



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

(Design and Construction of Solid Core Suspension Disc Insulators)

โดย รศ ดร. สำรวย สังข์สะอาด และคณะ

31 มกราคม พ.ศ.2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

“Design and Construction of Single Shed Solid Core Suspension Disc Insulators”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. นายโตมร สุนทรนภา | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. นายประเสริฐ รังสีโสภณอารมณ์ | การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย |
| 4. นายพีรภูมิ ยุทธโกวิท | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ชุดโครงการ เมธีวิจัยอาวุโส รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด



ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเนื้อพอร์ซเลน
(Solid Core Suspension Disc Porcelain Insulators)

คำนำ

โครงการเรื่อง การพัฒนาออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเนื้อพอร์ซเลน เป็นโครงการต่อเนื่องขยายโครงการหลัก เรื่อง “ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” โดยเหตุที่ผลของการศึกษาโครงการหลัก ทำให้เข้าใจปัญหาการเกิดเกาะทะเลของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนประเภท B คือ ลูกถ้วยประเภทที่มีความหนาของเนื้อฉนวนน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะอาร์กกรอบผิวลูกถ้วยในอากาศ อันมีสาเหตุจากแรงดันเล็จไฟฟ้าที่มีความชันหน้าคลื่นสูงมาก ๆ คือสูงกว่า $2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ทำให้เข้าใจกลไกการเกิดเกาะทะเลเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น และมีวิธีการแก้ปัญหาการเกาะทะเลดังกล่าว โดยทำลูกถ้วยแขวนที่มีหัวครอบโลหะด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งเป็นก้านโลหะ ให้เป็นหัวครอบทั้งสองด้าน เพื่อให้เนื้อฉนวนพอร์ซเลนมีลักษณะเป็นคอตัน มีระยะความหนาของเนื้อฉนวนยาวกว่าลูกถ้วยฉนวนประเภท B แต่สั้นกว่าประเภท A

การพัฒนาทำลูกถ้วยแขวนคอตัน เริ่มต้นด้วยการทำลูกถ้วยแบบเสมือนหนึ่งว่า ลูกถ้วยแขวนธรรมดา 2 ลูกมาต่อกันเป็นพวง เชื่อมต่อกันด้วยเนื้อพอร์ซเลน ซึ่งมีลักษณะเป็นคอตัน จึงเรียกว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน โดยออกแบบบนพื้นฐานรูปแบบและมิติอิงแบบลูกถ้วยแขวน ANSI CI. 52-4 สองลูกมาต่อกัน คือมีระยะรั้ว ระยะอาร์ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางความสูงสมนัยกัน ผลของการทดสอบพบว่า ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลได้ตามมาตรฐานกำหนด ความคงทนต่อแรงดึงทางกลก็สูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด และที่สำคัญก็คือ ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันไม่เกิดการเกาะทะเลจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น แม้ว่าความชันหน้าคลื่นแรงดันทดสอบมีค่าสูงถึง $10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ถือได้ว่าบรรลุวัตถุประสงค์ที่วางแผนไว้

อย่างไรก็ตาม แม้การแก้ปัญหาการเกาะทะเลของลูกถ้วยแขวนด้วยลูกถ้วยแขวนคู่คอตันได้สำเร็จ แต่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันจะยุ่งยาก ต้นทุนการผลิตจะสูง เพราะการขึ้นรูปต้องใช้การกลึง อีกประการหนึ่ง ผู้ปฏิบัติงานการติดตั้ง จะไม่ชอบใช้ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน เพราะน้ำหนักมาก ไม่สะดวกในการติดตั้ง ยังนิยมใช้ลูกถ้วยแขวนธรรมดา เพราะน้ำหนักเบา และสามารถเพิ่มจำนวนลูกถ้วยได้ตามระดับแรงดันของระบบสูงขึ้น ฉะนั้นเพื่อสนองความต้องการของผู้ใช้ในเรื่องความสะดวกต่อการติดตั้ง จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดา แต่ให้เป็นคอตัน คือเพิ่มความหนาของเนื้อฉนวนพอร์ซเลน ให้อิเล็กทรอนิกส์เป็นหัวครอบทั้งสองด้าน สามารถผลิตได้ง่ายเหมือนลูกถ้วยแขวนธรรมดา คือขึ้นรูปโดยการกดอัดในแบบพิมพ์ ทำให้น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตก็ไม่แพง มีลักษณะเป็นคอตันจึงสามารถทนต่อการเกาะทะเลจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นได้

การทำให้เป็นหัวครอบโลหะหุ้มเนื้อพอร์ซเลนยื่นออกมาของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว แทนการใช้ก้านโลหะฝังในเนื้อพอร์ซเลนแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดา จึงทำให้ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว มีความสูงมากกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา (ANSI CI. 52-4) เมื่อเทียบลูกต่อลูก การ

ออกแบบมิติความยาวของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว จึงมีเงื่อนไขให้สามารถต่อเป็นพวงใช้แทนพวงลูกถ้วยแขวนธรรมดาได้ นั่นคือ มิติของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวต่อเป็นพวง 3 ลูก จะมีค่าใกล้เคียงที่ใช้แทนพวงลูกถ้วยแขวนธรรมดา 4 ลูกในระบบ 69 kV ได้ และลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว 5 ลูก จะมีค่ามิติใกล้เคียงกับพวงลูกถ้วยแขวนธรรมดา 7 ลูกสำหรับระบบ 115 kV

ผลของการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลได้ตามที่มาตรฐานกำหนด และไม่เกิดการเจาะทะลุแม้ว่าแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น จะมีความชันสูงถึง 7500 kV/ μ s จึงอาจกล่าวได้ว่า โครงการศึกษาผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนนี้ ประสบผลสำเร็จครบสมบูรณ์ คือ ทราบและเข้าใจต้นเหตุของปัญหา และสามารถหาวิธีการแก้ปัญหาได้ แต่จะมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ถ้าหากโรงงานอุตสาหกรรมนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในการผลิตเป็นอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ และทางการไฟฟ้าได้นำไปใช้ประโยชน์จริง

รองศาสตราจารย์ ดร. สรรวย สังข์สะอาด

เมธีวิจัยอาวุโส สกว.

หัวหน้าโครงการ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยในส่วนต่อเนื่องและขยายโครงการหลัก เกิดขึ้นและสำเร็จได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนด้านทุน สำหรับการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการเมธีวิจัยอาวุโส จึงขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณ คุณอารีย์ ภูไพบูลย์ บริษัท ไฟน์อาร์ต เซรามิค จำกัด ที่ช่วยผลิตตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยโครงการนี้ โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์ทดสอบ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทดสอบ และขอขอบคุณคณะผู้ช่วยวิจัยทุกท่าน ที่ช่วยกันทำการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการด้วยความตั้งใจและมานะพยายาม จนทำให้ผลงานประสบผลสำเร็จครบสมบูรณ์ และขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยให้โครงการนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำรวย สังข์สะอาด

หัวหน้าโครงการวิจัย

รายงานการวิจัย

รหัสโครงการ : HVE 40-01/ext.

โครงการ : การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

คณะผู้วิจัย : รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
นายโตมร สุนทรนภา (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
นายประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)
นายพีรฤทธิ ยุทธโกวิท (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย : มกราคม 2545 – มิถุนายน 2546

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเนื้อพอร์ซเลน ใช้สำหรับยึดตัวนำในระบบส่งจ่ายแรงสูง แทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI CI. 52-4 มีความคงทนต่อการเจาะทะลุเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น ตามที่มาตรฐานกำหนดได้

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ นำเสนอการพัฒนาออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเนื้อพอร์ซเลน มีรูปลักษณะพื้นฐานเช่นเดียวกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา การผลิตใช้วิธีขึ้นรูปโดยการกดอัดเนื้อฉนวนลงในแบบพิมพ์ และมีอิเล็กโตรดเป็นหัวครอบ โลหะหุ้มเนื้อพอร์ซเลนทั้งสองด้าน สำหรับต่อกันเป็นพวงได้ สามารถใช้แทนพวงลูกถ้วยแขวนธรรมดาในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายที่ล่อแหลมต่อการถูกฟ้าผ่า การทำเป็นคอตันแก้ปัญหาการเจาะทะลุเนื่องจากแรงดันลื่นรั่วฟ้าผ่าหน้าคลื่นชั้น ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวจะได้รับการออกแบบและประกอบสร้าง อยู่บนฐานมิติของลูกถ้วยแขวนธรรมดา (conventional suspension disc insulator) ANSI CI. 52-4 เนื้อพอร์ซเลนเป็นชนิดอะลูมินา ทำการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกล ทำการทดสอบค่าแรงดันวาบไฟตามผิวกระแสสลับ 50 Hz และอิมพัลส์วิกฤต ของพวงลูกถ้วย 3 ลูก และ 5 ลูกต่อพวง ผลการสอบพบว่า มีค่าได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ทดสอบความคงทนต่อแรงดึงทางกล และได้ผลค่าแรงดึงสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดเช่นกัน ทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นในอากาศ ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่มีขนาดประมาณ 2.5 เท่าของค่าวาบไฟอิมพัลส์วิกฤต (CFO) ของลูกถ้วยแขวนเดี่ยวที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ที่มีความชันสูงถึง 7500 kV/ μs ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวไม่เกิดการเจาะทะลุ ถึงแม้ว่าแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นมีความชันเพิ่มสูงถึง 7500 kV/ μs

คำสำคัญ : ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว, แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น, การทดสอบเจาะทะลุในลูกถ้วยในอากาศ

Research report

Project code : HVE 40-01/ext.

Project title : Design and Construction of Solid Core Suspension Disc Insulators

Investigators : Assoc. Prof. Dr. Samruay Sangkasaad (Chulalongkorn University)

Mr. Tomorn Soontornapa (Chulalongkorn University)

Mr. Prasert Rungsisopon-arporn (Electricity Generating Authority
of Thailand)

Mr. Pearawut Yuthagowith (Chulalongkorn University)

Project Period: January 2002 - June 2003

Objectives :

To develop and design solid core suspension disc porcelain insulators for supporting line conductors in high voltage overhead transmission and distribution lines to replace conventional cap and pin insulators ANSI Cl. 52-4 with high strength to withstand electrical puncture caused by steep front impulse voltage in accordance with standard specifications.

Abstract :

This report presents developing and constructing suspension disc porcelain insulators (cap and cap suspension disc insulator) having configuration based on standard suspension disc insulator (cap and pin suspension disc insulator). The insulators were formed by pressing the compound material in a mould with both side electrodes are metallic cap covered porcelain bodies. The insulators can be connected in a string for replacing conventional suspension disc insulator strings in overhead transmission and distribution lines which exposes to lightning discharges. By this means the puncture problem caused by steep front surge voltage produced by lightning discharge on the lines can be solved. The solid core suspension disc insulator was designed and constructed based on the dimensions of conventional suspension disc insulator ANSI Cl. 52-4. The insulators are made of alumina porcelain. The electrical and mechanical characteristics of the solid core suspension disc insulators were carried out. AC 50 Hz flashover voltage test and critical impulse flashover test on insulator strings with 3 units and 5 units per string were performed. The tested results complied with the standard requirement. The tensile mechanical strength test was also conducted. The test results are better than the standard specifications. The steep front

impulse puncture tests in air were performed by applying steep front impulse voltage with amplitude about 2.5 per unit of 50% flashover (CFO) of the insulator unit at negative standard lightning impulse 1.2/50 μ s with steepness upto 7500 kV/ μ s. The testing results showed that solid core suspension disc insulators were not punctured, eventhough the steepness of the steep front impulse voltage was increased up to 7500 kV/ μ s.

Keywords : Solid core suspension dis insulators, steep front impulse voltage, puncture test on insulator in air.

สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	i
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทคัดย่อภาษาไทย.....	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	v
สารบัญ.....	vii
สารบัญรูปภาพ	viii
สารบัญตาราง	ix
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.4 ขอบข่ายงานวิจัย	3
บทที่ 2 ตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	
2.1 รูปลักษณะลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว	4
2.2 เงื่อนไขการออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว	6
2.3 จำนวนตัวอย่างลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ	6
บทที่ 3 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	
3.1 การทดสอบลูกถ้วยแขวนเดี่ยว	7
3.1.1 การทดสอบหาค่าวาบไฟตามผิวด้วยแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ลูกเดี่ยว	7
3.1.2 การทดสอบวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO) ลูกเดี่ยว.....	7
3.1.3 การทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น..	8
3.1.4 การทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว	10
3.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของพวงลูกถ้วย	11
3.2.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ 50 Hz	11
3.2.2 การทดสอบค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต U50% (CFO).....	12
3.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของพวงลูกถ้วย	12
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	14
การสร้างที่มวิจัย	15
เอกสารอ้างอิง	16
ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการและที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร	17

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1-1 รูปลักษณะและมิติลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน b) เปรียบเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 a)	1
1-2 การติดตั้งการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนคู่คอตันด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น.....	2
2-1 ภาควัดขวางของลูกถ้วยแขวน.....	4
2-2 ภาพถ่ายลูกถ้วยแขวนสองลูกต่อกัน.....	5
3-1 การติดตั้งลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเพื่อทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น	8
3-2 ออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นวาวไฟตามผิวลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS ที่ความชันต่างๆ โดยค่า p.u. อยู่บนฐานค่าวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO) $CFO^+ = 163 \text{ kV}$ และ $CFO^- = 153 \text{ kV}$ และเวลาคลื่นตัด T_c สเกลเวลา 100 ns/div.	9

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	มิติของลูกถ้วยแขวน SSS อิงมิติของลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4..... 6
3-1	ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว 8
3-2	ผลการทดสอบแรงดึงของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว 10
3-3	ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน AC 50 Hz 11
3-4	ผลของการทดสอบค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต $U_{50\%}$ (CFO) 12

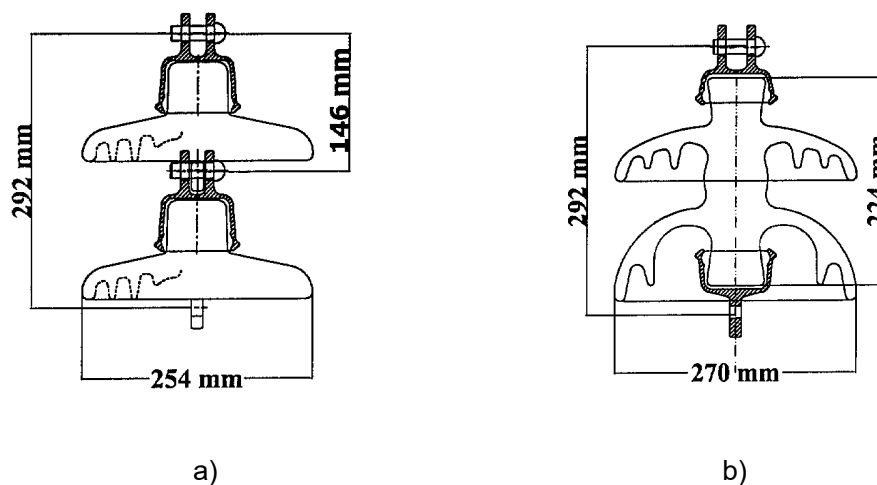
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา

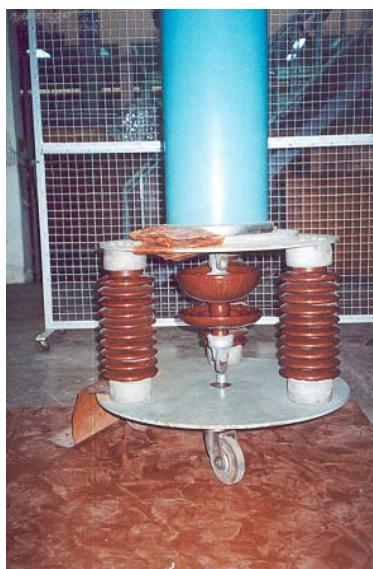
จากโครงการหลักเรื่อง “ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” [1] โดยใช้ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-1, Class 52-4 และลูกถ้วยก้านตรง ANSI Class 56-2 ซึ่งจัดเป็นลูกถ้วยประเภท B (IEC 383-1983) [2] คือ ลูกถ้วยฉนวนที่มีระยะเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็ง (พอร์ซเลน) น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวางไฟตามผิวในอากาศรอบลูกถ้วย ใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1200 kV 36 kJ เป็นตัวสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่ปรับความชันได้ตั้งแต่ 1,000 kV/ μ s ถึง 10,000 kV/ μ s พบว่าแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น ทำให้ลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class 52-4 เจาะทะลุประมาณ 50% ที่ความชัน 2,500 kV/ μ s ซึ่งเป็นความชันของแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน AS 2947.1 – 1989 [3] และ CAN/CSA C411-1 M89-1989 [4]

ในโครงการหลัก ได้มีการศึกษาพัฒนาลูกถ้วยฉนวนเพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุ โดยหลักการอาจทำได้ 2 วิธี คือการปรับปรุงเนื้อพอร์ซเลน หรือการเพิ่มความหนาเนื้อพอร์ซเลน ในการศึกษาดังกล่าวได้เลือกวิธีหลัง คือการเพิ่มความหนาเนื้อพอร์ซเลน โดยเพิ่มความหนาเนื้อพอร์ซเลนระหว่างอิเล็กโทรดให้มีความมากขึ้น มีลักษณะเป็นแกนกลางของลูกถ้วยแขวนเป็นเนื้อพอร์ซเลนตัน เสมือนหนึ่งนำลูกถ้วยแขวนแบบธรรมดาสองลูกมาต่อกัน มีลักษณะเป็นคอตันด้วยเนื้อพอร์ซเลน ดังรูปที่ 1-1 เรียกว่า ลูกถ้วยแขวนคอตัน มีเงื่อนไขการออกแบบให้ลูกถ้วยแขวนคอตัน มีมิติระยะรั้ว ระยะอาร์ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะความสูงตามแนวแกนกลาง สมนัยกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกัน เพื่อให้ลูกถ้วยแขวนคอตันใช้งานได้จริง โดยลูกถ้วยแขวนคอตัน 1 ลูกแทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา 2 ลูก ดังรายละเอียดในรายงานวิจัย [1]



รูปที่ 1-1 รูปลักษณะและมิติลูกถ้วยแขวนคอตัน b) เปรียบเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 a)

ผลจากการทดสอบพบว่า ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันมีค่าวาบไฟตามผิว 50 Hz และอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 จำนวน 2 ลูกต่อกันเป็นพวง เมื่อทำการทดสอบเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ดังรูปที่ 1-2 พบว่า ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันไม่เกิดเจาะทะลุ แม้ว่า ความชันของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะมีค่าสูงถึง 10,000 kV/ μ s ที่ค่าวาบไฟตามผิวของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีค่าประมาณ 3 เท่า (3 p.u.) ของค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่วลรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s มีค่าสูงกว่าของลูกถ้วยแขวน Cl. 52-4 ซึ่งมีค่าเพียง 2 เท่า (2 p.u.) จึงอาจกล่าวได้ว่า ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสามารถแก้ปัญหาการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลนได้ ดังรายละเอียดของการศึกษาในรายงาน [5]



รูปที่ 1-2 การติดตั้งการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนคู่คอตันด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน [5]

จากผลของการทดสอบแสดงให้เห็นชัดเจนว่า การออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสามารถแก้ปัญหาการเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อคำนึงถึงเรื่องการผลิตเชิงอุตสาหกรรมจะมีความยุ่งยาก และต้นทุนการผลิตสูง อีกประการหนึ่งในทางปฏิบัติ ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันอาจจะติดตั้งไม่สะดวก เนื่องจากมีน้ำหนักมาก ประมาณ 11.6 กิโลกรัมต่อลูก อย่างไรก็ตามวิศวกรผู้ใช้ลูกถ้วย ก็ยังมีความนิยมใช้ลูกถ้วยแขวน เพราะสามารถเพิ่มจำนวนลูกถ้วยในพวงให้มากขึ้นได้ เมื่อใช้กับแรงดันระบบสูงขึ้น ฉะนั้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ในเรื่องความสะดวกติดตั้งง่าย จึงได้เกิดแนวความคิดในการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ซึ่งสามารถผลิตได้ง่าย เช่นเดียวกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 หรือ Cl. 52-3 ซึ่งมีน้ำหนักเบา ราคาไม่แพงนัก เนื่องจากเป็นแบบคอตัน จึงน่าจะสามารถทนต่อการเจาะทะลุตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ผลการทดสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า สามารถทนต่อการเจาะทะลุได้ อย่างไรก็ตาม ยังมีคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้า และทางกลที่ต้องศึกษาอีกหลายประการ จึงได้เสนอเป็นโครงการวิจัยเสริมต่อเนื่องจากโครงการวิจัยหลัก เพื่อให้สามารถผลิตเป็นเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาในส่วนขยายโครงการนี้ เป็นผลสืบเนื่องจากโครงการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องคือ

1) “ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” [1] ซึ่งเป็นโครงการหลัก ผลของการศึกษาทำให้เห็นชัดเจนว่า แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น ที่มีความชันเท่ากับหรือมากกว่า $2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนประเภท B (IEC) เจาะทะลุได้ ทำให้เข้าใจถึงกลไกการเจาะทะลุ และมองเห็นแนวทางการแก้ไขปัญหา โดยทำให้ลูกถ้วยฉนวนให้เป็นแบบคอตัน เป็นกึ่งประเภท A

2) “การออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันสำหรับสายส่งแรงสูง” เป็นผลของการศึกษาสืบเนื่องจากโครงการหลักข้างต้น เป็นโครงการศึกษาเพื่อหาวิธีการแก้ปัญหการเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน โดยทำให้ลูกถ้วยมีลักษณะเหมือนกับว่า นำลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกมาต่อกันเป็นพวง แต่ต่อกันด้วยเนื้อพอร์ซเลนเป็นคอตัน จึงเรียกว่า ลูกถ้วยแขวนคอตัน [5] และผลของการศึกษาก็พบว่า ลูกถ้วยแขวนคอตันสามารถทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นได้

3) “การออกแบบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น” เป็นโครงการเริ่มต้นของโครงการหลักว่าด้วย การเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาออกแบบสร้างขึ้น เพื่อใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น สำหรับการศึกษาวิจัยกลไกการเจาะทะลุ และเกิดการพัฒนาลูกถ้วยแขวนคอตันขึ้น และที่สำคัญคือ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้สามารถทำการทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุ ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นตามมาตรฐานกำหนดได้ภายในประเทศ ให้แก่การไฟฟ้าต่างๆ และโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตลูกถ้วยฉนวนประเภท B

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

การขยายโครงการเพิ่มเติม มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1) เพื่อพัฒนาออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ใช้สำหรับยึดตัวนำในระบบส่งจ่ายแรงสูง เพื่อแก้ปัญหการเจาะทะลุอันเนื่องจากแรงดันเสิร์จหน้าคลื่นชั้น
- 2) เพื่อทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว
- 3) เพื่อใช้เป็นต้นแบบและการพัฒนาลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

1.4 ขอบข่ายงานวิจัย

1) ทำการออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเนื้อพอร์ซเลนอะลูมินา โดยความร่วมมือของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนในประเทศ

2) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวที่ออกแบบสร้างขึ้น

บทที่ 2

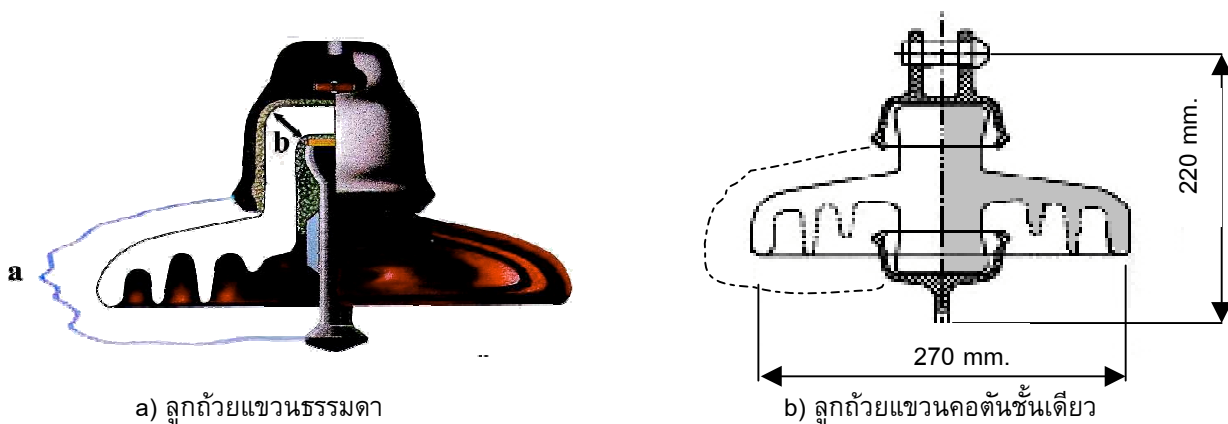
ตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่พัฒนาออกแบบสร้างขึ้นเอง คือลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวโดยอาศัยโรงงานอุตสาหกรรมผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนภายในประเทศ เป็นผู้ผลิตให้ตามทีออกแบบ

2.1 รูปลักษณะลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวจะได้รับการออกแบบให้มีรูปลักษณะพื้นฐานเช่นเดียวกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา เช่น ANSI Cl. 52-3 หรือ 52-4 คือให้สามารถนำมาต่อกันเป็นพวงจำนวนเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันระบบ และกระบวนการผลิต จะใช้วิธีขึ้นรูปโดยการกดอัดเนื้อฉนวนลงในแบบพิมพ์ได้ ซึ่งจะทำได้สะดวกและรวดเร็ว จึงช่วยให้ต้นทุนการผลิตต่ำลงได้ ความแตกต่างของลูกถ้วยแขวนคอตันกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ก็คือ ลูกถ้วยแขวนธรรมดา ด้านหนึ่งจะทำเป็นหัวสำหรับยึดหัวครอบ (cap) ส่วนอีกด้านหนึ่ง จะทำเนื้อพอร์ซเลนให้มีลักษณะเป็นเบ้าสำหรับยึดก้านโลหะ (pin) ด้านนี้เนื้อพอร์ซเลนจะหุ้มโลหะ ดังรูปที่ 2-1 a) จึงทำให้ระยะระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับความหนาของเนื้อฉนวนแข็ง คือ พอร์ซเลน และเป็นจุดอ่อนที่ทำให้เกิดการเจาะทะลุได้ แต่ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว จะทำให้เนื้อพอร์ซเลนมีลักษณะเป็นหัวยื่นออก เพื่อเป็นที่ยึดหัวครอบโลหะทั้งสองด้าน จึงมีลักษณะหัวครอบโลหะหุ้มเนื้อพอร์ซเลน และเป็นแกนคอตัน ดังรูปที่ 2-1 b) ถึงแม้ว่าจะไม่เป็นลูกถ้วยฉนวนแบบ A แต่ก็เป็นแบบ B ที่มีเนื้อพอร์ซเลนที่มีความหนามากกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา เส้นทางแนวการเจาะทะลุ ส่วนหนึ่งเป็นเนื้อพอร์ซเลนและส่วนหนึ่งเป็นอากาศ การเจาะทะลุเกิดได้ยากขึ้น

ลูกถ้วยแขวนทั้งสองแบบสามารถนำมาต่อกันเป็นพวงได้ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-1 ภาคตัดขวางของลูกถ้วยแขวน



รูปที่ 2-2 ภาพถ่ายลูกถ้วยแขวนสองลูกต่อกัน

- a) ลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANCI Cl. 52-4
- b) ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS

2.2 เงื่อนไขการออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว (SSS) จะได้รับการออกแบบโดยใช้มิติของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 เป็นเกณฑ์อ้างอิง ได้แก่ ระยะรั้ว ระยะอาร์ก เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของลูกถ้วย (ระยะห่าง) ดังรูปที่ 2-1 b) โดยมีเงื่อนไข คือ

ให้สามารถใช้ลูกถ้วยแขวน SSS จำนวน 3 ลูกแทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 จำนวน 4 ลูกที่ใช้สำหรับระบบ 69 kV และ

ใช้ลูกถ้วยแขวน SSS จำนวน 5 ลูกแทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 จำนวน 7 ลูกในระบบ 115 kV ได้

เพื่อให้ลูกถ้วยแขวน SSS สามารถใช้ในสภาวะเปราะเปื้อนได้ เช่นเดียวกับลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4 จึงออกแบบให้ลูกถ้วยแขวน SSS มีระยะรั้วเท่ากับหรือมากกว่า ระยะรั้วของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 มิติของลูกถ้วยแขวน SSS อิงมิติของลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4

คุณลักษณะทางมิติ	ลูกถ้วยแขวนปกติ ANSI Cl. 52-4		ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS	
ระยะรั้ว (มม.)	1 ลูก	303	1 ลูก	425
	4 ลูก	1212	3 ลูก	1275
	7 ลูก	2121	5 ลูก	2125
ความยาว หรือ ระยะห่าง (มม.)	1 ลูก	146	1 ลูก	220
	4 ลูก	584	3 ลูก	660
	7 ลูก	1022	5 ลูก	1100
ระยะอาร์ก (มม.)	1 ลูก	215	1 ลูก	245
	4 ลูก	665	3 ลูก	695
	7 ลูก	1120	5 ลูก	1200

2.3 จำนวนตัวอย่างลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จำนวน 20 ลูก และทางกลจำนวน 6 ลูก คือ

- 1) การทดสอบวาวไฟตามผิวกระแสสลับ AC 50 Hz จำนวน 20 ลูก
- 2) การทดสอบวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO) จำนวน 20 ลูก ชุดเดียวกับการทดสอบ AC
- 3) การทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น จำนวน 10 ลูก ที่ผ่านการทดสอบ AC และ CFO แล้ว
- 4) การทดสอบแรงดึง จำนวน 6 ลูก

บทที่ 3

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว มีวัตถุประสงค์เน้นเพื่อการแก้ปัญหาการเจาะทะลุ เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น ฉะนั้นการทดสอบคุณสมบัติของลูกถ้วย จะทำการทดสอบเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับการทดสอบการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น และเป็นการตรวจเช็คว่าคุณลักษณะของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวมีคุณสมบัติได้ตามที่ออกแบบ และมาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยทำการทดสอบเป็น 2 ลักษณะคือ ลักษณะหนึ่ง ทดสอบลูกถ้วยแขวนเดี่ยวตามที่มาตรฐานกำหนด [6] และอีกลักษณะหนึ่งเป็นการทดสอบลูกถ้วยที่ต่อเป็นพวง เพื่อหาความคงทนต่อแรงดันทดสอบ (AC และ BIL) ตามระบบแรงดันใช้งาน

3.1 การทดสอบลูกถ้วยแขวนเดี่ยว

เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวยังไม่มีมาตรฐานกำหนด แต่โดยเหตุที่การออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว มีรูปลักษณะคล้ายกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา และตั้งใจจะนำมาใช้แทนกัน การทดสอบจึงอ้างอิงข้อกำหนดของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 ตามมาตรฐาน ANSI 29.2-1983 [6] คือ

- 1) การทดสอบวาวไฟตามผิว แรงดันกระแสลับความถี่ 50 Hz
- 2) การทดสอบวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO)
- 3) การทดสอบความคงทนการเจาะทะลุต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น
- 4) การทดสอบแรงดึง

3.1.1 การทดสอบหาค่าวาวไฟตามผิวด้วยแรงดันกระแสลับ 50 Hz ลูกเดี่ยว

การทดสอบวาวไฟตามผิวด้วยแรงดันกระแสลับ 50 Hz ขั้นต้นทำการทดสอบลูกถ้วยทุกลูกจำนวน 20 ลูก นอกจากเป็นการทดสอบตรวจเช็คคุณภาพของลูกถ้วยแล้ว ยังเป็นการหาค่าวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวลูกเดี่ยวทั้ง 20 ลูก แรงดันทดสอบได้จากหม้อแปลงทดสอบต่อแบบขั้นบันได 2 ชั้น 200 kV 10 kVA ได้ผลค่าเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 3-1

3.1.2 การทดสอบวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO) ลูกเดี่ยว

การทดสอบใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ขั้วบวกและขั้วลบ แรงดันทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μ s ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 600 kV 30 kJ [7] ใช้ตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวจำนวน 20 ลูก ที่ผ่านการทดสอบวาวไฟตามผิว 50 Hz ในข้อ 3.1.1 มาแล้ว ได้ผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

รายการทดสอบ	ลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI CI. 52-4	ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS
แรงดันวาทไฟตามผิวกระแส สลับ 50 Hz (kV)	85	94
แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์ วิกฤต 1.2/50 μ s		
ชั่วบวก (kV)	125	162
ชั่วลบ (kV)	130	153

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3-1 จะเห็นว่าค่าแรงดันวาทไฟตามผิวทั้งแรงดันกระแสสลับ 50 Hz และอิมพัลส์วิกฤต (CFO) ของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS มีค่าสูงกว่าของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI CI. 52-4 ทั้งนี้เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวมีระยะอาร์กหรือระยะวาทไฟยาวกว่าของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ส่วนค่าอิมพัลส์วิกฤตได้ค่าชั่วบวกสูงกว่าค่าชั่วลบ ซึ่งมีผลสลับกันกับของลูกถ้วยแขวนธรรมดา เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวมีอิเล็กโตรดทั้งสองด้านเป็นหัวครอบเหมือนกัน มีลักษณะสนามไฟฟ้าสมมาตรมากกว่าของลูกถ้วยธรรมดาที่มีด้านหนึ่งเป็นหัวครอบ และอีกด้านหนึ่งเป็นก้านโลหะ ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าด้านที่เป็นหัวครอบ ค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่วลบจึงสูงกว่าชั่วบวกกลับกันกับลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว นอกจากจะสมมาตรมากกว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าก็น้อยกว่า ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตชั่วบวก จะมีค่าสูงกว่าชั่วลบ เช่นเดียวกับลูกถ้วยแขวนคอตัน [5]

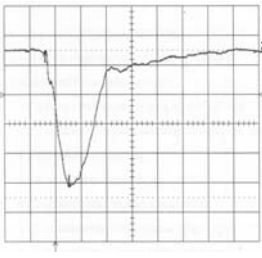
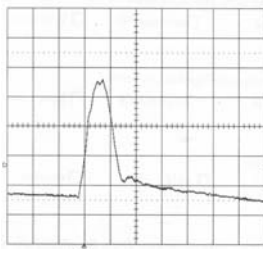
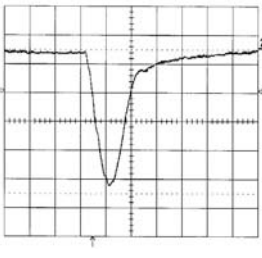
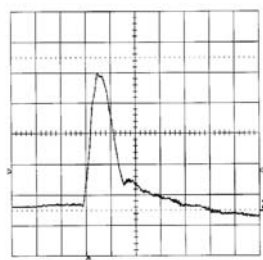
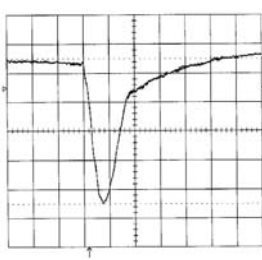
3.1.3 การทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน



แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ 1.2/50 μ s ขนาด 1000kV 30 kJ ค่าเก็บประจุรวม 50 nF [8] และตัดคลื่นอิมพัลส์ด้วยสปาร์กแกปเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันตามที่มาตรฐานกำหนด [2, 3, 4] วิธีการทดสอบทำเช่นเดียวกับการทดสอบลูกถ้วยแขวนคอตันในรายงานวิจัย [7] โดยติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทดสอบความคงทนการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ดังแสดงในรูปที่ 3-1

รูปที่ 3-1 การติดตั้งลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวเพื่อทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

การทดสอบเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ทดสอบที่ความชันต่างๆ 3 ระดับ คือ 3,000 kV/ μ s, 5,000 kV/ μ s และ 7,500 kV/ μ s โดยแต่ละระดับแรงดันจะทดสอบทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ชั่วละ 10 ลูก (ยกเว้นที่ 7,500 kV/ μ s จะใช้ตัวอย่าง 5 ลูก) แต่ละลูกป้อนแรงดันอย่างน้อย 10 ครั้งต่อชั่ว แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันวัดด้วยโวลเตจดีไวเดอร์แบบเก็บประจุ 500 kV สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 500 kV มีเวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time) 2-2 ns [9] ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน วาบไฟตามผิว ดังออสซิลโลแกรมในรูปที่ 3-2 พร้อมค่าวาบไฟตามผิวเป็น kV และ p.u. กับเวลาคลิ้นตัด (chopped time) T_c

Steepness kV/ μ s	Positive	Negative
3000	 FO 283 kV (1.7 p.u.) $T_c = 102$ ns	 FO 280 kV (1.8 p.u.) $T_c = 106$ ns
5100	 FO 355 kV (2.2 p.u.) $T_c = 94$ ns	 FO 407 kV (2.7 p.u.) $T_c = 99$ ns
7500	 FO 391 kV (2.4 p.u.) $T_c = 64$ ns	 FO 435 kV (2.8 p.u.) $T_c = 70$ ns

รูปที่ 3-2 ออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS ที่ความชันต่างๆ โดยค่า p.u. อยู่บนฐานค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO) $CFO^+ = 162$ kV และ $CFO^- = 153$ kV และเวลาคลิ้นตัด T_c สเกลเวลา 100 ns/div.

ผลของการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นได้ และได้สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด ในที่นี้ ทดสอบที่ความชันสูงถึง 7500 kV/ μ s ซึ่งก็เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการแก้ปัญหาการเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนธรรมดา โดยแนวแกนระหว่างหัวครอบจะเป็นเนื้อพอร์ซเลนตัน การเจาะทะลุตามแนวแกนจะไม่เกิดขึ้น แนวที่มีความคงทนต่อการเจาะทะลุน้อยกว่าแนวแกน ก็คือ แนวระหว่างขอบริมของฝาครอบ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นเนื้อพอร์ซเลนที่มีความหนาพอสมควร และอีกส่วนหนึ่งเป็นอากาศ (ดูรูปที่ 2-1 b) การเจาะทะลุจึงเกิดได้ยากเช่นกัน ความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น ย่อมมีค่าสูงกว่าของลูกถ้วยแขวนธรรมดาประเภท B

3.1.4 การทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

การทดสอบแรงดึงใช้เครื่องดึงแรงกลขนาดพิกัด 40 ตัน (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) เช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันในรายงานวิจัย [5] ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวที่ใช้ทดสอบแรงดึงมีจำนวน 6 ลูก ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ผลของการทดสอบแรงดึงของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว

ตัวอย่างลูกถ้วยทดสอบ	แรงดึงที่ทำให้ลูกถ้วยเสียหาย (tons)	หมายเหตุ
1	11.8	มาตรฐานกำหนดความคงทนต่อแรงดึงโหลดทางกล-ไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52.4 มีค่า ≥ 6.8 ตัน
2	9.3	
3	8.1	
4	10.4	
5	14.5	
6	7.9	

จากผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวในตารางที่ 3-2 จะเห็นว่า มีค่าสูงกว่าของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 ที่มาตรฐานกำหนดไว้

3.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของพวงลูกถ้วย

โดยเงื่อนไขการออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว นอกจากจะต้องมีความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นในอากาศแล้ว ยังต้องสามารถนำไปต่อเป็นพวงใช้แทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Cl. 52-4 ในระบบ 69 kV และ 115 kV ได้ จึงต้องทำการทดสอบคุณลักษณะบางประการตามที่มาตรฐาน ANSI C 29.1 และ IEC 383 กำหนด คือการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (AC) 50 Hz ในสภาพแห้งและสภาพเปียก และค่าแรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO)

3.2.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ของพวงลูกถ้วย

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ AC 50 Hz ทำการทดสอบ 2 สภาพ คือ สภาพแห้ง (dry condition) และสภาพเปียก (wet condition) สภาพเปียกจะใช้วิธีจำลองน้ำฝน ซึ่งมีคุณลักษณะของน้ำฝน (spray) ตามมาตรฐานกำหนดดังนี้ [10]

ข้อกำหนด	ANSI Standard	IEC standard
- อัตราการตกของน้ำ mm/min	5 ± 0.5	3 ± 0.3
- ความต้านทานจำเพาะของน้ำ (Ω - m)	178 ± 27	100 ± 10
- ระยะเวลาป้อนแรงดันในสภาพเปียก (sec)	10	60

หมายเหตุ: ค่าแรงดันที่ป้อนที่สภาวะของห้องต้องแก้ด้วย แฟกเตอร์ความหนาแน่นบรรยากาศ k_d และแฟกเตอร์แก้ความชื้น k_h

การทดสอบพวงลูกถ้วยโดยใช้ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวมาต่อกัน 3 ลูกต่อพวงสำหรับแรงดันระบบ 69 kV และต่อกัน 5 ลูกต่อพวงสำหรับแรงดันระบบ 115 kV ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตาราง 3-3

ตารางที่ 3-3 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน AC 50 Hz

จำนวนลูกถ้วยในพวง (ระบบแรงดัน)	แรงดันทดสอบ kV	สภาพแห้ง	สภาพเปียก	
		ANSI/IEC	ANSI	IEC
3 ลูก (69 kV)	140 kV	60 วินาที ทนได้	10 วินาที ทนได้	60 วินาที ทนได้
5 ลูก (115 kV)	230 kV	60 วินาที ทนได้	10 วินาที ทนได้	60 วินาที ทนไม่ได้ เกิดวาวไฟที่ 216 kV

3.2.2 การทดสอบค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต $U_{50\%}$ (CFO)

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s หาค่า 50% (CFO) ของพวงลูกถ้วยด้วยวิธี up and down [10] ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการทดสอบค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต $U_{50\%}$ (CFO)

จำนวนลูกถ้วย ในพวง (ระบบแรงดัน) ค่า BIL	ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS			ค่าแรงดันวาทไฟตามผิว ($U_{50\%}$) ลูกถ้วยแขวนธรรมดา* ANSI Cl. 52-4	
	ข้อแรงดัน	ค่าวาทไฟ ตามผิว $U_{50\%}$ (kV)	ค่าความคงทน $0.96 U_{50\%}$ (kV)	ANSI (kV)	IEC (kV)
3 ลูก (69 kV) BIL = 325 kV	ข้อบวก	371	356.2	440	400
	ข้อลบ	386.3	370.8	415	375
5 ลูก (115 kV) BIL = 550 kV	ข้อบวก	566.1	543.5	695	625
	ข้อลบ	594.0	570	670	605

* ข้อมูลจาก NGK สำหรับพวงลูกถ้วย ANSI Cl. 52-4

3.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของพวงลูกถ้วย

จากผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของพวงลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ดังแสดงในตารางที่ 3-3 และ 3-4 จะพบว่า

1) พวงลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวจำนวน 3 ลูกสำหรับระบบ 69 kV มีความคงทนต่อแรงดันทดสอบกระแสลับ 50 Hz ได้ทั้งในสภาพแห้งและสภาพเปียกตามที่มาตรฐาน ANSI และ IEC กำหนด 140 kV

2) กรณีพวงลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวจำนวน 5 ลูกสำหรับระบบ 115 kV นั้น พวงลูกถ้วยสามารถทนต่อแรงดันกระแสลับ 50 Hz สภาพแห้งที่ 230 kV ได้ตามที่มาตรฐาน ANSI และ IEC กำหนด แต่ที่สภาพเปียกพวงลูกถ้วยทนได้ 10 วินาทีตามมาตรฐาน ANSI กำหนด แต่ในสภาพเปียกตามมาตรฐาน IEC พวงลูกถ้วยทนต่อแรงทดสอบไม่ได้ จะเกิดวาทไฟตามผิวที่แรงดัน 216 kV ทั้งนี้ อาจเนื่องจากความต้านทานจำเพาะของน้ำฝนจำลองตามมาตรฐาน IEC มีค่าต่ำกว่าของมาตรฐาน ANSI กำหนด

3) ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (CFO) ของพวงลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ทั้ง 3 ลูก (ระบบ 69 kV) และ 5 ลูก (ระบบ 115 kV) มีค่าต่ำกว่าของพวงลูกถ้วยธรรมดา ANSI Cl. 52-4 ที่อ้างอิงจากข้อมูลของ NGK มาตรฐานมิได้กำหนดค่าวาทไฟของพวงลูกถ้วย แต่จะ

กำหนดเป็นค่าแรงดันวาทไฟตามผิวลูกเดียว ซึ่งได้วิเคราะห์ผลแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยที่ทดสอบได้ ช่วยให้สามารถคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ U_w จากความสัมพันธ์ [10]

$$\begin{aligned} U_w &= U_{50\%} (1-1.35) \\ &= 0.96 U_{50\%} \end{aligned}$$

เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.03

จะพบว่า ได้ค่าแรงดันความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (U_w) มีค่าสูงกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน (BIL = Basic Impulse Insulation Level) ที่กำหนดตามระดับแรงดันระบบ คือ ระบบ 69 kV BIL = 325 kV และระบบ 115 kV BIL = 550 kV หรือ 450 kV กรณีหลังต่อระบบลงดินโดยตรง (solidly grounded) จึงถือว่าพวงลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวทั้งพวง 3 ลูกและ 5 ลูก มีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่กำหนดได้

บทที่ 4

สรุปผลการศึกษาวิจัย

โครงการศึกษาวิจัยการออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ซึ่งเป็นส่วนขยายโครงการวิจัยหลัก เรื่อง “ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” การศึกษาวิจัยในส่วนขยายโครงการนี้ มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว ที่สามารถผลิตได้โดยการอัดลงในแบบพิมพ์ และมีความคงทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ทำให้การวิจัยโครงการหลักบรรลุผลครบสมบูรณ์ ผลของการศึกษาวิจัยในส่วนขยายโครงการสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว SSS มีมิติความยาว และระยะรั้ว เมื่อต่อเป็นพวง 3 ลูก และ 5 ลูก มีค่าใกล้เคียงกับพวงลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI CI. 52-4 จำนวน 4 ลูก (ระบบ 69 kV) และ 7 ลูก (ระบบ 115 kV) ตามลำดับ

2) ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวลูกเดี่ยว มีความคงทนต่อแรงดึงทางกลได้สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด

3) ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวสามารถทนต่อการเจาะทะลุได้ คือ ไม่เกิดการเจาะทะลุ แม้ว่าแรงดันอิมพัลส์จะมีความชันสูงถึง 5000 kV/ μ s และอาจสูงถึง 7500 kV/ μ s (จากผลการทดสอบลูกถ้วยเพียง 5 ลูกที่ความชันนี้) จึงกล่าวได้ว่า ลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียวสามารถแก้ปัญหาการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลนได้

4) จากค่าวابلไฟตามผิวทั้ง 50 Hz และอิมพัลส์วิกฤต (CFO) ของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว (3 ลูกต่อพวงและ 5 ลูกต่อพวง) แสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปใช้ทดแทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI CI. 52-4 ในระบบ 69 kV (4 ลูก) และ ระบบ 115 kV (7 ลูก) ได้

5) ตัวอย่างลูกถ้วยพอร์ซเลนที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ผลิตโดยโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศ จึงเชื่อว่าโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าว จะสามารถผลิตออกมาเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

การสร้างทีมวิจัย

โดยที่โครงการวิจัยเรื่อง “การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว” นี้ เป็นโครงการต่อเนื่องที่ขยายเพิ่มจากโครงการวิจัยหลัก เรื่อง “ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” คณะผู้วิจัยส่วนหนึ่งเป็นคณะวิจัยในโครงการวิจัยหลัก ดังนี้

1) รองศาสตราจารย์ ดร. สรรวย สังข์สะอาด คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นหัวหน้าโครงการ และผู้วิจัยหลักตลอดโครงการ

2) นายโตมร สุนทรนภา นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ทำวิทยานิพนธ์ปริญญาโทที่มีหัวข้อเรื่อง เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยหลัก และจบการศึกษาปริญญาโท เมื่อปลายปี พ.ศ. 2544 ได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ในโครงการนี้ ในส่วนการออกแบบรูปลักษณะและมิติของลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว และทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยเดี่ยว

3) นายประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นนักวิจัยรุ่นใหม่ผู้หนึ่งในโครงการเมธีวิจัยอาวุโส ในโครงการขยายนี้ คุณประเสริฐ ได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ทำการทดสอบหาค่าวาทไฟตามผิวของพวงลูกถ้วย เพื่อเปรียบเทียบผลกับพวงลูกถ้วยแขวนธรรมดา

4) นายพีรฤดี ยุทธโกวิท สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2544 เป็นนิสิตในที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ปริญญาโท หลังจบการศึกษาปริญญาโท ทำงานเป็นนักวิจัยของศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัยในโครงการที่ขยายนี้ ทำการทดสอบลูกถ้วยฉนวนคอตันชั้นเดียวเกี่ยวกับการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด และคณะ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการ “ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน”, โครงการเมธีวิจัยอาวุโส ส่นอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สกว., มิถุนายน 2544
- [2] IEC Publ. 383-1983 “Test on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V”, 1983.
- [3] Australian Standard, AS 2947.1-1989, “Insulators – Porcelain and glass for overhead power lines voltage greater than 1000 V-A.C., Part 1 : Test methods”
- [4] Canadian Standard, CAN/CSA-C411.1 – M 89, “AC Suspension Insulators”
- [5] สำรวย สังข์สะอาด และโตมร สุนทรนภา “การออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสำหรับสายส่งแรงสูง” รายงานวิจัยเสนอ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ธันวาคม 2544.
- [6] ANSI C29.2-1983, American National Standard for Electrical Power Insulators – Wet Process Porcelain and Toughened Glass Suspension Type.
- [7] สำรวย สังข์สะอาด และวิฑูรย์ งามประดิษฐ์ “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 600 kV 30 kJ”, รายงานวิจัยเสนอต่อศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยี ไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กุมภาพันธ์ 2546
- [8] สำรวย สังข์สะอาด และวีระพันธ์ รัสสิวิจิตรประภา, “เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ”, รายงานโครงการสิ่งประดิษฐ์ ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์ ส่นอฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พฤษภาคม 2538.
- [9] สำรวย สังข์สะอาด และประเสริฐ รัสสิโสภณอาภรณ์ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ “การพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น”, โครงการเมธีวิจัยอาวุโส ส่นอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สกว., กุมภาพันธ์ 2545
- [10] IEC Standard Publ. 60-1, 1989. “High Voltage Test Techniques Part I : General definitions and test requirements”.

ผลงานที่ตีพิมพ์

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์หรือเสนอในที่ประชุมวิชาการ

ผลงานที่เกี่ยวกับโครงการวิจัยที่ขยายนี้ ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการและตีพิมพ์ในวารสาร มีดังนี้

ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- 1) Sangkasaad, S. "Research and Experience with New Insulator Technologies in Thailand" Proceeding of the 2001 World Congress & Exhibition, Shanghai, China, November 18-21, 2001, pp. 154-167 (invited paper)
- 2) Sangkasaad, S. "Solid Core Suspension Disc Insulators Preventing Puncture Caused by Steep Front Surge Voltage", Proceeding of the 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, November 17-20, 2002, Han Kyung Chik Memorial Soongsil University, Seoul, Korea, pp. 361-365.
- 3) Rungsisopon-arporn, P., and Sangkasaad, S., "Design and Construction of 500 kV Steep Front Impulse Voltage Divider", Proceeding of the 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, November 17-20, 2002, Han Kyung Chik Memorial Soongsil University, Seoul, Korea, pp. 135-138.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร

- 1) จากผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ บทความเรื่อง "Solid Core Suspension Disc Insulators Preventing Puncture Caused by Steep Front Surge Voltage" ที่ประเทศเกาหลี เมื่อ November 17-20, 2002 นั้น ได้รับพิจารณาคัดเลือกจาก คณะผู้ทรงคุณวุฒิ ประเมินผลเป็นบทความที่ดี และขออนุญาตนำไปตีพิมพ์ในวารสาร The Korean Institute of Electrical Engineers, KIEE International Transaction on EA, Vol. 3-C, No. 5 pp. 165-170, 2003.