# บทที่ 2

# การใช้ไดอาคอปติกในระบบไฟฟ้ากำลัง

## 2.1 การหาผลลัพธ์แบบแยกส่วน (2,11)

วิธีการของไดอาคอปติกคือแบ่งข่ายวงจร (Network) ออกเป็นส่วนย่อยแล้วหาผลลัพธ์ของส่วนย่อย นำผลลัพธ์ของส่วนย่อยรวมกับผลอันเนื่องมาจากการแบ่ง จะได้ผลลัพธ์รวมของข่ายวงจรทั้งหมด

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงในรูปที่ 2.1 ก. ซึ่งประกอบด้วย 8 บัส และสายส่ง 12 เส้นต่อเชื่อมโยงกันอยู่ สมมุติระบบนี้ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนโดยเส้นประแสดงถึงเส้นแบ่ง สายที่ถูกตัดเรียกว่าคัทลายน์ (Cut Line) เส้นที่แบ่งโซนผ่านบัสอยู่บัสหนึ่งเรียกว่า บัสร่วม (Common Bus) ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังจะให้บัสร่วมคือ กราวนด์บัส (Ground Bus) โดยที่

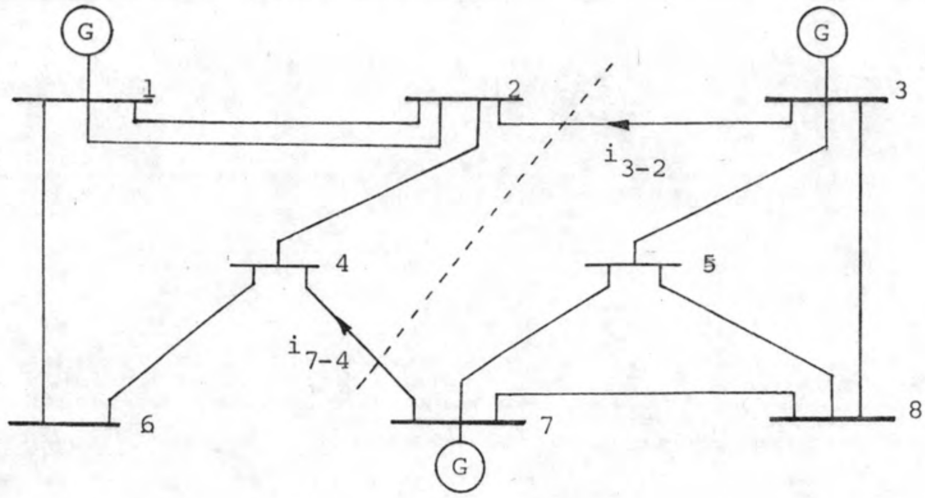
$I_T$ คือกระแสบัสเนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแส ประกอบด้วย $I_1, I_2 \ldots, I_8$ ซึ่งสมมุติว่ารู้ค่า

$E_T$ คือแรงดันคร่อมบัสเทียบกับกราวนด์ ประกอบด้วย $E_1, E_2 \ldots E_8$ ซึ่งต้องการหาค่า

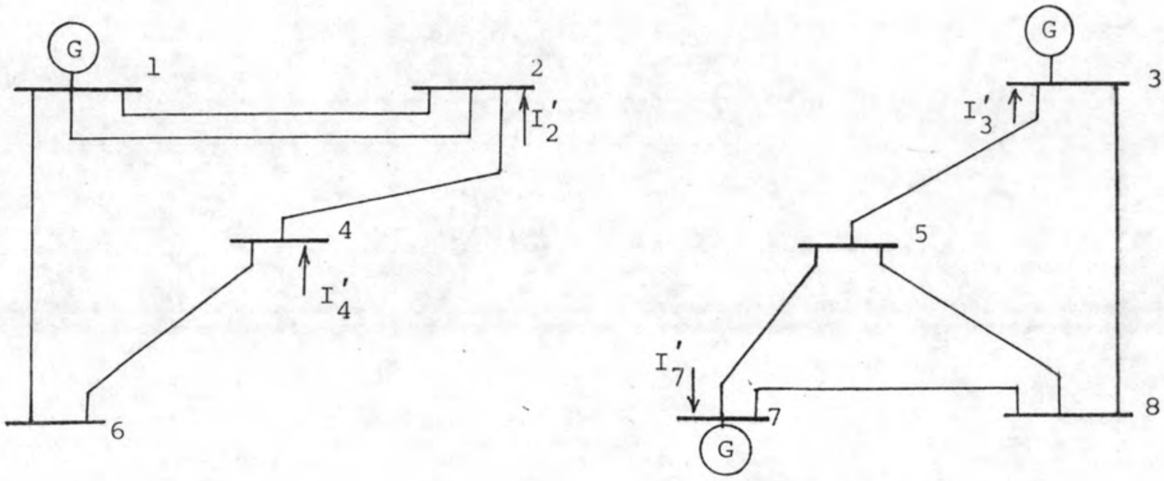
$i_C$ คือกระแสในคัทลายน์ ประกอบด้วย $i_{3-2}$ , $i_{7-4}$ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่รู้ค่า

โดยวิธีการของไดอาคอปติก สมมุติทิศทางของกระแสในคัทลายน์ตามรูปที่ 2.1 ก. ในที่นี้ คัทลายน์คือ สาย 3-2 และสาย 7-4 เมื่อตัดคัทลายน์ออกจากระบบจะแยกระบบเดิมออกเป็นระบบย่อย 2 ระบบคือ ระบบย่อย A และระบบย่อย B

เพื่อที่จะให้ระบบย่อยและคัทลายน์ที่แยกออกมามีความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันในส่วนต่าง ๆ มีค่าคงเดิม จึงแทนคัทลายน์ด้วยแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลย์ $I_T'$ ซึ่งประกอบด้วย $I_2'$ และ $I_4'$ ไหลเข้าบัส 2 และบัส 4 ในระบบย่อย A และ $I_3'$ และ $I_7'$ ไหลเข้าบัส 3 และบัส 7 ในระบบย่อย B ตามลำดับโดยมีขนาดและทิศทางที่จะทำให้แรงดันคร่อมบัสของแต่ละระบบย่อยมีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมบัสของระบบเดิมทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ข.

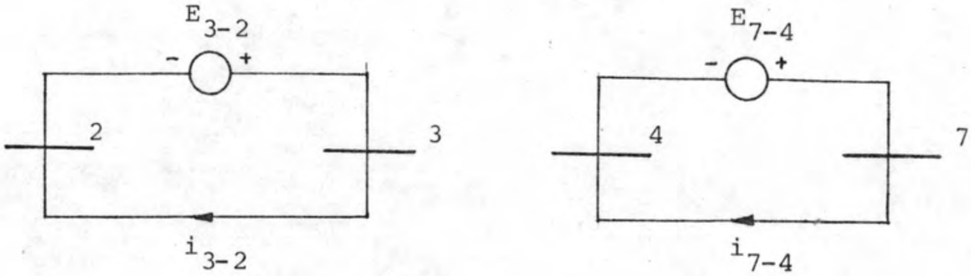



รูปที่ 2.1 ก. แสดงระบบไฟฟ้ากำลังก่อนแบ่งโซน




ระบบย่อย A ระบบย่อย B

รูปที่ 2.1 ข. แสดงระบบย่อยหลังแบ่งโซน




รูปที่ 2.1 ค. แสดงสมมูลย์ของศักลายน์

ในทำนองเดียวกันใส่แหล่งกำเนิดแรงดันสมมูลย์ $E_L$ ซึ่งประกอบด้วย $E_{3-2}$ และ $E_{7-4}$ คร่อมคัทลายน์ โดยมีขนาดและทิศทางที่ทำให้กระแสในคัทลายน์มีค่าเท่ากับกระแสในสายส่งของระบบเดิมทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ค.

ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลย์ $I'_T$ กับกระแส $i_C$ ในคัทลายน์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$I'_2 = i_{3-2}$$

$$I'_3 = -i_{3-2}$$

$$I'_4 = i_{7-4}$$

$$I'_7 = -i_{7-4}$$

สำหรับบัสอื่น ๆ ที่ไม่ได้ต่อกับคัทลายน์ไม่มีความสัมพันธ์ดังกล่าว จากสมการข้างบน สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_6 \\ I'_2 \\ I'_4 \\ \hline I'_3 \\ I'_5 \\ I'_7 \\ I'_8 \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \text{บัส} \backslash \text{คัทลายน์} \\ 1 \\ 6 \\ 2 \\ 4 \\ 3 \\ 5 \\ 7 \\ 8 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 3-2 & 7-4 \end{array} \\ \begin{bmatrix} & \\ & \\ 1 & \\ & 1 \\ \hline -1 & \\ & \\ & -1 \\ & \end{bmatrix} \end{array} \begin{bmatrix} i_{3-2} \\ i_{7-4} \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

หรือในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$I'_T = C_{TC}\, i_C \tag{2.2}$$

โดยที่ $C_{TC}$ คืออินซิเดนซ์เมตริกซ์ของทรี-วงรอบปิด (Tree-close loop Incidence Matrix)

ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแรงดันสมมูลย์ $E_L$ ที่ศักลายน์ต่าง ๆ กับแรงดันคร่อมบัส $E_T$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_{3-2} = E_3 - E_2$$

$$E_{7-4} = E_7 - E_4$$

ซึ่งเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{3-2} \\ \\ E_{7-4} \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \text{ศักลายน์} \backslash \text{บัส} \\ 3-2 \\ \\ 7-4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc:cccc} 1 & 6 & 2 & 4 & 3 & 5 & 7 & 8 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccc:cccc} & & -1 & & 1 & & & \\ & & & & & & & \\ & & & -1 & & & 1 & \end{array}\right] \end{array} \left[\begin{array}{c} E_1 \\ E_6 \\ E_2 \\ E_4 \\ \hdashline E_3 \\ E_5 \\ E_7 \\ E_8 \end{array}\right] \quad (2.3)$$

หรือเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$E_L = -C_{TC}^{t} E_T \quad (2.4)$$

โดยที่

$$E_T = \left[\begin{array}{c} E_A \\ \hdashline E_B \end{array}\right] \quad (2.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัสในระบบย่อยและแรงดันคร่อมบัสในระบบย่อย สามารถเขียนได้ดังนี้

ระบบย่อย A $\quad Y_{AA} E_A = I_{TA} + I'_{TA}$ (2.6)

ระบบย่อย B $\quad Y_{BB} E_B = I_{TB} + I'_{TB}$ (2.7)

โดยที่ $Y_{AA}$ และ $Y_{BB}$ คือบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบย่อย A และ B

$E_A$ และ $E_B$ คือแรงดันคร่อมบัสของระบบย่อย A และ B

$I_{TA}$ และ $I_{TB}$ คือกระแสบัสเนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสของระบบย่อย A และ B

$I'_{TA}$ และ $I'_{TB}$ คือกระแสบัสเนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลย์ของระบบย่อย A และ B

จากสมการ (2.6) และ (2.7) สามารถเขียนรวมกันในรูปของเมตริกซ์ ดังนี้

$$\left[\begin{array}{c|c} Y_{AA} & \\ \hline & Y_{BB} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} E_A \\ \hline E_B \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{TA} + I'_{TA} \\ \hline I_{TB} + I'_{TB} \end{array}\right] \qquad (2.8)$$

ซึ่งเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$Y_{TT}\, E_T = I_T + I'_T \qquad (2.9)$$

โดยที่ $Y_{TT}$ คือบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบย่อย ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกลุ่มเมตริกซ์แนวทะแยง (Block Diagonal Matrix)

