

แบบจำลองของ ระบบเอกไซเตชัน ระบบควบคุมความเร็ว
และอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์

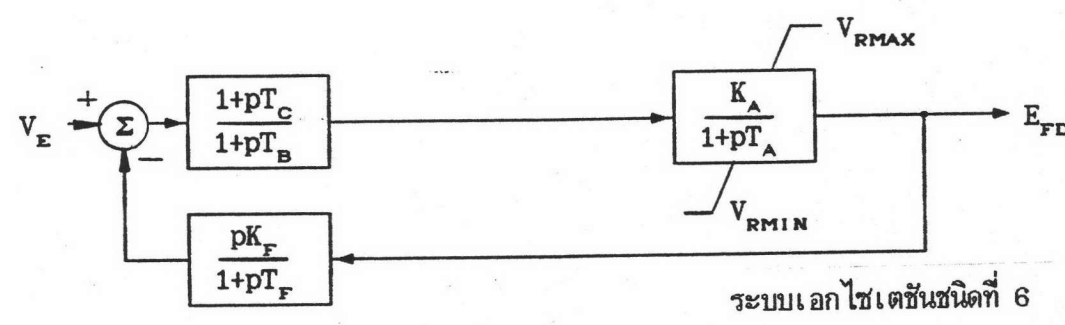
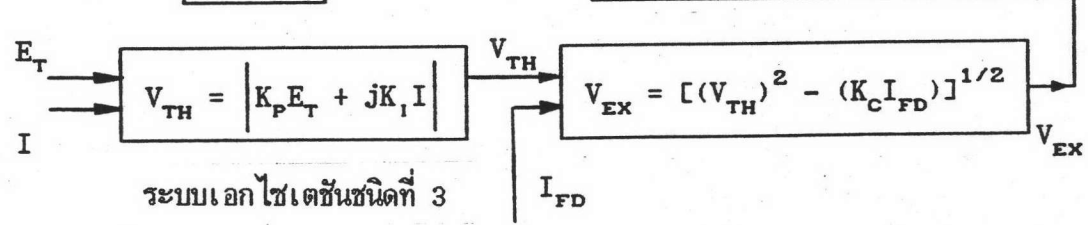
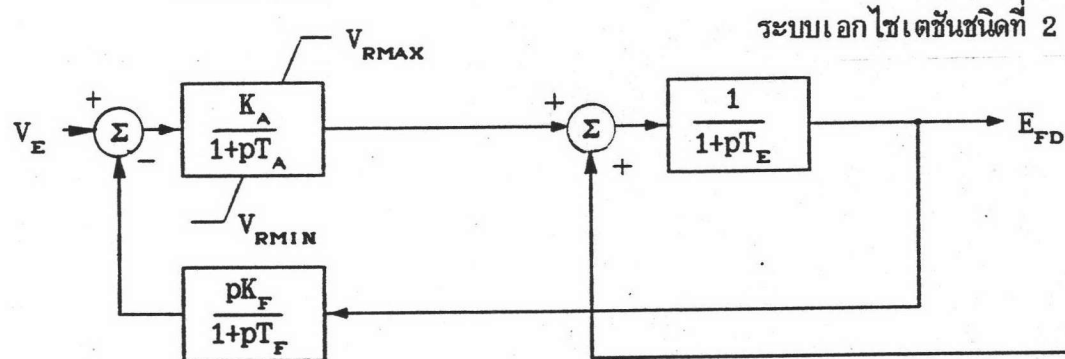
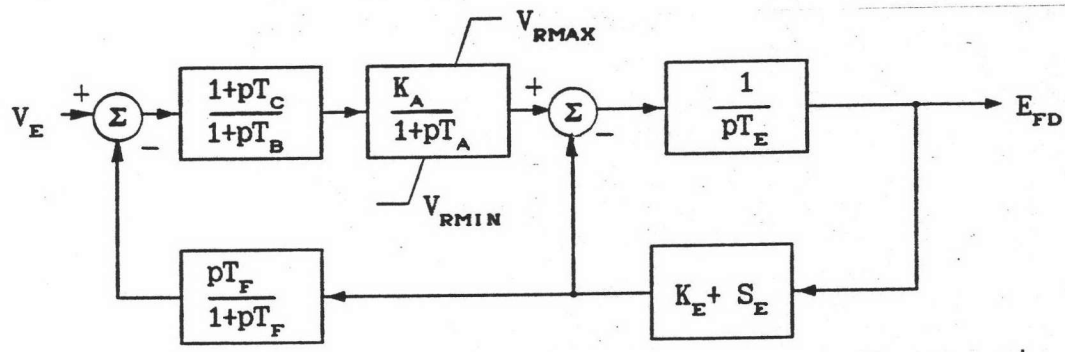
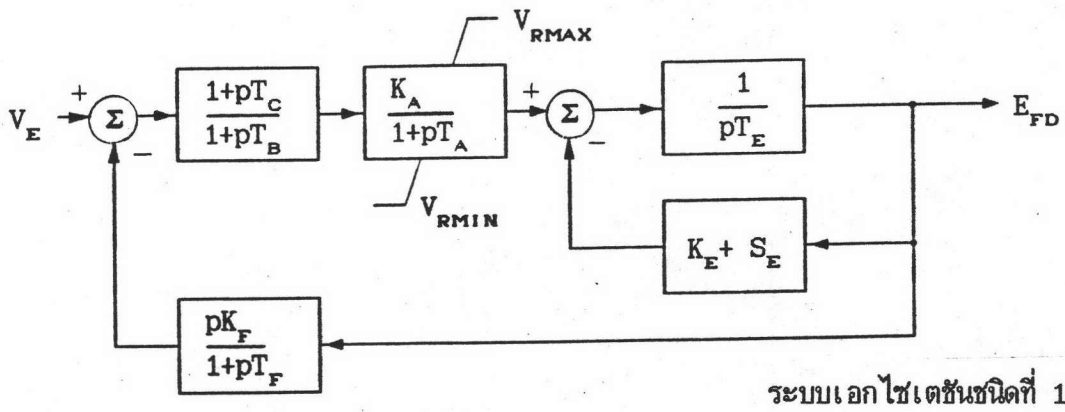
แบบจำลองของระบบเอกไซเตชัน (excitation system) แบบจำลองของระบบควบคุมความเร็ว (speed governing system) และ แบบจำลองของอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ (power system stabilizer) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้น ส่วนหนึ่งของความไม่เชิงเส้นดังกล่าว มีสาเหตุมาจาก ในการทำงาน of อุปกรณ์เหล่านี้ มีการตั้งขีดจำกัดสูงสุด และ ขีดจำกัดต่ำสุดของตัวแปรบางตัว การอิ่มตัวทางแม่เหล็ก (magnetic saturation) ก็เป็นสาเหตุหนึ่งของความไม่เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง ตามวิธีการในวิทยานิพนธ์นี้ ตัวแปรที่ใช้เป็นหลักในการวิเคราะห์เป็นตัวแปรอินครีเมนตอล ซึ่งได้จากการประมาณค่าแบบเชิงเส้นรอบจุดทำงานปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของปัญหาออสซิลเลชันดังกล่าวเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพไดนามิกของระบบไฟฟ้ากำลัง^[1] ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังไปเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงได้สมมติว่าค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่จุดทำงานปกติ อยู่ห่างจากขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดของมันมากพอเพียงจนไม่เป็นอุปสรรคต่อการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

