บทที่ 5

การใช้โปรแกรมและตัวอย่างการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

บทนำ

ในบทนี้จะรายงานเกี่ยวกับการป้อนข้อมูล ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง และตัวอย่างการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การป้อนข้อมูล

โปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า และคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งได้เขียนเป็นภาษาฟอร์แทรน 77 (Fortran 77) สำหรับใช้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิท หน่วยความจำ 512 กิโลไบท์ (KBytes) รับคำสั่งทางเทอร์มินัล (Terminal) และแสดงผลโดยเก็บข้อมูลในไฟล์ สำหรับการแสดงผลแบบกราฟิคได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Lotus อ่านข้อมูลเพื่อนำไปพลอต (Plot) แสดงผลทางเทอร์มินัลหรือเครื่องพิมพ์โดยใช้ MS DOS Operating System

1. โปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง

ข้อมูลอินพุทแบ่งออกเป็น 4 ชุด สามารถป้อนข้อมูลทันที หรือป้อนข้อมูลในอินพุทไฟล์ก่อนก็ได้ ข้อมูลทั้งหมดเป็นแบบฟรีฟอร์แมท (Free Format)

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นชื่อเรื่อง (Title) ของการคำนวณ ความยาวไม่เกิน 80 คอลัมน์

ข้อมูลชุดที่ 2 ถามถึงระบบของข้อมูลที่ใช้เป็นระบบเมตริกหรืออังกฤษ ใส่คำว่า METRIC สำหรับระบบเมตริก และ ENGLIS สำหรับระบบอังกฤษ

ข้อมูลชุดที่ 3 ชุดข้อมูลของสายนำไฟฟ้า (Conductor) ประกอบด้วย 11 เขตของข้อมูล (Data Field) เรียงลำดับดังนี้

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วยของระบบ	
		เมตริก	อังกฤษ
IPHASE	เฟสนัมเบอร์ (Phase Number) เพื่อบอกว่าสายส่งชุดใดอยู่ในเฟสใด เช่น 1, 2 และ 3 แทนเฟส A, B และ C ตามลำดับ 0 แทนสายกราวน์ (Overhead Ground Wire)		
SKN	Skin Effect เป็นอัตราส่วนของความหนาต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของสายนำไฟฟ้า ถ้าเป็น Solid conductor ค่านี้จะเท่ากับ 0.5		
RES	ความต้านทานกระแสตรงต่อหน่วยของสายนำไฟฟ้า	โอห์ม/กม.	โอห์ม/ไมล์
ITYPE	เป็นค่าตัวเลขที่บ่งบอกเขตของข้อมูลถัดไป มีความหมายอย่างไร		
REA	ถ้า TYPE= 2 หมายถึงข้อมูลชุดนี้คือ GMR ถ้า TYPE = 4หมายถึงข้อมูลชุดนี้ไม่มีความหมาย	ซม.	นิ้ว
DIA	เส้นผ่าศูนย์กลางของสายนำไฟฟ้า	ซม.	นิ้ว
TBX	ระยะทางแนวนอนเทียบกับตำแหน่งกึ่งกลางเสา	เมตร	ฟุต
H1	ระยะทางแนวตั้งเทียบกับพื้นดินที่จุดกึ่งกลางระหว่างเสาไฟฟ้า	เมตร	ฟุต
D8	ระยะห่างระหว่างบันเดิล	ซม.	นิ้ว
D9	มุมระหว่างบันเดิลนั้น ๆ กับเส้นอ้างอิง	องศา	องศา
I3	จำนวนของบันเดิลในเฟสนั้น ๆ		

ตาราง 5.1 การใส่ข้อมูลของสายส่งชุดที่ 3

ชุดของข้อมูลทั้งหมดที่ใส่ต่อเนื่องกันจนครบชุดของสายนำไฟฟ้าทั้งหมด และสิ้นสุด โดยการใส่ 888 ในเขตของข้อมูลของเฟสนัมเบอร์

ข้อมูลชุดที่ 4 ชุดที่บ่งบอกความถี่, ความต้านทานของดิน, ระยะทางและการเลือกผลลัพธ์ที่ต้องการประกอบด้วย 17 เขตของข้อมูล เรียงลำดับดังนี้

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วยของข้อมูลในระบบ	
		เมตริก	อังกฤษ
REARTH	ความต้านทานของดิน	โอห์ม-เมตร	โอห์ม-ฟุต
FREQ	ความถี่	เฮิร์ท	เฮิร์ท
CORR	คำนึงถึงผลของพื้นดินด้วยหรือไม่ 1 คำนึงถึง Earth Effect ด้วย 0 ไม่คำนึงถึง Earth Effect		
J1	เลือกผลเอาท์พุท อินเวอร์ส่วน C หรือ ωC โดยใส่ค่า 1		
J2	เลือกผลเอาท์พุท อินเวอร์ส่วน C_E หรือ ωC_E โดยE หมายถึง Equivalent		
J3	เลือกผลเอาท์พุทอินเวอร์ส่วน C_S หรือ ωC_S โดย S หมายถึง Symmetrical		
J4	เลือกผลเอาท์พุท C หรือ ωC		
J5	เลือกผลเอาท์พุท C_E หรือ ωC_E		
J6	เลือกผลเอาท์พุท C_S หรือ ωC_S		
J7	เลือกผลเอาท์พุท Z		
J8	เลือกผลเอาท์พุท Z_E		
J9	เลือกผลเอาท์พุท Z_S		

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วยของข้อมูลในระบบ	
		เมตริก	อังกฤษ
J10	เลือกผลเอาท์พุท อินเวอร์ส ของ Z		
J11	เลือกผลเอาท์พุทอินเวอร์สของ Z_E		
J12	เลือกผลเอาท์พุทอินเวอร์สของ Z_S		
IW	เลือกโหมดผลลัพธ์ของ J1-J6 ใส่ 1 หมายถึง J1-J6 เป็น Capacitance ใส่ 0 หมายถึง J1-J6 เป็น Susceptance		
DIST	ระยะทาง	กม.	ไมล์

ตาราง 5.2 การใส่ข้อมูลของสายส่งชุดที่ 4

2. โปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

ข้อมูลอินพุทแบ่งออกเป็น 10 ชุด ป้อนข้อมูลเก็บในอินพุทไฟล์ก่อนและโปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูลอีกทีหนึ่ง ข้อมูลทั้งหมดเป็นแบบฟรีฟอร์แมทดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นชื่อเรื่อง (Title)ของการวิเคราะห์ จำนวน 3 บรรทัด

ข้อมูลชุดที่ 2 ชุดข้อมูลของการควบคุมการทำงานประกอบด้วย 7 เซตข้อมูล แสดงรายละเอียดในตาราง 5.3

ข้อมูลชุดที่ 3 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับ พารามิเตอร์แบบก้อน (Lumped Parameter)ประกอบด้วยข้อมูล 2 บรรทัด จากตาราง 5.4 เมื่อ ITYPE=0 และตาราง 5.5

ข้อมูลชุดที่ 4 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับสายส่งที่ใช้วงจรสมมูลย์ ประกอบด้วยข้อมูลเท่ากับจำนวนเฟส +1 บรรทัด บรรทัดแรกจากตาราง 5.4 เมื่อITYPE มีค่าเป็นบวกโดยมีค่า