จากสมการ (2.9) เมื่อแก้สมการเมตริกซ์ จะหาค่าแรงดันคร่อมบัสได้ นั่นคือ

$$E_T = Z_{TT}\, I_T + Z_{TT}\, I'_T \qquad (2.10)$$

โดยที่ $Z_{TT}$ คือบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของระบบย่อยซึ่งอยู่ในรูปกลุ่มเมตริกซ์แนวทะแยง

จะเห็นได้ว่า ลักษณะเมตริกซ์แนวทะแยงจะทำให้ลดที่เก็บข้อมูลในหน่วยความจำของเครื่องดิจิตอลคอมพิวเตอร์ลง

ในการคำนวณหาสมาชิกต่าง ๆ ของ $Z_{TT}$ จะไม่หามาจากส่วนกลับของ $Y_{TT}$ แต่จะใช้วิธีการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของแต่ละระบบย่อยโดยตรงตามวิธีของ Stagg และ El-Abiad[10]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในคัทลายน์และแหล่งกำเนิดแรงดันสมมูลย์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{3-2} \\ \\ E_{7-4} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} Z_{32} & \\ \hline & Z_{74} \end{array}\right] \begin{bmatrix} i_{3-2} \\ \\ i_{7-4} \end{bmatrix} \qquad (2.11)$$

ในรูปทั่วไปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_L = Z_{LL}\ i_C \qquad (2.12)$$

โดยที่ $E_L$ คือแหล่งกำเนิดแรงดันสมมูลย์คร่อมคัทลายน์

$Z_{LL}$ คืออิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของคัทลายน์

$i_C$ คือกระแสในคัทลายน์

แทนค่า $I_T'$ จากสมการ (2.2) ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$E_T = Z_{TT}\ I_T + Z_{TT}\ C_{TC}\ i_C \qquad (2.13)$$

แทนค่า $E_L$ จากสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$Z_{LL}\ i_C = -\ C_{TC}^t\ E_T \qquad (2.14)$$

แทนค่า $E_T$ จากสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.14) จะได้

$$Z_{LL}\ i_C = -\ C_{TC}^t\ (Z_{TT}\ I_T + Z_{TT}\ C_{TC}\ i_C) \qquad (2.15)$$

สมการ (2.15) จัดให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมจะได้

$$0 = C_{TC}^t\ Z_{TT}\ I_T + (C_{TC}^t\ Z_{TT}\ C_{TC} + Z_{LL})\ i_C \qquad (2.16)$$

จากสมการ (2.13) และ (2.16) จะได้

$$\left[\begin{array}{c} E_T \\ \hline 0 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c} Z_{TT} & Z_{TT}C_{TC} \\ \hdashline C_{TC}^{t}\,Z_{TT} & C_{TC}^{t}Z_{TT}C_{TC} + Z_{LL} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} I_T \\ \hline i_c \end{array}\right] \tag{2.17}$$

หรือ

$$\left[\begin{array}{c} E_T \\ \hline 0 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c} Z_1 & Z_2 \\ \hdashline Z_3 & Z_4 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} I_T \\ \hline i_C \end{array}\right] \tag{2.18}$$

โดยที่
$$Z_1 = Z_{TT}$$
$$Z_2 = Z_{TT}C_{TC}$$
$$Z_3 = C_{TC}^{t}Z_{TT} = Z_2^{t}$$
$$Z_4 = C_{TC}^{t}Z_{TT}C_{TC} + Z_{LL}$$