ในบทนี้ ได้อธิบายถึงแบบจำลองของ ระบบเอกไซเตชัน ระบบควบคุมความเร็ว และ อุปกรณ์สแตบิไลเซอร์ ซึ่งใช้ประกอบในการวิเคราะห์ ว่ามีลักษณะเป็นเช่นไรบ้าง และได้แสดงการหาแบบจำลองเชิงเส้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังกล่าวจากแบบจำลองไม่เชิงเส้น แบบจำลองเชิงเส้นของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ใช้เป็นหลักในการหาระบบสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม

5.1 แบบจำลองระบบเอกไซเตชัน

แบบจำลองของระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหลายชนิด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีหน่วยงานบางหน่วยงานที่ทำการศึกษเกี่ยวกับระบบเอกไซเตชันดังกล่าว และได้เสนอแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันต่าง ๆ เพื่อประโยชน์ในเชิงวิเคราะห์เอาไว้ด้วย ตัวอย่างหน่วยงานดังกล่าวได้แก่ IEEE และ เวสต์เทอร์น ซีสเต็ม โคออร์ดิเนตติ้ง เคาน์ซิล



รูปที่ 5.1 แบบจำลองของระบบเอกไซเตชันชนิดต่าง ๆ

TYPE	EXCITER SYSTEM DESCRIPTION
1	Continuously acting regulator with rotating exciter, damping feedback from exciter terminal
2	Continuously acting regulator with rotating exciter, damping feedback from exciter field current
3	GE SPCT static system with current and potential sources
6	Static system with rectifier exciter supplied from potential sources

ตารางที่ 5.1 รหัสของแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันแต่ละชนิดพร้อมคำอธิบาย

(Western System Coordinating Council) หรือ WSCC^[1] เป็นต้น ในการออกแบบและพัฒนาระบบเอกไซเตชัน ย่อมต้องทำให้ดีขึ้นไปเรื่อย ๆ และอาจมีส่วนที่แตกต่างไปจากเดิม ดังนั้น จึงเป็นเรื่องยากที่จะเสนอแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันให้สามารถครอบคลุมระบบเอกไซเตชันได้ทุกชนิด

ระบบเอกไซเตชัน ที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบจำลองที่เสนอโดย [6] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ครอบคลุมระบบเอกไซเตชันได้กว้างขวางกว่าแบบจำลองที่เสนอโดย IEEE และ WSCC ในวิทยานิพนธ์นี้ได้คัดเลือกแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันมาใช้ประกอบการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน ตามที่แสดงในรูปที่ 5.1 คำอธิบายเกี่ยวกับแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันแต่ละชนิดได้อธิบายไว้ในตารางที่ 5.1

ความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเกิดขึ้นที่ระบบเอกไซเตชันเมื่ออยู่หลายประการเช่น ความ

ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเกิดขึ้นที่เออร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน และความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก เป็นต้น

5.1.1 แบบจำลองของเออร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน

แบบจำลองของเออร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 5.2 คำอธิบายสำหรับสัญลักษณ์ของตัวแปรและค่าคงตัวซึ่งใช้ในแบบจำลองดังกล่าว อยู่ในตารางที่ 5.2 จากรูปที่ 5.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในส่วนต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

$$E_G = E_T + IZ_C \quad (5.1)$$

$$E_{GR} = E_{TR} + R_C I_R - X_C I_I \quad (5.2)$$

$$E_{GI} = E_{TI} + R_C I_I + X_C I_R \quad (5.3)$$

$$E_C^2 = E_{GR}^2 + E_{GL}^2 \quad (5.4)$$

$$E_C = (1 + pT_R) V_C \quad (5.5)$$

$$V_E = V_{REF} + V_S - V_C \quad (5.6)$$

ทำการประมาณค่าสมการ (5.4) แบบเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินทรีย์ เมนตอลดังสมการ (5.7)

$$E_{C\Delta} = C_{V1} E_{GR\Delta} + C_{V2} E_{GI\Delta} \quad (5.7)$$

โดยที่ ค่าคงตัว C_{V1} และ C_{V2} ในสมการ (5.7) มีค่าดังสมการ (5.8) และสมการ (5.9) ตามลำดับ

$$C_{V1} = E_{GRO}/E_{CO} \quad (5.8)$$

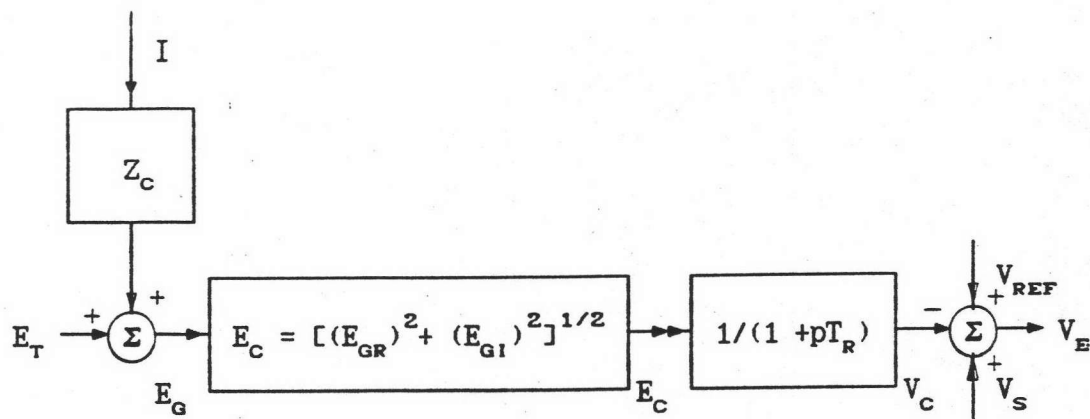
$$C_{V2} = E_{GIO}/E_{CO} \quad (5.9)$$

ทำการประมาณค่าสมการ (5.2) และสมการ (5.3) แบบเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินทรีย์เมนตอลดังสมการ (5.10) และสมการ (5.11) ตามลำดับ

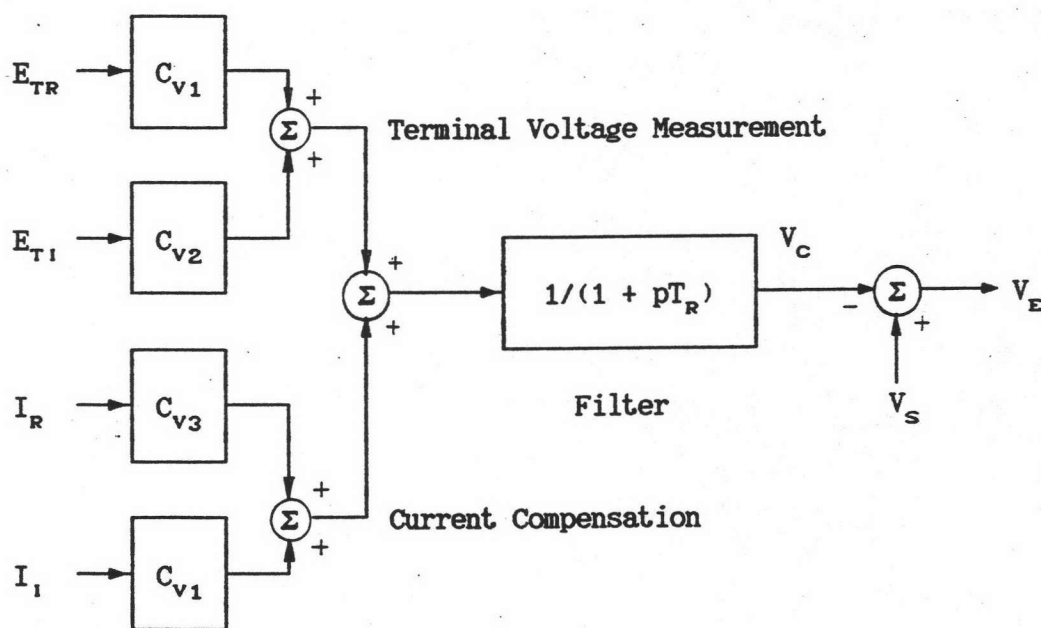
$$E_{GR\Delta} = E_{TR\Delta} + R_C I_{R\Delta} - X_C I_{I\Delta} \quad (5.10)$$

$E_T = E_{TR} + jE_{TI}$	เฟสเซอร์ความถี่กำลัง (power frequency phasor) ของแรงดันที่ขั้วบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$I = I_R + jI_I$	เฟสเซอร์ความถี่กำลังของกระแสที่จ่ายออกจากขั้วบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$Z_C = R_C + jX_C$	อิมพีแดนซ์ของการชดเชย (compensation impedance)
$E_G = E_T + IZ_C$ $= E_{GR} + jE_{GI}$	เฟสเซอร์ความถี่กำลังของแรงดันชดเชย (compensated voltage)
E_C	แรงดันชดเชยที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง (Unfiltered compensated voltage)
V_C	แรงดันชดเชยซึ่งผ่านการกรองแล้ว (Filtered compensated voltage)
V_{REF}	แรงดันอ้างอิง (Reference voltage)
V_S	เอาต์พุตของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์
V_E	แรงดันเออร์เรอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน
C_{V1}	E_{GR0}/E_{C0}
C_{V2}	E_{GI0}/E_{C0}
C_{V3}	$R_C C_{V1} + X_C C_{V2}$
C_{V4}	$R_C C_{V2} - X_C C_{V1}$

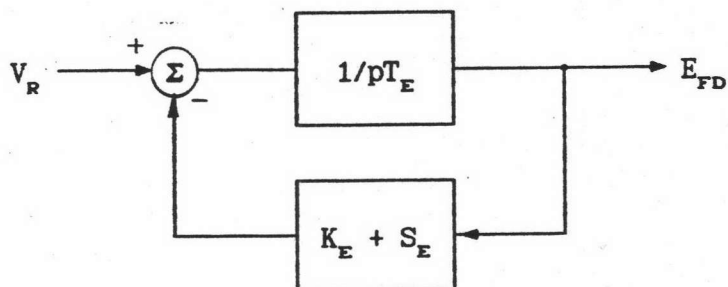
ตารางที่ 5.2 สัญลักษณ์ของตัวแปรและค่าคงตัวในแบบจำลองของเออร์เรอร์ดีเทกเตอร์



รูปที่ 5.2 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของเออร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน



รูปที่ 5.3 แบบจำลองเชิงเส้นของเออร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน



รูปที่ 5.4 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของเอกไซท์เตอร์กระแสตรงชนิดหมุน

$$E_{G1\Delta} = E_{T1\Delta} + R_C I_{I\Delta} - X_C I_{R\Delta} \quad (5.11)$$

แทนค่า $E_{G1\Delta}$ จากสมการ (5.10) และ $E_{G1\Delta}$ จากสมการ (5.11) ลงในสมการที่ (5.7) ได้ผลดังสมการที่ (5.12)

$$E_{C\Delta} = C_{V1} E_{T1\Delta} + C_{V2} E_{T1\Delta} + C_{V3} I_{R\Delta} + C_{V4} I_{I\Delta} \quad (5.12)$$

โดยที่ C_{V3} และ C_{V4} ในสมการ (5.12) มีค่าดังสมการ (5.13) และ (5.14) ตามลำดับ

$$C_{V3} = R_C C_{V1} + X_C C_{V2} \quad (5.13)$$

$$C_{V4} = R_C C_{V2} - X_C C_{V1} \quad (5.14)$$

ทำการประมาณค่าสมการ (5.5) และ สมการ (5.6) ได้สมการ (5.15) และ สมการ (5.16) ตามลำดับ

$$E_{C\Delta} = (1 + pT_R) V_{C\Delta} \quad (5.15)$$

$$V_{E\Delta} = V_{S\Delta} + V_{C\Delta} \quad (5.16)$$

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากสมการ (5.12) สมการ (5.15) และ สมการ (5.16) จึงได้แบบจำลองเชิงเส้นของเออร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันตามที่แสดงในรูปที่ 5.3

5.1.2 แบบจำลองของเอกไซเตอร์

แบบจำลองของระบบเอกไซเตอร์ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 มีอยู่ 2 ชนิดที่มีเอกไซเตอร์ (exciter) เป็นเอกไซเตอร์ชนิดหมุน (rotating exciter) กล่าวคือระบบเอกไซเตอร์ชนิดที่ 1 และ 2 เอกไซเตอร์ของระบบเอกไซเตอร์ชนิดที่ 1 เป็นเอกไซเตอร์กระแสตรง (dc exciter) เอกไซเตอร์ของระบบเอกไซเตอร์ชนิดที่ 2 เป็นเอกไซเตอร์กระแสสลับ (ac exciter) ความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเกิดขึ้นกับเอกไซเตอร์ทั้ง 2 ชนิดที่กล่าวมา เกิดขึ้นเนื่องจากการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก

5.1.2.1 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุน

แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุน (rotating dc exciter) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 5.4 สัญลักษณ์ในแบบจำลองดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

T_E	คือค่าคงตัวทางเวลาของเอกไซเตอร์
S_E	คือตัวประกอบของการอิ่มตัว (saturation factor) ของเอกไซเตอร์ซึ่งมีค่าขึ้นกับจุดทำงานของเอกไซเตอร์
K_E	เป็นค่าคงตัวของเอกไซเตอร์ซึ่งมีค่าขึ้นกับการเอกไซเตชันด้วยตัวเอง (self-excitation)

ในรูปที่ 5.4 อินพุตของเอกไซเตอร์ V_R มีความสัมพันธ์กับเอาต์พุต E_{FD} ดังสมการ (5.17)

$$V_R = (K_E + S_E) E_{FD} + T_E p E_{FD} \quad (5.17)$$

ทำการประมาณค่าสมการ (5.17) แบบเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลดังสมการ (5.18)

$$V_{RA} = [(K_E + S_{EO}) + T_E p] E_{FDA} + E_{FDO} S_{EA} \quad (5.18)$$

ค่าของ S_E ในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ E_{FD} ดังสมการ (5.19)

$$S_E = A(E_{FD})^B \quad (5.19)$$

ค่าคงตัว A และ B ในสมการ (5.19) ได้รับการกำหนดให้สอดคล้องกับฟังก์ชันการอิ่มตัว (saturation function) ของการเอกไซเตชันที่ระดับเพดาน (ceiling) และที่ 75% ของระดับเพดาน

ทำการประมาณค่าสมการ (5.19) แบบเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครี

เมเนตอลตั้งสมการ (5.20)

$$S_{E\Delta} = BA(E_{FDO})^{B-1}E_{FDA} \quad (5.20)$$

แทนค่า $S_{E\Delta}$ จากสมการ (5.20) ลงในสมการ (5.18) ได้ความสัมพันธ์ตั้งสมการ (5.21)

$$\begin{aligned} V_{RA} &= [(K_E + S_{EO}) + T_E p]E_{FDA} + BA(E_{FDO})^B E_{FDA} \\ &= [(K_E + S_{EO} + BS_{EO}) + T_E p]E_{FDA} \end{aligned} \quad (5.21)$$

กำหนดให้

$$K'_E = K_E + S_{EO} + BS_{EO} \quad (5.22)$$

แทนค่า K'_E จากสมการ (5.22) ลงในสมการ (5.21) ได้ผลตั้งสมการ (5.23)

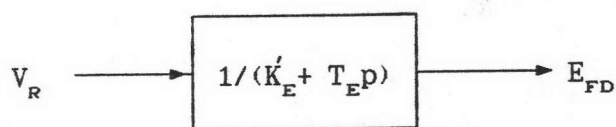
$$V_{RA} = (K'_E + T_E p)E_{FDA} \quad (5.23)$$

ดังนั้นแบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุนจึงมีลักษณะดังรูปที่ 5.5

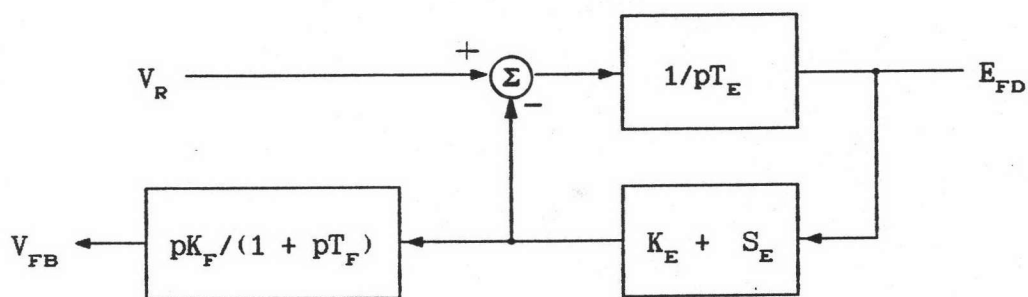
5.1.2.2 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน

แบบจำลองของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน (rotating ac exciter) ซึ่งเป็นเอกไซเตอร์ของระบบเอกไซเตอร์ชนิดที่ 2 มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 5.6 [6] เอกไซเตอร์ดังกล่าวนี้ใช้สัญญาณป้อนกลับจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (field current)

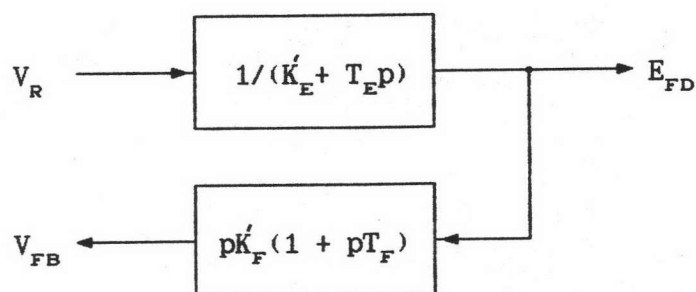
ในแบบจำลองไม่เชิงเส้นของ เอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุน และ เอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน ความสัมพันธ์ระหว่าง V_R กับ E_{FD} มีลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง V_{RA} กับ E_{FDA} ในแบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุนจึงมีลักษณะเหมือนกับสัมพันธ์ระหว่าง V_{RA} กับ E_{FDA} ในแบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุนด้วย กล่าวคือมีลักษณะตั้งสมการ (5.23)



รูปที่ 5.5 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุน



รูปที่ 5.6 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน



รูปที่ 5.7 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน

จากรูปที่ 5.6 ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรดังสมการ (5.24)

$$V_{FB} + T_F p V_{FB} = K_F K_E p E_{FD} + K_F p (S_E E_{FD}) \quad (5.24)$$

จากการประมาณค่าสมการ (5.24) แบบเชิงเส้น ได้สมการ (5.25)

$$(1 + p T_F) V_{FB\Delta} = (K_F K_E p) E_{FD\Delta} + K_F E_{FD0} p S_{EA} + K_F S_{EO} p E_{FD\Delta} \quad (5.25)$$

จากสมการ (5.19)

$$p S_{EA} = BA (E_{FD})^{B-1} E_{FD\Delta} \quad (5.26)$$

แทนค่า $p S_{EA}$ จากสมการ (5.26) ลงในสมการ (5.24) ได้ผลดังสมการ (5.27)

$$(1 + p T_F) V_{FB\Delta} = K_F (K_E + S_{EO} + B S_{EO}) p E_{FD\Delta} \quad (5.27)$$

กำหนดให้

$$K'_F = K_F (K_E + S_{EO} + B S_{EO}) \quad (5.28)$$

แทนค่า K'_F จากสมการ (5.28) ลงในสมการ (5.27) ได้ผลดังสมการ (5.29)

$$(1 + p T_F) V_{FB\Delta} = K'_F p E_{FD\Delta} \quad (5.29)$$

จากสมการ (5.23) และสมการ (5.29) จึงเห็นได้ว่า แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุนซึ่งใช้สัญญาณป้อนกลับจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก มีลักษณะตามที่แสดงรูป 5.7

5.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตอร์

แบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตอร์ ซึ่งใช้ประกอบการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองซึ่งได้พัฒนามาจากแบบจำลองไม่เชิงเส้นของระบบเอกไซเตอร์ โดยตัด

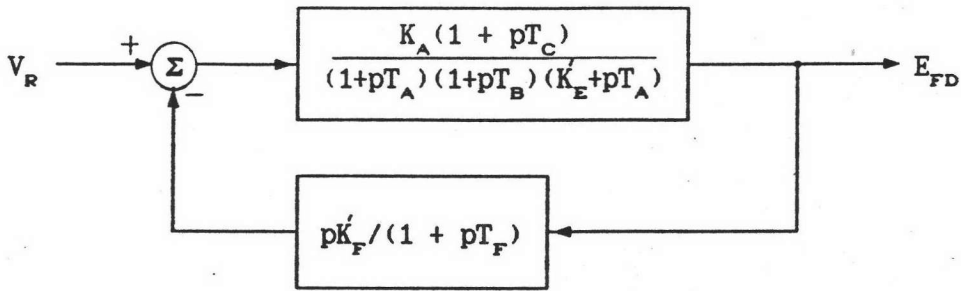
ผลของขีดจำกัดของอุปกรณ์ความคุมแรงดันออกไป

แบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 1 ได้จากการแทนที่ส่วนของเอกไซเตอร์ในระบบดังกล่าว ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์จากรูปที่ 5.5 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 2 ได้จากการแทนที่ส่วนของเอกไซเตอร์ในระบบดังกล่าวด้วยแบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์จากรูปที่ 5.7 ในแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 3 ได้จากการตัดผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน V_{EX} ออกไป ทั้งนี้เป็นเพราะถ้าการเปลี่ยนแปลงของ V_{EX} มีไม่มากนัก มันจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ E_{FD} น้อยมาก

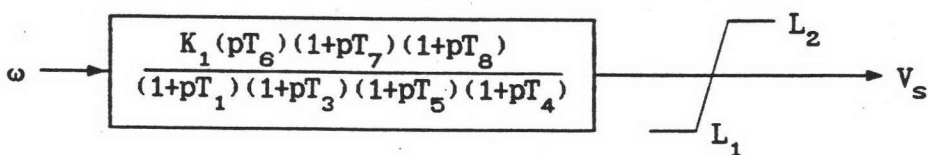
จากการสังเกตพบว่า รูปที่ 5.8 สามารถใช้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 1, 2, 3 และ 6 ได้ทั้งหมด โดยที่ค่าคงตัวต่าง ๆ ในแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตชันแต่ละชนิด ต้องมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 5.3 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงได้ใช้แบบจำลองของระบบเอกไซเตชันตามที่แสดงในรูปที่ 5.8 เป็นแบบจำลองทั่วไปของระบบเอกไซเตชัน

TYPE	1	2	3	6
T_B	T_B	T_B	0	T_B
T_C	T_C	T_C	0	T_C
K'_E	$K_E(1+S_O+BS_O)$	$K_E(1+S_O+BS_O)$	1	1
K'_F	K_F	$K_F(1+S_O+BS_O)$	K_F	K_F
T_E	T_E	T_E	T_E	0

ตารางที่ 5.3 ค่าคงตัวและค่าคงตัวทางเวลาของระบบเอกไซเตชันชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 5.8 แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปของระบบเอชไอเตชัณชนิดที่ 1, 2, 3 และ 6



รูปที่ 5.9 แบบจำลองของอุปกรณ์สแตบิไลเซอร์

