บทที่ 5

การพัฒนาโปรแกรมในส่วนของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

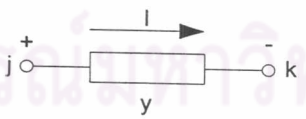
ในบทที่ 3 ได้อธิบายถึงการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส ว่าเป็นการประกอบไปด้วยอุปกรณ์ย่อยต่างๆ ในบทนี้จะอธิบายถึงการนำเอาหลักการเชิงวัตถุมาประยุกต์ใช้กับการพัฒนาอุปกรณ์แต่ละชนิดและนำมารวมกันเพื่อสามารถทำงานได้ตรงกับวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

5.1 ตราประจำอุปกรณ์

เมื่อพิจารณาถึงการสร้างสมการเมทริกซ์ของวงจรในแง่ของการเขียนโปรแกรมแล้ว วิธีโมดิฟายด์โนดัลเป็นวิธีที่อำนวยให้เราสามารถป้อนสมการลักษณะสมบัติของอุปกรณ์แต่ละตัวลงในสมการวงจรได้อย่างอิสระ อุปกรณ์แต่ละชนิดจึงมีสมการเฉพาะตัวซึ่งเราสามารถนำไปแทนลงในสมการของวงจรตามตำแหน่งแรงดันโนด และกระแสที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์นั้น ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดตราประจำอุปกรณ์ (device stamp) ซึ่งเป็นตารางหรือสูตรที่บอกว่าค่าของอุปกรณ์นั้นๆ ควรจะถูกโหลดเข้ายังตำแหน่งใดของเมทริกซ์ และเวกเตอร์

5.1.1 การสร้างตราประจำอุปกรณ์

การสร้างตราประจำอุปกรณ์อ้างอิงจากกฎของกระแส (Kirchhoff's current law) ที่กล่าวว่า "ผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากปมใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์" พิจารณาอุปกรณ์ที่มีค่าแอดมิตแตนซ์ y และเชื่อมโยงระหว่างโนด j และ k ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 อุปกรณ์แยกเดี่ยว

สมมติให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าเท่ากับ I และไหลจากโนด j ไปยังโนด k ค่ากระแส I จะปรากฏในสมการตามกฎของกระแสด้วยค่าบวกและค่าลบดังนี้

KCL ที่โนด j $\cdots + I \cdots = \cdots$ (5.1)

KCL ที่โนด k $\cdots - I \cdots = \cdots$ (5.2)

โดย $\cdots$ แทนค่าจากอุปกรณ์และแหล่งจ่ายตัวอื่น เราสามารถเขียนค่ากระแส I ให้อยู่ในรูปผลต่างของแรงดันโนด และค่าแอดมิตแตนซ์ได้ดังนี้

KCL ที่โนด j $\cdots + y(V_j - V_k) \cdots = \cdots$ (5.3)

KCL ที่โนด k $\cdots - y(V_j - V_k) \cdots = \cdots$ (5.4)

กระจายค่า y ทำให้ได้

KCL ที่โนด j $\cdots + yV_j \cdots - yV_k \cdots = \cdots$ (5.5)

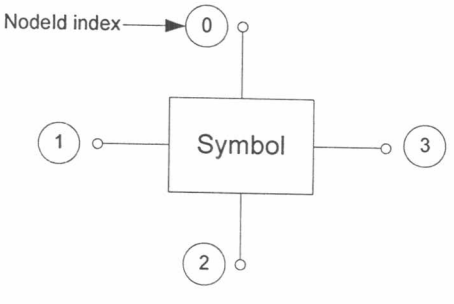
KCL ที่โนด k $\cdots - yV_j \cdots + yV_k \cdots = \cdots$ (5.6)

จะได้ว่าค่าแอดมิตแตนซ์ของอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงระหว่างโนด j และ โนด k จะปรากฏเฉพาะแถวและคอลัมน์ j และ k ของเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ เท่านั้นโดยมีค่าบวกที่ตำแหน่ง (j,j) และ (k,k) และมีค่าลบที่ตำแหน่ง (j,k) และ (k,j) เราจะเขียนอธิบายด้วยสัญลักษณ์แทนได้ดังนี้

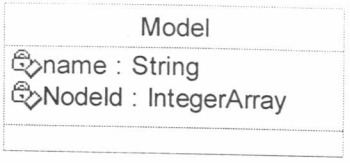
$$\begin{array}{c} \\ j \\ k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} j & k & b \end{array} \\ \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \qquad (5.7)$$

5.2 โครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

รูปแบบทั่วไปของอุปกรณ์ไฟฟ้าแสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจะประกอบไปด้วยโนดจำนวนหนึ่งแล้วแต่ว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดใด และหมายเลขอ้างอิงของโนดเหล่านี้จะใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการสร้างสมการเมทริกซ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าข้อมูลพื้นฐานจะอยู่ในคลาสแม่ ดังนั้นเราจะให้คลาสแม่มีหมายเลขอ้างอิงของโนดเป็นคุณลักษณะและตั้งชื่อว่าคลาส Model โครงสร้างของคลาส Model แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 รูปแบบทั่วไปของอุปกรณ์ไฟฟ้า

