

## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้าง

#### 3.1 บทนำ

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่ง จะทำการประเมินสมรรถนะโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประเมิน เนื่องจากไม่สามารถทดสอบระบบส่งด้วยสถานการณ์ฟ้าผ่าจริงได้ เพราะไม่สามารถกำหนดหรือควบคุมสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นจริงที่ซึ่งจะนำมาใช้ในการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการที่จะประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่ง โดยการเริ่มนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้งานนั้น ในช่วงต้น ค.ศ.1960 ได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า จึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบอนาล็อกมาใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ Dr.Dommel แห่งมหาวิทยาลัย Munich ประเทศเยอรมัน ได้เริ่มพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแบบดิจิทัลขึ้น โดยอาศัยงานของ Schnyder-Bergeron เป็นวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกทาง Benneville Power Administration (BPA) ซึ่งจัดตั้งโดยกระทรวงพลังงานของสหรัฐ มีความสนใจในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้เชิญ Dr. Dommel มาเป็นนักวิจัย เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมหาค่ากระแสเกินใน Transient Program Model ซึ่งมีประมาณ 4,000 บรรทัด ก็เสร็จสมบูรณ์ออกมาเผยแพร่

ต่อมาในปี ค.ศ. Dr.Dommel ลาออกจาก BPA โดยมี Dr.W.Scott-Meyer เป็นผู้รับผิดชอบช่วงต่อในการพัฒนาโปรแกรม จนในปี ค.ศ.1976 ก็มีนักวิจัยอีกหลายคนเข้าร่วมในการพัฒนาโปรแกรม เช่น Dr.Tse-Huei Liu และ Dr.Akihiro Ametani นอกจากนี้ Mr.L. Dube ผู้พัฒนา TACS/MODEL Dr.V. Brandwain ผู้พัฒนาโครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้า Prof. A. Semlyen ผู้พัฒนาโมเดลของสายส่งเข้าร่วมทำให้โปรแกรม EMTP มีความสามารถมากยิ่งขึ้น จนในช่วงทศวรรษ 1980 โปรแกรม EMTP M 31 ซึ่งมีประมาณ 100,000 บรรทัดก็เสร็จสมบูรณ์ และมีการนำไปใช้งานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก

การพัฒนาโปรแกรมหาดำเนินมาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน โปรแกรม EMTP แตกออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกันคือ EMTP ของ BPA DCG/EPRI และ ATP-EMTP ของ Dr.Scott-Meyer โดยโปรแกรมที่เราจะนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่งในงานวิจัยนี้ คือ ATP-EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราว ซึ่งในงานวิจัยหลายๆด้านก็ได้ใช้โปรแกรมนี้นี้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ในสภาวะชั่วคราวเช่นเดียวกัน

การใช้โปรแกรม EMTP วิเคราะห์สภาวะชั่วคราว (Transient) ในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ในระบบให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในบางครั้งจึงมีความยุ่งยากและซับซ้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ด้วย

### 3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP

#### 3.2.1 หลักการทั่วไป

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง หากจัดกลุ่มตามลักษณะของผลลัพธ์ที่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

##### 3.2.1.1 การวิเคราะห์ในกรอบของความถี่ (Frequency Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองแรงดัน หรือกระแสเป็นขนาด และมุมเฟส โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่จะใช้กับการวิเคราะห์ที่ระบบไฟฟ้า ที่อยู่ในสภาวะปกติ เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) หรือระบบไฟฟ้าที่กลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) ภายหลังที่เกิดสภาวะชั่วคราว เช่น การคำนวณกระแสไฟฟ้าผิดปกติ (Fault Current Analysis) เพื่อใช้ในการประสานสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

##### 3.2.1.2 การวิเคราะห์ในกรอบของเวลา (Time Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองของแรงดันหรือกระแสเป็นขนาด ในแต่ละช่วงเวลา การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรืออยู่ในสภาวะชั่วคราว เช่น การสับปลด (Switching Operation) การเกิดความผิดปกติ (Fault) หรือการรบกวนภายนอกอื่นๆ เช่น ไฟผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถใช้แนวคิดของการวิเคราะห์เชิงความถี่ ในการวิเคราะห์หรือกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาได้

ในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยียังไม่ก้าวหน้า รูปแบบของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงเวลามักจะเป็นสมการในเชิงคณิตศาสตร์ ที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ หากระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ หรือปัญหาที่มีความซับซ้อน ก็จะต้องกำหนดสมมติฐานเป็นจำนวนมาก จนทำให้ผลตอบสนองที่ได้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวอีกแบบหนึ่งที่นิยมก็คือ Transient Network Analyzer (TNA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำลองระบบไฟฟ้า โดยการย่อระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง แล้วทำการจำลองความต้องการ แต่ TNA นั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และการปรับเปลี่ยนมีข้อจำกัด การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวในปัจจุบัน จึงได้ปรับเปลี่ยนไปสู่ดิจิทัลคอมพิวเตอร์มากขึ้น การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวโดยใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ เริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 โดยใช้เทคนิค Bewley's Lattice Diagram และวิธีของ Bergeron เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้กับวงจรที่มีขนาดเล็ก ที่มีพารามิเตอร์ขององค์ประกอบเป็นแบบกระจาย (Distributed Parameter) หรือแบบกลุ่มก้อน (Lumped Parameter) ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น ต่อมา H.W.Dommel ได้เสนอเทคนิคที่นำเอา Trapezoidal Rule และวิธีของ Bergeron สร้างเป็นอัลกอริทึมที่นำมาแก้ปัญหาสภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถใช้กับวงจรข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีการดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transient Program: EMTP) Trapezoidal Rule จะทำการแปลงสมการดิฟเฟอเรนเชียลขององค์ประกอบในวงจรข่าย ให้เป็นสมการทางพีชคณิต (Algebraic Equation) ที่เกี่ยวข้องกับแรงดัน กระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$[G][v(t)] = [I(t)] - [I] \quad (3.1)$$

เมื่อ  $[G]$  คือ เมตริกของconductance  
 $[V(t)]$  คือ เวกเตอร์ของแรงดัน  
 $[I(t)]$  คือ เวกเตอร์ของแหล่งจ่ายกระแส  
 $[I]$  คือ เวกเตอร์ของค่าในอดีต

แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรหลายส่วนมากจะต่อลงกราวด์ เพราะฉะนั้นจะสามารถแยกสมการออกเป็นสองส่วน คือ แรงดันที่ไม่ทราบค่า [ส่วน A] และแรงดันที่ทราบค่า [ส่วน B] ดังสมการที่ (3.2)

$$[V_A(t)] = [I_A(t)] - [I_A] - [G_{AB}][V_B] \quad (3.2)$$

คำตอบของภาวะชั่วครู่จะหาได้โดยใช้ Triangular Factorization ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีขนาดใหญ่ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ในระบบจริง จะแปรตามความถี่ จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองที่สามารถรองรับเงื่อนไขดังกล่าว และปัญหาอีกอย่างคือ คุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการแปรตามเวลาขององค์ประกอบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือกับดักไฟฟ้า การแก้ปัญหาคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าว จะใช้การแทนแบบ Piecewise Linear

ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองภาวะชั่วครู่แม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเข้าใจอัลกอริทึมได้ง่าย แต่ข้อเสียของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule คือ การใช้ขนาดของ Time Step ที่คงที่อาจทำให้เกิดการสั่นของสัญญาณ (Numerical Oscillation) ได้ เนื่องจากค่า Time Step กำหนดมาจากความถี่ที่ใช้ในการจำลองความถี่ของปรากฏการณ์ภาวะชั่วครู่ที่เกิดขึ้น อาจเกิดทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำในเวลาเดียวกันแต่ต่างโหนด เพราะฉะนั้นการใช้ค่า Time Step เพียงค่าเดียว อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการแกว่งของสัญญาณในหลายกรณี เช่น การสวิตชิง หรือการเปลี่ยนช่วงการทำงานในขั้นตอนของ Piecewise Linear อาจทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณได้ เทคนิคต่างๆ ถูกนำมาใช้ เช่น ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์หน่วง (Damping) เพื่อลดการเกิดการแกว่งของสัญญาณ โดยใช้ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ และอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ต่อคร่อมอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งเทคนิคที่ใช้กันอยู่มาก เช่น การต่อวงจร snubber (Snubber Circuit) ขนานกับสวิตช์ ซึ่งวงจรดังกล่าวสามารถพบได้ทั่วไปในส่วน of วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนวิธีการลดการแกว่งของสัญญาณแบบอื่นๆ อาจทำได้อีกหลายวิธี เช่น ใช้เทคนิค Critical Damping Adjustment (CDA)

ขั้นตอนการแก้ปัญหาภาวะชั่วครู่แม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นหรือจุดที่เริ่มเกิดภาวะชั่วครู่ การแก้ปัญหาจะเริ่มจากหาเงื่อนไขของสภาวะอยู่ตัว ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบของสภาวะอยู่ตัวของวงจรหลายแบบเชิงเส้นที่ความถี่หนึ่งๆ หาได้จากการใช้สมการโหนดแอดมิตแตนซ์ (Nodal Admittance Equation) ตามสมการที่ (3.3)

$$[Y][V] = [I] \quad (3.3)$$

|             |     |                                   |
|-------------|-----|-----------------------------------|
| เมื่อ $[Y]$ | คือ | เมตริกของแอดมิตแตนซ์ (Admittance) |
| $[V]$       | คือ | เวกเตอร์ของแรงดัน                 |
| $[I]$       | คือ | เวกเตอร์ของแหล่งจ่ายกระแส         |

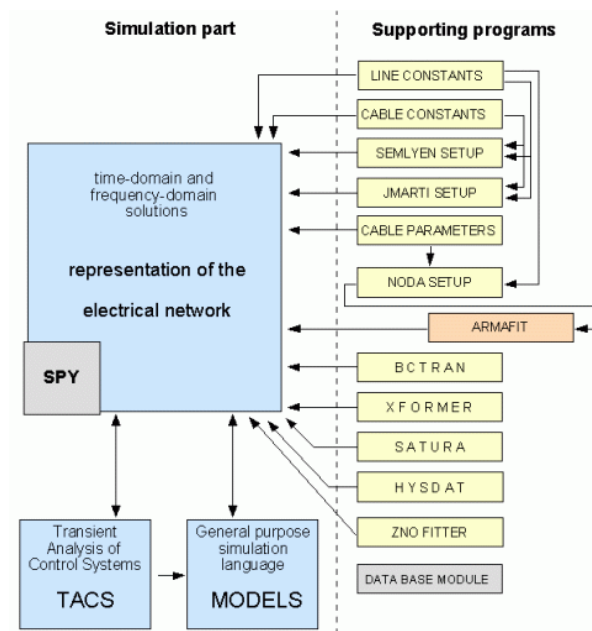
สำหรับการแทนองค์ประกอบของวงจรขั้วนั้น ในการวิเคราะห์ภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลอง เพื่อจำลองคุณลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่การแทนองค์ประกอบของวงจรขั้ว ให้มีความถูกต้องครอบคลุมความถี่ทุกช่วงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของแต่ละองค์ประกอบของวงจรขั้ว จะมีผลโดยตรงกับภาวะชั่วคราวของปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการจัดกลุ่มภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการศึกษาด้วยวิธี Time Domain โดยแบ่งตามช่วงความถี่ในแต่ละกลุ่มและความชันหน้าคลื่นที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตามข้อเสนอแนะของ Cigre

### 3.2.2 ความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP

โปรแกรม ATP-EMTP พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง โครงสร้างหลักของโปรแกรมประกอบไปด้วย ส่วนที่ใช้ในการจำลอง (Simulation Part) และส่วนช่วยสนับสนุน (Supporting Programs) ในรูปแบบของการวิเคราะห์เชิง Time Domain และ Frequency Domain

**ตารางที่ 3.1** ช่วงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

| ระดับ | ช่วงความถี่     | ลักษณะรูปคลื่น            | ปรากฏการณ์                                 |
|-------|-----------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| 1     | 0.1 Hz–3 kHz    | Low Frequency Oscillation | แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) |
| 2     | 50/60 Hz–20 kHz | Slow Front Transient      | แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage)  |
| 3     | 10 Hz–3 MHz     | Fast Front Transient      | แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage)   |
| 4     | 10 kHz–50 MHz   | Very Fast Front Transient | การเกิดอาร์คซ้ำ (Restrike Overvoltage)     |



รูปที่ 3.1 EMTP-ATP Module

โปรแกรม EMTP-ATP ได้จัดเตรียมแบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญหลายชนิดไว้ในโปรแกรม ทำให้ผู้ใช้งานสะดวกในการสร้างแบบจำลองมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีมาให้ นั้นมีคุณสมบัติและเงื่อนไขการใช้งานที่ต่างกัน ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเลือกใช้งานให้ถูกต้อง มิเช่นนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดจากความเป็นจริง

### 3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า

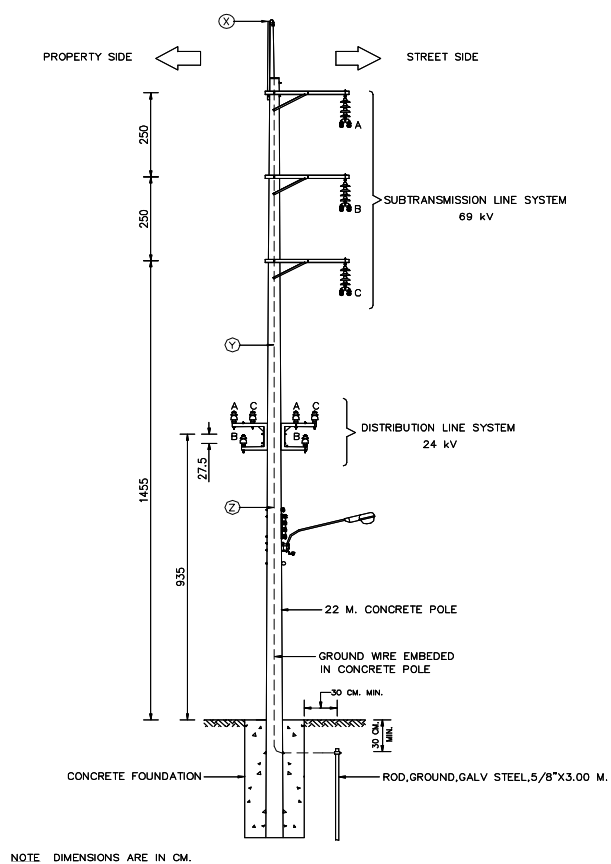
การศึกษานี้จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นเครื่องมือจำลององค์ประกอบในระบบสายส่งและสายป้อน อันประกอบไปด้วยแบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต แบบจำลองลูกถ้วย แบบจำลองความต้านทานอิมพัลส์ที่ฐานเสา แบบจำลองสายตัวนำลงดินนอกเสา แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการทำวิจัยฉบับนี้ เป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั่วโลกสำหรับการนำแบบจำลองระบบไฟฟ้าไปใช้ในระบบของการไฟฟ้านครหลวงนั้น ยังไม่ได้มีข้อมูลการจัดทำที่ได้จากการวัดจริง เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่ทันสมัย แต่ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวง ยังไม่มีเครื่องมือดังกล่าว แต่ก็แน่ใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้มีความถูกต้อง เพราะได้รับการยอมรับกันทั่วโลก

### 3.3.1 แบบจำลองสายส่งย่อยและสายป้อนเหนือดิน

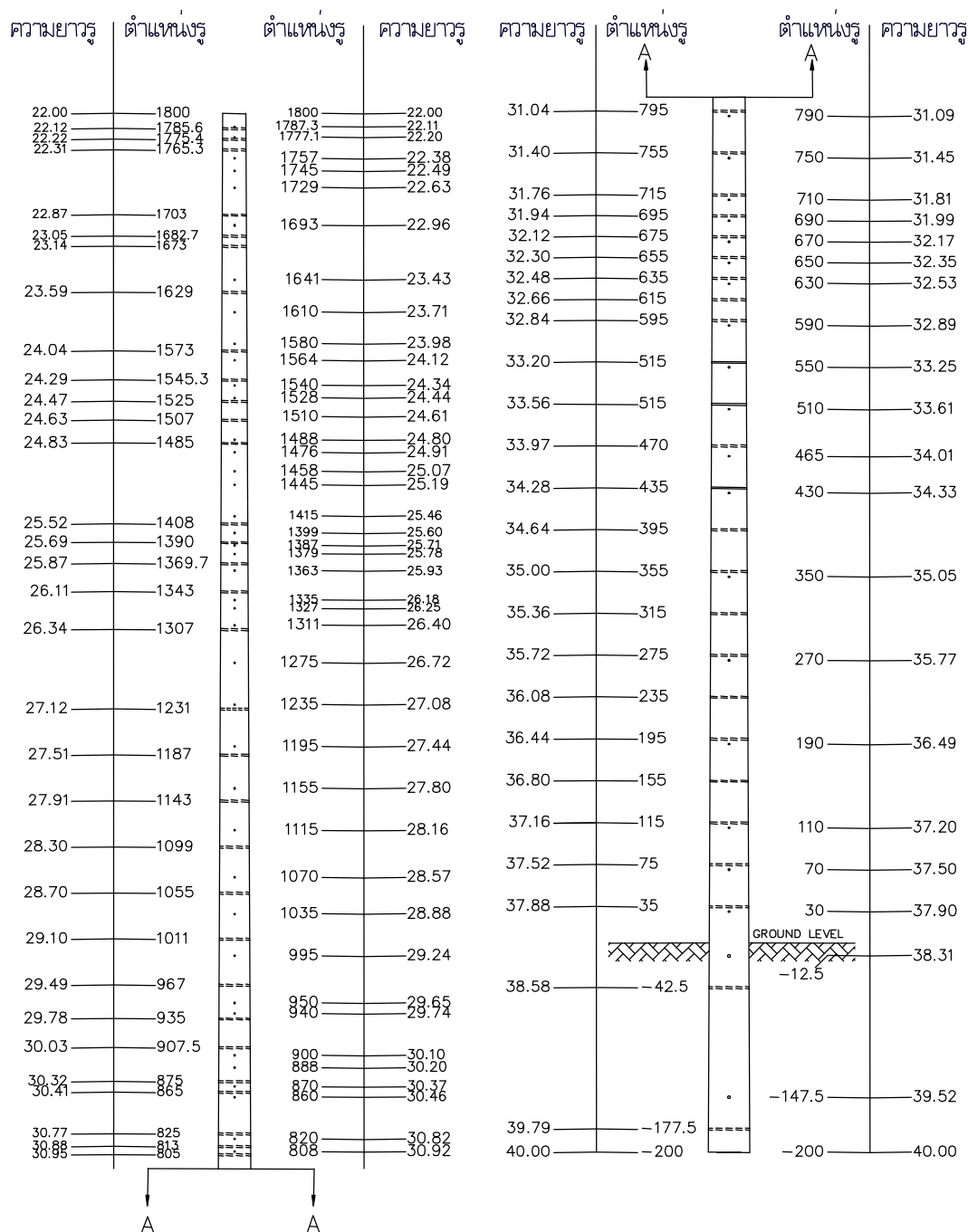
แบบจำลองสายส่งและสายป้อนเหนือดินแบบหลายตัวนำตามสภาพการใช้งานจริง สำหรับการศึกษารากฏการณ์ฟ้าผ่าผ่านนั้น แบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเหมาะสม คือ แบบจำลองที่แปรผันตามความถี่ (Frequency Dependent Line Model: J. Marti Model) อยู่ในโปรแกรม EMTP ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการใช้แบบจำลองสายส่งและสายป้อนเหนือดินแบบหลายตัวนำ แปรผันตามความถี่ในการวิเคราะห์ คือ การกำหนดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วงด้วยกัน ตามตารางที่ 3.1 และค่าช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขในโปรแกรม จะต้องน้อยกว่า  $1/10.f_{max}$  โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงที่ทำการศึกษาไว้ที่ 10 Hz – 3 MHz ค่าช่วงเวลาไว้ที่ 1E-9

แบบจำลองสายส่งย่อยและสายป้อนเป็นแบบวงจรเดียวตัวนำคู่ ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้ง ประกอบด้วยสายตัวนำคู่ 3 เฟส และสายล่อฟ้า 1 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างของระบบส่ง 69 kV และ 24 kV ที่ติดตั้งอยู่บนต้นเดียวกัน

สำหรับเสาคอนกรีตที่ใช้สำหรับสายส่งนั้น จะผลิตรองรับแรงดัน 69 kV จำนวน 1 วงจรสายเดี่ยวโดยมีขนาดความสูงของเสา 20 เมตร มีโมเมนต์ดัด (Bending Moment: BM) 14 ตัน-เมตร ตามรูปที่ 3.3 ต่อมาเมื่อความต้องการการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในพื้นที่ให้บริการของการไฟฟ้านครหลวง จึงจำเป็นต้องขยายระบบเพื่อรองรับความต้องการที่มากขึ้นดังกล่าว โดยการเพิ่มโมเมนต์ดัดเป็น 18 ตัน-เมตร เพื่อรองรับตัวนำของสายส่งแบบสายควบเป็น 2 ตัวนำต่อเฟส ต่อมาได้พัฒนารูปแบบของเสาไฟฟ้าคอนกรีตใหม่ เป็นขนาดความสูงของเสา 22 เมตร มีโมเมนต์ดัด 18 ตัน-เมตร ตามรูปที่ 3.4 โดยจะใช้ติดตั้งสายส่งทั้งระดับแรงดัน 115 kV และ 69 kV โดยจะใช้ปักเสาพาดสายในแนวทางตรง และเมื่อปักเสาพาดสายในแนวทางโค้งและหัวมุม ซึ่งจะต้องรับแรงดิ่งค่อนข้างมากกว่าปกติ ก็จะใช้ความสูงของเสาคอนกรีต 22 เมตรเท่าเดิม แต่มีโมเมนต์ดัด 25 ตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยต่อมาได้มีข้อบังคับของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ว่า หากปักเสาพาดสายในบริเวณที่ไม่มีทางเท้า ให้ใช้เสาคอนกรีตที่มีความสูง 23 เมตรและมีโมเมนต์ดัด 18 ตัน-เมตร ดังรูปที่ 3.6 โดยให้ปักลงดินเพิ่มอีก 1 เมตรเป็น 3 เมตรจากเดิม 2 เมตร แต่หากเป็นพื้นที่ของกรุงเทพมหานครหรือองค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) ก็จะกำหนดให้การไฟฟ้านครหลวงปักเสาที่มีขนาดความสูง 22 เมตร สำหรับในกรณีที่ต้องทำการพาดสายส่งย่อยเพื่อข้ามถนนนั้น จะใช้จำนวนเสาไฟฟ้าฝั่งละ 2 ต้น เพื่อให้โมเมนต์ดัดมีค่า 36 ตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



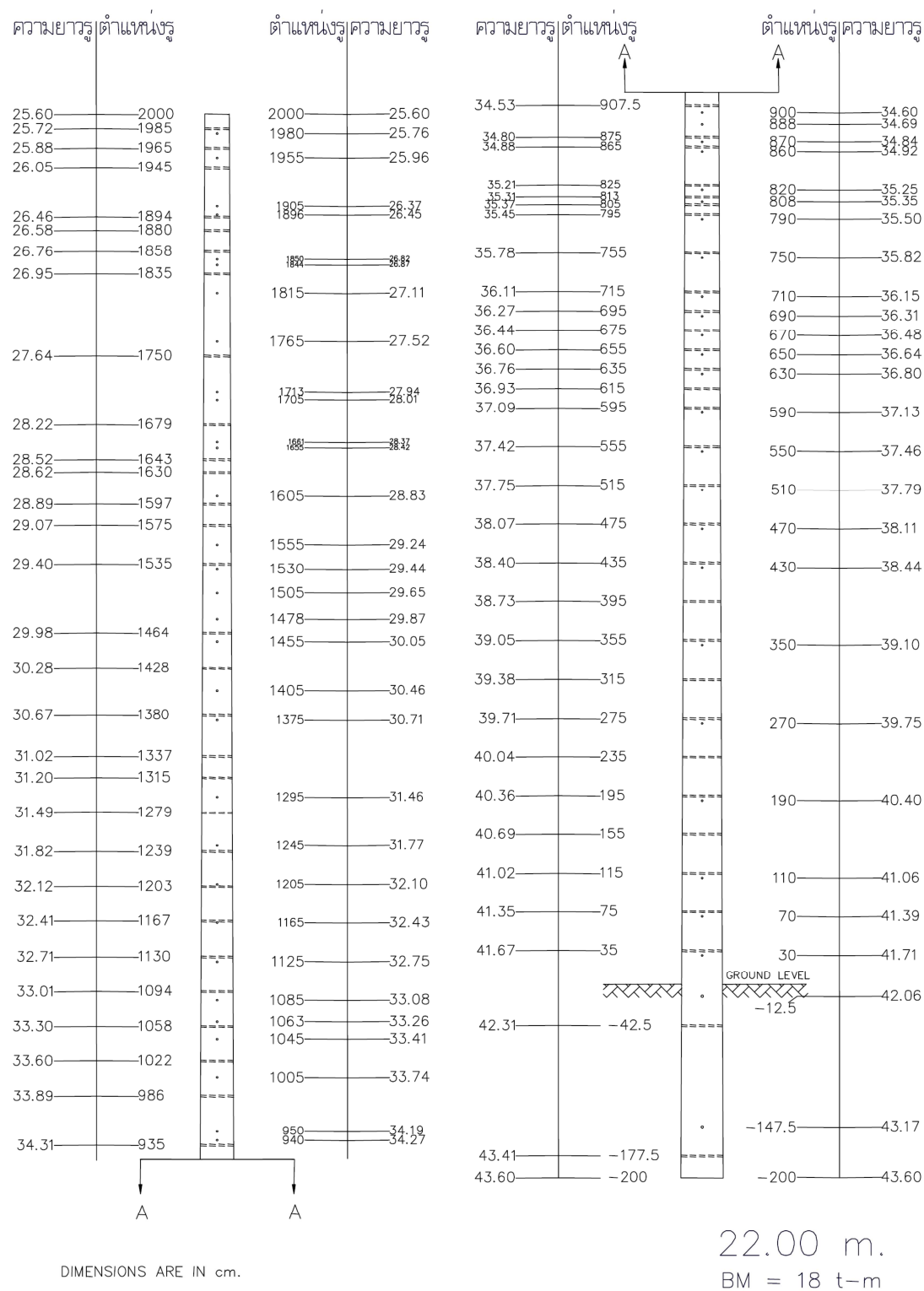
รูปที่ 3.2 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV



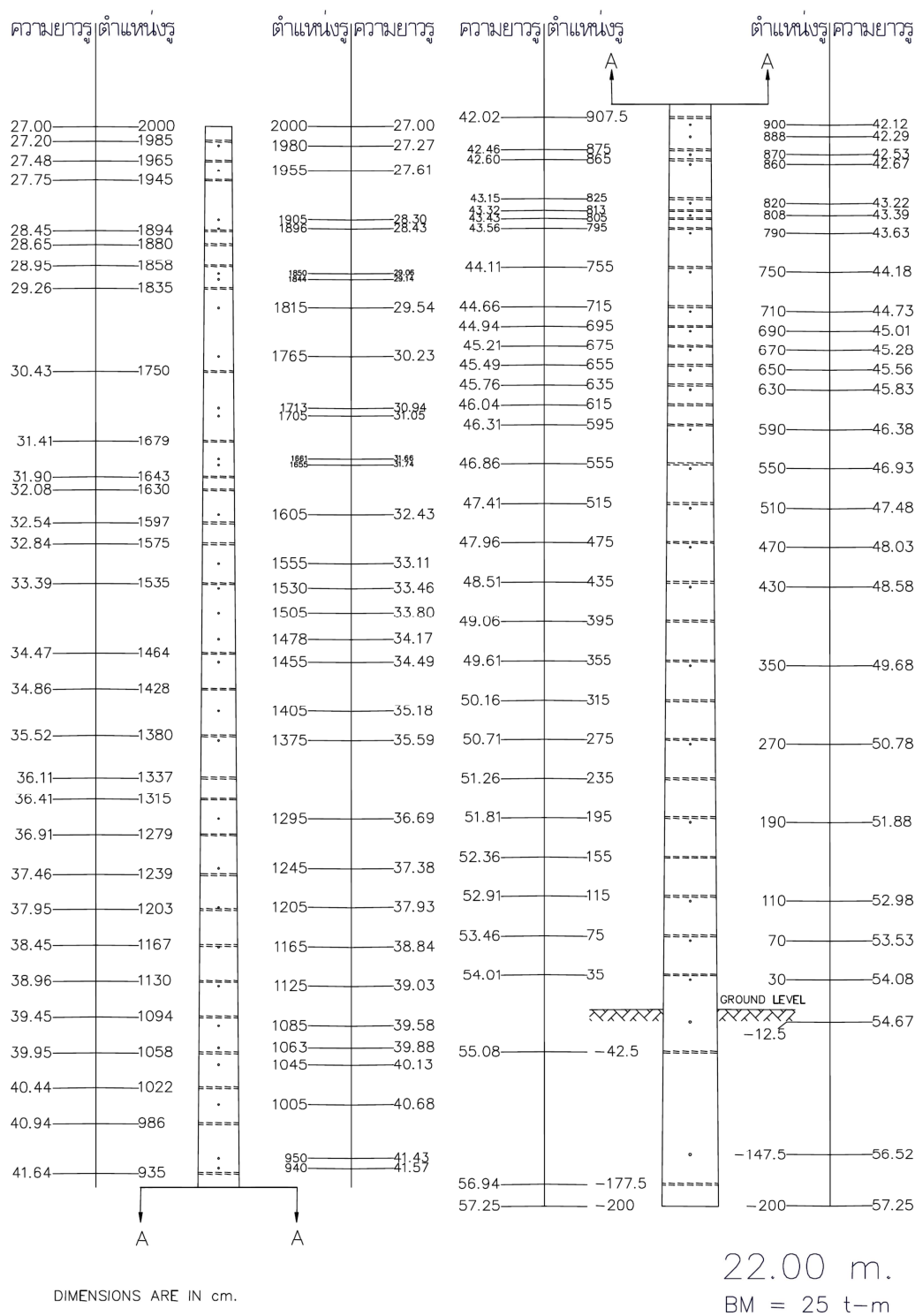
DIMENSIONS ARE IN cm.

20.00 m.  
BM = 14 t-m

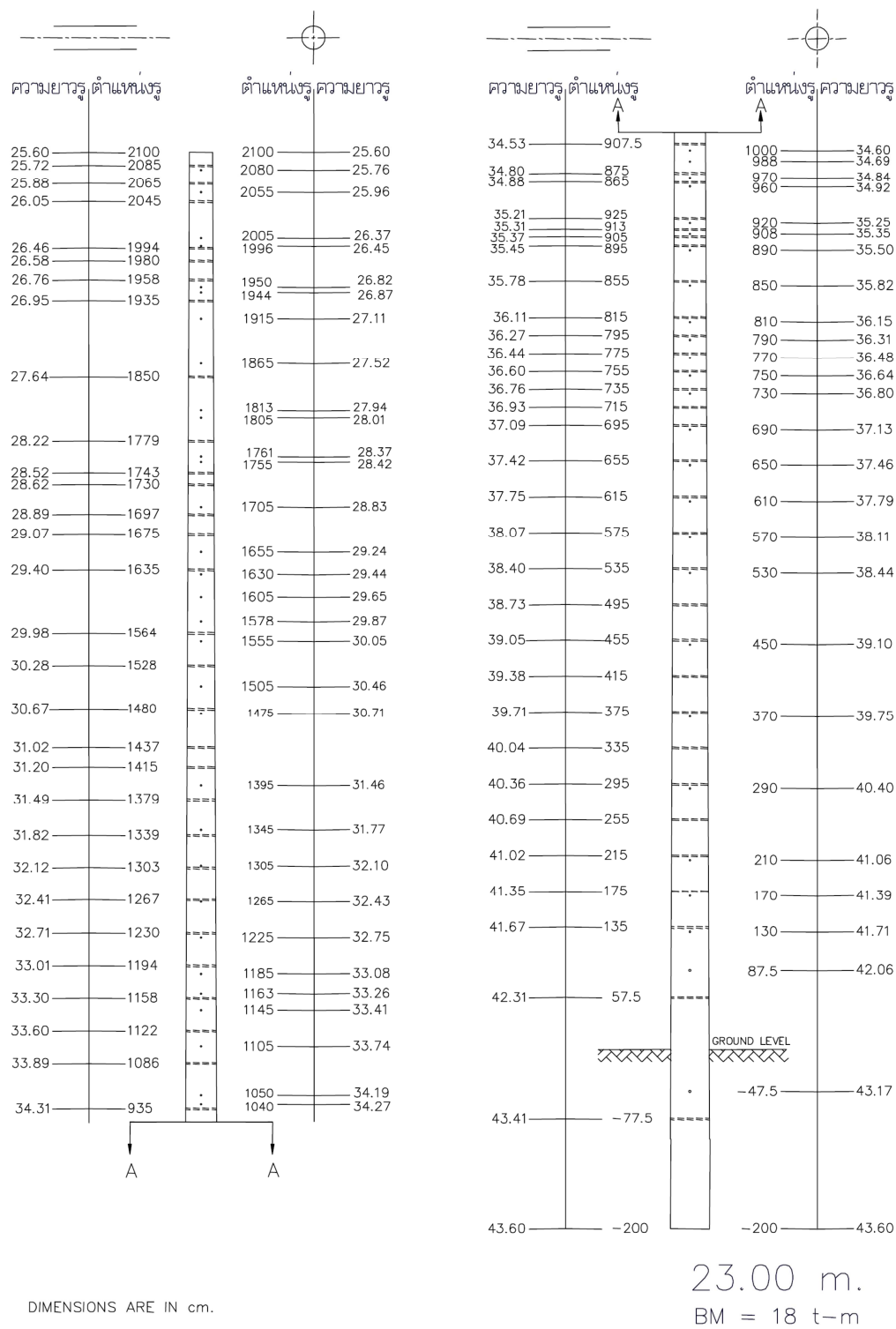
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 20 เมตร 14 ตัน-เมตร



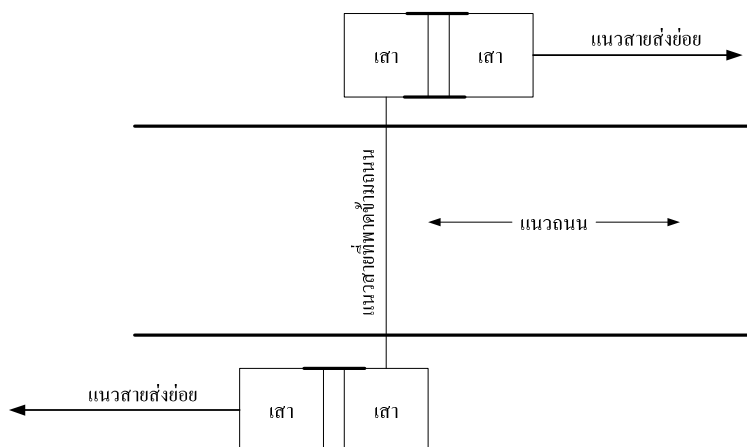
รูปที่ 3.4 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 18 ตัน-เมตร



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสูง 22 เมตร 25 ตัน-เมตร



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 23 เมตร 18 ต้น-เมตร



รูปที่ 3.7 การปักเสาพาดสายของสายส่งย่อยกรณีข้ามถนน

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง

| ชนิด            | ขนาด<br>(ตร. ม.ม.) | จำนวนเส้นลวด<br>(เส้น) | เส้นผ่านศูนย์กลาง<br>ภายนอก (ม.ม.) | ความต้านทาน<br>กระแสดตรง<br>( $\Omega$ /กม.) |
|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|
| สายล่อฟ้า       | 38.32              | 7                      | 7.94                               | 4.5733                                       |
| สายตัวนำ 24 kV  | 185                | 30                     | 16.8                               | 0.16456                                      |
| สายตัวนำ 69 kV  | 400                | 61                     | 25.65                              | 0.08883                                      |
| สายตัวนำ 115 kV | 400                | 61                     | 25.65                              | 0.08883                                      |

สายส่งนี้ถูกแทนด้วยแบบจำลองที่แปรผันกับความถี่ (frequency-dependent line model) โดยแต่ละช่วงความยาวสาย สามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ 3.4

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4l_{\text{line}}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่สำหรับการจำลองสาย (เฮิรตซ์)  
 $l_{\text{line}}$  คือ ความยาวสาย (เมตร) [43]

ตารางที่ 3.3 ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา

| ความยาวระยะห่างเสา (เมตร) | ความถี่ที่พิจารณา (เฮิรตซ์) |
|---------------------------|-----------------------------|
| 40                        | 1,875,000                   |
| 80                        | 937,500                     |
| 120                       | 625,000                     |

ในการศึกษาเลือกใช้แบบจำลองแบบ J. Marti ลักษณะเป็นสายความสูญเสียต่ำที่ความถี่สูงโดยใช้โปรแกรม ATP Line Constant (ATPLCC) สร้างแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยจะประกอบด้วยสายส่งย่อย 69 kV จำนวน 1 วงจร และสายป้อน 24 kV จำนวน 2 วงจร

Line/Cable Data: G26-24MEA

Model

Date

Nodes

| #  | Ph.no. | Rin    | Rout    | Resis       | Horiz   | Vtower | Vmid  | Separ | Alpha | NB |
|----|--------|--------|---------|-------------|---------|--------|-------|-------|-------|----|
|    |        | [cm]   | [cm]    | [ohm/km DC] | [m]     | [m]    | [m]   | [cm]  | [deg] |    |
| 1  | 0      | 1.2825 | 0.0778  | 2           | 18.74   | 17.92  | 20    | 180   | 2     |    |
| 2  | 0      | 1.2825 | 0.0778  | 2           | 16.24   | 15.42  | 20    | 180   | 2     |    |
| 3  | 0      | 1.2825 | 0.0778  | 2           | 13.74   | 12.92  | 20    | 180   | 2     |    |
| 4  | 0      | 0.799  | 0.16456 | 1.072       | 10.0073 | 9.32   | 0     | 0     | 1     |    |
| 5  | 0      | 0.799  | 0.16456 | 0.82        | 9.3073  | 8.62   | 0     | 0     | 1     |    |
| 6  | 0      | 0.799  | 0.16456 | 0.572       | 10.0073 | 9.32   | 0     | 0     | 1     |    |
| 7  | 0      | 0.799  | 0.16456 | -1.072      | 10.0073 | 9.32   | 0     | 0     | 1     |    |
| 8  | 0      | 0.799  | 0.16456 | -0.82       | 9.3073  | 8.62   | 0     | 0     | 1     |    |
| 9  | 0      | 0.799  | 0.16456 | -0.572      | 10.0073 | 9.32   | 0     | 0     | 1     |    |
| 10 | 10     | 0      | 0.39688 | 3.601       | 0       | 21.68  | 21.35 | 0     | 0     | 1  |

Add row

Delete last row

Insert row copy

Move Up

Move Down

OK

Cancel

Import

Export

Run&TP

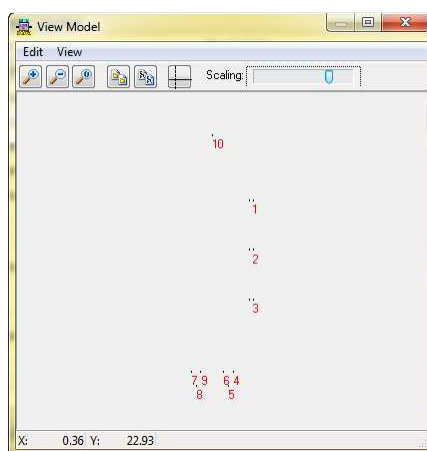
View

Verify

Edit defn.

Help

รูปที่ 3.8 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายป้อน 24 kV



รูปที่ 3.9 แสดงรูปแบบการจัดวางสายแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายป้อน 24 kV

จากแบบจำลองที่ผ่านการประมวลผลแล้ว ทำให้ได้ผลการคำนวณเป็นอิมพีแดนซ์เมตริก  $[Z_{\text{surge-mode}}]$  และ Transformation Matrix ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาอิมพีแดนซ์เมตริก  $[Z_{\text{surge-phase}}]$  ได้ตามสมการที่ (3.5)

$$Z_{\text{surge-phase}} = [T] \cdot [Z_{\text{surge-mode}}] \cdot [T]^t \quad (3.5)$$

### 3.3.2 แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้เสาคอนกรีตสูง 22 เมตร สายล่อฟ้าจะทำการต่อลงดิน โดยผ่านสายตัวนำเป็นลวดเหล็กเคลือบสังกะสี ที่ฝังอยู่ในเสาคอนกรีตทุกต้นลงดินไปยังระบบรากสายดิน ซึ่งจะมีตัวนำเป็นแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร ความยาว 3 เมตร โดยอยู่ต่ำจากผิวดิน 0.3 เมตร รายละเอียดตามภาพที่ 3.2 และ 3.3

การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$Z_T = 60 \ln \left( \frac{H}{r} \right) + 90 \left( \frac{r}{H} \right) - 60 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $Z_T$  คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต ( $\Omega$ )  
 $H$  คือ ความสูงของเสา (เมตร)  
 $R$  คือ รัศมีของตัวนำสายดิน (เมตร)

เมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะทำให้เกิดการหน่วง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากต้องมียางส่วนหนึ่งที่จะต้องกระทำ เพื่อเอาชนะแรงหน่วงนี้ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ และความนำไฟฟ้าของคอนกรีต และความถี่เป็นไปตามสมการที่ (3.7)

$$\mu = \frac{C}{\sqrt{\mu_r (\epsilon_r - j\sigma / \epsilon_0 \omega)}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตรต่อวินาที)  
 $C$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  (เมตรต่อวินาที)  
 $\mu_r$  คือ Relative Permeability ของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1  
 $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางคอนกรีตเท่ากับ 5.94

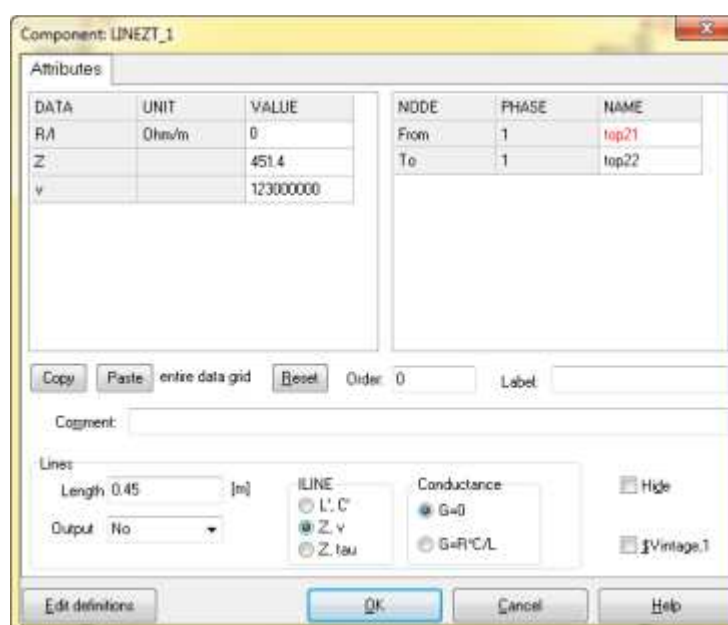
แบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีต จะทำการสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน Line Distributed/Transp. Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.6) และ สมการที่ (3.7) ตามลำดับ

งานวิจัยของ สำเร็จ ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความเร็วของคลื่นภายในคอนกรีต ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ในช่วง 25 kHz ถึง 1 MHz โดยพบว่ามีค่าตามในตารางที่ 3.4

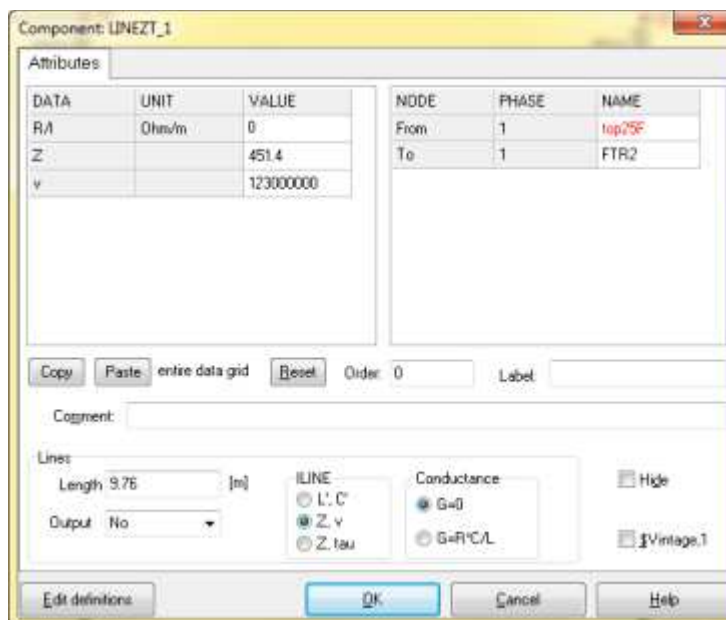
**ตารางที่ 3.4** ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

|                            |    |     |     |     |     |     |     |     |       |
|----------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| ความถี่ (kHz)              | 25 | 40  | 63  | 100 | 160 | 250 | 400 | 630 | 1,000 |
| ความเร็วคลื่น m/ $\mu$ s ) | 96 | 100 | 105 | 109 | 112 | 115 | 118 | 120 | 123   |

การทำแบบจำลองในนี้ ความเร็วคลื่นภายในเสาคอนกรีตนี้ จะใช้ 123 m/ $\mu$ s



**รูปที่ 3.10** การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนบน



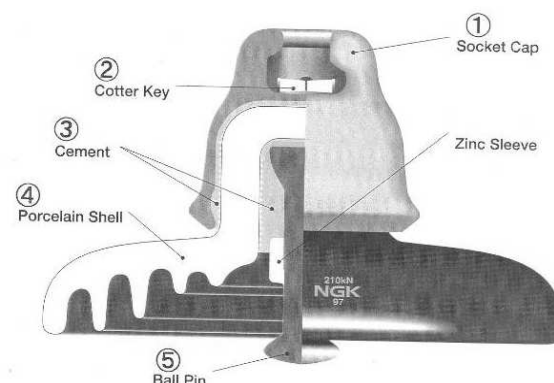
รูปที่ 3.11 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนล่าง

### 3.3.3 แบบจำลองพวงลูกถ้วย

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 ลูก ส่วนระบบ 24 kV กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 56/57 ตามมาตรฐาน มอก.1251 จำนวน 1 ลูกโดยมีคุณลักษณะของการวางไฟตามผิว ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะวางไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยแขวนเพื่อรองรับระบบส่ง

| จำนวน<br>ลูกถ้วย | ค่าเฉลี่ยวางไฟตามผิวความถี่ต่ำ |          | ค่าเฉลี่ยวางไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต |     |
|------------------|--------------------------------|----------|-----------------------------------|-----|
|                  | ผิวแห้ง                        | ผิวเปียก | ผิวแห้ง                           |     |
| 1                | 80                             | 50       | 1                                 | 80  |
| 2                | 155                            | 90       | 2                                 | 155 |
| 3                | 215                            | 130      | 3                                 | 215 |
| 4                | 270                            | 170      | 4                                 | 270 |
| 5                | 325                            | 215      | 5                                 | 325 |
| 6                | 380                            | 255      | 6                                 | 380 |
| 7                | 435                            | 295      | 7                                 | 435 |



รูปที่ 3.12 ลูกถ้วยแขวน 52-3

### 3.3.4 แบบจำลองความต้านทานอิมพัลส์

สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาลักษณะของความต้านทานดิน เมื่อมีกระแสแพร่กระจายในดิน หากกระแสฟ้าผ่ามีขนาดสูงพอที่จะสนามไฟฟ้าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน ณ จุดที่ติดตั้งตัวนำลงดินจะทำให้ดินรอบๆ ตัวนำนั้นเสียสภาพการเป็นฉนวน กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าแทน เสมือนว่าตัวนำลงดินนั้นขยายใหญ่ขึ้น ออกเป็นรูปครึ่งทรงกลม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา ได้จากการวัดในภาคสนาม หรือได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรตามมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวนำลงดิน ค่าเหล่านี้เป็นค่าความต้านทานที่ความถี่กำลัง แต่ในความเป็นจริงความต้านทานดินที่ฐานเสาลดลง เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าความถี่สูงไหล

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ใช้ตัวนำลงดินเป็นชนิดแท่ง ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังที่ฐานเสา หาได้จากสมการที่ (3.8)

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (3.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง กับความต้านทานอิมพัลส์ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.9)

$$R_i = \alpha R_0 \quad (3.9)$$

|       |          |     |                                       |
|-------|----------|-----|---------------------------------------|
| เมื่อ | $R_i$    | คือ | ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)           |
|       | $R_0$    | คือ | ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง (โอห์ม) |
|       | $\alpha$ | คือ | สัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของความต้านทานดิน |

เนื่องจากค่าความต้านทานดิน ขึ้นกับชนิดและลักษณะของดินเป็นหลัก และในการปฏิบัติงานภาคสนามมีความไม่แน่นอนของลักษณะของดิน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปฏิบัติงาน ดังนั้น ในการศึกษาโดยโปรแกรม ATP-EMTP จึงทำโดยการแปรผันค่าความต้านทานอิมพัลส์เป็นหลายค่า เพื่อพิจารณาผลของความต้านทานอิมพัลส์ ที่มีผลต่อแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ในที่นี้แปรผันค่าดังนี้ 5, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม

เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบรากสายดิน จะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่รากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุของดินจะหาได้จากสมการที่ (3.10)

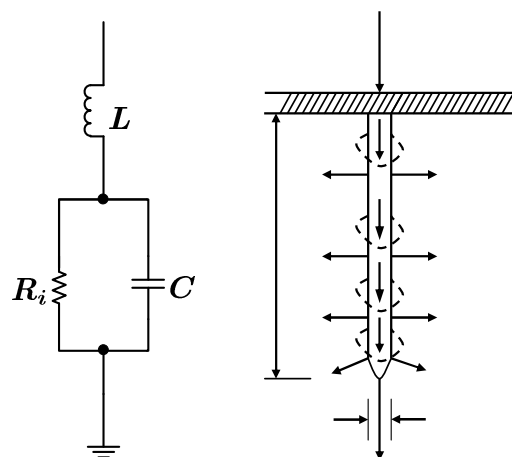
$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln \left( \frac{4l}{d} \right)} \times 10^{-9} \quad (3.10)$$

กระแสฟ้าผ่าไหลผ่านรากสายดิน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่รากสายดินดังสมการที่ (3.11)

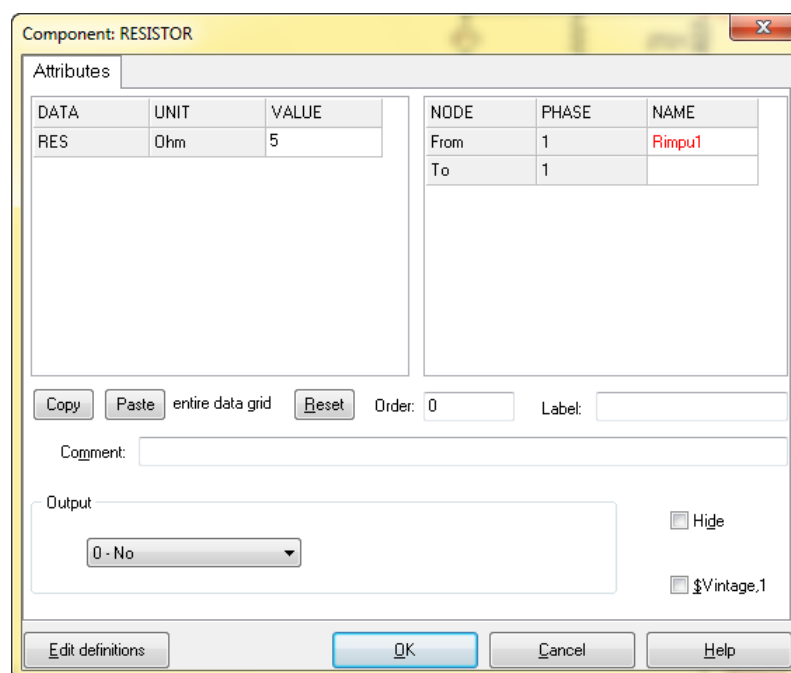
$$L = 2l \cdot \ln \left( \frac{4l}{d} \right) \times 10^{-7} \quad (3.11)$$

|       |              |     |                                                    |
|-------|--------------|-----|----------------------------------------------------|
| เมื่อ | C            | คือ | คาปาซิแตนซ์ของรากสายดิน (ฟารัด)                    |
|       | L            | คือ | อินดักแตนซ์ของรากสายดิน (เฮนรี่)                   |
|       | L            | คือ | ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)                       |
|       | D            | คือ | เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน (เมตร)             |
|       | $\epsilon_r$ | คือ | Relative Permittivity ของดิน ( $\epsilon_r = 10$ ) |

ดังนั้นวงจรสมมูลของรากสายดิน เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบรากสายดิน จะประกอบด้วย ความต้านทานอิมพัลส์ คาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ดังภาพที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของรากสายดิน



รูปที่ 3.14 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง

Component: IND\_RP

Attributes

| DATA | UNIT       | VALUE      |
|------|------------|------------|
| L    | mH         | 0.00397675 |
| Kp   | Damp. 5-10 | 7.5        |

| NODE | PHASE | NAME   |
|------|-------|--------|
| From | 1     | FTR1   |
| To   | 1     | Rimpu1 |

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output  
0 - No

☐ Hide  
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

รูปที่ 3.15 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง

Component: CAP\_RS

Attributes

| DATA | UNIT         | VALUE       |
|------|--------------|-------------|
| C    | ๓F           | 0.000251462 |
| Ks   | Damp 0.1-0.2 | 0.15        |

| NODE | PHASE | NAME   |
|------|-------|--------|
| From | 1     | Rimpu1 |
| To   | 1     |        |

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output  
0 - No

☐ Hide  
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

รูปที่ 3.16 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแท่ง

### 3.3.5 แบบจำลองสายดินนอกเสา

แบบจำลองสายดินภายนอกเสา จะเลือกใช้ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีตีเกลียว ขนาด 7.93 มิลลิเมตร ขนานลงมากับเสาไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อเข้าด้วยกันกับลวดเหล็กที่ฝังภายในเสาที่ยอดเสา สามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินภายนอก จากสมการที่ (3-12)

$$Z_{gc} = 60 \ln(h / er) - k \cdot \ln[1 + (rc / D)] \quad (3.12)$$

|       |          |     |                                                                                                          |
|-------|----------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $Z_{gc}$ | คือ | เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)                                                                           |
|       | $E$      | คือ | ลึกลับฐานธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.71828                                                                   |
|       | $H$      | คือ | ความยาวสายดินนอกเสา (เมตร)                                                                               |
|       | $R$      | คือ | รัศมีสายดินนอกเสา (เมตร)                                                                                 |
|       | $r_c$    | คือ | รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)                                                                              |
|       | $D$      | คือ | ระยะห่างระหว่างผิวเสากับแท่งตัวนำลงดิน (เมตร) มีค่า 1 เมตรซึ่งเป็นระยะที่เสิร์จอิมพีแดนซ์เริ่มมีค่าคงที่ |

โดยคำนวณค่า  $k$  จากสมการที่ (3.13)

$$k = 0.096 \cdot r_c + 13.95 \quad (3.13)$$

|       |       |     |                             |
|-------|-------|-----|-----------------------------|
| เมื่อ | $k$   | คือ | ค่าคงที่                    |
|       | $r_c$ | คือ | รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร) |

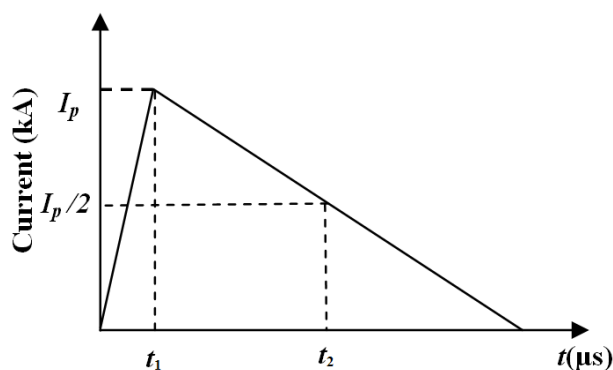
**ตารางที่ 3.6** พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา

| พารามิเตอร์                      | ขนาด (เมตร)   |
|----------------------------------|---------------|
| ความยาวของสายดินนอกเสา           | 20            |
| รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต             | 0.2560-0.4360 |
| รัศมีสายตัวนำลงดินนอกเสา         | 0.00396       |
| ระยะห่างจากผิวเสาสู่สายดินนอกเสา | 1             |

สร้างแบบจำลองสายดินนอกเสา ด้วยฟังก์ชัน Line Distributed/Transp. Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา ตามการคำนวณจากสมการที่ (3.12)

### 3.3.6 แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ต่อขนานอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลํ้าฟ้าผ่า และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะกำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีเวลานํ้าคลื่นช่วงเวลาเป็น  $\mu\text{s}$  ต่อช่วงเวลาหลังคลื่นไมโครวินาที มีค่าเท่ากับ 0.25/100  $\mu\text{s}$ , 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350  $\mu\text{s}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งในโปรแกรม ATP-EMTP ได้เลือกใช้แบบจำลองแหล่งกำเนิดแบบ SLOP RAMP ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

Component: SLOPE\_RA

Attributes

| DATA      | UNIT   | VALUE  |
|-----------|--------|--------|
| Amplitude | Ampere | 50000  |
| T0        | s      | 2.5E-7 |
| A1        | Ampere | 25000  |
| T1        | s      | 0.0001 |
| TStart    | s      | 0      |
| TStop     | s      | 0.2    |

| NODE | PHASE | NAME  |
|------|-------|-------|
| SR   | 1     | top21 |

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

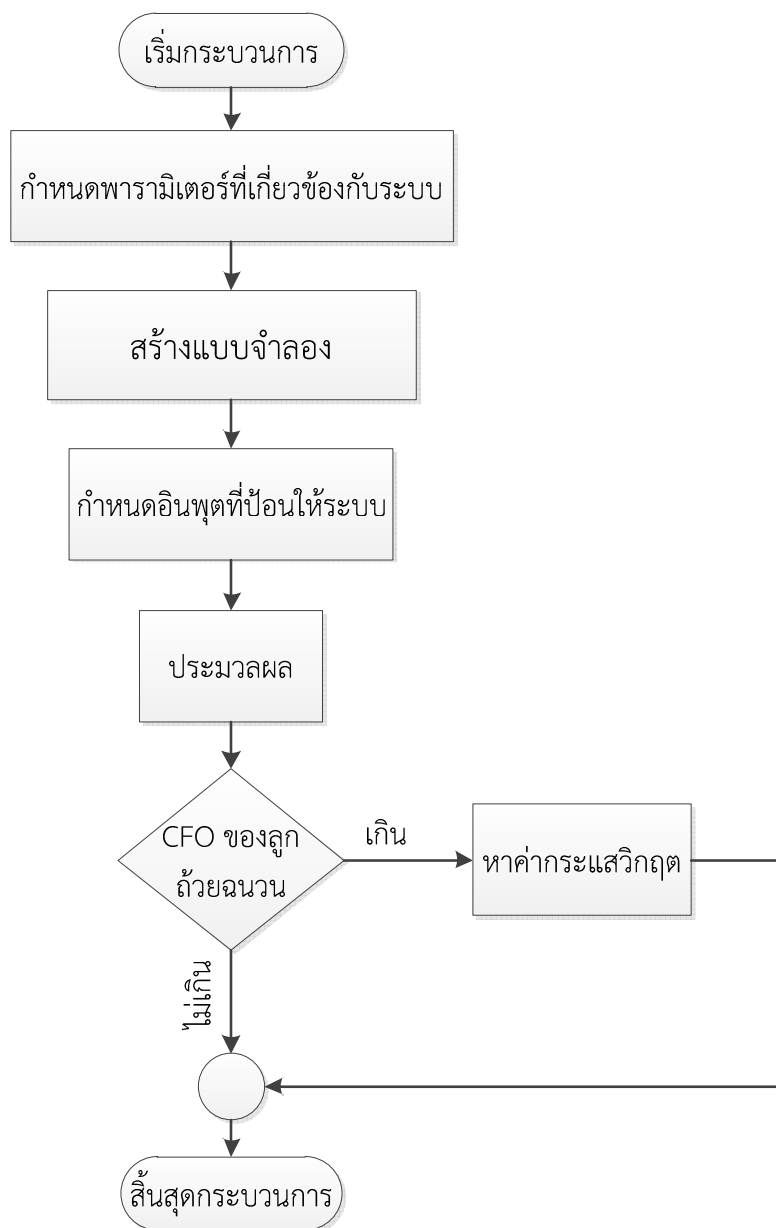
Type of source  
☒ Current  
☐ Voltage

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

รูปที่ 3.18 การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฟ้าผ่า

### 3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 3.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรม