บทที่ 4
สมการความไวของค่าเจาะจงของวงจรกระตุ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาสมการความไวของค่าเจาะจงของวงจรกระตุ้นแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทำโปรแกรมเชิงเส้น

กำหนดให้ ω_i , υ_i เป็นเวกเตอร์เจาะจงทางซ้ายและขวาตัวที่ i ของเมตริกซ์ A ตามลำดับ

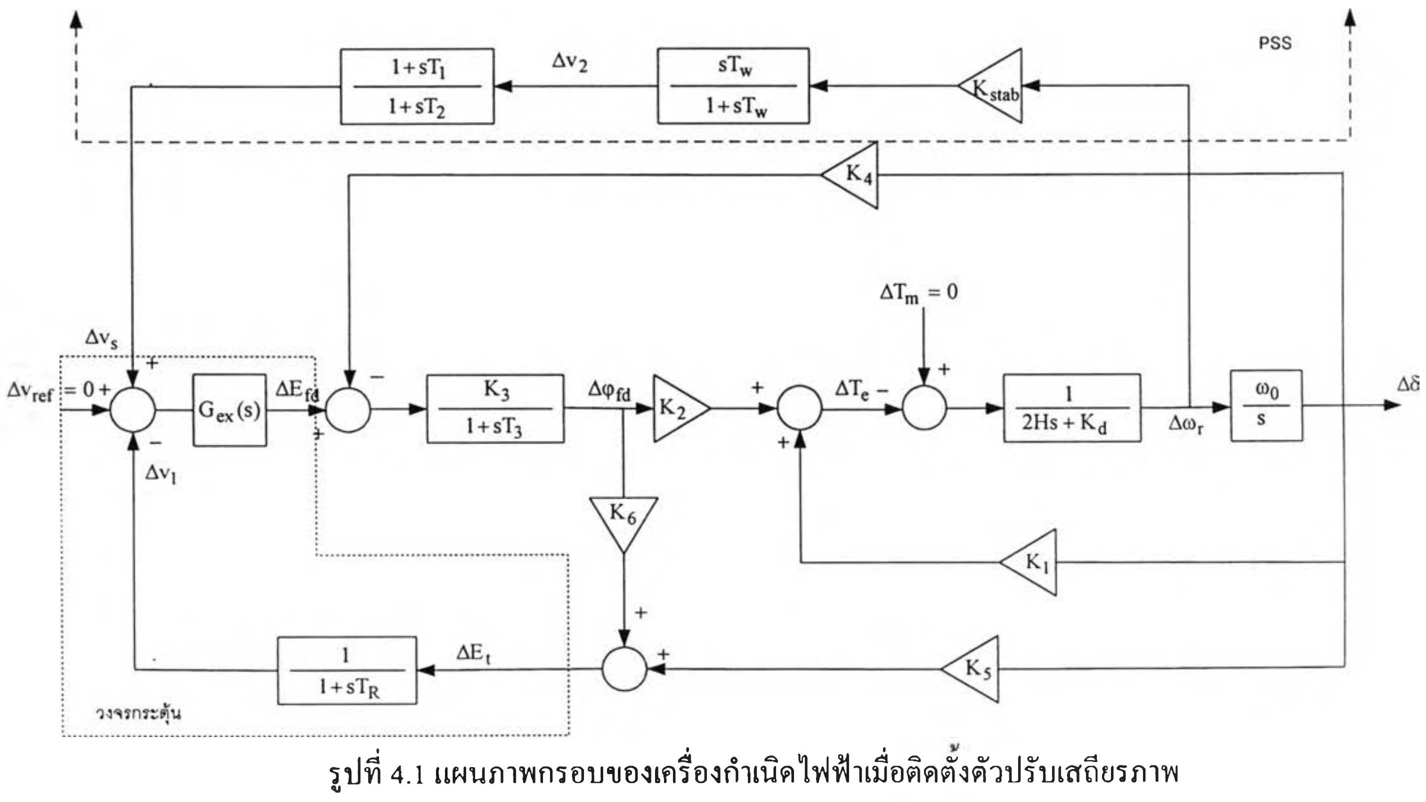
$\omega_{in} , \upsilon_{in}$ เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์เจาะจงทางซ้ายและขวาตัวที่ i ของเมตริกซ์ A เมื่อ n คือจำนวนมิติของเวกเตอร์ ω_i และ υ_i

เครื่องหมาย “ ^{T} ” เป็นสัญลักษณ์ทรานสโพส (transpose) ของเวกเตอร์

จากสมการ (2.20) สามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta\lambda_i = \omega_i^T \Delta A(\Delta K)\upsilon_i \tag{4.1}$$

และจากรูปที่ 3.12 เมื่อติดตั้งตัวปรับเสถียรภาพจะมีแผนภาพกรอบดังรูปที่ 4.1[1]



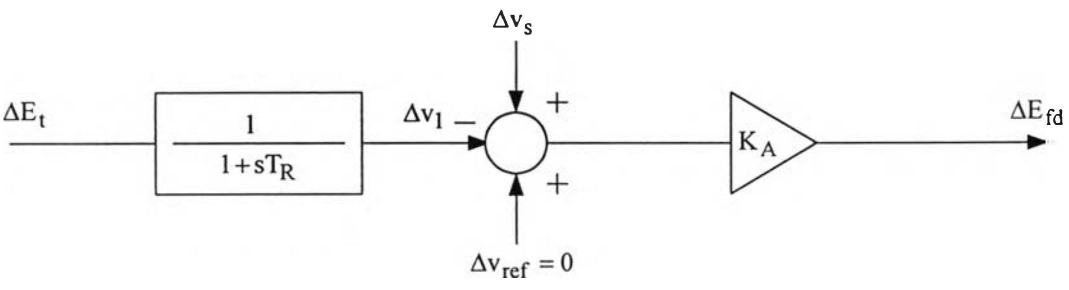
รูปที่ 4.1 แผนภาพกรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวปรับเสถียรภาพ

กำหนดให้ $K = [K_{stab} \quad T_w \quad T_1 \quad T_2]^T$

=เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ของตัวปรับเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.1 แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรกระตุ้น

แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรกระตุ้นประมาณให้ $G_{ex}(s) = K_A$ ซึ่งมีแผนภาพกรอบเป็นดังรูปที่ 4.2 [1]



รูปที่ 4.2 แผนภาพกรอบของวงจรกระตุ้นที่มีแบบจำลองอย่างง่าย

จากแผนภาพกรอบในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เขียนสมการสภาวะได้ดังนี้

สมการสภาวะ

$$\Delta\dot{\omega}_r = (-\frac{K_d}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_d}{2H})\Delta\varphi_{fd}$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega_r$$

$$\Delta\dot{\varphi}_{fd} = (-\frac{K_3K_4}{T_3})\Delta\delta + (-\frac{1}{T_3})\Delta\varphi_{fd} + (\frac{K_3K_A}{T_3})\Delta v_s - (\frac{K_3K_A}{T_3})\Delta v_1$$

$$\Delta\dot{v}_1 = (\frac{K_5}{T_R})\Delta\delta + (\frac{K_6}{T_R})\Delta\varphi_{fd} - (\frac{1}{T_R})\Delta v_1$$

$$\Delta\dot{v}_2 = (-\frac{K_dK_{stab}}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1K_{stab}}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_2K_{stab}}{2H})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{1}{T_w})\Delta v_2$$

$$\Delta\dot{v}_s = (-\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\delta + (-\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\varphi_{fd} + [\frac{1}{T_2}(1-\frac{T_1}{T_w})]\Delta v_2 + (-\frac{1}{T_2})\Delta v_s$$

หรือเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\varphi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_1 \\ \Delta\dot{v}_2 \\ \Delta\dot{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\varphi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

โดย

$a_{11} = -\frac{K_d}{2H}$ $\quad a_{12} = -\frac{K_1}{2H}$ $\quad a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$

$a_{21} = \omega_0$

$a_{32} = -\frac{K_3 K_4}{T_3}$ $\quad a_{33} = -\frac{1}{T_3}$ $\quad a_{34} = -\frac{K_3 K_A}{T_3}$ $\quad a_{36} = \frac{K_3 K_A}{T_3}$

$a_{42} = \frac{K_5}{T_R}$ $\quad a_{43} = \frac{K_6}{T_R}$ $\quad a_{44} = -\frac{1}{T_R}$

$a_{51} = -\frac{K_d K_{stab}}{2H}$ $\quad a_{52} = -\frac{K_1 K_{stab}}{2H}$ $\quad a_{53} = -\frac{K_2 K_{stab}}{2H}$ $\quad a_{55} = -\frac{1}{T_w}$

$a_{61} = -\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2}$ $\quad a_{62} = -\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2}$ $\quad a_{63} = -\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2}$ $\quad a_{65} = \frac{1}{T_2}(1-\frac{T_1}{T_w})$

$a_{66} = -\frac{1}{T_2}$

คำนวณ ΔA

จากสมการ 4.2 สามารถหา ΔA ได้ และจะแสดงเป็นคอลัมน์ดังนี้

คอลัมน์ที่ 1

$$\Delta a_{51} = -\frac{K_d}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{61} = -\frac{K_d T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_d K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_d T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

คอลัมน์ที่ 2

$$\Delta a_{52} = -\frac{K_d}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{62} = -\frac{K_d T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_d K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_d T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

คอลัมน์ที่ 3

$$\Delta a_{53} = -\frac{K_d}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{63} = -\frac{K_d T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_d K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_d T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

คอลัมน์ที่ 4 แต่ละองค์ประกอบมีค่าเป็นศูนย์

คอลัมน์ที่ 5

$$\Delta a_{55} = \frac{1}{T_w^2}\Delta T_w$$

$$\Delta a_{56} = -\frac{1}{T_2 T_w}\Delta T_1 - [\frac{1}{T_2^2}(1 - \frac{T_1}{T_w})]\Delta T_2 + \frac{T_1}{T_2 T_w^2}\Delta T_w$$

คอลัมน์ที่ 6

$$\Delta a_{66} = \frac{1}{T_2^2}\Delta T_2$$

องค์ประกอบของ $[\omega_i^T \Delta A]$

กำหนดให้ $m_1 = -\frac{K_d}{2H} \quad m_2 = -\frac{K_1}{2H} \quad m_3 = -\frac{K_2}{2H}$

$$[\omega_i^T \Delta A]_1 = (\omega_{i5} m_1 + \omega_{i6} m_1 \frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i6} m_1 \frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i6} m_1 \frac{K_{stab} T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_2 = (\omega_{i5} m_2 + \omega_{i6} m_2 \frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i6} m_2 \frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i6} m_2 \frac{K_{stab} T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_3 = (\omega_{i5} m_3 + \omega_{i6} m_3 \frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i6} m_3 \frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i6} m_3 \frac{K_{stab} T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_4 = 0$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_5 = (\frac{\omega_{i5}}{T_w^2} + \frac{\omega_{i6} T_1}{T_2 T_w^2})\Delta T_w - \frac{\omega_{i5}}{T_2 T_w}\Delta T_1 - \frac{\omega_{i6}}{T_2^2}(1 - \frac{T_1}{T_w})\Delta T_2$$

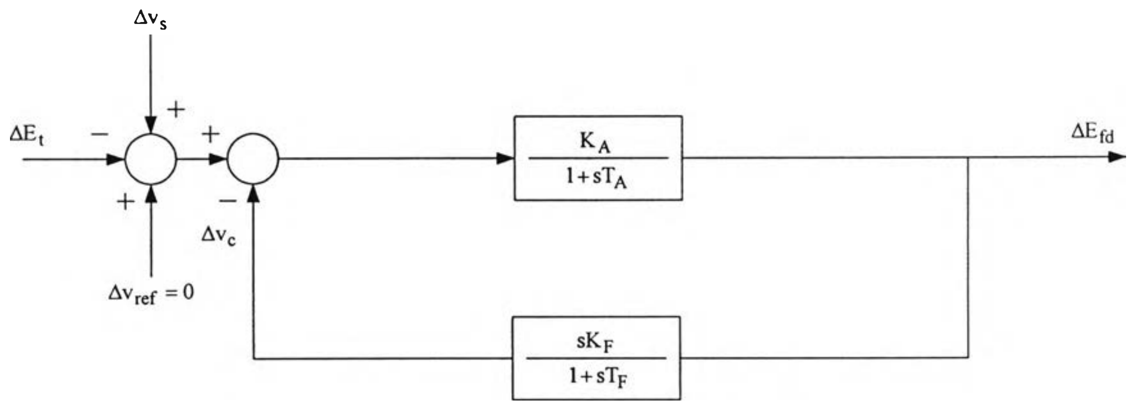
$$[\omega_i^T \Delta A]_6 = \frac{\omega_{i6}}{T_2^2}\Delta T_2$$

จะได้สมการความไวของค่าเจาะจง $\omega_i^T \Delta A \upsilon_i$ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
[\omega_i^T \Delta A \upsilon_i] = {} & [(\omega_{i5} m_1 + \omega_{i6} m_1 \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i1} + (\omega_{i5} m_2 + \omega_{i6} m_2 \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i2} \\
& + (\omega_{i5} m_3 + \omega_{i6} m_3 \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i3}]\Delta K_{stab} \\
& + [\frac{1}{T_w^2}(\omega_{i5} + \omega_{i6} \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i5}]\Delta T_w \\
& + [\frac{\omega_{i6} K_{stab}}{T_2}(m_1 \upsilon_{i1} + m_2 \upsilon_{i2} + m_3 \upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i6} \upsilon_{i5}}{T_2 T_w}]\Delta T_1 \\
& + \{-\frac{\omega_{i6} K_{stab} T_1}{T_2^2}(m_1 \upsilon_{i1} + m_2 \upsilon_{i2} + m_3 \upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i6}}{T_2^2}[-(1 - \frac{T_1}{T_w})\upsilon_{i5} + \upsilon_{i6}]\}\Delta T_2
\end{aligned} \tag{4.3}$$

4.2 แบบจำลองวงจรกระตุ้นประเภท General Electric SCR

แบบจำลองวงจรกระตุ้นประเภท General Electric SCR มีแผนภาพกรอบดังรูปที่ 4.3[13]



รูปที่ 4.3 แผนภาพกรอบของวงจรกระตุ้นประเภท General Electric SCR

จากแผนภาพกรอบในรูปที่ 4.1 และ 4.3 เขียนสมการสภาวะได้ดังนี้

$$\Delta\dot{\omega}_r = (-\frac{K_d}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_d}{2H})\Delta\varphi_{fd}$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega_r$$

$$\Delta\dot{\varphi}_{fd} = (-\frac{K_3K_4}{T_3})\Delta\delta + (-\frac{1}{T_3})\Delta\varphi_{fd} + (\frac{K_3}{T_3})\Delta E_{fd}$$

$$\Delta\dot{E}_{fd} = (-\frac{K_5K_A}{T_A})\Delta\delta + (-\frac{K_6K_A}{T_A})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{1}{T_A})\Delta E_{fd} + (\frac{K_A}{T_A})\Delta v_s$$

$$\Delta\dot{v}_c = (-\frac{K_5K_AK_F}{T_AT_F})\Delta\delta + (-\frac{K_6K_AK_F}{T_AT_F})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{K_F}{T_AT_F})\Delta E_{fd} + (-\frac{1}{T_F})\Delta v_c + (\frac{K_AK_F}{T_AT_F})\Delta v_s$$

$$\Delta\dot{v}_2 = (-\frac{K_dK_{stab}}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1K_{stab}}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_2K_{stab}}{2H})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{1}{T_w})\Delta v_2$$

$$\Delta \dot{v}_s = (-\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\delta + (-\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\varphi_{fd}$$
$$+[\frac{1}{T_2}(1-\frac{T_1}{T_w})]\Delta v_2 + (-\frac{1}{T_2})\Delta v_s$$

หรือเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\varphi}_{fd} \\ \Delta\dot{E}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_c \\ \Delta\dot{v}_2 \\ \Delta\dot{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & a_{47} \\ 0 & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & 0 & a_{57} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & 0 & a_{66} & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\varphi_{fd} \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_c \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

โดย

$a_{11} = -\frac{K_d}{2H}$ $\quad a_{12} = -\frac{K_1}{2H}$ $\quad a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$

$a_{21} = \omega_0$

$a_{32} = -\frac{K_3 K_4}{T_3}$ $\quad a_{33} = -\frac{1}{T_3}$ $\quad a_{34} = \frac{K_3}{T_3}$

$a_{42} = -\frac{K_5 K_A}{T_A}$ $\quad a_{43} = -\frac{K_6 K_A}{T_A}$ $\quad a_{44} = -\frac{1}{T_A}$

$a_{47} = \frac{K_A}{T_A}$

$a_{52} = -\frac{K_5 K_A K_F}{T_A T_F}$ $\quad a_{53} = -\frac{K_6 K_A K_F}{T_A T_F}$ $\quad a_{54} = -\frac{K_F}{T_A T_F}$

$a_{55} = -\frac{1}{T_F}$ $\quad a_{57} = \frac{K_A K_F}{T_A T_F}$

$a_{61} = -\frac{K_d K_{stab}}{2H}$ $\quad a_{62} = -\frac{K_1 K_{stab}}{2H}$ $\quad a_{63} = -\frac{K_2 K_{stab}}{2H}$

$a_{66} = -\frac{1}{T_w}$

$$a_{71} = -\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2} \qquad a_{72} = -\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2} \qquad a_{73} = -\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2}$$

$$a_{76} = \frac{1}{T_2}(1-\frac{T_1}{T_w}) \qquad a_{77} = -\frac{1}{T_2}$$

คำนวณ ΔA

จากสมการ 4.4 สามารถหาค่า ΔA ได้ และจะแสดงเป็นคอลัมน์ดังนี้

<u>คอลัมน์ที่ 1</u>

$$\Delta a_{61} = -\frac{K_d}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{71} = -\frac{K_d T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_d K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_d T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 2</u>

$$\Delta a_{62} = -\frac{K_1}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{72} = -\frac{K_1 T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_1 K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_1 T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 3</u>

$$\Delta a_{63} = -\frac{K_2}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{73} = -\frac{K_2 T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_2 K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_i + \frac{K_2 T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 4 และ 5</u> มีแต่ละองค์ประกอบมีค่าเป็นศูนย์

<u>คอลัมน์ที่ 6</u>

$$\Delta a_{66} = \frac{1}{T_w^2}\Delta T_w$$

$$\Delta a_{76} = -\frac{1}{T_2 T_w}\Delta T_1 - [\frac{1}{T_2^2}(1-\frac{T_1}{T_w})]\Delta T_2 + \frac{T_1}{T_2 T_w^2}\Delta T_w$$

<u>คอลัมน์ที่ 7</u>

$$\Delta a_{77} = \frac{1}{T_2^2}\Delta T_2$$

องค์ประกอบของ $[\omega_i^T \Delta A]$

เมื่อ $m_1 = -\dfrac{K_d}{2H}$, $m_2 = -\dfrac{K_1}{2H}$, $m_3 = -\dfrac{K_2}{2H}$

$$[\omega_i^T \Delta A]_1 = (\omega_{i6} m_1 + \omega_{i7} m_1 \frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i7} m_1 \frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i7} m_1 \frac{K_{stab} T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_2 = (\omega_{i6} m_2 + \omega_{i7} m_2 \frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i7} m_2 \frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i7} m_2 \frac{K_{stab} T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_3 = (\omega_{i6} m_3 + \omega_{i7} m_3 \frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i7} m_3 \frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i7} m_3 \frac{K_{stab} T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_4 = [\omega_i^T \Delta A]_5 = 0$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_6 = (\frac{\omega_{i6}}{T_w^2} + \frac{\omega_{i7} T_1}{T_2 T_w^2})\Delta T_w - \frac{\omega_{i6}}{T_2 T_w}\Delta T_1 - \frac{\omega_{i7}}{T_2^2}(1 - \frac{T_1}{T_w})\Delta T_2$$

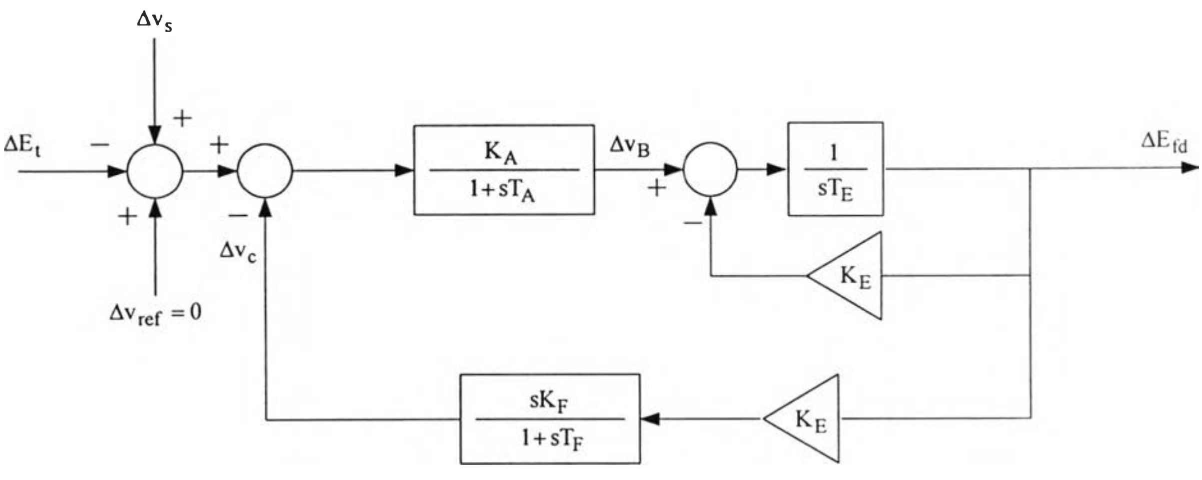
$$[\omega_i^T \Delta A]_7 = \frac{\omega_{i7}}{T_2^2}\Delta T_2$$

จะได้สมการความไวของค่าเจาะจง $\omega_i^T \Delta A \upsilon_i$ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
[\omega_i^T \Delta A \upsilon_i] = {} & [(\omega_{i6} m_1 + \omega_{i7} m_1 \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i1} + (\omega_{i6} m_2 + \omega_{i7} m_2 \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i2} \\
& + (\omega_{i6} m_3 + \omega_{i7} m_3 \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i3}]\Delta K_{stab} \\
& + [\frac{1}{T_w^2}(\omega_{i6} + \omega_{i7} \frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i7}]\Delta T_w \\
& + [\frac{\omega_{i7} K_{stab}}{T_2}(m_1 \upsilon_{i1} + m_2 \upsilon_{i2} + m_3 \upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i7} \upsilon_{i6}}{T_2 T_w}]\Delta T_1 \\
& + \{-\frac{\omega_{i7} K_{stab} T_1}{T_2^2}(m_1 \upsilon_{i1} + m_2 \upsilon_{i2} + m_3 \upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i7}}{T_2^2}[-(1 - \frac{T_1}{T_w})\upsilon_{i6} + \upsilon_{i7}]\}\Delta T_2
\end{aligned} \tag{4.5}$$

4.3 แบบจำลองวงจรกระตุ้นประเภท Westinghouse Brushless

แบบจำลองของวงจรกระตุ้นประเภท Westinghouse Brushless มีแผนภาพกรอบดังรูปที่ 4.4[13]



รูปที่ 4.4 แผนภาพกรอบของวงจรกระตุ้นประเภท Westinghouse brushless

จากรูปที่ 4.1 และ 4.4 เขียนสมการสภาวะได้ดังนี้

สมการสภาวะ

กำหนดให้ $K_7 = K_E K_F$

$$\Delta\dot{\omega}_r = (-\frac{K_d}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_d}{2H})\Delta\varphi_{fd}$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega_r$$

$$\Delta\dot{\varphi}_{fd} = (-\frac{K_3K_4}{T_3})\Delta\delta + (-\frac{1}{T_3})\Delta\varphi_{fd} + (\frac{K_3}{T_3})\Delta E_{fd}$$

$$\Delta\dot{E}_{fd} = (-\frac{K_E}{T_E})\Delta E_{fd} + (\frac{1}{T_E})\Delta v_B$$

$$\Delta\dot{v}_c = (-\frac{K_EK_7}{T_ET_F})\Delta E_{fd} + (\frac{K_7}{T_ET_F})\Delta v_B + (-\frac{1}{T_F})\Delta v_c$$

$$\Delta\dot{v}_B = (-\frac{K_5K_A}{T_A})\Delta\delta + (-\frac{K_6K_A}{T_A})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{K_A}{T_A})\Delta v_c + (\frac{K_A}{T_A})\Delta v_s + (-\frac{1}{T_A})\Delta v_B$$

$$\Delta \dot{v}_2 = (-\frac{K_d K_{stab}}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1 K_{stab}}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_2 K_{stab}}{2H})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{1}{T_w})\Delta v_2$$

$$\Delta \dot{v}_s = (-\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\delta + (-\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\varphi_{fd} + [\frac{1}{T_2}(1-\frac{T_1}{T_w})]\Delta v_2 + (-\frac{1}{T_2})\Delta v_s$$

หรือเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\varphi}_{fd} \\ \Delta\dot{E}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_B \\ \Delta\dot{v}_c \\ \Delta\dot{v}_2 \\ \Delta\dot{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & a_{56} & 0 & a_{58} \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 & 0 & a_{77} & 0 \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\varphi_{fd} \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_B \\ \Delta v_c \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

โดย

$a_{11} = -\frac{K_d}{2H}$ $\quad a_{12} = -\frac{K_1}{2H}$ $\quad a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$

$a_{21} = \omega_0$

$a_{32} = -\frac{K_3 K_4}{T_3}$ $\quad a_{33} = -\frac{1}{T_3}$ $\quad a_{34} = \frac{K_3}{T_3}$

$a_{44} = -\frac{K_E}{T_E}$ $\quad a_{45} = \frac{1}{T_E}$

$a_{52} = -\frac{K_5 K_A}{T_A}$ $\quad a_{53} = -\frac{K_6 K_A}{T_A}$ $\quad a_{55} = -\frac{1}{T_A}$

$a_{56} = -\frac{K_A}{T_A}$ $\quad a_{58} = \frac{K_A}{T_A}$

$$a_{64} = -\frac{K_A K_7}{T_E T_F} \qquad a_{65} = \frac{K_7}{T_E T_F} \qquad a_{66} = -\frac{1}{T_F}$$

$$a_{71} = -\frac{K_d K_{stab}}{2H} \qquad a_{72} = -\frac{K_1 K_{stab}}{2H} \qquad a_{73} = -\frac{K_2 K_{stab}}{2H}$$

$$a_{77} = -\frac{1}{T_w}$$

$$a_{81} = -\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2} \qquad a_{82} = -\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2} \qquad a_{83} = -\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2}$$

$$a_{87} = \frac{1}{T_2}\left(1 - \frac{T_1}{T_w}\right) \qquad a_{88} = -\frac{1}{T_2}$$

คำนวณ ΔA

จากสมการ 4.6 สามารถหา ΔA ได้ และจะแสดงเป็นคอลัมน์ได้ดังนี้

<u>คอลัมน์ที่ 1</u>

$$\Delta a_{71} = -\frac{K_d}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{81} = -\frac{K_d T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_d K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_d T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 2</u>

$$\Delta a_{72} = -\frac{K_1}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{82} = -\frac{K_1 T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_1 K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_1 T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 3</u>

$$\Delta a_{73} = -\frac{K_2}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{83} = -\frac{K_2 T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_2 K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_2 T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 4, 5 และ 6</u> มีแต่ละองค์ประกอบมีค่าเป็นศูนย์

<u>คอลัมน์ที่ 7</u>

$$\Delta a_{77} = \frac{1}{T_w^2}\Delta T_w$$

$$\Delta a_{78} = -\frac{1}{T_2 T_w}\Delta T_1 - [\frac{1}{T_2^2}(1-\frac{T_1}{T_w})]\Delta T_2 + \frac{T_1}{T_2 T_w^2}\Delta T_w$$

<u>คอลัมน์ที่ 8</u>

$$\Delta a_{88} = \frac{1}{T_2^2}\Delta T_2$$

องค์ประกอบของ $[\omega_i^T \Delta A]$

เมื่อ $m_1 = -\frac{K_d}{2H}$, $m_2 = -\frac{K_1}{2H}$, $m_3 = -\frac{K_2}{2H}$

$$[\omega_i^T \Delta A]_1 = (\omega_{i7}m_1 + \omega_{i8}m_1\frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i8}m_1\frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i8}m_1\frac{K_{stab}T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_2 = (\omega_{i7}m_2 + \omega_{i8}m_2\frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i8}m_2\frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i8}m_2\frac{K_{stab}T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_3 = (\omega_{i7}m_3 + \omega_{i8}m_3\frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i8}m_3\frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i8}m_3\frac{K_{stab}T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_4 = [\omega_i^T \Delta A]_5 = [\omega_i^T \Delta A]_6 = 0$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_7 = (\frac{\omega_{i7}}{T_w^2} + \frac{\omega_{i8}T_1}{T_2 T_w^2})\Delta T_w - \frac{\omega_{i7}}{T_2 T_w}\Delta T_1 - \frac{\omega_{i8}}{T_2^2}(1-\frac{T_1}{T_w})\Delta T_2$$

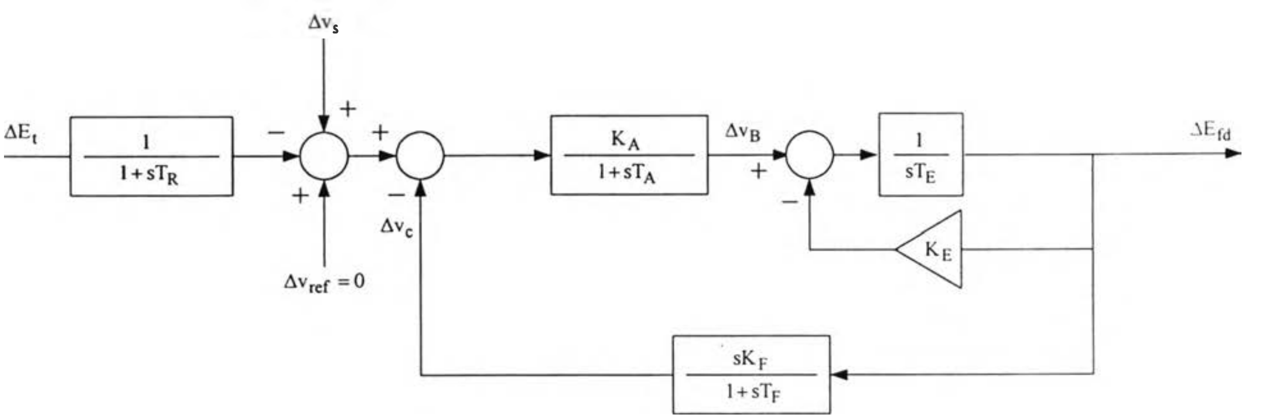
$$[\omega \Delta A]_8 = \frac{\omega_{i8}}{T_2^2}\Delta T_2$$

จะได้สมการความไวของค่าเจาะจง $\omega_i^T \Delta A \upsilon_i$ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
[\omega_i^T \Delta A \upsilon_i] = &[(\omega_{i7}m_1 + \omega_{i8}m_1\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i1} + (\omega_{i7}m_2 + \omega_{i8}m_2\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i2} \\
&+ (\omega_{i7}m_3 + \omega_{i8}m_3\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i3}]\Delta K_{stab} \\
&+ [\frac{1}{T_w^2}(\omega_{i7} + \omega_{i8}\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i7}]\Delta T_w \\
&+ [\frac{\omega_{i8}K_{stab}}{T_2}(m_1\upsilon_{i1} + m_2\upsilon_{i2} + m_3\upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i8}\upsilon_{i7}}{T_2 T_w}]\Delta T_1 \\
&+ \{-\frac{\omega_{i8}K_{stab}T_1}{T_2^2}(m_1\upsilon_{i1} + m_2\upsilon_{i2} + m_3\upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i8}}{T_2^2}[-(1-\frac{T_1}{T_w})\upsilon_{i7} + \upsilon_{i8}]\}\Delta T_2
\end{aligned} \tag{4.7}$$

4.4 แบบจำลองวงจรกระตุ้นประเภท General Electric NA 143

แบบจำลองของวงจรกระตุ้นประเภท General Electric NA 143 มีแผนภาพกรอบดังรูปที่ 4.5[13]



รูปที่ 4.5 แบบจำลองวงจรกระตุ้นประเภท General Electric NA 143

จากรูปที่ 4.1 และ 4.5 เขียนสมการสภาวะได้ดังนี้

สมการสภาวะ

$$\Delta \dot{\omega}_r = (-\frac{K_d}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_d}{2H})\Delta\varphi_{fd}$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega_r$$

$$\Delta\dot{\varphi}_{fd} = (-\frac{K_3 K_4}{T_3})\Delta\delta + (-\frac{1}{T_3})\Delta\varphi_{fd} + (\frac{K_3}{T_3})\Delta E_{fd}$$

$$\Delta\dot{E}_{fd} = (-\frac{K_E}{T_E})\Delta E_{fd} + (\frac{1}{T_E})\Delta v_B$$

$$\Delta\dot{v}_c = (-\frac{K_E K_F}{T_E T_F})\Delta E_{fd} + (\frac{K_F}{T_E T_F})\Delta v_B + (-\frac{1}{T_F})\Delta v_c$$

$$\Delta\dot{v}_B = (-\frac{K_5 K_A}{T_A})\Delta\delta + (-\frac{K_6 K_A}{T_A})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{K_A}{T_A})\Delta v_c + (\frac{K_A}{T_A})\Delta v_s + (-\frac{1}{T_A})\Delta v_B$$

$$\Delta\dot{v}_2 = (-\frac{K_d K_{stab}}{2H})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1 K_{stab}}{2H})\Delta\delta + (-\frac{K_2 K_{stab}}{2H})\Delta\varphi_{fd} + (-\frac{1}{T_w})\Delta v_2$$

$$\Delta \dot{v}_s = (-\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\omega_r + (-\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\delta + (-\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2})\Delta\varphi_{fd}$$
$$+[\frac{1}{T_2}(1-\frac{T_1}{T_w})]\Delta v_2 + (-\frac{1}{T_2})\Delta v_s$$

หรือเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\varphi}_{fd} \\ \Delta\dot{E}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_B \\ \Delta\dot{v}_c \\ \Delta\dot{v}_2 \\ \Delta\dot{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & a_{56} & 0 & a_{58} \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 & 0 & a_{77} & 0 \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\varphi_{fd} \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_B \\ \Delta v_c \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

โดย

$a_{11} = -\frac{K_d}{2H}$ $a_{12} = -\frac{K_1}{2H}$ $a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$

$a_{21} = \omega_0$

$a_{32} = -\frac{K_3 K_4}{T_3}$ $a_{33} = -\frac{1}{T_3}$ $a_{34} = \frac{K_3}{T_3}$

$a_{44} = -\frac{K_E}{T_E}$ $a_{45} = \frac{1}{T_E}$

$a_{52} = -\frac{K_5 K_A}{T_A}$ $a_{53} = -\frac{K_6 K_A}{T_A}$ $a_{55} = -\frac{1}{T_A}$

$a_{56} = -\frac{K_A}{T_A}$ $a_{58} = \frac{K_A}{T_A}$

$a_{64} = -\frac{K_A K_F}{T_E T_F}$ $a_{65} = \frac{K_F}{T_E T_F}$ $a_{66} = -\frac{1}{T_F}$

$$a_{71} = -\frac{K_d K_{stab}}{2H} \qquad a_{72} = -\frac{K_1 K_{stab}}{2H} \qquad a_{73} = -\frac{K_2 K_{stab}}{2H}$$

$$a_{77} = -\frac{1}{T_w}$$

$$a_{81} = -\frac{K_d K_{stab} T_1}{2HT_2} \qquad a_{82} = -\frac{K_1 K_{stab} T_1}{2HT_2} \qquad a_{83} = -\frac{K_2 K_{stab} T_1}{2HT_2}$$

$$a_{87} = \frac{1}{T_2}(1 - \frac{T_1}{T_w}) \qquad a_{88} = -\frac{1}{T_2}$$

คำนวณ ΔA

จากสมการ (4.8) สามารถหา ΔA ได้ และจะแสดงเป็นคอลัมน์ดังนี้

<u>คอลัมน์ที่ 1</u>

$$\Delta a_{71} = -\frac{K_d}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{81} = -\frac{K_d T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_d K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_d T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 2</u>

$$\Delta a_{72} = -\frac{K_1}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{82} = -\frac{K_1 T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_1 K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_1 T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 3</u>

$$\Delta a_{73} = -\frac{K_2}{2H}\Delta K_{stab}$$

$$\Delta a_{83} = -\frac{K_2 T_1}{2HT_2}\Delta K_{stab} - \frac{K_2 K_{stab}}{2HT_2}\Delta T_1 + \frac{K_2 T_1 K_{stab}}{2HT_2^2}\Delta T_2$$

<u>คอลัมน์ที่ 4, 5 และ 6</u> มีแต่ละองค์ประกอบมีค่าเป็นศูนย์

<u>คอลัมน์ที่ 7</u>

$$\Delta a_{77} = \frac{1}{T_w^2}\Delta T_w$$

$$\Delta a_{78} = -\frac{1}{T_2 T_w}\Delta T_1 - [\frac{1}{T_2^2}(1 - \frac{T_1}{T_w})]\Delta T_2 + \frac{T_1}{T_2 T_w^2}\Delta T_w$$

คอลัมน์ที่ 8

$$\Delta a_{88} = \frac{1}{T_2^2}\Delta T_2$$

องค์ประกอบของ $[\omega_i^T \Delta A]$

เมื่อ $m_1 = -\frac{K_d}{2H}$, $m_2 = -\frac{K_1}{2H}$, $m_3 = -\frac{K_2}{2H}$

$$[\omega_i^T \Delta A]_1 = (\omega_{i7}m_1 + \omega_{i8}m_1\frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i8}m_1\frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i8}m_1\frac{K_{stab}T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_2 = (\omega_{i7}m_2 + \omega_{i8}m_2\frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i8}m_2\frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i8}m_2\frac{K_{stab}T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_3 = (\omega_{i7}m_3 + \omega_{i8}m_3\frac{T_1}{T_2})\Delta K_{stab} + (\omega_{i8}m_3\frac{K_{stab}}{T_2})\Delta T_1 - (\omega_{i8}m_3\frac{K_{stab}T_1}{T_2^2})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_4 = [\omega_i^T \Delta A]_5 = [\omega_i^T \Delta A]_6 = 0$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_7 = (\frac{\omega_{i7}}{T_w^2} + \frac{\omega_{i8}T_1}{T_2T_w^2})\Delta T_w - \frac{\omega_{i7}}{T_2T_w}\Delta T_1 - \frac{\omega_{i8}}{T_2^2}(1-\frac{T_1}{T_w})\Delta T_2$$

$$[\omega_i^T \Delta A]_8 = \frac{\omega_{i8}}{T_2^2}\Delta T_2$$

จะได้สมการของ $\omega_i^T \Delta A \upsilon_i$ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
[\omega_i^T \Delta A \upsilon_i] = {} & [(\omega_{i7}m_1 + \omega_{i8}m_1\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i1} + (\omega_{i7}m_2 + \omega_{i8}m_2\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i2} \\
& + (\omega_{i7}m_3 + \omega_{i8}m_3\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i3}]\Delta K_{stab} \\
& + [\frac{1}{T_w^2}(\omega_{i7} + \omega_{i8}\frac{T_1}{T_2})\upsilon_{i7}]\Delta T_w \\
& + [\frac{\omega_{i8}K_{stab}}{T_2}(m_1\upsilon_{i1} + m_2\upsilon_{i2} + m_3\upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i8}\upsilon_{i7}}{T_2T_w}]\Delta T_1 \\
& + \{-\frac{\omega_{i8}K_{stab}T_1}{T_2^2}(m_1\upsilon_{i1} + m_2\upsilon_{i2} + m_3\upsilon_{i3}) - \frac{\omega_{i8}}{T_2^2}[-(1-\frac{T_1}{T_w})\upsilon_{i7} + \upsilon_{i8}]\}\Delta T_2
\end{aligned} \tag{4.9}$$