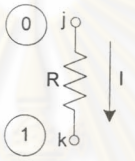


รูปที่ 5.3 คลาส Model

5.2.1 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี 2 โนด ดังสัญลักษณ์ในรูปที่ 5.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะเป็นไปตามสมการ

$$I = \frac{V}{R} \tag{5.8}$$

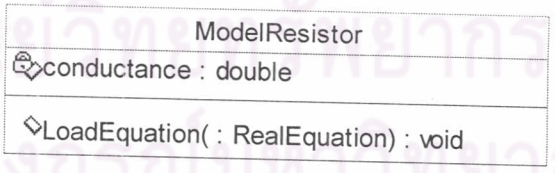


รูปที่ 5.4 สัญลักษณ์ตัวต้านทาน

ทำให้ได้ตราประจำอุปกรณ์ของตัวต้านทานคือ

$$\begin{matrix} & j & k \\ j & 1/R & -1/R \\ k & -1/R & 1/R \end{matrix} \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

การทำงานของตัวต้านทานคือการแทนค่าความนำไฟฟ้าลงในสมการเมทริกซ์เท่านั้น ทำให้ได้โครงสร้างคลาสสำหรับตัวต้านทานดังรูปที่ 5.5



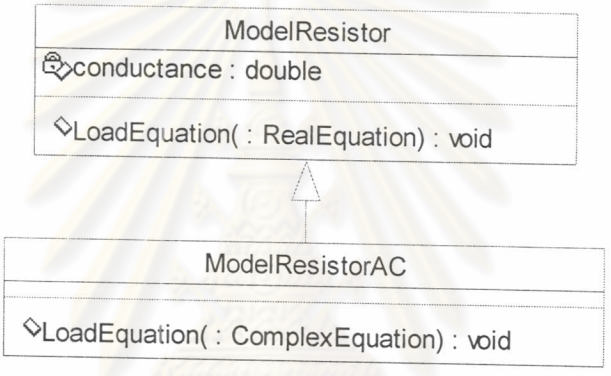
รูปที่ 5.5 คลาส ModelResistor

จากรูปที่ 5.5 คลาส ModelResistor จะมีตัวแปร conductance เป็นค่าความนำไฟฟ้า และมีการกำหนดค่าความนำไฟฟ้าในสมการเมทริกซ์ด้วยฟังก์ชัน LoadEquation และส่งผ่านตัวแปรชนิด RealEquation เข้ามาในฟังก์ชัน ตัวแปรชนิด RealEquation จะประกอบไปด้วยเมทริกซ์ A และเวกเตอร์ b สำหรับการแก้สมการวงจรไฟฟ้า รายละเอียดของคลาสสำหรับจัดการกับสมการวงจรไฟฟ้าจะกล่าวถึงในบทที่ 6

การทำงานของการกำหนดค่าในสมการเมทริกซ์ของตัวต้านทานแสดงได้ดังรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelResistor::LoadEquation(RealEquation)
{
    1. Add conductance at (NodeId[0], NodeId[0]) int Matrix A
    2. Add -conductance at (NodeId[0], NodeId[1]) int Matrix A
    3. Add -conductance at (NodeId[1], NodeId[0]) int Matrix A
    4. Add conductance at (NodeId[1], NodeId[1]) int Matrix A
}
```

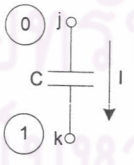
เนื่องจากในการคำนวณผลตอบสนองเชิงความถี่ ข้อมูลที่ใช้จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการสำหรับจำนวนเชิงซ้อนด้วย ทำให้ได้โครงสร้างของคลาสสำหรับตัวต้านทานในการคำนวณผลตอบสนองเชิงความถี่ดังรูปที่ 5.6 จากโครงสร้างนี้จะเห็นว่าวัตถุจากคลาส ModelResistorAC จะสามารถจัดการกับข้อมูลทั้งจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน



รูปที่ 5.6 คลาส ModelResistorAC

5.2.2 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี 2 โนดดังสัญลักษณ์ในรูปที่ 5.7

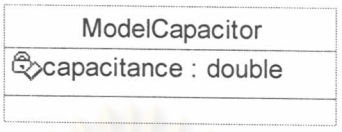


รูปที่ 5.7 สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุ

ในการคำนวณจุดทำงานสงบ ตัวเก็บประจุจะเสมือนเป็นวงจรเปิด (open-circuit) ค่ากระแสที่ไหลผ่านมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ได้ตราประจำอุปกรณ์ของตัวเก็บประจุคือ

$$\begin{array}{c} \\ j \\ k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cc} j & k \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{c} b \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \qquad (5.10)$$

โครงสร้างคลาสสำหรับตัวเก็บประจุแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าคลาสนี้จะไม่มีการกระทำใดๆ กับสมการวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 5.8 คลาส ModelCapacitor

ในการคำนวณผลตอบสนองเชิงเวลา กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะเป็นไปตามสมการ

$$I = C\frac{dV}{dt} \qquad (5.11)$$

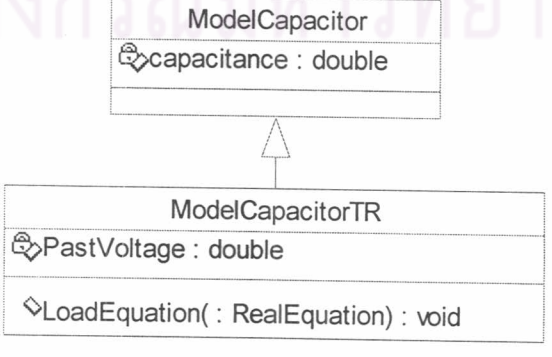
จากสมการที่ (2.16) ทำให้ได้

$$I = C\frac{V(t_i) - V(t_{i-1})}{h} \qquad (5.12)$$

ทำให้ได้ตราประจำอุปกรณ์ของตัวเก็บประจุในการคำนวณผลตอบสนองเชิงเวลาคือ

$$\begin{array}{c} \\ j \\ k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cc} j & k \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{C}{h} & -\frac{C}{h} \\ -\frac{C}{h} & \frac{C}{h} \end{bmatrix} \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{c} b \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{C}{h} \cdot V(t_{i-1}) \\ -\frac{C}{h} \cdot V(t_{i-1}) \end{bmatrix} \end{array} \qquad (5.13)$$

โครงสร้างคลาสสำหรับตัวเก็บประจุในการคำนวณผลตอบสนองเชิงเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 คลาส ModelCapacitorTR

การทำงานของการกำหนดค่าในสมการเมทริกซ์ของตัวเก็บประจุในการคำนวณผลตอบสนองเชิงเวลาแสดงได้ดังรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelCapacitorTR::LoadEquation(RealEquation)
{
    1. double tmpValue1 = capacitance / stepSize
    2. double tmpValue2 = tmpValue1 * PastVoltage
    3. Add tmpValue1 at (NodeId[0], NodeId[0]) in Matrix A
    4. Add -tmpValue1 at (NodeId[0], NodeId[1]) in Matrix A
    5. Add -tmpValue1 at (NodeId[1], NodeId[0]) in Matrix A
    6. Add tmpValue1 at (NodeId[1], NodeId[1]) in Matrix A
    7. Add tmpValue2 at (NodeId[0]) in Vector B
    8. Add -tmpValue2 at (NodeId[0]) in Vector B
}
```

