บทที่ 3

โปรแกรมจำลองการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์ของ "เล็ก 6.0"

เนื่องจากเราได้เลือกโปรแกรมจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ "เล็ก 6.0" เป็นตัวแทนของโปรแกรมจำลองวงจรเชิงตัวเลข ในการนำมาพัฒนาเพื่อเร่งความเร็วในการคำนวณ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงจะขออธิบายหลักการทำงานของโปรแกรม "เล็ก 6.0" ที่ใช้ในการจำลองวงจรไฟฟ้า ในส่วนของการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา ซึ่งหลักการทำงานของขั้นตอนวิธีก็จะเป็นแบบเดียวกับโปรแกรมจำลองการทำงานเชิงตัวเลขอื่นๆทั่วไป โดยที่เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา พร้อมทั้งยกตัวอย่างวงจรนำมาอธิบายประกอบ และในตอนท้ายของบทนี้ จะแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ไปในแต่ละส่วนของการคำนวณว่าใช้เวลาไปมากน้อยเท่าใด

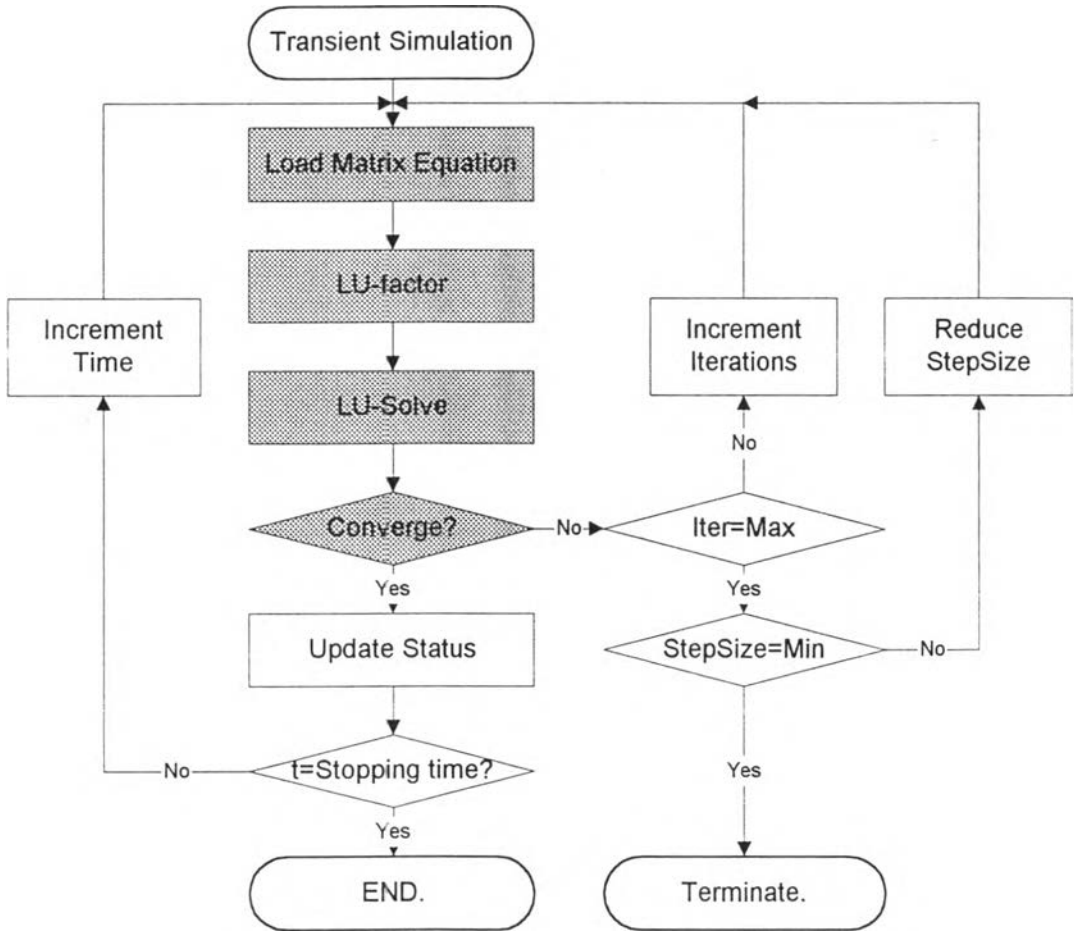
3.1 ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์วงจรของ "เล็ก 6.0"

"เล็ก 6.0" เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กมาก คือประมาณ 100Kbytes เท่านั้นเอง แต่มีความสามารถจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ถึง 3 โมดการทำงาน คือ

1. วิเคราะห์หาจุดทำงานสงบของวงจร (DC Simulation)
2. วิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Simulation)
3. วิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Simulation)

สำหรับในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาขั้นตอนวิธีในส่วนการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา ดังนั้นจึงขออธิบายเฉพาะขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการจำลองทางเวลาเท่านั้น โดยที่จะขอเริ่มอธิบายจากแผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในโปรแกรม "เล็ก 6.0" ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และการทำงานของขั้นตอนวิธีสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

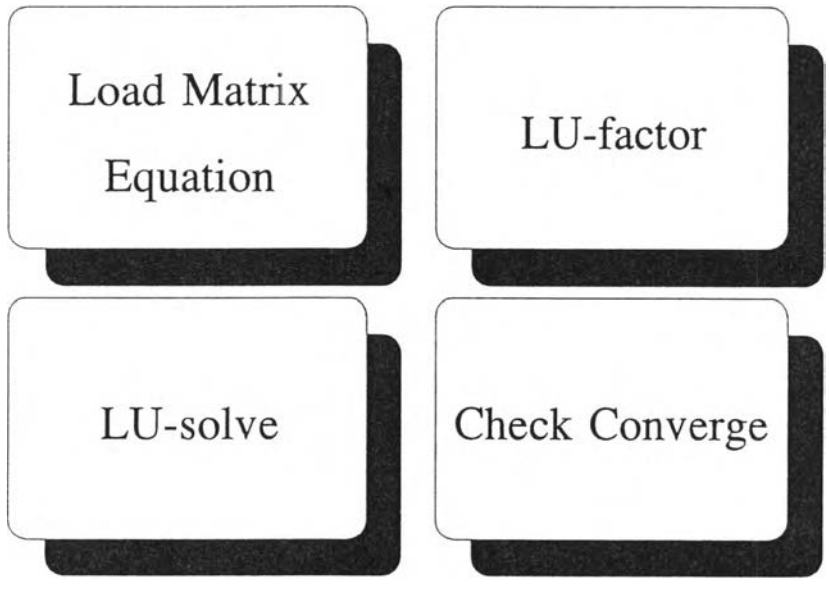
ณ.ที่จุดเวลาหนึ่งๆ ในการทำการจำลองทางเวลา "เล็ก 6.0" จะทำการสร้างสมการเมตริกซ์ของวงจร จากนั้นจะแก้สมการเมตริกซ์ด้วยวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยู แล้วจะตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบว่าลู่เข้าหรือไม่ ถ้าคำตอบที่ได้ลู่เข้า "เล็ก 6.0" จะปรับทันการ (update) ข้อมูลแล้วเลื่อนไปวิเคราะห์ที่จุดเวลาถัดไป ในทางตรงกันข้ามถ้าคำตอบที่ได้ไม่ลู่เข้า "เล็ก 6.0" ก็จะทำการวนซ้ำ (Iteration) จนคำตอบที่ได้ลู่เข้าแต่จะไม่ทำการวนซ้ำเกิน 15 ครั้ง และถ้าทำการวนซ้ำจนครบ 15 ครั้งแล้วคำตอบที่ได้ยังไม่ลู่เข้า "เล็ก 6.0" จะทำการลดขั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงครึ่งหนึ่งแล้วเริ่มทำการวนซ้ำใหม่อีกครั้งหนึ่ง แต่ถ้าการลดขั้นตอนเวลาลงจนถึงค่าต่ำสุดแล้วยังไม่ช่วยให้คำตอบลู่เข้า "เล็ก 6.0" ก็ถึงจะเลิกการคำนวณ



รูปที่ 3.1 แผนภูมิสายงานขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของโปรแกรม "เล็ก 6.0"

จากแผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของโปรแกรม "เล็ก 6.0" ดังในรูปที่ 3.1 นั้นจะพบว่ามีส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน (ส่วนที่แรเงา) คือ

1. *Load Matrix Equation* คือการสร้างสมการเมตริกซ์ของวงจร ซึ่ง "เล็ก 6.0" จะใช้วิธีโมดิฟายด์โนดัลในการสร้างสมการ Ax = b
2. *LU-factor* คือขั้นตอนในการการแยกตัวประกอบแอล-ยูเมตริกซ์ A
3. *LU-solve* คือขั้นตอนในการแก้สมการเมตริกซ์หาค่าผลเฉลยของวงจร
4. *Check Converge* คือการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบของอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อน

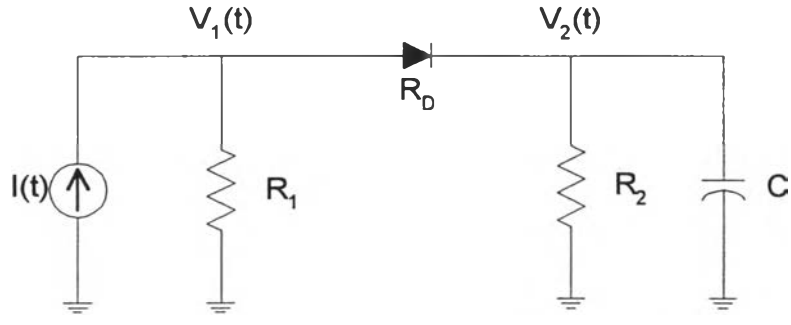


รูปที่ 3.2 โมดูลที่สำคัญในการคำนวณของโปรแกรม "เล็ก 6.0"

3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของ "เล็ก 6.0"

เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของ "เล็ก 6.0" มากยิ่งขึ้น จึงจะขอยกตัวอย่างวงจรในรูปที่ 3.3 มาใช้ประกอบในการอธิบายดังนี้

ถ้าป้อนวงจรดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นวงจรขนาด 2 โนดให้แก่โปรแกรม "เล็ก 6.0" เป็นผู้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาแล้ว "เล็ก 6.0" จะกำหนดให้มีตัวแปรของวงจร 2 ตัวคือ $V_1(t)$ และ $V_2(t)$ แล้วหลังจากนั้น "เล็ก 6.0" จึงจะทำการสร้างสมการเมตริกซ์ด้วยวิธีโมดิฟายด์โนดัลได้ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งในรายละเอียดแล้วจะต้องทำการเดาค่าสถานะของอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อนเสียก่อน ซึ่งในตัวอย่างนี้จะสมมติให้ค่าสถานะของอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อนคือ ไดโอด ให้เป็นสถานะไม่นำกระแส ดังสมการที่ (3.2) โดยที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไดโอดที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นแบบท่อนดังนี้



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างวงจรในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

- V_{cutin} = 0.6 V
- V_Z = 1 MV
- R_{on} = 1 mΩ
- R_{off} = 100 MΩ
- R_Z = 1 mΩ
- $1/R_D$ = $1/R_{OFF}$ เมื่อไดโอดมีสถานะไม่นำกระแส
  = $1/(R_{ON}//R_{OFF})$ เมื่อไดโอดมีสถานะนำกระแส
- I_D = 0 เมื่อไดโอดมีสถานะไม่นำกระแส
  = V_{CUTIN}/R_Z เมื่อไดโอดมีสถานะนำกระแส

และเพื่อง่ายต่อความเข้าใจจึงจะขอสมมติค่าพารามิเตอร์ของวงจรดังต่อไปนี้ i=1, t_1=0.001 s, R_1=1 Ω, R_2=1 Ω, $1/R_D=10^{-8}$ S, I_D=0 A, C=0.001 F, h=0.001 s, $I(0)$=5 A, $V_2(0)$=0 V ซึ่งสมการภายหลังจากแทนค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแล้ว ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3.3) และต่อไปจะเข้าสู่ขั้นตอนในการแก้สมการเพื่อหาค่าผลเฉลย

สมการวงจร
$$\begin{bmatrix} 1/R_1 + 1/R_D & -1/R_D \\ -1/R_D & 1/R_2 + C/h + 1/R_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t_i) \\ V_2(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(t_i) + I_D \\ C * V_2(t_{i-1})/h - I_D \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

กำหนดค่าสถานะ PWL = off
$$1/R_D = 10^{-8} \quad (3.2ก)$$

$$I_D = 0 \quad (3.2ข)$$

แทนค่าตัวแปร

$$\begin{bmatrix} 1+10^{-8} & -10^{-8} \\ -10^{-8} & 2+10^{-8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t_1) \\ V_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

แยกตัวประกอบแอลยู

$$\begin{bmatrix} 1+10^{-8} & 0 \\ -10^{-8} & 2+10^{-8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -10^{-8} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t_1) \\ V_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

แก้สมการ Ly=b

$$\begin{bmatrix} 1+10^{-8} & 0 \\ -10^{-8} & 2+10^{-8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t_1) \\ y_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5ก)$$

ผลเฉลย y(t)

$$\begin{bmatrix} y_1(t_1) \\ y_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 2.5 * 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (3.5ข)$$

แก้สมการ Ux=y

$$\begin{bmatrix} 1 & -10^{-8} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t_1) \\ V_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 2.5 * 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (3.6ก)$$

ผลเฉลยของวงจร

$$\begin{bmatrix} V_1(t_1) \\ V_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 2.5 * 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (3.6ข)$$

ตรวจสอบสถานะ PWL

$$_1(t_1) - V_2(t_1) \approx 5 \quad (3.7)$$

สร้างสมการวงจร

$$\begin{bmatrix} 1001 & -1000 \\ -1000 & 1002 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t_1) \\ V_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 605 \\ -600 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ผลเฉลยวงจร

$$\begin{bmatrix} V_1(t_1) \\ V_2(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.0686 \\ 1.4657 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ตรวจสอบสถานะ PWL

$$V_1(t_1) - V_2(t_1) \approx 0.603 \quad (3.10)$$

ในขั้นตอนการแก้สมการเมตริกซ์ Ax=b นั้น จะแบ่งการแก้สมการออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ ในขั้นตอนแรก (Factorization) นั้นจะทำการแยกเมตริกซ์ A ให้เป็นผลคูณของเมตริกซ์ L และเมตริกซ์ U ซึ่งจะได้สมการ LUx = b ดังในสมการที่ (3.4) และในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการแก้สมการ LUx = b ซึ่งก็จะแบ่งการแก้สมการเมตริกซ์ออกเป็นเป็น 2 ขั้นตอนคือ ในขั้นตอนที่ 1 จะทำการแก้สมการ Ly = b เพื่อหาค่า y แล้วในขั้นตอนที่ 2 จึงจะหาค่าผลเฉลย x จากสมการ Ux=y ซึ่ง

ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3.5) และ (3.6) หลังจากนั้นจะต้องนำค่าผลลัพธ์ที่ได้มาทำการตรวจสอบว่าสถานะของอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อนตรงกับสถานะที่ได้กำหนดไว้ในตอนแรกหรือไม่ ซึ่งจากคำตอบที่ได้แสดงไว้ในสมการ (3.6ข) นั้นสามารถนำมาหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าประมาณ 5 volts ซึ่งมากกว่า V_{cutin}=0.6 volts แสดงว่าสถานะของไดโอดที่กำหนดในตอนแรกคือสถานะไม่นำกระแสนั้นผิด จึงต้องทำการสร้างสมการเมตริกซ์ใหม่อีกครั้ง โดยที่ในครั้งนี้ต้องกำหนดให้ไดโอดมีสถานะเป็นแบบนำกระแสคือ $1/R_D$ = 1000 Ω และ I_D = 600 A ซึ่งสมการวงจรที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3.8) หลังจากนั้นก็ทำการแก้สมการเมตริกซ์ด้วยวิธีเดิม จะทำให้ได้คำตอบของวงจรดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (3.9) หลังจากนำคำตอบที่ได้มาตรวจสอบสถานะของไดโอดดังสมการที่ (3.10) พบว่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าประมาณ 0.603 V ซึ่งมากกว่า V_{CUTIN} แสดงว่าสถานะของไดโอดที่จุดนี้เป็นสถานะนำกระแสจริง จึงสิ้นสุดการคำนวณที่จุดเวลา t_1 นี้

หลังจากที่สามารถหาผลเฉลยของที่จุดเวลา t_1 ได้แล้วก็จะทำการปรับค่าสถานะของอุปกรณ์ในวงจรแล้วจึงเลื่อนการวิเคราะห์ไปยังจุดเวลา t_2 ถัดไป โดยที่ที่จุดเวลาถัดไปก็จะทำการสร้างสมการวงจร แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าผลเฉลยเหมือนเดิม

3.3 จับเวลาแต่ละรูทีนที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม "เล็ก 6.0"

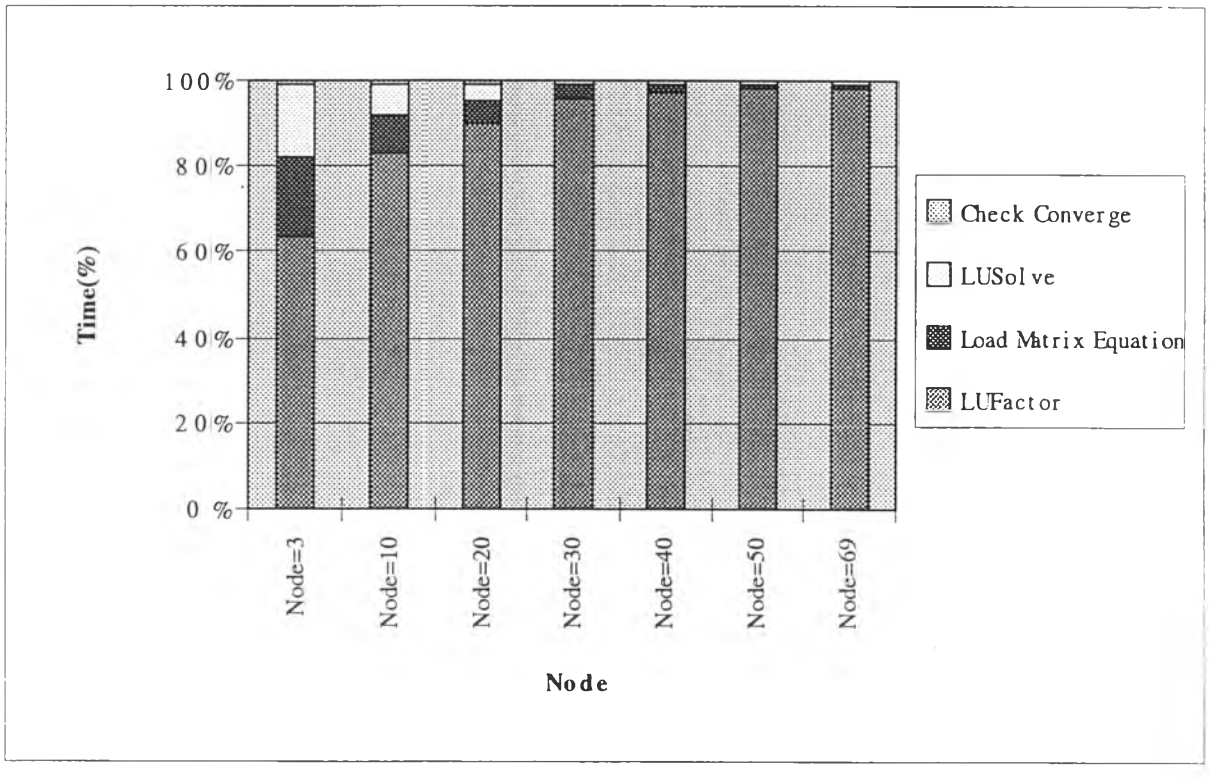
การทดสอบจับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของโปรแกรม "เล็ก 6.0" นี้เกิดขึ้น เนื่องจากเหตุผล 3 ประการคือ

1. ต้องการทราบว่าโปรแกรม "เล็ก 6.0" นี้เสียเวลาไปในการคำนวณกับส่วนใดมากที่สุด เพื่อที่จะนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มความเร็วต่อไป
2. พิจารณาตัวแปรของการวิเคราะห์ เช่น จำนวนโนด ตัวแปรของวงจร ฯลฯ ว่ามีผลอย่างไรต่อเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจร
3. ขั้นตอนวิธีนำเอาค่าตัวประกอบแอล-ยูกลับมาใช้ใหม่นั้นสามารถเพิ่มความเร็วในการคำนวณได้จริงหรือเปล่า

และในการจับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของโปรแกรม "เล็ก 6.0" นี้จะมุ่งความสนใจไปที่ 4 รูทีนหลักตามรูป 3.1 และ 3.2 คือ รูทีนในการสร้างสมการเมตริกซ์ (Load Matrix Equation) รูทีนในการแยกตัวประกอบแอล-ยู (LUfactor) รูทีนในการแก้สมการเมตริกซ์ (LUsolve) และรูทีนในการตรวจสอบการลู่เข้าของการคำนวณ (Check Converge) ซึ่งเวลาที่ได้จาก

การจับเวลาการคำนวณนี้จะเป็นเวลาที่อ้างอิงจากการใช้โปรแกรม Borland's turbo profiler โดยที่รายละเอียดของโปรแกรมนี้จะอธิบายไว้ในภาคผนวกต่อไป และผลที่ได้จากการจับเวลาที่ใช้ไปในแต่ละส่วนของการคำนวณ โดยจะเปรียบเทียบกันที่จำนวนโนดแตกต่างกันนั้น เมื่อนำไปพล็อตกราฟแล้วได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4

จากกราฟของเวลาที่ใช้ไปในแต่ละรูทีนของโปรแกรม "เล็ก 6.0" ดังรูปที่ 3.4 นั้นพบว่าเวลาส่วนใหญ่ (70-90%) ถูกใช้ไปในการแยกตัวประกอบแอล-ยู ยิ่งไปกว่านั้นเวลาที่ใช้ไปในการแยกตัวประกอบแอล-ยู ยังเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนโนดของวงจรด้วย นั่นหมายความว่าถ้าเราสามารถลดเวลาในการแยกตัวประกอบแอล-ยูลงได้ ก็จะเป็นการลดเวลาส่วนใหญ่ที่ใช้ในการทำการจำลองทางเวลาด้วย จากจุดนี้เองก็จะเป็นสิ่งหนึ่งที่ใช้ยืนยันได้ว่า จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้ที่จะลดเวลาที่ใช้ในการจำลองทางเวลาโดยการลดเวลาที่ใช้ในการแยกตัวประกอบแอล-ยูนั้นสามารถลดเวลาได้จริงและ ลดเวลาได้มากด้วย



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบที่จำนวนโนดต่างๆกัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย