

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ศุภชัย แซ่เจียม มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และสมชาติ จิรวิภากร “อัตราการวาบไฟตามผิวเนื่องจากผลต่างของความต้านทานดินระหว่างเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 กิโลโวลต์” Electrical Engineering Conference (EECON27), Khonkaen, Thailand, November 2004.

อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวเนื่องจากผลต่างของความต้านทานดินระหว่างเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 กิโลโวลต์

Flashover Rates due to Effects of the Different Pole Footing Resistance between Adjacent Poles From Direct Lightning Strokes on 115 kV Pole

ศุภชัย แซ่เจียม มณฑล ธิลาจินดาไกรฤกษ์ และสมชาติ จิวิภากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ

โทร : 0-2326-4550 โทรสาร 0-2326-4550 E-mail: ssc2514@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ เป็นการวิเคราะห์อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวฉนวนลูกถ้วย อันเนื่องมาจากผลต่างของความต้านทานดินที่ฐานเสาและเสาข้างเคียง กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมและการวิเคราะห์พบว่า ความแตกต่างของความต้านทานสัมผัสของดินที่ฐานเสา กับเสาข้างเคียง เมื่อมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม จะไม่ทำให้อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวมีค่าเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: ฟ้าผ่าลงโดยตรง, ผลต่างของความต้านทานดินที่ฐานเสา, อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิว

Abstract

This paper analyzes the effects of the different pole footing resistances between adjacent poles on lightning flashover rate from direct stroke on 115 kV pole with ATP-EMTP program. The simulated and analyzed results show that the different pole footing resistance between adjacent poles which is lower than 5 ohms does not affect the flashover rate.

Keywords: direct lightning stroke, different pole footing resistance, flashover rate,

1. คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนชื้นที่มีอัตราการเกิดฟ้าผ่าค่อนข้างสูง การเกิดฟ้าผ่าลงโดยตรงหรือลงบริเวณข้างเคียงจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับ และที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวิธีการป้องกันความเสียหายจากฟ้าผ่าหลายวิธีด้วยกัน เช่นการจัดการฉนวนแบบไม่สมมาตรหรือเพิ่มจำนวนฉนวนลูกถ้วยให้มากกว่าปกติ การเพิ่มค่าปลิงของสายดิน การลดมุมป้องกัน การลดความต้านทานดิน และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า เป็นต้น

การป้องกันแรงดันเกินจากกรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงนั้น วิธีการพื้นฐานหนึ่งก็คือการออกแบบความต้านทานดินที่ฐานเสาและระหว่างเสาให้เหมาะสมกับระบบ แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบความต้านทานดินที่ฐานเสาให้มีความเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดนั้น สามารถทำได้ค่อนข้างยากในพื้นที่ที่เป็นภูเขา เป็นต้น

ดังนั้นในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวฉนวนลูกถ้วย อันเนื่องมาจากผลต่างของความต้านทานดินที่ฐานเสาไฟฟ้ากับเสาข้างเคียง กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP โดยจะทำการพิจารณารากสายดินชนิดแห้งและพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่ามีค่าต่างๆ กัน

2. การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า

2.1 ความต้านทานดินที่ฐานเสา

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาไฟฟ้าโดยตรง กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะไหลผ่านรากสายดินลงดิน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ รากสายดินโดยแปรเปลี่ยนตามเวลา เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน (E_0) จะทำให้ดินรอบตัวนำเกิดการเบรกดาวน์เปรียบเสมือนรากสายดินมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานดินในบริเวณนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เราเรียกว่าความต้านทานนี้ว่าความต้านทานสัมผัส

ความต้านทานสัมผัสของดิน จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงทางเรขาคณิตของรากสายดิน(ขนาดและความลึก) สภาพความต้านทานของดิน รูปคลื่นและขนาดของกระแสสัมผัส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต้านทานที่ความถี่กำลัง ตามสมการ[2]

$$R_f = \alpha R_0 \quad (1)$$

เมื่อ R_f คือ ความต้านทานสัมผัสของดิน Ω

R_0 คือ ความต้านทานดินที่ความถี่ต่ำ Ω

α คือ สัมประสิทธิ์สัมผัส

ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง จะขึ้นอยู่กับชนิดของรากสายดินและสภาพความต้านทานดินโดยรอบในบริเวณนั้น กรณีรากสายดินเป็นชนิดแห้ง ความต้านทานดินที่ฐานเสา หาได้จากสมการ

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

เมื่อ

ρ คือ สภาพความต้านทานดิน $\Omega \cdot m$

l คือ ความยาวของรากสายดิน m

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของรากสายดิน m

2.2 พารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่า

ในการคำนวณแรงดันเกินจากฟ้าผ่า ทำการพิจารณาฟ้าผ่าได้เสมือนกับเป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งอาจจะเป็นขั้วบวก ขั้วลบ หรือมีทั้งขั้วบวกและขั้วลบอยู่ในฉากระแสฟ้าผ่าเดียวกัน และรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าและสิ่งที่มีอยู่ในบริเวณนั้นเช่น โครงสร้างที่มีความสูงหรือภูเขา ซึ่งอาจจะมีผลทำให้เกิดการคิดเทียบของคลื่นฟ้าผ่าได้

โดยทั่วไป ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของพารามิเตอร์กระแสฟ้าผ่าจะถูกกำหนดอยู่ในเทอมของ การแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล (log-normal distribution) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดกระแสฟ้าผ่าจะสูงกว่ากระแสฟลักซ์ของจำนวนลูกถ้วย, $P(I)$ สามารถประมาณได้จาก [3]

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (i_0 / 31)^{2.6}} \quad (3)$$

2.3 ความสูงโครงสร้าง

ฟ้าผ่าจะมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือในการจำหน่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายไฟฟ้าที่มีความสูงและอยู่ในที่โล่งแจ้ง ดังนั้นอัตรา การเกิดฟ้าผ่าหรือจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลงสาย กรณียูไนท์ที่โล่งแจ้ง สามารถหาได้จากสมการ[3]

$$N_L = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4)$$

เมื่อ h คือ ความสูงเสา (เมตร)

b คือ ความกว้างโครงสร้าง (เมตร)

และ N_g คือ จำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลงดิน (ครั้ง/ตร.กม.-ปี)

จำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลงดินสามารถประมาณหาได้จากจำนวนวันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้องใน 1 ปี, T_d ตามสมการ [3]

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (5)$$

2.4 อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิว

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรง กระแสฟ้าผ่าและประจุจะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเสาตามสายตัวนำลงดินที่ฝังอยู่ภายในเสาตงสู่ดินและสะท้อนกลับจากดินขึ้นสู่ยอดเสา และอีกส่วนหนึ่งจะแยกไหลไปยังเสาข้างเคียงผ่านสายล่อฟ้า และเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ถ้าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่าค่า

แรงดันวาไฟฟ้าตามผิวอิมพัลส์ฟลักซ์ของพวงฉนวนลูกถ้วยก็จะเกิดการลัดวงจร ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับ ดังนั้นอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวหาได้จากสมการ[4]

$$BFR = N_L P(I) \quad (6)$$

3. ข้อมูลและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 ข้อมูลของระบบ 115 kV

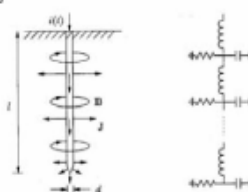
ในการวิเคราะห์จะทำการพิจารณาระบบ 115 kV แบบวงจรเดี่ยวที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้งประกอบด้วยสายตัวนำ 3 เฟสชนิด AAC ขนาด 400 มม² สายล่อฟ้า 1 เส้นเป็นชนิดสายเหล็กตีเกลียว และเสาเสาคอนกรีตมีความสูง 22 เมตร สายล่อฟ้าจะทำการต่อลงดินโดยผ่านสายตัวนำลงดินที่ฝังในเสาคอนกรีตทุกต้นของเสาตงไปยังระบบรากสายดิน ซึ่งเป็นชนิดแท่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 เมตร มีความยาว 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจัดวางสายเฟสลงตัวของระบบ 115 kV

3.2 แบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสา

ความต้านทานดินที่ฐานเสาจะแทนด้วยแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งประกอบด้วยความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานของรากสายดิน[1],[5]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบรากสายดิน เนื่องจากผลของกระแสฟ้าผ่า

3.3 ฉนวนลูกถ้วย

ระบบจำหน่าย 115 kV ติดตั้งฉนวนลูกถ้วยแขวนปอร์เซเลนแบบ 52-3 หรือ 52-8 จำนวน 7 ลูก ซึ่งแต่ละลูกมีค่าแรงดันวาไฟฟ้าตามผิวอิมพัลส์ฟลักซ์ทางบวกและลบอย่างน้อย 125 kV และ 130 kV (ตามมาตรฐาน มอก. 354-2523)

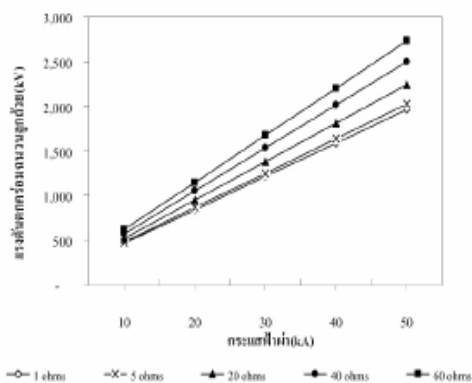
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

กระแสไฟฟ้า	อิมพัลส์ ขนาด 10 - 50 kA
	ความชันหน้าคลื่นเป็น 0.5, 1, 1.2 และ 2 μ s
	เสิร์จอิมพีแดนซ์ของลวดฟ้าผ่า 400 Ω
สายล่อฟ้า	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.6675 cm
	ความต้านทานกระแสตรง 9.4 Ω /km
	Frequency Dependent Model
สายตัวนำ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2.611 m
	ความต้านทานกระแสตรง 0.0715 Ω /km
เสาไฟฟ้า[1]	ความสูง 22 m
	เสิร์จอิมพีแดนซ์ 450 Ω
	ระยะห่างเสา 80 m
	ความเร็วในการกระจายคลื่น 300 m/ μ s
ลูกถ้วยแขวน	ค่าความจุ 80 pF/pin
รากสายดิน[1,5]	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.6 cm ยาว 2 m
	ความต้านทานอิมพัลส์ 1 -60 Ω
	ความต้านทานจำเพาะดิน 100 Ω .m

4. ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าจากผลต่างความต้านทานดินระหว่างเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 kV เมื่อระยะห่างระหว่างเสาคู่เท่ากับ 80 เมตร ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสฟ้าผ่า เวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าและผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสาระหว่างเสาคู่ค่าต่างๆ กัน

4.1 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

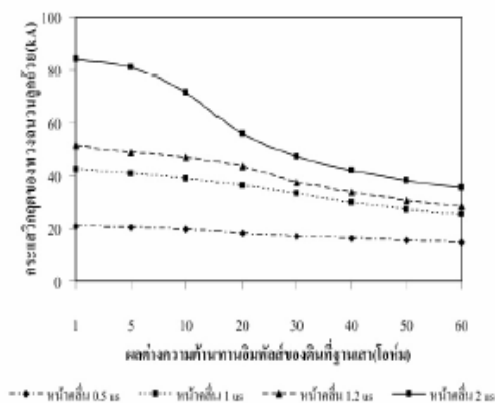


รูปที่ 3 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยระบบ 115 kV (จำนวน 7 ลูก)
เมื่อเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 0.5 μ s

จากรูปพบว่า เมื่อผลต่างของความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.2 กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วย

กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยหาได้จากกราฟจำลองการเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เมื่อระยะห่างเสา 80 เมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าและผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินระหว่างเสาคู่ค่าต่างๆ กัน ก็จะได้อัตราแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยตามในรูปที่ 3 และทำให้ทราบค่ากระแสวิกฤตเมื่อพิจารณาพวงฉนวนลูกถ้วยมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์เท่ากับ 875 kV ดังแสดงในรูปที่ 4

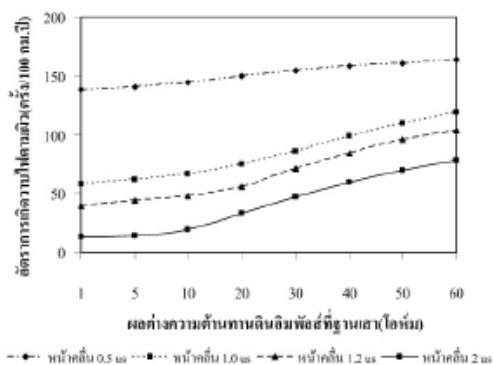


รูปที่ 4 กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก

จากรูปที่ 4 พบว่าที่เวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 0.5 μ s กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าต่างๆ กัน และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหน้าคลื่นเป็น 1, 1.2 และ 2 μ s กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าต่างกันเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าน้อยกว่า 30 โอห์ม

4.3 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิว

ในการคำนวณหาอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของพวงฉนวนลูกถ้วยในระบบ 115 kV ทำการพิจารณาจำนวนวันที่ได้ยื่นเสี่ยงฟ้าร้องเท่ากับ 90 วัน/ปี ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของประเทศไทย อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของพวงฉนวนลูกถ้วยเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวของพวงจนวนลูกด้วยระบบ 115 kV

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่เวลาหน้าคลื่นมากกว่า $1 \mu s$ อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวจะขึ้นอยู่กับผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสา กล่าวคือเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสาไม่เกิน 5 โอห์ม อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันที่แต่ละเวลาหน้าคลื่น แต่เมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีมากกว่า 5 โอห์ม อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวจะมีต่างกันที่แต่ละเวลาหน้าคลื่น โดยจะขึ้นอยู่กับผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสา

5. สรุป

การจำลองเพื่อหาอัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวของพวงจนวนลูกด้วย กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรง ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรง กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะไหลผ่านรากสายดินลงสู่ดิน และอีกส่วนหนึ่งจะแยกไหลไปยังเสาข้างเคียงผ่านสายล่อฟ้า และเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมลูกด้วย ถ้าแรงดันตกคร่อมลูกด้วยที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวาไฟฟ้าตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงจนวนลูกด้วยก็จะเกิดการสัควงจรทำให้เกิดไฟฟ้าดับ

2. ที่เวลาหน้าคลื่นมากกว่า $1 \mu s$ ผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสากับเสาข้างเคียงที่มีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม จะทำให้อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวของพวงจนวนลูกด้วยมีค่าคงที่

3. ดังนั้นในทางปฏิบัติ การต่อลงดินของเสาไฟฟ้า จะต้องทำให้ความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสาแต่ละต้นมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม (ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังเท่ากับ 12.5 โอห์ม)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลในการวิเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำเริง อินทามะ, วันชัย จันทรผล, วิจิต เครือสุข และมนต์ชัย สุรกุล "ผลจากความแตกต่างของความต้านทานดินระหว่างเสาและขนาดสายตัวนำลงดินที่ฝังในเสาต่อแรงดันเกิน กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาในระบบ 115 กิโลโวลต์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
- [2] H. Jinliang, Z. Rong, C. Shuiming, L. Siyun and W. Weiha "Impulse Characteristics of Grounding Systems of Transmission Line Towers in the Regions with High Soil Resistivity" IEEE Transaction on Power Delivery, pp. 156-162, 1998.
- [3] IEEE Std. 1410-1997 "IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines", 1997.
- [4] A.R.Hileman "The blackflash" Chapter 10 of Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 373-420, 1999.
- [5] A.El-Morshedy "Grounding System" Chapter 13 of High-Voltage Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 427-428, 2000.



ศุภชัย แซ่เจียม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม เมื่อปี พ.ศ.2537 ปัจจุบันศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่สถาบันเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



มนทล นิลจินดากรฤกษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาที่สนใจ Power System, Power System Protection, Power System Planning, Power System Co-operation.



สมชาติ จิรวินาการ สำเร็จการศึกษา Ph.D. in EE จาก Imperial College ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาที่สนใจ Power System และ โครงข่ายประสานเทียม