ในการคำนวณผลตอบสนองเชิงความถี่ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะเป็นไปตามสมการ

$$I = j\omega C \cdot V \qquad (5.14)$$

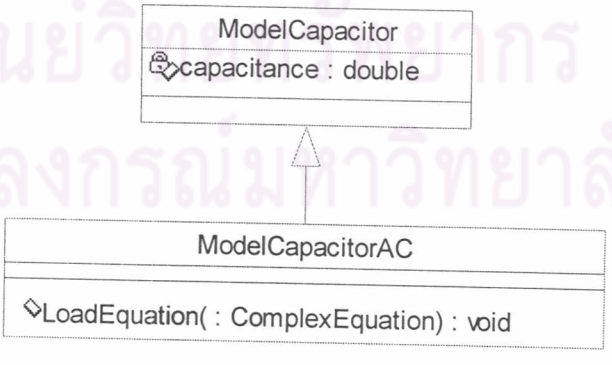
โดยที่ $j = \sqrt{-1}$

$\omega = 2\pi \cdot f$ และ f แทนความถี่ของวงจร

ทำให้ได้ตราประจำอุปกรณ์ของตัวเก็บประจุในการคำนวณผลตอบสนองเชิงความถี่คือ

$$\begin{array}{c} \\ j \\ k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cc} j & k \end{array} \\ \begin{bmatrix} j\omega C & -j\omega C \\ -j\omega C & j\omega C \end{bmatrix} \end{array}\begin{array}{c} b \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \qquad (5.15)$$

โครงสร้างคลาสสำหรับตัวเก็บประจุในการคำนวณผลตอบสนองเชิงเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



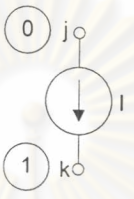
รูปที่ 5.10 คลาส ModelCapacitorAC

การทำงานของการกำหนดค่าในสมการเมทริกซ์ของตัวเก็บประจุในการคำนวณผลตอบสนองเชิงความถี่แสดงได้ดังรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelCapacitorAC::LoadEquation(ComplexEquation)
{
    1. Complex tmpValue = capacitance * omega * j
    2. Add tmpValue at (NodeId[0], NodeId[0] in Matrix A
    3. Add -tmpValue at (NodeId[0], NodeId[1] in Matrix A
    4. Add -tmpValue at (NodeId[1], NodeId[0] in Matrix A
    5. Add tmpValue at (NodeId[1], NodeId[1] in Matrix A
}
```

5.2.3 แหล่งจ่ายกระแส

แหล่งจ่ายกระแสเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี 2 โนดดังสัญลักษณ์ในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายกระแส

จากสมการ (5.1) ถึง (5.6) ทำให้ได้รูปแบบของค่าที่ใช้แทนในสมการตามกฎของกระแสดังนี้

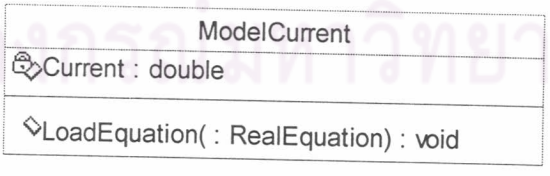
KCL ที่โนด j $\quad ... = -I$ (5.16)

KCL ที่โนด k $\quad ... = I$ (5.17)

ทำให้ได้ตราประจำอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายกระแสคือ

$$\begin{array}{c} \\ j \\ k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cc} j & k \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}\begin{array}{c} b \\ \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} \end{array} \qquad (5.18)$$

โครงสร้างคลาสสำหรับแหล่งจ่ายกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 5.12



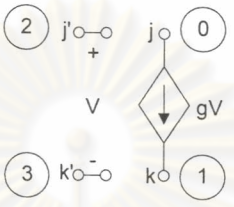
รูปที่ 5.12 คลาส ModelCurrent

การทำงานของการกำหนดค่าในสมการเมทริกซ์ของแหล่งจ่ายกระแสแสดงได้ดังรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelCurrent::LoadEquation(RealEquation)
{
    1. Load -Current at (NodeId[0]) in Vector B
    2. Load Current at (NodeId[1]) int Vector B
}
```

5.2.4 <u>แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน</u>

แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี 4 โนดดังสัญลักษณ์ในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน

กระแสที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันเป็นไปตามสมการ

$$I_{j'} = 0 \qquad (5.19)$$

$$I_{k'} = 0 \qquad (5.20)$$

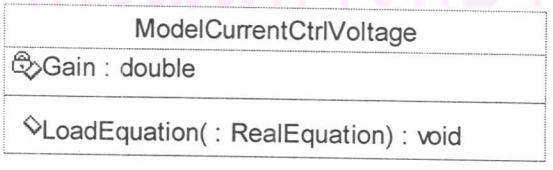
$$I_j = g(V_{j'} - V_{k'}) \qquad (5.21)$$

$$I_k = -g(V_{j'} - V_{k'}) \qquad (5.22)$$

ทำให้ได้ตราประจำอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันคือ

$$\begin{array}{c} \\ j \\ k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cc} j' & k' \end{array} \\ \begin{bmatrix} g & -g \\ -g & g \end{bmatrix} \end{array}\begin{array}{c} b \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \qquad (5.23)$$

โครงสร้างคลาสสำหรับแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 5.14



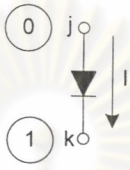
รูปที่ 5.14 คลาส ModelCurrentCtrlVoltage

การทำงานของการกำหนดค่าในสมการเมทริกซ์ของแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันแสดงได้ดังรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelCurrentCtrlVoltage::LoadEquation(RealEquation)
{
    1. Load Gain at (NodeId[0], NodeId[2]) in Matrix A
    2. Load -Gain at (NodeId[0], NodeId[3]) in Matrix A
    3. Load -Gain at (NodeId[1], NodeId[2]) in Matrix A
    4. Load Gain at (NodeId[1], NodeId[3]) in Matrix A
}
```

5.2.5 ไดโอด

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี 2 โนดดังสัญลักษณ์ในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 สัญลักษณ์ไดโอด

กระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าดังสมการ

$$I = I_s \cdot \left(e^{v/v_t} - 1\right) \tag{5.24}$$

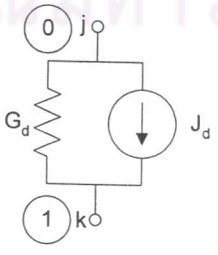
เนื่องจากสมการกระแสของไดโอดเป็นสมการไม่เชิงเส้น เราจำเป็นต้องนำขั้นตอนวิธีนิวตัน-ราฟสันมาใช้ ดังนั้นสมการกระแสของไดโอดที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$\begin{aligned} I_{(k+1)} &= I_{(k)} + \frac{\partial I_{(k)}}{\partial V} \cdot \left(V_{(k+1)} - V_{(k)}\right) \\ &= G_d \cdot V_{(k+1)} + J_d \end{aligned} \tag{5.25}$$

โดยที่ $$G_d = \frac{\partial I}{\partial V} = \frac{I_s}{V_t} \cdot e^{V/V_t} \tag{5.26}$$

$$J_d = I_{(k)} - G_d \cdot V_{(k)} \tag{5.27}$$

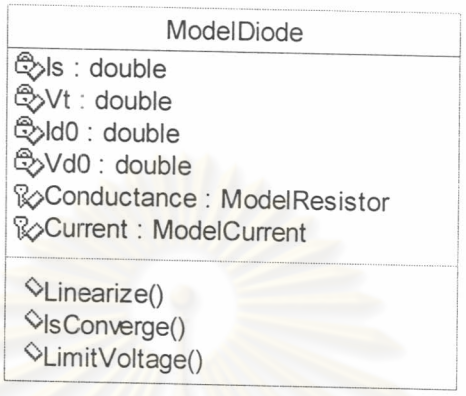
จากสมการที่ (5.25) ทำให้ได้วงจรสมมูลของไดโอดดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วงจรสมมูลของไดโอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.16 หลังจากที่เราคำนวณค่า G_d และ J_d ได้แล้ว เราสามารถใช้วัตถุจากคลาสของตัวต้านทาน และวัตถุจากคลาสของแหล่งจ่ายกระแสมาช่วยในการหาผลลัพธ์ของการทำงาน ขั้นตอนการทำงานของคลาสไดโอดจะต้องมีการคำนวณเชิงเส้นก่อน ดังนั้นโครงสร้างของคลาสไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

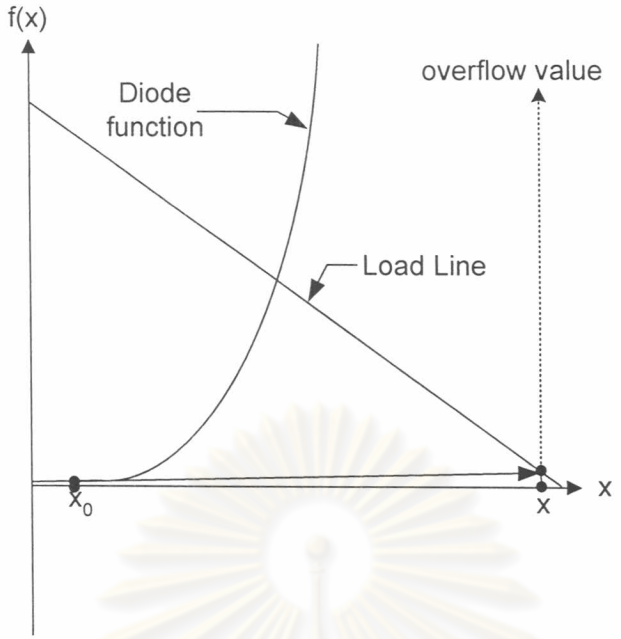


รูปที่ 5.17 คลาส ModelDiode

ขั้นตอนการทำงานของคลาสไดโอดคือการคำนวณเชิงเส้นเพื่อหาค่า G_d และ J_d จากนั้นจึงกำหนดค่า G_d และ J_d ให้กับวัตถุจากคลาสของตัวต้านทานและวัตถุจากคลาสของแหล่งจ่ายกระแสตามลำดับ ส่วนหน้าที่ในการกำหนดค่าในสมการเมทริกซ์จะเป็นหน้าที่ของวัตถุจากคลาสทั้งสองนี้ รายละเอียดของการคำนวณเชิงเส้นแสดงได้ด้วยรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelDiode::Linearize()
{
    1. Calculate Id
    2. Calculate Gd
    3. Calculate Jd
    4. Assign Gd to Conductance
    5. Assign Jd to Current
}
```

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำงานของคลาสไดโอดคือการจำกัดกระแส เนื่องจากสมการกระแสของไดโอดเป็นสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นค่าแรงดันที่ได้จากการแก้สมการอาจทำให้ค่ากระแสที่เกิดจากการใช้ค่าแรงดันนั้นเป็นตัวแปรในการคำนวณขั้นต่อไปมีค่ามากจนเกิดการล้นเกินขีดจำกัดของการเก็บข้อมูลได้ ลักษณะของการเกิดการล้นของข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ 5.18

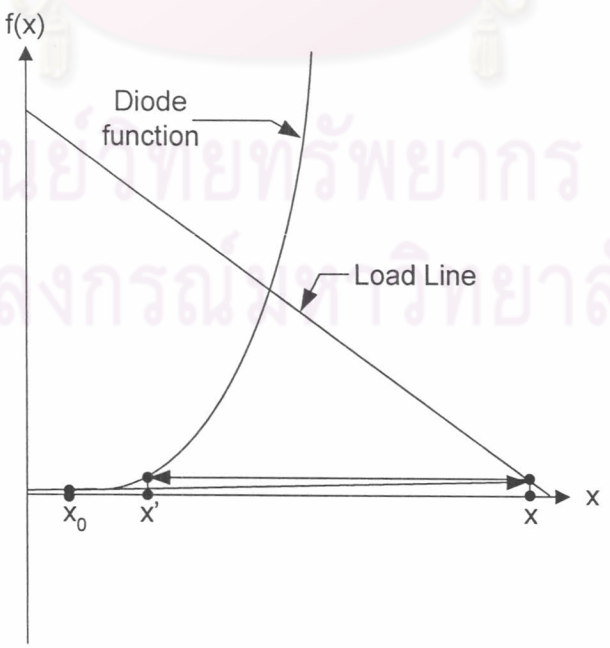


รูปที่ 5.18 การเกิดการล้นของข้อมูล

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการล้นของข้อมูล เราจะเปลี่ยนจากการอ้างอิงด้วยแรงดันเป็นอ้างอิงด้วยกระแสแทน กล่าวคือ เมื่อได้ค่าแรงดันใหม่แล้ว ก่อนที่จะนำไปใช้ในการคำนวณขั้นต่อไป เราจะใช้ค่าแรงดันใหม่ที่ได้ และความชันเดิมของจุดเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาค่ากระแสดังสมการ

$$I = f'(x_0) \cdot (x - x_0) \qquad (5.28)$$

จากนั้นจึงทำการหาค่าแรงดันจากค่ากระแสที่ได้ ขั้นตอนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 การเปลี่ยนจากการอ้างอิงด้วยแรงดันเป็นอ้างอิงด้วยกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

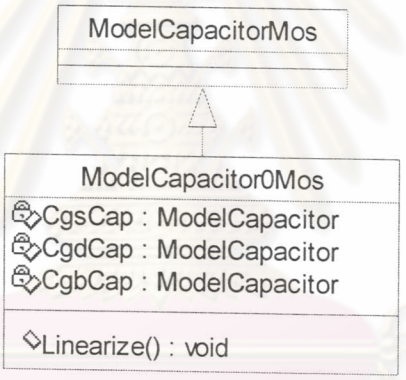
จากรูปที่ 5.19 เพื่อเป็นการป้องกันการล้นของข้อมูล ค่าแรงดันที่จะใช้ในการคำนวณครั้งต่อไปด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนจากค่า x เป็นค่า x'

5.3 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

หัวข้อ 5.2 ได้อธิบายถึงคลาสที่ใช้ในการคำนวณการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส ในการพัฒนาการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสนี้ เราจะอาศัยวัตถุจากคลาสต่างๆ นี้เพื่อช่วยในการจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

5.3.1 ตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

แบบจำลองของ Meyer เป็นการคำนวณค่าตัวเก็บประจุระหว่างโนดต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส ดังนั้นเราจะอาศัยวัตถุจากคลาสตัวเก็บประจุมาใช้ในการคำนวณ โครงสร้างของคลาสตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 คลาส ModelCapacitor0Mos

การทำงานของคลาสตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส แสดงได้ด้วยรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelCapacitor0Mos::Linearize()
{
    1. Calculate Cgs
    2. Calculate Cgd
    3. Calculate Cgb
    4. Assign Cgs to CgsCap
    5. Assign Cgd to CgdCap
    6. Assign Cgb to CgbCap
}
```

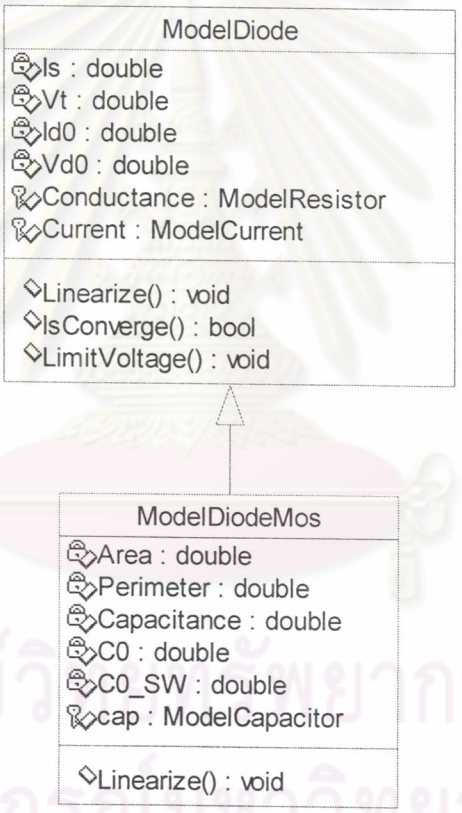
5.3.2 ไดโอดในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

ไดโอดในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสจะประกอบด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุ โครงสร้างคลาสของไดโอดในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแสดงได้ดังรูปที่ 5.21

รายละเอียดของการคำนวณเชิงเส้นแสดงได้ด้วยรหัสเทียมดังนี้

```
void ModelDiodeMos::Linearize()
{
    1. Calculate Id
    2. Calculate Gd
    3. Calculate Jd
    4. Calculate Capacitance
    5. Assign Gd to Conductance
    6. Assign Jd to Current
    7. Assign Capacitance to cap
}
```

หลังจากคำนวณค่าเชิงเส้นแล้วกำหนดให้กับวัตถุจากคลาสตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายกระแส แล้ว จึงปล่อยให้หน้าที่ในการสร้างสมการเมทริกซ์เป็นของวัตถุนั้นๆ ไป

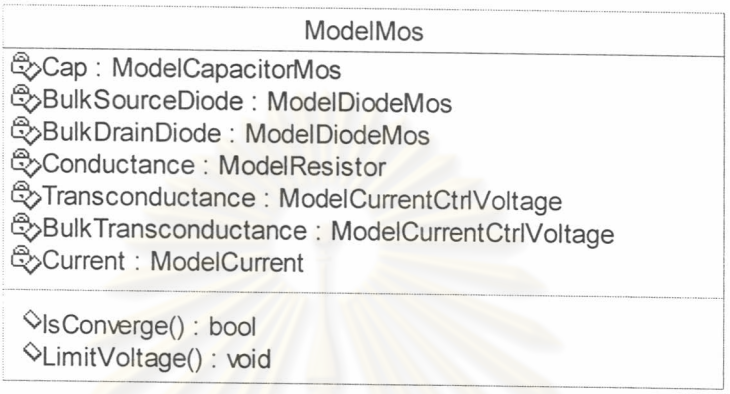


รูปที่ 5.21 คลาส ModelDiodeMos

5.3.3 ทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

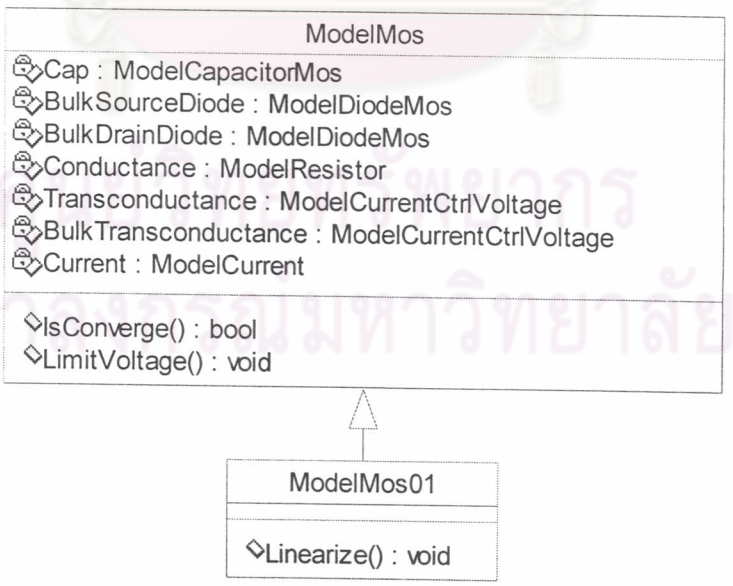
การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสจะมีการทำงานของตัวเก็บประจุและไดโอดของทรานซิสเตอร์มอส รวมกับแบบจำลองกระแสเดรน ซึ่งการทำงานของตัวเก็บประจุและไดโอดของทรานซิสเตอร์มอสได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา ในการใช้งานจริง เราเพียงสร้างวัตถุจากคลาส

ModelCapacitorMos และ ModelDiodeMos เท่านั้น ดังนั้นหน้าที่หลักของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส คือการคำนวณการทำงานของกระแสเดรน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ว่ากระแสเดรนในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสจะขึ้นกับแรงดัน V_{gs}, V_{ds} และ V_{bs} เท่านั้น ทำให้วงจรสมมูลของกระแสเดรนประกอบไปด้วยตัวต้านทาน แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน และแหล่งจ่ายกระแส โครงสร้างคลาสของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแสดงได้ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 คลาส ModelMos

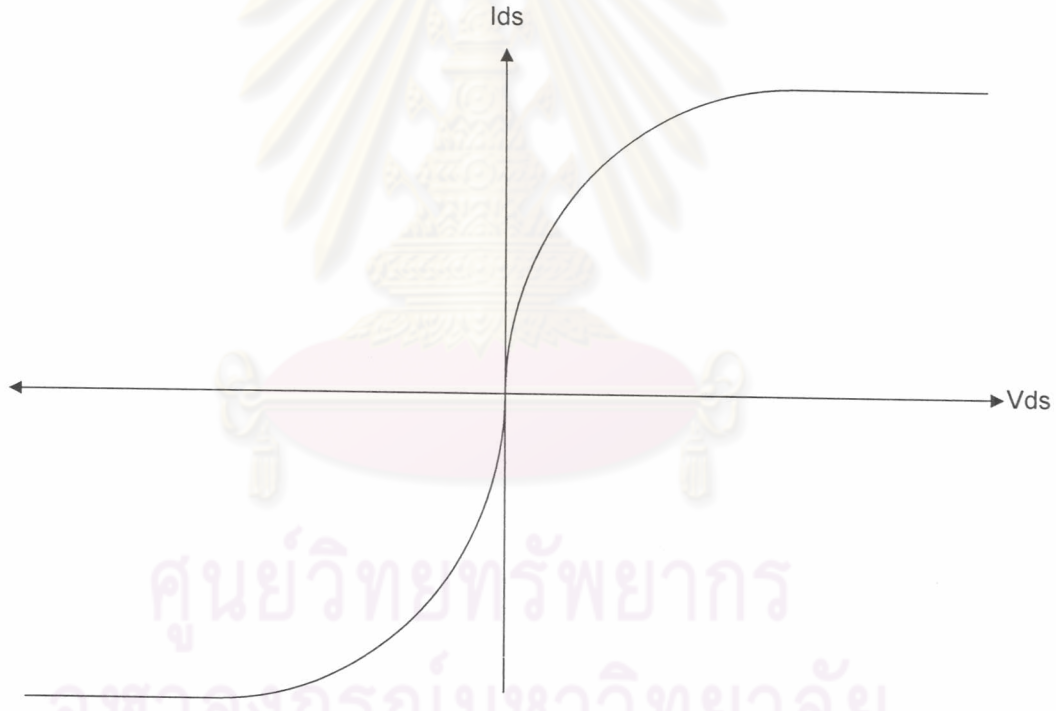
ค่าที่กำหนดให้กับวัตถุต่างๆ ภายในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสนั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละระดับของการคำนวณ ในวิทยานิพนธ์นี้ทรานซิสเตอร์ชนิดมอสจะมีการคำนวณค่าของกระแสเดรนในระดับ 1 ทำให้ได้โครงสร้างคลาสของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสระดับ 1 ดังรูปที่ 5.23 ซึ่งในการคำนวณระดับที่สูงขึ้น เราเพียงแต่สร้างคลาสเพื่อคำนวณค่าที่กำหนดให้กับวัตถุภายในเท่านั้น



รูปที่ 5.23 คลาส ModelMos01

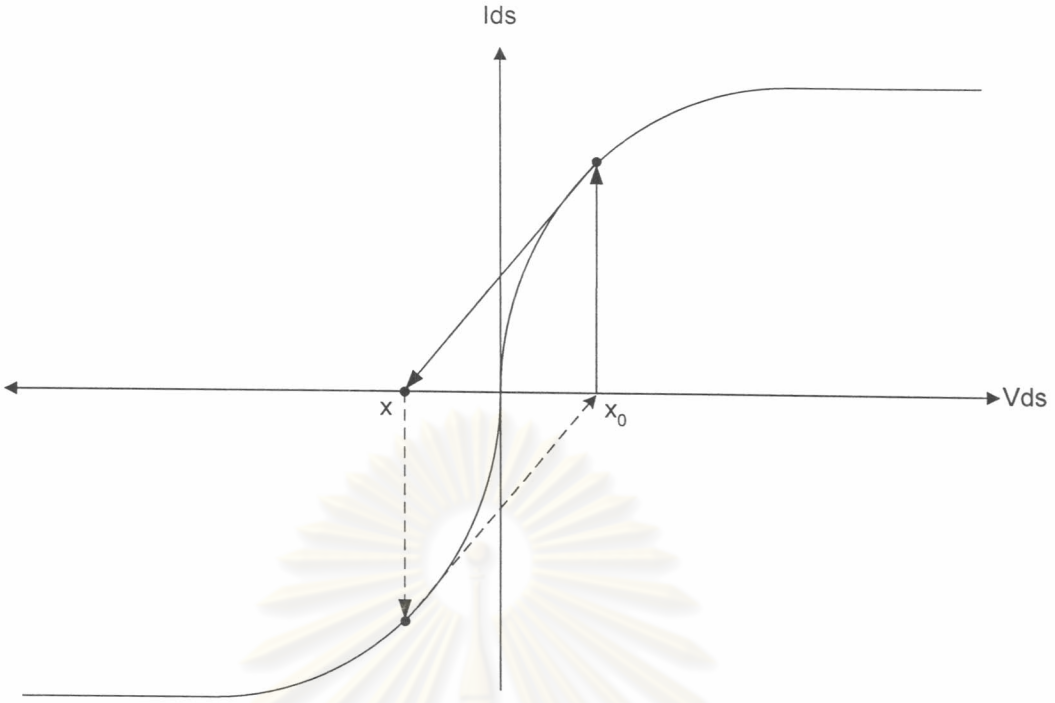
สิ่งที่ต้องพิจารณาถึงในการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสอีกประการคือการจำกัดกระแส เนื่องจากในการทำงานจริงของทรานซิสเตอร์มอส กระแสสามารถเปลี่ยนทิศได้ ทำให้กระแสเดรนมีลักษณะดังรูปที่ 5.24 ซึ่งทำให้อาจเกิดกรณีที่ทำให้การวนซ้ำ (loop) ของการคำนวณเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 5.25

รูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เลือกจุดเริ่มต้น x_0 ไม่ดี อาจทำให้การใช้ค่าความชันที่จุด x_0 เพื่อหาจุดต่อไปในการคำนวณเชิงเส้น ทำให้ค่าความชันที่จุดต่อไปส่งผลกลับมาให้ใช้ค่าแรงดัน x_0 อีกครั้ง ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ไม่ลู่เข้าสู่คำตอบที่ต้องการ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหานี้จึงใช้วิธีกำหนดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจุดต่อไป ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้ว่าจะให้ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกินค่าที่กำหนด วิธีนี้จะทำให้ผลลัพธ์ลู่เข้าสู่คำตอบได้ช้าลง แต่จะลดการเกิดปัญหาการเกิดการวนซ้ำได้ ลักษณะของการกำหนดแรงดันในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแสดงได้ดังรูปที่ 5.26

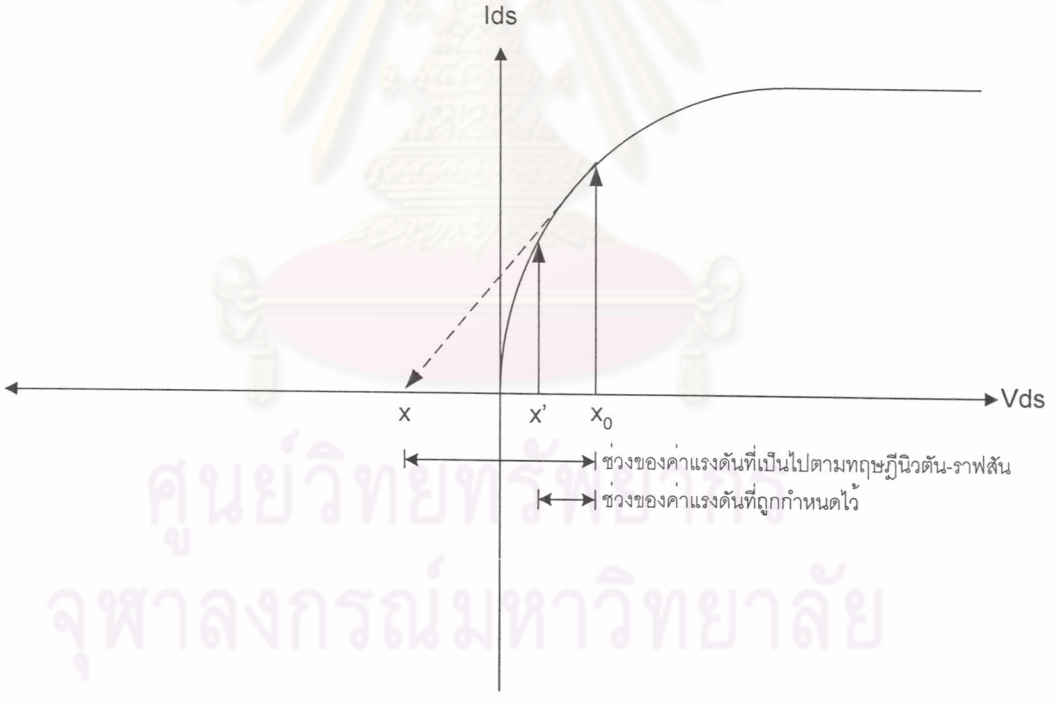


รูปที่ 5.24 ลักษณะของค่ากระแสเดรน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.25 ลักษณะของการวนซ้ำในการคำนวณเชิงเส้นของกระแสเดรน



รูปที่ 5.26 การกำหนดแรงดันในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส

รูปที่ 5.26 แสดงให้เห็นการเริ่มใช้จุด x_0 ในการคำนวณเชิงเส้น ซึ่งจากค่าความชันที่จุด x_0 ด้วยการคำนวณตามปกติจะต้องใช้ค่า x เป็นค่าแรงดันในครั้งถัดไป แต่เราจะกำหนดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไว้ จึงเปลี่ยนไปใช้ค่า x' เป็นค่าแรงดันในครั้งถัดไปแทน วิธีนี้จะลดการเกิดการวนซ้ำแต่ก็ทำให้ผลลัพธ์ลู่เข้าสู่คำตอบได้ช้าลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงการนำเอาการพัฒนาโปรแกรมเชิงวัตถุมาประยุกต์ใช้กับการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์วงจรรวม ข้อดีของการพัฒนาโปรแกรมเชิงวัตถุนี้คือทำให้เราสามารถพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นรายชนิดไป และสามารถนำเอาการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งจะเป็นการลดเวลาในการพัฒนาโปรแกรมต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์ไฟฟ้าเช่นทรานซิสเตอร์ชนิดมอส เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบจำลองที่แน่นอน ดังนั้นเราสามารถกำหนดโครงสร้างและการทำงานพื้นฐานไว้ในคลาสแม่ได้ ส่วนการคำนวณในระดับต่างๆ เราสามารถใช้คลาสที่สืบทอดมาจากคลาสแม่นี้ทำหน้าที่ในการคำนวณ ซึ่งในอนาคตสามารถที่จะพัฒนาระดับที่สูงขึ้นของทรานซิสเตอร์มอสได้อย่างง่าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย