

## การทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบกราวด์สายดิน Lightning Response Testing of Grounding System

สำริง อินทาม้า นิมิต บุญภิรมย์ วรรษชัย จูอนุวัฒน์กุล และ วันชัย จันไกรผล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[samroeng.hi@spu.ac.th](mailto:samroeng.hi@spu.ac.th), [nimit.bo@spu.ac.th](mailto:nimit.bo@spu.ac.th), [parachai.ju@spu.ac.th](mailto:parachai.ju@spu.ac.th) และ [wanchai.ch@spu.ac.th](mailto:wanchai.ch@spu.ac.th)

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้เป็นการทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบกราวด์สายดินด้วยการพิจารณาชนิดของดิน โดยทำการตรวจวัดค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังด้วยเครื่องวัดความต้านทานดินโดยวิธีการวัดแบบ 3 จุดและทำการทดสอบการตรวจวัดค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ด้วยเครื่องจำลองกระแสฟ้าผ่า จากผลการทดสอบพบว่ากรณีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho$  น้อยกว่า 100 โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{AC} < R_{imp}$  และสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha$  จะมีค่ามากกว่า 1 และเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน  $\rho$  มีค่ามากกว่า 100 โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{AC} > R_{imp}$  และสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นในการออกแบบระบบกราวด์สายดิน เมื่อทราบค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho$  ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha$  หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง,  $R_{AC}$  และค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{imp}$  หากค่าความต้านทานใดมีค่ามากกว่าก็นำค่าความต้านทานดินนั้นไปทำการออกแบบระบบกราวด์สายดินต่อไป

**คำสำคัญ:** ความต้านทานจำเพาะของดิน ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง ความต้านทานดินอิมพัลส์ สัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน

### Abstract

In this paper presents the lightning response testing of grounding system by considering the type of soil to effect of grounding resistance. In this grounding resistance test at power frequency will measure using the 3-point method and impulse grounding resistance using impulse tester. From testing results found that in the case of soil resistivity value,  $\rho$  less than 100 ohm-meter, the grounding resistance values at the power frequency are less than the impulse grounding resistance,  $R_{AC} < R_{imp}$  and the impulse coefficient of the soil,  $\alpha$  is more than 1. While in the case of soil resistivity value,  $\rho$  more than 100 ohm-meter, the grounding resistance values at the power frequency are more than the impulse grounding resistance,  $R_{AC} > R_{imp}$  and the impulse coefficient of the soil value,  $\alpha$  is less than 1. Therefore, the grounding system design should be known the soil resistivity value,  $\rho$  then the impulse

coefficient or ratio of grounding resistance at power frequency and impulse grounding resistance can be found. If any resistance is greater than that, take that resistance to further design a grounding system later.

**Keywords:** Soil resistivity, Grounding resistance at power frequency, Impulse grounding resistance, Impulse coefficient

### 1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนชื้นที่มีอัตราการเกิดฝนฟ้าคะนองค่อนข้างสูง ทำให้มีความหนาแน่นของจำนวนผ่าฟ้าผ่าสูงภาคพื้นดิน,  $N_g$  ปริมาณสูงไปด้วย ดังนั้นคุณสมบัติของระบบกราวด์สายดินภายใต้สภาวะฟ้าผ่าจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากต่อความปลอดภัยในชีวิตทรัพย์สินและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

กราวด์สายดินในระบบป้องกันฟ้าผ่ามีไว้เพื่อทำหน้าที่กระจายกระแสฟ้าผ่าไปลงดินให้รวดเร็วที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันเกิดจากการสัมผัส (touch voltage) และแรงดันช่วงก้าว (step voltage) ต่อผู้ที่อยู่ใกล้เคียงอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างนั้นๆ ส่วนการต่อลงดินในระบบไฟฟ้าแรงดันนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้ไฟฟ้าในอาคาร และเพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันสามารถเปิดวงจรออกได้อย่างปลอดภัยเมื่อมีการเกิดลัดวงจรขึ้น และสุดท้ายจุดต่อลงดินของทุกระบบจะต้องต่อเชื่อมเข้าด้วยกัน ณ จุดต่อลงดินเดียวกัน

ดังนั้นในบทความนี้ จึงได้ทำการทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบกราวด์สายดินด้วยการพิจารณาชนิดของดิน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์และค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังและค่าความต้านทานจำเพาะของดิน  $\rho$

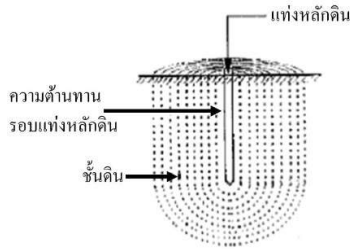
### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความต้านทานดินของแท่งหลักดิน (Grounding resistance)

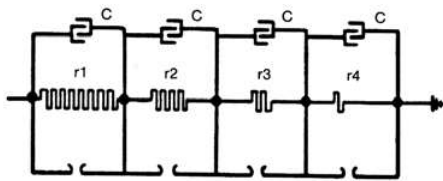
ค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ความต้านทานแท่งหลักดิน ความต้านทานของหน้าผิวสัมผัสระหว่างแท่งหลักดินกับดิน และความต้านทานดินรอบๆแท่งหลักดิน ปกติแล้วความต้านทานของดินรอบๆแท่งหลักดินจะมีผลต่อค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ส่วนประกอบของสารเคมีในดิน ระดับความชื้น และอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 1 และพฤติกรรมของแท่งหลักดินสามารถแสดงได้ตามแบบจำลองดังในรูปที่ 1 ข) ปกติดินจะมี

PW-21

พฤติกรรมเป็นลักษณะตัวต้านทานและไดอิเล็กทริกในตัว ซึ่งความต้านทานของแท่งหลักดินจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ความต้านทานจำเพาะของดิน ขนาดและความยาวของแท่งหลักดิน



ก) ความต้านทานของแท่งหลักดิน

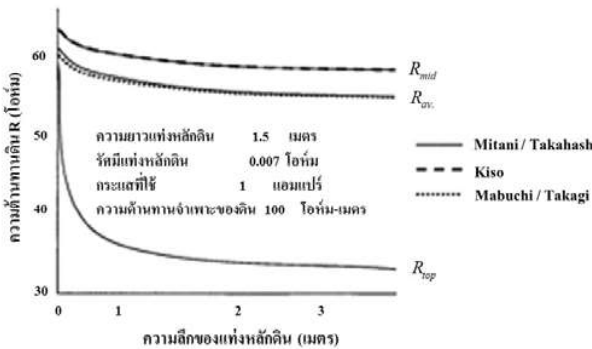


ข) แบบจำลองของแท่งหลักดิน

รูปที่ 1 ความต้านทานและแบบจำลองของแท่งหลักดิน [3]

## 2.2 ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังหรือในสภาวะคงตัว [1]

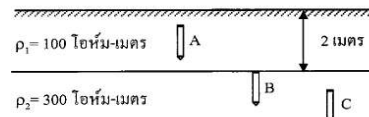
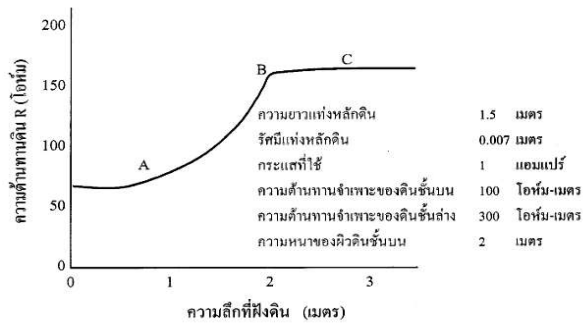
ความต้านทานดินนี้ก็หมายถึงค่าความต้านทานดิน ที่ความถี่กำลังหรือในสภาวะคงตัวนั่นเอง กล่าวคือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่ความถี่กำลัง (50/60 Hz) ไหลผ่านแท่งหลักดินลงไปในดิน และใช้แท่งหลักดินเป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้าลงดิน ค่าความต้านทานดินจะขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของแท่งหลักดิน ค่าความต้านทานดินจะมีค่าลดลง เมื่อมีการฝังแท่งหลักดินลึกมากขึ้นลงในดิน แต่เมื่อฝังลึกลงไปถึงจุดหนึ่งความต้านทานดินก็ไม่ลดลงอีก ด้วยเหตุนี้เองแท่งหลักดินจึงได้มีการทำออกมาให้มีความยาว 2-3 เมตร ความต้านทานกับความลึกของการฝังแท่งหลักดินในดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ สังเกตจะเห็นว่ากรณีนี้กระแสที่ใช้มีค่าต่ำมาก ดังนั้นความต้านทานดินอิมพัลส์กับความต้านทานดินที่ได้จากการวัดจึงมีค่าเกือบเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2



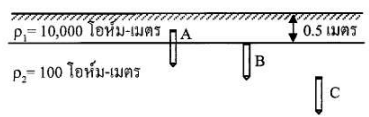
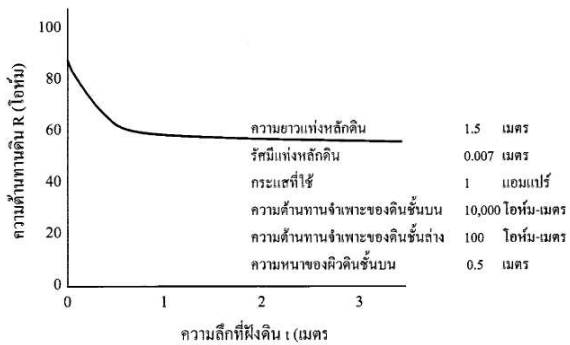
รูปที่ 2 ความต้านทานดินแปรผกผันกับความลึกที่ฝังดิน

เมื่อ  $R_{mid}$  ความต้านทานที่กึ่งกลางแท่งหลักดิน,  
 $R_{av}$  ความต้านทานเฉลี่ยทั้งแท่งหลักดิน  
 $R_{top}$  ความต้านทานที่โคนแท่งหลักดิน

กรณีฝังแท่งหลักดินในดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะไม่เท่ากันจะได้ผลต่างกัน ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบที่มีการฝังแท่งหลักดินที่ความลึกต่างๆในดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและชั้นล่างไม่เท่ากัน ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 3



ก) ดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าของดินชั้นล่าง



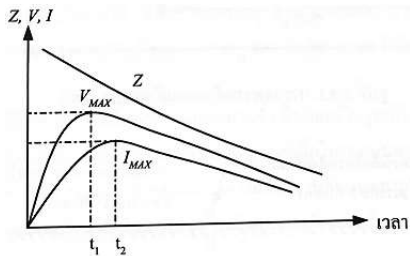
ข) ดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าของดินชั้นล่าง

รูปที่ 3 ความต้านทานดินของแท่งหลักดินที่ฝังในดินสองชั้น

## 2.3 อิมพัลส์ของดินตามเวลา เมื่อสัญญาณกระแสเป็นอิมพัลส์ [1,2]

อิมพัลส์ของดินหรือความต้านทานดินอิมพัลส์เมื่อสัญญาณกระแสเป็นอิมพัลส์มีค่าไม่คงที่ ขึ้นกับช่วงขณะสัญญาณแรงดันและกระแสในช่วงนั้นว่ามีค่าเท่าใด จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการวัดค่า

อิมพีแดนซ์ของดินเมื่อสัญญาณกระแสเป็นอิมพัลส์จะได้อุปกรณ์คลื่นแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเมื่อต้องการนำอิมพีแดนซ์ของดินมาคิดก็ให้คิดที่ค่าแรงดันและกระแสสูงสุดนำมาคำนวณอิมพีแดนซ์ แม้ว่าจะไม่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อิมพีแดนซ์ของดิน เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสอิมพัลส์ไหลผ่าน

อิมพีแดนซ์ของดินหรือความต้านทานดินอิมพัลส์

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad (1)$$

เมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบบรากสายดิน จะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่บรากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของดิน สามารถหาได้จากสมการ [4]

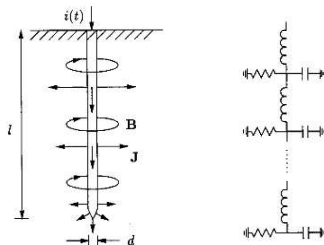
$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln(4l/d)} \times 10^{-9} \quad F \quad (2)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ relative permittivity ของดิน ( $\epsilon_r = 10$ )

กระแสในบรากสายดินและในดินจะมีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ดังนั้นความเหนี่ยวนำที่บรากสายดิน หาได้จากสมการ [1,4]

$$L = 2l \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \times 10^{-7} \quad H \quad (3)$$

วงจรมูลของบรากสายดินในสภาวะความถี่สูง ประกอบไปด้วยความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานของบรากสายดิน[4] ได้ดังแสดงตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรมูลของระบบบรากสายดินในสภาวะความถี่สูง(จากผลของกระแสฟ้าผ่า)

ส่วนความต้านทานดินอิมพัลส์ จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงทางเรขาคณิตของบรากสายดิน(ขนาดและความลึก) สภาพความต้านทาน

ของดิน รูปคลื่นและขนาดของกระแสอิมพัลส์ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานที่ความถี่กำลัง ตามสมการ[2]

$$R_i = \alpha R_o \quad (4)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์อิมพัลส์

### 3. การทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของระบบบรากสายดิน

ในที่นี้ได้ทำการทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของระบบบรากสายดินด้วยการพิจารณาชนิดของดิน โดยทำการตรวจวัดค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังและค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ในบริเวณพื้นที่ภาคกลาง เช่น ณ อำเภอคลองเขื่อน จังหวัดฉะเชิงเทรา ณ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี ณ อำเภอสาขลา จังหวัดนครปฐม ณ อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี ณ อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี และภาคตะวันออก เช่น ณ อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ณ อำเภอบางเสาธง จังหวัดชลบุรี เป็นต้น

ในการวัดค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง จะทำการวัดด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานดินด้วยวิธีการวัดแบบ 3 จุด (Fall of Potential Method) ดังในรูปที่ 6 ก) และทำการทดสอบค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ด้วยเครื่องจำลองกระแสฟ้าผ่า(Impulse generator) ดังในรูปที่ 6 ข)



ก) เครื่องวัดความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง

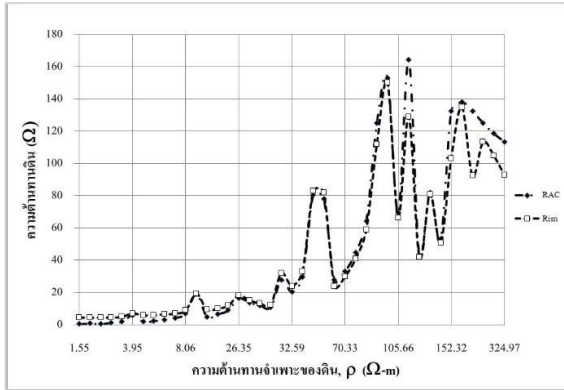


ข) เครื่องทดสอบความต้านทานดินอิมพัลส์ WG-407

รูปที่ 6 เครื่องวัดความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง และเครื่องทดสอบความต้านทานดินอิมพัลส์

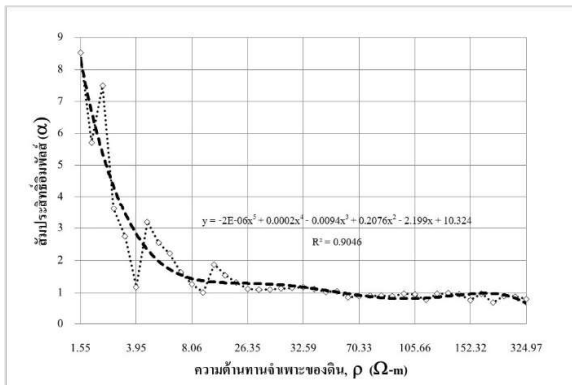
### 4. ผลการตรวจวัดความต้านทานดิน

ในการตรวจวัดค่าความต้านทานดิน สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังและค่าความต้านทานดินอิมพัลส์กับค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินกับความถี่กำลังและค่าความต้านทานดินอิมพัลส์กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

จากผลการพบว่า เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho < 100$  โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{AC} < R_{imp}$  และเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho \geq 100$  โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{AC} > R_{imp}$  และค่าสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha = R_{imp} / R_{AC}$  เทียบกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha$  กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho$

จากผลการตรวจวัด สามารถการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์อิมพัลส์กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ด้วยวิธีการประมาณเส้นกราฟ ได้ดังนี้

$$\alpha = -2 \times 10^{-6} \rho^5 + 0.0003 \rho^4 + -0.0118 \rho^3 + 0.2402 \rho^2 - 2.372 \rho + 10.564$$

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการตรวจวัดค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังและค่าความต้านทานดินอิมพัลส์โดยพิจารณาความต้านทานจำเพาะดิน พบว่า

- 1) เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho < 100$  โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{AC} < R_{imp}$  และสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha > 1$  และเมื่อค่าความ

ต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho \geq 100$  โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{AC} > R_{imp}$  และสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha < 1$

2) ดังนั้นในการออกแบบระบบบรากสายดิน เมื่อทราบค่าความต้านทานจำเพาะของดิน,  $\rho$  ก็นำไปหาค่าสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน,  $\alpha$  หรือนำไปหาค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง,  $R_{AC}$  และค่าความต้านทานดินอิมพัลส์,  $R_{imp}$  ได้ หากค่าความต้านทานดินใดมีค่ามากกว่าก็นำค่าความต้านทานดินนั้นไปทำการออกแบบระบบบรากสายดินต่อไป ซึ่งจะ เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสายส่งหรือระบบสายจำหน่ายไฟฟ้า และระบบการต่อลงดินของอาคารสำนักงานและที่อยู่อาศัยต่อไป

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชำนาญ ห่อเกียรติ. 2549. **การต่อลงดิน**. กรุงเทพมหานคร: โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] Hileman, A.R. 1999. **Insulation Coordination for Power Systems**, New York: Marcel Dekker.
- [3] Substations Committee. 2015. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. United States of America.: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [4] Visacro, S, and Rosado, G. 2009. "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation." **IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility**: 161-164.



สำเร็จ อินททำไม้ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีความสนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ระบบการต่อลงดินและระบบการป้องกันฟ้าผ่า และการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า