โดยทั่วไปถ้าเราแบ่งระบบออกเป็นระบบย่อยทั้งหมด N ระบบ สมการ (2.18) สามารถเขียนได้ดังนี้.-

$$\left[\begin{array}{c} E_A \\ \hline E_B \\ \hline E_C \\ \hline \vdots \\ E_N \\ \hline 0 \end{array}\right] = \begin{array}{cc} & \begin{array}{ccccc} A & B & C & \cdots & N \end{array} \\ \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ \vdots \\ N \\ Z_2^{t} \end{array} & \left[\begin{array}{c:c:c:cc|c} Z_{AA} & & & & & Z_{2AA} \\ \hdashline & Z_{BB} & & & & Z_{2BB} \\ \hdashline & & Z_{CC} & & & Z_{2CC} \\ \hdashline & & & \ddots & & \vdots \\ & & & & Z_{NN} & Z_{2NN} \\ \hline Z_{2AA}^{t} & Z_{2BB}^{t} & Z_{2CC}^{t} & \cdots & Z_{2NN}^{t} & Z_4 \end{array}\right] \end{array} \left[\begin{array}{c} I_{TA} \\ \hline I_{TB} \\ \hline I_{TC} \\ \hline \vdots \\ I_{TN} \\ \hline i_C \end{array}\right] \tag{2.19}$$

การหา $E_T$ เมื่อรู้ค่า $I_T$ ทำได้โดยเขียนสมการ (2.10) อีกครั้งคือ

$$E_T = Z_{TT}I_T + Z_{TT}I_T' \tag{2.10}$$

แทนค่า $I_T'$ จากสมการ (2.2) ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$E_T = Z_{TT}I_T + Z_{TT}\ (\ C_{TC}i_C\ ) \tag{2.20}$$

จากสมการ (2.16) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$i_C = Z_4^{-1}\left[-\ C_{TC}^t\ (\ Z_{TT}I_T\ )\right] \tag{2.21}$$

แทนสมการ (2.21) ลงในสมการ (2.20) จะได้

$$E_T = Z_{TT}I_T + Z_{TT}\left[C_{TC}\left[Z_4^{-1}\left[-C_{TC}^t\left[Z_{TT}I_T\right]\right]\right]\right] \tag{2.22}$$

จากสมการ (2.22) สามารถเขียนเป็น 6 ขั้นตอน โดยคิดจากวงเล็บในสุดดังนี้

$$\begin{aligned}
&1)\ E_T^{(0)} = Z_{TT}\ I_T\\
&2)\ e_C' = -C_{TC}^t\ E_T^{(0)}\\
&3)\ i_C = Z_4^{-1}\ e_C'\\
&4)\ I_T' = C_{TC}\ i_C\\
&5)\ E_T^{(1)} = Z_{TT}\ I_T'\\
&6)\ E_T = E_T^{(0)} + E_T^{(1)}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

จากสมการ (2.18) ถ้ากำจัดตัวแปร $i_C$ จะได้

$$E_T = (Z_1 - Z_2\ Z_4^{-1}\ Z_2^{\ t})\ I_T \tag{2.24}$$

หรือ $$E_T = Z_1'\ I_T \tag{2.25}$$

โดยที่ $Z_1' = Z_1 - Z_2 Z_4^{-1} Z_2^t$

ซึ่ง $Z_1'$ คือ $Z_{BUS}$ ของระบบรวมทั้งหมด

## 2.2 ตัวอย่างการหาผลลัพธ์

พิจารณาข่ายวงจรในรูปที่ 2.2 สมมุติอิมพีแดนซ์ของสายทุกเส้นเป็น 1 PU. กระแสที่ไหลเข้าบัสทุกบัสมีค่าเป็น 0.5 PU. ระบบถูกแบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อย โดยแบ่งผ่านบัสร่วม ซึ่งระบบที่ถูกแบ่งแล้วตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.3 ข่ายวงจรที่ทำการหาผลลัพธ์โดยวิธีแบ่งโซนนี้ ต้องไม่มีมิวชวลคัปปลิง (Mutual coupling) ระหว่างสายที่อยู่ต่างโซนกัน แต่มีมิวชวลคัปปลิงระหว่างสายที่อยู่ในโซนเดียวกันได้

จากข่ายวงจรรูปที่ 2.3 สามารถหาผลลัพธ์ได้ตามลำดับดังนี้

ก. หาบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ของแต่ละระบบย่อย

$$
Z_1 = \begin{array}{c|ccc|ccc|cc|}
 & 1A & 2A & 3A & 1B & 2B & 3B & 1C & 2C \\
\hline
1A & 2 & 2 & 1 & & & & & \\
2A & 2 & 3 & 1 & & & & & \\
3A & 1 & 1 & 1 & & & & & \\
\hline
1B & & & & 2 & 1 & 1 & & \\
2B & & & & 1 & 1 & 1 & & \\
3B & & & & 1 & 1 & 2 & & \\
\hline
1C & & & & & & & 2 & 1 \\
2C & & & & & & & 1 & 1 \\
\hline
\end{array}
$$

ข. หาเมตริกซ์ $Z_2$

$Z_2$ อาจหาได้จากผลคูณของเมตริกซ์ $Z_1C_{TC}$ ก็ได้ แต่ในที่นี้จะหาโดยไม่ใช้ $C_{TC}$ จะเห็นว่า $C_{TC}$ เป็นเมตริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วย 0, 1,-1 ดังนั้น $Z_2$ หรือผลคูณของ $Z_1C_{TC}$ ประกอบด้วยสมาชิกใน $Z_1$ โดยกำหนดเครื่องหมายจากทิศทางของคัทลายน์ สมมุติคัทลายน์ $L_1$ เชื่อมระหว่างโซน A และโซน B มีทิศทางจากบัส $1_B$ ไปบัส $1_A$ ค่าสมาชิกในแกนตั้ง $C_1$ ของ $Z_2$ ก็คือ สมาชิกในแถวตั้ง 1A ลบด้วยสมาชิกในแถวตั้ง 1B ของ Z1 สำหรับคัทลายน์เส้นอื่นก็หาได้เช่นเดียวกัน ดังนี้

$$
Z_2 = \begin{array}{c|cc|c|c|}
 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\
 & 1A-1B & 2B-2A & 3B-2C & 1C-3A \\
\hline
1A & 2 & -2 & & -1 \\
2A & 2 & -3 & & -1 \\
3A & 1 & -1 & & -1 \\
\hline
1B & -2 & 1 & 1 & \\
2B & -1 & 1 & 1 & \\
3B & -1 & 1 & 2 & \\
\hline
1C & & & -1 & 2 \\
2C & & & -1 & 1 \\
\hline
\end{array}
$$

ค. หาเมตริกซ์ $Z_4$

$Z_4$ หาได้จาก $Z_2$ ด้วยวิธีดังนี้ สมาชิกในแถวนอน $C_1$ ของ $Z_4$ เท่ากับสมาชิกในแถวนอน 1A ลบด้วย สมาชิกในแถวนอน 1B ของ $Z_2$ สมาชิกในแถวนอน $C_2$ ของ $Z_4$ เท่ากับสมาชิกในแถวนอน 2B ลบด้วยสมาชิกในแถวนอน 2A ของ $Z_2$ สมาชิกในแถวนอน $C_3$ และ $C_4$ หาได้เช่นเดียวกัน สำหรับค่าสมาชิกในแนวทะแยงให้บวกเพิ่มด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของคัทลายน์ $Z_4$ ดังนี้

$Z_4$ =

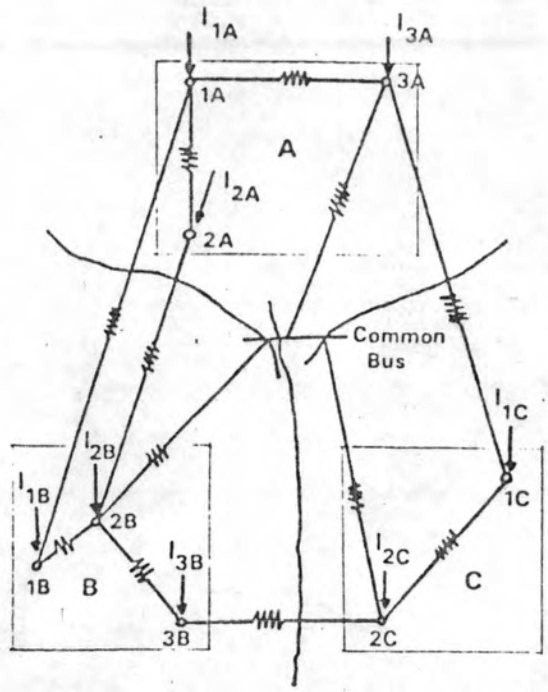
| | $C_1$ 1A-1B | $C_2$ 2B-2A | $C_3$ 3B-2C | $C_4$ 1C-3A |
|---|---|---|---|---|
| $C_1$ 1A-1B | 5 | -3 | -1 | -1 |
| $C_2$ 2B-2A | -3 | 5 | 1 | 1 |
| $C_3$ 3B-2C | -1 | 1 | 4 | -1 |
| $C_4$ 1C-3A | -1 | 1 | -1 | 4 |

ง. หาเมตริกซ์ $Y_4$

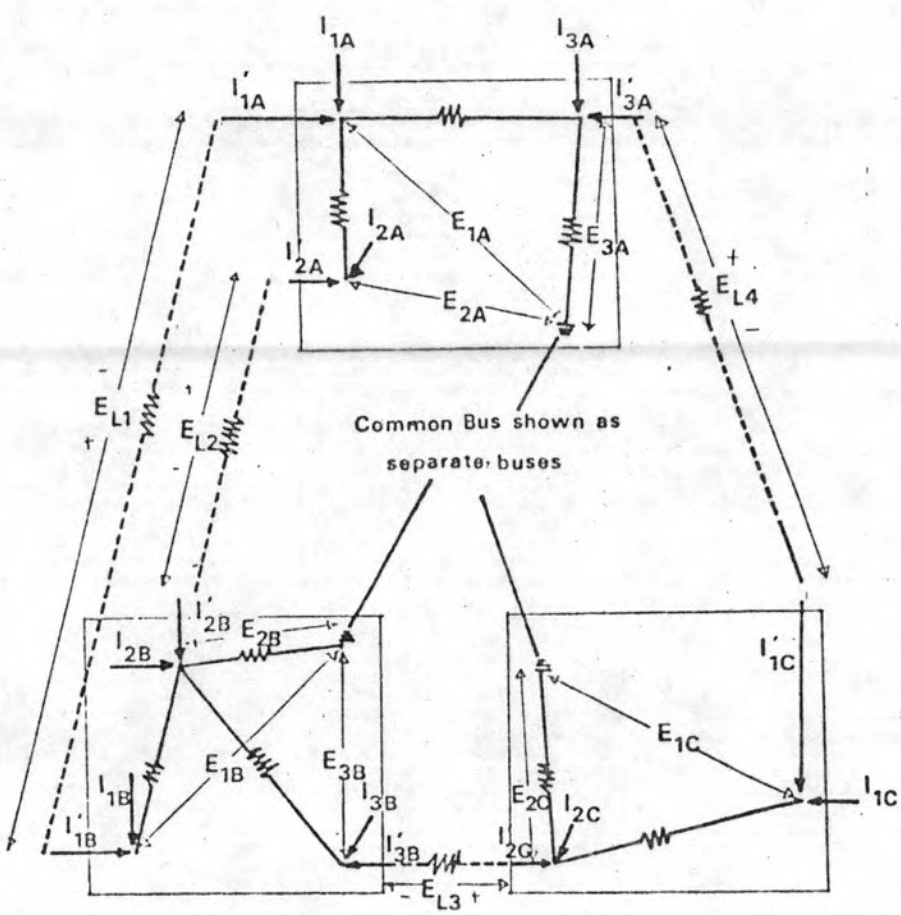
ได้มาจากการหาส่วนกลับของ $Z_4$ ดังนี้

$Y_4 = Z_4^{-1}$ =

| | $C_1$ 1A-1B | $C_2$ 2B-2A | $C_3$ 3B-2C | $C_4$ 1C-3A |
|---|---|---|---|---|
| $C_1$ 1A-1B | 0.370370 | 0.259259 | 0.037037 | 0.037037 |
| $C_2$ 2B-2A | 0.259259 | 0.481481 | -0.074074 | -0.074074 |
| $C_3$ 3B-2C | 0.037037 | -0.074074 | 0.303704 | 0.103704 |
| $C_4$ 1C-3A | 0.037037 | -0.074074 | 0.103704 | 0.303704 |




รูปที่ 2.2 แสดงข่ายวงจรซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 โซน




รูปที่ 2.3 แสดงข่ายวงจรเมื่อเอาศักย์ลายน้ำออก

จ. หาผลลัพธ์ตามขั้นตอนดังนี้

1. $E_T^{(o)} = Z_1 I_T$

$I_T = 0.5$

$$E_T^{(o)} = \begin{array}{c} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{array} \begin{bmatrix} E_{1A}^{(o)} = 2.5 \\ E_{2A}^{(o)} = 3.0 \\ E_{3A}^{(o)} = 1.5 \\ E_{1B}^{(o)} = 2.0 \\ E_{2B}^{(o)} = 1.5 \\ E_{3B}^{(o)} = 2.0 \\ E_{1C}^{(o)} = 1.5 \\ E_{2C}^{(o)} = 1.0 \end{bmatrix}$$

2. $e'_c = E_L^{(o)}$

$$e'_c = E_L^{(o)} = \begin{array}{c} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{array} \begin{bmatrix} E_{1B}^{(o)} - E_{1A}^{(o)} = -0.5 \\ E_{2A}^{(o)} - E_{2B}^{(o)} = 1.5 \\ E_{2C}^{(o)} - E_{3B}^{(o)} = -1.0 \\ E_{3A}^{(o)} - E_{1C}^{(o)} = 0 \end{bmatrix}$$

3. $i_c = Y_4 e'_c$

$$i_c = \begin{array}{c} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{array} \begin{bmatrix} i_{c1} = 0.1666 \\ i_{c2} = 0.6666 \\ i_{c3} = -0.4333 \\ i_{c4} = -0.2333 \end{bmatrix}$$

4. หา $I'_T$ จาก $i_c$

$$I'_T = \begin{array}{c} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{array} \begin{bmatrix} I'_{1A} & = & i_{c1} & = & 0.1666 \\ I'_{2A} & = & -i_{c2} & = & -0.6666 \\ I'_{3A} & = & -i_{c4} & = & 0.2333 \\ I'_{1B} & = & -i_{c1} & = & -0.1666 \\ I'_{2B} & = & i_{c2} & = & 0.6666 \\ I'_{3B} & = & i_{c3} & = & -0.4333 \\ I'_{1C} & = & i_{c4} & = & -0.2333 \\ I'_{2C} & = & -i_{c3} & = & 0.4333 \end{bmatrix}$$

5. $E_T^{(1)} = Z_1 I'_T$

$$E_T^{(1)} = \begin{array}{c} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{array} \begin{bmatrix} E_{1A}^{(1)} & = & -0.7666 \\ E_{2A}^{(1)} & = & 1.4333 \\ E_{3A}^{(1)} & = & -0.2666 \\ E_{1B}^{(1)} & = & -0.1000 \\ E_{2B}^{(1)} & = & 0.0666 \\ E_{3B}^{(1)} & = & -0.3666 \\ E_{1C}^{(1)} & = & -0.0333 \\ E_{2C}^{(1)} & = & 0.2000 \end{bmatrix}$$

6. $E_T = E_T^{(o)} + E_T^{(1)}$

$$E_T = \begin{array}{c} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{array} \begin{bmatrix} E_{1A} & = & 1.7333 \\ E_{2A} & = & 1.5666 \\ E_{3A} & = & 1.2333 \\ E_{1B} & = & 1.9000 \\ E_{2B} & = & 1.5666 \\ E_{3B} & = & 1.6333 \\ E_{1C} & = & 1.4666 \\ E_{2C} & = & 1.2000 \end{bmatrix}$$