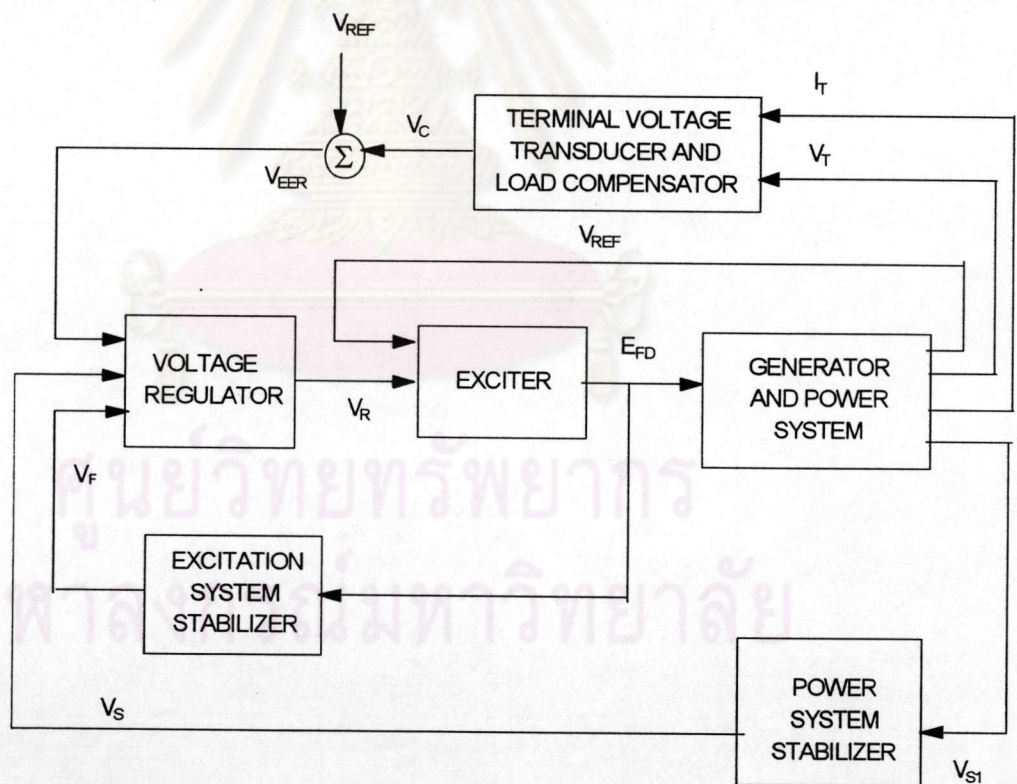


บทที่ 3
แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ

ในบทนี้จะแสดงถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบควบคุมต่าง ๆ ตลอดจนแบบจำลองของสายส่งและโหลด เนื่องจากปัญหาดังกล่าวเกี่ยวกับเสถียรภาพเชิงไดนามิกของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นแบบจำลองต่างๆจึงสามารถใช้เป็นแบบจำลองชนิดเชิงเส้นหรือแบบจำลองไดนามิก (Linear Incremental Model) ได้^[17] ซึ่งแบบจำลองโดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมจะเป็นตามที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองโดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุม

จากรูป 3.1 จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบควบคุมเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. สายส่งและโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง
3. อุปกรณ์สแตบิไลเซอร์
4. ระบบเอกไซเตชัน และระบบปรับแรงดัน
5. อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันขั้ว (Terminal Voltage Transducer and Load Compensator)

ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองในส่วนต่าง ๆ ได้มีการพัฒนากันออกไปมากมายหลายรูปแบบ เพื่อให้เหมาะสมและถูกต้องกับสภาวะที่ต้องการศึกษามากที่สุด โดยในบทนี้จะได้ศึกษาถึงแบบจำลองในส่วนต่าง ๆ ในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม ซึ่งจะสามารถนำไปสร้างสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเตตสเปซได้ต่อไป ตามรายละเอียดในบทที่ 4

3.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

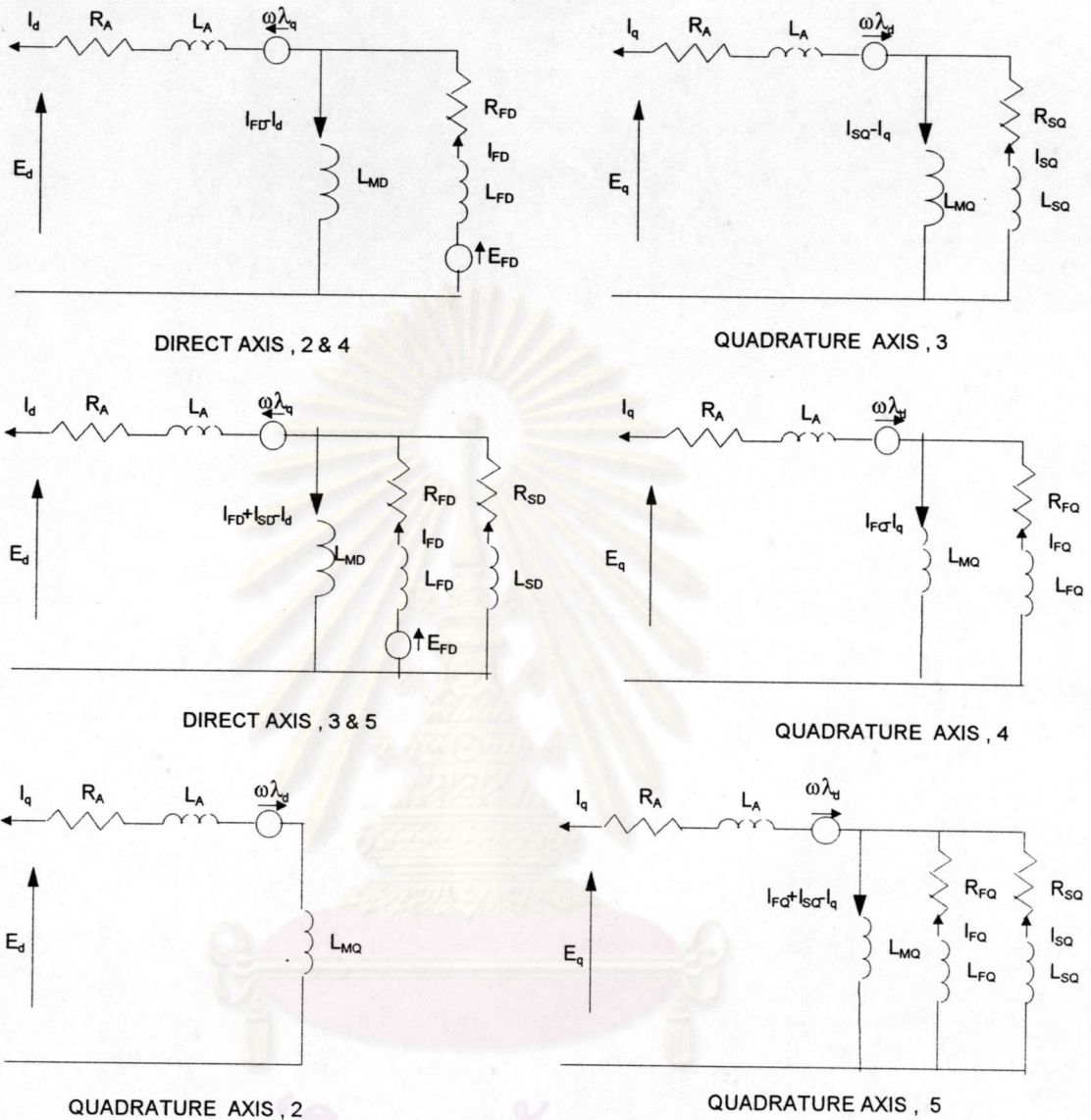
การสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้ยึดเอาทฤษฎีสองแกน (Two Axis Theory) เป็นหลัก โดยจะพิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีฟลักซ์คัลลิง (Flux Linkage) อยู่ 2 แกน คือ ในแนวแกนตรง (Direct Axis) และในแนวแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องจะมีแบบจำลองอยู่ 2 ชุด คือ แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์คัลลิงกับ แรงดันในแนวแกนตรง และแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์คัลลิงและแรงดันในแนวแกนตั้งฉาก นอกจากนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ชนิด โดยใช้ค่าคงตัวทางเวลาในแนวแกนตรง และในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มาเป็นหลักเกณฑ์ในการแบ่ง โดยมีรายละเอียดตามที่แสดงใน ตารางที่ 3.1 3.2 และรูปที่ 3.2^[1]

ชนิด	รายละเอียด
1.	ฟลักซ์คั้งคงที่ (Classical Model)
2.	โรเตอร์ชนิดลามิเนต ไม่มีวงจรรดแมเปอร้(Laminated Rotor Without Damper Circuit)
3.	โรเตอร์ชนิดลามิเนต มีวงจรรดแมเปอร้(Laminated Rotor With Damper Circuit)
4.	โรเตอร์ชนิดโซลิด ไม่มีวงจรรชบทรานเซอรันต(Solid Rotor Without Subtransient Circuit)
5.	โรเตอร์ชนิดโซลิด มีวงจรรชบทรานเซอรันต(Solid Rotor With Subtransient Circuit)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

ชนิด	T'_{d0}	T''_{d0}	T'_{q0}	T''_{q0}
1.	0	0	0	0
2.	>0	0	0	0
3.	>0	>0	0	0
4.	>0	0	>0	0
5.	>0	>0	>0	>0

