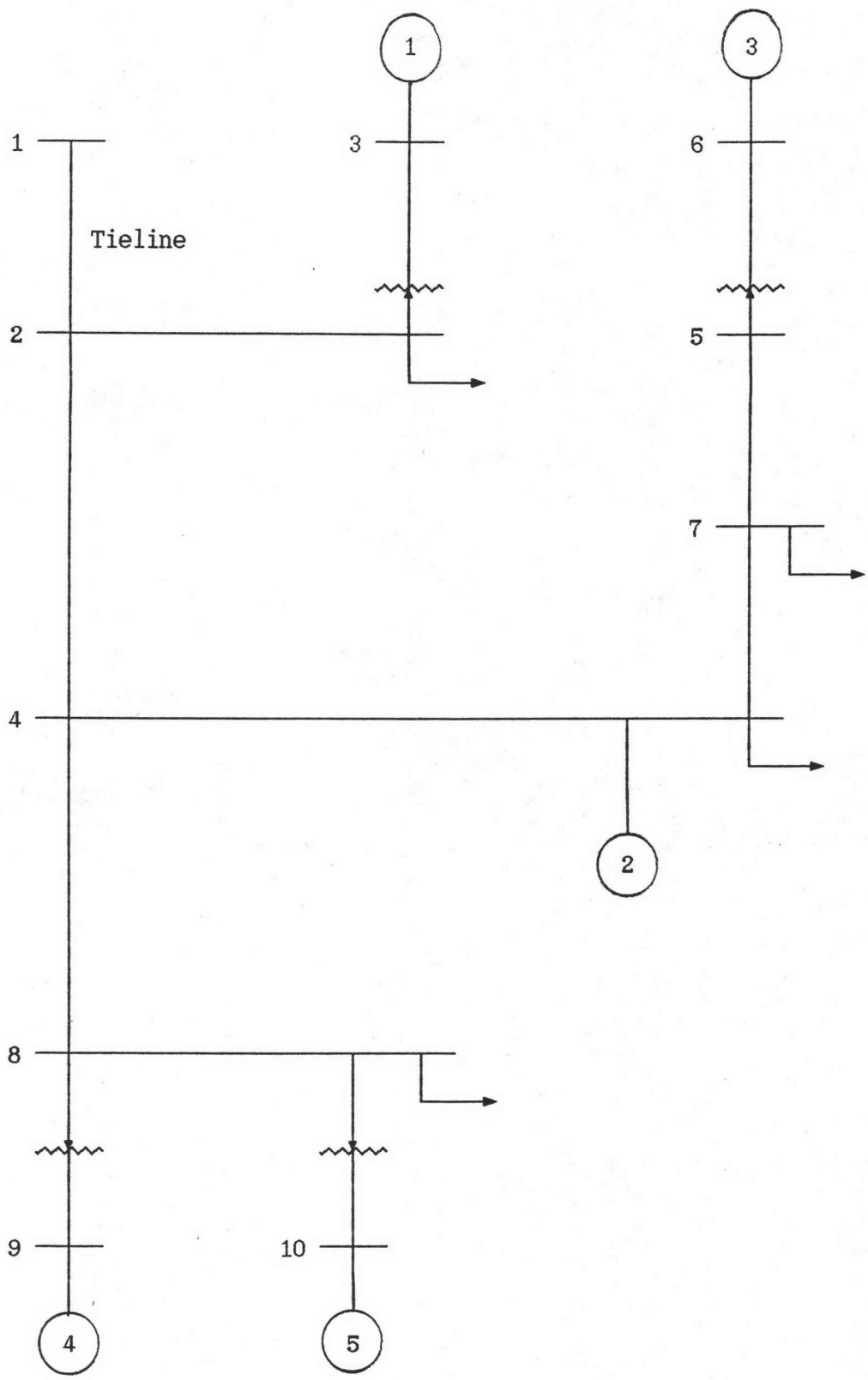
สุด ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ (PSS) จึงควรเริ่มที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6

### 9.3 ผลของอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่มีต่อการหน่วงของออสซิลเลชัน ในโหมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบผลของอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่มีต่อการหน่วงของออสซิลเลชันในโหมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง ได้ทำการทดสอบโดยกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 ได้รับการกำหนดให้ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ซึ่งมีข้อมูลตามที่แสดงในตารางที่ 9.12 จากผลการทดสอบ ค่าของค่าไอเกินซึ่งสมนัยกับออสซิลเลชันในโหมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ มีค่าดังตารางที่ 9.11 จากตารางที่ 9.11 จะเห็นได้ว่าค่าของค่าไอเกินทุกค่าต่างก็มีส่วนจริงที่เป็นลบ อันเป็นการแสดงว่า อุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ ช่วยทำให้การหน่วงของออสซิลเลชันในโหมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง ดีขึ้นมาก หรืออาจกล่าวได้ว่ามันช่วยทำให้เสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลังดีขึ้นนั่นเอง

### 9.4 ผลของอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่มีต่อการหน่วง

ดังได้กล่าวแล้วว่า อุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 มีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันในโหมดที่มีความถี่ต่ำที่สุด มากที่สุด ดังนั้น การทดสอบในเรื่องของผลของอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่มีต่อการหน่วง จึงได้กระทำที่บัส 6 จากการทดสอบได้ผลตามที่แสดงในตารางที่ 9.13 จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เมื่อลดค่าของอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติลง การหน่วงก็เลวลงด้วย กล่าวคือ ส่วนจริงของค่าไอเกินที่สมนัยกับออสซิลเลชันในโหมดที่มีความถี่ต่ำที่สุด มีค่าเพิ่มขึ้น



✓ รูปที่ 9.1 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับทดสอบ

Gen. No.	1	2	3	4	5
ต่ออยู่กับบัสที่	3	4	6	9	10
Base MVA	115.000	150.000	175.000	115.000	115.000
$X_D$	1.920	1.000	1.216	1.720	1.670
$X'_D$	0.362	0.350	0.336	0.263	0.364
$X''_D$	0.298	0.250	0.306	0.202	0.228
$X_Q$	1.900	0.750	0.756	1.640	1.610
$X'_Q$	1.130	0.000	0.000	0.467	0.536
$X''_Q$	0.283	0.250	0.306	0.202	0.228
$X_L$	0.194	0.170	0.153	0.145	0.170
$R_A$	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002
$T'_{DO}$	5.690	5.000	11.500	4.120	7.800
$T''_{DO}$	0.041	0.050	0.066	0.032	0.038
$T'_{qo}$	1.500	0.000	0.000	1.475	1.388
$T''_{qo}$	0.164	0.050	0.029	0.061	0.063
H	2.700	2.000	7.400	1.600	6.100
D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 9.1 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

จากบัสที่	ไปยังบัสที่	ความต้านทาน (เปอร์ยูนิต)	รีแอกแตนซ์ (เปอร์ยูนิต)	Charging MVAR
1	2	0.04	0.30	5.00
2	4	0.04	0.20	20.00
4	7	0.04	0.20	20.00
4	8	0.02	0.10	40.00
5	7	0.04	0.20	20.00

ตารางที่ 9.2 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

บัสปฐมภูมิ	บัสทุติยภูมิ	ความต้านทาน (เปอร์ยูนิต)	รีแอกแตนซ์ (เปอร์ยูนิต)	แท็ป
2	3	0.02	0.12	1.02
5	6	0.01	0.06	1.02
8	9	0.02	0.12	1.02
8	10	0.02	0.12	1.02

ตารางที่ 9.3 ข้อมูลของหม้อแปลงขอระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

บัสลำดับที่	ชนิดของบัส	กำลังผลิต		โหลด		แรงดัน		ตัวเก็บประจุ (MVAR)
		P(MW)	Q(MW)	P(MW)	Q(MW)	ขนาด	เฟส	
1	3	1.47	5.84	0	0	1.05	0	0
2	2	0	0	100.00	25.00	1.02	-0.06	0
3	1	100.00	28.08	0	0	1.05	6.17	0
4	1	0	-4.44	100.00	25.00	1.00	0.29	0
5	2	0	0	0	0	1.05	29.61	0
6	1	150.00	22.99	0	0	1.05	34.28	0
7	2	0	0	30.00	15.00	0.99	13.48	0
8	2	0	0	200.00	50.00	1.02	-0.14	0
9	1	100.00	35.53	0	0	1.05	6.06	0
10	1	100.00	35.53	0	0	1.05	6.06	0

ตารางที่ 9.4 ข้อมูลของบัสต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

บัสที่	3	4	6	9	10
$K_A$	400	400	400	400	400
$T_A$	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02
$V_{RMAX}$	7.30	--	--	7.30	8.02
$V_{RMIN}$	-7.30	--	--	-7.30	-8.02
$K_E$	1.00	--	--	1.00	1.00
$T_E$	0.80	0.95	0.95	0.80	1.30
$E_{FDMAX}$	--	4.5	4.5	--	--
$E_{FDMIN}$	--	-4.5	-4.5	--	--
$S_1$	0.50	0.22	0.22	0.50	0.50
$S_2$	0.82	0.95	0.95	0.86	1.10
$K_F$	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
$T_F$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TYPE	1	1	1	1	1

ตารางที่ 9.5 ข้อมูลของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่บัสต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ



โมดที่	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกบังคับ	ค่าไอเกิน	
		ส่วนจริง	ส่วนจินตภาพ
1	3	0.2820	2.9740
2	5	-0.2474	5.7077
3	1	-0.8808	9.7484
4	2	-1.2352	10.7327
5	4	-1.4058	15.2664

✓ ตารางที่ 9.6 ค่าไอเกินในโมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

COMPLEX POLE SEARCH OUTPUT					
ESTIMATED EIGENVALUE			EXTERNAL TORQUE		ITER
ALPHA	BETA	HERTZ	HOIRZ	VERTI	NO.
.3484	2.9396	.4678	-.2259	-.1095	1
.2825	2.9887	.4757	.0468	-.0276	2
.2793	2.9728	.4731	.0012	.0107	3
.2824	2.9735	.4732	-.0020	-.0006	4
.2820	2.9740	.4733	.0003	-.0003	5
DRIVEN MACHINE IS ON BUS NO. 6					

✓ ตารางที่ 9.7 ตัวอย่างของคำตอบจากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละวงรอบของการค้นหาค่าของค่าไอเกิน

FINAL GENERATOR SPEEDS		
BUS	HORIZONTAL	VERTICAL
3	.002864	.000351
4	.005046	.000101
6	.010000	.000000
9	.004844	.000355
10	.005645	.000157

ตารางที่ 9.8 ตัวอย่างของความเร็วเบี่ยงเบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ซึ่งคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภายหลังจากการค้นหาค่าของค่าไอเกนในตารางที่ 9.7 ประสบผลสำเร็จแล้ว

สัณฐานโมด ที่ 1	สัณฐานโมด ที่ 2	สัณฐานโมด ที่ 3	สัณฐานโมด ที่ 4	สัณฐานโมด ที่ 5
$\begin{bmatrix} 0.2864 \\ 0.5046 \\ 1.0000 \\ 0.4844 \\ 0.5645 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3057 \\ 0.5117 \\ -0.3351 \\ 0.5710 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.8542 \\ -0.0430 \\ 0.1906 \\ -0.3271 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.6315 \\ 1.0000 \\ -0.0139 \\ 0.1176 \\ -0.1036 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.0748 \\ -0.1890 \\ -0.0101 \\ 1.0000 \\ -0.1136 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 9.9 สัณฐานโมดของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ  
ในโมดต่าง ๆ

คอมบิเนชันของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน	ค่าไอเกิน
3-4-6-9-10	0.2820 ± j2.9740
3-4-9-10	0.1632 ± j2.9246
4-9-10	0.1545 ± j2.9070
3-4-9	0.1467 ± j2.8971
3-9-10	0.0336 ± j2.8436
3-4-10	0.1650 ± j2.8701
None	-0.0971 ± j2.8119

ตารางที่ 9.10 คอมบิเนชันต่าง ๆ ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติและค่าไอเกิน  
ในโมดที่มีความถี่ต่ำสุดซึ่งสมนัยกับแต่ละคอมบิเนชัน

โมดที่	เครื่อง กำเนิดไฟฟ้า ที่ถูกบังคับ	ค่าไอเกิน	
		ส่วนจริง	ส่วนจินตภาพ
1	3	-0.3920	2.4059
2	5	-0.6396	5.5931
3	1	-0.9298	9.7511
4	2	-1.2311	10.7170
5	4	-1.4112	15.2763

ตารางที่ 9.11 ค่าไอเกินในโมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ  
ภายหลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่บัส 6

$K_1$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$L_1$	$L_2$
20	0	0	0	0	0	0.95	0.05	0	5.0	-5.0

✓ ตารางที่ 9.12 ข้อมูลของอุปกรณ์สแตบิลไลเซอร์ ที่ติดตั้งที่บัส 6

$K_A$	ค่าไอเกินในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด		ความถี่ (เฮิรตซ์)
	ส่วนจริง	ส่วนจินตภาพ	
500	0.2792	2.9779	0.4739
450	0.2805	2.9762	0.4737
400	0.2820	2.9740	0.4733
350	0.2838	2.9710	0.4729
300	0.2860	2.9670	0.4722
250	0.2885	2.9610	0.4713
200	0.2912	2.9516	0.4698
150	0.2925	2.9356	0.4672

ตารางที่ 9.13 ผลของอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 ที่มีต่อค่าไอเกินซึ่งสมนัยกับออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด