

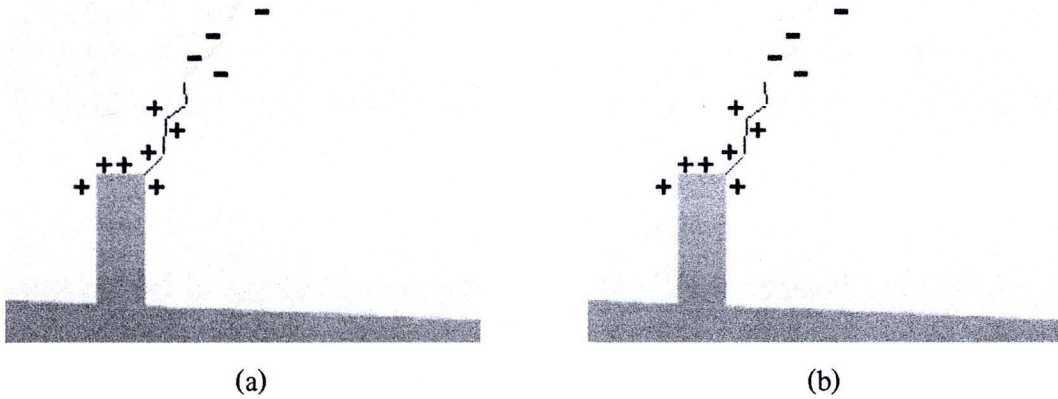
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (Lightning Strike)

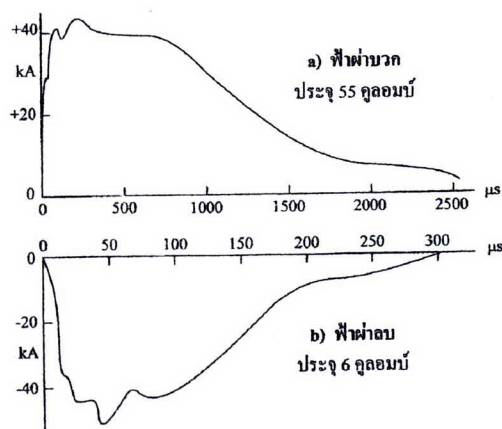
หากหากมองด้วยตาเปล่าเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นมา สิ่งที่สามารถสังเกตเห็น นั่นก็คือ ลำแสงกระแสฟ้าผ่าพุ่งลงสู่วัตถุที่มีความสูง (มากที่สุด) หรือลงสู่พื้นดินที่ราบ โลง ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและแฟคเตอร์บังคับเป็นอย่างไร ผลกระทบจากฟ้าผ่ามิได้จำกัดอยู่แค่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สินอย่างตรงๆ เพียงเท่านั้น แต่ผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าพ่ายังแพร่กว้างไปมากกว่าที่เราสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า อันตรายของฟ้าผ่าสามารถจำแนกออกมาได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ผลกระทบทางตรง (Direct Lightning) กับผลกระทบทางอ้อม (Indirect Lightning) อันตรายจากฟ้าผ่าในรูปแบบผลกระทบทางตรง นั่นก็คือ ความเสียหาย ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าได้ผ่าลงมาอย่าง ตรงๆ ส่วนผลกระทบทางอ้อมจากฟ้าผ่า ได้แก่ ไฟกระชอก (Surge) ทรานเซียนต์ และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ในทางปฏิบัติแล้ว ความเสียหาย ความเสื่อมสภาพ หรือผลการทำงานที่ผิดปกติของส่วนงานอิเล็กทรอนิกส์ความไวสูง ซึ่งทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำมีความไวในการตอบสนองที่เร็วมาก รองรับพลังงานไฟฟ้าได้ต่ำ ตัวอย่างเช่น IC มีความสามารถในการรองรับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดอยู่ใน ช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-7} จูล ล้วนแล้วแต่ได้รับอิทธิพลมาจากผลกระทบทางอ้อมจากฟ้าผ่าเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีใช่ผลกระทบทางตรง

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าก็คือการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นผิวโลก (หรือเป็นไปในทิศทางที่ตรงกันข้าม ซึ่งมีโอกาสดังกล่าวน้อยกว่า 1 %) สำหรับลักษณะการสะสมประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆโดยส่วนบนของก้อนเมฆจะมีการสะสมประจุไฟฟ้าบวก และฐานล่างของก้อนเมฆจะสะสมประจุไฟฟ้าลบ การเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้าส่งผลให้สนามไฟฟ้า (Electric Field) ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นผิวโลกมีความเข้มข้นที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะไปสอดคล้องกับทฤษฎีในเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) นั่นก็คือ จะก่อให้เกิดการสร้างประจุไฟฟ้าตามพื้นผิวดิน หรือผิวของโครงสร้างวัตถุต่างๆ ที่อยู่ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นผิวโลกเมื่อระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอยู่ในราว 10kV – 30 kV/ เมตร จะก่อให้เกิดการไอโอไนเซชันในอากาศประจุไฟฟ้าจากก้อนเมฆจะถูกถ่ายเทลงไปตามเส้นทางนำลงหรือ Leader (พิจารณารูปที่ 2.1(a)) ประจุไฟฟ้าที่ถูกถ่ายเทลงไปตามเส้นทางนำลง จะเหนี่ยวนำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้ามที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวโลกให้เคลื่อนที่ขึ้นไปหา โดยจะเรียกว่าเส้นทางนำขึ้น หรือ Streamer เมื่อเส้นทางนำขึ้นกับเส้นทางนำลงมาระทบกัน จะก่อให้เกิดการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจำนวนมหาศาลจากก้อนเมฆลงสู่พื้นผิวโลกหรือโครงสร้างวัตถุใด ๆ เรียกเส้นทางการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้างดกล่าวนี้นว่า Return Stroke Current ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 (a) เกิดเส้นทางนำขึ้น (b) เกิด return stroke current

จากข้อมูลบันทึกได้ในต่างประเทศพบว่า ประมาณ 80-85% เป็นฟ้าผ่าลบ ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าอาจกำหนดด้วยช่วงเวลาน้ำคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น เวลาช่วงน้ำคลื่น หมายถึง เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของคลื่นและช่วงเวลางานคลื่นหมายถึง เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าดังรูปที่ 2.2 [1]



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่า

ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่ามีทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อวงจรไฟฟ้าทั้ง conducted และ radiated disturbances ที่ทุกระดับแรงดัน ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นมีดังนี้ [2]

- ความร้อน (การหลอมละลายของอุปกรณ์ต่าง ๆ, ไฟไหม้, ระเบิด)

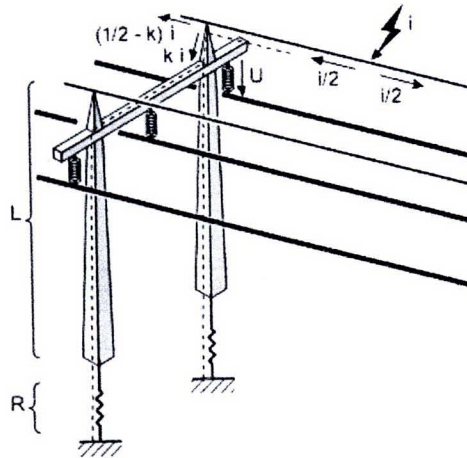
- อุปกรณ์ไฟฟ้าถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กความถี่สูง ซึ่งรวมทั้งการรบกวนโดยการนำกระแส, การเหนี่ยวนำของวงจร
- อุปกรณ์เกิดความเสียหาย ตัวอย่างเช่น เกิดการเบรคดาว์นเนื่องจากแรงดันเกิน หรืออายุการใช้งานฉนวนเสื่อมลง
- เกิดการหยุดชะงักของระบบไฟฟ้า
- เกิดอันตรายต่อมนุษย์หรือสัตว์



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีต่อสัตว์

2.3 กรณีฟ้าผ่าลงบนสายดินของเสาส่งไฟฟ้า

สำหรับเสาส่งไฟฟ้าที่มีสายดินแขวนอยู่ด้านบน (overhead ground wire) เพื่อล่อฟ้าดังรูปที่ 2.4 ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าระบบสายดินมีการก่อสร้างไม่เหมาะสมกับพฤติกรรมทรานเซียนต์ เช่น การทำให้ความต้านทานกระแสตรงต่ำ โดยการตอกรากสายดินแนวดิ่งยาวมากเกินไป ส่งผลให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำมีค่าสูง ดังนั้นขณะที่กระแสฟ้าผ่าวิ่งไปบนสายดินและแบ่งไหลลงสู่เสาส่งด้วยอัตราส่วน k เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าสูง U ตกคร่อมระหว่างสายดินกับสายไฟฟ้าที่แขวนอยู่อีกปลายข้างหนึ่งของฉนวนตามสมการที่ (2.1) เมื่อแรงดันดังกล่าวมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตอิมพัลส์ (impulse flashover voltage) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดการกระโดดข้ามของแรงดันระหว่างสายทั้งสอง (back flashover) เกิดเป็นรูปคลื่นแรงดันหน้าคลื่นชัน (steep-front wave voltage surge) วิ่งไปบนสายเฟส ทำให้ระบบป้องกันเห็นว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า [3]



รูปที่ 2.4 ไฟฟ้าลงบนสายดิน

$$U = k.(I.R_g + L.\frac{dI}{dt}) + V_{peak} \quad (2.1)$$

เมื่อ

R_g = ความต้านทานการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

L = ความเหนี่ยวนำเสาส่งไฟฟ้า

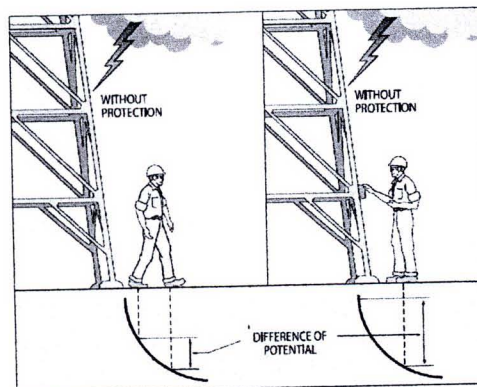
$\frac{dI}{dt}$ = อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า

V_{peak} = ค่ายอดแรงดันของระบบไฟฟ้า

2.4 แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

แรงดันช่วงก้าว คือ แรงดันที่แตกต่างระหว่างเท้าทั้งสองข้าง สาเหตุเนื่องมาจากการกระแสไฟฟ้าที่กระจายลงสู่ดิน

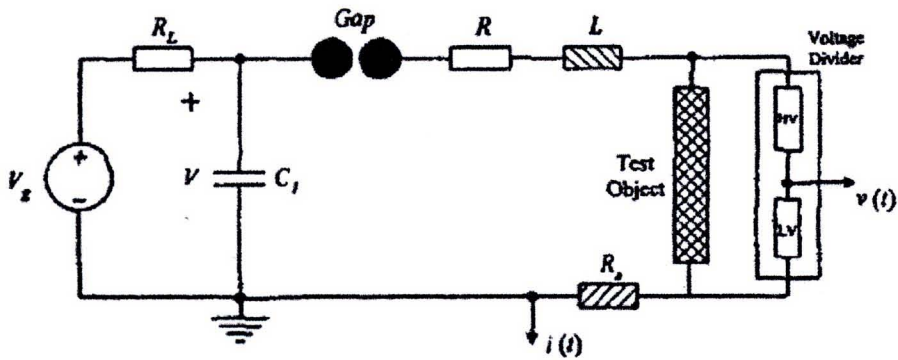
แรงดันสัมผัส คล้ายคลึงกับแรงดันช่วงก้าว แตกต่างกันที่กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านแขน และลำตัวของผู้สัมผัสลงสู่ดิน



รูปที่ 2.5 แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

2.5 การสร้างกระแสอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์โดยทั่วไปจะใช้หลักการวงจร Transient R-L-C ดังรูปที่ 2.6 [4]



รูปที่ 2.6 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

เมื่อ

V_g คือ แรงดันอัดประจุ (DC generator)

R_L คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแส

R_s คือ ความต้านทานชั้นที่ สำหรับวัดกระแสทดสอบ

L คือ ตัวเหนี่ยวนำ

C คือ ตัวเก็บประจุ

เมื่อตัวเก็บประจุถูกอัดประจุด้วยแรงดัน V_g และเกิดการคายประจุเมื่อแกปเกิดการสปาร์ก ได้กระแส i_m ตามสมการที่ (2.3) [5]

$$V = Ri_m + L \frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_m dt \quad (2.2)$$

$$i_m = \frac{V}{\omega L} [\exp(-\alpha t)] \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{R}{2L} \text{ และ } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.4)$$

เวลาที่กระแส i_m เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง ค่าสูงสุดครั้งแรก คือ

$$t_1 = t_f = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{\omega}{\sqrt{LC}} \right) = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\alpha} \right) \quad (2.5)$$

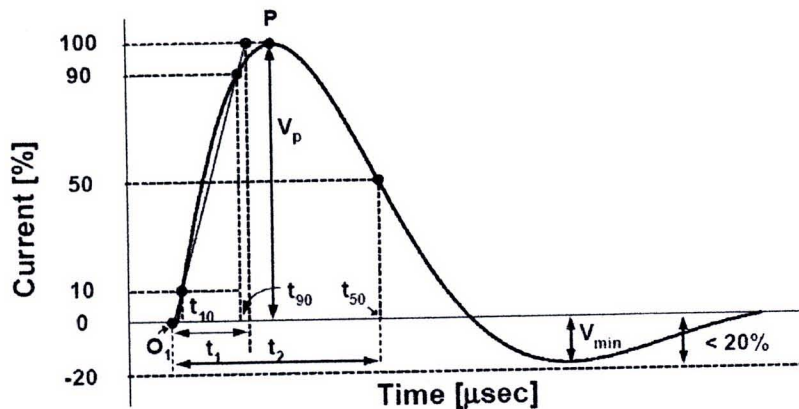
เวลาที่กระแส i_m ลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง คือ

$$t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (2.6)$$

พารามิเตอร์ของเวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหลังคลื่น T_2 ของกระแสอิมพัลส์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) จากค่าเวลาที่ 3 ค่า t_{10} , t_{90} และ t_{50} ที่ค่ากระแส 10%, 90% และ 50% ของค่าสูงสุดดังรูปที่ 2.7 [6]

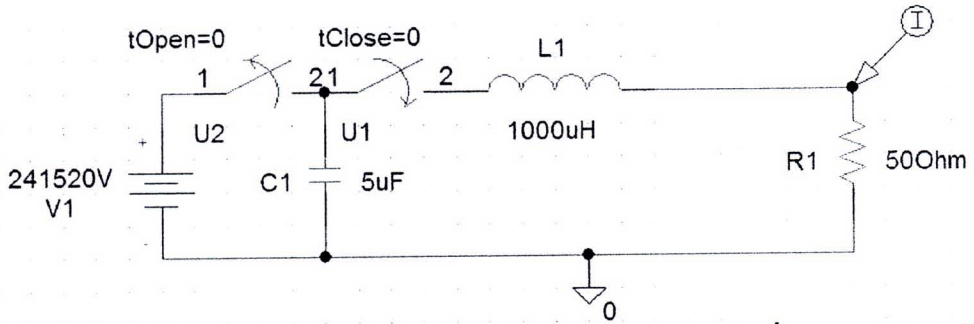
$$T_1 = \frac{t_{90} - t_{10}}{0.8} \quad (2.7)$$

$$T_2 = t_{50} - \frac{9t_{10} - t_{90}}{8} \quad (2.8)$$



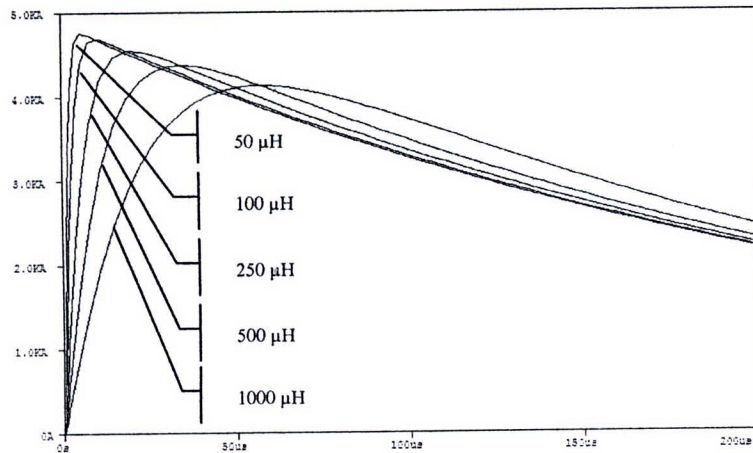
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และค่าพารามิเตอร์

การปรับลดเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ ต้องทำการปรับเพิ่มหรือลดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร ในการหาค่าของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงของหน้าคลื่น จะใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลอง สำหรับวงจรที่ใช้ในการจำลองดังรูปที่ 2.8



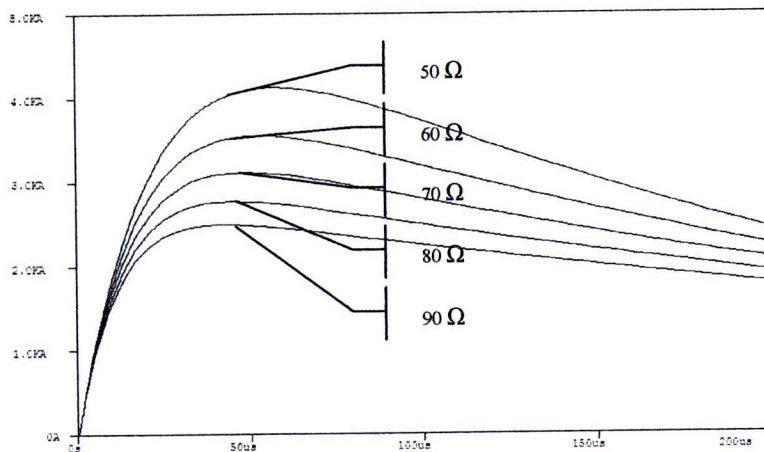
รูปที่ 2.8 วงจรจำลองหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงของหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์

กรณีที่ 1 ค่าความต้านทานคงที่และค่าความเหนี่ยวนำลดลง



รูปที่ 2.9 ผลการจำลองที่ค่าความต้านทานคงที่และความเหนี่ยวนำลดลง

กรณีที่ 2 ค่าความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 ผลการจำลองที่ความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อค่าความต้านทานคงที่และค่าความเหนี่ยวนำลดลงจะทำให้เวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าลดลง และเมื่อค่าความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าลดลงเช่นกัน

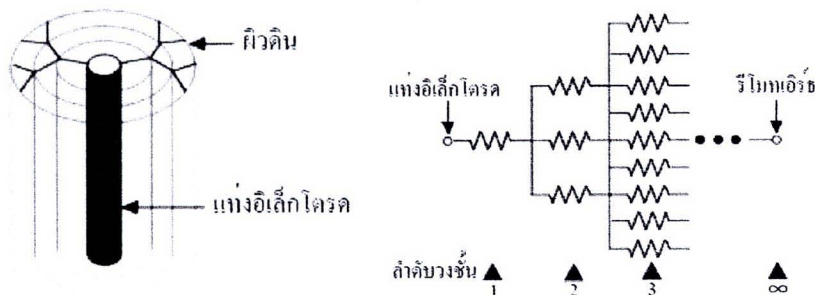
2.6 ความรู้เกี่ยวกับระบบรากสายดิน

การเชื่อมต่อเข้ากับระบบของอุปกรณ์ คือ การเตรียมเส้นทางเดินให้กับกระแสรั่วหรือกระแสไฟฟ้าขนาดสูงไหลลงสู่ดินโดยไม่ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตและอุปกรณ์ในบริเวณนั้น เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้ารั่วควรมีค่าความต้านทานไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ และเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าควรมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่สูงเกินไป ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการกระจายกระแสของรากสายดินได้แก่

1. ความต้านทานดิน
2. ความลึกในการฝังรากสายดิน
3. ความชื้นภายในดิน
4. อุณหภูมิ
5. ชนิดของรากสายดิน
6. พฤติกรรมทรานเซียนต์ภายใต้กระแสไฟฟ้าผ่า

2.6.1 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานของดิน เป็นตัวแปรหรือแฟกเตอร์ที่สำคัญต่อค่าความต้านทานของรากสายดิน ซึ่งการวัดค่าความต้านทานของรากสายดิน จะหมายถึง การวัดค่าความต้านทานดินโดยเทียบจากแท่งอิเล็กโทรด หรือจุดที่ทำการวัดไปยังรีโมทเอิร์ธ (Remote Earth) โดยจะเรียกค่าความต้านทานนี้ว่า ค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร หรือ โอห์ม-เซนติเมตร หรือ โอห์ม-นิ้ว เป็นต้น [7]



(a) รูปแบบจำลองของรากสายดิน

(b) วงจรสมมูลของวงชั้นดิน

รูปที่ 2.11 อิทธิพลของรากสายดินที่มีต่อความต้านทานดิน

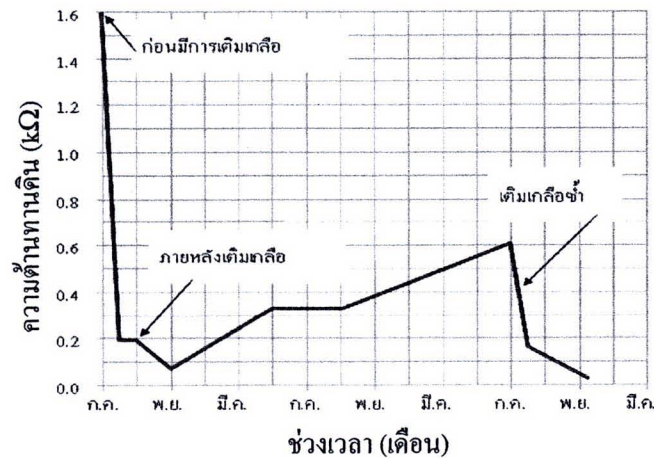
จากรูปที่ 2.11 (b) จะเห็นว่าความสามารถในการต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้ายังมีค่าต่ำลงเรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากรูปแบบของการต่อขนานกันของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และเมื่อถึงวงจรมอนตันต์ (∞) ซึ่งไม่รู้ว่ายู่ที่ไหน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และจุดที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับศูนย์ ก็คือรีโมทเอิร์ธ (Remote Earth) ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานโดยเทียบจากแท่งอิเล็กโตรดหรือจุดกราวนด์ที่ต้องการวัดเทียบไปยังรีโมทเอิร์ธ (Remote Earth) ก็คือ การวัดค่าความต้านทานรวมตามรูปแบบจำลองดังรูปที่ 2.11 (b)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความต้านทานดิน [8]

จำนวนจุดทดสอบ	ชนิดของดิน	ความต้านทานของดิน		
		ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
24	Fills and ground containing varying amounts of refuse such as cinders, ashes and brine waste	14	3.5	41
205	Clay, shale, adobe, gumbo, loam, and slightly sandy proportions of sand, gravel, and stones	21	2.0	98
137	Clay, adobe, gumbo, and loam mixed with varying proportions of sand, gravel, and stones	93	6.0	800
72	Sand, stones, or gravel with little or no clay or stones	554	35	2,700

ความต้านทานดินอาจจะลดลงได้ 15% ถึง 90% โดยการเติมสารเคมี (ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของดิน) สำหรับสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับใช้ลดความต้านทานดิน ได้แก่ โซเดียม คลอไรด์, แมกนีเซียม ซัลเฟต, คอปเปอร์ ซัลเฟต และแคลเซียม คลอไรด์ สำหรับสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างมากคือ เกลือ และแมกนีเซียม ซัลเฟต โดยทั่วไปการใช้สารเคมี จะใส่ที่รอบ ๆ รากสายดิน โดยป้องกันไม่ให้สัมผัสกับรากสายดินโดยตรง [9]

การเติมสารเคมีเป็นการแก้ปัญหาค่าความต้านทานดินสูง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพควรมีแผนการบำรุงรักษาเพื่อให้แน่ใจว่าดินมีความต้านทานต่ำดังรูปที่ 2.12



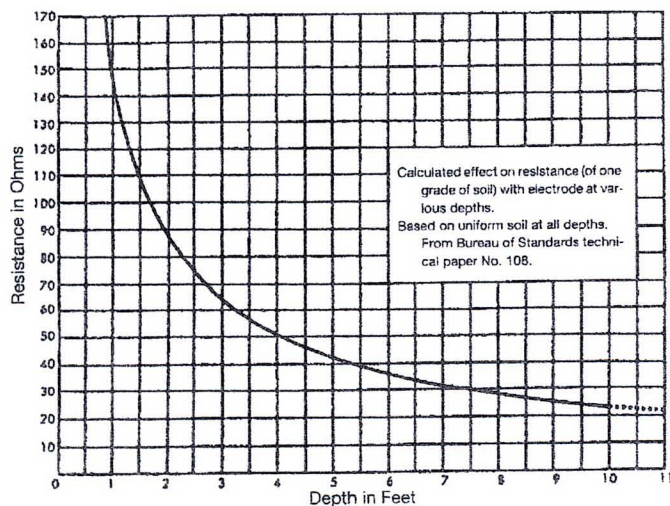
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการปรับปรุงความต้านทานดินด้วยเกลือ

2.6.2 ความลึกในการฝังรากสายดิน

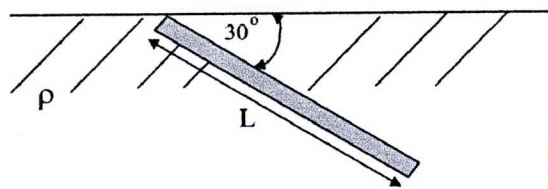
การฝังรากสายดินให้มีประสิทธิภาพ จำต้องทำให้ค่าความต้านทานของรากสายดินลดลงตามความลึก ซึ่งระดับความลึกที่เหมาะสมจะมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะของดิน ตัวอย่างของความต้านทานดินตามระดับความลึกดังรูปที่ 2.13 จากกราฟพบว่า ความลึกที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-9 m ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลต่อความลึกในการฝังรากสายดินคือ

1. ความต้านทานเฉลี่ยของชั้นดินที่ลึกลงไป
2. การเพิ่มขึ้นของกำลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการฝังรากสายดิน

ในกรณีที่ไม่สามารถตอกรากสายดินให้ลึกได้มาตรฐาน [10] แนะนำให้ติดตั้งรากสายดินเอียงทำมุม 30° กับแนวระดับ ดังรูปที่ 2.14 เพื่อให้ได้ความยาวของรากสายดินที่ฝังลึกลงไปในดินเพิ่มขึ้นและยังเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างรากสายดินกับดิน



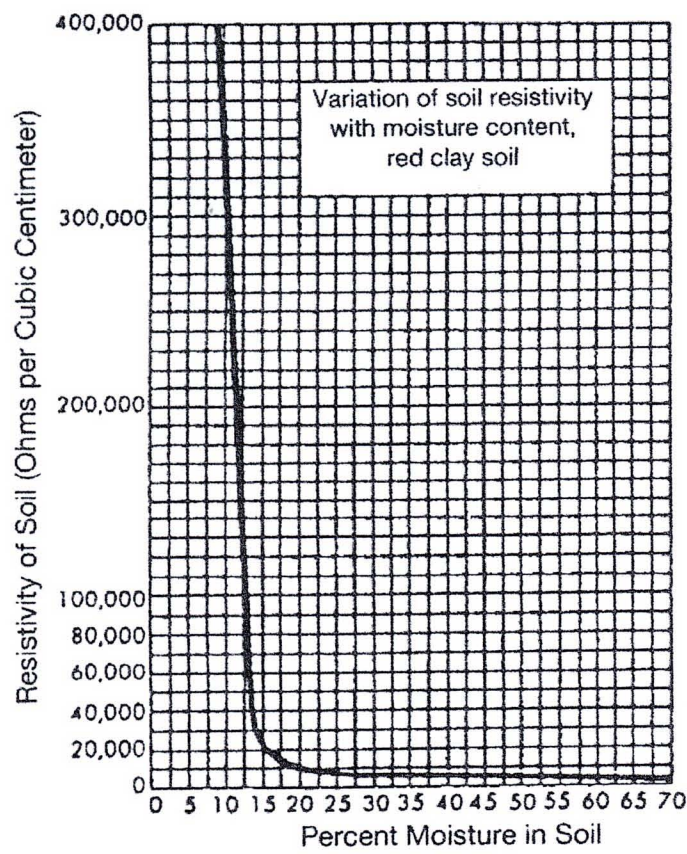
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความลึก



รูปที่ 2.14 การติดตั้งรากสายดินทำมุม 30°

2.6.3 ความชื้นภายในดิน

เปลี่ยนแปลงตามความชื้นของดิน เมื่อดินมีค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานของดินต่ำลง ดังรูปที่ 2.15

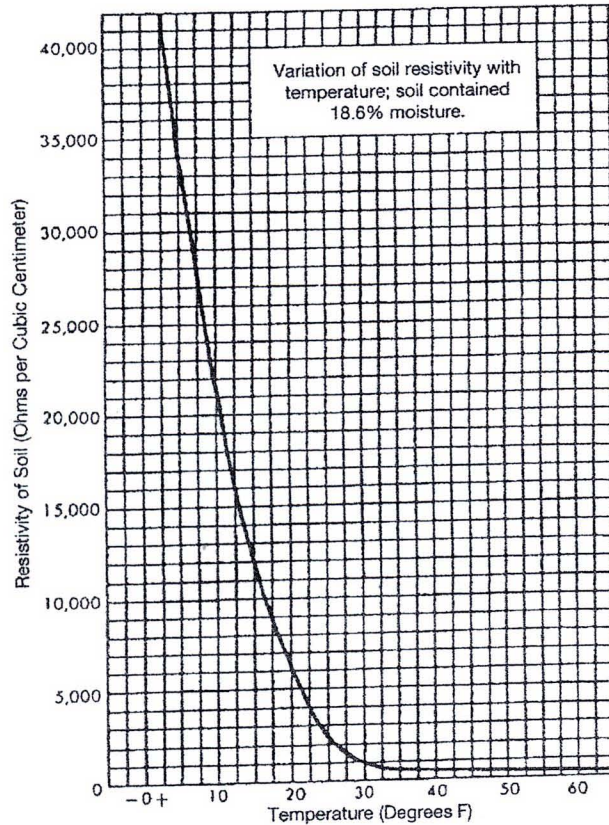


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความชื้นของดิน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 20 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 246323
เลขเรียกหนังสือ

2.6.4 อุณหภูมิ

เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของดินเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำลงดังรูปที่ 2.16

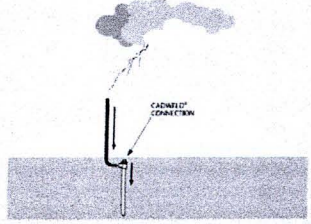
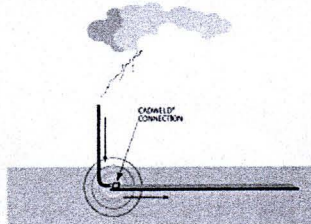
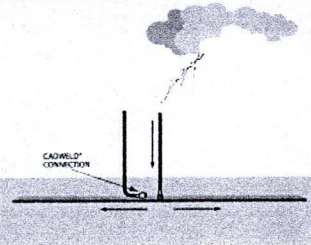
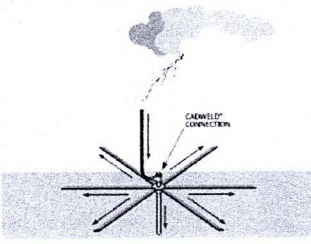
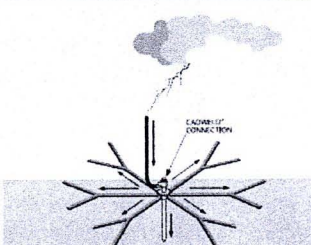
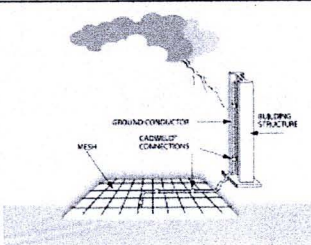


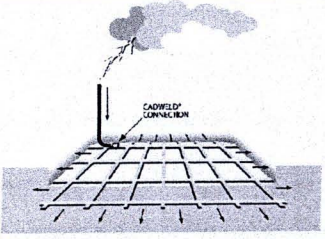
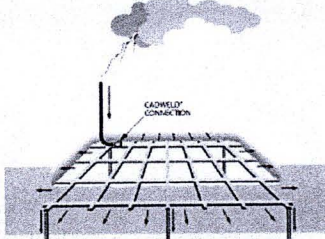
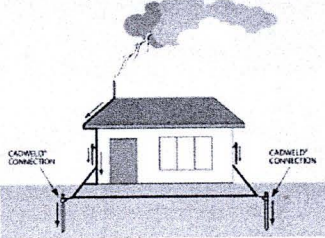
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับอุณหภูมิของดิน

2.6.5 ชนิดของรากสายดิน

พื้นฐานการติดตั้งรากสายดิน ควรทำให้ผิวของรากสายดินสัมผัสกับดินให้มากที่สุด การทำเช่นนี้ไม่เพียงแต่เป็นการลดความต้านทานของระบบรากสายดินให้ต่ำลง แต่ยังเป็นการปรับปรุงเสถียรภาพแอมเพเด้นซ์ของรากสายดินให้ดีขึ้น รูปร่าง จำนวน ความยาว และความลึก ของรากสายดิน จะขึ้นอยู่กับการใช้งาน ชนิดของดิน และขนาดของพื้นที่ สำหรับรูปแบบของการติดตั้งที่ใช้โดยทั่วไป มีดังตารางที่ 2.2

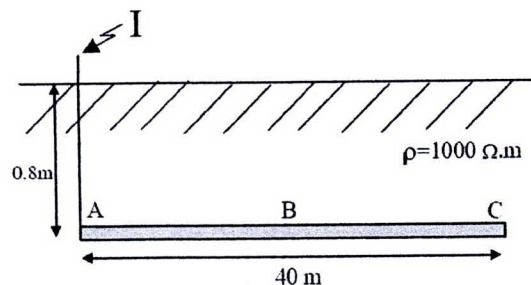
ตารางที่ 2.2 ชนิดของรากสายดิน

1. รากสายดินเดี่ยวแนวตั้ง รากสายดินชนิดนี้อาจจะเพียงพอสำหรับการติดตั้งระบบไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับกระแสฟ้าผ่ารากสายดินชนิดนี้อาจจะมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่ต่ำเพียงพอ	
2. รากสายดินเดี่ยวแนวอนที่ต่อจุดปล่อยกระแสตรงส่วนปลาย การติดตั้งรากสายดินแบบนี้เป็นทางเลือก สำหรับพื้นที่แจ้งหรือเป็นหิน การเจาะลงไปแนวตั้งทำได้ยาก แต่วิธีนี้ก็ไม่น่าแนะนำ เพราะแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสจะสูงมาก	
3. รากสายดินเดี่ยวแนวอนที่ต่อจุดปล่อยกระแสตรงกลาง การติดตั้งวิธีนี้กระแสจะแยกไหลเป็น 2 ทิศทาง และทำให้อิมพีแดนซ์ต่ำลง แต่วิธีนี้ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า	
4. รากสายดินแบบแนวรัศมีเดี่ยว การติดตั้งแบบนี้เหมาะสมสำหรับการป้องกันฟ้าผ่า ในพื้นที่ที่มีความต้านทานปานกลาง รัศมีสามารถขยายออกไปได้เป็นระยะทาง 100 ฟุต	
5. รากสายดินแบบแนวรัศมีทวิคูณ เหมาะสำหรับการป้องกันฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าจะแบ่งไหลแยกไปตามตัวนำ ทำให้มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ลดอันตรายจากแรงดันอย่างก้าว	
6. รากสายดินแบบฐานราก ได้แก่ตัวนำทองแดง หรือเหล็กชุบสังกะสีฝังในคอนกรีต ซึ่งรากสายดินแบบนี้ต้องดำเนินการติดตั้ง ตั้งแต่ตอนที่เริ่มก่อสร้างอาคาร โดยทั่วไปรากสายดินแบบนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมใช้	

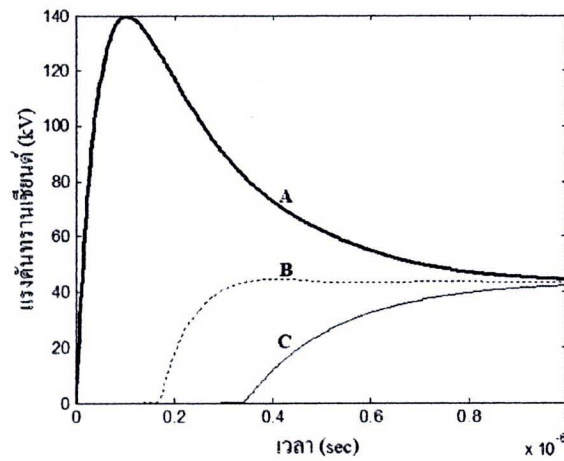
7. รากสายดินแบบกริด การติดตั้งแบบนี้นิยมใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปจะออกแบบให้มีความต้านทาน 1 โอห์ม	
8. รากสายดินแบบกริดผสมรากสายดินเดี่ยวแนวดิ่ง เพื่อช่วยให้ความต้านทานดินต่ำลง	
9. รากสายดินแบบวงแหวนเป็นรากสายดินที่มีตัวนำวนรอบเป็นวงแหวน หรือ วนตัวนำรอบอาคาร ทำหน้าที่ให้ความต้านทานดินต่ำ นอกจากนี้จะทำให้แรงดันย่างก้าวน้อยลง (step voltage) สำหรับคนที่ก้าวออกจากตัวอาคาร ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าหรือเกิดลัดวงจรระบบไฟฟ้าลงดิน	

2.6.6 พฤติกรรมทรานเซียนต์ภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ในการออกแบบรากสายดินนอกจากการลดค่าความต้านทานดินแล้ว ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงการลดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งการเพิ่มความยาวรากสายดินแม้ว่าจะช่วยลดค่าความต้านทานของระบบรากสายดิน ค่าความเหนี่ยวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามความยาว ทำให้การกระจายของแรงดันบนตัวนำไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง โดยค่ายอดแรงดันจะมีขนาดลดลงตลอดความยาวของตัวนำและมีแนวโน้มอ้อมตัวเมื่อตัวนำมีความยาวถึงค่า ๆ หนึ่ง



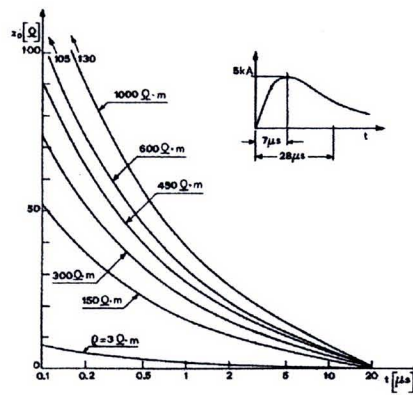
รูปที่ 2.17 การจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 40 m



รูปที่ 2.18 การกระจายของแรงดันบนรากสายดิน

2.7 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน

Mazzetti และ Vaca [11] ได้ให้ความหมายของความยาวประสิทธิผลว่า เป็นความยาวที่เพียงพอต่อการกระจายกระแสไฟฟ้าลงสู่ดิน โดยความยาวประสิทธิผลมีแนวโน้มลดลงตามค่าความต้านทานดินดังรูปที่ 2.19 แต่ยังไม่ได้ระบุถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณหาความยาวประสิทธิผล



รูปที่ 2.19 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับฟังก์ชันของความต้านทานดิน

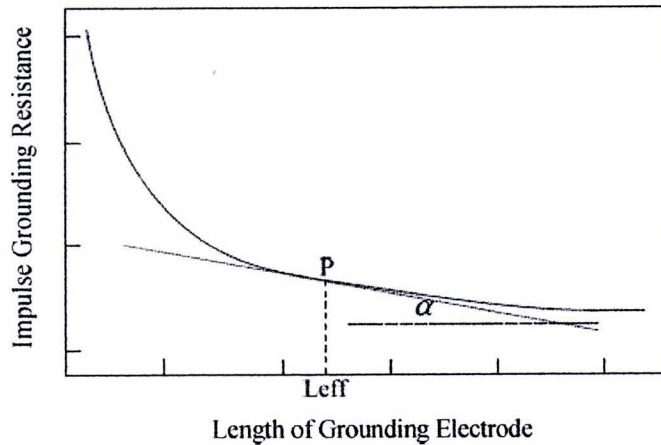
Gupta และ Thapar [12] ได้ทำการศึกษาความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน โดยพบว่า จากความยาวของรากสายดินทั้งหมดนั้น จะมีเพียงความยาวส่วนหนึ่งนับจากจุดที่ปล่อยกระแส ที่สามารถกำหนดค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเรียกความยาวนี้ว่าความยาวประสิทธิผล ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$l_e = A(\rho \cdot \tau)^{0.5} \quad (2.9)$$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานดิน τ คือ เวลาหน้าคลื่น ซึ่งความยาวประสิทธิผลจะเกิดขึ้นเมื่อ อัตราส่วน RT/L_s มีค่าเท่ากับ 0.57 เมื่อ R คือ ความต้านทานดินของกระแสความถี่ต่ำ T คือ เวลาหน้าคลื่น ($\mu s.$) และ L_s คือ ความเหนี่ยวนำรวมของรากสายดินทั้งหมด สัมประสิทธิ์ A มีค่า 1.4 สำหรับรากสายดินแนวนอนที่ปล่อยกระแสตรงปลายตัวนำ มีค่า 1.55 สำหรับรากสายดินแนวนอนที่ปล่อยกระแสตรงกึ่งกลางตัวนำ และมีค่า 1.85 สำหรับรากสายดิน 4 แฉก ที่ปล่อยกระแสตรงจุดกึ่งกลางที่เชื่อมตัวนำเข้าด้วยกัน

J. L. He [13] ได้เสนอว่า ความยาวประสิทธิผลคำนวณได้จากค่าอนุพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ของรากสายดินเทียบกับความยาวมีค่าไม่เกิน Tangent ของมุม $\alpha = 5^\circ$ ดังสมการที่ (2.10) และรูปที่ 2.20

$$-\frac{dz_I}{dl} \leq \tan \alpha \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.20 ค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาว

L. Grece [14] เรียกความยาวประสิทธิผลว่า ความยาวลักษณะ (characteristic length) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ลักษณะ (characteristic frequency in F_c MHz) และความต้านทานดิน ρ จากผลการศึกษาในดินที่มีความต้านทานดินต่ำ ความยาวลักษณะจะมีค่าสั้น และจะเพิ่มขึ้นตามความต้านทานดินดังสมการที่ (2.11)

$$l_c = 0.6 (\rho / F_c)^{0.43} \quad (2.11)$$

พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ [3] ได้เสนอแนวคิดจุดคุ้มค่า (optimum point) ทางคณิตศาสตร์ คือ วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวต่ำสุด (minimize per unit length impedance method) สำหรับหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวดิ่ง และรากสายดินแนวนอน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. หาคความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ power function

$$Z = aL^b + c \quad (2.12)$$

เมื่อ a, b และ c หาได้จากการทำ curve fitting

2. หาค่า impulse impedance ต่อหน่วย โดยการหารฟังก์ชัน Z ในสมการที่ (2.12) ด้วย L ดังสมการที่ (2.13)

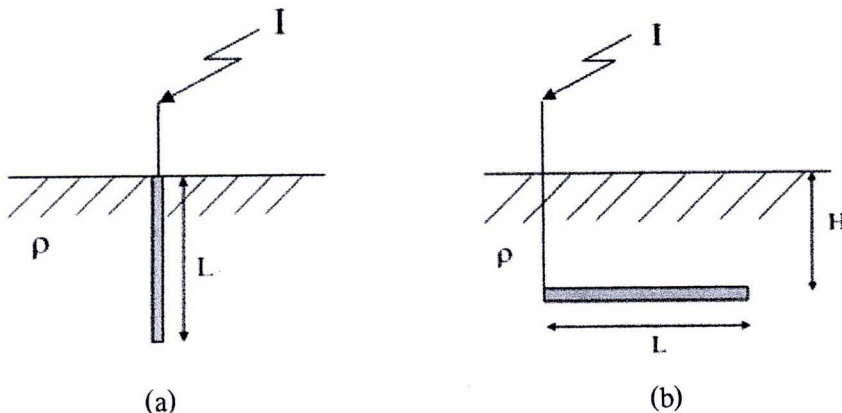
$$\frac{Z}{L} = \frac{aL^b + c}{L} = aL^{b-1} + cL^{-1} \quad (2.13)$$

3. หาค่าอนุพันธ์ Z/L แล้วกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อหาค่าความยาวตรงจุดต่ำสุดดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{d(Z/L)}{dL} = 0 \quad (2.14)$$

แก้สมการหาค่าความยาวประสิทธิผล l_e ดังสมการที่ (2.15)

$$l_e = \left| \frac{c}{a(b-1)} \right|^{1/b} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.21 การทดลองหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน (a) แนวดิ่ง (b) แนวนอน

เมื่อได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแส ก็จะหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน จากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันต่อค่ายอดกระแสตามสมการที่ (2.16)

$$Z = \frac{V_{peak}}{I_{peak}} \quad (2.16)$$

หลังจากได้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแส ก็จะนำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มาทำ curve fitting กับความยาวรากสายดินด้วย power function ตามสมการที่ (2.12) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a, b และ c

เนื่องจากการหาความยาวประสิทธิผลมีวิธีการหาหลายแบบตามงานวิจัยต่าง ๆ เช่น การหาความยาวประสิทธิผลของ Gupta และ Thapar ตามสมการที่ (2.9) แต่การหาความยาวตามวิธีการนี้ไม่ได้กล่าวถึงสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการหาความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวดิ่ง

งานวิจัยของ L. Grcev ได้กล่าวว่า ความยาวประสิทธิผลมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ลักษณะของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามสมการที่ (2.11) แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดความถี่ลักษณะที่สอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ทำได้ยาก

การหาความยาวประสิทธิผลของ พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ ด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวต่ำสุด เป็นวิธีการหาความยาวจากจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวตรงจุดที่กราฟมีความชันเป็นศูนย์ จะได้ความยาวประสิทธิผลที่มีความยาวมาก ซึ่งจากการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดิน ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มีแนวโน้มคงที่ ที่ความยาวของรากสายดินในช่วงที่ไม่ยาวมากนัก ซึ่งจากการหาความยาวด้วยวิธีของ J. L. He มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่พิจารณาได้จากกราฟมากกว่า อีกทั้งวิธีการนี้ยังสามารถใช้หาความยาวประสิทธิผลได้ทั้งรากสายดินแนวดิ่งและรากสายดินแนวนอน

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้การหาค่าความยาวประสิทธิผลตามวิธีการของ J. L. He

2.8 หลักการทดลองย่อส่วน

เนื่องจากการทดลองด้วยขนาดที่เท่ากับของจริงยังมีข้อจำกัดดังนั้น จะเลือกใช้ทฤษฎีการทดลองย่อส่วน ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลองภาคสนามกับผลการทดลองที่ได้จากการย่อส่วน [15] ยืนยันว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน อีกทั้งยังง่ายต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความลึกของรากสายดิน ความต้านทานดิน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะไหลลงสู่ดิน เกิดสนามไฟฟ้า (E) รอบรากสายดินดังสมการที่ (2.17)

$$E = J\rho_i \quad (2.17)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นของกระแส และ ρ_i คือ ความต้านทานดิน ขณะกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดิน เมื่อสนามไฟฟ้าในดินรอบรากสายดินเกินค่าสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์วิกฤติของดิน ดินรอบรากสายดินจะแตกตัว ความต้านทานของดินที่เกิดการแตกตัวจะต่ำลงมาก

ในการจำลองปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ทดลองภายในห้องปฏิบัติการ จะต้องเหมือนกับสภาพจริง ดังนั้น ค่าความต้านทานดินและค่าสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์วิกฤติของดินของทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.18) และ (2.19)

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (2.18)$$

$$E_{01} = E_{02} \quad (2.19)$$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานของดิน E_0 คือ ค่าสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์วิกฤติของดิน การทดลองภายในห้องปฏิบัติการแทนด้วย 2 สภาพจริงแทนด้วย 1 ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางดินของทั้งสองระบบดังสมการที่ (2.20)

$$v_1 = v_2 \quad (2.20)$$

และปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ในรูปอัตราส่วน n เท่าของค่าในสภาพจริงได้แก่ ความยาวรากสายดิน แรงดันอิมพัลส์ กระแสอิมพัลส์ และอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.21)- (2.24)

$$l_1 = nl_2 \quad (2.21)$$

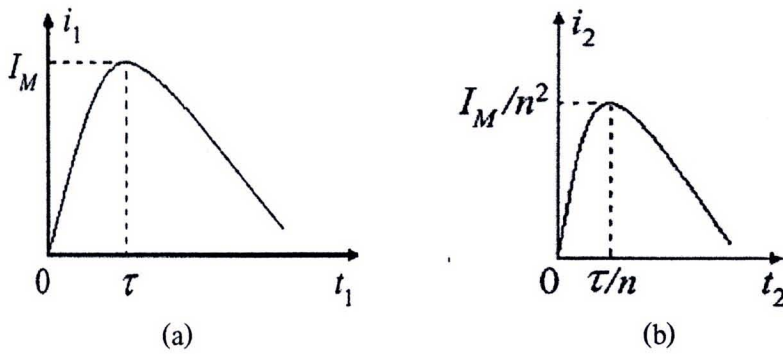
$$u_1 = nu_2 \quad (2.22)$$

$$i_1 = n^2 i_2 \quad (2.23)$$

$$Z_{I1} = \frac{1}{n} Z_{I2} \quad (2.24)$$

ในการทดลองย่อส่วน เวลาหน้าคลื่นจริงของกระแสอิมพัลส์จะถูกทำอัตราส่วน n เท่า ดังสมการที่ (2.25) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริงและรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลองที่ใช้ในการทดลองย่อส่วนแสดงดังรูปที่ 2.22

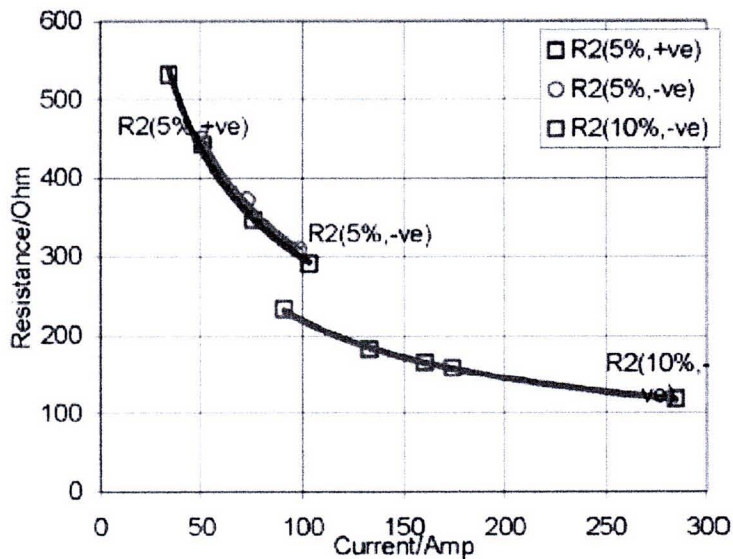
$$\tau_1 = n\tau_2 \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.22 (a) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริง (b) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลอง

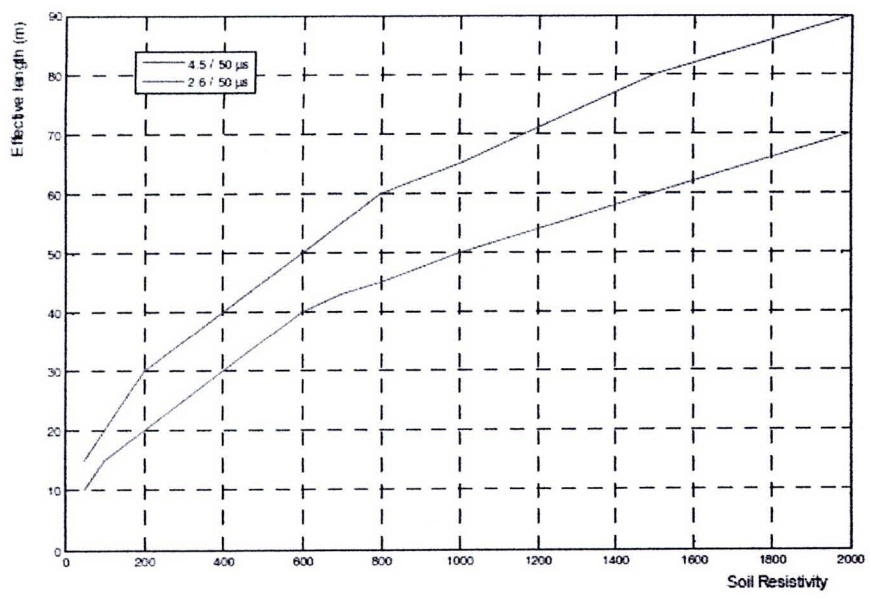
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Idris, Mohamad Nor และ Ahmad [16] ได้ศึกษาผลกระทบของชั่วของอิมพัลส์ที่มีต่อรากสายดิน พบว่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ เมื่อเปรียบเทียบค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของชั่วบวกและชั่วลบ ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของชั่วบวกจะต่ำกว่าชั่วลบดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับกระแส
จากการทดลองของ Idris, Mohamad Nor และ Ahmad

Ivica, Rino และ Dragan [17] ศึกษาถึงความยาวประสิทธิภาพของรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.6/50 μ s. และ 4.5/50 μ s. ซึ่งมีเวลานำคลื่นที่แตกต่างกัน และได้อธิบายว่า ที่เวลานำคลื่นสั้นมาก ๆ จะมีความถี่สูง ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดินเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้ความยาวประสิทธิภาพของรากสายดินสั้นลงตามเวลานำคลื่นที่ลดลงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน