โปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับใช้กับไมโครคอมพิวเตอร์ไอบีเอ็มขนาด 16 บิท โปรแกรมได้เขียนขึ้นตามแนวทางในบทที่ 2 และบทที่ 3

โครงสร้างของโปรแกรมคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

โปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังมีการทำงานในลักษณะการเชน (Chain)โดยที่โปรแกรมหลักจะทำหน้าที่เรียกโปรแกรมย่อยขึ้นมาทำงานตามลำดับขั้นตอนจนเสร็จสิ้นขบวนการ โปรแกรมนี้ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยดังนี้

1. EMTA เป็นโปรแกรมหลักในการเรียกโปรแกรมย่อยขึ้นมาใช้งาน ตลอดจนอ่านข้อมูลจากไฟล์ช่วยเหลือ (Help File)และแสดงผลเมื่อผู้ใช้ต้องการทราบวิธีการใช้โปรแกรม โฟล์วชาร์ตแสดงโครงสร้างของโปรแกรมดังรูป 4.1

2. READIN เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการอ่านข้อมูลอินพุท และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลชนิดต่าง ๆ โฟล์วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยนี้ดังรูป 4.2

3. CONECT เป็นโปรแกรมย่อยในการจัดการเชื่อมต่อของโหนดต่าง ๆ จากข้อมูลอินพุท โฟล์วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยนี้ดังรูป 4.3

4. RENUM เป็นโปรแกรมย่อยในการจัดลำดับเลข (Ordering)ของโหนดต่าง ๆ ให้เหมาะสมในการทำ Triangular Factorization ต่อไป โฟล์วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยนี้ดังรูป 4.4

5. CONVRT เป็นโปรแกรมย่อยเพื่อแปลงข้อมูลอินพุทแต่ละชนิดให้อยู่ในหน่วยเดียวกันเพื่อจะได้สามารถนำไปใช้สร้างปัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้ โฟล์วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยนี้ดังรูป 4.5

6. PREPTB เป็นโปรแกรมย่อยสำหรับสร้างตารางบันทึกข้อมูลต่าง ๆ โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานแสดงดังรูป 4.6

7. FORMY เป็นโปรแกรมย่อยในการสร้างมัลแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยอาศัยข้อมูลจากตารางบันทึกข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมย่อย PREPTB และทำ Upper Triangular Factorization โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยนี้แสดงดังรูป 4.7

8. SETUP เป็นโปรแกรมย่อยในการเตรียมข้อมูลเบื้องต้นก่อนการคำนวณ โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานแสดงดังรูป 4.8

9. TSTEP เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสูปของช่วงเวลา (Time Step Loop) จนกว่าจะครบช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา และแสดงผลลัพธ์ของแรงดันหรือกระแสที่ต้องการในแต่ละช่วงเวลาในเอาท์พุทไฟล์หรือพลอตไฟล์เพื่อนำไปพลอตด้วย Package โปรแกรม Lotus 123 ต่อไป โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยนี้แสดงดังรูป 4.9 และ 4.10

1. การอ่านข้อมูลของโปรแกรม

สับรูทีน READIN เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการอ่านข้อมูลชนิดต่าง ๆ โดยที่ข้อมูลแต่ละชนิดจะมีโคด (Code)ของแต่ละชนิดที่ต่างกัน โดยการอ่านโคดนี้จะอ่านเข้าไปเก็บในตัวแปร ITYPE เพื่อทำการตรวจเช็คว่าเป็นข้อมูลชนิดใด จึงค่อยอ่านข้อมูลส่วนถัดมาเข้าไปเก็บในตัวแปรที่เหมาะสมกับข้อมูลนั้น สำหรับข้อมูลของ Branch มีโคดดังนี้

ITYPE เท่ากับ 0 แสดงว่าข้อมูลเป็นชนิดพารามิเตอร์แบบก้อน

ITYPE มากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 10 แสดงว่าข้อมูลเป็นชนิดพาย

ITYPE น้อยกว่า 0 แสดงว่าข้อมูลเป็นชนิดพารามิเตอร์แบบกระจาย

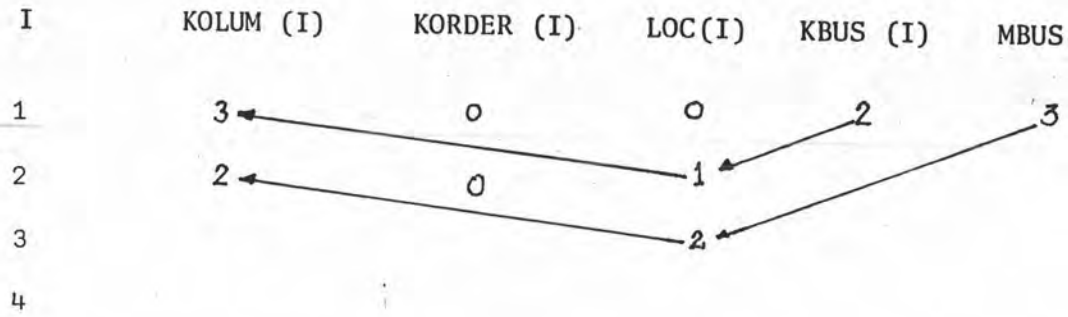
ITYPE อยู่ระหว่าง 90 ถึง 99 แสดงว่าข้อมูลเป็นชนิดพารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้น

และเมื่อ ITYPE เท่ากับ 88 แสดงว่าจบข้อมูลของ Branch

จากนั้นจึงอ่านข้อมูลของสวิทช์ ข้อมูลแหล่งกำเนิดแรงดัน และข้อมูลของการเลือกบัสแรงดันตามลำดับ ข้อมูลแต่ละชนิดต้องบ่งบอกตำแหน่งข้อมูลด้วยชื่อบัส 2 บัสคือ บัสเริ่มต้น (From Bus) เก็บค่าในตัวแปรชุด KBUS และบัสอีกด้านหนึ่ง (To Bus) เก็บค่าในตัวแปรชุด MBUS โปรแกรมจะทำการอ่านชื่อบัสทั้งสองแล้วเปลี่ยนเป็นหมายเลขเพื่อให้เหมาะในการนำไปใช้งานต่อไป

2. การจัด Topology ของวงจรจากข้อมูลอินพุท

สับรูทีน CONECT เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการจัดการบันทึกการต่อกันของบัสต่าง ๆ ในวงจร โดยใช้ข้อมูลที่จัดเก็บด้วยสับรูทีน READIN มาทำดัชนีเพื่อให้สามารถทราบการเชื่อมต่อของบัสต่าง ๆ ว่าต่อกับบัสใดบ้าง แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีในการบันทึกการเชื่อมต่อของบัสต่าง ๆ ในตารางดังนี้



โดยที่ I เป็นหมายเลขของข้อมูล Branch อินพุท

KBUS (I) เป็นหมายเลขของบัสเริ่มต้น (From Bus)

MBUS (I) เป็นหมายเลขของบัสอีกด้านหนึ่งของ Branch (To Bus)

จากตารางเริ่มจากตัวเลขบัสในตัวแปร MBUS บอกถึงค่า I ซึ่งโยงไปถึงตัวแปร LOC และค่าในตัวแปร LOC บอกถึงค่า I ของตัวแปร KOLUM ซึ่งมีค่าใน KOLUM นี้เองเป็นตัวบอกหมายเลขบัสที่ต่อกับMBUS นั้น และค่าของตัวแปร KORDER (I) บอกถึงค่า I ของ KOLUM ถัดมาซึ่งค่าใน KOLUM นี้บอกถึงหมายเลขบัสอีกบัสหนึ่งที่ต่อกับMBUS ค่าของ KORDER(I) ใหม่นี้บอกถึงค่า I ของ KOULM ถัดไปทำอย่างนี้เรื่อย ๆ จนพบว่าค่า KORDER (I)เท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่มีบัสนี้ต่ออีกแล้ว

3. <u>การจัดลำดับเลขของโหนดใหม่</u> (Ordering)

สับรูทีน RENUM เป็นโปรแกรมย่อยในการจัดลำดับเลขของโหนดต่าง ๆ เพื่อให้ออปติไมเซชั่นสำหรับการเก็บข้อมูล ทฤษฎีของการจัดลำดับเลขใหม่ให้เหมาะสมนี้ได้อธิบายในภาคผนวก ง. การจัดลำดับบัสซึ่งต่อกับข้อมูลของสวิทช์ แหล่งกำเนิดแรงดันและอิลิเมนต์ชันท์แบบพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นไว้ในตำแหน่งหลัง (Lower Part)ของเมตริกซ์ สำหรับส่วนบนจัดลำดับตามจำนวนของอิลิเมนต์ที่ไม่เท่ากับศูนย์ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก โฟล์วชาร์ตแสดงดังรูป 4.4

4. <u>การแปลงข้อมูลอินพุทแต่ละชันท์ให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน</u>

สับรูทีน CONVRT เป็นโปรแกรมย่อยเพื่อเปลี่ยนข้อมูลอินพุทของสายส่งพารามิเตอร์แบบกระจายซึ่งข้อมูลอินพุทอาจบอกเป็นค่าของ L และ C โดยเปลี่ยนเป็นค่าของเลิร์จอิมพีแดนซ์ในหน่วยของโอห์มและเวลาของคลื่นเคลื่อนที่บนสายส่งนั้นด้วยสับรูทีนย่อย EQUIV และหาค่า

อิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์สำหรับพารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้นจากความชัน (Slope)ของข้อมูลที่แสดงถึงลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้น V-I ของอุปกรณ์นั้น โฟลว์ชาร์ตแสดงดังรูป 4.5

5. <u>การเตรียมตารางบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ</u>

สับรูทีน PREPTB เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการเตรียมตารางของข้อมูลของโหลดชนิดพารามิเตอร์แบบก้อนคือการแปลงข้อมูลของ L และ C ให้อยู่ในรูปของ $\frac{\Delta t}{2L}, \frac{2C}{\Delta t}$ ซึ่งเป็นข้อมูลอินพุทที่ใช้ในการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และทำการเช็คสภาวะเริ่มต้นของสวิทช์ว่าอยู่ตำแหน่งปิดหรือเปิด รวมทั้งทำการแปลงข้อมูลของสายส่งพารามิเตอร์แบบกระจายให้อยู่ในรูปแอดมิตแตนซ์ โดยอาศัยสับรูทีนย่อย MULT ในการทำอินเวอร์สเมตริกซ์ข้อมูลของเสิร์จอิมพิแดนซ์ซึ่งได้มาจากสับรูทีน CONVRT โฟลว์ชาร์ตแสดงดังรูป 4.6

6. <u>การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์</u>

สับรูทีน FORMY เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ เนื่องจากโปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยข้อมูลที่แตกต่างกันหลายประเภทและรูปแบบของข้อมูลอินพุทไม่สามารถนำมาสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้โดยตรงจึงต้องอาศัยสับรูทีน CONVRT และ PREPTB เพื่อแปลงและจัดข้อมูลให้เหมาะสมในรูปแอดมิตแตนซ์ การหาค่าในอิลิเมนต์ของ Self Admittance เมตริกซ์ (Y_{ii})ได้มาจากการบวกค่าของแอดมิตแตนซ์ของ Branch ต่าง ๆ ที่ต่อกับบัส i ส่วนการหาค่าอิลิเมนต์ของ Mutual Admittance เมตริกซ์ (Y_{ij})ได้มาจากค่าลบของแอดมิตแตนซ์ที่ต่อระหว่างบัส i กับบัส j ในโปรแกรมย่อยนี้เก็บค่าของ Y ในตัวแปรชุด F

หลังจากนั้นทำ Triangular Factorization สำหรับ Upper Triangular ของ Y เมตริกซ์ที่เก็บข้อมูลของอิลิเมนต์ของแอดมิตแตนซ์ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อช่วงเวลา (Time Step) เปลี่ยนไปคือไม่ใช่ข้อมูลของสวิทช์หรืออุปกรณ์แบบพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นจะได้ Reduced Matrix เก็บค่าขบวนการทำงานในตารางของแฟคเตอร์ (Table of Factor) ทฤษฎีการทำ Factorization อธิบายในภาคผนวก ง ส่วนข้อมูลของแอดมิตแตนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อช่วงเวลาเปลี่ยนไปเก็บใน Low Triangular ของ Y เมตริกซ์ซึ่งเก็บค่าเต็มไว้ (Full Matrix) โฟลว์ชาร์ตแสดงดังรูป 4.7

7. <u>การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นก่อนการคำนวณ</u>

สับรูทีน SETUP เป็นโปรแกรมย่อยใช้ในการคำนวณจำนวนช่วงเวลาและเลือกบัสที่ต้องการทราบผลลัพธ์เอาท์พุทตลอดจนเตรียมในการแสดงผลลัพธ์

8. <u>การคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในลูปของช่วงเวลา (Time Step Loop)</u>

สับรูทีน Tstep เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณโดยแบ่งเป็นโปรแกรมย่อยอีก 3 โปรแกรมคือ

8.1 โปรแกรมย่อย TS1 ทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 1 และ 2

8.2 โปรแกรมย่อย TS2 ทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 3

8.3 โปรแกรมย่อย TS3 ทำการคำนวณขั้นตอนที่เหลือทั้งหมด

สำหรับขั้นตอนการคำนวณเป็นดังนี้

1. ทำการตรวจเช็คการเปลี่ยนแปลงของสวิทช์ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะทำการแก้ไขส่วนล่าง (Lower Part) ของ Triangular เมตริกซ์

2. ถ้ามีอิลิเมนต์พารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้นต้องหาค่าเวคเตอร์ Z อธิบายวิธีการหาในบทที่ 3

3. ทำการปรับข้อมูลให้ทันสมัยตามช่วงเวลาคือปรับค่าแหล่งจ่ายกระแสสมมูลย์ I_{total} ทุก ๆ ช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป

4. ทำการเปลี่ยนช่วงเวลาจาก t เป็น $t+\Delta t$ และเช็คว่าเวลานี้ครบตามช่วงเวลาที่ต้องการศึกษาหรือไม่ ถ้าครบให้จบการคำนวณได้แต่ถ้ายังไม่ครบให้คำนวณในขั้นตอนต่อไป

5. อ่านและคำนวณค่าแรงดันและกระแสที่บัสต่าง ๆ ตามสมการ 3.5 และ 3.6 ในบทที่ 3 อ่านค่าแรงดันที่ทราบค่าในเวคเตอร์ $e_B(t)$ และคำนวณค่า I_{total}

6. หาผลลัพธ์ด้วยการทำ Forward Substitution ในส่วนบน (Upper Part) ของ Triangular เมตริกซ์

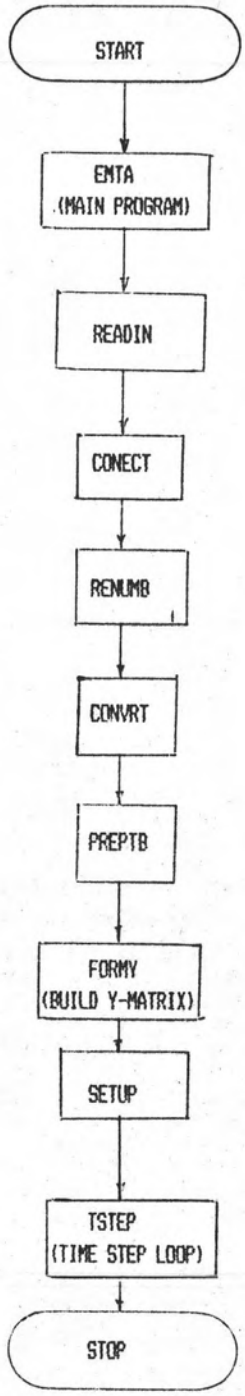
7. หาผลลัพธ์ด้วยการทำ Forward Substitution ในส่วนล่าง (Lower Part) ของ Triangular เมตริกซ์

8. ทำการแทนค่าย้อนกลับ (Back Substitution) หาค่าแรงดัน $e_A(t)$

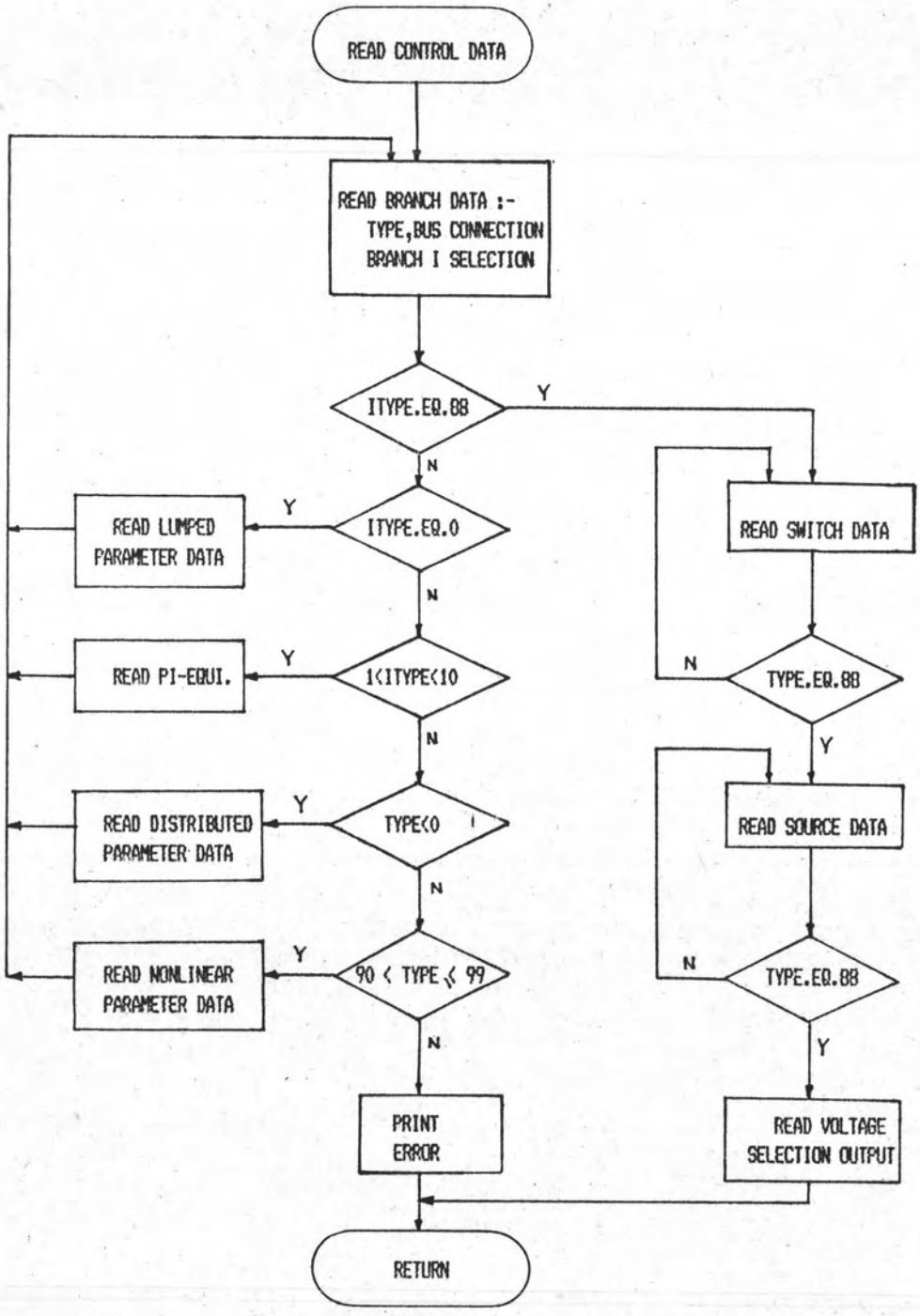
9. ถ้ามีอิลิเมนต์แบบพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้น ทำการปรับค่าแรงดันในขั้นตอนที่ 8 ใหม่

10. แสดงผลลัพธ์เอาท์พุทของแรงดัน

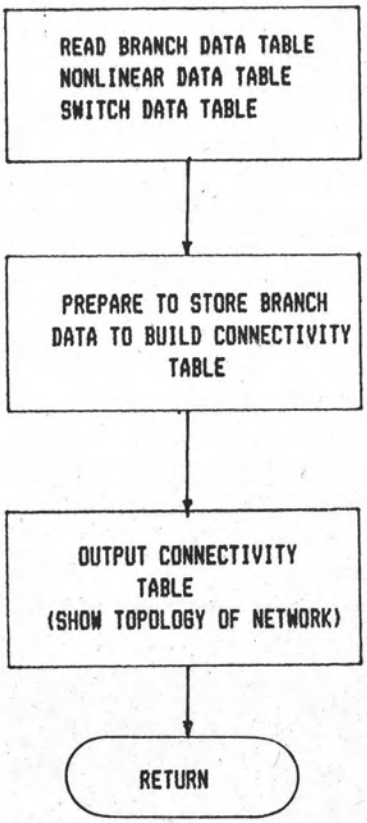
11. กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 ใหม่



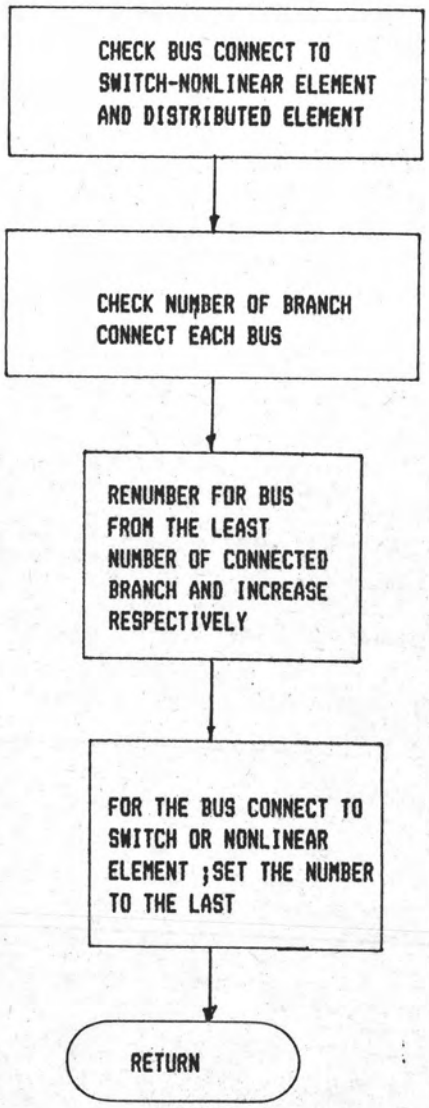
รูป 4.1 โฟล์วชาร์ตแสดงโครงสร้างของโปรแกรม



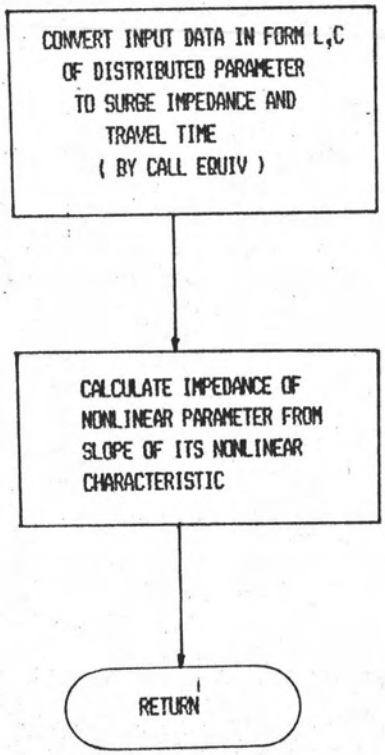
รูป 4.2 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการอ่านข้อมูลอินพุท



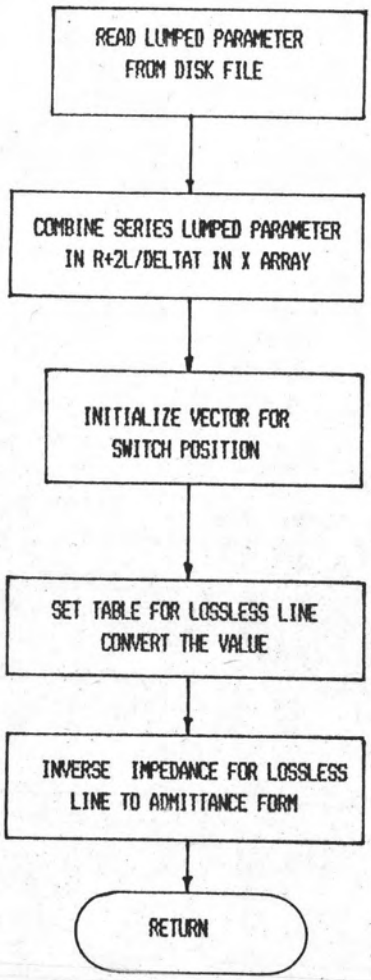
รูป 4.3 โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการจัด Topology ของข้อมูล



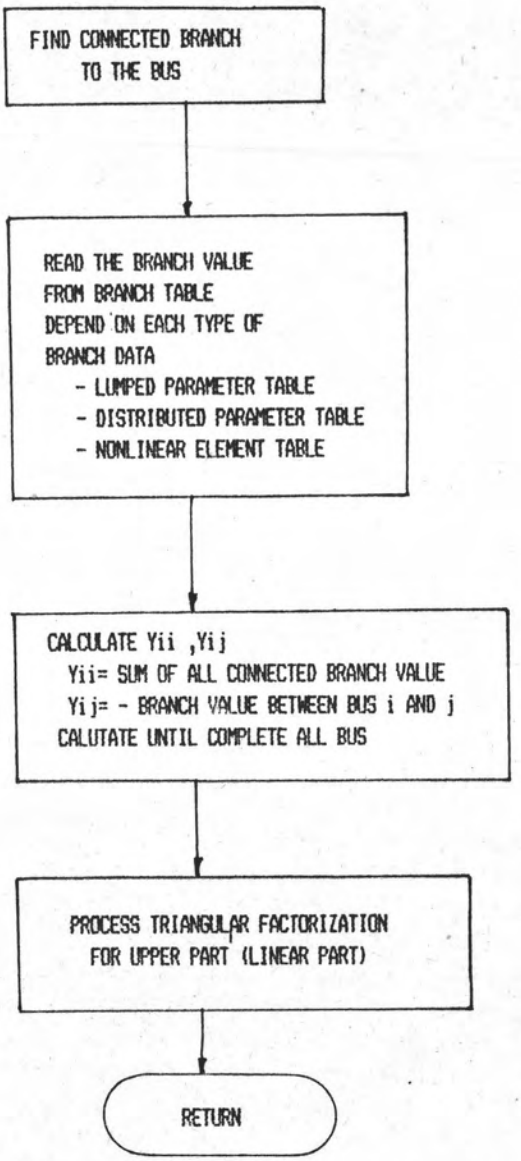
รูป 4.4 โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการจัดลำดับเลขของโหนดต่าง ๆ



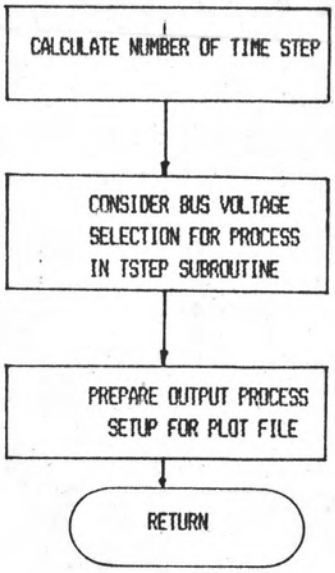
รูป 4.5 โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน



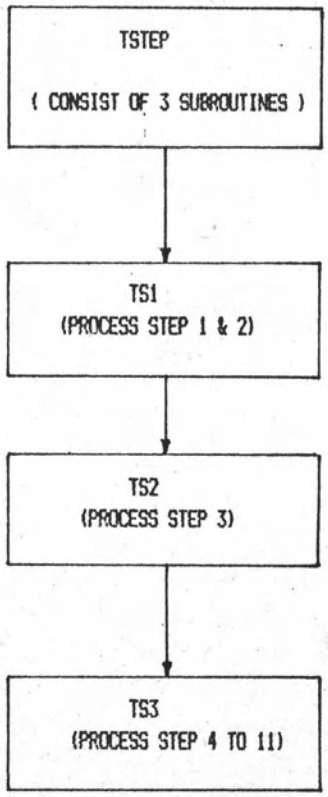
รูป 4.6 โฟล์วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยสำหรับสร้างตารางบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ



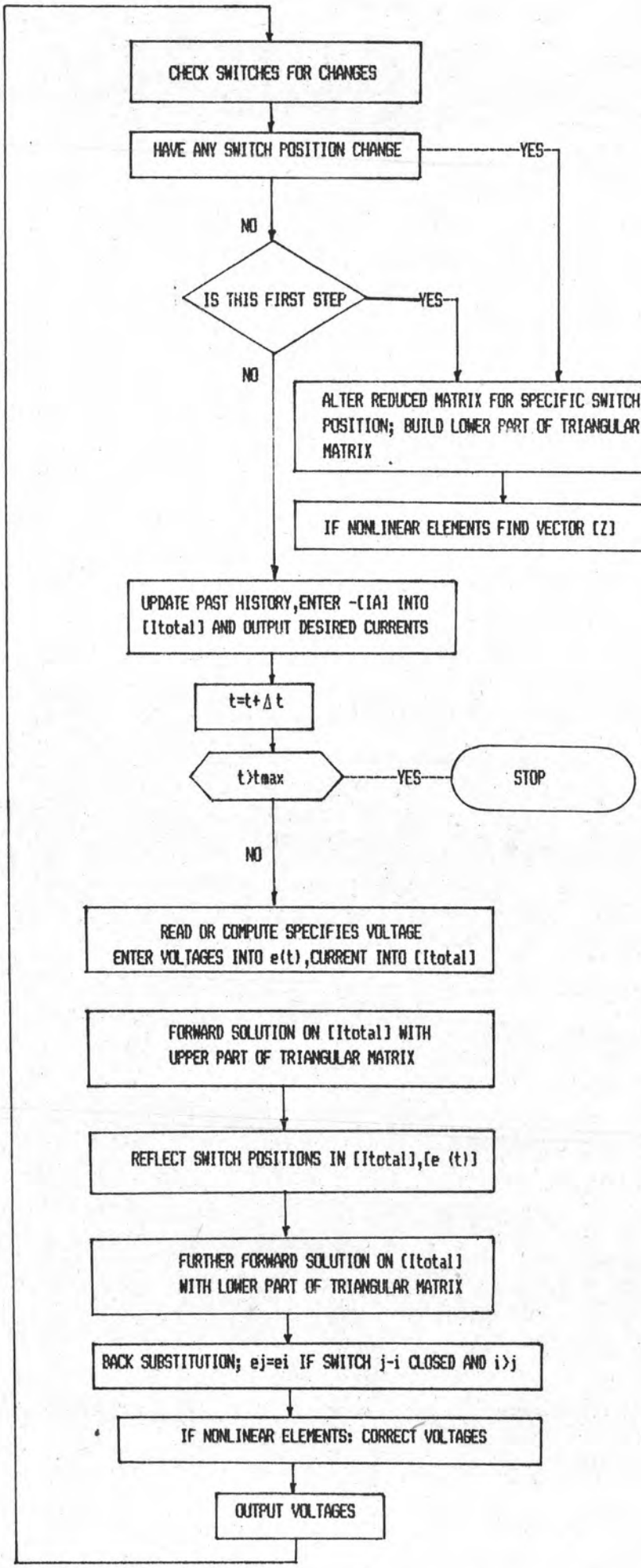
รูป 4.7 โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์



รูป 4.8 โฟล้ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น



รูป 4.9 โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

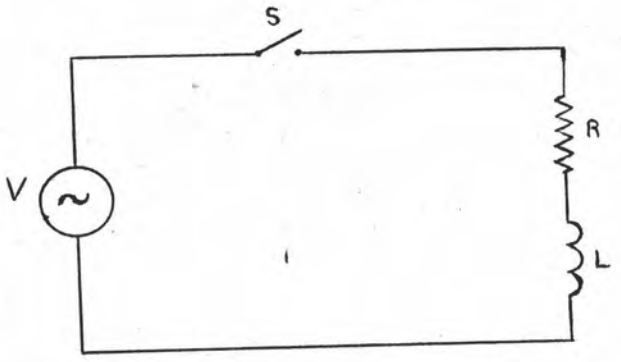


รป 4.10 โฟล้วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (ต่อ)

<u>การแล่ดงวงจรการเกิดทรานเยียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง</u> ๆ

ทรานเยียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในวงจร เช่น การสับหรือปลดของเซอร์กิตเบรคเกอร์ และการเกิดการลัดวงจร เป็นต้น สำหรับวงจรง่าย ๆ ในการแทนวงจรทรานเยียนต์มีดังนี้

1. <u>ทรานเยียนต์ขณะสับเซอร์กิตเบรคเกอร์</u>



รูป 4.11 แล่ดงถึงวงจรทรานเยียนต์ขณะสับเซอร์กิตเบรคเกอร์

จากรูปเมื่อเขียนเป็นสมการวงจรไฟฟ้าจะได้

$$RI + \frac{L dI}{dt} = V = V_m \sin(\omega t + \theta) \qquad (4.1)$$

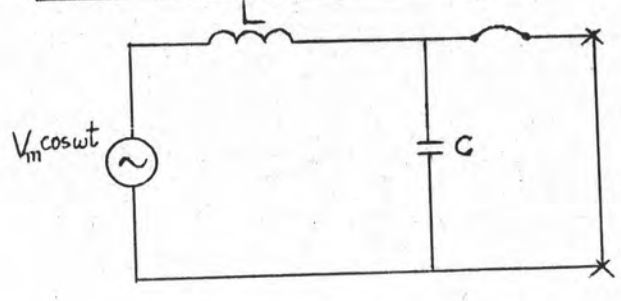
โดย ω เป็นความถี่ของแหล่งกำเนิดแรงดัน

θ มุมเฟสขณะสับเซอร์กิตเบรคเกอร์

การแก้สมการ 4.1 เพื่อหากระแสขณะสับเซอร์กิตเบรคเกอร์จะได้ (21)

$$I(t) = \frac{V_m}{(R^2+\omega^2L^2)^{\frac{1}{2}}} \sin(\omega t+\theta-\psi) - \sin(\theta-\psi)e^{-\alpha t} \qquad (4.2)$$

2. <u>ทรานเยียนต์ขณะทำการตัดกระแสลัดวงจร</u>



รูป 4.12 แล่ดงถึงวงจรทรานเยียนต์ขณะปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์

จากรูปแสดงถึงการปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์ เพื่อตัดกระแสลัดวงจร ซึ่งการเกิดแรงดันรีโคเวอรี่ (Recovery Voltage)สามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อเขียนเป็นสมการวงจรไฟฟ้าจะได้ดังสมการ

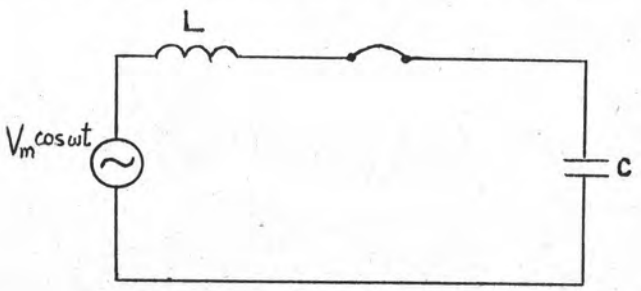
$$\frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = \frac{V_m}{LC}\cos\omega t \qquad (4.3)$$

เมื่อแก้สมการ 4.3 เพื่อหาแรงดันรีโคเวอรี่คร่อมคาแปซิเตอร์จะได้ผลดังสมการ 4.4 (21)

$$V_c(t) = \frac{\omega_o^2}{(\omega_o^2 - \omega^2)} V_m \left[\cos\omega t - \cos\omega_o t\right] \qquad (4.4)$$

โดยที่ $\omega_o^2 = \frac{1}{LC}$

3. <u>ทรานเยียนต์ขณะสับคาแปซิเตอร์ (Capacitor Switching)</u>



รูป 4.13 แสดงถึงวงจรทรานเยียนต์ขณะสับคาแปซิเตอร์

จากรูป 4.13 เมื่อเขียนเป็นสมการวงจรไฟฟ้าจะได้

$$V_m\cos\omega t - V_c = \frac{LdI}{dt} \qquad (4.5)$$

เมื่อแก้สมการ 4.5 จะได้กระแสอินรัชขณะสับคาแปซิเตอร์ดังสมการ

$$I(t) = \frac{V_m - V_c(0)}{L\omega_o} \sin\omega_o t \qquad (4.6)$$

สำหรับค่าแรงดันคร่อมคาแปซิเตอร์หาได้จากสมการ 4.7 (21) คือ

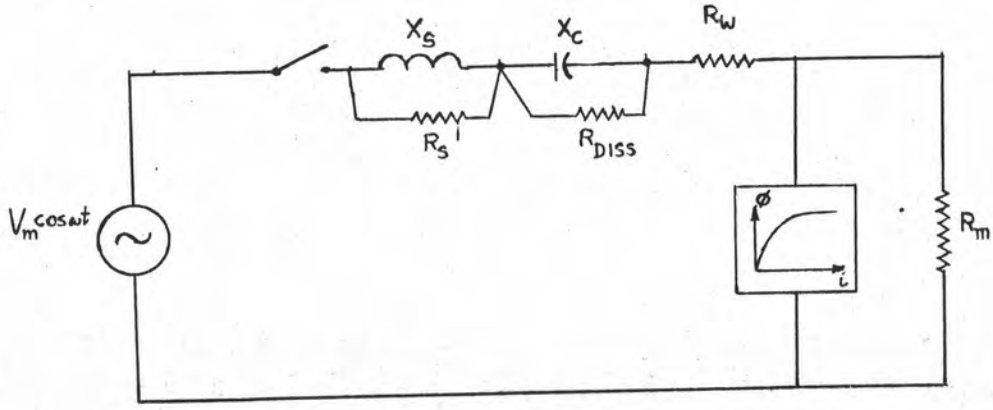
$$V_c = V_c(0) + \frac{1}{C}\int_0^t \left[V_m - V_c(0)\right] \left(\frac{C}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \sin\omega_o t\,dt \qquad (4.7)$$

โดยที่ $V_c(0)$ คือแรงดันคร่อมคาแปซิเตอร์ขณะปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

4. ทรานเซียนต์ขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferroresonance) (21,22)

การเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นเมื่อวงจรมีคาแปซิแตนซ์ต่ออนุกรมกับหม้อแปลง ซึ่งการเกิดนี้ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การสับเซอร์กิตเบรคเกอร์เฟสเดียวของระบบ 3 เฟส (Single Pole Switching) เป็นต้น สำหรับวงจรสมมูลย์ในการแทนเหตุการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (22) แสดงดังรูป 4.14



รูป 4.14 แสดงถึงวงจรสมมูลย์ในการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์

โดยที่ R_S และ X_S คืออิมพิแตนซ์ของแหล่งกำเนิดแรงดัน

X_C คือคาแปซิแตนซ์ของระบบที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

R_{DISS} แทนกำลังสูญเสียในส่วนที่ขนานกับคาแปซิแตนซ์

R_W แทนกำลังสูญเสียของหม้อแปลงในส่วนที่ต่ออนุกรม

R_m แทนกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)

ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับกระแสแทนกราฟแสดงความอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลง

5. ทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่า (3,21)

การเกิดฟ้าผ่าบนสายส่งทำให้เกิด Traveling Wave เคลื่อนที่ไปตามสายส่ง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของเสิร์จอิมพิแตนซ์จะเกิดการสะท้อน (Reflection) และการหักเห (Refraction) ของคลื่นขึ้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดผลของแรงดันเกินที่ตำแหน่งดังกล่าวได้ วงจรในการศึกษาทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่ามักแทนสายส่งด้วยเสิร์จอิมพิแตนซ์และเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปบนสายส่งแสดงดังรูป 4.15

รูป 4.15 แสดงถึงวงจรในการศึกษาทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่า

โดยที่ Z_1 และ Z_2 เป็นเสิร์จอิมพิแดนซ์ของสายส่งช่วงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

T_1 และ T_2 เป็นเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปบนสายส่งช่วงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