เท่ากับ 1 สำหรับเฟสที่หนึ่งจนถึง 3 สำหรับเฟสที่สาม ข้อมูลบรรทัดถัดมาจากตาราง 5.6

ชุดของข้อมูลชุดที่ 5 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับสายส่งที่ใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย ประกอบด้วยข้อมูล 2 บรรทัด/เฟส บรรทัดแรกจากตาราง 5.4 เมื่อ ITYPE มีค่าเป็นลบโดยมีค่า -1 สำหรับเฟสที่หนึ่งจนถึง -3 สำหรับเฟสที่สาม ข้อมูลบรรทัดถัดมาจากตาราง 5.7

ชุดของข้อมูลชุดที่ 6 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับพารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Parameter) ประกอบด้วย 2 ชนิดคือแบบความต้านทานไม่เชิงเส้นและแบบอินดักแตนซ์ไม่เชิงเส้นโดย

ITYPE เท่ากับ 98 สำหรับอินดักแตนซ์ไม่เชิงเส้น

ITYPE เท่ากับ 99 สำหรับความต้านทานไม่เชิงเส้น

ประกอบด้วยข้อมูลจากตาราง 5.4 เมื่อ ITYPE =98 หรือ 99 และข้อมูลจากตาราง 5.8

ชุดของข้อมูลชุดที่ 7 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับสวิทช์ข้อมูล 1 บรรทัดต่อสวิทช์ 1 ตัว ข้อมูลอินพุทแสดงดังตาราง 5.9

ชุดของข้อมูลชุดที่ 8 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับแหล่งกำเนิดแรงดัน มีอยู่ 4 ชนิด แสดงดังตาราง 5.10

ชุดของข้อมูลชุดที่ 9 การเลือกบัสที่ต้องการแสดงผลของแรงดันในเอาท์พุทไฟล์ เป็นข้อมูล 1 บรรทัดให้เลือกได้สูงสุด 9 บัส

ชุดของข้อมูลชุดที่ 10 โดยใส่ 999999 เป็นข้อมูลที่แสดงว่าจบชุดข้อมูลอินพุท

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
DELTAT	ขนาดของช่วงเวลา (Time Step Size) Δt ของการอินทิเกรท การหาผลลัพธ์จะหาที่ทุกช่วงของ Δt จาก Δt, $2\Delta t$ .... etc	วินาที
TMAX	เวลาสิ้นสุดของการศึกษา	วินาที
XOPT	ชี้ว่าข้อมูลสำหรับ Branch Data อยู่ในรูปของอินดักแตนซ์หรือรีแอคแตนซ์ 0 : สำหรับอินดักแตนซ์ L f : บอกค่าความถี่ของรีแอคแตนซ์	
COPT	ชี้ว่าข้อมูลสำหรับ Branch Data อยู่ในรูปของ Capacitance หรือ Susceptance 0 : สำหรับ Capacitance f : บอกค่าความถี่ของ Susceptance	
IPR	ชี้ว่าต้องการพิมพ์ผลของตัวแปรในแต่ละสับรูทีนหรือไม่ 0 : ไม่ต้องการพิมพ์ 1 : ต้องการพิมพ์	
IPRNT	ความถี่ของการพิมพ์ผลลัพธ์ในเอาท์พุทไฟล์บอกเป็นตัวเลขจำนวนเท่าของ Δt	
IPLOT (n)	ความถี่ของพลอตข้อมูลในไฟล์พลอตบอกถึงพลอตทุก n step	

ตาราง 5.3 ข้อมูลควบคุมโปรแกรม

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
ITYPE	เป็นตัวเลขบอกถึงชนิดของ Branch Data	
BUS1	ชื่อบัสด้านหนึ่งของ Branch Data ความยาวไม่เกิน 6 ตัวอักษร	
BUS2	ชื่อบัสอีกด้านหนึ่งของ Branch Data ความยาวไม่เกิน 6 ตัวอักษร	
BUS3	ชื่อบัสใช้กรณีข้อมูลของ Branch ระหว่าง BUS1 และ BUS2 ซ้ำกับข้อมูลของ Branch เดิมที่ต่อระหว่าง BUS3 และ BUS4	
BUS4		
IOUT	บ่งบอกว่าต้องการกระแสไหลผ่าน Branch นี้หรือไม่ ถ้าต้องการใส่ 1	

ตาราง 5.4 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับ Branch Data

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
R	ข้อมูลของความต้านทานอนุกรม	โอห์ม
L	ข้อมูลของอินดักแตนซ์หรือรีแอคแตนซ์ขึ้นอยู่กับข้อมูลใน XOPT ถ้าเป็น	
	อินดักแตนซ์ L	มิลลิเฮนรี่
	รีแอคแตนซ์ ωL	โอห์ม
C	ข้อมูลของ Capacitance หรือ Susceptance ขึ้นอยู่กับข้อมูลใน COPT	
	Capacitance C	ไมโครฟารัด
	Susceptance ωC	ไมโครโมห์

ตาราง 5.5 ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับพารามิเตอร์แบบก้อน

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
TR	ความต้านทาน	โอห์ม
TX	รีแอคแตนซ์	โอห์ม
C	Suceptance	โมห์
	หมายเหตุ ใส่ข้อมูล 1 ชุด สำหรับกรณีมีเฟสเดียว ในกรณีเป็นระบบ 3 เฟสจะอ่านข้อมูล 6 ชุดในลักษณะของ Lower Triangle ดูตัวอย่างการป้อนข้อมูลประกอบ	

ตาราง 5.6 ชุดของข้อมูลอินพุทของวงจรสมมูลย์นิดพาย

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
H1	ความต้านทานต่อหน่วย	
AA	ถ้า ILINE = 0 เป็นอินดักแตนซ์ต่อหน่วย = 1 เป็นค่า Surge Impedance	
X3	ถ้า ILINE = 0 เป็นคาแปซีแตนซ์ต่อหน่วย = 1 เป็น Travel Time	
XLONG	ความยาวของสายส่ง	กิโลเมตร
ILINE	ตัวบอกชนิดของข้อมูลในเขตข้อมูล AA และ X3	

ตาราง 5.7 ชุดของข้อมูลอินพุทของสายส่งที่ใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
A1	ถ้า ITYPE = 98 และ 99 A1 หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับเขตของข้อมูล A2	แอมแปร์
A2	ถ้า ITYPE = 98 A2 หมายถึงฟลักซ์ (Flux) ถ้า ITYE = 99 A2 หมายถึงแรงดัน หมายเหตุ การป้อนข้อมูลA1 และA2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นเป็นจุด ๆ ใส่ข้อมูลจนครบจุดที่ต้องการ และสิ้นสุดด้วย 9999 ในเขตข้อมูล A1	เวเปอร์ โวลต์

ตาราง 5.8 ชุดของข้อมูลอินพุทของพารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้น

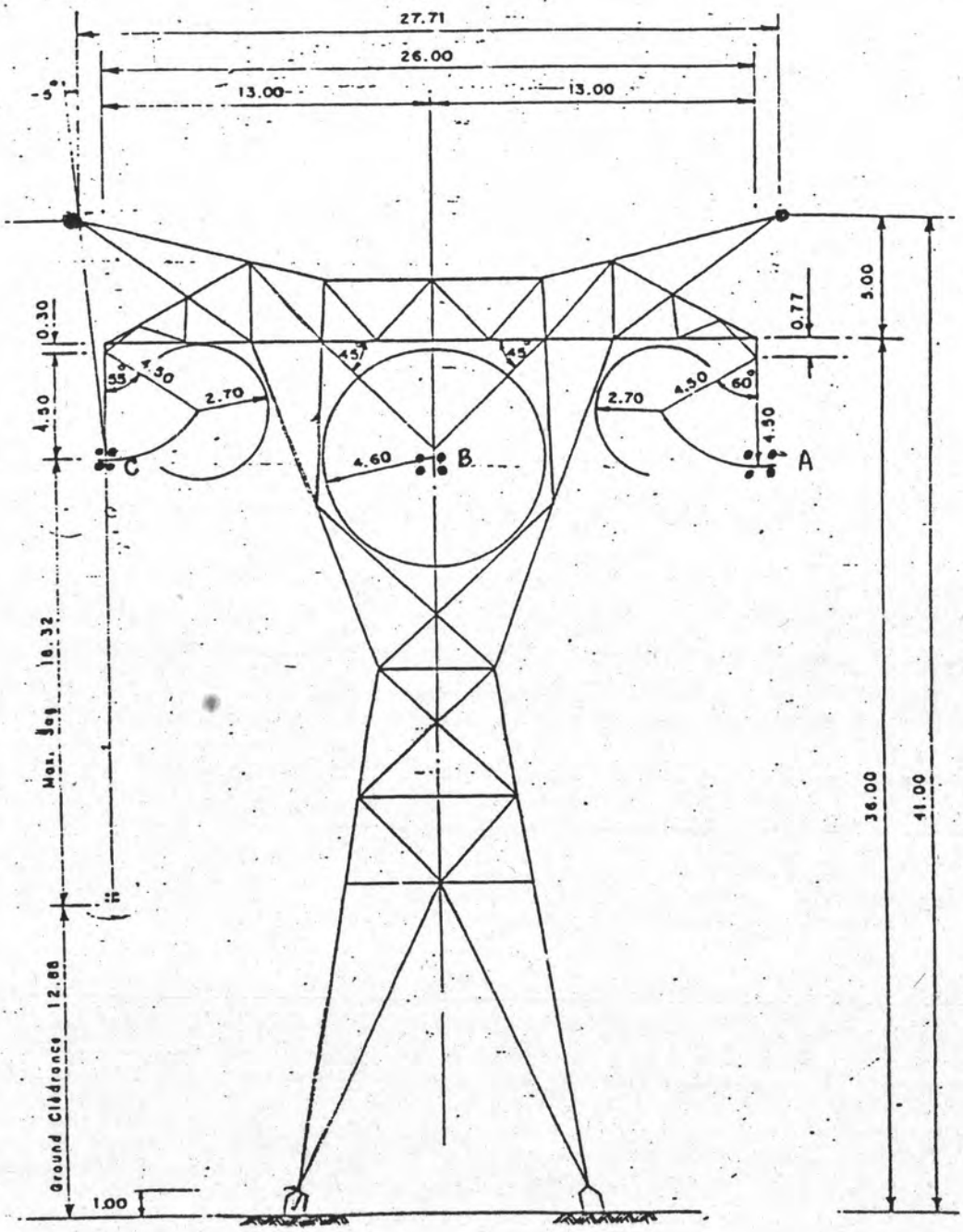
สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
IT22	เป็นตัวเลขเท่ากับ 20 บอกถึงข้อมูลของสวิทช์	
BUS1	ชื่อบัสที่ปลายด้านหนึ่งของสวิทช์	
BUS2	ชื่อบัสที่ปลายอีกด้านหนึ่งของสวิทช์	
GUS3	เวลาที่สวิทช์อยู่ในตำแหน่งสับ (Close)	วินาที
GUS4	เวลาที่สวิทช์อยู่ในตำแหน่งปลด (Open)	วินาที

ตาราง 5.9 ชุดของข้อมูลอินพุทของสวิทช์

สัญญลักษณ์ที่ใช้	คำอธิบาย	หน่วย
N2	ชนิดของแหล่งกำเนิดแรงดัน ถ้าเท่ากับ 11 หมายถึง Step function 12 หมายถึง Ramp function 13 หมายถึง Standard function 14 หมายถึง AC Voltage Source	
BUS1	ชื่อบัสขั้วของแหล่งกำเนิดแรงดัน อีกปลายด้านหนึ่งเป็นกราวน์	
A	ขนาดสูงสุดของแรงดัน (Amplitude) สำหรับ N2 = 14,13และเท่าขนาดของแรงดันที่สัมพันธ์กับเวลา To สำหรับ N_2= 11 และ 12	โวลต์
D1	ความถี่ของแหล่งกำเนิดแรงดันชนิด 14 และเท่ากับค่าคงที่ α สำหรับชนิด 13	Hz
GUS2	หมายถึงเวลา To ที่สัมพันธ์กับขนาด Aสำหรับ N2=11 และ 12 และเท่ากับค่าคงที่ β สำหรับชนิด 13	วินาที
H1	ขนาดของแรงดันที่สัมพันธ์กับเวลาของเขตข้อมูล H2	โวลต์
H2	เวลาที่สัมพันธ์กับเขตข้อมูล H1	วินาที
GUS3	เวลาเริ่มต้น	วินาที
GUS4	เวลาสิ้นสุด	วินาที

ตาราง 5.10 ชุดของข้อมูลอินพุทของแหล่งกำเนิดแรงดัน

STRUCTURE & CONFIGURATION FOR TRANSMISSION LINES
500 KV SINGLE CIRCUIT TOWER



STRUCTURE No. 901 500 KV SC/ST, 4 CONDUCTORS/PHASE
MAE MOH 3 – THA TAKO – MIN BURI

รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างลักษณะของเสาไฟฟ้า 500 kV

All dimensions are in meter

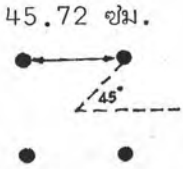
ตัวอย่างการวิเคราะห์

1. ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง

ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งขนาดแรงดัน 500 kV จากสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก แสดงรูปร่างและลักษณะของเสาไฟฟ้าดังรูป 5.1

ข้อมูลของสายไฟฟ้าประกอบด้วย

1. สายส่งไฟฟ้าเบอร์ 795 MCM ACSR มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2.682 ซม. ความต้านทานกระแสตรง .0719 โอห์ม/กิโลเมตร ประกอบด้วยสายนำไฟฟ้า 4 เส้น/เฟส โดยวางตำแหน่งดังรูป 5.2 และระยะห่างของแต่ละเส้นในเฟสเดียวกันเท่ากับ 45.72 ซม.



รูป 5.2 แสดงการวางตำแหน่งสายไฟฟ้าในเฟสเดียวกัน

2. สายกราวน์ (Overhead Ground Wine) เป็นสาย Class A $\frac{3}{8}$"EHS มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.9144 ซม. ความต้านทานกระแสตรง 3.867 โอห์ม/กิโลเมตร มีจำนวน 2 เส้น

ข้อมูลของเสาไฟฟ้าจากรูป 5.1 สำหรับความสูงของสายไฟฟ้าจากพื้นดินเท่ากับ 31.2 เมตร ความสูงที่จุดกึ่งกลางระหว่างเสาไฟฟ้าเนื่องจากผลของ Sag เท่ากับ 12.88 เมตร ส่วนระยะตามแนวนอนโดยวัดเทียบกับจุดกึ่งกลางของเสาไฟฟ้าไปทางขวาเป็นค่าบวก ทางซ้ายเป็นค่าลบโดย

เฟส A ระยะทางตามแนวนอนเท่ากับ 13 เมตร

เฟส B ระยะทางตามแนวนอนเท่ากับ 0 เมตร

เฟส C ระยะทางตามแนวนอนเท่ากับ -13 เมตร

หลังจากนั้นนำข้อมูลให้ไปป้อนแก่โปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ซึ่งสามารถป้อนข้อมูลทั้งทางเทอร์มินัลตามตาราง 5.11 และ 5.12 และป้อนข้อมูลผ่านอินพุทไฟล์ตามตาราง 5.13 แสดงผลลัพธ์เอาท์พุทในตาราง 5.14 ถึง 5.20

```
YOU WANT TO INPUT INTERACTIVE MODE (Y/N)
Y
-
NAME OF OUTPUT FILE
T500.OUT
--------
INPUT TITLE CASE #1 CALCULATE 500 KV LINE
           ---------------------------
INPUT SYSTEM UNIT METRIC
                ------
IF YOU WANT <HELP FOR INPUT CONDUCTOR DATA> INPUT 1
1
-
 CONDUCTOR DATA CONSISTS OF 10 FIELDS:-
<PH. NO.>     : PHASE NUMBER 1,2,3.....
<SKIN EFF.>   : SKIN EFFECT = RATIO OUTER/INNER RADIUS
              : 0 FOR BYPASS THIS FIELD
<RESIST>      : DC RESISTANCE (OHM/KM OR OHM/MILE)
<TYPE>        : SELECT NEXT FIELD INPUT (2 OR 4)
<GMR>         : TYPE =2 MEAN GMR OF CONDUCTOR (CM/INCH)
              :      =4 MEAN BYPASS THIS FIELD
<DIA>         : CONDUCTOR DIAMETER (CM OR INCH)
<H-DIST>      : HORIZONTAL DISTANCE (METER OR FEET)
<V-HGHT>      : VERTICAL HEIGHT (METER OR FEET)
<MV-HGHT>     : MIDSPAN VERTICAL HEIGHT (METER OR FEET)
<S-BDLE>      : SEPARATION BETWEEN BUNDLE (CM OR INCH)
<A-BDLE>      : ANGLE BETWEEN BUNDLE (CM OR INCH)
<N-BDLE>      : NUMBER OF BUNDLE
888 FOR PHASE NUMBER MEAN END CONDUCTOR DATA

 <PH. NO.> <SKIN EFF.> <RESIST> <TYPE> <GMR> <DIA>   1,0.3914,0.07190,4,0,2.682
                                                     -------------------------

 <H-DIST> <V-HGT> <MV-HGT> <S-BDLE> <A-BDLE> <N-BDLE> 13.0,31.2,12.88,45.72,45.0,4
                                                      ------------------------

 <PH. NO.> <SKIN EFF.> <RESIST> <TYPE> <GMR> <DIA>   888,0,0,0,0,0
                                                     ------------

 <H-DIST> <V-HGT> <MV-HGT> <S-BDLE> <A-BDLE> <N-BDLE> 0,0,0,0,0,0
                                                      ------------
```

ตารางที่ 5.11 การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งทางเทอร์มินัล

```
IF YOU WANT <HELP FOR FREQ-OUPUT DATA> INPUT 1
1
-
 FREQUENCY & OUTPUT DATA :-
<REARTH>      : EARTH RESISTIVITY (OHM)
<FREQ>        : FREQUENCY (HZ)
<CORR>        : EARTH CORRECTION 1 IF YOU WANT
<J1>          : INVERSE FORM OF C OR WC
<J2>          : INVERSE FORM OF C OR WCequivalent
<J3>          : INVERSE FORM OF C OR WCsymmetrical
<J4>          : C OR WC
<J5>          : C OR WCequivalent
<J6>          : C OR WCsymmetrical
<J7>          : SERIES IMPEDANCE Z
<J8>          : SERIES IMPEDANCE Zequivalent
<J9>          : SERIES IMPEDANCE Zsymmetrical
<J10>         : INVERSE FORM OF Z
<J11>         : INVERSE FORM OF Zequivalent
<J12>         : INVERSE FORM OF Zsymmetrical
<IW>          : SELECT MODE FOR J1-J6
              : "1"    -  C OUTPUT
              : "0"    -  WC OUTPUT
<DIST>        : DISTANCE (KM OR MILE)
J1-J12 INPUT 1 FOR SELECTION

INPUT FREQUENCY & OUTPUT
<REARTH> <FREQ> <CORR> <J1> <J2> <J3> <J4> <J5> <J6>
100.0,50.0,1,1,1,1,1,1,1
-----------------------
<J7> <J8> <J9> <J10> <J11> <J12> <IW> <DIST>
1,1,1,1,1,1,1,335.00
--------------------
```

ตารางที่ 5.12 การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งทางเทอร์มินัล

```
CASE #1 CALCULATE 500 KV LINE
METRIC
1,0.3914,0.07190,4,0,2.682,13.0,31.2,12.88,45.72,45.0,4
2,0.3914,0.07190,4,0,2.682,0.0,31.2,12.88,45.72,45.0,4
3,0.3914,0.07190,4,0,2.682,-13.00,31.2,12.88,45.72,45.0,4
0,0.5,3.86700,4,0,0.9144,13.85,41.00,22.68,0,0,0
0,0.5,3.86700,4,0,0.9144,-13.85,41.00,22.68,0,0,0
888,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
100.0,50.0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,335.00,0,0
```

ตาราง 5.13 การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งผ่านทางไฟล์อินพุท

```
*******************************
*                             *
*  LINE CONSTANT CALCULATION  *
*                             *
*******************************
```

< TITLE: > CASE #1 CALCULATE 500 KV LINE

NO.	PHASE	SKIN	RESIST	TYPE	GMD	DIAMETER	HORIZONTAL	VERTICAL
1	1	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	13.229	18.758
2	2	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	.229	18.758
3	3	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	-12.771	18.758
4	1	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	12.771	19.215
5	1	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	13.229	19.215
6	1	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	-.229	18.758
7	2	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	-.229	19.215
8	2	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	.229	19.215
9	2	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	-13.229	18.758
10	3	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	-13.229	19.215
11	3	.39140	.07190	4	.000000	2.68200	-12.771	19.215
12	3	.39140	.07190	4	.000000	.91440	13.850	28.787
13	0	.50000	3.86700	4	.000000	.91440	-13.850	28.787
14	0	.50000	3.86700	4				

ตาราง 5.14 แสดงผลลัพธ์ของการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง

INVERTED CAPACITANCE MATRIX (DARAF KM)
FOR SYSTEM OF PHYSICAL CONDUCTORS

1	.14266E+09								
2	.20070E+08	.14266E+09							
3	.10116E+08	.20070E+08	.14266E+09						
4	.79225E+08	.20646E+08	.10333E+08	.14266E+09					
5	.73213E+08	.20830E+08	.10479E+08	.79441E+08	.14309E+09				
6	.79441E+08	.20253E+08	.10261E+08	.73213E+08	.79658E+08	.14309E+09			
7	.19517E+08	.79225E+08	.20646E+08	.20070E+08	.20253E+08	.19700E+08	.14266E+09		
8	.19700E+08	.73213E+08	.20830E+08	.20253E+08	.20457E+08	.19901E+08	.79441E+08	.14309E+09	
9	.20253E+08	.79441E+08	.20253E+08	.20830E+08	.21037E+08	.20457E+08	.73213E+08	.79658E+08	.14309E+09
10	.99058E+07	.19517E+08	.79225E+08	.10116E+08	.10261E+08	.10049E+08	.20070E+08	.20253E+08	.19700E+08
	.14266E+09								
11	.10049E+08	.19700E+08	.73213E+08	.10261E+08	.10411E+08	.10197E+08	.20253E+08	.20457E+08	.19901E+08
	.79441E+08	.14309E+09							
12	.10261E+08	.20253E+08	.79441E+08	.10479E+08	.10631E+08	.10411E+08	.20830E+08	.21037E+08	.20457E+08
	.73213E+08	.79658E+08	.14309E+09						
13	.27940E+08	.19286E+08	.11683E+08	.27875E+08	.28875E+08	.28948E+08	.18943E+08	.19375E+08	.19731E+08
	.11488E+08	.11716E+08	.11914E+08	.16970E+09					
14	.11488E+08	.18943E+08	.27875E+08	.11683E+08	.11914E+08	.11716E+08	.19286E+08	.19731E+08	.19375E+08
	.27940E+08	.28948E+08	.28875E+08	.15022E+08	.16970E+09				

ตาราง 5.15

CAPACITANCE MATRIX (FARAD/KM)
FOR SYSTEM OF PHYSICAL CONDUCTORS

1	.12277E-07									
2	-.12258E-09	.12294E-07								
3	-.31853E-10	-.12146E-09	.12285E-07							
4	-.36372E-08	-.14745E-09	-.36044E-10	.12285E-07						
5	-.20761E-08	-.14755E-09	-.37577E-10	-.36343E-08	.12283E-07					
6	-.36429E-08	-.12281E-09	-.33351E-10	-.20761E-08	-.36395E-08	.12274E-07				
7	-.10194E-09	-.36249E-08	-.14745E-09	-.12146E-09	-.12180E-09	-.10238E-09	.12294E-07			
8	-.10334E-09	-.20662E-08	-.14856E-09	-.12277E-09	-.12667E-09	-.10700E-09	-.36282E-08	.12286E-07		
9	-.12382E-09	-.36282E-08	-.12277E-09	-.14856E-09	-.15262E-09	-.12760E-09	-.20661E-08	-.36327E-08	.12286E-07	
10	-.28322E-10	-.10194E-09	-.36372E-08	-.31853E-10	-.33366E-10	-.29799E-10	-.12258E-09	-.12382E-09	-.10334E-09	
	.12277E-07									
11	-.29799E-10	-.10238E-09	-.20761E-08	-.33351E-10	-.35411E-10	-.31790E-10	-.12281E-09	-.12760E-09	-.10700E-09	
	-.36429E-08	.12274E-07								
12	-.33365E-10	-.12180E-09	-.36343E-08	-.37577E-10	-.39695E-10	-.35411E-10	-.14755E-09	-.15262E-09	-.12667E-09	
	-.20761E-08	-.36395E-08	.12283E-07							
13	-.38228E-09	-.19782E-09	-.83734E-10	-.36795E-09	-.44943E-09	-.46455E-09	-.17615E-09	-.20518E-09	-.22833E-09	
	-.77518E-10	-.87007E-10	-.93633E-10	.63136E-08						
14	-.77518E-10	-.17615E-09	-.36795E-09	-.83734E-10	-.93633E-10	-.87007E-10	-.19782E-09	-.22833E-09	-.20518E-09	
	-.38228E-09	-.46455E-09	-.44943E-09	-.29475E-09	.63136E-08					

ตาราง 5.16

INVERTED CAPACITANCE MATRIX (DARAF KM)
FOR SYSTEM OF EQUIVALENT PHASE CONDUCTORS

1	.88481E+08		
2	.16064E+08	.87687E+08	
3	.68156E+07	.16064E+08	.88481E+08

INVERTED CAPACITANCE MATRIX (DARAF KM)
FOR SYMMETRICAL COMPONENT OF EQUIVALENT PH.CON

0	.11485E+09		
	.00000E+00		
1	-.17424E+07	.28820E+07	
	.30180E+07	.49917E+07	
2	-.17424E+07	.75901E+08	.28820E+07
	-.30180E+07	.57596E-09	-.49917E+07

CAPACITANCE MATRIX (FARAD/KM)
FOR SYSTEM OF EQUIVALENT PHASE CONDUCTORS

1	.11707E-07		
2	-.20004E-08	.11867E-07	
3	-.53856E-09	-.20004E-08	.11707E-07

CAPACITANCE MATRIX (FARAD/KM)
FOR SYMMETRICAL COMPONENT OF EQUIVALENT PH.CON

0	.87337E-08		
	.00000E+00		
1	.21697E-09	-.51393E-09	
	-.37580E-09	-.89016E-09	
2	.21697E-09	.13273E-07	-.51393E-09
	.37580E-09	-.37395E-25	.89016E-09

ตาราง 5.17

IMPEDANCE MATRIX (OHM-KM)
FOR SYSTEM OF PHYSICAL CONDUCTORS

1	.12214E+00								
	.71481E+00								
2	.49348E-01	.12214E+00							
	.26843E+00	.71481E+00							
3	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00						
	.22488E+00	.26843E+00	.71481E+00						
4	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00					
	.47876E+00	.27068E+00	.22599E+00	.71481E+00					
5	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00				
	.45699E+00	.27064E+00	.22598E+00	.47876E+00	.71481E+00				
6	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00			
	.47876E+00	.26839E+00	.22487E+00	.45699E+00	.47876E+00	.71481E+00			
7	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00		
	.26626E+00	.47876E+00	.27068E+00	.26843E+00	.26839E+00	.26622E+00	.71481E+00		
8	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	-.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00	
	.26622E+00	.45699E+00	.27064E+00	.26839E+00	.26843E+00	.26626E+00	.47876E+00	.71481E+00	
9	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00
	.26839E+00	.47876E+00	.26839E+00	.27064E+00	.27068E+00	.26843E+00	.45699E+00	.47876E+00	.71481E+00
10	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01
	.22378E+00	.26626E+00	.47876E+00	.22488E+00	.22487E+00	.22377E+00	.26843E+00	.26839E+00	.26622E+00
	.12214E+00								
	.71481E+00								
11	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01
	.22377E+00	.26622E+00	.45699E+00	.22487E+00	.22488E+00	.22378E+00	.26839E+00	.26843E+00	.26626E+00
	.49348E-01	.12214E+00							
	.47876E+00	.71481E+00							
12	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01
	.22487E+00	.26839E+00	.47876E+00	.22598E+00	.22599E+00	.22488E+00	.27064E+00	.27068E+00	.26843E+00
	.49348E-01	.49348E-01	.12214E+00						
	.45699E+00	.47876E+00	.71481E+00						
13	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01
	.28461E+00	.25189E+00	.21922E+00	.28437E+00	.28727E+00	.28753E+00	.25053E+00	.25148E+00	.25289E+00
	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.39164E+01					
	.21829E+00	.21862E+00	.21957E+00	.78382E+00					
14	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01
	.21829E+00	.25053E+00	.28437E+00	.21922E+00	.21957E+00	.21862E+00	.25189E+00	.25289E+00	.25148E+00
	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.49348E-01	.39164E+01				
	.28461E+00	.28753E+00	.28727E+00	.22090E+00	.78382E+00				

ตาราง 5.18

INVERTED IMPEDANCE MATRIX (MHO-KM)
FOR SYSTEM OF PHYSICAL CONDUCTORS

1	.87661E+00								
	-.30048E+01								
2	-.18302E-02	.87810E+00							
	.65193E-01	-.30242E+01							
3	.22722E-02	-.14534E-02	.87815E+00						
	.37444E-01	.63484E-01	-.30101E+01						
4	-.34045E+00	-.39390E-02	.19509E-02	.87815E+00					
	.88085E+00	.70340E-01	.38051E-01	-.30101E+01					
5	-.13660E+00	-.34660E-02	.21556E-02	-.33938E+00	.87867E+00				
	.58496E+00	.69850E-01	.37933E-01	.87817E+00	-.30100E+01				
6	-.34091E+00	-.13839E-02	.24734E-02	-.13661E+00	-.33992E+00	.87715E+00			
	.88344E+00	.64742E-01	.37331E-01	.58496E+00	.88091E+00	-.30047E+01			
7	.21703E-04	-.33980E+00	-.39389E-02	-.14533E-02	-.10152E-02	.43675E-03	.87810E+00		
	.59350E-01	.86421E+00	.70340E-01	.63483E-01	.63030E-01	.58932E-01	-.30242E+01		
8	.39536E-03	-.13612E+00	-.35145E-02	-.10585E-02	-.11754E-02	.30319E-03	-.33958E+00	.87830E+00	
	.58932E-01	.56830E+00	.69847E-01	.63030E-01	.63502E-01	.59370E-01	.86404E+00	-.30242E+01	
9	-.14303E-02	-.33958E+00	-.10586E-02	-.35145E-02	-.36508E-02	-.15385E-02	-.13611E+00	-.33960E+00	.87830E+00
	.64740E-01	.86404E+00	.63030E-01	.69847E-01	.70362E-01	.65216E-01	.56830E+00	.86422E+00	-.30242E+01
10	.25226E-02	.21689E-04	-.34045E+00	.22722E-02	.24739E-02	.27213E-02	-.18302E-02	-.14304E-02	.39542E-03
	.36975E-01	.59351E-01	.88085E+00	.37444E-01	.37331E-01	.36866E-01	.65193E-01	.64740E-01	.58932E-01
	.87661E+00								
	-.30048E+01								
11	.27213E-02	.43683E-03	-.13661E+00	.24735E-02	.25406E-02	.27914E-02	-.13839E-02	-.15385E-02	.30311E-03
	.36866E-01	.58932E-01	.58496E+00	.37331E-01	.37451E-01	.36982E-01	.64742E-01	.65216E-01	.59370E-01
	-.34091E+00	.87715E+00							
	.88344E+00	-.30047E+01							
12	.24740E-02	-.10153E-02	-.33938E+00	.21554E-02	.22189E-02	.25406E-02	-.34661E-02	-.36507E-02	-.11754E-02
	.37331E-01	.63030E-01	.87817E+00	.37934E-01	.38059E-01	.37451E-01	.69850E-01	.70362E-01	.63502E-01
	-.13660E+00	-.33992E+00	.87867E+00						
	.58496E+00	.88091E+00	-.30100E+01						
13	-.22171E-01	-.13275E-01	-.91200E-02	-.21336E-01	-.24071E-01	-.24931E-01	-.12441E-01	-.13339E-01	-.14221E-01
	.38638E-02	.28179E-02	.25778E-02	.39319E-02	.35973E-02	.35245E-02	.29021E-02	.28029E-02	.27097E-02
	-.90646E-02	-.93787E-02	-.94455E-02	.25217E+00					
	.26154E-02	.26078E-02	.25678E-02	-.38575E-01					
14	-.90646E-02	-.12441E-01	-.21336E-01	-.91200E-02	-.94455E-02	-.93787E-02	-.13275E-01	-.14221E-01	-.13339E-01
	.26154E-02	.29021E-02	.39319E-02	.25778E-02	.25678E-02	.26078E-02	.28179E-02	.27097E-02	.28029E-02
	-.22171E-01	-.24931E-01	-.24071E-01	-.12668E-02	.25217E+00				
	.38638E-02	.35245E-02	.35973E-02	-.26465E-02	-.38575E-01				

ตาราง 5.19

IMPEDANCE MATRIX (OHM-KM)
FOR SYSTEM OF EQUIVALENT PHASE CONDUCTORS

1	.94173E-01		
	.51306E+00		
2	.75319E-01	.93440E-01	
	.24930E+00	.51321E+00	
3	.74828E-01	.75319E-01	.94173E-01
	.20581E+00	.24930E+00	.51306E+00

IMPEDANCE MATRIX (OHM-KM)
FOR SYMMETRICAL COMPONENT OF EQUIVALENT PH.CON

0	.24424E+00		
	.98271E+00		
1	-.12555E-01	-.24776E-01	
	-.73420E-02	.14965E-01	
2	.12636E-01	.18773E-01	.25347E-01
	-.72019E-02	.27831E+00	.13974E-01

SEQUENCE	SURGE IMPEDANCE MAGNITUDE(OHM)	SURGE IMPEDANCE ANGLE(DEGR.)	ATTENUATION DB/KM	VELOCITY KM/S	WAVELENGTH KMS	RESISTANCE OHM/KM	REACTANCE OHM/KM	SUSCEPTANCE MHO/KM
ZERO	.60750E+03	-.69786E+01	.17590E-02	.18989E+06	.37977E+04	.24424E+00	.98270E+00	.27437E-05
POSITIVE	.25864E+03	-.19295E+01	.31540E-03	.29147E+06	.58293E+04	.18773E-01	.27831E+00	.41697E-05

INVERTED IMPEDANCE MATRIX (MHO-KM)
FOR SYSTEM OF EQUIVALENT PHASE CONDUCTORS

1	.24287E+00		
	-.26430E+01		
2	-.24299E-01	.25121E+00	
	.10299E+01	-.29105E+01	
3	.38758E-01	-.24299E-01	.24287E+00
	.59878E+00	.10299E+01	-.26430E+01

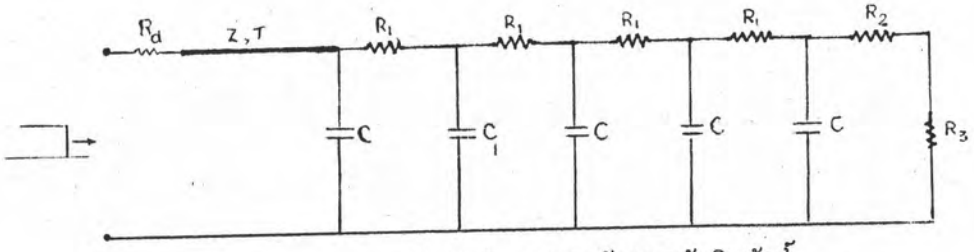
INVERTED IMPEDANCE MATRIX (MHO-KM)
FOR SYMMETRICAL COMPONENT OF EQUIVALENT PH.CON

0	.23909E+00		
	-.95978E+00		
1	-.38138E-01	-.34853E+00	
	-.43078E-01	.14947E+00	
2	.56376E-01	.24893E+00	.30371E+00
	-.11489E-01	-.36184E+01	.22710E+00

ตาราง 5.20

2. การวิเคราะห์ Step Response ของแรงดันอิมพัลส์

ตัวอย่าง การป้อนแรงดัน Step เพื่อดูผลตอบสนองของวงจรวัดแรงดันอิมพัลส์ และได้แสดงวงจรตามที่แสดงในรูป 5.3 (5)



รูป 5.3 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

โดยที่ R_d คือ Damping Resistor เท่ากับ 100 โอห์ม

Z คือเสริ์จอิมพิแดนซ์ของสายเคเบิลเท่ากับ 272 โอห์ม

T คือเวลาของคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเคเบิลเท่ากับ 20 นาโนวินาที

R_1, C, R_2, R_3 แทนวงจรวัดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage Measuring Circuit)

R_1 เท่ากับ 232 โอห์ม

C เท่ากับ 5 พิโคฟารัด

R_2 เท่ากับ 208.8 โอห์ม

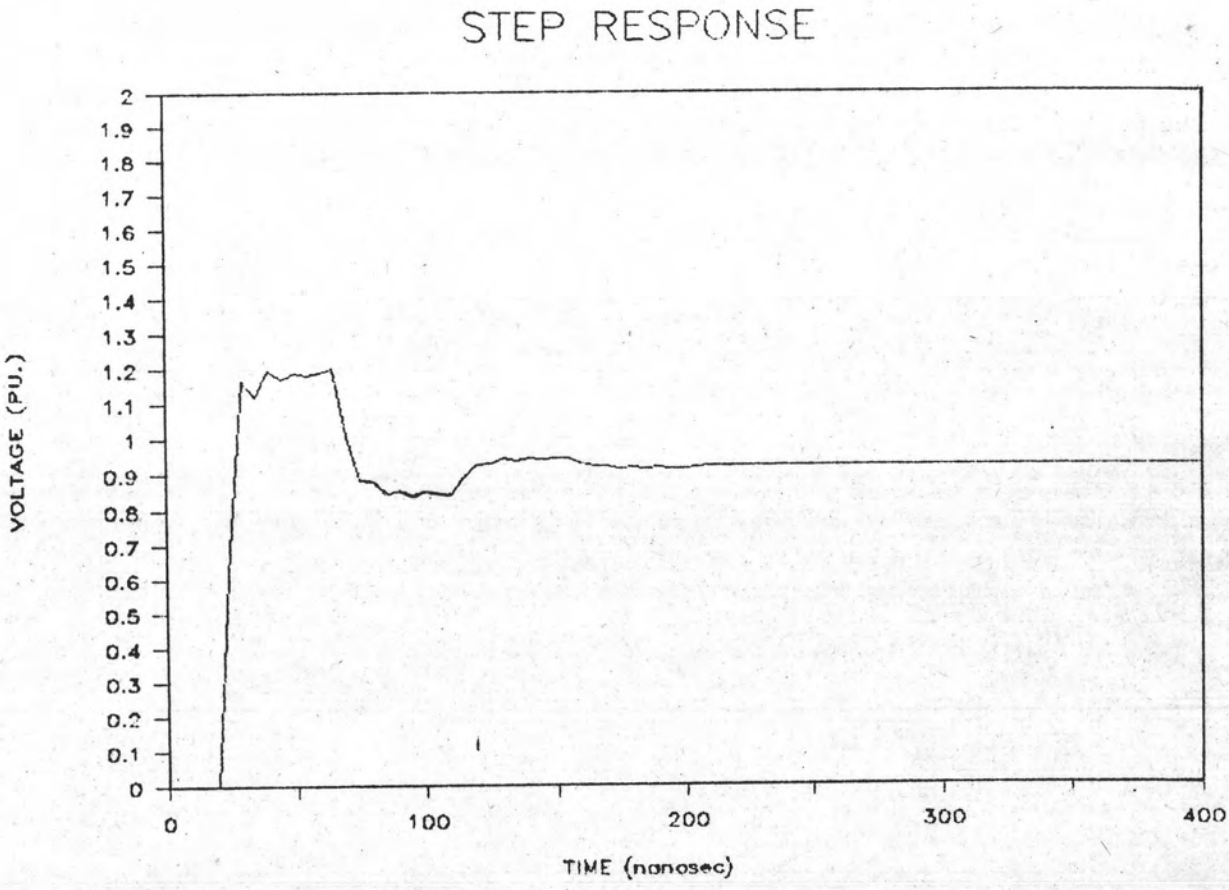
R_3 เท่ากับ 23.2 โอห์ม

รายละเอียดของการแทนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในวงจรด้วยโมเดลได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

อุปกรณ์ไฟฟ้า	โมเดล
เครื่องกำเนิดแรงดัน Step	แหล่งกำเนิดแรงดันแบบแรงดัน Step ขนาด 1 pu
วงจรวัด	พารามิเตอร์แบบก้อน (R,L, C)
เคเบิลต่อระหว่าง Damping Resistor กับวงจรวัด	สายส่งพารามิเตอร์แบบกระจายโดยบอกค่าของเสริ์จอิมพิแดนซ์กับเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผ่านเคเบิล
Damping Resistor	พารามิเตอร์แบบก้อนขนาดเท่ากับ 100 โอห์ม

สำหรับการป้อนข้อมูลในโปรแกรมแสดงในตาราง 5.21 และผลสัมฤทธิ์ของแรงดันที่

บัส 3 แสดงในรูป 5.4



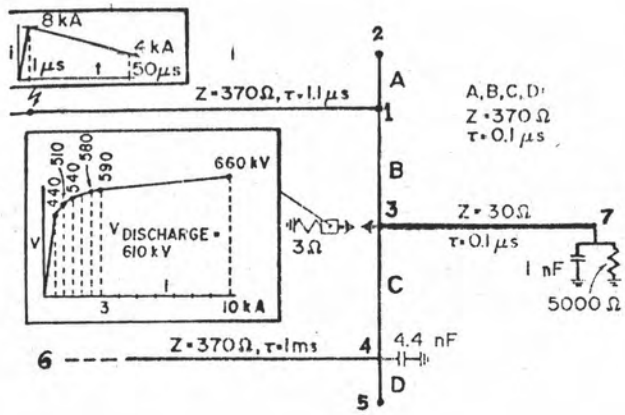
รูปที่ 5.4

```
TO MEASURE THE STEP RESPONSE                    !
INPUT VOLTAGE STEP FUNCTION 1 PU.               !   TITLE 3 LINES
--------------------------------                !
5.E-9,4.E-7,,,0,1,1                                 CONTROL DATA
  BUS1  BUS2                0                   !   BRACH DATA
500.0,,,                                        !   LUMPED PARAMETER
  BUS3                      0
0,,5.E-6
  BUS3  BUS4                0
232.0,,,
  BUS4          BUS3        0
  BUS4  BUS5    BUS3  BUS4  0
  BUS5          BUS3        0
  BUS5  BUS6    BUS3  BUS4  0
  BUS6          BUS3        0
  BUS6  BUS7    BUS3  BUS4  0
  BUS7          BUS3        0
  BUS7  BUS8                0
208.8,,,
  BUS8                      0
23.2,,,
-1BUS2  BUS3                0                   !   DISTRIBUTED PARAMETER
0.0,272.0,20.,10.,1                             !   DATA
88                                                  SKIP SWITCH DATA
88                                                  SOURCE DATA
11BUS1
1.0,,,,,,,,,
88                                                  SELECT OUTPUT VOLTAGE
BUS3                                                END
999999
```

TABLE 5.21
==========

3. การวิเคราะห์เกี่ยวกับ Lighting Surge

เป็นตัวอย่างของ Lightning Surge ผ่าลงบนสายส่ง ศึกษาแรงดันของหม้อแปลงและกระแส Discharge ของกับดักฟ้าผ่า โดยที่ A,B,C,D แทนบัสของสถานีไฟฟ้าย่อยออกเป็นส่วน ๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 5.5



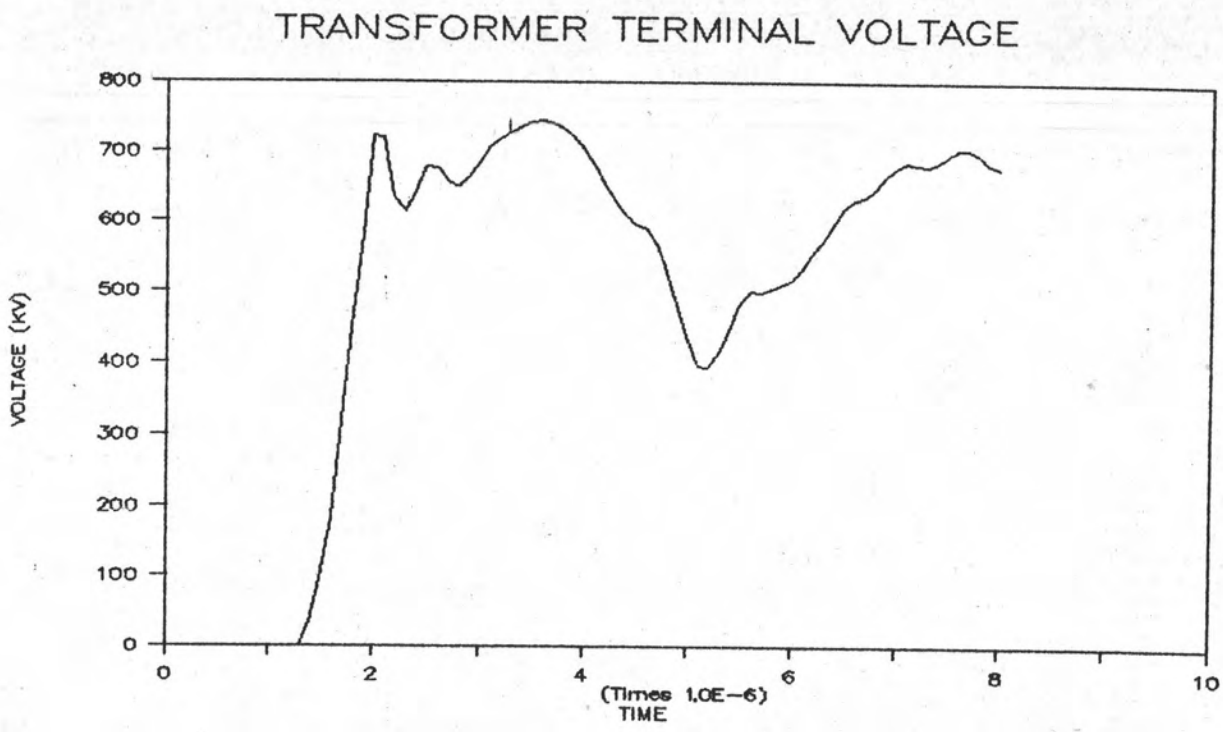
รูป 5.5 ตัวอย่างของ Lightning Discharge

รายละเอียดของการแทนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในวงจรด้วยโมเดลได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

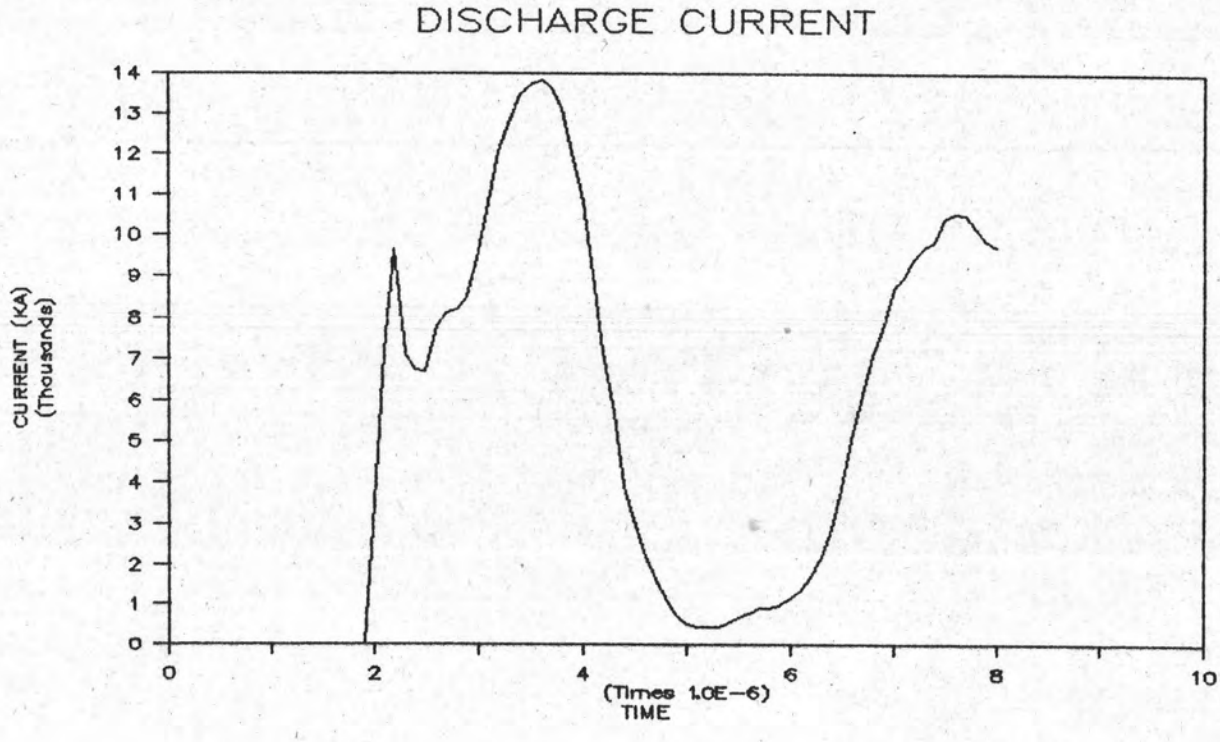
อุปกรณ์ไฟฟ้า	โมเดล
เสิร์จฟ้าผ่า	แหล่งกำเนิดกระแสแบบฟังก์ชั่นลาด (Ramp function) โดยมีลักษณะสมบัติคือ เวลา (วินาที) กระแส (kA) 0 0 1E-6 8 50.E-6 4
สายส่งและเคเบิล	สายส่งต่อระหว่างจุด 0 และจุด 1 แทนด้วยเสิร์จอิมพีแดนซ์ขนาด 370 โอห์ม, T = 1.1 ไมโครวินาที สายส่งต่อระหว่างจุด 4 และจุด 6 แทนด้วยเสิร์จอิมพีแดนซ์ขนาด 370 โอห์ม, T = 1 มิลลิวินาที

อุปกรณ์ไฟฟ้า	โมเดล
หม้อแปลง	เคเบิลต่อระหว่างจุด 3 และจุด 7 แทนด้วยเลิร์จอิมพีแดนซ์ขนาด 30 โอห์ม, T = 0.1ไมโครวินาที ส่วนของบัส A,B,C,D แทนด้วยเลิร์จอิมพีแดนซ์ขนาด 370 โอห์ม,T = 0.1 ไมโครวินาที ความต้านทานขนาด 5000 โอห์มขนานกับคาแปซิแตนซ์ขนาด 1 นาโนฟารัด
กับตักฟ้าผ่า	แทนด้วยพารามิเตอร์ความต้านทานแบบไม่เชิงเส้นต่ออนุกรมกับ Gap และความต้านทาน แสดงลักษณะสมบัติของความต้านทานแบบไม่เชิงเส้นด้วยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส กระแส (kA) — แรงดัน (kV) 0 — 0 .5 — 440 1 — 510 1.5 — 540 2.5 — 580 3.0 — 590 10 — 660

สำหรับการป้อนข้อมูลในโปรแกรมแสดงในตาราง 5.22 และผลลัพธ์ที่ต้องการพิจารณาแรงดันที่ขั้วของหม้อแปลง และกระแสที่ไหลผ่านกับตักฟ้าผ่า แสดงผลลัพธ์ดังรูป 5.6



รูป 5.6 ก แสดงแรงดันที่ขั้วของหม้อแปลง



รูป 5.6 ข แสดงกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่า