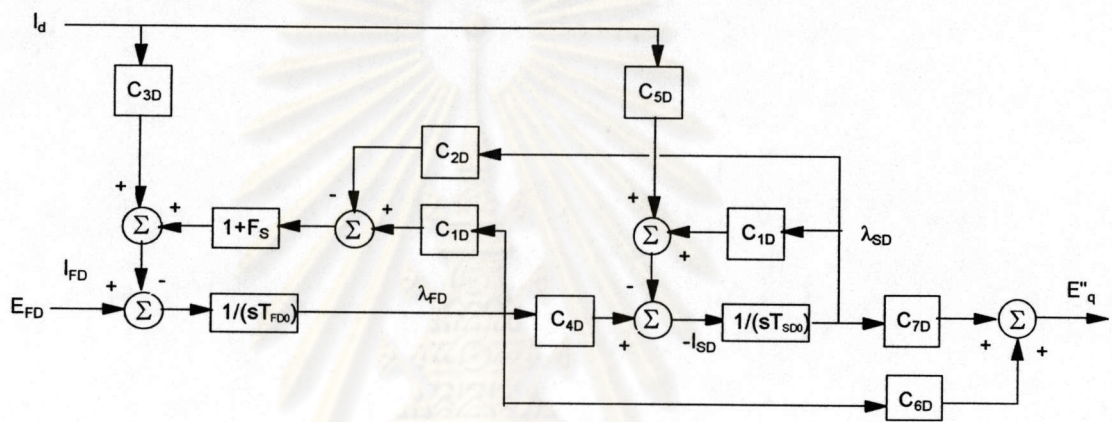
ตารางที่ 3.2 เส้นไขของค่าคงตัวทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ



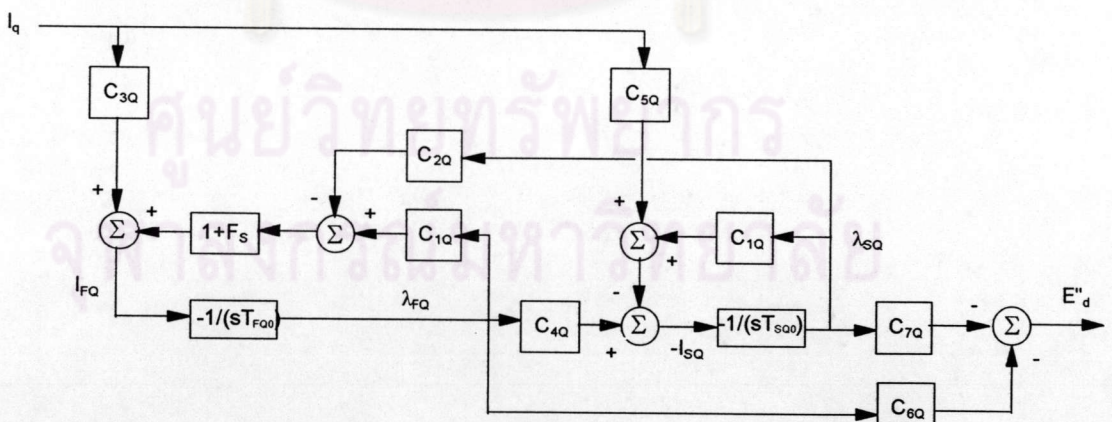
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลในแนวแกนตรง และแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดที่ 2, 3, 4 และ 5

แบบจำลอง ชนิดที่ 1 เป็นแบบจำลองที่มีความละเอียดน้อยมาก ในการคำนวณจะให้ผลผิดพลาดจากความเป็นจริงได้ง่ายแต่จะใช้เวลาในการคำนวณน้อย มักจะใช้ในระบบที่ไม่ต้องการความแม่นยำในการคำนวณมากนัก หรือจะใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อระบบน้อยมาก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงไม่ใช้แบบจำลองชนิดนี้^[17, 2] จะใช้เฉพาะแบบจำลองชนิดที่ 2 3 4 และ 5 เท่านั้น

รูปที่ 3.3^[1] จะแสดงถึงบล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ รูปที่ 3.4^[1] จะเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะมีตัวแปร C_{1D} ถึง C_{7D} และ C_{1Q} ถึง C_{7Q} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ารีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และมีค่าคงตัวทางเวลา T_{SD0} , T_{FD0} , T_{SQ0} และ T_{FQ0} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวทางเวลา T'_{q0} , T''_{q0} , T'_{d0} และ T''_{d0} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ตาม ตารางที่ 3.3 และ 3.4^[1]



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรง



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉาก

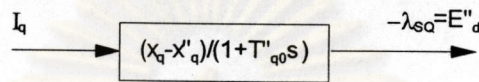
แบบจำลองที่	2 และ 4	3 และ 5
C_{1D}	1	$1 + (X_d - X'_d)(X'_d - X''_d) / (X'_d - X_A)^2$
C_{2D}	0	$(X_d - X'_d)(X'_d - X''_d) / (X'_d - X_A)^2 + (X_d - X'_d)(X''_d - X_A) / (X'_d - X_A)(X_d - X_A)$
C_{3D}	$(X_d - X'_d)$	$(X_d - X'_d)(X''_d - X_A) / (X'_d - X_A)$
C_{4D}	0	$(X_d - X_A)(X'_d - X''_d) / (X'_d - X_A)^2$
C_{5D}	0	$(X_d - X_A)(X'_d - X''_d) / (X'_d - X_A)$
C_{6D}	1	$(X''_d - X_A) / (X'_d - X_A)$
C_{7D}	0	$(X'_d - X''_d) / (X'_d - X_A) + (X''_d - X_A) / (X_d - X_A)$
T_{FD0}	T'_{d0}	$\frac{1}{2} [T'_{d0} + T''_{d0} + \sqrt{ \{ (T'_{d0} + T''_{d0})^2 - 4C_{1D}T'_{d0}T''_{d0} \} }]$
T_{SD0}	0	$\frac{1}{2} [T'_{d0} + T''_{d0} - \sqrt{ \{ (T'_{d0} + T''_{d0})^2 - 4C_{1D}T'_{d0}T''_{d0} \} }]$

ตารางที่ 3.3 ค่าคงตัวในสมการไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

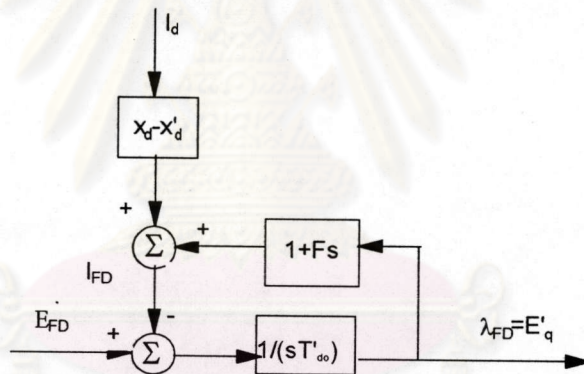
แบบจำลองที่	2	3	4	5
C_{1Q}	1	1	1	$1 + (X_q - X'_q)(X'_q - X''_q) / (X'_q - X_A)^2$
C_{2Q}	0	0	0	$(X_q - X'_q)(X'_q - X''_q) / (X'_q - X_A)^2 + (X_q - X'_q)(X''_q - X_A) / (X'_q - X_A)(X_q - X_A)$
C_{3Q}	0	0	$X_q - X'_q$	$(X_q - X'_q)(X''_q - X_A) / (X'_q - X_A)$
C_{4Q}	0	0	0	$(X_q - X_A)(X'_q - X''_q) / (X'_q - X_A)^2$
C_{5Q}	0	$X_q - X''_q$	0	$(X_q - X_A)(X'_q - X''_q) / (X'_q - X_A)$
C_{6Q}	0	0	1	$(X''_q - X_A) / (X'_q - X_A)$
C_{7Q}	0	1	0	$(X'_q - X''_q) / (X'_q - X_A) + (X''_q - X_A) / (X_q - X_A)$
T_{FQ0}	0	0	T'_{q0}	$\frac{1}{2} [T'_{q0} + T''_{q0} + \sqrt{ \{ (T'_{q0} + T''_{q0})^2 - 4C_{1Q}T'_{q0}T''_{q0} \} }]$
T_{SQ0}	0	T''_{q0}	0	$\frac{1}{2} [T'_{q0} + T''_{q0} - \sqrt{ \{ (T'_{q0} + T''_{q0})^2 - 4C_{1Q}T'_{q0}T''_{q0} \} }]$

ตารางที่ 3.4 ค่าคงตัวในสมการไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าแบบจำลองในแนวแกนตรงของชนิดที่ 3 จะเหมือนกับชนิดที่ 5 แต่แบบจำลองในแนวแกนตั้งฉากของชนิดที่ 3 จะเป็นตามรูปที่ 3.5^[1] และแบบจำลองในแนวแกนตรงของชนิดที่ 2 จะเหมือนกับชนิดที่ 4 ดังแสดงในรูป 3.6^[1] แต่แบบจำลองชนิดที่ 2 จะไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสนาม กระแสเสถเตอร์และแรงดันภายในในแนวแกนตั้งฉาก ต่างจากแบบจำลองชนิดที่ 4 ซึ่งจะแสดงไว้ในรูป 3.7^[1]

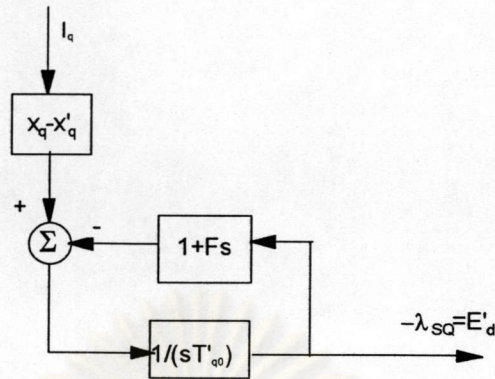


รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดที่ 3



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 และ 4

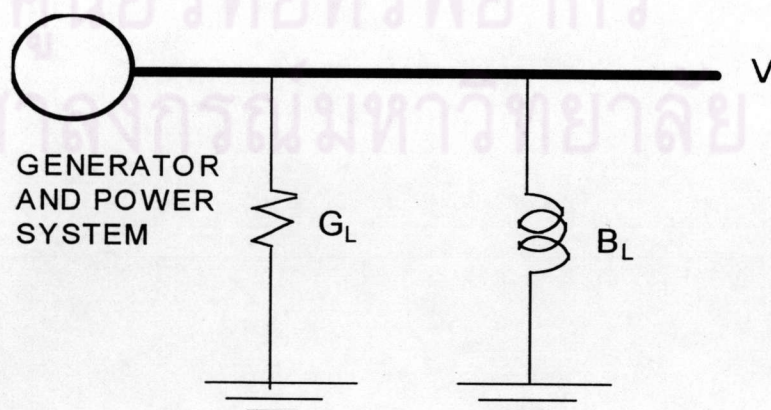
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งจากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดที่ 4

3.2 แบบจำลองสายส่งและโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาเสถียรภาพเชิงไดนามิกของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เนื่องจากความถี่ที่เกิดจากการแกว่งเชิงกลไฟฟ้าของโรเตอร์จะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น จึงทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากความถี่ที่ระบุ (Nominal Frequency) น้อยมาก จนทำให้สามารถละเลยผลของความถี่ที่เกิดจากการแกว่งของโรเตอร์ได้^[10,27] จึงถือว่าความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าคงที่ ดังนั้น แบบจำลองเชิงเส้นของสายส่งจึงเป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงที่ (Static Impedance) และด้วยเหตุผลเดียวกันจะสามารถพิจารณาให้โหลดภายในระบบไฟฟ้าเป็นพาสซีฟแอดมิทแตนซ์ที่มีค่าคงที่ (Constant Passive Admittance)^[17] ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของโหลด

โดยค่า G_L และ B_L มีค่าตามสมการ (3.1) และ (3.2)

$$G_L = P_L/V^2 \quad (3.1)$$

$$B_L = Q_L/V^2 \quad (3.2)$$

P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด (วัตต์)

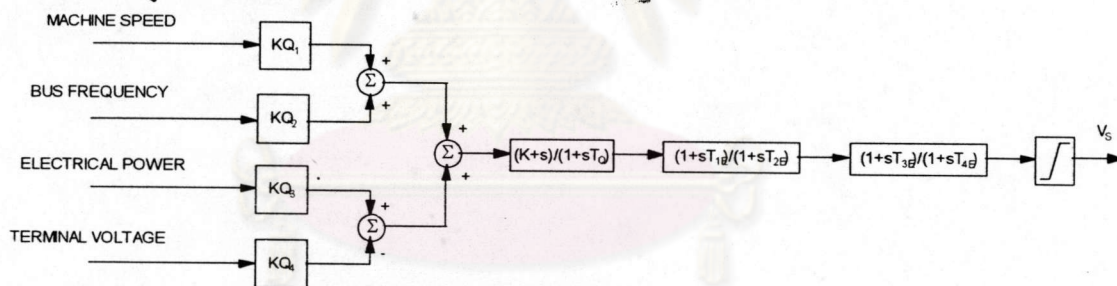
Q_L คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของโหลด (วาร์)

V คือ แรงดันของระบบส่ง (โวลท์)

G_L-jB_L คือ แอดมิตแตนซ์ (โอห์ม)

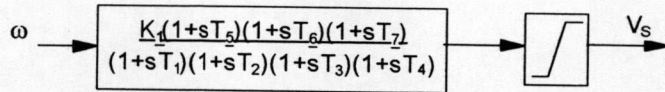
3.3 แบบจำลองอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์

อุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่จะนำเอาสัญญาณด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านำมาป้อนกลับให้กับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นๆ โดยสัญญาณด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาป้อนกลับนั้น อาจจะเป็นความเร็วของโรเตอร์, ความถี่ของไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา หรือ แรงดันขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า^[2,17] ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดัง รูปที่ 3.9^[2]

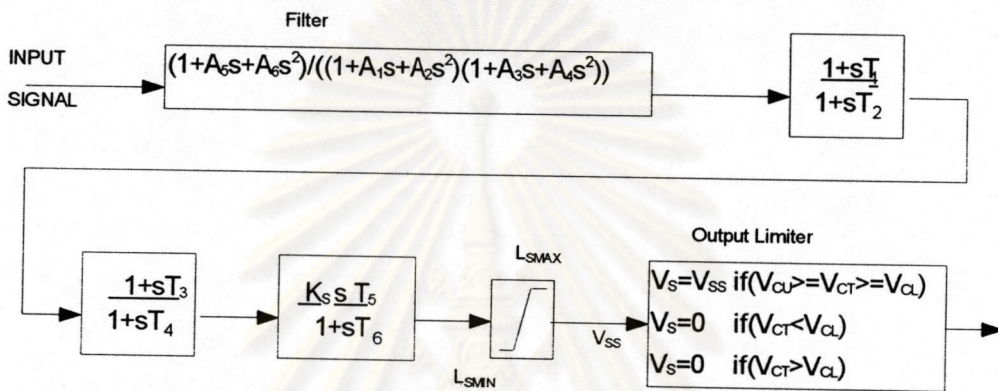


รูปที่ 3.9 แบบจำลองของอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่สัญญาณเข้าชนิดต่าง ๆ

ตามวิธีการในวิทยานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้อุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่นำเอาความเร็วของโรเตอร์มาเป็นสัญญาณป้อนกลับ จึงสามารถแสดงแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.10^[1] ซึ่งใกล้เคียงกับแบบจำลองของอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ในปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แบบจำลองอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ซึ่งใช้ความเร็วโรเตอร์เป็นสัญญาณเข้า



รูปที่ 3.11 แบบจำลองอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ในด้านการศึกษาระบบไฟฟ้า ทางกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้กำหนดให้ $A_1 - A_6$ มีค่าเป็นศูนย์ T_1 T_2 และ T_4 มีค่าเท่ากับ 0.18 T_3 มีค่าเท่ากับ 0.06 T_5 T_6 มีค่าเท่ากับ 5.00 K_5 มีค่าเท่ากับ -0.75 L_{SMAX} มีค่าเท่ากับ 0.10 L_{SMIN} มีค่าเท่ากับ -0.10

จากรูปที่ 3.10 ความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์เกิดจากขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณออก (V_s) และอาจเกิดจากลักษณะสมบัติของตัวอุปกรณ์เอง เช่นความหน่วงทางเวลา (Time Lag) แต่การศึกษาเสถียรภาพเชิงไดนามิก จะเป็นการวิเคราะห์ในช่วงที่เกิดออสซิลเลชันที่ความถี่ต่ำ ๆ ทำให้เกิดออสซิลเลชันในความถี่แคบๆเท่านั้น ดังนั้นจะสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ค่าสัญญาณออกที่ได้จะมีค่าห่างจากขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดอยู่มาก จนทำให้ประมาณได้ว่าอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ทำงานในช่วงของเชิงเส้น

3.4 แบบจำลองระบบเอกไซเตชั่น

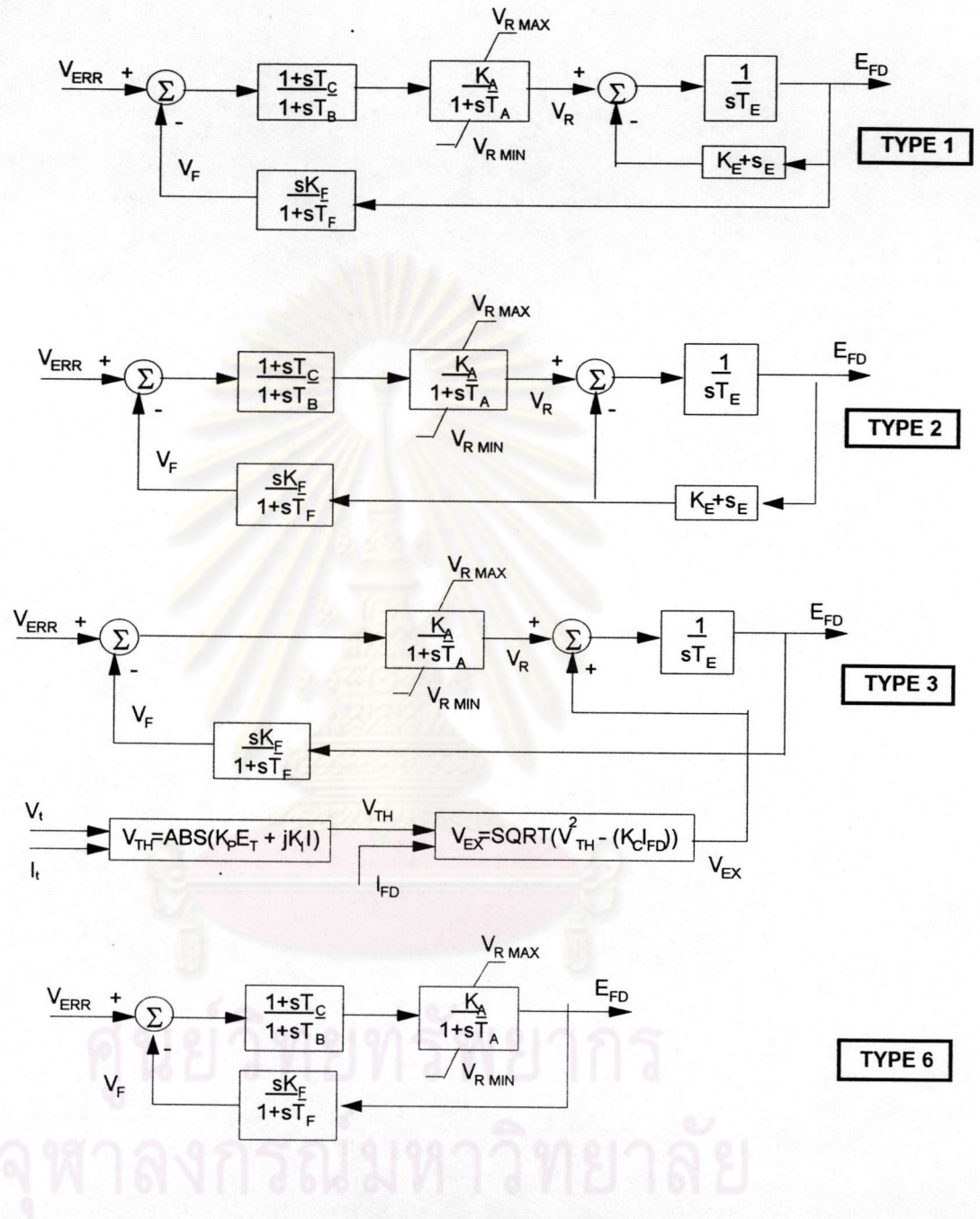
ระบบเอกไซเตชั่น จะประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ อุปกรณ์ปรับแรงดัน (Voltage Regulator), เอกไซเตอร์ (Exciter) และ เอกไซเตอร์ สเตบิไลเซอร์ (Exciter

Stabilizer) โดยแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันจะแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ตามหลักการทำงานได้ดังตารางที่ 3.5^[1,13] และมีแบบจำลองตามรูปที่ 3.12^[1] โดยแบบจำลองชนิดที่ 4 จะไม่นำมาใช้ในโปรแกรมขนาดเล็ก เนื่องจากมีผลของเดดแบนด์ (Dead Band) จากการทำงานของคอนแทคเตอร์ (Contactor)^[1] จึงจะไม่นำมาพิจารณาในขั้นนี้

แบบจำลองที่	รายละเอียด
1	Continuously acting regulator with rotating exciter, damping feedback from exciter terminals.
2	Continuously acting regulator with rotating exciter, damping feedback from exciter field current.
3	GE SCPT static system with current and potential sources.
4	Motor operated rheostat and contactor applied to rotating dc exciter.
6	Static system with rectifier exciter supplied from potential source.

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของระบบเอกไซเตชันชนิดต่าง ๆ

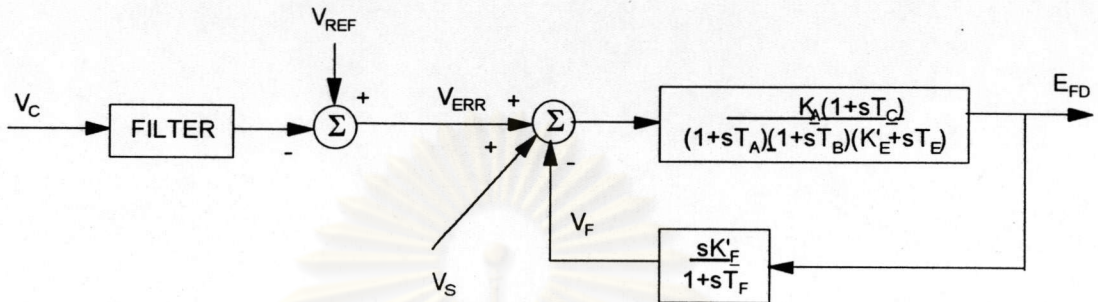
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของระบบเอกไซเตรัน

ถ้าทำแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นให้เป็นแบบจำลองชนิดเชิงเส้นจะต้องใช้สมมติฐานดังนี้คือ^[1] ในแบบที่ 1 และ 2 จะต้องละเลยผลของขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ในแบบที่ 3 จะต้องละเลยผลของแรงดัน V_{EX} เพราะว่าจะมีค่าต่ำมากจนอาจสมมติให้ไม่มีผลต่อ E_{FD} และในแบบที่ 6 ก็จะต้องละเลยผลของขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดของอุปกรณ์ปรับ

แรงดัน ก็จะได้แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับระบบเอกไซเตชัน แบบที่ 1 2 3 และ 6 ซึ่งสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทั่วไปได้ตามรูปที่ 3.13^[1] โดยมีค่าคงตัวต่าง ๆ ตาม ตารางที่ 3.6^[1]



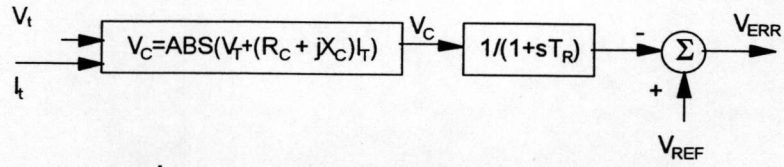
รูปที่ 3.13 แบบจำลองทั่วไปของระบบเอกไซเตชัน

แบบจำลองที่	1	2	3	6
T_B	T_B	T_B	0	T_B
T_C	T_C	T_C	0	T_C
K'_E	$K_E (1 + S_0 + BS_0)$	$K_E (1 + S_0 + BS_0)$	1	1
K'_F	K_F	$K_F (K_E + S_0 + BS_0)$	K_F	K_F
T_E	T_E	T_E	T_E	0

ตารางที่ 3.6 ค่าคงตัวของระบบเอกไซเตชันชนิดต่าง ๆ

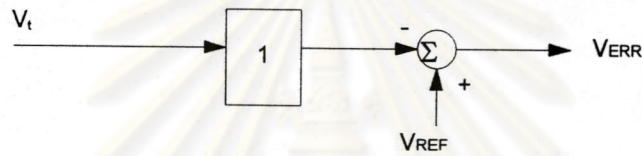
3.5 แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันขั้ว (Terminal voltage transducer and load compensator)

เป็นอุปกรณ์ที่จะตรวจจับเอาแรงดันและกระแสที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำมาใช้เป็นสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (V_{REF}) เพื่อให้ได้สัญญาณด้านเข้าของระบบเอกไซเตชัน เพื่อที่จะควบคุมแรงดันและกระแสตามให้ได้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่คงที่ ซึ่งจะมีแบบจำลองดังรูปที่ 3.14^[1,13,14,17]



รูปที่ 3.14 แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันชั่ว

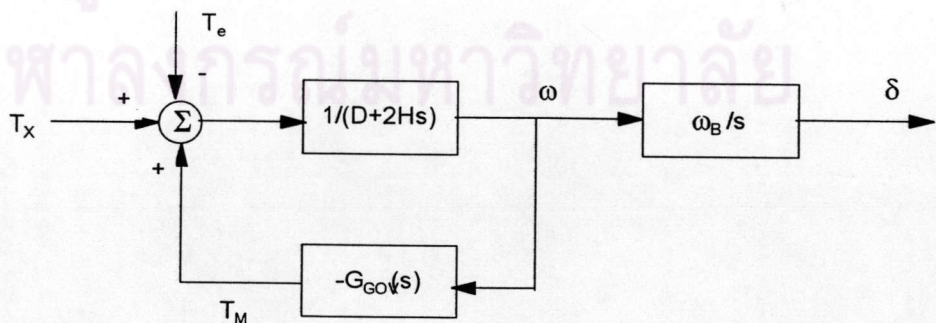
ซึ่ง R_c และ X_c จะทำหน้าที่เป็นตัวชดเชย (Compensator) และบล็อกถัดไปจะเป็นตัวกรอง (Filter) ซึ่งจะแทนได้ด้วยค่าคงตัวทางเวลา ซึ่งตามปกติ ค่า R_c , X_c และ T_R จะมีค่าเท่ากับศูนย์^[14] ดังนั้น จะได้แบบจำลองเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันชั่ว ตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แบบจำลองเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันชั่ว

3.6 แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

เนื่องจากอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ที่ทำการศึกษา จะใช้ความเร็วของโรเตอร์มาใช้เป็นสัญญาณเข้า ดังนั้น จึงจะต้องทำการหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะได้แบบจำลองตามรูปที่ 3.16^[1]



รูปที่ 3.16 แบบจำลองเชิงไดนามิกของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

ซึ่ง T_x คือแรงบิดจากภายนอกที่มากระทำกับโรเตอร์ โดยปกติจะมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กำหนดให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกบังคับ (Driven Generator)^[1] และ $G_{GOV}(s)$ เป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย