หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพในภาวะทรานเซียนต์โดยวิธีไดอาคอปติก

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีไดอาคอปติก พร้อมทั้งแสดงโฟลว์ชาร์ตประกอบ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ฯ ตามที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโฟลว์ชาร์ตตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

4.1 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ฯ อ่านจากเทอร์มินอล (Terminal) ของเครื่องมินิคอมพิวเตอร์ PDP-11 โดยโปรแกรมย่อย INPUT (Subroutine INPUT) แล้วเก็บข้อมูลเหล่านี้ลงดีสค์ (Disk) เพื่อไว้ใช้ในการคำนวณต่อไป รายละเอียดการอ่านและแก้ไขข้อมูลนี้ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2 คำนวณโหลดโฟลว์

ขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณโหลดโฟลว์โดยวิธีไดอาคอปติก เพื่อหาแรงดันที่บัสต่าง ๆ ก่อนเกิดความผิดปกติในระบบ ซึ่งแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอนดังนี้

1) การอ่านข้อมูลจากดีสค์สำหรับคำนวณโหลดโฟลว์ และการจัดข้อมูลแบ่งออกเป็นโซน (โปรแกรมย่อย STEP1A และ STEP1B)
2) การสร้างเมตริกซ์ Z_1 และ Z_2 (โปรแกรมย่อย STEP2A และ STEP2B)
3) การสร้างเมตริกซ์ Z_4 และ Y_4 (โปรแกรมย่อย STEP3)
4) การกำหนดค่าเริ่มต้น (โปรแกรมย่อย STEP4)
5) การหาผลลัพธ์ของแรงดันโดยวิธีอิเทอเรทีฟ (โปรแกรมย่อย STEP5)
6) ส่วนแสดงผลลัพธ์ (โปรแกรมย่อย STEP6)

โฟลว์ชาร์ตที่สำคัญได้แสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนรายละเอียดของการคำนวณโหลดโฟลว์สามารถศึกษาจากเอกสารอ้างอิง[11]

4.3 การปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1

ขั้นตอนนี้เป็นโปรแกรมย่อย STEP7 ซึ่งขั้นตอนการทำงานประกอบด้วยการอ่านข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ การปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 การจัดเรียงเมตริกซ์ใหม่ และการเก็บข้อมูลของเมตริกซ์ลงดีสค์ รายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ อธิบายได้ตามลำดับดังนี้

4.3.1 การอ่านข้อมูล

ข้อมูลที่อ่านจากดีสค์เก็บไว้ในตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

NGEN คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

NLBUS คือ จำนวนบัสที่มีโหลดชนิด นอน-อิมพีแดนซ์

IMGN(N) คือ หมายเลขเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

BGEN(N) คือ บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

XDI (N) คือ Direct-axis reactance

XQI (N) คือ Quadrature-axis reactance

XDPI(N) คือ Direct-axis transient reactance

ซึ่ง (N) หมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ N

จากนั้นจัดข้อมูลเหล่านี้ออกเป็นโซน โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

NOGEN (J) คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในโซน J

MGEN (K,J) คือ บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

XQ (K,J) คือ Quadrature-axis reactance

ZG (K,J) คือ อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมีค่าเท่ากับ 0.0+jXQ(K,J)

ซึ่ง (K,J) หมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ K ในโซน J

NOBUSZ(J) คือ จำนวนบัสทั้งหมดในโซน J

NODE(I,J) คือ หมายเลขบัสซึ่งอยู่อันดับที่ I ในโซน J

NOZONE คือ จำนวนโซนทั้งหมด

การจัดข้อมูลดังกล่าวนี้ได้แสดงรายละเอียดในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.2

4.3.2 การจัดข้อมูลของสายส่งที่เกิดการตัดต่อ (Switching)

ข้อมูลเกี่ยวกับการตัดต่ออ่านมาเก็บในตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

NST คือ จำนวนการเกิดการตัดต่อทั้งหมด (รวมทั้งการสัดวงจรด้วย)

TITS(I) คือ เวลาที่เกิดการตัดต่อครั้งที่ I

LIOP(K,I) คือ หมายเลขสายส่งที่ถูกตัดออกจากระบบ ที่เวลา TITS(I)

LICL(K,J) คือ หมายเลขสายส่งที่ถูกต่อกลับเข้าระบบ ที่เวลา TITS(I)

โดยที่สายส่งที่ถูกตัดหรือต่อต้องไม่เป็นศัทลายน์ และจำนวนสายส่งที่ถูกตัด หรือต่อในแต่ละครั้งกำหนดไว้ไม่เกินอย่างละ 3 เส้น จากนั้นหาบัสที่สายส่งเหล่านี้ต่ออยู่และอิมพีแดนซ์ของสายส่งดังกล่าวตามที่แสดงในโฟลว์ชาร์ต รูปที่ 4.3 ซึ่งเริ่มจากการตรวจสอบการตัดต่อครั้งแรก ถ้ามีสายส่งที่ถูกตัดออกจากระบบให้บันทึกบัสที่สายส่งนั้นต่ออยู่ (BUSP, BUSQ) แล้วบันทึกอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั้นให้มีค่าเป็นลบ (IMP=-ZPRI) จากนั้นตรวจสอบถ้ามีสายส่งที่ถูกต่อกลับเข้าระบบ ให้บันทึกบัสที่สายส่งนั้นต่ออยู่ และบันทึกอิมพีแดนซ์ (IMP=ZPRI) พร้อมทั้งบันทึกจำนวนสายส่งที่ถูกตัดต่อครั้งที่หนึ่ง (NLSW) แล้วไปตรวจสอบการตัดต่อครั้งต่อไป โฟลว์-ชาร์ตรูปที่ 4.4 แสดงรายละเอียดการหาจำนวนบัสที่ต่อกับสายส่งที่ถูกตัดต่อ (NOMT) และแบ่งบัสนี้ออกเป็นโซน โดยที่

NOMET (J) คือ จำนวนบัสดังกล่าวในโซน J

MET (K,J) คือ บัสที่แบ่งเป็นโซนแล้ว

4.3.3 จัดข้อมูลของโหลด

ข้อมูลของโหลดชนิด นอน-อิมพีแดนซ์ (Non-impedance type load) อ่านเข้ามาเก็บในตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

NLBUS คือ จำนวนบัสที่มีโหลดชนิด นอน-อิมพีแดนซ์ต่ออยู่

LBUS (N) คือ บัสที่ต่อกับโหลดชนิด นอน-อิมพีแดนซ์

ROD1 (N) คือ ค่าของโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่

ROD2 (N) คือ ค่าของโหลดชนิดกระแสคงที่

ROD3 (N) คือ ค่าของโหลดชนิดกำลังงานคงที่

จากนั้นทำการจัดข้อมูลเหล่านี้แบ่งออกเป็นโซน ดังที่ได้แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.5 โดยเริ่มตรวจสอบจากบัส I ในโซน J ถ้า NODE(I,J) เป็นบัสของโหลดให้บันทึกค่าของโหลดแต่ละชนิดและบันทึกบัสที่โหลดชนิดนั้นต่ออยู่

โดยที่ LOD1(K,J), LOD2(K,J) และ LOD3(K,J) คือบัสที่โหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่, กระแสคงที่ และกำลังงานคงที่ต่ออยู่ตามลำดับ

RODZ2(K,J) และ RODZ3(K,J) คือค่าของโหลดชนิด กระแสคงที่ และกำลังงานคงที่ตามลำดับ และหาจำนวนโหลดแต่ละชนิดในแต่ละโซนโดยที่ NOLOD1(J), NOLOD2(J) และ NOLOD3(J) คือจำนวนโหลดชนิด อิมพีแดนซ์คงที่ กระแสคงที่และกำลังงานคงที่ ที่จัดอยู่ในโซน J ตามลำดับ

4.3.4 คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ปรับปรุงที่บัสต่าง ๆ

ในขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์นั้น โหลดถูกเปลี่ยนเป็นกราวนด์-ทาย แอดมิดแตนซ์ซึ่งมีค่า

$$YO(I,J) = LOADZ(I,J)^{*} / \ VOLTZ(I,J)^{2} \ /BASMVA$$

โดยที่ YO(I,J) คือ กราวนด์-ทาย แอดมิดแตนซ์ ที่บัส I ในโซน J

LOADZ(I,J) คือ ค่าของโหลด

VOLTZ(I,J) คือ ขนาดแรงดันที่กำหนดเริ่มแรก

ในขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพ แอดมิดแตนซ์ที่ใช้แทนโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่สามารถคำนวณได้จาก

$$YL(I,J) = SUM^{*} / \left|ET(I,J)\right|^{2} / BASMVA$$

โดยที่ YL (I,J) คือแอดมิดแตนซ์ที่ใช้แทนโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่

SUM คือ ค่าของโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่ (SUM=LOADZ-RODZ2-RODZ3)

$\left|ET(I,J)\right|$ คือขนาดของแรงดันที่บัส I ของโซน J ที่ได้จากการคำนวณโหลดโฟลว์ก่อนเกิดการผิดปกติ

และการแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลย์ของนอร์ตัน ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ ZG ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อลงกราวนด์ บัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงต้องคิดผลของ ZG ด้วย ดังนั้นแอดมิดแตนซ์ที่ต้องปรับปรุงที่บัสต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$YMOD(I,J) = YL(I,J) - YO(I,J) + 1/ZG(K,J)$$

และ $$ZMOD(I,J) = 1/YMOD(I,J)$$

โดยที่ ZMOD(I,J) คือ อิมพีแดนซ์ที่ต่อลงกราวนด์ที่บัส I โซน J เพื่อปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1

บัสที่ไม่มีการปรับปรุงจะกำหนดให้ YMOD(I,J) = 0.0 + J0.0

ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณแอดมิดแตนซ์ที่ใช้แทนโหลดชนิดกระแสคงที่ และกำลังงานคงที่ดังนี้

$$ZDD(K,J) = RODZ2(K,J)^{*} / |ET(I,J)|^{2}/BASMVA$$

$$ZLN(K,J) = RODZ3(K,J)^{*} / |ET(I,J)|^{2}/BASMVA$$

โดยที่ ZDD และ ZLN คือแอดมิดแตนซ์ที่ใช้แทนโหลดชนิดกระแสคงที่ และกำลังงานคงที่ตามลำดับ ซึ่งแอดมิดแตนซ์นี้ไม่ได้ใช้ในการปรับปรุงเมตริกซ์ แต่ใช้ในการคำนวณหาผลสัพธ์ในช่วงลัดวงจรซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

โฟลว์ชาร์ตการหา ZMOD(I,J) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6

4.3.5 ปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1

เนื่องจาก ZMOD(I,J) ที่เพิ่มเข้าที่บัสต่าง ๆ อยู่ในลักษณะเป็นลิงค์ (Link) ที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นบัสอ้างอิง ดังนั้นการปรับปรุงเมตริกซ์อาจทำได้ดังนี้

ก. สร้างโหนดขั้วคราว L โดยที่ L=K+1 เมื่อ K เป็นจำนวนบัสทั้งหมดในโซน J

ข. บันทึกค่าลงมาชั่วคราวในแถวตั้ง L ของ Z_1 ดังนี้

$$Z1(I,L,J) = Z1(IFQ,I,J) \quad \text{โดยที่ } I = 1,2,\ldots K$$

และ $$Z1(L,L,J) = -Z1(IFQ,L,J) + ZMOD(IFQ,J)$$

โดยที่ IFQ คือบัสที่มี ZMOD ต่ออยู่

ค. กำจัดค่าลงมาชั่วคราวในแถวตั้ง L ของเมตริกซ์ Z_1 โดยใช้สมการดังนี้

$$Z1(I,M,J) = Z1(I,M,J) - \frac{Z1(I,L,J) \times Z1(L,M,J)}{Z1(L,L,J)}$$

โดยที่ I = 1,2,...,K

M = 1,2,...K

และได้แสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.7

4.3.6 จัดเรียงเมตริกซ์ใหม่

บัสที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณหาแรงดันในภาวะทรานเซียนต์คือ บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสของโหลดอินฟินิต นอน-อิมพีแดนซ์ บัสที่มีศักลายน์ต่ออยู่และบัสที่เกิดลัดวงจร ดังนั้นจึงต้องจัดเรียงเมตริกซ์ใหม่เพื่อใช้ส่วนของเมตริกซ์ Z_1 เฉพาะแถวที่มีบัสดังกล่าว ทำให้ลดที่บันทึกข้อมูลในหน่วยความจำลงอีก ตัวอย่างเช่น

$Z_1 =$

	1	2	3	4
1	11	12	13	14
2	21	22	23	24
3	31	32	33	34
4	41	42	43	44

ถ้าต้องการใช้เพียงบัส 2 และบัส 4 ให้จัดเรียงดังนี้

$Z_1 =$

	2	4		
2	22	24	//	//
4	42	44	//	//
	//	//	//	//
	//	//	//	//

พร้อมกันนี้ ค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับบัส I โซน J ของเมตริกซ์เดิมต้องเปลี่ยนให้ตรงกับเมตริกซ์ที่จัดเรียงใหม่ แล้วบันทึกค่าเหล่านี้ลงดีสค์ โฟลว์ชาร์ตของการจัดเรียงเมตริกซ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 โดยตรวจสอบทุก ๆ NODE(I,J) ถ้าเป็นที่ต้องใช้ในการคำนวณแรงดัน ให้บันทึกไว้และจัดเรียงเมตริกซ์ใหม่ เปลี่ยน NODE(I,J), GENZ(I,J), ET(I,J) และ NOBUSZ(J) ให้ตรงกับเมตริกซ์ใหม่และเปลี่ยนตำแหน่งของศักลายน์ ตามที่แสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.9 พร้อมทั้งกำหนดให้ ISWB และ ISWZ คือ บัสและโซนที่เกิดลัดวงจรตามลำดับ

4.4 คำนวณค่าเริ่มต้น

ขั้นตอนนี้เป็นโปรแกรมย่อย STEP8 ซึ่งใช้คำนวณค่าเริ่มต้นและตัวแปรที่จำเป็นอื่น ๆ โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

4.4.1 อ่านข้อมูล

ตัวแปรที่บันทึกไว้ในดิสค์เช่น Z1, NODE, GENZ, ET, ZG ให้อ่านเข้ามาบันทึกในหน่วยความจำ ส่วนตัวแปรอื่นที่ไม่ใช้ในการคำนวณให้ตัวแปรอื่นทับ เพื่อประหยัดหน่วยความจำ

4.4.2 จัดข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้จัดในแต่ละโซน โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ K ของโซน J ใช้ตัวแปรดังนี้

NOGEN(J)	คือ	จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโซน J
GNO	คือ	หมายเลขเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
MGEN	คือ	บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่
XD	คือ	Direct-axis synchronous reactance
XQ	คือ	Quadrature-axis synchronous reactance
XDP	คือ	Transient reactance
TO	คือ	Open-circuit field time constant
H	คือ	Inertia constant of machine
MU	คือ	Overall gain of excitation system
EFMAX	คือ	Ceiling excitation voltage
EFMIN	คือ	Minimum excitation voltage
TE	คือ	Excitation system time constant
TC	คือ	Governor system time constant
TS	คือ	Steam system time constant
R	คือ	Speed regulation
PMAX	คือ	Maximum mechanical power

4.4.3 คำนวณค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดความผิดปกติในระบบสามารถคำนวณได้ดังนี้

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ K ของโซน J

IQQ คือ กระแสที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Terminal current)

EQ คือ voltage back of X_q

ETOO คือ ขนาดของแรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดก่อนเกิดการผิดปกติ

EQP คือ voltage proportional to field flux linkage (e'_q)

ANG คือ เฟสของแรงดัน E_q เทียบกับสวิงบัส

EFDO คือ ขนาดของแรงดันสนามแม่เหล็กก่อนเกิดการผิดปกติ

AG คือ กระแสสมมูลย์ที่ใช้แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

PMO คือ กำลังงานกลก่อนเกิดการผิดปกติ

และสามารถเขียนในโปรแกรมดังนี้

$$IQQ(K,J) = GENZ(I,J)^{*}/ET(I,J)^{*}/BASMVA$$

$$EQ(K,J) = ET(I,J) + ZG(K,J) * IQQ(K,J)$$

$$ETOO(K,J) = |ET(I,J)|$$

$$EQP(K,J) = |EQ(K,J)| - (XQ(K,J)-XDP(K,J)) * SAVE/|EQ(K,J)|$$

$$ANG(K,J) = \tan^{-1} \frac{Im\,[EQ(K,J)]}{Re\,[EQ(K,J)]}$$

$$EFDO(K,J) = \frac{(XD(K,J)-XDP(K,J))}{(XQ(K,J)-XDP(K,J))} * |EQ(K,J)| + \frac{(XQ(K,J)-XD(K,J))}{(XQ(K,J)-XDP(K,J))} * EQP(K,J)$$

$$AG(K,J) = EQ(K,J)/ZG(K,J)$$

$$PMO(K,J) = Re\,[GENZ(I,J)]/BASMVA$$

โดยที่ $SAVE = Im[EQ(K,J)] * Re[IQQ(K,J)] - Re[EQ(K,J)] * Im[IQQ(K,J)]$

ซึ่ง $Re[...]$ และ $Im[...]$ คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามลำดับ โฟลว์ชาร์ตการคำนวณค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 4.10

4.4.4 คำนวณค่าเริ่มต้นของโหลด

โฟลว์ชาร์ตของการคำนวณค่าเริ่มต้นของโหลดชนิดกระแสคงที่และโหลดชนิดกำลังงานคงที่ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ โดยที่

ALOD2 คือ กระแสของโหลดชนิดกระแสคงที่

ALPA คือ มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสของโหลดชนิดกระแสคงที่ ซึ่งคงที่ตลอดการคำนวณ

ABL2 คือ ขนาดของ ALOD2 ซึ่งคงที่ตลอดการคำนวณ

ALOD3 คือ กระแสของโหลดชนิดกำลังงานคงที่

และค่าเริ่มต้นของโหลด K ในโซน J สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$ALOD2(K,J) = RODZ2(K,J)^{*}/ET(I,J)^{*}/BASMVA$$

$$ALPA(K,J) = \tan^{-1}\frac{Im\left[RODZ2(K,J)\right]}{Re\left[RODZ2(K,J)\right]}$$

$$ABL2(K,J) = \left| ALOD2(K,J) \right|$$

$$ALOD3(K,J) = RODZ3(K,J)^{*}/ET(I,J)^{*}/BASMVA$$

4.4.5 บันทึกบัสที่ต้องการคำนวณแรงดันในแต่ละวงรอบ

การอิเทอเรทพาผลลัพธ์แบ่งเป็น 3 วงรอบ โดยที่ วงรอบที่ 1 ให้คำนวณเฉพาะแรงดันของบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงรอบที่ 2 คำนวณเฉพาะแรงดันของบัสที่ต่อกับโหลดชนิดกระแสคงที่ และวงรอบที่ 3 คำนวณเฉพาะแรงดันของบัสที่ต่อกับโหลดชนิดกำลังงานคงที่ เนื่องจากในทุกวงรอบมีการคำนวณแรงดันที่บัสที่ต่อกับศัทลายน์และบัสที่เกิดสัดวงจร ดังนั้น จึงต้องบันทึกบัสที่ใช้คำนวณแรงดันในแต่ละวงรอบโดยที่

NELOP(N,J) คือ จำนวนบัสที่ใช้คำนวณแรงดันในวงรอบที่ N ของโซน J

NNODE(L,N,J) คือ บัสที่ใช้คำนวณแรงดันเป็นอันดับที่ L ในวงรอบ N ของโซน J

โฟลว์ชาร์ตการบันทึกบัสดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13

4.5 คำนวณหาเสถียรภาพของระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณเสถียรภาพ ฯ โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่เวลา t = 0 การคำนวณใช้โปรแกรมย่อย STEP9 เป็นโปรแกรมหลัก และมีโปรแกรมย่อยอื่นอีก 3 โปรแกรม คือ โปรแกรมย่อย SOLVE ซึ่งทำการคำนวณผลลัพธ์โดยวิธีไดอาคอปติก โปรแกรมย่อย MODIFY ทำการปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 และคำนวณเมตริกซ์ Y_4 และ Z_S และโปรแกรมย่อย STATE ทำการคำนวณผลลัพธ์ของสมการสภาวะ ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงแบ่งเป็นขั้นตอนย่อย ๆ อีกตามลำดับดังนี้

4.5.1 ตรวจสอบการตัดต่อ (Switching) ที่เวลา t ใด ๆ ถ้ามีการตัดต่อให้ทำการปรับปรุงเมตริกซ์ในขั้นตอนที่ 4.5.2 ถ้าไม่มีการตัดต่อให้ไปทำขั้นตอนที่ 4.5.5

4.5.2 ปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 และคำนวณเมตริกซ์ Z_4, Y_4 และ Z_S ใหม่ ที่เวลา t = 0 ซึ่งเมตริกซ์ Z_1 ได้ปรับปรุงแล้วในขั้นตอนที่ 4.3 ดังนั้นให้ข้ามไปคำนวณเมตริกซ์ Z_4, Y_4 และ Z_S และที่เวลา t ใด ๆ ที่มีการตัดต่อและมีสายส่งถูกตัดออกจากระบบหรือถูกต่อกลับเข้าระบบ ให้ทำการปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 ใหม่ การแทนสายส่งที่ถูกตัดทำโดยขนานสายส่งที่มีขนาดอิมพีแดนซ์ เท่ากับสายส่งที่ถูกตัด แต่มีค่าเป็นลบ ในโปรแกรมย่อย MODIFY นี้ แบ่งขั้นตอนทำงานตามที่ได้แสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.14 ซึ่งอธิบายได้ตามลำดับดังนี้

1) ปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 โดยตรวจสอบหาสายส่งที่ถูกตัดต่อ พร้อมทั้งหาบัสและโซนที่สายส่งนั้นต่ออยู่ เนื่องจากสายส่งนี้ต่อในลักษณะลิงค์ระหว่างบัส ดังนั้นการปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 อาจทำได้ดังนี้

ก. สร้างโหนดขึ้นใหม่ L โดยที่ L = NOBUSZ(J) + 1

ข. บันทึกค่าลงมาอีกในแถวตั้ง L ของเมตริกซ์ Z_1 ดังนี้

Z1 (I,L,J) = Z1 (I,IFP,J) - Z1 (I,IFQ,J)

โดยที่ I = 1, 2,... NOBUSZ(J)

และ Z1 (L,L,J) = Z1 (IFP,L,J) - Z1 (IFQ,L,J) + IMP(K,ITS)

โดยที่ IFP และ IFQ คือบัส P และบัส Q ที่สายส่งต่ออยู่

IMP(K,ITS) คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งอันดับที่ K ของการตัดต่อครั้งที่ ITS

ค. กำจัดค่าสมาชิกในแถวตั้ง L ของเมตริกซ์ Z_1 โดยใช้สมการดังนี้

$$Z1(I,M,J) = Z1(I,M,J) - \frac{Z1(I,L,J) * Z1(L,M,J)}{Z1(L,L,J)}$$

โดยที่ I = 1,2... NOBUSZ(J)

M = 1,2... NOBUSZ(J)

เสร็จแล้วให้ตรวจสอบสายส่งที่เกิดการตัดต่อเส้นอื่นต่อไปจนครบ

2) สร้างเมตริกซ์ Z_2

การสร้างเมตริกซ์ Z_2 คล้ายกับการสร้างเมตริกซ์ Z_2 ของโปรแกรมย่อย STEP2B ของการคำนวณโหลดโฟลว์ โดยโปรแกรมกำหนดทิศทางการไหลของกระแสในสายนี้ โดยที่กระแสสายนี้ไหลเข้าไปในโซนที่พบสายนี้นั้นก่อนและไหลออกจากโซนที่พบสายนี้ที่หลัง (ในโปรแกรมนี้โซนที่มีลำดับต่ำกว่าจะพบสายนี้ก่อน) โฟลว์ชาร์ตของการสร้างเมตริกซ์ Z_2 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 สัญญลักษณ์ที่ใช้ในโปรแกรมมีดังนี้

Z_2 ได้บันทึกค่าไว้ในรูปของอาเรย์ 3 มิติคือ Z2 (L,IC,J)

โดยที่ L คือ ดัชนีบอกแถวนอนที่มีค่าสูงสุดเท่ากับจำนวนบัสในโซน

IC คือ ดัชนีบอกแถวตั้ง มีค่าสูงสุดเท่ากับจำนวนสายนี้

J คือ ดัชนีบอกโซน

CUTF คือ เครื่องหมายของสายนี้กำหนดไว้เพื่อตรวจสอบว่าสายนี้ถูกตรวจพบแล้วหรือยัง

3) สร้างเมตริกซ์ Z_4

โปรแกรมส่วนนี้เหมือนกับโปรแกรมสร้างเมตริกซ์ Z_4 ในโปรแกรมย่อย STEP3 และได้แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.16 ซึ่งเมตริกซ์ Z_4 คำนวณได้โดยตรวจจากเมตริกซ์ Z_2 โดยที่ Z_4 บันทึกค่าไว้ในรูปของอาเรย์ 2 มิติ เป็นเมตริกซ์สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Matrix) มีจำนวนแถวนอนและแถวตั้งเท่ากับศักลายน์ เป็นเมตริกซ์สมมาตร (Symmetric Matrix) แต่ละแถวตั้งสัมพันธ์กับศักลายน์ ค่าสมาชิกบนแนวทแยงคือผลรวมของไดรวิงพอยต์อิมพีแดนซ์ (Driving Point Impedance) ของบัสทั้งสองที่ศักลายน์เชื่อมอยู่บวกกับค่าอิมพีแดนซ์ ของศักลายน์ ส่วนค่าสมาชิกนอกแนวทแยงเป็นผลของมิวชวลคับปลิง (Mutual Coupling) ระหว่างบัสกับศักลายน์

4) สร้างเมตริกซ์ Y_4

โปรแกรมส่วนนี้เหมือนกับโปรแกรมสร้างเมตริกซ์ Y_4 ในโปรแกรมย่อย STEP3 ซึ่งเมตริกซ์ Y_4 คำนวณได้จากส่วนกลับของเมตริกซ์ Z_4 และได้แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.17 โดยที่ Y_4 ได้บันทึกค่าไว้เป็นอาเรย์ มี 2 มิติ ขนาดเดียวกับ Z_4

D คือ ที่เก็บค่าชั่วคราวในระหว่างการคำนวณ บันทึกค่าไว้เป็นอาเรย์มี 1 มิติ

DD คือ ตัวแปรที่เก็บค่าชั่วคราวในระหว่างการคำนวณ

5) สร้างเมตริกซ์ Z_S

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีไดอาคอปติกนี้ เราสามารถคำนวณกระแสสัตวงจรจาก Z_S ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของระบบรวม (Z_{BUS}) โดยที่

$$Z_{BUS} = Z_1 - Z_2 \, Y_4 Z_2^t$$

ในการหาค่าสมาชิกของเมตริกซ์ Z_S จะไม่หาจาก Z_{BUS} ทั้งหมด แต่หาเฉพาะแกนของบัสที่เกิดสัตวงจรและได้แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.18 โดยที่ Z_S ได้บันทึกค่าไว้เป็นอาเรย์ มี 2 มิติคือ ZS(I,J) ซึ่ง I เป็นดัชนีซึ่งบอกโหนด J เป็นดัชนีซึ่งบอกโอน VECTOR เป็นอาเรย์ซึ่งมี 1 มิติซึ่งเป็นที่เก็บค่าชั่วคราวระหว่างการคำนวณ

4.5.3 คำนวณผลลัพธ์ของย่ายวงจร

ขั้นตอนนี้ทำการหาผลลัพธ์ของย่ายวงจรโดยวิธีไดอาคอปติกซึ่งใช้โปรแกรมย่อย SOLVE ตามที่แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.19 โดยมีลำดับขั้นการคำนวณดังนี้

1. เริ่มคำนวณวงรอบที่ 1. โดยกำหนด

N = 1

และ NIT1 = NIT2 = NIT3 = 0

โดยที่ N เป็นดัชนีแสดงวงรอบ

NIT1, NIT2, NIT3 เป็นตัวแปรบันทึกจำนวนการอิเทอเรทีฟในวงรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

2. คำนวณกระแสที่เข้าบัสต่าง ๆ ได้จาก

A(I,J) = AG(K,J) - ALOD2 (K,J) - ALOD3 (K,J)

โดย A(I,J) คือ กระแสที่เข้าบัส I ของโซน J

AG(K,J) คือ กระแสเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ALOD2(K,J) คือ กระแสเนื่องจากโหลดชนิดกระแสคงที่

ALOD3(K,J) คือ กระแสเนื่องจากโหลดชนิดกำลังงานคงที่

3. ทดสอบเวลา t ถ้าอยู่ในขณะลัดวงจรให้ทำในขั้นตอนที่ 4 ถ้าพ้นจากช่วงลัดวงจรแล้วให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 5 โดยที่ TCF เป็นตัวแปรเก็บค่าเวลาที่การลัดวงจรได้แก้ไขเรียบร้อย (Fault Cleared)

4. คำนวณกระแสลัดวงจร (I_F) โดยที่

ISWB คือ บัสที่เกิดลัดวงจร

ISWZ คือ โซนที่เกิดลัดวงจร

การลัดวงจรนี้กำหนดให้เป็นชนิด 3 เฟสลงกราวนด์ โดยให้แรงดันที่บัสลัดวงจร (E_F) มีค่าเป็นศูนย์นั่นคือ

ET (ISWB, ISWZ) = 0.0 + j0.0

กระแสลัดวงจร I_F สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_F = \frac{E_F}{Z_{SS}} - \frac{Z_{S1}}{Z_{SS}} \cdot I_1 - \frac{Z_{S2}}{Z_{SS}} \cdot I_2 \ldots\ldots\ldots - \frac{Z_{Sn}}{Z_{SS}} \cdot I_n$$

และเขียนในโปรแกรมได้ดังนี้

```
A(ISWB,ISWZ) = (ET(ISWB,ISWZ) - SUM) / ZS(ISWB,ISWZ)
```

โดยที่

$$SUM = \sum_{\substack{I = 1,\ I \neq ISWB \\ J = 1}}^{\substack{NOZONE \\ NOBUSZ\ (J)}} ZS(I,J) * A(I,J)$$

5. คำนวณแรงดันที่บัสในวงรอบต่าง ๆ โดยใช้วิธีไดอาคอปติก 6 ขั้นตอนดังนี้

ก. คำนวณค่า $E_T^{(o)}$ ของวงรอบ N ของโซน J ได้จากสมการดังนี้

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

ซึ่งเขียนในโปรแกรมได้ดังนี้

$$ECUT(NNL,J) = \sum_{L = 1}^{NOBUSZ\ (J)} Z1(NNL,L,J) * A(L,J)$$

โดยที่ NNL = NNODE (K,N,J)

K = 1,2 .... NELOP (N,J)

J = 1,2 .... NOZONE

ข. คำนวณแรงดันคร่อมคัทลายน์ e'_c จากผลต่างของ $E_T^{(o)}$ ของบัสที่คัทลายน์เชื่อมอยู่

ข.1 หาบัสและโซนที่มีคัทลายน์ I_C เชื่อมอยู่

```
IP = CUTPB (IC)
IQ = CUTQB (IC)
JP = CUTPZ (IC)
JQ = CUTQZ (IC)
```

ข.2 กำหนดให้โซนที่มีลำดับสูงกว่า เป็นปลายส่ง และโซนที่มีลำดับต่ำกว่า เป็นปลายรับของคัทลายน์

ถ้า JP > JQ :

EC(IC) = ECUT(IQ,JQ) - ECUT(IP,JP)

ถ้า JP < JQ :

EC(IC) = ECUT(IQ,JQ) - ECUT(IP,JP)

IC = 1,2 ... NOCUT

ค. คำนวณหากระแสวงรอบปิด i_c จากสมการ

$$i_c = Y_4 \, e'_c$$

เขียนในโปรแกรมดังนี้

$$AC(IC) = \sum_{I=1}^{NOCUT} Y_4(IC,J) \times EC(I)$$

โดยที่ IC = 1,2 ... NOCUT

ง. คำนวณหากระแส I'_T จากการกำหนดเครื่องหมาย i_c

ง.1 หาบัสและโซนที่คัทลายน์ I_C เชื่อมอยู่

IP = CUTPB (IC)

IQ = CUTQB (IC)

JP = CUTPZ (IC)

JQ = CUTQZ (IC)

ง.2 กำหนดให้โซนที่มีลำดับสูงกว่า เป็นปลายส่งและโซนที่มีลำดับต่ำกว่า เป็นปลายรับของคัทลายน์

ถ้า JP > JQ

ACUT(IP,JP) = ACUT(IP,JP) - AC(IC)

ACUT(IQ,JQ) = ACUT(IQ,JQ) - AC(IC)

ถ้า JP < JQ

ACUT(IP,JP) = ACUT(IP,JP) + AC(IC)

ACUT(IQ,JQ) = ACUT(IQ,JQ) - AC(IC)

จ. คำนวณหาค่า E_T และ $E_T^{(o)}$ ของบัส NNL ดังนี้

จ.1 $ETO = \sum_{L=1}^{K} Z1(NNL,L,J) \times A(L,J)$

จ.2 $ET1 = \sum_{L=1}^{K} Z1(NNL,L,J) \times ACUT(L,J)$

จ.3 ET(NNL,J) = ETO + ET1

K คือ จำนวนบัสในโซน J

ET คือ แรงดันคร่อมบัส (E_T) เก็บค่าไว้ในรูปบวน มี 2 มิติ

ECUT คือ แรงดันคร่อมบัส เมื่อไม่รวมผลของกระแสคัทลายน์ ($E_T^{(o)}$) เก็บค่าไว้ในรูปบวนมี 2 มิติ

EC คือ แรงดันคร่อมคัทลายน์ (e_c') เก็บค่าไว้ในรูปบวน มี 1 มิติ

A คือ กระแสบัสเนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแส (I_T) เก็บค่าไว้ในรูปบวนมี 2 มิติ

ACUT คือ กระแสบัสเนื่องจากคัทลายน์ (I_T') เก็บไว้ในรูปบวนมี 2 มิติ

AC คือ กระแสในคัทลายน์ (i_c) เก็บค่าไว้ในรูปบวน มี 1 มิติ

6. ตรวจสอบ ถ้าอยู่ในวงรอบที่ 1 (N=1) ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 7

ถ้าอยู่ในวงรอบที่ 2 (N=2) ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 8

ถ้าอยู่ในวงรอบที่ 3 (N=3) ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 9

7. ตรวจสอบการเข้าหาคำตอบของวงรอบที่ 1 โดยคำนวณขนาดแรงดัน e_q' จากสมการดังนี้

$$I_t = (E_q - E_t) / jX_q$$

และ $|e'_q| = |E_q| - \frac{(x_q - x'_d)}{E_q} \cdot (Im[E_q] Re[I_t] - Re[E_q] Im[I_t])$

ซึ่งเขียนในโปรแกรมได้ดังนี้

$$IQQ(K,J) = (EQ(K,J) - ET(K,J)) / ZG(K,J)$$

$$EQP(K,J) = |EQ(K,J)| - \frac{(XQ(K,J) - XDP(K,J)) \times SAVE}{|EQ(K,J)|}$$

โดยที่ $SAVE = Im[EQ(K,J)] Re[IQQ(K,J)] - Re[EQ(K,J)] Im[IQQ(K,J)]$

และเปรียบเทียบขนาด e'_q ที่ได้กับ $\bar{e}'_q$ ที่ต้องการโดยที่

$$TEST1 = |EQBP(K,J) - EQP(K,J)|$$

ซึ่ง EQBP(K,J) คือขนาด e'_q ที่ต้องการ

จากนั้นตรวจสอบ TEST1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัว ถ้ามีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด (NETA) ให้ปรับปรุงขนาดของ EQ(K,J) ใหม่ดังนี้

$$EQMB(K,J) = |EQ(K,J)| * EQBP(K,J) / EQP(K,J)$$

และปรับค่า EQ(K,J) และ AG(K,J) ดังนี้

$$EQ(K,J) = ER + jEI$$

และ $$AG(K,J) = EQ(K,J) / ZG(K,J)$$

โดยที่ $$ER = EQMB(K,J) \times COS(ANG(K,J))$$

และ $$EI = EQMB(K,J) \times SIN(ANG(K,J))$$

แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่จนกว่าจะได้คำตอบ แล้วไปหาคำตอบในวงรอบที่ 2 ต่อไป โดยกำหนดค่า N=2 ตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรมมีดังนี้

EQMB คือ ขนาดของ EQ ที่ปรับปรุงแล้วในแต่ละอิเทอเรทีฟ

ANG คือ เฟสของ EQ ซึ่งคงที่ในแต่ละช่วงเวลาของการอิเทอเรทีฟ

8. ตรวจสอบการเข้าหาคำตอบของวงรอบที่ 2 โดยแบ่งการตรวจสอบเป็น 2 กรณี ดังนี้

ก. กรณีที่เกิดลัดวงจรซึ่งโหลดทั้งหมดถูกแทนด้วยอิมพีแดนซ์คงที่ การตรวจสอบทำโดยการเปรียบเทียบกระแส ALOD2 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นกับกระแส IKVP ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการหาผลลัพธ์ของย่ายวงจรและคำนวณได้จาก

$$IKVP(K,J) = ET(I,J) \times ZDD(K,J)$$

โดยที่ ZDD คือ แอดมิดแตนซ์ที่แทนโหลดชนิดกระแสคงที่ ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว

และเปรียบเทียบกระแสโดยให้

$$TEST2 = \left| ALOD2(K,J) - IKVP(K,J) \right|$$

จากนั้นตรวจสอบ TEST2 ของโหลดทุกตัว ถ้ามีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด (EPLON) ให้ปรับปรุง ALOD2 ใหม่โดยที่

$$ALOD2(K,J) = IKVP(K,J)$$

และ $NIT2 = NIT2 + 1$

แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่ จนได้คำตอบ จากนั้นจึงไปทำในวงรอบที่ 3 โดยกำหนดค่า N=3

ข. กรณีที่การลัดวงจรได้แก้ไขเรียบร้อยแล้ว (Fault cleared) ให้แทนโหลดเป็นชนิดกระแสคงที่ การตรวจสอบการเข้าหาคำตอบทำได้ดังนี้

ข.1 คำนวณเฟสของแรงดันของโหลดชนิดกระแสคงที่ (CTAP) จาก

$$CTAP(K,J) = \tan^{-1} \frac{Im\left[ET(I,J)\right]}{Re\left[ET(I,J)\right]}$$

ข.2 คำนวณมุมของกระแสของโหลดชนิดกระแสคงที่ (AGI2) จาก

$$AGI2(K,J) = \tan^{-1} \frac{Im\left[ALOD2(K,J)\right]}{Re\left[ALOD2(K,J)\right]}$$

และ $CTA(K,J) = AGI2(K,J) + ALPA(K,J)$

โดยที่ ALPA คือ มุมของเพาเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งมีค่าคงที่ตามค่าเริ่มต้น

ข.3 เปรียบเทียบค่า CTAP กับ CTA โดยให้

$$TEST2 = \left| \, |CTAP| - |CTA| \, \right|$$

แล้วตรวจสอบ TEST2 ของโหลดทุกตัว ถ้ายังมากกว่าค่าที่กำหนด (EPLON) ให้ทำการปรับปรุงเฟสของกระแสโหลด (AGI2) ดังนี้

กำหนดให้ $CTA(K,J) = CTAP(K,J)$

ดังนั้น $AGI2(K,J) = CTA(K,J) - ALPA(K,J)$

และให้ $AR = ABL2(K,J) \times \cos(AGI2(K,J))$

$AI = ABL2(K,J) \times \sin(AGI2(K,J))$

โดยที่ ABL2 คือ ขนาดของกระแสของโหลดชนิดกระแสคงที่ ซึ่งคำนวณไว้แล้วในขั้นตอนการคำนวณค่าเริ่มต้น

ดังนั้น กระแสของโหลดที่ปรับปรุงแล้วคือ

$$ALOD2(K,J) = AR + jAI$$

แล้วเพิ่มค่า NIT2 ขึ้น

$$NIT2 = NIT2 + 1$$

แล้วกลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 ใหม่จนได้คำตอบ แล้วไปทำในวงรอบที่ 3 โดยกำหนดค่า N=3

9. ตรวจสอบการเข้าหาคำตอบของวงรอบที่ 3 โดยแบ่งการตรวจสอบเป็น 2 กรณีเช่นกันดังนี้

ก. กรณีที่เกิดลัดวงจรซึ่งโหลดทั้งหมดถูกแทนด้วยอิมพีแดนซ์คงที่ การตรวจสอบทำโดยการเปรียบเทียบกระแส ALOD3 ซึ่งเป็นค่าสมมุติตามค่าเริ่มต้นกับกระแส IKVP ซึ่งเป็นกระแสของโหลดที่ได้จากการคำนวณผลลัพธ์ของย่ายวงจรและคำนวณได้จาก

$$IKVP(K,J) = ET(I,J) \times ZLN(K,J)$$

โดยที่ ZLN คือ แอดมิดแตนซ์ที่แทนโหลดชนิดกำลังงานคงที่ ซึ่งได้คำนวณไว้แล้ว

และ $TEST3 = |ALOD3(K,J) - IKVP(K,J)|$

แล้วตรวจสอบ TEST3 ของโหลดทุกตัว ถ้ายังมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด (OMGA)

ให้ปรับปรุง ALOD3 ใหม่โดยที่

ALOD3 = IKVP(K,J)

แล้วเพิ่มค่า NIT3 ขึ้น

NIT3 = NIT3 + 1

แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่จนได้คำตอบ จากนั้นตรวจสอบ ถ้ามีการอิเทอเรทีฟในวงรอบที่ 2 และวงรอบที่ 3 นั่นคือทั้ง NIT2 และ NIT3 มีค่าไม่เป็นศูนย์ ให้ไปทำการอิเทอเรทีฟใหม่ตั้งแต่วงรอบที่ 1 โดยกำหนดค่า N=1 จนกว่าจะได้คำตอบของย่ายวงจรทั้งหมด

ย. กรณีที่การลัดวงจรได้แก้ไขเรียบร้อย (Fault cleared) ให้แทนโหลดเป็นย่นิดกำลังงานคงที่ โดยที่กระแสของโหลดที่ได้จากการคำนวณผลลัพธ์ของย่ายวงจรสามารถคำนวณจาก

$$IKVP(K,J) = RODZ3(K,J)^{*}/ET(I,J)^{*}/BASMVA$$

โดยที่ RODZ3(K,J) คือ โหลดย่นิดกำลังงานคงที่ ซึ่งมีค่าคงที่ตามค่าเริ่มต้น จากนั้นทำการตรวจสอบการเข้าหาคำตอบซึ่งกระทำเหมือนข้อ ก. ทุกประการ

4.5.4 คำนวณกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อได้ผลลัพธ์ของย่ายวงจรตามขั้นตอนที่ 4.5.3 แล้ว ให้คำนวณกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสมการ

$$PE(K,J) = Re\left[EQ(K,J) \times IQQ(K,J)^{*}\right]$$

โดยที่ PE คือ กำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นให้ตรวจสอบ ถ้า JJ=0 ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 4.5.5 ถ้า JJ=1 ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 4.5.6 และถ้า JJ=2 ให้เพิ่มเวลา ($t+\Delta t \rightarrow t$) แล้วตรวจสอบ ถ้ายังไม่ถึงเวลาที่กำหนด (tmax) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 5.1 จนหมดช่วงเวลาของการวิเคราะห์ แล้วไปทำขั้นตอนที่ 4.6 ซึ่งเป็นการแสดงผล

4.5.5 คำนวณผลลัพธ์ของสมการสภาวะครั้งแรกที่เวลา $t+\Delta t$ โดยที่ Forward Euler จากนั้นกำหนดค่า JJ=1 แล้วกลับไปคำนวณผลลัพธ์ของย่ายวงจรในขั้นตอนที่ 4.5.3 และคำนวณกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 4.5.4 แล้วไปทำขั้นตอนที่ 4.5.6

4.5.6 คำนวณผลลัพธ์ของสมการสภาวะครั้งสุดท้ายที่เวลา $t+\Delta t$ โดยวิธี Modified Euler จากนั้นกำหนดค่า JJ=2 แล้วกลับไปคำนวณผลลัพธ์ของย่ายวงจรในขั้นตอนที่ 4.5.3 เพื่อคำนวณเสถียรภาพในช่วงเวลาต่อไป

ขั้นตอนที่ 4.5.5 และขั้นตอนที่ 4.5.6 นี้เป็นโปรแกรมย่อย STATE ซึ่งคำนวณผลลัพธ์ของสมการสภาวะครั้งแรกและครั้งสุดท้ายโดยวิธี Forward Euler และ Modified Euler ตามลำดับ สมการสภาวะประกอบด้วยสมการอนุพันธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบเอกไซเตชัน โกวเวอร์เนอร์ และสมการสวิง ตามที่กล่าวแล้วในบทที่ 3 ซึ่งนำมาเขียนรวมกันดังนี้

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd}-E_I)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{1}{T_E} (E'_{fd}-E_{fd})$$

$$\frac{dP'm}{dt} = \frac{1}{T_C} (P''m - P'm)$$

$$\frac{dPm}{dt} = \frac{1}{T_S} (P'm - Pm)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Pi f}{H} (Pm - Pe)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\Pi f$$

หรือเขียนในรูปทั่วไปของสมการสภาวะต่อไปนี้

$$\dot{X} = f(x,u,t)$$

และเขียนในโปรแกรมโดยใช้สัญญลักษณ์ซึ่งเรียงลำดับตามตัวแปรของสมการข้างบนดังนี้

```
DEQP (K,J) = (EFD(K,J) - EII(K,J)) / TO(K,J)
DEFD (K,J) = (EFDP(K,J) - EFD(K,J))/ TE(K,J)
DPMP (K,J) = (PMPP(K,J) - PMP(K,J))/ TC(K,J)
DPM  (K,J) = (PMP(K,J) - PM(K,J))/  TS(K,J)
 DW  (K,J) =  3.14159 X F X (PM(K,J) - PE(K,J))/H(K,J)
DDEL (K,J) =  W(K,J) - WO
```

โดยที่

$$EII(K,J)=\frac{(XD(K,J)-XDP(K,J))}{(XQ(K,J)-XDP(K,J))}\times|EQ(K,J)|+\frac{(XQ(K,J)-XD(K,J))}{(XQ(K,J)-XDP(K,J))}\times EQP(K,J)$$

$$EFD(K,J) = EFDO(K,J)-MU(K,J)\times(ETR(K,J)-ETOO(K,J))$$

หรือ $EFD(K,J) = EFMAX(K,J)$ ถ้า $EFD(K,J) \geqslant EFMAX(K,J)$

หรือ $EFDP(K,J) = EFMIN(K,J)$ ถ้า $EFDP(K,J) \leqslant EFMIN(K,J)$

$$PMPP(K,J)= PMO(K,J) - \frac{(WO-W(K,J))}{2\times3.14159\times FXR(K,J)}$$

หรือ $PMPP(K,J) = PMAX(K,J)$ ถ้า $PMPP(K,J) \geqslant PMAX(K,J)$

หรือ $PMPP(K,J) = 0$ ถ้า $PMPP(K,J) \leqslant 0$

ซึ่ง EFDO คือ แรงดันล่นามแม่เหล็กก่อนเกิดการผิดปกติ (E_{fdo})

MU คือ อัตราขยายทั้งหมดของระบบเอกไซเตชัน (μ)

ETR คือ ขนาดของแรงดันที่ปลายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (E_t)

ETOO คือ ขนาดของแรงดันที่ปลายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดการผิดปกติ (E_{to})

PMO คือ กำลังงานกลของเครื่องต้นกำลังก่อนเกิดการผิดปกติ ($P_{m(o)}$)

WO คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส ($2\pi f$)

การคำนวณหาผลลัพธ์ซึ่งแสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.20 สามารถอธิบายโดยลำดับดังนี้

1) คำนวณ $\dot{X}$ จากสมการ $\dot{X} = f(x,u,t)$

2) ตรวจสอบ ถ้า JJ=0 หรือ JJ=2 แสดงว่าเป็นการคำนวณผลลัพธ์ครั้งแรกให้ไปทำขั้นตอนที่ 3) ถ้า JJ=1 แสดงว่าเป็นการคำนวณผลลัพธ์ครั้งสุดท้าย ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 4)

3) เก็บ $\dot{X}$ ไว้ในตัวแปรชั่วคราว $\dot{X}_1$ ดังนี้

```
SDEQ(K,J)  = DEQP(K,J)
SDEF(K,J)  = DEFD(K,J)
SDPMP(K,J) = DPMP(K,J)
SDPM(K,J)  = DPM(K,J)
SDW(K,J)   = DW(K,J)
SDDEL(K,J) = DDEL(K,J)
```

และเก็บ X_t ไว้ในตัวแปรชั่วคราว X1 ดังนี้

```
EQP1(K,J)  = EQP(K,J)
EFD1(K,J)  = EFD(K,J)
PMP1(K,J)  = PMP(K,J)
PM1(K,J)   = PM(K,J)
W1(K,J)    = W(K,J)
AAMG1(K,J) = ANG(K,J)
```

จากนั้นไปทำขั้นตอนที่ 5)

4) คำนวณ $\dot{X}$ ของการหาผลลัพธ์ครั้งสุดท้ายโดยที่

$$\dot{X} = \frac{(\dot{X} + \dot{X}_1)}{2}$$

ซึ่งเขียนในโปรแกรมดังนี้

```
DEQP(K,J) = (DEQP(K,J) + SDEQ(K,J))/2.0
DEFD(K,J) = (DEFD(K,J) + SDEF(K,J))/2.0
DPMP(K,J) = (DPMP(K,J) + SDPMP(K,J))/2.0
DPM (K,J) = (DPM(K,J)  + SDPM(K,J))/2.0
DW  (K,J) = (DW(K,J)   + SDW(K,J)) /2.0
DDEL(K,J) = (DW(K,J)   + SDW(K,J)) /2.0
```

และให้ X_t เป็นค่าเดิมที่เก็บไว้หรือ $X_t \leftarrow X1$ ซึ่งเขียนในโปรแกรมดังนี้

```
EQP(K,J)  =  EQP1(K,J)
EFD(K,J)  =  EFD1(K,J)
PMP(K,J)  =  PMP1(K,J)
PM (K,J)  =  PM1(K,J)
W  (K,J)  =  W1(K,J)
ANG(K,J)  =  AANG1(K,J)
```

แล้วไปทำขั้นตอนที่ 5)

5) คำนวณหา X ที่เวลา $t+\Delta t$ นั้นคือ

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \dot{X}\Delta t$$

ซึ่งเขียนในโปรแกรมดังนี้

```
EQP(K,J)  =  EQP(K,J) + DEQP(K,J) X DT
EFD(K,J)  =  EFD(K,J) + DEFD(K,J) X DT
PMP(K,J)  =  PMP(K,J) + DPMP(K,J) X DT
PM (K,J)  =  PM(K,J)  + DPM(K,J)  X DT
W  (K,J)  =  W(K,J)   + DW(K,J)   X DT
ANG(K,J)  =  ANG(K,J) + DDEL(K,J) X DT
```

โดยที่ ANG คือ เฟสของแรงดัน E_q มีหน่วยเป็นเรเดียน

และ DT คือ ช่วงเวลา (Time Interval) แต่ละขั้น (Δt)

6) ปรับปรุงแรงดัน E_q และ e'_q และกระแส I_G ซึ่งเขียนในโปรแกรม ดังนี้

```
ER  = |EQ(K,J)| COS (ANG(K,J))
EI  = |EQ(K,J)| SIN (ANG(K,J))
EQ(K,J) = ER + jEI
EQBP(K,J) = EQP(K,J)
```

และ AG(K,J) = EQ(K,J) / ZG(K,J)

แล้วทดลอบ ถ้า JJ=0 หรือ JJ=2 ให้กลับไปทำในโปรแกรมหลัก (STEP9) ถ้า JJ=1 ให้บันทึกความเร็วรอบ (ω) และมุม δ ที่คำนวณได้ที่เวลานั้น ๆ ดังนี้

```
WW(L,IISET) = W(K,J)/2.0/3.14159/F
DELTA(L,IISET) = ANG(K,J) X 57.29578
```

โดยที่ WW คือ ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นค่าต่อหน่วย

DELTA คือ เฟสของแรงดัน E_q หรือมุม δ เทียบกับแกนอ้างอิง มีหน่วยเป็นองศา

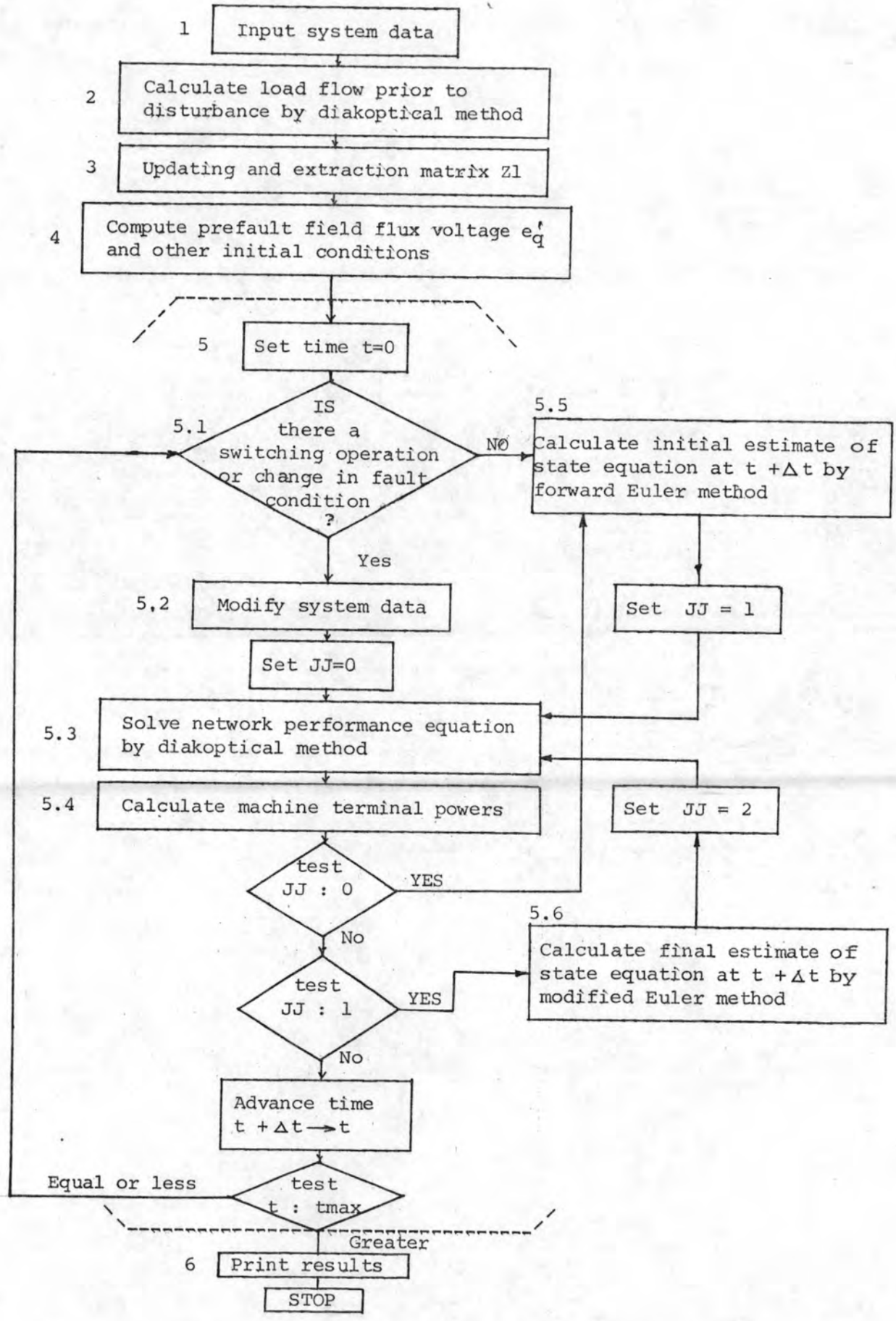
IISET คือ ตัวบ่งบอกตำแหน่งของช่วงเวลา

L คือ หมายเลยกราฟที่แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

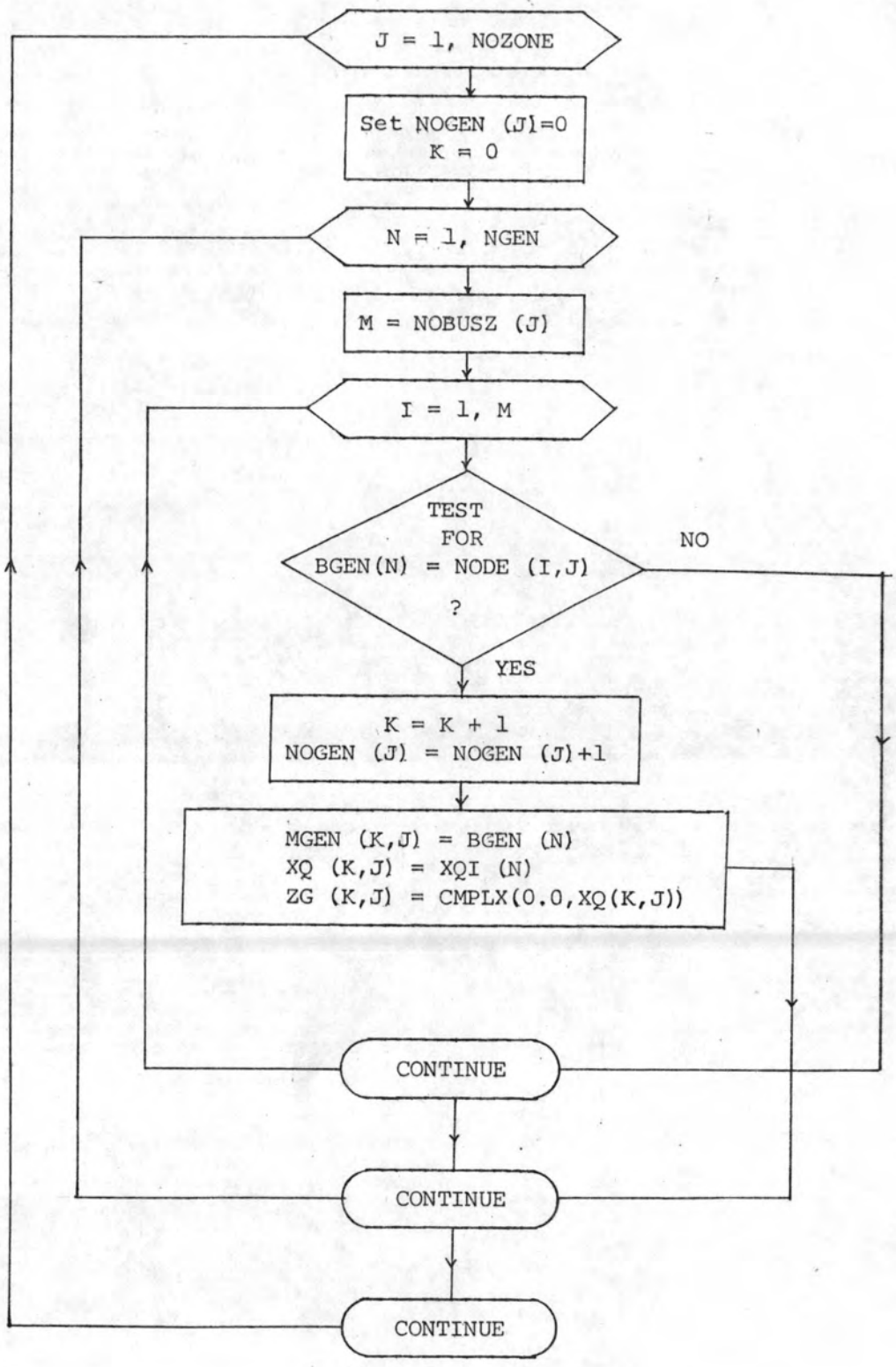
เสร็จแล้วกลับไปทำในโปรแกรมหลัก (STEP9)

4.6 <u>แสดงผลการวิเคราะห์</u>

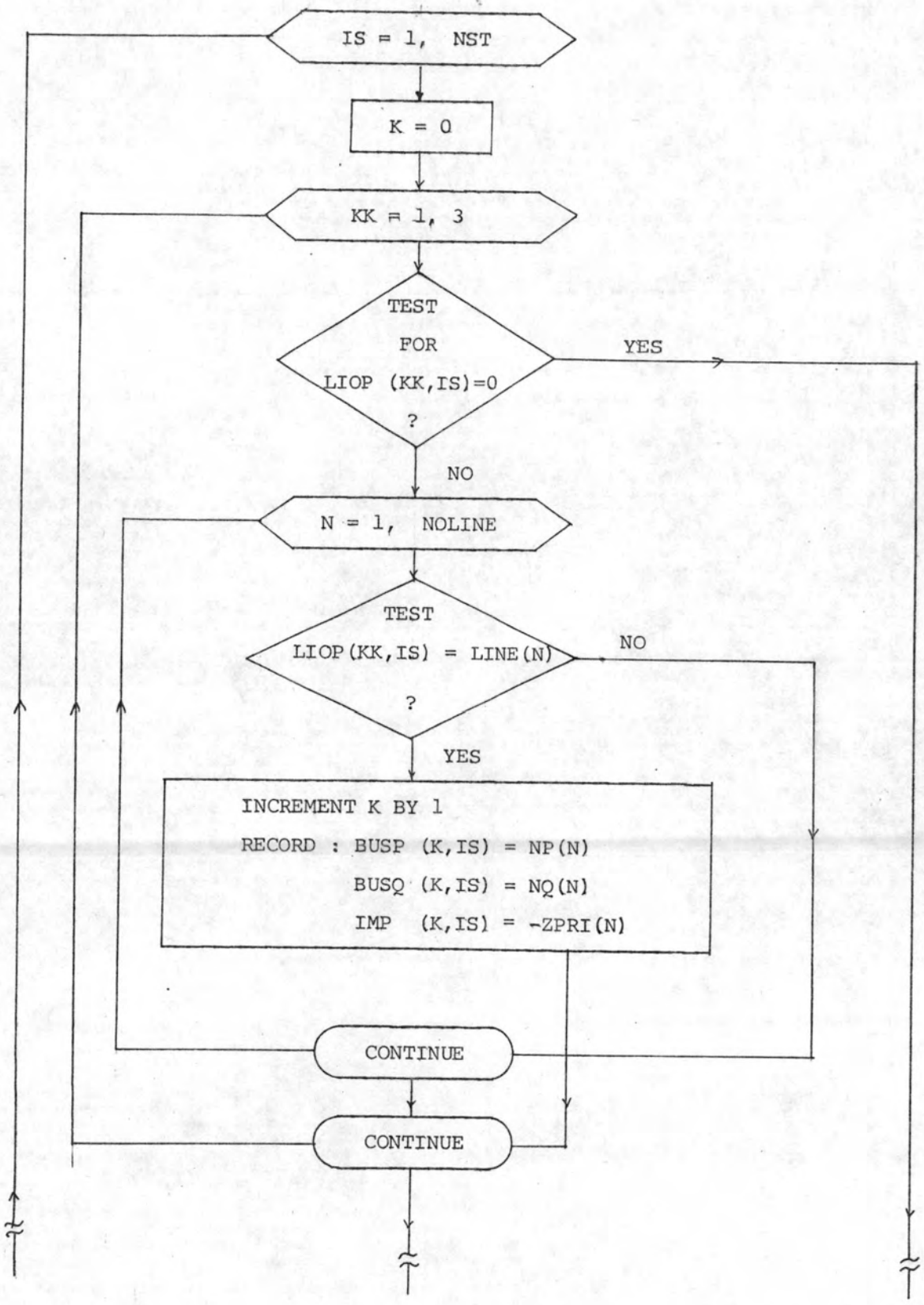
การแสดงผลลัพธ์บนเครื่องมินิคอมพิวเตอร์ PDP-11 อาจแสดงด้วยโปรแกรมย่อย PLOT ซึ่งแสดงกราฟของความเร็วรอบ และตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ (δ) ที่เวลาต่าง ๆ โดยมีแกนนอนเป็นแกนของเวลาและสามารถเลือกขยายสเกลของเวลาในกรณีที่ต้องการขยายเวลาการวิเคราะห์เป็น 2 หรือ 3 วินาที และแกนตั้งเป็นแกนของความเร็วรอบ (ω) และตำแหน่งเชิงมุม (δ) ซึ่งสามารถเลือกสเกลให้ได้รูปกราฟที่เหมาะสม โปรแกรมย่อย PLOT นี้สามารถเลือกให้แสดงกราฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ครั้งละไม่เกิน 5 ตัว

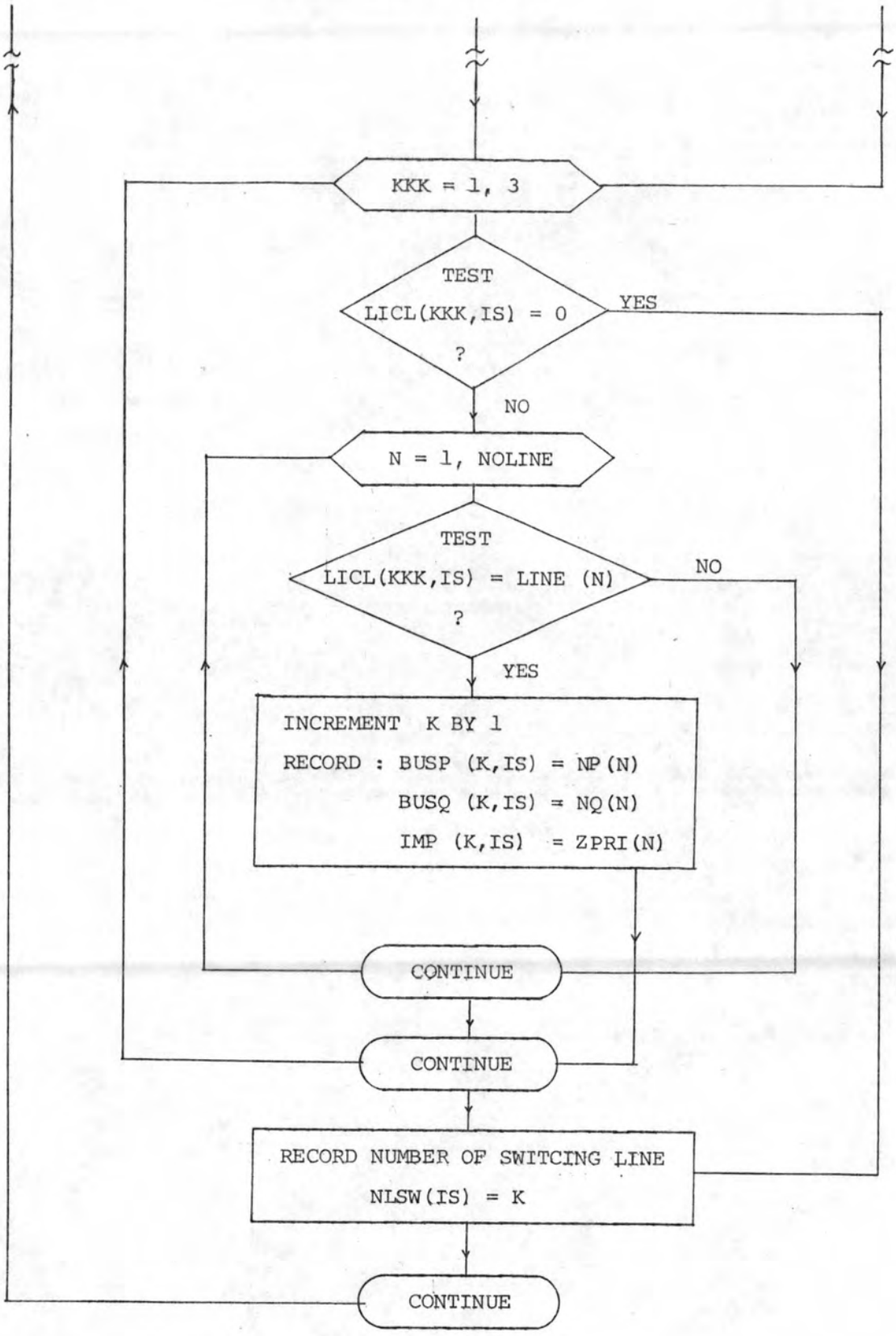


รูปที่ 4.1 โฟลว์ชาร์ตการวิเคราะห์เสถียรภาพ

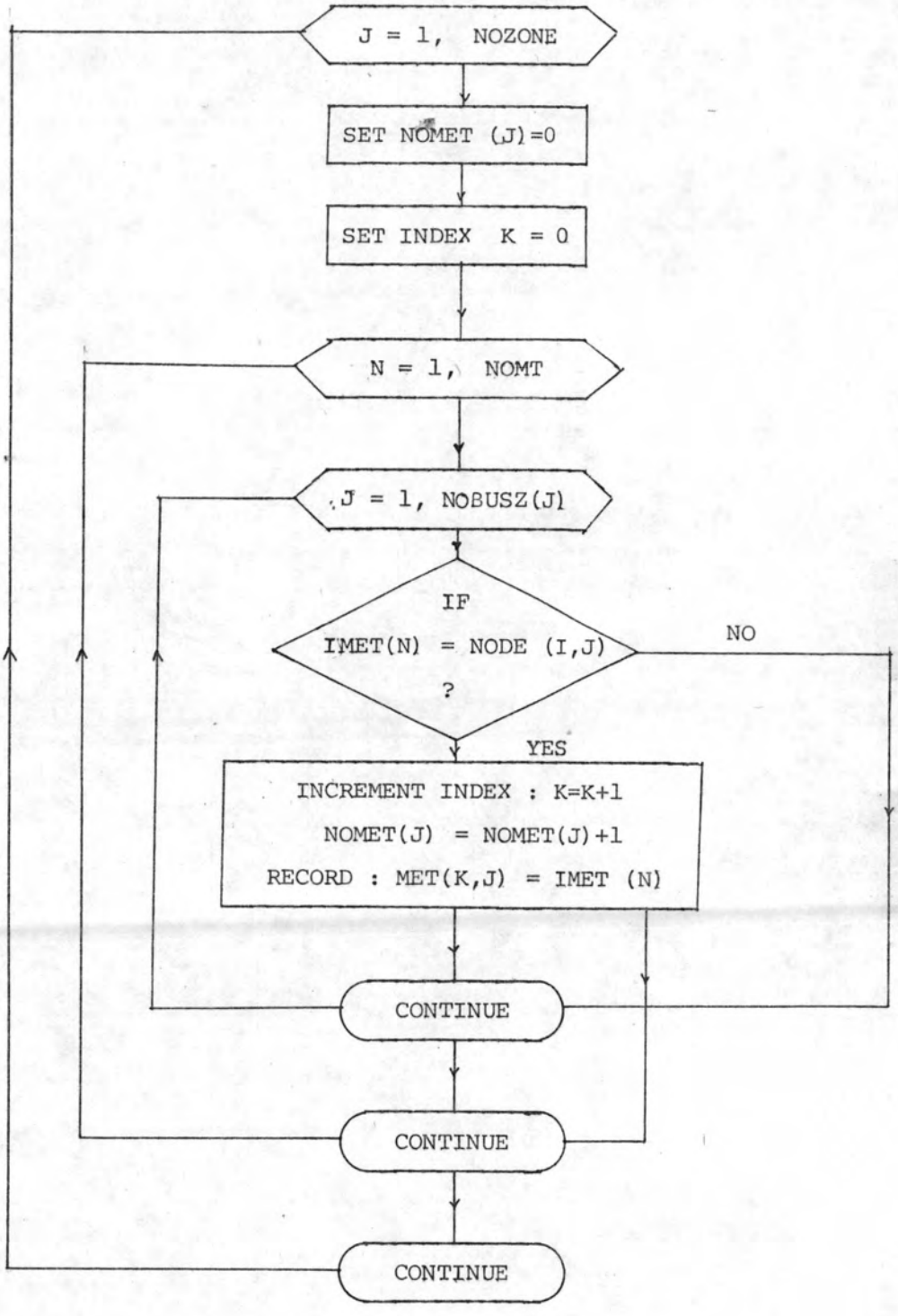


รูปที่ 4.2 โฟลว์ชาร์ตการจัดข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า


IS = 1, NST
K = 0
KK = 1, 3
TEST FOR LIOP (KK,IS)=0 ?
YES
NO
N = 1, NOLINE
TEST LIOP(KK,IS) = LINE(N) ?
NO
YES
INCREMENT K BY 1
RECORD : BUSP (K,IS) = NP(N)
BUSQ (K,IS) = NQ(N)
IMP (K,IS) = -ZPRI(N)
CONTINUE
CONTINUE



รูปที่ 4.3 โฟลว์ชาร์ตการจัดข้อมูลของสายสั่งที่เกิดการสัดต่อ (Switching)



รูปที่ 4_4 โฟลว์ชาร์ตการจัดบัสที่ต่อกับสายส่งที่มีการตัดต่อ (Switching)

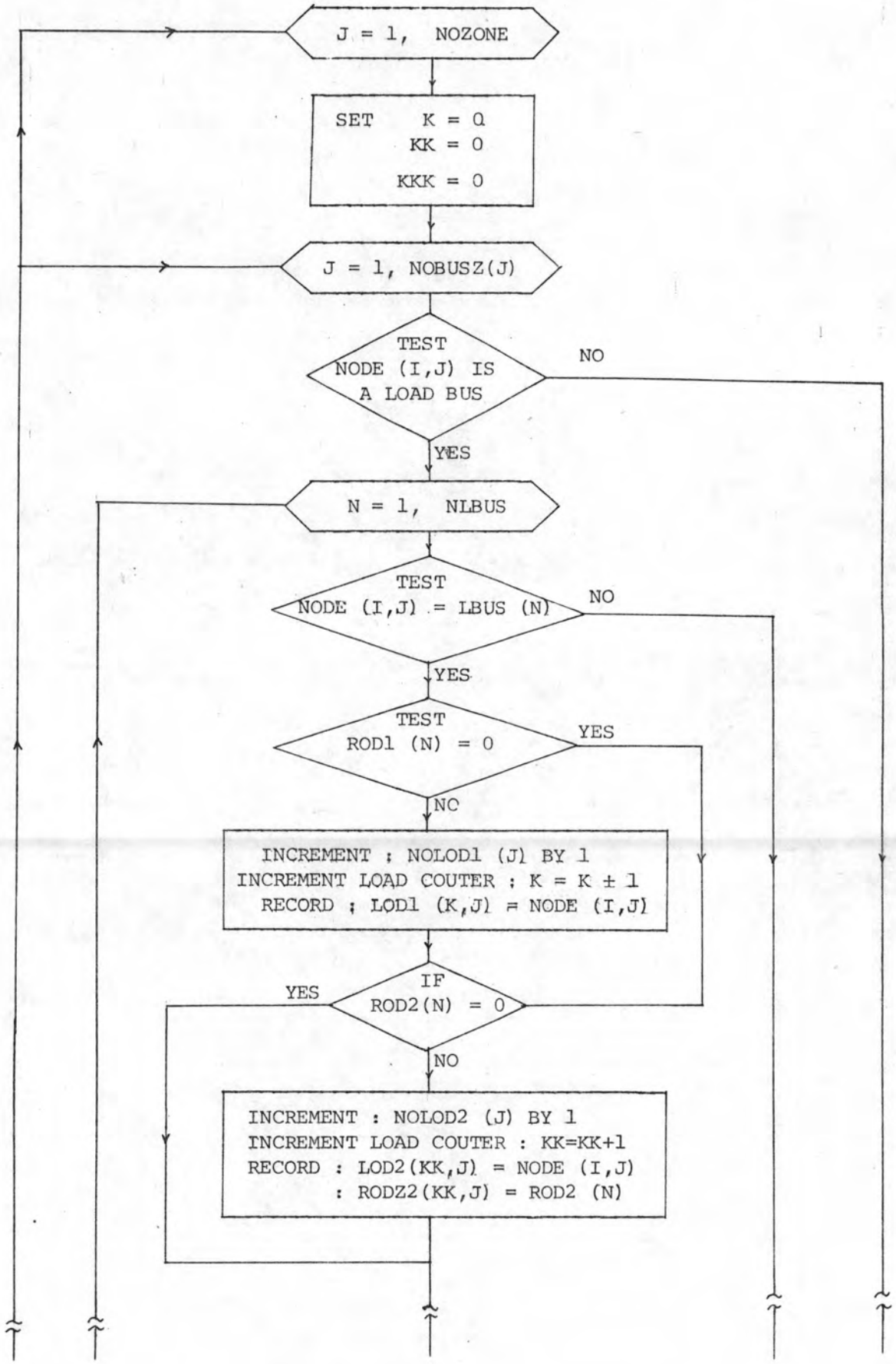
(Cat. by.....Date.....Input by .....)

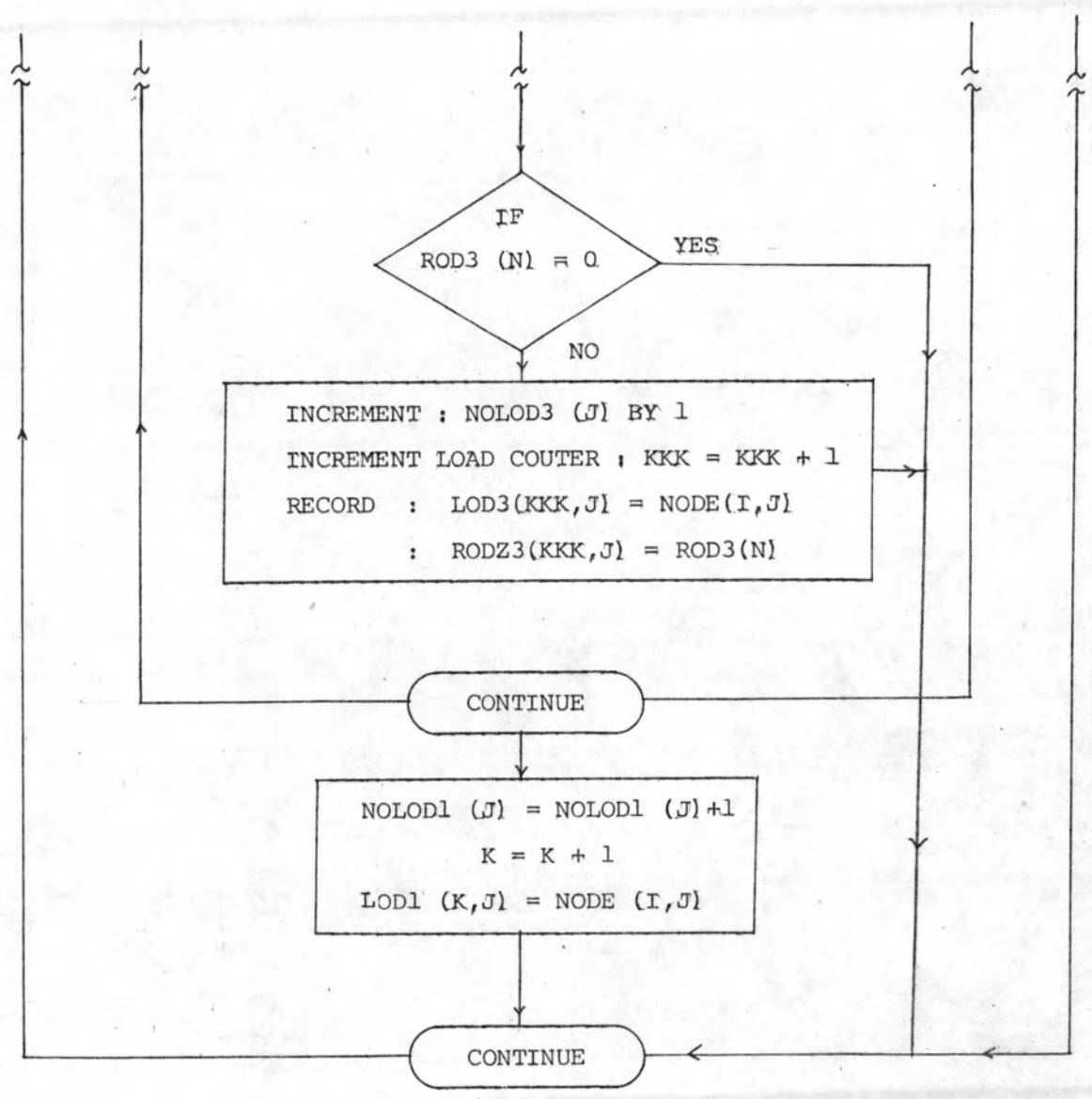
CU : THES DATA BASE - INSIS INPUT WORKSHEET

ISIS no.....

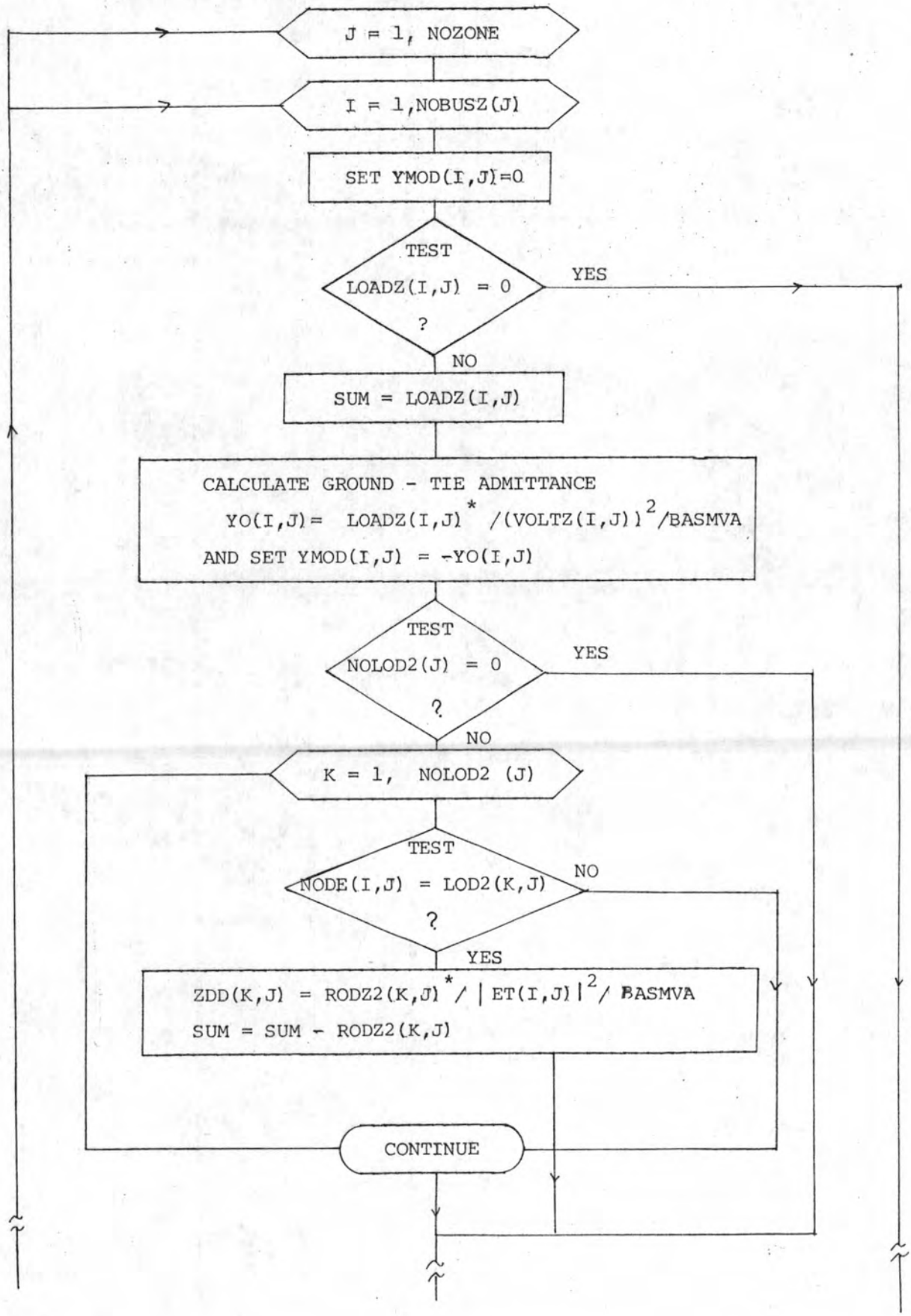
016	Accession no. 017418
020	ISBN. ^a 974-578-370-6
100	Author ^a ทรงศักดิ์ คงน้อย ^d 2504 -
245	Title ^a วิธีดีเคอพเพิลแบบแบ่งส่วนย่อยสำหรับฟาสต์ดีคัปเปิลโหลดโฟลว์แบบปรับปรุง ^l Piecewise method for modified fast-decouple load flow ^c ทรงศักดิ์ คงน้อย
260	Publication area. ^c 2534
300	Physical description area. ^a [11], 203 แผ่น ^b ภาพประกอบ
500	General note. ^a พิมพ์ดีด (หน้าสั้นหน้า)
502	Dessertation note. ^a วิทยานิพนธ์ (วศ.ด.) --จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534
600	Pers name descriptor.....
610	Corp name descriptor.....
630	Unif tif descriptor.....

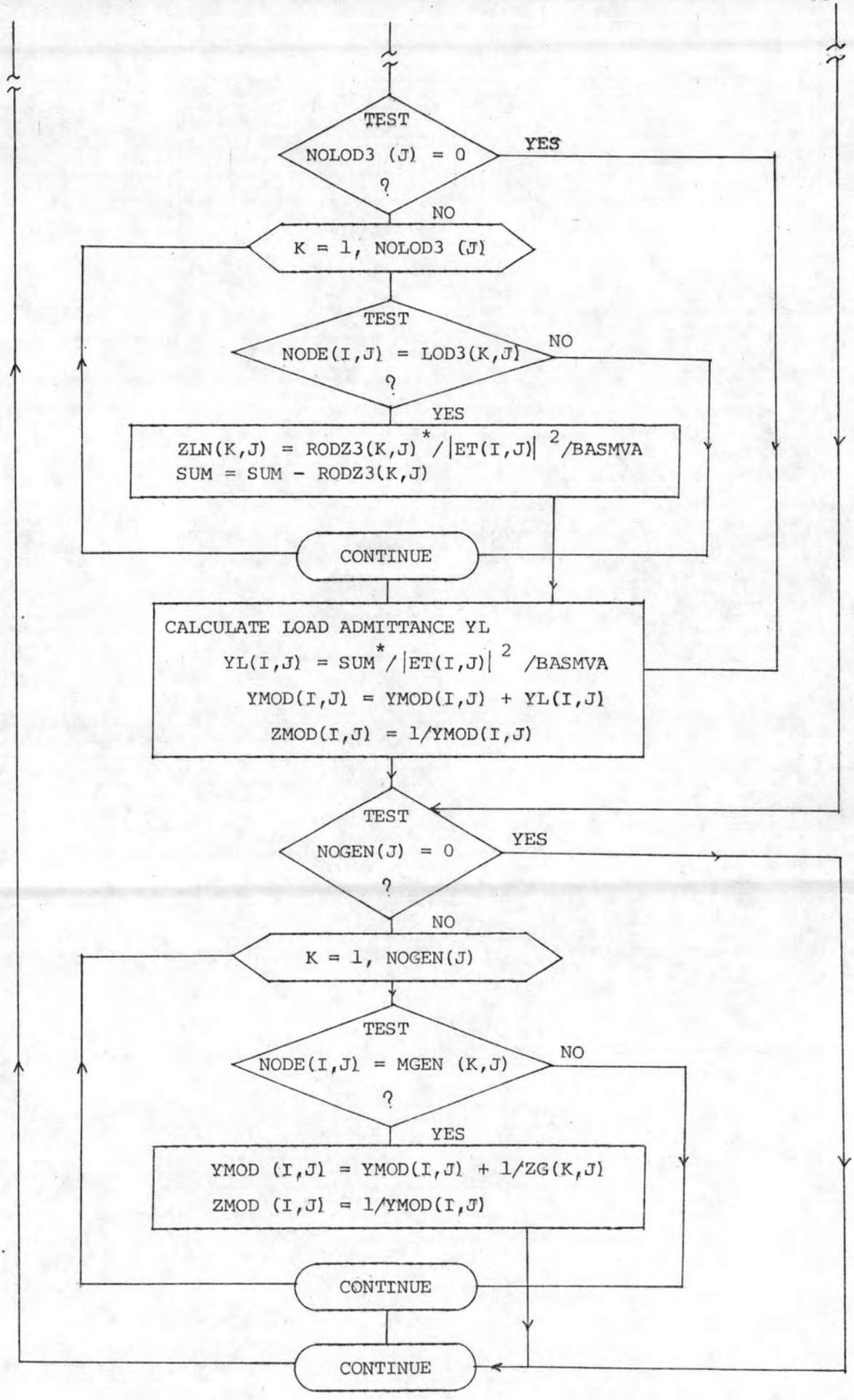
645	2Tit descriptor.....
	.....
	.....
	.....
650	Theasaurus descriptor.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
651	Geographic descriptor.....
	.....
	.....
	.....
	.....
710	Coporate name added entry.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....


J = 1, NOZONE
SET K = 0
KK = 0
KKK = 0
J = 1, NOBUSZ(J)
TEST NODE (I,J) IS A LOAD BUS
NO
YES
N = 1, NLBUS
TEST NODE (I,J) = LBUS (N)
NO
YES
TEST ROD1 (N) = 0
YES
NO
INCREMENT : NOLOD1 (J) BY 1
INCREMENT LOAD COUTER : K = K + 1
RECORD : LOD1 (K,J) = NODE (I,J)
IF ROD2(N) = 0
YES
NO
INCREMENT : NOLOD2 (J) BY 1
INCREMENT LOAD COUTER : KK=KK+1
RECORD : LOD2(KK,J) = NODE (I,J)
: RODZ2(KK,J) = ROD2 (N)

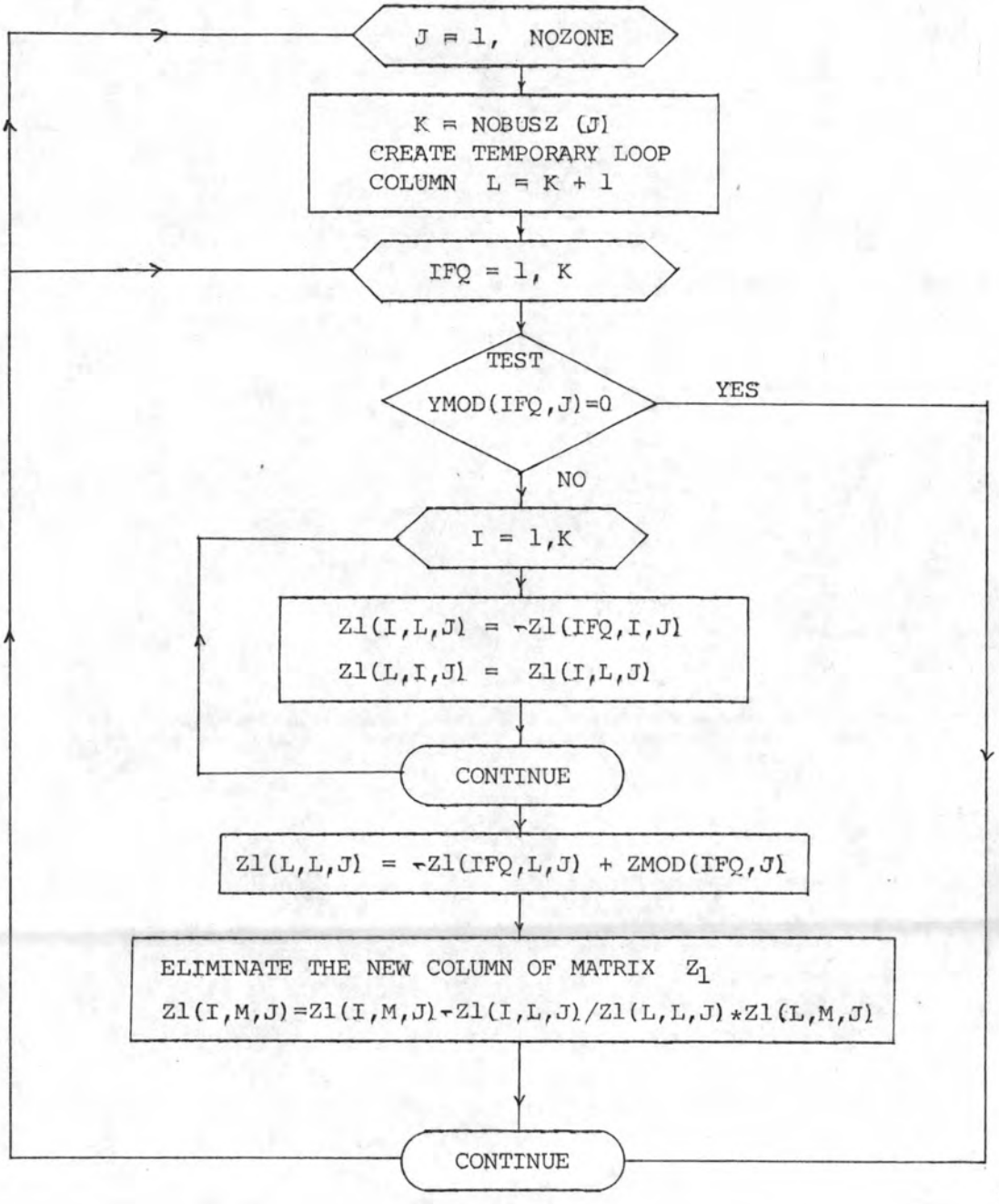


รูปที่ 4_5 โฟลว์ชาร์ตการจัดข้อมูลของโหลดชนิด นอน-อิมพีแดนซ์ (non-impedance)

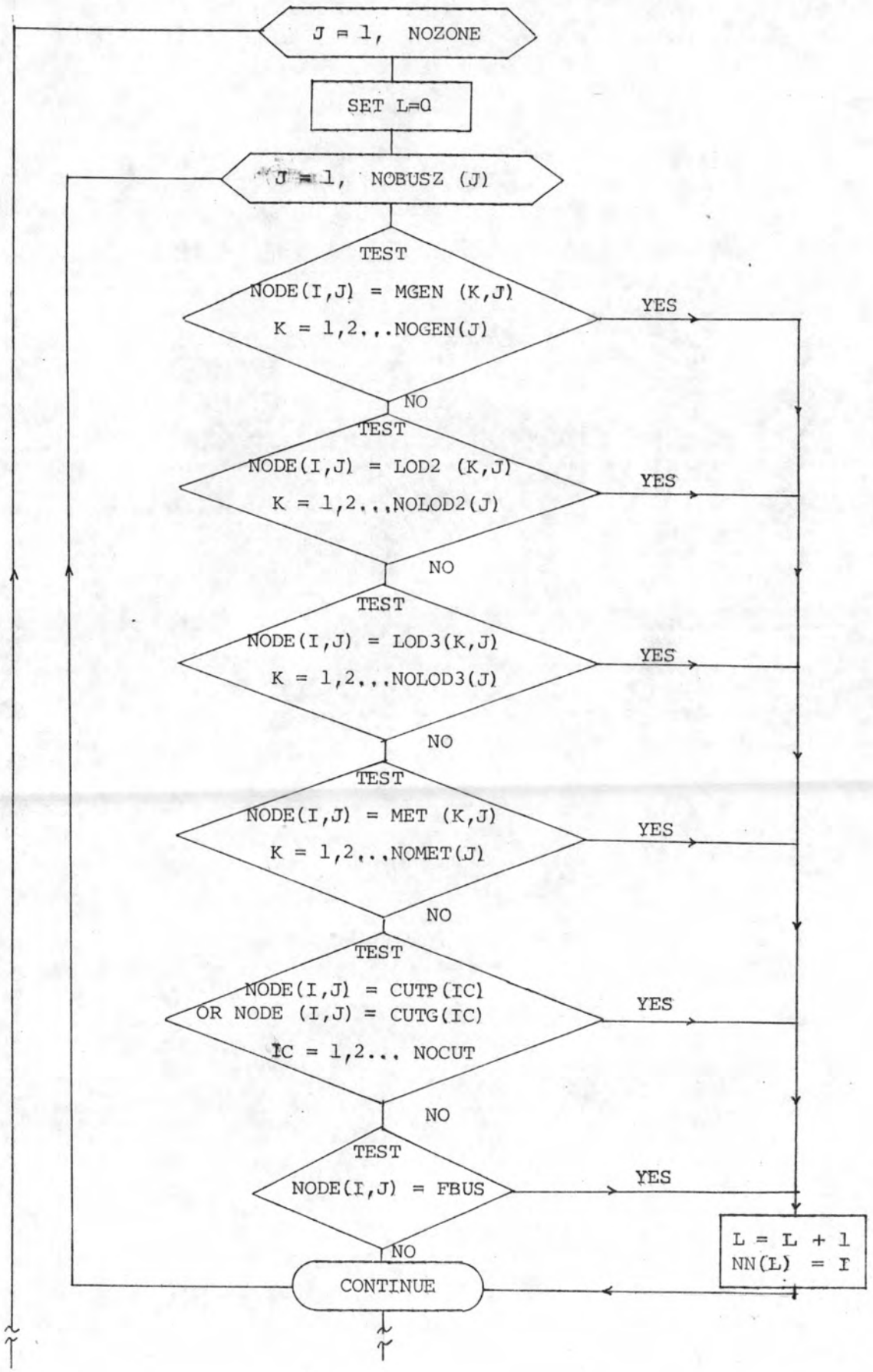

J = 1, NOZONE
I = 1,NOBUSZ(J)
SET YMOD(I,J)=0
TEST
LOADZ(I,J) = 0
?
YES
NO
SUM = LOADZ(I,J)
CALCULATE GROUND - TIE ADMITTANCE
YO(I,J)= LOADZ(I,J)* /(VOLTZ(I,J))2/BASMVA
AND SET YMOD(I,J) = -YO(I,J)
TEST
NOLOD2(J) = 0
?
YES
NO
K = 1, NOLOD2 (J)
TEST
NODE(I,J) = LOD2(K,J)
?
NO
YES
ZDD(K,J) = RODZ2(K,J)* / | ET(I,J)|2/ BASMVA
SUM = SUM - RODZ2(K,J)
CONTINUE

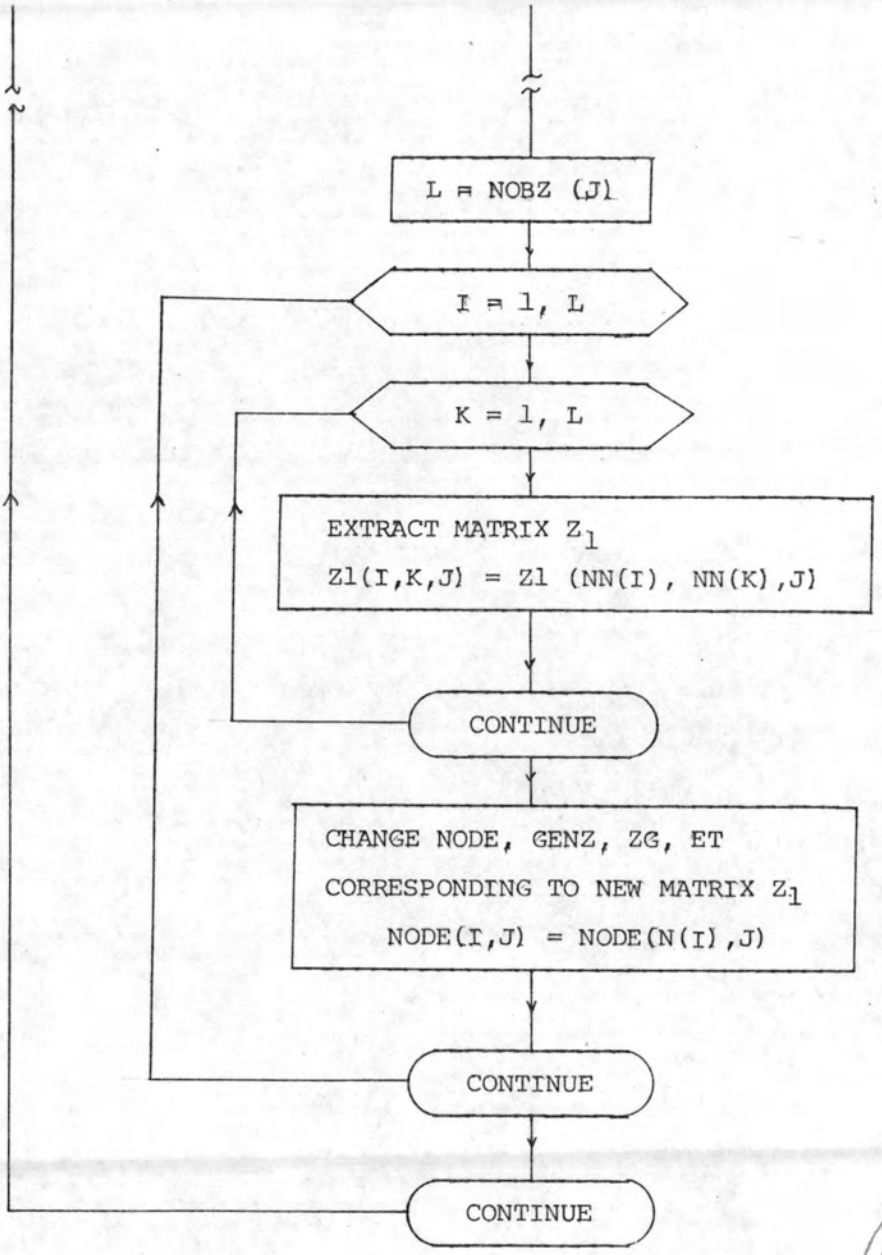


รูปที่ 4_6 โฟลว์ชาร์ตการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่ใช้ปรับเมตริกซ์ Z_1



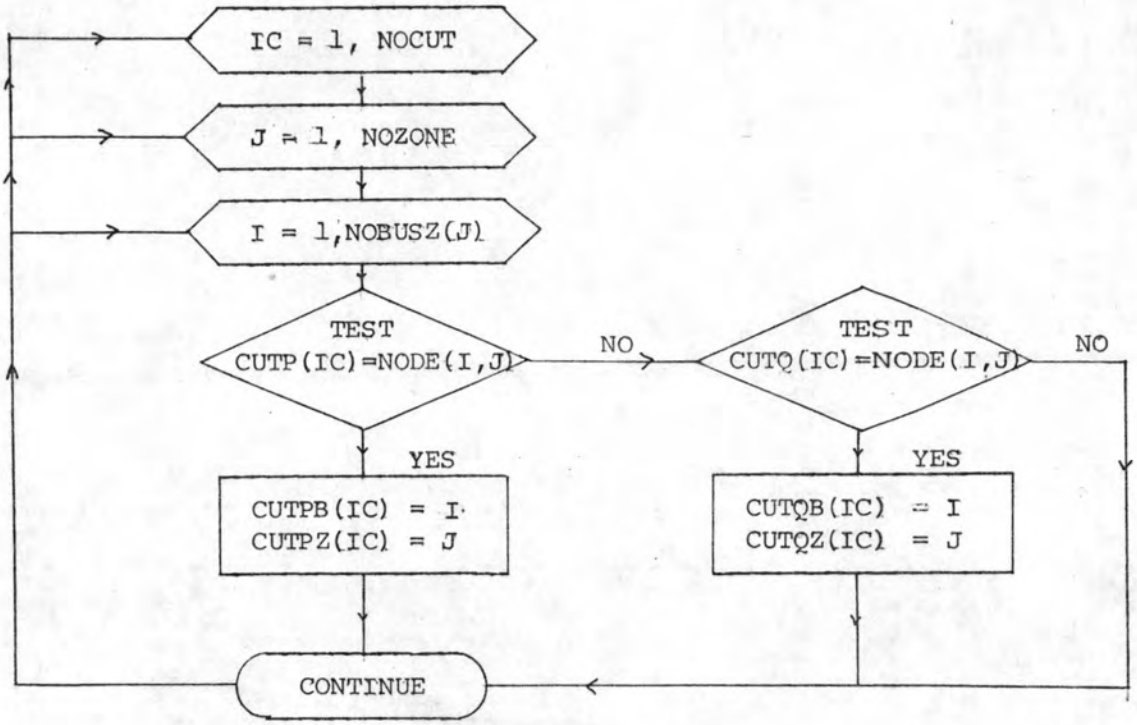
รูปที่ 4.7 โฟลว์ชาร์ตการปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1


J = 1, NOZONE
SET L=0
J = 1, NOBUSZ (J)
TEST
NODE(I,J) = MGEN (K,J)
K = 1,2,..NOGEN(J)
YES
NO
TEST
NODE(I,J) = LOD2 (K,J)
K = 1,2,,NOLOD2(J)
YES
NO
TEST
NODE(I,J) = LOD3(K,J)
K = 1,2,,NOLOD3(J)
YES
NO
TEST
NODE(I,J) = MET (K,J)
K = 1,2,,NOMET(J)
YES
NO
TEST
NODE(I,J) = CUTP(IC)
OR NODE (I,J) = CUTG(IC)
IC = 1,2... NOCUT
YES
NO
TEST
NODE(I,J) = FBUS
YES
NO
L = L + 1
NN(L) = I
CONTINUE

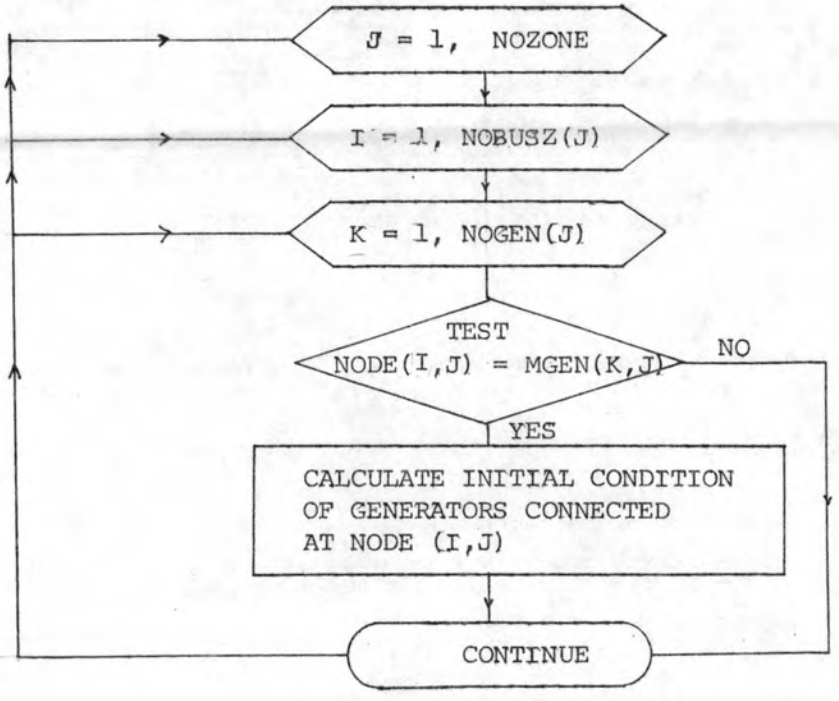


หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

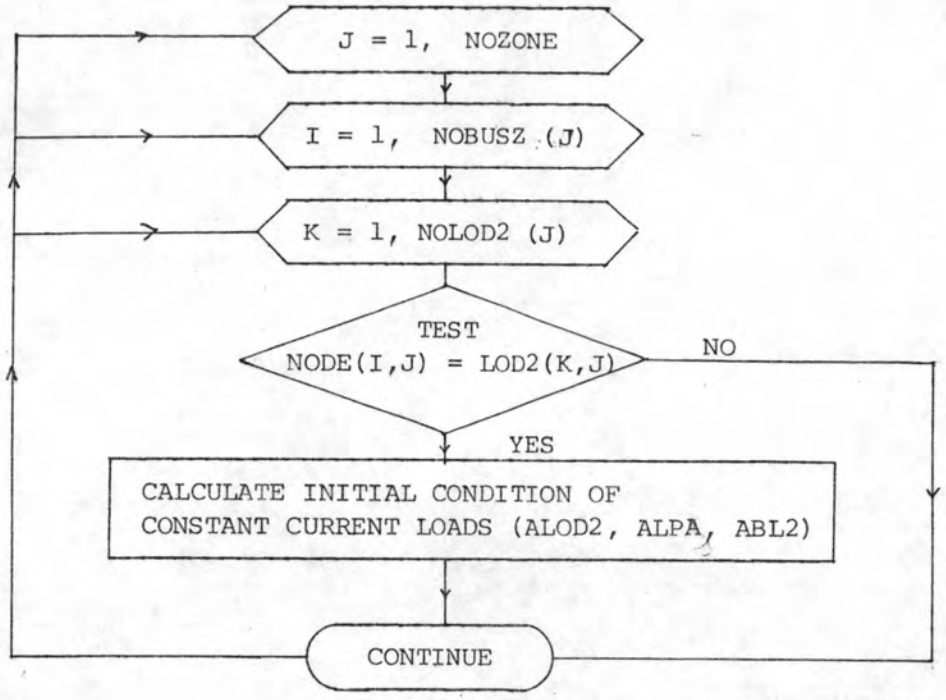
รูปที่ 4.8 โฟลว์ชาร์ตการจัดเรียงเมตริก Z_1



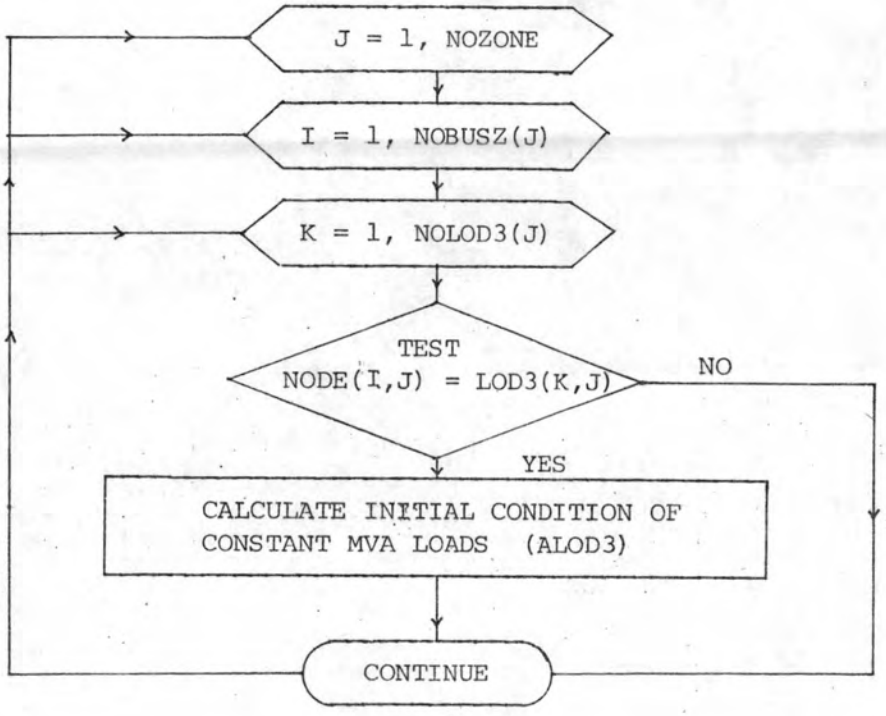
รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตการเปลี่ยนตำแหน่งของศักลายน์



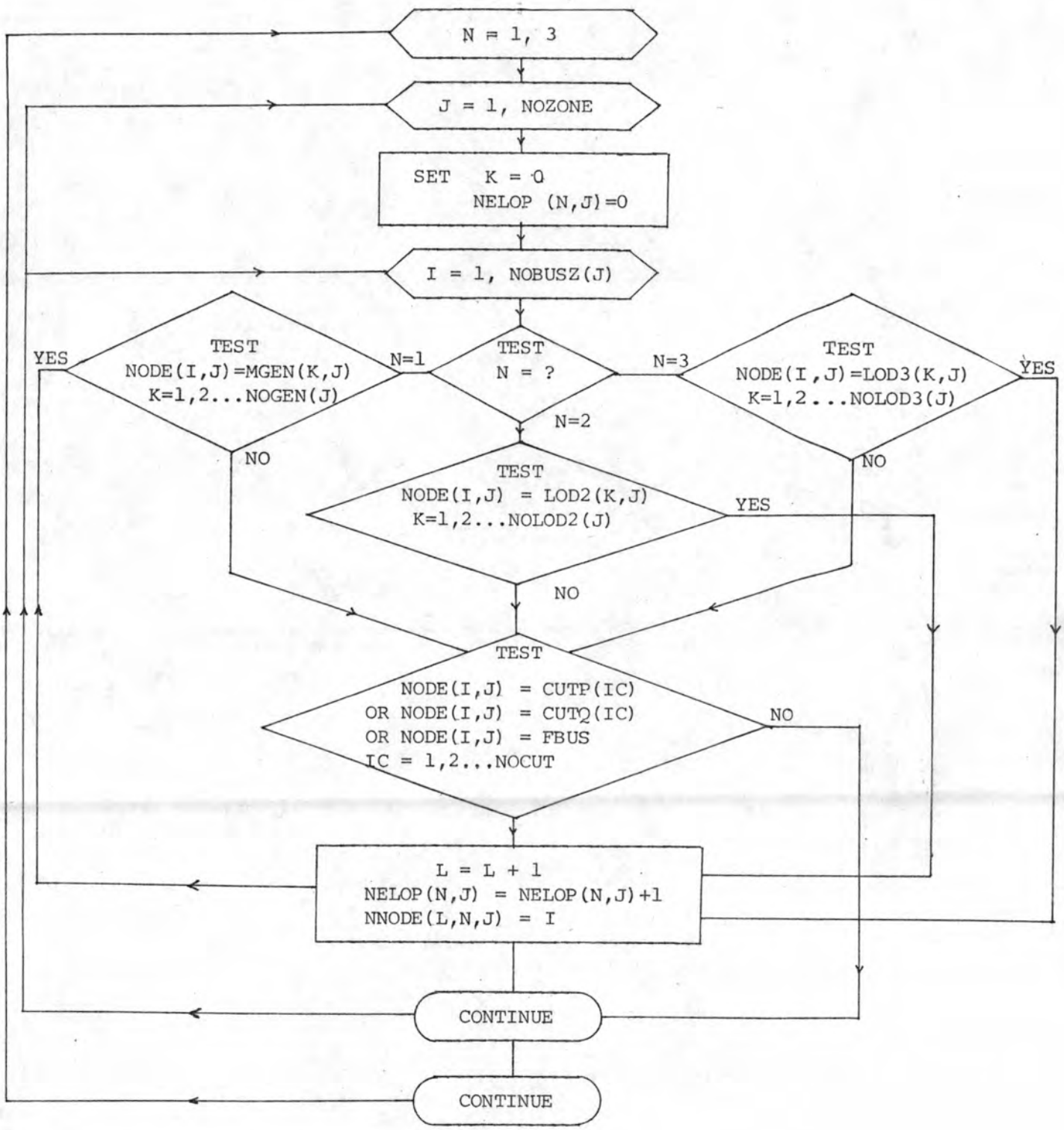
รูปที่ 4.10 โฟลว์ชาร์ตการคำนวณค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



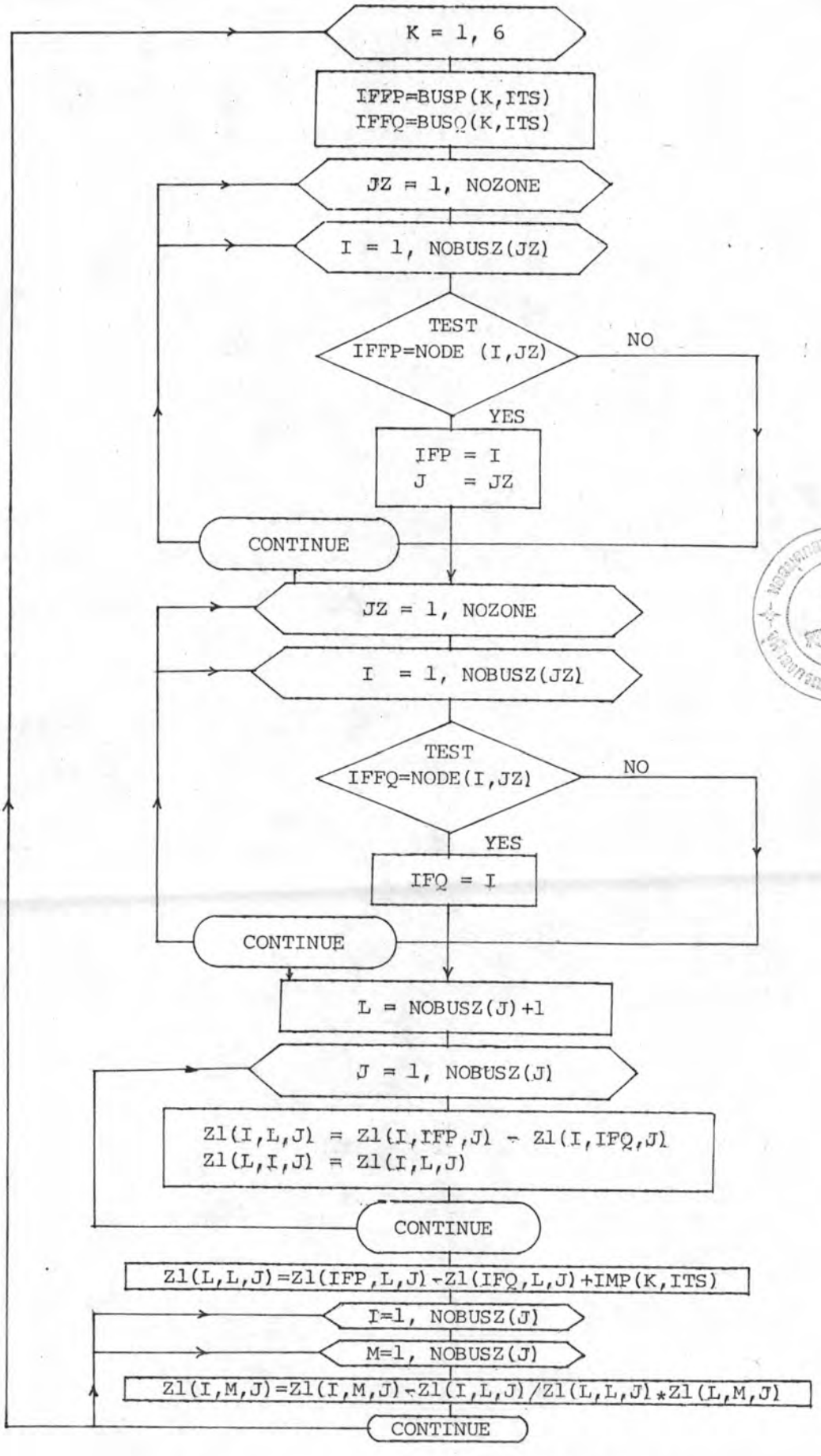
รูปที่ 4.11 โฟลว์ชาร์ตการคำนวณค่าเริ่มต้นของโหลดชนิดกระแสคงที่



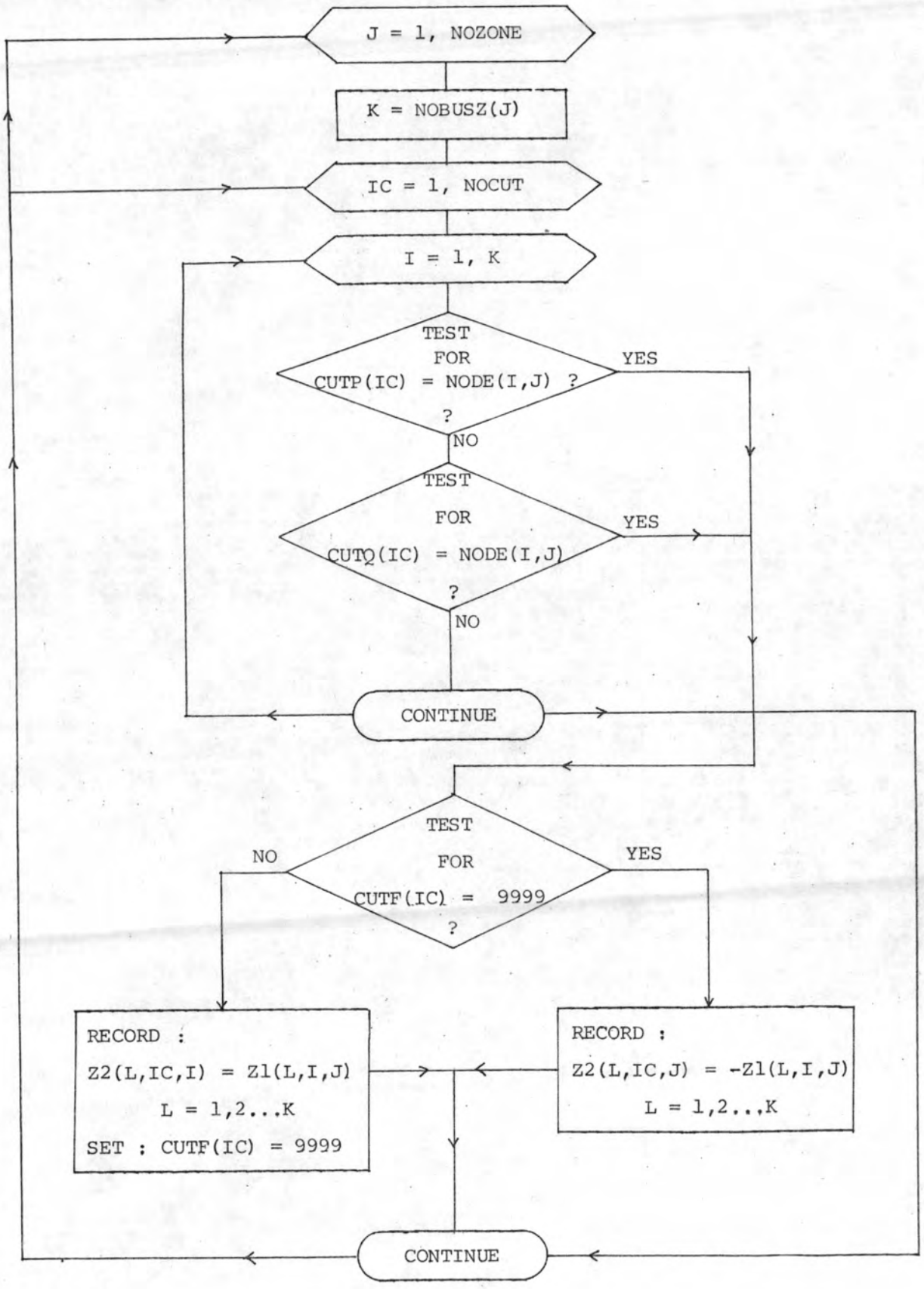
รูปที่ 4.12 โฟลว์ชาร์ตการคำนวณค่าเริ่มต้นของโหลดชนิดกำลังงานคงที่



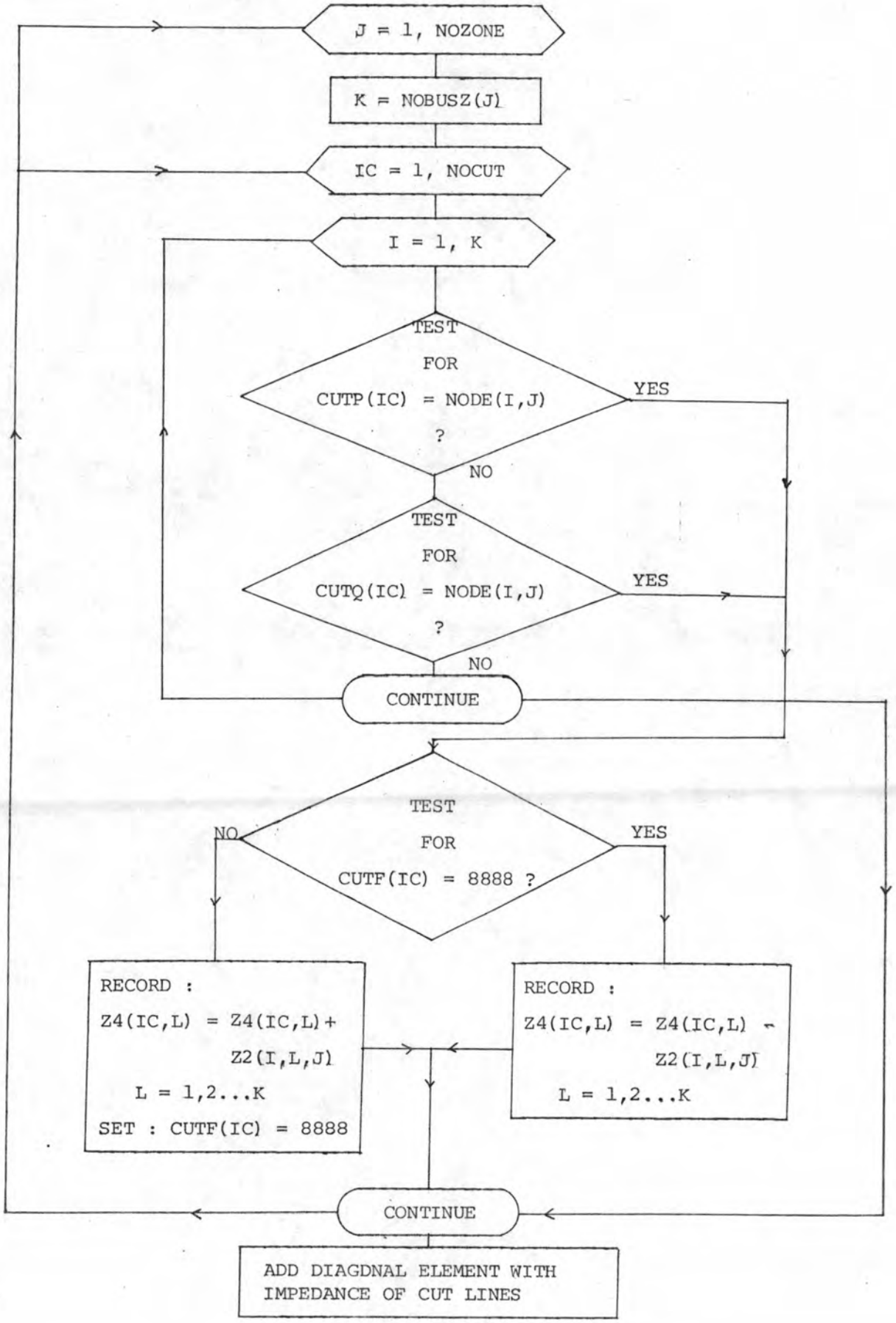
รูปที่ 4.13 โฟลว์ชาร์ตการบันทึกบัสที่ใช้ในแต่ละวงรอบ



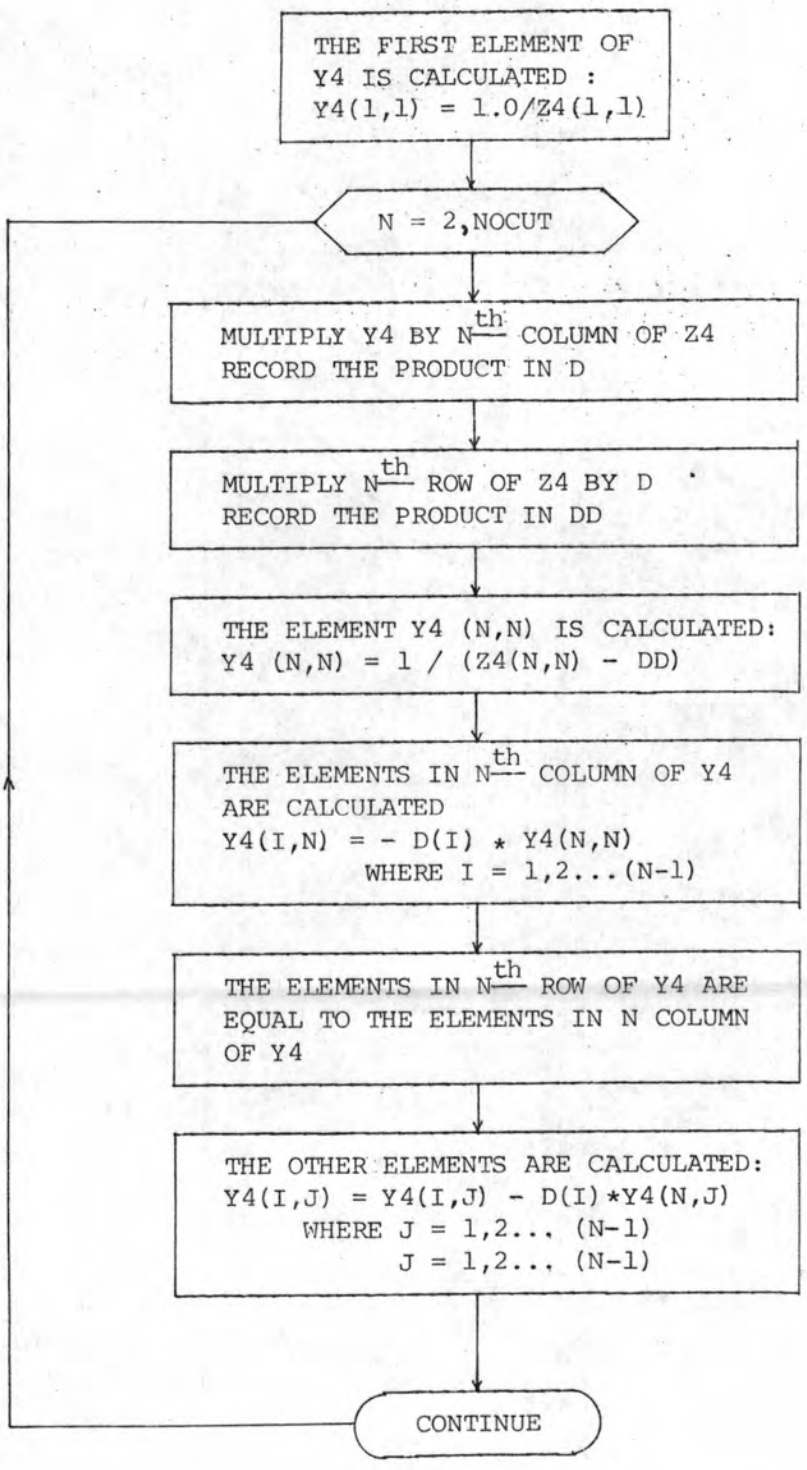
รูปที่ 4.14 โฟลว์ชาร์ตการปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 เนื่องจากผลการตัดต่อสายส่ง



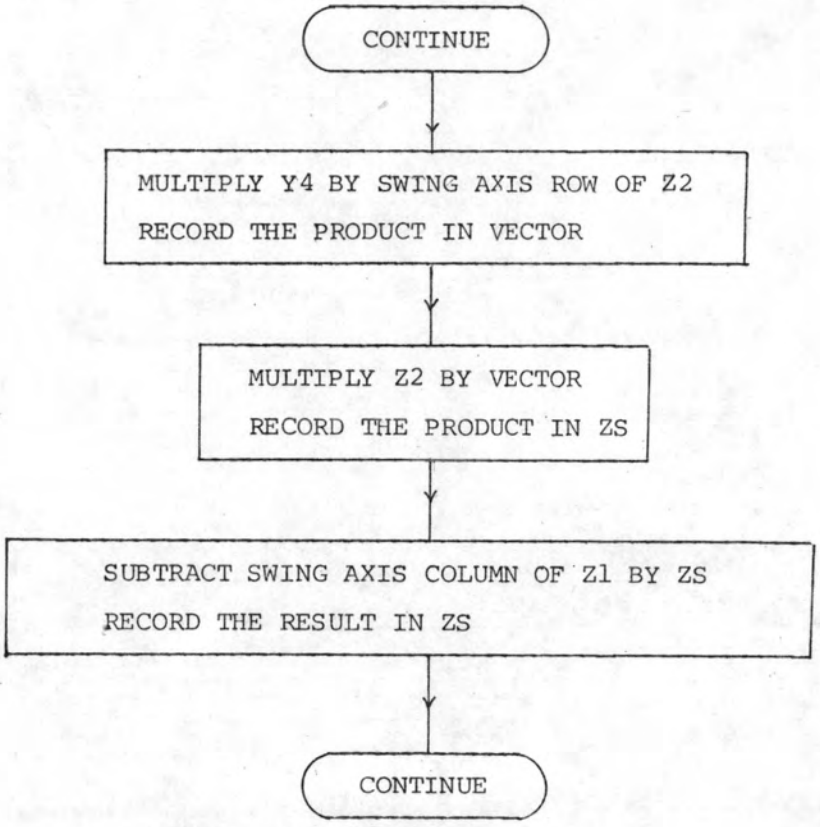
รูปที่ 4.15 โฟลว์ชาร์ตแสดงการสร้างเมตริกซ์ Z_2



รูปที่ 4.16 โฟลว์ชาร์ตแสดงการสร้างเมตริกซ์ Z_4

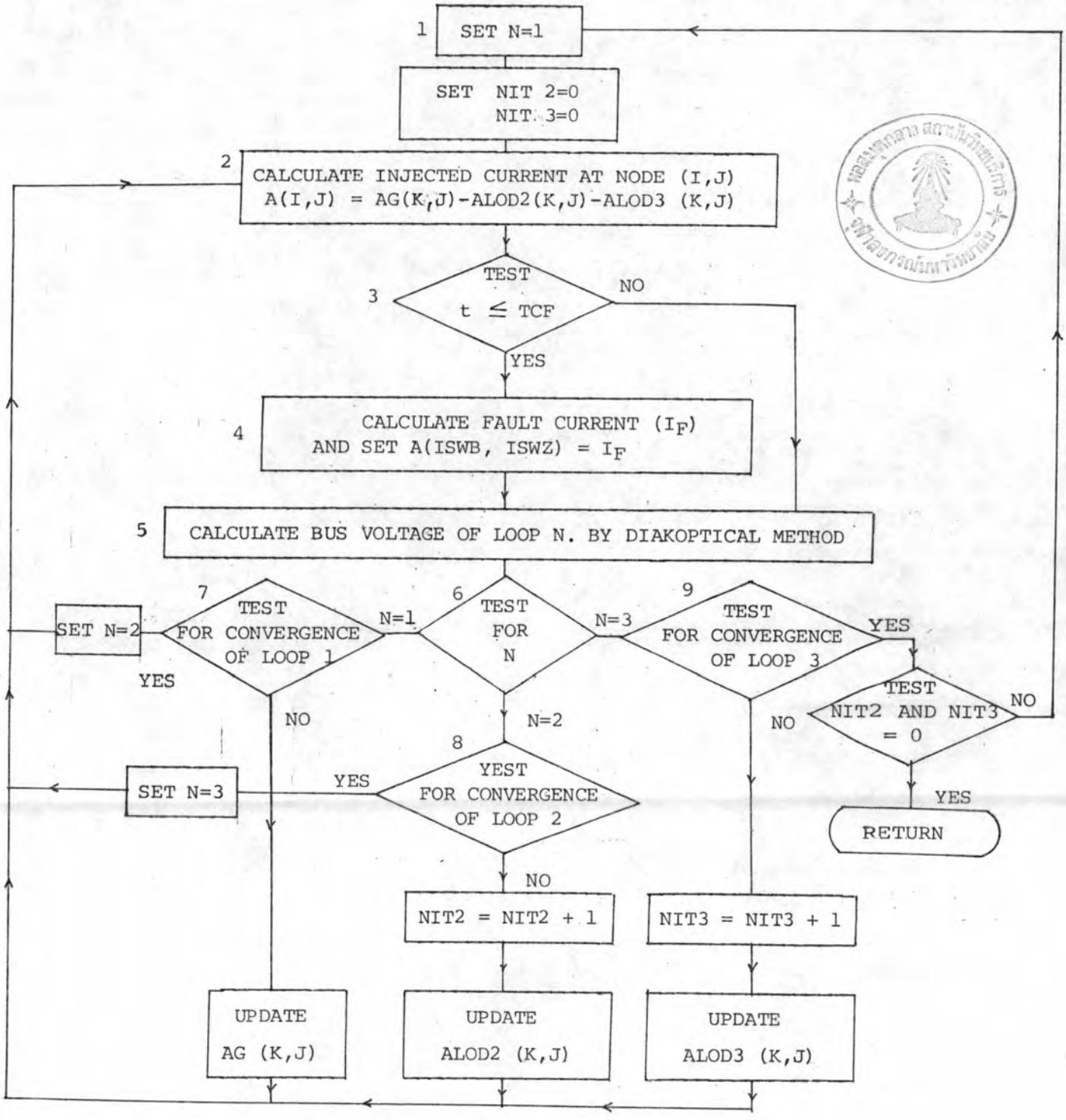


รูปที่ 4.17 โฟลว์ชาร์ตแสดงการหาค่าเมตริกซ์ Y_4

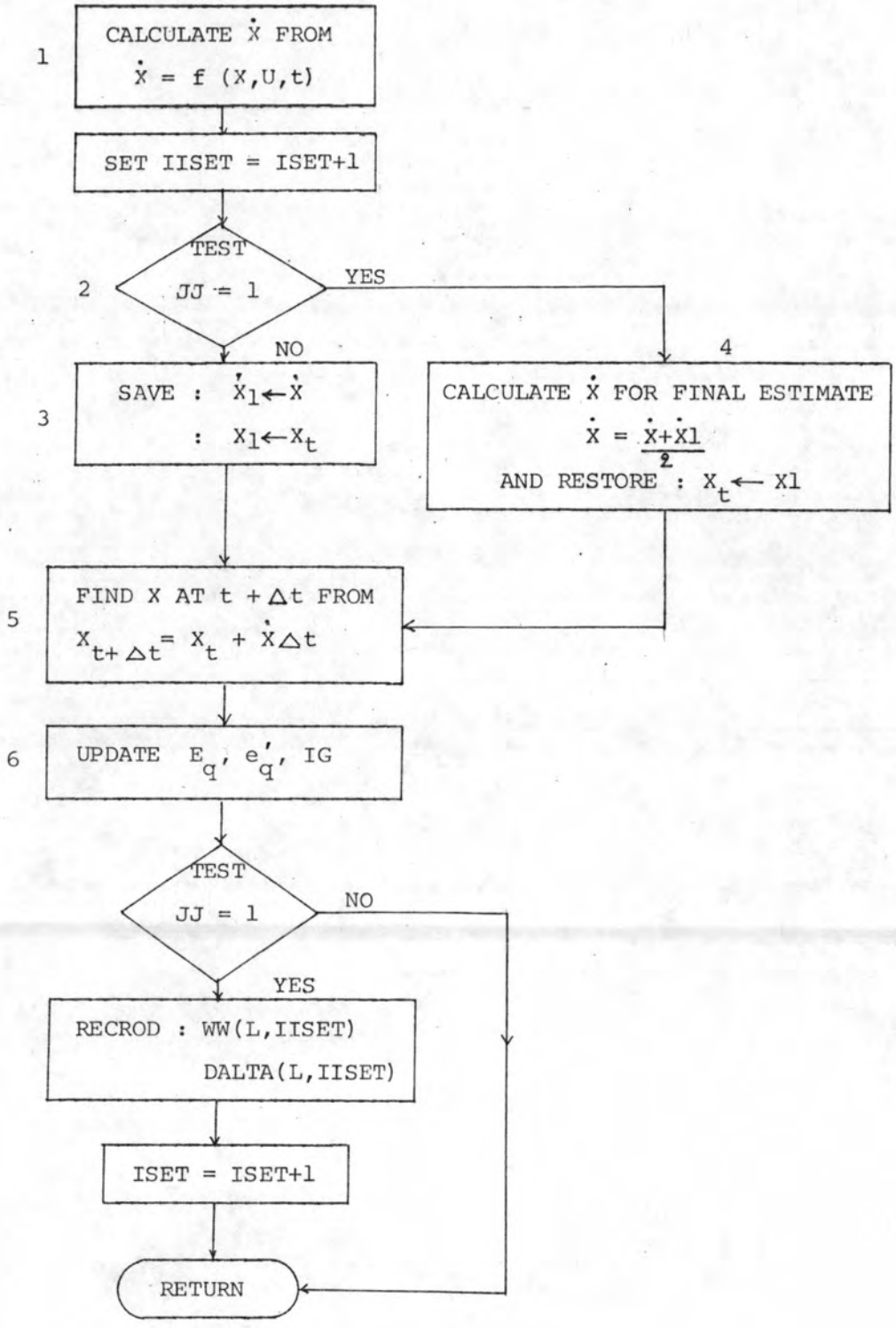


รูปที่ 4.18 โฟลว์ชาร์ตแสดงการหาเมตริกซ์ Z_S

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 โฟลว์ชาร์ตแสดงการคำนวณผลสัพธ์ของย่ายวงจร



รูปที่ 4.20 โฟลว์ชาร์ตแสดงการคำนวณผลลัพธ์ของสมการสภาวะ