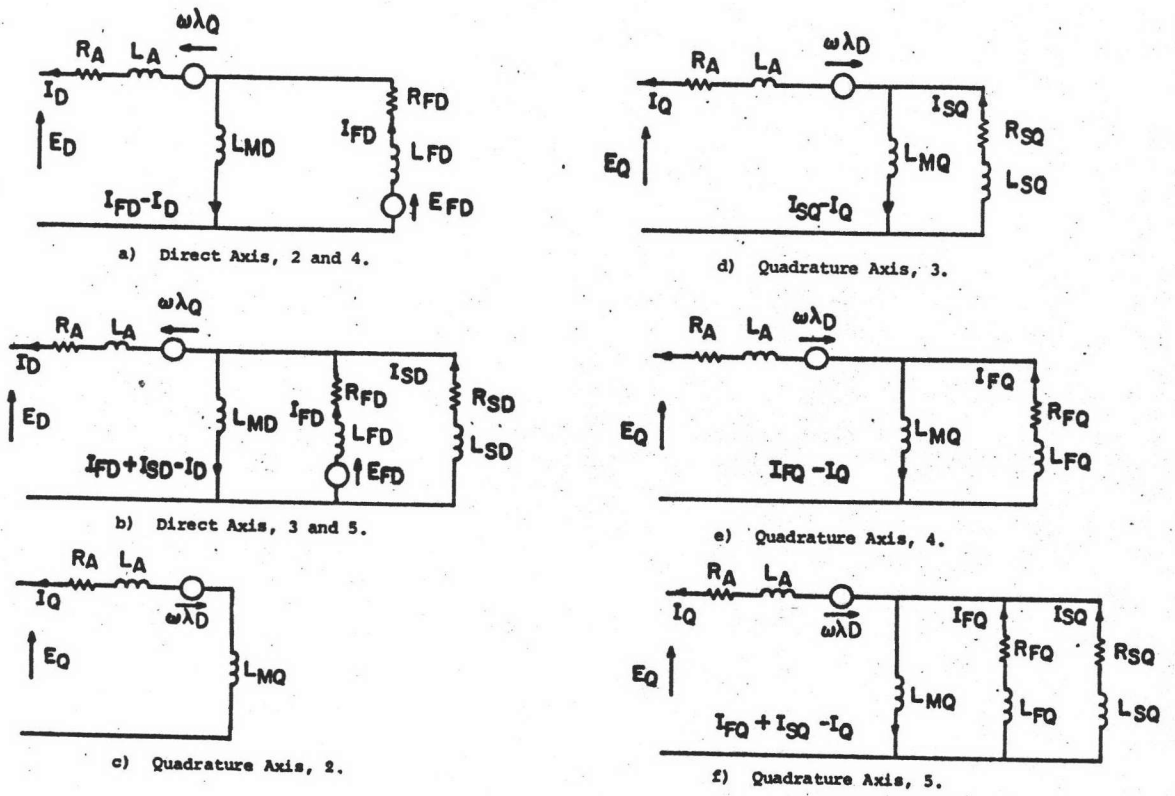


แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

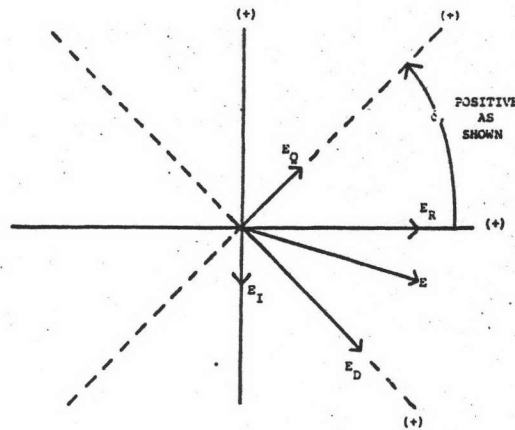
แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังมีหลายชนิด เพื่อให้ขอบเขตของการวิเคราะห์กว้างขวางพอสมควร ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้คัดเลือกแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 ชนิดด้วยกัน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อความสะดวกในการอ้างอิง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิดได้รับการกำหนดให้มีหมายเลขกำกับตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 การตรวจสอบชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าเป็นชนิดใด ทำได้โดยตรวจสอบค่าคงตัวทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามที่แสดงในตาราง 4.2

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลัง มีความจำเป็นต้องใช้สมการเชิงไดนามิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบในการวิเคราะห์ สมการดังกล่าวมาจากสมการแรงดัน (voltage equations) และสมการฟลักซ์คัลลิ่ง (flux linkage equations) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในรูปของบล็อกไดอะแกรม เป็นวิธีที่นิยมกันมากเพราะสะดวกในการพิจารณา บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเดียวกัน แตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับการจัดรูปสมการเชิงไดนามิค เพราะการจัดรูปสมการเชิงไดนามิคจากสมการฟลักซ์คัลลิ่งและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้หลายวิธี ดังนั้นในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลังจึงควรอธิบายเกี่ยวกับบล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ว่ามีลักษณะเช่นไร ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในบทนี้จึงได้แสดงวิธีการหาความสัมพันธ์เชิงไดนามิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด ตลอดจนได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของบล็อกไดอะแกรมประกอบไว้ด้วย เนื่องจากสมการแรงดันของวงจรสมมูลของสเตเตอร์เป็นสมการที่มีความจำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สมการดังกล่าวของเครื่องกำเนิดชนิดต่าง ๆ มีลักษณะแตกต่างกันไป จึงอาจก่อให้เกิดความสับสนได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้แสดงที่มาของสมการดังกล่าวไว้ด้วย

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปยึดหลักทฤษฎีสองแกน (Two Axis Theory) เป็นหลัก ทฤษฎีดังกล่าวได้แบ่งตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเป็นสองประเภท ได้แก่ตัวแปรในแนวแกนตรง (direct axis) และตัวแปรในแนวแกนตั้งฉาก



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลแนวแกนตรง และ วงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก  
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2, 3, 4, และ 5



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงของระบบไฟฟ้ากำลัง  
กับแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

MODEL NUMBER	MODEL DESCRIPTION
1	Constant flux linkages
2	Laminated rotor without damper circuits
3	Laminated rotor with damper circuits
4	Solid rotor without subtransient circuits
5	Solid rotor with subtransient circuits

ตารางที่ 4.1 หมายเลขอ้างอิงของแบบจำลองของ  
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และคำอธิบาย

MODEL NUMBER	$T'_{DO}$	$T''_{DO}$	$T'_{e0}$	$T''_{e0}$
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 4.2 ค่าคงตัวทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

(quadrature axis) ในสมการความแสดงสัมพันธ์เชิงไดนามิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวแปรในแนวแกนตรงและตัวแปรในแนวแกนตั้งฉาก มีความสัมพันธ์กัน จึงอาจก่อให้เกิดความสัมพันธ์ในการเรียกชื่อได้ เพื่อขจัดปัญหานี้ จึงต้องกำหนดการเรียกชื่อดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ฟลักซ์คัลลิ่งเป็นหลักในการอ้างอิง เช่นความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรง หมายถึงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์คัลลิ่งในแนวแกนตรงเป็นต้น เนื่องจากแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี 2 แกน คือ แกนตรงและแกนตั้งฉาก ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงไดนามิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรง และ ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉาก

ในแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ทั้ง 5 ชนิด แรงดันเชิงอัตราเร็ว (speed voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวคือ  $\omega \lambda_D$  และ  $\omega \lambda_Q$  ได้รับการกำหนดให้คิดที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ในช่วงชั้บทรานเซียนต์และช่วงทรานเซียนต์ ส่วนของแรงดันซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คัลลิ่ง (flux linkage) จากสเตเตอร์ กล่าวคือ  $p\lambda_D$  และ  $p\lambda_Q$  ได้รับการสมมติให้มีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาพิจารณา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator coordinates) กับตัวแปรในระบบโคออร์ดิเนตอ้างอิง (reference coordinates) ใช้รูปที่ 4.2 ประกอบการอ้างอิง

บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิดมีลักษณะแตกต่างกัน ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อขั้นตอนวิธีในการวิเคราะห์ ดังนั้นการกำหนดรูปแบบทั่วไป (generalized form) ของบล็อกไดอะแกรมดังกล่าว ทำให้เกิดความสะดวกต่อการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก การกำหนดรูปแบบทั่วไปของบล็อกไดอะแกรมดังกล่าว ได้อธิบายไว้ในบทนี้ด้วยเช่นกัน

#### 4.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

##### 4.1.1 สมการฟลักซ์คัลลิ่งและสมการแรงดันของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

สมการฟลักซ์คัลลิ่งและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งพิจารณาจากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 มีดังต่อไปนี้<sup>[6]</sup>



$$\lambda_{FD} = (L_{MD} + L_{FD})I_{FD} + L_{MD}I_{SD} - L_{MD}I_D \quad (4.1)$$

$$\lambda_{SD} = L_{MD}I_{FD} + (L_{MD} + L_{SD})I_{SD} - L_{MD}I_D \quad (4.2)$$

$$\lambda_D = -L_{MD}I_{FD} - L_{MD}I_{SD} + (L_{MD} + L_A)I_D \quad (4.3)$$

$$\lambda_{Fq} = (L_{Mq} + L_{Fq})I_{Fq} + L_{Mq}I_{Sq} - L_{Mq}I_q \quad (4.4)$$

$$\lambda_{Sq} = L_{Mq}I_{Fq} + (L_{Mq} + L_{Sq})I_{Sq} - L_{Mq}I_q \quad (4.5)$$

$$\lambda_q = -L_{Mq}I_{Fq} - L_{Mq}I_{Sq} + (L_{Mq} + L_A)I_q \quad (4.6)$$

$$E_D = -R_A I_D - p\lambda_D + \omega\lambda_q \quad (4.7)$$

$$E_q = -R_A I_q - p\lambda_q - \omega\lambda_D \quad (4.8)$$

$$E_{FD} = R_{FD} I_{FD} + p\lambda_{FD} \quad (4.9)$$

$$0 = R_{SD} I_{SD} + p\lambda_{SD} \quad (4.10)$$

$$0 = R_{Fq} I_{Fq} + p\lambda_{Fq} \quad (4.11)$$

$$0 = R_{Sq} I_{Sq} + p\lambda_{Sq} \quad (4.12)$$

โดยใช้ค่าเบส (base value) ของตัวแปรต่าง ๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 4.3 สมการพิกซ์คล็อง และ สมการแรงดัน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ในระบบ เปอร์ยูนิต (per unit system) มีดังต่อไปนี้

$$\lambda_{FD} = I_{FD} + X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})^{-1}I_{SD} - (X_{MD})^2(X_{MD} + X_{FD})^{-1}I_D \quad (4.13)$$

$$\lambda_{SD} = X_{MD}(X_{MD} + X_{SD})^{-1}I_{FD} + I_{SD} - (X_{MD})^2(X_{MD} + X_{FD})^{-1}I_D \quad (4.14)$$

$$\lambda_D = -I_{FD} - I_{SD} + X_D I_D \quad (4.15)$$

$$\lambda_{Fq} = I_{Fq} + X_{Mq}(X_{Mq} + X_{Fq})^{-1}I_{Sq} - (X_{Mq})^2(X_{Mq} + X_{Fq})^{-1}I_q \quad (4.16)$$

$$\lambda_{Sq} = X_{Mq}(X_{Mq} + X_{Sq})^{-1}I_{Fq} + I_{Sq} - (X_{Mq})^2(X_{Mq} + X_{Sq})^{-1}I_q \quad (4.17)$$

$$\lambda_q = -I_{Fq} - I_{Sq} + X_q I_q \quad (4.18)$$

$$E_D = -R_A I_D + \lambda_q \quad (4.19)$$

$$E_q = -R_A I_q - \lambda_D \quad (4.20)$$

$$E_{FD} = I_{FD} + T_{FDO} p\lambda_{FD} \quad (4.21)$$

$$0 = I_{SD} + T_{SDO} p\lambda_{SD} \quad (4.22)$$

$$0 = I_{Fq} + T_{FqO} p\lambda_{Fq} \quad (4.23)$$

$$0 = I_{Sq} + T_{SqO} p\lambda_{Sq} \quad (4.24)$$

โดยที่ค่าคงตัวทางเวลา  $T_{FDO}$   $T_{SDO}$   $T_{FqO}$  และ  $T_{SqO}$  ในสมการ (4.21) - (4.24) มีค่าดังต่อไปนี้

สัญลักษณ์ตัวแปร	สัญลักษณ์ของเบส	คำจำกัดความของเบส
$E_D, E_Q$	$E_{DQB}$	$(3/2)^{1/2} E_P$
$I_D, I_Q$	$I_{DQB}$	$(3/2)^{1/2} I_P$
$\lambda_D, \lambda_Q$	$\lambda_{DQB}$	$E_{DQB} (\omega_B)^{-1}$
$I_{FD}, I_{FQ}$	$I_{FDB}$	$E_{DQB} (\omega_B L_{MD})^{-1}$
$I_{SD}, I_{SQ}$	$I_{FQB}$	$E_{DQB} (\omega_B L_{MQ})^{-1}$
$\lambda_{FD}$	$\lambda_{FDB}$	$(L_{MD} + L_{FD}) E_{DQB} (\omega_B L_{MD})^{-1}$
$\lambda_{SD}$	$\lambda_{SDB}$	$(L_{MD} + L_{SD}) E_{DQB} (\omega_B L_{MD})^{-1}$
$\lambda_{FQ}$	$\lambda_{FQB}$	$(L_{MQ} + L_{FQ}) E_{DQB} (\omega_B L_{MQ})^{-1}$
$\lambda_{SQ}$	$\lambda_{SQB}$	$(L_{MQ} + L_{SQ}) E_{DQB} (\omega_B L_{MQ})^{-1}$
$E_{FD}$	$E_{FDB}$	$R_{FD} I_{FDB}$
	$Z_B$	$E_P / I_P = E_{DQB} / I_{DQB}$
	$S_B$	$(3/2) E_P I_P = E_{DQB} I_{DQB}$

ตารางที่ 4.3 สัญลักษณ์และคำจำกัดความของค่าเบส  
ของตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 C_{1D} &= (X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \\
 C_{2D} &= X_{MD}(X_{MD} + X_{SD})[(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})]^{-1} \\
 C_{3D} &= (X_{MD})^2 X_{SD}(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \\
 C_{4D} &= X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \\
 C_{5D} &= (X_{MD})^2 X_{FD}(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \\
 C_{6D} &= X_{SD}(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \\
 C_{7D} &= X_{FD}(X_{MD} + X_{SD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.4 ค่าคงตัวซึ่งใช้ในสมการไดนามิกในแนวแกนตรง  
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

$$T_{FDO} = (L_{MD} + L_{FD})/R_{FD} \quad (4.25)$$

$$T_{SDO} = (L_{MD} + L_{SD})/R_{SD} \quad (4.26)$$

$$T_{FQO} = (L_{MQ} + L_{FQ})/R_{FQ} \quad (4.27)$$

$$T_{SQO} = (L_{MQ} + L_{SQ})/R_{SQ} \quad (4.28)$$

#### 4.1.2 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรง ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

จากสมการ (4.13) ค่าของ  $I_{FD}$  ในรูปผลบวกเชิงเส้น (linear combination) ของ  $I_{SD}$ ,  $\lambda_{FD}$  และ  $I_D$  มีลักษณะดังสมการ (4.29)

$$I_{FD} = -[X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})^{-1}]I_{SD} + \lambda_{FD} + [(X_{MD})^2(X_{MD} + X_{FD})^{-1}]I_D \quad (4.29)$$

จากสมการ (4.14) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการ (4.30)

$$[X_{MD}(X_{MD} + X_{SD})^{-1}]I_{FD} = -I_{SD} + \lambda_{SD} + [(X_{MD})^2(X_{MD} + X_{SD})^{-1}]I_D \quad (4.30)$$

คูณตลอดสมการ (4.30) ด้วย  $-[X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})^{-1}]$  ได้ผลดังสมการที่ (4.31)

$$\begin{aligned} -\{(X_{MD})^2[(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1}\}I_{FD} = \\ [X_{MD}/(X_{MD} + X_{FD})]I_{SD} - \\ [X_{MD}/(X_{MD} + X_{FD})]\lambda_{SD} - \\ \{(X_{MD})^3[(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1}\}I_D \end{aligned} \quad (4.31)$$

ทำการบวกสมการ (4.30) กับสมการ (4.31) เข้าด้วยกัน ได้ผลดังสมการ (4.32)

$$C_1 I_{FD} = \lambda_{FD} + C_2 \lambda_{SD} + C_3 I_D \quad (4.32)$$

ค่าคงตัว  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ในสมการ (4.32) มีค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
C_1 &= 1 - \{(X_{MD})^2 [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1}\} \\
&= [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD}) - (X_{MD})^2] [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \\
&= [X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD}] [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \quad (4.33)
\end{aligned}$$

$$C_2 = -X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})^{-1} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned}
C_3 &= (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1} - (X_{MD})^3 [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \\
&= [(X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1}] [1 - X_{MD}(X_{MD} + X_{SD})^{-1}] \\
&= (X_{MD})^2 X_{SD} [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \quad (4.35)
\end{aligned}$$

หารตลอดสมการ (4.32) ด้วย  $C_1$  ได้ผลดังสมการ (4.36) กล่าวคือ

$$I_{FD} = C_{1D} \lambda_{FD} - C_{2D} \lambda_{SD} + C_{3D} I_D \quad (4.36)$$

โดยค่าคงตัว  $C_{1D}$   $C_{2D}$  และ  $C_{3D}$  ในสมการ (4.36) มีค่าดังต่อไปนี้

$$C_{1D} = 1/C_1 \quad (4.37)$$

$$C_{2D} = -C_2/C_1 \quad (4.38)$$

$$C_{3D} = C_3/C_1 \quad (4.39)$$

แทนค่า  $C_1$  จากสมการ (4.33) ลงในสมการ (4.37) ได้ผลดังสมการ (4.40)

$$C_{1D} = (X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \quad (4.40)$$

แทนค่า  $C_1$  จากสมการ (4.33) และ  $C_2$  จากสมการ (4.34) ลงในสมการ (4.38) ได้ผลดังสมการ (4.41)

$$\begin{aligned}
C_{2D} &= X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD}) [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})]^{-1} \\
&= X_{MD}(X_{MD} + X_{SD}) [(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})]^{-1} \quad (4.41)
\end{aligned}$$

แทนค่า  $C_1$  จากสมการ (4.33) และ  $C_3$  จากสมการ (4.35) ลงในสมการ (4.39) ได้ผลดังสมการ (4.42)

$$C_{3D} = X_{SD} (X_{MD})^2 (X_{MD} X_{FD} + X_{MD} X_{SD} + X_{FD} X_{SD})^{-1} \quad (4.42)$$

จากสมการ (4.14) ค่าของ  $I_{SD}$  ในรูปผลบวกเชิงเส้นของ  $I_{FD}$   $\lambda_{SD}$  และ  $I_D$  มีค่าดังสมการ (4.43)

$$I_{SD} = -[X_{MD} (X_{MD} + X_{SD})^{-1}] I_{FD} + [X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{SD})^{-1}] I_D + \lambda_{SD} \quad (4.43)$$

จัดรูปสมการ (4.13) เสียใหม่ได้ดังสมการ (4.44)

$$[X_{MD} (X_{MD} + X_{FD})^{-1}] I_{SD} = -I_{FD} + \lambda_{FD} + [(X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1}]^{-1} I_D \quad (4.44)$$

คูณตลอดสมการ (4.43) ด้วย  $-[X_{MD} (X_{MD} + X_{SD})^{-1}]$  ได้ผลดังสมการ (4.45)

$$\begin{aligned} -\{(X_{MD})^2 [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1}\} I_{SD} = \\ [X_{MD}/(X_{MD} + X_{SD})] I_{FD} \quad - \\ [X_{MD}/(X_{MD} + X_{SD})] \lambda_{FD} \quad - \\ \{(X_{MD})^3 [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1}\} I_D \end{aligned} \quad (4.45)$$

ทำการบวกสมการ (4.44) กับสมการ (4.45) เข้าด้วยกันได้ผลดังสมการ (4.46)

$$K_1 I_{SD} = \lambda_{SD} + K_2 \lambda_{FD} + K_3 I_D = 0 \quad (4.46)$$

โดยค่าคงตัว  $K_1$   $K_2$  และ  $K_3$  ในสมการ (4.46) มีค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} K_1 &= 1 - (X_{MD})^2 [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \\ &= C_1 \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$K_2 = -X_{MD} (X_{MD} + X_{SD})^{-1} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} K_3 &= (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{SD})^{-1} - (X_{MD})^3 [(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \\ &= [(X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{SD})^{-1}] [1 - X_{MD} (X_{MD} + X_{FD})^{-1}] \\ &= (X_{MD})^2 X_{FD} [(X_{MD} + X_{SD})(X_{MD} + X_{SD})]^{-1} \end{aligned} \quad (4.49)$$

ถ้าหารตลอดสมการ (4.49) ด้วย  $K_1$  ได้ผลดังสมการ (4.50)

$$I_{SD} = -C_{4D}\lambda_{FD} + C_{1D}\lambda_{SD} + C_{5D}I_D \quad (4.50)$$

โดยค่าคงตัว  $C_{4D}$  และ  $C_{5D}$  ในสมการ (4.50) มีค่าดังต่อไปนี้

$$C_{4D} = -K_2/K_1 \quad (4.51)$$

$$C_{5D} = K_3/K_1 \quad (4.52)$$

แทนค่า  $K_1$  จากสมการ (4.47) และ  $K_2$  จากสมการ (4.48) ลงในสมการ (4.51) ได้ผลดังสมการ (4.53)

$$C_{4D} = X_{MD}(X_{MD} + X_{FD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \quad (4.53)$$

แทนค่า  $K_1$  จากสมการ (4.47) และ  $K_3$  จากสมการ (4.49) ลงในสมการ (4.52) ได้ผลดังสมการ (4.54)

$$C_{5D} = (X_{MD})^2 X_{FD}(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \quad (4.54)$$

แทนค่า  $I_{FD}$  จากสมการ (4.36) และ  $I_{SD}$  จากสมการ (4.50) ลงในสมการ (4.15) ได้ผลดังสมการ (4.55)

$$\begin{aligned} \lambda_D &= -C_{1D}\lambda_{FD} + C_{2D}\lambda_{SD} + C_{3D}I_D + \\ &\quad C_{4D}\lambda_{FD} - C_{1D}\lambda_{SD} - C_{5D}I_D + X_D I_D \\ &= -(C_{1D} - C_{4D})\lambda_{FD} - (C_{1D} - C_{2D})\lambda_{SD} + (X_D - C_{3D} - C_{5D})I_D \\ &= -C_{6D}\lambda_{FD} - C_{7D}\lambda_{SD} + X_D'' I_D \end{aligned} \quad (4.55)$$

ค่าคงตัว  $C_{6D}$  และ  $C_{7D}$  ในสมการ (4.55) มีค่าดังสมการ (4.56) และสมการ (4.57) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} C_{6D} &= C_{1D} - C_{4D} \\ &= (X_{MD} + X_{FD})(X_{MD} + X_{SD} - X_{MD})(X_{MD}X_{FD} + X_{MD}X_{SD} + X_{FD}X_{SD})^{-1} \end{aligned}$$

$$= X_{SD} (X_{MD} + X_{FD}) (X_{MD} X_{FD} + X_{MD} X_{SD} + X_{FD} X_{SD})^{-1} \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} C_{7D} &= C_{1D} - C_{2D} \\ &= (X_{MD} + X_{SD}) (X_{MD} + X_{FD} - X_{MD}) (X_{MD} X_{FD} + X_{MD} X_{SD} + X_{FD} X_{SD})^{-1} \\ &= X_{FD} (X_{MD} + X_{SD}) (X_{MD} X_{FD} + X_{MD} X_{SD} + X_{FD} X_{SD})^{-1} \end{aligned} \quad (4.57)$$

ในสมการ (4.55) นั้น  $\tilde{X}_D$  มีค่าดังสมการ (4.58) [จากสมการ (ก.4)]

$$\tilde{X}_D = X_D - C_{3D} - C_{5D} \quad (4.58)$$

เนื่องจากพังก์ชันคลื่นในแนวแกนตรงที่สเตเตอร์ในช่วงขั้วทรานเซียนต์หรือ  $\tilde{\lambda}_D$  ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.59) [8]

$$\tilde{\lambda}_D = \lambda_D - \tilde{X}_D I_D \quad (4.59)$$

แทนค่า  $\lambda_D$  จากสมการ (4.55) ลงในสมการ (4.59) ได้ผลดังสมการ (4.60)

$$\tilde{\lambda}_D = -C_{6D} \lambda_{FD} - C_{7D} \lambda_{SD} \quad (4.60)$$

แรงดันเชิงอัตราเร็ว อันเป็นผลมาจากพังก์ชันคลื่นในแนวแกนตรง ในช่วงขั้วทรานเซียนต์หรือ  $\tilde{E}_Q$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.61) [8]

$$\tilde{E}_Q = -\omega \tilde{\lambda}_D \quad (4.61)$$

เนื่องจากในแบบจำลองชนิดที่ 5 นี้ แรงดันในสมการ (4.61) ได้รับการกำหนดให้คิดที่ความเร็วเชิงโครนอส ดังนั้น

$$\begin{aligned} \tilde{E}_Q &= -\tilde{\lambda}_D \\ &= C_{6D} \lambda_{FD} + C_{7D} \lambda_{SD} \end{aligned} \quad (4.62)$$

แทนค่า  $C_{6D} \lambda_{FD} + C_{7D} \lambda_{SD}$  ในสมการ (4.55) ด้วย  $\tilde{E}_Q$  จากสมการ (4.62) ได้ผลดังสมการ (4.63)



$$\lambda_D = \dot{X}_D I_D - \dot{E}_Q \quad (4.63)$$

แทนค่า  $\lambda_D$  จากสมการ (4.63) ลงในสมการ (4.20) ได้ผลดังสมการ (4.64)

$$E_Q = -R_A I_Q - \dot{X}_D I_D + \dot{E}_Q \quad (4.64)$$

สมการ (4.64) นี้คือสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

ในสมการ (4.36) ส่วนของ  $I_{FD}$  ที่ขึ้นกับพลาซมัลต์คล็องในแนวแกนตรงคือ  $C_{1D} \lambda_{FD} - C_{2D} \lambda_{SD}$  ถ้านำเอาผลของการอิ่มตัว (saturation effects) มาประกอบการพิจารณาด้วย จะต้องแก้ไขสมการดังกล่าวให้มีลักษณะดังสมการ (4.65)<sup>[6]</sup>

$$I_{FD} = (1+F_S)(C_{1D} \lambda_{FD} - C_{2D} \lambda_{SD}) + C_{3D} I_D \quad (4.65)$$

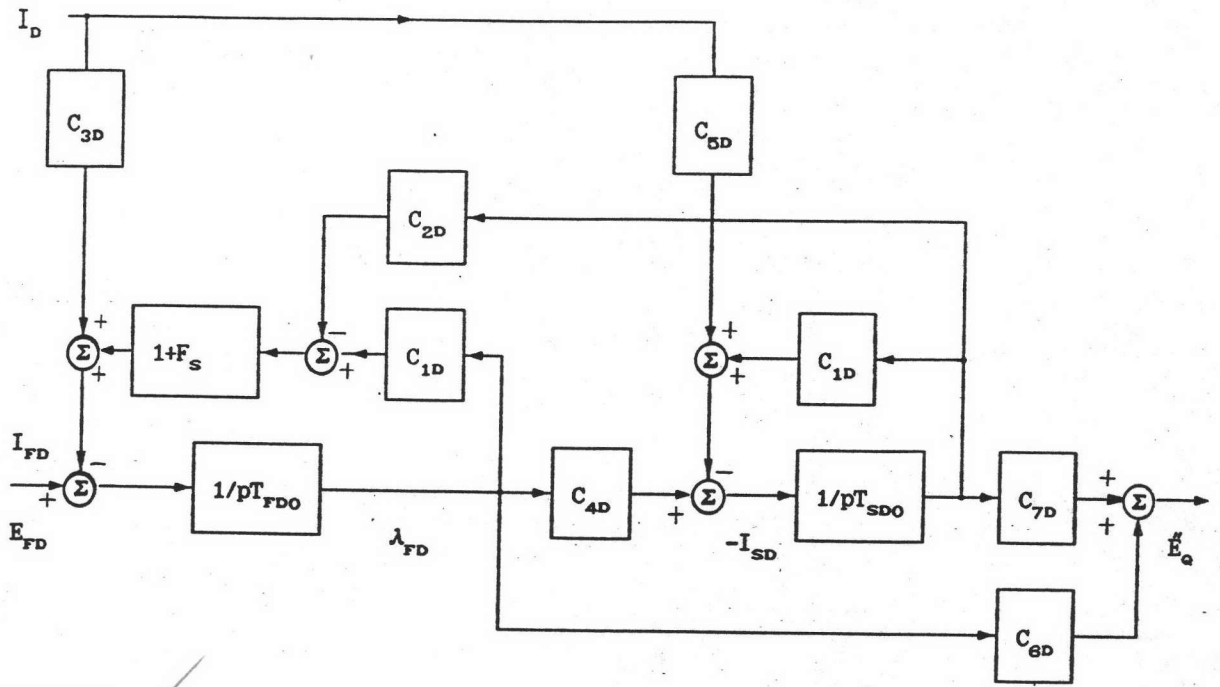
การหาค่า  $F_S$  ในสมการ (4.65) ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ (4.7)

บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งสร้างมาจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากสมการ (4.21), (4.22), (4.62), (4.36), (4.60) และ (4.65) มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 ค่าคงตัวในรูปดังกล่าวมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 4.4

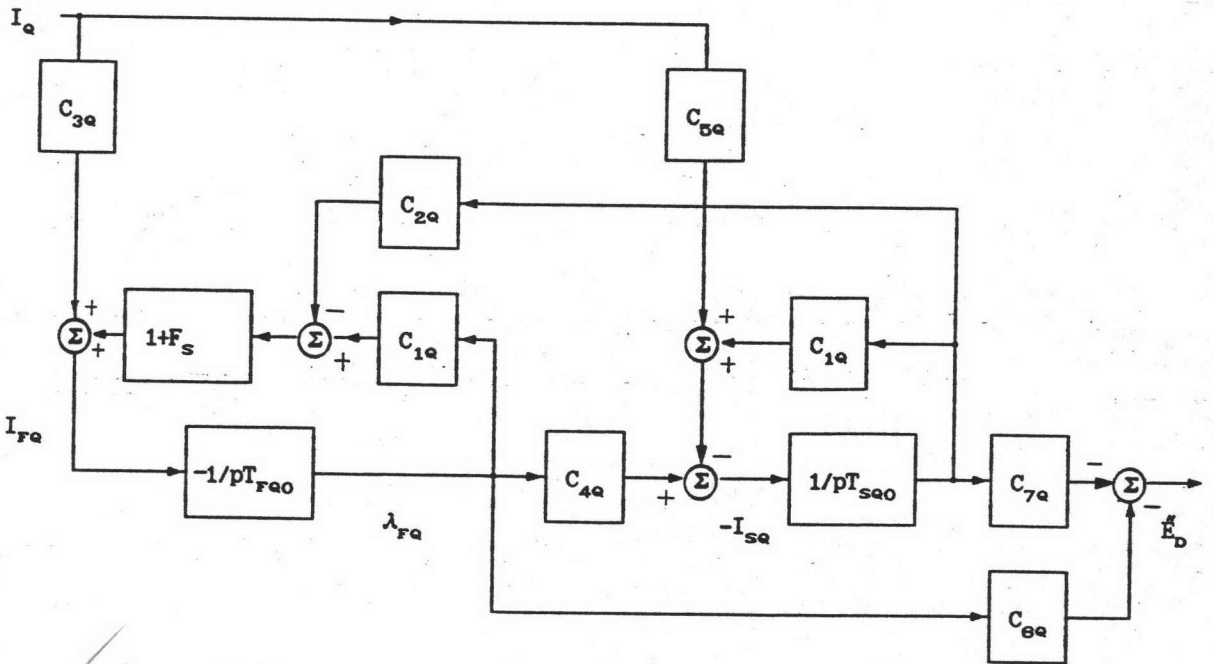
ค่าคงตัว  $C_{1D} - C_{7D}$  ของแบบจำลองชนิดที่ 5 ซึ่งอยู่ในรูปของ  $\dot{X}_D$ ,  $X'_D$  และ  $X_A$  มีค่าดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค)

#### 4.1.3 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

ค่าคงตัว  $C_{1D} - C_{7D}$  ในหัวข้อ 4.1.2 เป็นค่าคงตัวซึ่งหามาจากสมการพลาซมัลต์คล็องในแนวแกนตรง สมการดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับสมการพลาซมัลต์คล็องในแนวแกนตั้งฉาก ดังนั้นการหาค่า  $C_{1Q} - C_{7Q}$  จึงสามารถทำได้โดยการเลียนแบบการหาค่า  $C_{1D} - C_{7D}$  ในหัวข้อ 4.1.2 โดยการเลียนแบบสมการ (4.36) สมการ (4.43) และสมการ (4.45)



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรง  
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉาก  
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

$$\begin{aligned}
 C_{1D} &= 1 + (X_D - X'_D)(X'_D - X''_D)(X'_D - X_A)^{-2} \\
 C_{2D} &= (X_D - X'_D)(X'_D - X_A)^{-1} [(X'_D - X''_D)(X'_D - X_A)^{-1} + \\
 &\quad (X''_D - X_A)(X_D - X_A)^{-1}] \\
 C_{3D} &= (X_D - X'_D)(X''_D - X_A)(X'_D - X_A)^{-1} \\
 C_{4D} &= (X_D - X_A)(X'_D - X''_D)(X'_D - X_A)^{-2} \\
 C_{5D} &= (X_D - X_A)(X'_D - X''_D)(X'_D - X_A)^{-1} \\
 C_{6D} &= (X''_D - X_A)(X'_D - X_A)^{-1} \\
 C_{7D} &= (X'_D - X''_D)(X'_D - X_A)^{-1} + (X''_D - X_A)(X_D - X_A)^{-1}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.5 ค่าคงตัวในสมการไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5  
ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรีเอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 C_{1Q} &= 1 + (X_Q - X'_Q)(X'_Q - X''_Q)(X'_Q - X_A)^{-2} \\
 C_{2Q} &= (X_Q - X'_Q)(X'_Q - X_A)^{-1} [(X'_Q - X''_Q)(X'_Q - X_A)^{-1} + \\
 &\quad (X''_Q - X_A)(X_Q - X_A)^{-1}] \\
 C_{3Q} &= (X_Q - X'_Q)(X''_Q - X_A)(X'_Q - X_A)^{-1} \\
 C_{4Q} &= (X_Q - X_A)(X'_Q - X''_Q)(X'_Q - X_A)^{-2} \\
 C_{5Q} &= (X_Q - X_A)(X'_Q - X''_Q)(X'_Q - X_A)^{-1} \\
 C_{6Q} &= (X''_Q - X_A)(X'_Q - X_A)^{-1} \\
 C_{7Q} &= (X'_Q - X''_Q)(X'_Q - X_A)^{-1} + (X''_Q - X_A)(X_Q - X_A)^{-1}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.6 ค่าคงตัวในสมการไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5  
ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรีเอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ได้สมการแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 มีดังนี้

$$I_{Fq} = C_{1q}\lambda_{Fq} - C_{2q}\lambda_{Sq} + C_{3q}I_q \quad (4.66)$$

$$I_{Sq} = -C_{4q}\lambda_{Fq} + C_{1q}\lambda_{Sq} + C_{5q}I_q \quad (4.67)$$

$$\lambda_q = -C_{6q}\lambda_{Fq} - C_{7q}\lambda_{Sq} + X'_q I_q \quad (4.68)$$

โดยค่าคงตัว  $C_{1q} - C_{7q}$  มีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 4.6 จากการเขียนแบบสมการ (4.58) พบว่า  $X'_q$  ในสมการ (4.68) มีค่าดังสมการ (4.69)

$$X'_q = X_q - C_{3q} - C_{5q} \quad (4.69)$$

เนื่องจากฟลักซ์คัล่องในแนวแกนตั้งฉากที่สเตเตอร์ในช่วงชั้บทรานเซียนต์หรือ  $\lambda'_q$  ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.70) [6]

$$\lambda'_q = \lambda_q - X'_q I_q \quad (4.70)$$

แทนค่า  $\lambda_q$  จากสมการ (4.68) ลงในสมการ (4.70) ได้  $\lambda'_q$  ดังสมการ (4.71)

$$\lambda'_q = -C_{6q}\lambda_{Fq} - C_{7q}\lambda_{Sq} \quad (4.71)$$

แรงดันเชิงอัตราเร็วอันเกิดจากฟลักซ์คัล่องในแนวแกนตั้งฉากในช่วงชั้บทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 หรือ  $E'_D$  ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.72) [6]

$$E'_D = \omega \lambda'_q \quad (4.72)$$

เนื่องจากในแบบจำลองชนิดที่ 5 นี้ แรงดันในสมการ (4.72) ได้รับการกำหนดให้คิดที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ดังนั้น

$$\begin{aligned} E'_D &= \lambda'_q \\ &= -C_{6q}\lambda_{Fq} - C_{7q}\lambda_{Sq} \end{aligned} \quad (4.73)$$

แทนค่า  $\dot{E}_D$  จากสมการ (4.73) ลงในสมการ (4.68) ได้ผลดังสมการ (4.74)

$$\lambda_Q = \dot{X}_Q I_Q + \dot{E}_D \quad (4.74)$$

แทนค่า  $\lambda_Q$  จากสมการ (4.74) ลงในสมการ (4.19) ได้ผลดังสมการ (4.75)

$$E_D = -R_A I_D + \dot{X}_Q I_Q + \dot{E}_D \quad (4.75)$$

สมการ (4.75) นี้คือสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5

ในสมการที่ (4.66) ส่วนของ  $I_{FQ}$  ที่ขึ้นกับพรีคัลลิ่งในแนวแกนตั้งฉากจากสเตเตอร์คือ  $C_{1Q} \lambda_{FQ} - C_{2Q} \lambda_{SQ}$  ถ้าหากนำเอาผลของการอิมิตัวทางแม่เหล็กมาประกอบการพิจารณาด้วย ต้องแก้ไขสมการดังกล่าวให้มีลักษณะดังสมการ (4.76) <sup>[6]</sup>

$$I_{FQ} = (1+F_S)(C_{1Q} \lambda_{FQ} - C_{2Q} \lambda_{SQ}) + C_{3Q} I_Q \quad (4.76)$$

บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งสร้างมาจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากสมการ (4.20), (4.24) (4.66), (4.73) และ (4.76) มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 ค่าคงตัวในรูปดังกล่าวมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 4.5

## 4.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

### 4.2.1 สมการพรีคัลลิ่งและสมการแรงดันของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

สมการพรีคัลลิ่งและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ในระบบเปอร์ยูนิตซึ่งพิจารณาจากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 มีดังต่อไปนี้

$$\lambda_{FD} = I_{FD} - (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1} I_D \quad (4.77)$$

$$\lambda_D = -I_{FD} + X_D I_D \quad (4.78)$$

$$\lambda_{FQ} = I_{FQ} - (X_{MQ})^2 (X_{MQ} + X_{FQ})^{-1} I_Q \quad (4.79)$$

$$\lambda_Q = -I_{FQ} + X_Q I_Q \quad (4.80)$$

$$E_D = -R_A I_D + \lambda_Q \quad (4.81)$$

$$E_Q = -R_A I_Q - \lambda_D \quad (4.82)$$

$$E_{FD} = I_{FD} + T_{FDO} \lambda_{FD} \quad (4.83)$$

$$0 = I_{FQ} + T_{FQO} \lambda_{FQ} \quad (4.84)$$

โดยที่  $T_{FDO}$  ในสมการ (4.83) และ  $T_{FQO}$  ในสมการ (4.84) มีค่าดังสมการ (4.85) และสมการที่ (4.86) ตามลำดับ

$$T_{FDO} = T''_{DO} = (L_{MD} + L_{FD}) / R_{FD} \quad (4.85)$$

$$T_{FQO} = T''_{QO} = (L_{MQ} + L_{FQ}) / R_{FQ} \quad (4.86)$$

#### 4.2.2 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรง ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

จากการจัดรูปสมการที่ (4.77) ใหม่ได้ผลดังสมการที่ (4.87)

$$I_{FD} = \lambda_{FD} + (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1} I_D \quad (4.87)$$

แทนค่า  $I_{FD}$  จากสมการ (4.87) ลงในสมการ (4.78) ได้ผลดังสมการ (4.88)

$$\lambda_D = -\lambda_{FD} + [X_D - (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1}] I_D \quad (4.88)$$

เนื่องจาก [จากสมการ (ก.4) ของภาคผนวก ก]

$$X'_D = X_D - (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1} \quad (4.89)$$

แทนค่า  $X_D - (X_{MD})^2 (X_{MD} + X_{FD})^{-1}$  ในสมการ (4.88) ด้วย  $X'_D$  จากสมการ (4.89) ได้ผลดังสมการ (4.90)

$$\lambda_D = -\lambda_{FD} + X'_D I_D \quad (4.90)$$

แทนค่า  $\lambda_D$  จากสมการ (4.90) ลงในสมการ (4.82) ได้ผลดังสมการ (4.91)

$$E_Q = -R_A I_Q + \lambda_{FD} - X'_D I_D \quad (4.91)$$

จากการจัดรูปสมการ (4.90) ใหม่ได้ผลดังสมการ (4.92)

$$\lambda_D - X'_D I_D = -\lambda_{FD} \quad (4.92)$$

เนื่องจากพลาซ์คัลลิ่งในแนวแกนตรงที่สเตเตอร์ในช่วงทรานเซียนต์ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการที่ (4.93)

$$\lambda'_D = \lambda_D - X'_D I_D \quad (4.93)$$

แทนค่า  $\lambda_D - X'_D I_D$  จากสมการ (4.93) ลงในสมการ (4.92) ได้ผลดังสมการที่ (4.94)

$$\lambda'_D = -\lambda_{FD} \quad (4.94)$$

แรงดันเชิงอัตราเร็วอันเป็นผลมาจากพลาซ์คัลลิ่งในแนวแกนตรงในช่วงทรานเซียนต์ หรือ  $E'_Q$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.95)<sup>[6]</sup>

$$E'_Q = -\omega \lambda'_D \quad (4.95)$$

เนื่องจากค่าของแรงดันในสมการ (4.95) ได้รับการกำหนดให้คิดที่ความเร็วเชิงโรตารี ดังนั้น

$$\begin{aligned} E'_Q &= -\lambda'_D \\ &= \lambda_{FD} \end{aligned} \quad (4.96)$$

แทนค่า  $\lambda_{FD}$  ในสมการ (4.91) ด้วย  $E'_Q$  จากสมการ (4.96) ได้ผลดังสมการ (4.97)

$$E_Q = -R_A I_Q - X'_D I_D + E'_Q \quad (4.97)$$



สมการ (4.97) นี้คือสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

ถ้าหากนำเอาผลของการอ้อมตัวทางแม่เหล็กมาประกอบการพิจารณาด้วย ต้องแก้ไขสมการ (4.87) ให้มีลักษณะดังสมการ (4.98) [6]

$$\begin{aligned} I_{FD} &= (1+F_S)\lambda_{FD} + (X_{MD})^2(X_{MD} + X_{FD})^{-1}I_D \\ &= (1+F_S)\lambda_{FD} - (X_D - X'_D)I_D \end{aligned} \quad (4.98)$$

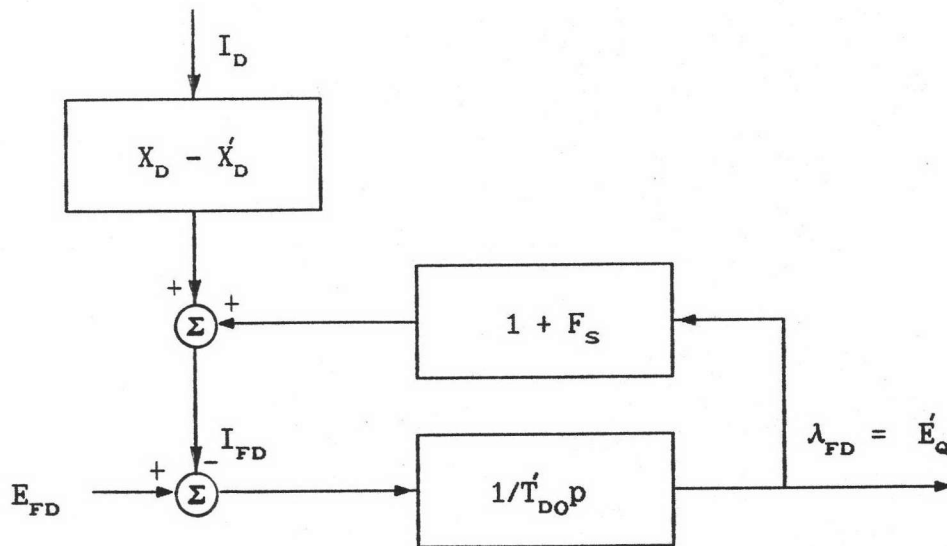
จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการ (4.83) สมการ (4.96) และสมการ (4.98) จึงได้บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.5

การหาค่า  $C_{1D} - C_{7D}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ทำได้โดยการเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.5 กับบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.3 จากการเปรียบเทียบดังกล่าวพบว่าค่าคงตัว  $C_{1D} - C_{7D}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 มีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 4.7

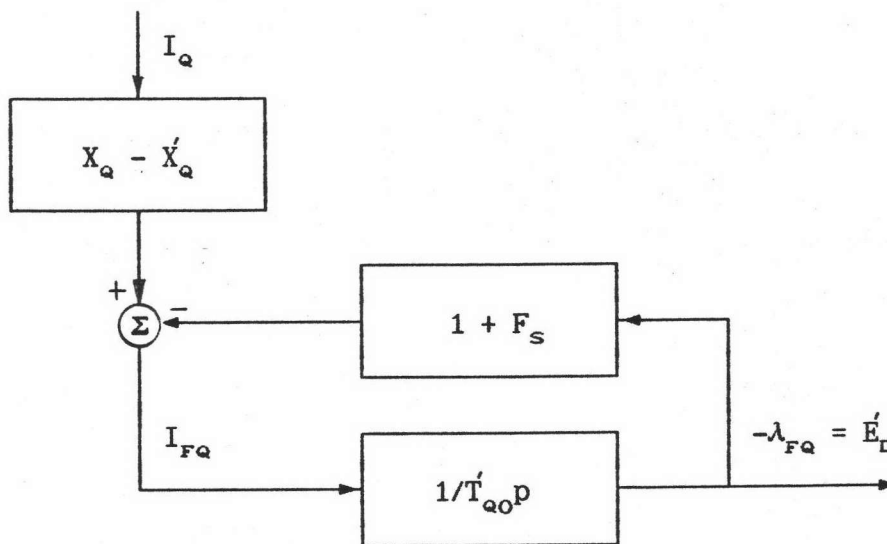
#### 4.2.3 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

จากการพิจารณาวงจรสมมูลแนวแกนตรงและวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 พบว่าวงจรทั้งสองคล้ายกันมาก ส่วนที่แตกต่างกันของวงจรทั้งสองมีอยู่ 2 ประการ ประการแรกแหล่งจ่ายแรงดันที่วงจรสมมูลของสเตเตอร์ กล่าวคือ  $\omega\lambda_q$  และ  $\omega\lambda_D$  มีลักษณะการต่อกลับขั้วกัน ประการที่ 2 วงจรสมมูลแนวแกนตรงของโรเตอร์มีแหล่งจ่ายแรงดัน  $E_{FD}$  ในขณะที่วงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากไม่มีแหล่งจ่ายแรงดัน แหล่งจ่ายแรงดันไม่มีผลต่อรูปของสมการพลาซัคคล็อง แต่มีผลต่อรูปของสมการแรงดัน ด้วยเหตุนี้การหาความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 สามารถใช้วิธีการเลียนแบบการหาความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ได้

โดยใช้วิธีการเลียนแบบการหาความสัมพันธ์เชิงไดนามิกของตัวแปรต่าง ๆ ในหัวข้อ 4.2.2 ได้ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ตามที่



รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิก  
ในแนวแกนตรง ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิก  
ในแนวแกนตั้งฉาก ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

แบบจำลองชนิดที่	2 และ 4	3 และ 5
$C_{1D}$	1	$1 + \frac{(X_D - X'_D)(X'_D - X''_D)}{(X'_D - X_A)^2}$
$C_{2D}$	0	$\frac{(X_D - X'_D)(X'_D - X''_D)}{(X'_D - X_A)^2} + \frac{(X_D - X'_D)(X''_D - X_A)}{(X'_D - X_A)(X_D - X_A)}$
$C_{3D}$	$(X_D - X'_D)$	$\frac{(X_D - X'_D)(X''_D - X_A)}{(X'_D - X_A)}$
$C_{4D}$	0	$\frac{(X_D - X_A)(X'_D - X''_D)}{(X'_D - X_A)^2}$
$C_{5D}$	0	$\frac{(X_D - X_A)(X'_D - X''_D)}{(X'_D - X_A)}$
$C_{6D}$	1	$\frac{(X''_D - X_A)}{(X'_D - X_A)}$
$C_{7D}$	0	$\frac{(X'_D - X''_D)}{(X'_D - X_A)} + \frac{(X''_D - X_A)}{(X_D - X_A)}$

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงตัวในสมการเชิงไดนามิกในแนวแกนตรง  
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

แสดงในรูปที่ 4.6

การหาค่า  $C_{1q} - C_{7q}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ทำได้โดยการเปรียบเทียบแบบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.6 กับบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.4 จากการเปรียบเทียบดังกล่าวพบว่าค่าคงตัว  $C_{1q} - C_{7q}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 มีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 4.8

สมการพังก์ชันคลื่นในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ซึ่งได้จากการเขียนแบบสมการพังก์ชันคลื่นในแนวแกนตรงในสมการ (4.90) มีลักษณะดังสมการ (4.99)

$$\lambda_q = -\lambda_{Fq} + X'_q I_q \quad (4.99)$$

โดยที่  $X'_q$  ในสมการ (4.99) มีค่าดังสมการ (4.100)

$$X'_q = X_q - (X_{Mq})^2 (X_{Mq} + X_{Fq})^{-1} \quad (4.100)$$

แรงดันเชิงอัตราเร็วอันเป็นผลมาจากพังก์ชันคลื่นในแนวแกนตั้งฉากในช่วงทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 หรือ  $E'_D$  ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.101)

$$E'_D = \lambda'_q \quad (4.101)$$

โดยที่  $\lambda'_q$  ในสมการ (4.101) มีค่าดังสมการ (4.102)

$$\lambda'_q = \lambda_q - X'_q I_q \quad (4.102)$$

แทนค่า  $\lambda'_q$  จากสมการ (4.101) ลงในสมการ (4.102) ได้ผลดังสมการ (4.103)

$$\lambda_q = E'_D + X'_q I_q \quad (4.103)$$

แทนค่า  $\lambda_q$  จากสมการ (4.103) ลงในสมการ (4.81) ได้ผลดังสมการ (4.104)

$$E_D = -R_A I_D + X'_q I_q + E'_D \quad (4.104)$$

สมการ (4.104) นี้คือสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4

### 4.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลแนวแกนตรง (direct axis equivalent circuit) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 เหมือนกับวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 แต่วงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก (quadrature axis equivalent circuit) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองชนิดดังกล่าวมีลักษณะแตกต่างกัน

#### 4.3.1 สมการพลักซ์คัลล์องและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3

เนื่องจากวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 เหมือนกับวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ดังนั้นสมการพลักซ์คัลล์องและสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองชนิดจึงเหมือนกัน ด้วยเหตุนี้จึงไม่ได้นำมาแสดงในหัวข้อนี้ อีก สมการพลักซ์คัลล์องและสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 มีดังต่อไปนี้

$$\lambda_{sq} = I_{sq} - (X_{Mq})^2 (X_{Mq} + X_{sq})^{-1} I_q \quad (4.105)$$

$$\lambda_q = -I_{sq} + X_q I_q \quad (4.106)$$

$$0 = I_{sq} + T_{sq0} p \lambda_{sq} = I_{sq} + T'_{q0} p \lambda_{sq} \quad (4.107)$$

#### 4.3.2 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3

ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 เหมือนกับความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ดังนั้น บล็อกไดอะแกรม ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 จึงใช้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ได้

### 4.3.3 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉาก ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3

สมการแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉาก ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 หามาจากสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าวซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 ที่มาของสมการแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.3 นี้

จากการจัดรูปสมการที่ (4.105) ใหม่ ได้ผลดังสมการ (4.108)

$$I_{sq} = \lambda_{sq} + (X_{mq})^2 (X_{mq} + X_{sq})^{-1} I_q \quad (4.108)$$

แทนค่า  $I_{sq}$  จากสมการ (4.108) ลงในสมการ (4.106) ได้ผลดังสมการ (4.109)

$$\begin{aligned} \lambda_q &= -\lambda_{sq} + [X_q - (X_{mq})^2 (X_{mq} + X_{sq})^{-1}] I_q \\ &= -\lambda_{sq} + X'_q I_q \end{aligned} \quad (4.109)$$

โดยที่  $X'_q$  ในสมการ (4.109) มีค่าดังสมการ (4.110)

$$X'_q = X_q - (X_{mq})^2 (X_{mq} + X_{sq})^{-1} \quad (4.110)$$

จากการจัดรูปสมการ (4.110) เสียใหม่ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (4.111)

$$X_q - X'_q = (X_{mq})^2 (X_{mq} + X_{sq})^{-1} \quad (4.111)$$

แทนค่า  $X_q - X'_q$  จากสมการ (4.111) ลงในสมการ (4.108) ได้ผลดังสมการ (4.112)

$$I_{sq} = \lambda_{sq} + (X_q - X'_q) I_q \quad (4.112)$$

พลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ในช่วงขั้นตอนการเปลี่ยนค่าได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.113)

$$\lambda'_q = \lambda_q - X'_q I_q \quad (4.113)$$

แทนค่า  $\lambda'_q$  จากสมการ (4.109) ลงในสมการ (4.113) ได้ผลดังสมการ (4.114)

$$\lambda'_q = -\lambda_{sq} \quad (4.114)$$

แรงดันเชิงอัตราเร็วอื่นเป็นผลมาจากฟลักซ์ค้ำองในแนวแกนตั้งฉากในช่วงขั้วทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.115)

$$\dot{E}'_D = \lambda''_q \quad (4.115)$$

แทนค่า  $\lambda''_q$  จากสมการ (4.114) ลงในสมการ (4.115) ได้ผลดังสมการ (4.116)

$$\dot{E}'_D = -\lambda_{sq} \quad (4.116)$$

สมการแรงดันของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 มีลักษณะดังสมการ (4.117)

$$E_D = -R_A I_D + \lambda_q \quad (4.117)$$

แทนค่า  $\lambda_q$  จากสมการ (4.109) ลงในสมการ (4.117) ได้ผลดังสมการ (4.118)

$$E_D = -R_A I_D + X'_q I_q - \lambda_{sq} \quad (4.118)$$

แทนค่า  $\lambda_{sq}$  จากสมการ (4.116) ลงในสมการ (4.118) ได้ผลดังสมการ (4.119)

$$E_D = -R_A I_D + X'_q I_q + \dot{E}'_D \quad (4.119)$$

สมการ (4.119) นี้คือสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3



จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการ (4.107) สมการ (4.112) และสมการ (4.112) จึงได้บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.7

การหาค่า  $C_{1q} - C_{7q}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 ทำได้โดยการเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.7 กับบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.4 จากการเปรียบเทียบดังกล่าวพบว่าค่าคงตัว  $C_{1q} - C_{7q}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 มีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 4.8

#### 4.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 เหมือนกับวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 แต่วงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองชนิดดังกล่าวมีลักษณะต่างกัน

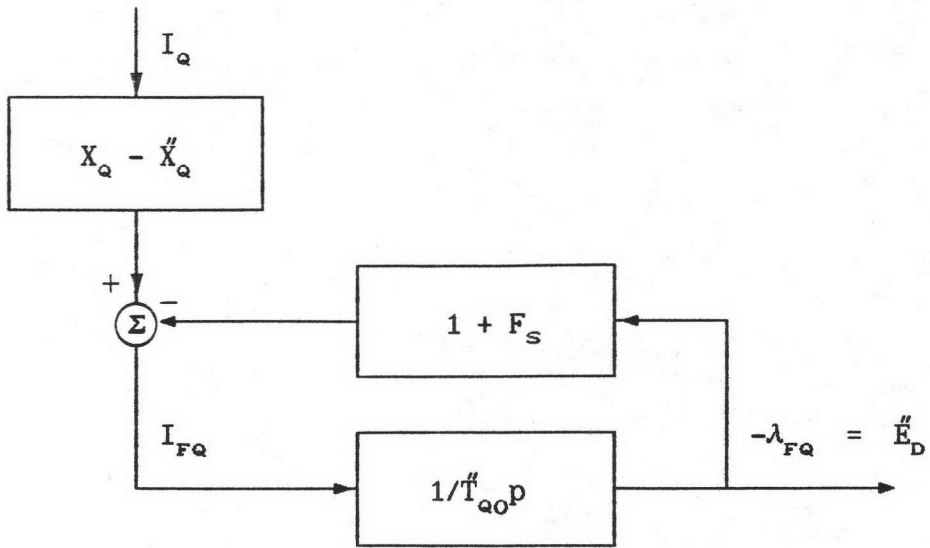
##### 4.4.1 สมการพลาซ์คัลลิ่งและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2

เนื่องจากวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 เหมือนกับวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 ดังนั้นสมการพลาซ์คัลลิ่งและสมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองชนิดจึงเหมือนกันด้วย ด้วยเหตุนี้จึงไม่นำมาแสดงในหัวข้อนี้

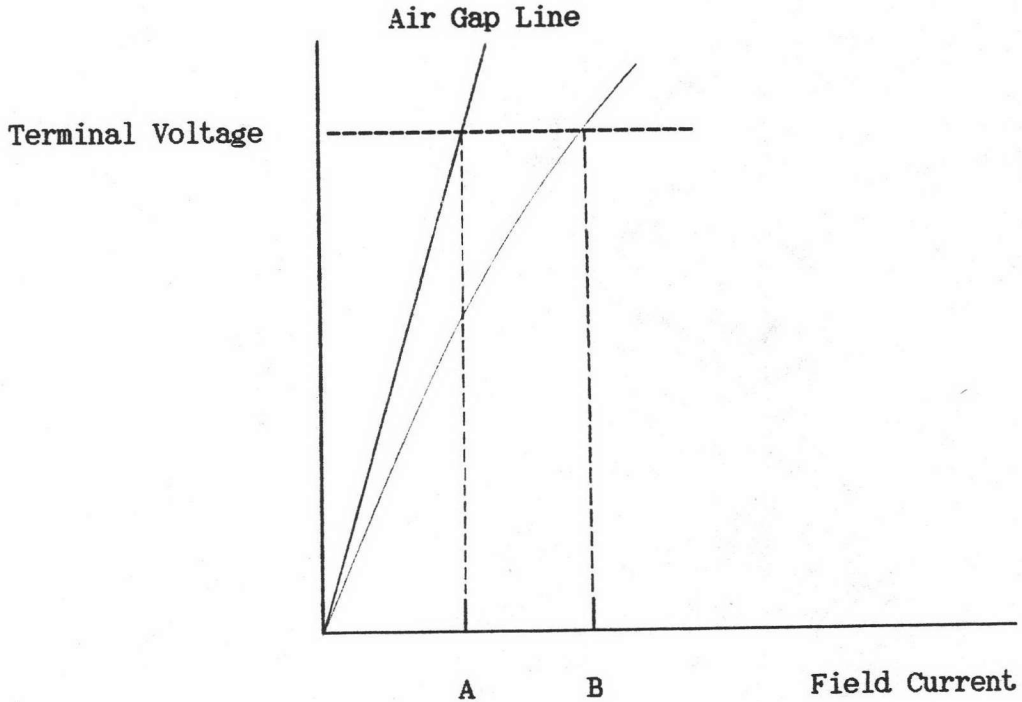
พลาซ์คัลลิ่งในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 ได้รับการกำหนดให้มีค่าคงที่ จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 สมการพลาซ์คัลลิ่งของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 มีลักษณะดังสมการ (4.120)

$$\lambda_q = X_q I_q \quad (4.120)$$

สมการแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 มีลักษณะดังสมการที่ (4.121)



รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิกในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างเส้นโค้งของการอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองชนิดที่	2	3	4
$C_{1q}$	1	1	1
$C_{2q}$	0	0	0
$C_{3q}$	0	0	$X_q - X'_q$
$C_{4q}$	0	0	0
$C_{5q}$	0	$X_q - X'_q$	0
$C_{6q}$	0	0	1
$C_{7q}$	0	1	0

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าคงตัวในสมการไดนามิกในแนวแกนตั้งฉาก  
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

Model No.	$\ddot{E}_D$	$\ddot{E}_q$	$\ddot{X}_D$	$\ddot{X}_q$
1	-	$\dot{E}$	$\dot{X}_D$	$\dot{X}_D$
2	-	$\dot{E}_q$	$X_q$	$\dot{X}_D$
3	$\ddot{E}_D$	$\ddot{E}_q$	$\ddot{X}_q$	$\ddot{X}_D$
4	$\dot{E}_D$	$\dot{E}_q$	$\dot{X}_q$	$\dot{X}_D$
5	$\ddot{E}_D$	$\ddot{E}_q$	$\ddot{X}_q$	$\ddot{X}_D$

ตารางที่ 4.9 แสดงการสมนัยกันของแรงดันภายในและค่ารีแอกแตนซ์  
ในสมการแรงดันภายใน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

$$E_D = -R_A I_D + X_D I_Q \quad (4.121)$$

#### 4.5 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 1

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 1 เป็นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด เพราะพลักซ์ค้ำลงในแนวแกนตรงและแกนตั้งฉากได้รับการสมมติให้มีค่าคงที่ ในการวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลังในโดเมนความถี่เชิงซ้อน จึงไม่ต้องหาความสัมพันธ์เชิงไดนามิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 1

สมการที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 1 ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง ในโดเมนความถี่เชิงซ้อน คือสมการแรงดันภายในสมการดังกล่าวมีลักษณะดังนี้

$$E' \cos \delta = E'_R = R_A I_R - X_D I_I + E_{TR} \quad (4.122)$$

$$E' \sin \delta = E'_I = R_A I_I + X_D I_R + E_{TI} \quad (4.123)$$

ทำการประมาณค่าสมการ (4.122) และสมการ (4.123) แบบเชิงเส้น ได้ผลดังสมการ (4.124) และ สมการ (4.125) ตามลำดับ

$$\Delta E'_R = -E'_O \sin \delta_0 = R_A \Delta I_R - X_D \Delta I_I + \Delta E_{TR} \quad (4.124)$$

$$\Delta E'_I = -E'_O \cos \delta_0 = R_A \Delta I_I + X_D \Delta I_R + \Delta E_{TI} \quad (4.125)$$

#### 4.6 รูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันของวงจรมุมของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมการแรงดันของวงจรมุมของสเตเตอร์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ มีลักษณะแตกต่างกันไป ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อขั้นตอนวิธีในการวิเคราะห์ การหารูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันดังกล่าว เป็นการทำให้การวิเคราะห์สะดวกขึ้นมาก

สมการแรงดันของวงจรมุมของสเตเตอร์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ได้นำมาแสดงอีกครั้งในตารางที่ 4.11 จากตารางที่ 4.11 พบว่ารูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันดังกล่าวสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 มีลักษณะดังสมการ (4.126) สมการดังกล่าว

สามารถใช้เป็นรูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันของวงจรสมมูลของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2-4 ได้เช่นกัน โดยต้องแทนที่  $\dot{E}_D$   $\dot{E}_Q$   $X'_D$   $X'_Q$  ในสมการดังกล่าวด้วยตัวแปรตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

$$\begin{bmatrix} \dot{E}'_D \\ \dot{E}'_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{TD} \\ E_{TQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_A & -X'_Q \\ X'_D & R_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (4.126)$$

สมการ (4.126) เป็นสมการในระบบโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีความจำเป็นต้องทำการแปลงโคออร์ดิเนต (coordinates transformation) สมการดังกล่าวไปสู่โคออร์ดิเนตอ้างอิงโดยใช้วิธีการแปลงโคออร์ดิเนตดังตัวอย่างที่ได้แสดงในตารางที่ 4.10 การแปลงโคออร์ดิเนตสมการ (4.126) จากโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโคออร์ดิเนตอ้างอิงได้ผลดังสมการ (4.127)

$$\begin{bmatrix} \sin\delta & \cos\delta \\ -\cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}'_D \\ \dot{E}'_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_R \\ E_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_I \end{bmatrix} \quad (4.127)$$

โดยที่

$$Z_{11} = R_A - (X'_D - X'_Q) \sin\delta \cos\delta \quad (4.128)$$

$$Z_{12} = -X'_D \sin^2\delta - X'_Q \cos^2\delta \quad (4.129)$$

$$Z_{21} = X'_D \cos^2\delta + X'_Q \sin^2\delta \quad (4.130)$$

$$Z_{22} = R_A + (X'_D - X'_Q) \sin\delta \cos\delta \quad (4.131)$$

$$\begin{bmatrix} E_R \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\delta & \cos\delta \\ -\cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_D \\ E_Q \end{bmatrix}$$

Generator Coordinates to Reference Coordinates

$$\begin{bmatrix} E_D \\ E_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\delta & -\cos\delta \\ \cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R \\ E_I \end{bmatrix}$$

Reference Coordinates to Generator Coordinates

ตารางที่ 4.10 แสดงการแปลงโคออร์ดิเนตของตัวแปรจากโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโคออร์ดิเนตอ้างอิงและจากโคออร์ดิเนตอ้างอิงไปยังโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่	สมการแรงดันของวงจรสมมูลของสเตเตอร์
5	$E_Q = -R_A I_Q - X'_D I_D + E'_Q \quad (4.64)$ $E_D = -R_A I_D + X'_Q I_Q + E'_D \quad (4.75)$
4	$E_Q = -R_A I_Q - X'_D I_D + E'_Q \quad (4.97)$ $E_D = -R_A I_D + X'_Q I_Q + E'_D \quad (4.104)$
3	$E_Q = -R_A I_Q - X'_D I_D + E'_Q \quad (4.64)$ $E_D = -R_A I_D + X'_Q I_Q + E'_D \quad (4.119)$
2	$E_Q = -R_A I_Q - X'_D I_D + E'_Q \quad (4.97)$ $E_D = -R_A I_D + X_Q I_Q \quad (4.121)$

ตารางที่ 4.11 แสดงสมการแรงดันของวงจรสมมูลของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

#### 4.7 การอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการปฏิบัติงานจริง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจมีการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก (magnetic saturation) ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ตัวอย่างของเส้นโค้งการอิ่มตัวขณะเปิดวงจร (open-circuit saturation curve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.8 ดัชนีของการอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการนิยามให้มีค่าดังสมการ (4.132)<sup>[6]</sup>

$$S = (B - A)/A \quad (4.132)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ เส้นโค้งของการอิ่มตัวได้รับการกำหนดให้สอดคล้องกับฟังก์ชันซึ่งมีลักษณะดังสมการ (4.133)

$$S = A(E_{T0})^B \quad (4.133)$$

โดยที่  $E_{T0}$  คือขนาดของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (open-circuit terminal voltage) ค่าของ A และ B ได้รับการกำหนดให้มีค่าสอดคล้องกับเส้นโค้งของการอิ่มตัวที่ระดับแรงดัน 1.0 และ 1.2 เปรอ์ยูนิต ที่จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าค่าของ S ในแนวแกนตรงและในแนวแกนฉากได้รับการกำหนดให้มีค่าเท่ากัน กล่าวคือ

$$S_{D0} = S_{Q0} = S_0 = A(E'_0)^B \quad (4.134)$$

ค่าของ  $F_S$  ในรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, และ 4.7 ได้รับการกำหนดให้มีค่าดังสมการ (4.135)

$$1 + F_S = 1 + S_0 + BS_0 \quad (4.135)$$

ในกรณีที่ไม่นิยามการอิ่มตัว ค่าของ  $F_S$  ได้รับการกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์