



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

โดย รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด และคณะ

มิถุนายน 2544

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์น้ำกลั่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1. รศ.ดร. ตำรวย สังข์สะอาด | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. นายณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. นายโตมร สุนทรนภา | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. นายวิวัฒน์ งามประดิษฐ์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการเมธีวิจัยอาวุโส รศ. ดร. ตำรวย สังข์สะอาด



อุปกรณ์ศึกษาวิจัยผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้เกิดขึ้นและสำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) โครงการเมธีวิจัยอาวุโสที่ให้การสนับสนุนด้านทุนสำหรับการวิจัย จึงขอขอบคุณยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์ทดสอบและให้การสนับสนุนเงินทุนการศึกษา แก่ผู้ช่วยวิจัย นิติระดับปริญญาโท ขอขอบคุณบริษัท อาเซียนอินซูเลเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และรวมถึงการให้ทุนสนับสนุนการวิจัยเพิ่มเติมในโครงการนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวเก็บประจุคัปปลิงประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัย และขอขอบคุณคณะผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่ช่วยกันทำการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการด้วยความมานะพยายาม จนทำให้ผลงานประสบผลสำเร็จตามเป้าหมาย และเกิดคุณประโยชน์ยิ่งแก่หลายฝ่ายหลายประการ

หัวหน้าโครงการวิจัย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : HVE40-01

โครงการ : ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

คณะผู้วิจัย : รศ. ดร. สำราญ สังข์สะอาด (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

นายณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

นายโตมร สุนทรนภา (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

นายวิทวัส งามประดิษฐ์ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย : 1 กรกฎาคม 2540-15 มิถุนายน 2544

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น $S \geq 2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนประเภท B [IEC] ที่ผลิตได้แล้วในประเทศ มีโอกาสเกิดเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนได้ จึงทำการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่จะไม่เกิดการเจาะทะลุเมื่อได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น

ลูกถ้วยฉนวนประเภท B ตามการจำแนกของ IEC-383 เช่นลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง ที่ใช้ยึดรองรับสายไฟในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบบสายจึงในอากาศกลางแจ้ง มีโอกาสได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มีค่าสูงมากๆ จะทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลนได้ ซึ่งจะทำให้ลูกถ้วยฉนวนเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร อันมีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย รายงานฉบับนี้เสนอผลของการศึกษาวิจัยการเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรงพอร์ซเลน ด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ $1,000 \text{ kV}$ 30 kJ ปรับความชันได้ตั้งแต่ $1,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ถึง $10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ทำการทดสอบทั้งชั่วคราวและชั่วคราวที่ความชันต่างๆ กับลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-1 และ 52-4 ลูกถ้วยก้านตรง ANSI Class 56-2 ที่ทำด้วยเนื้อพอร์ซเลนธรรมดา และเนื้อพอร์ซเลนอะลูมินา แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นต่างๆ ที่ป้อนแล้วเกิดวาวไฟตามผิว เกิดเจาะทะลุและหลังการเจาะทะลุ ทำการออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดันที่มีมิติสมนัยกับลูกถ้วยแขวน Class 52-4 จำนวนสองลูกแขวนต่อกัน เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาพวงสองลูก ค่าวาวไฟตามผิวความถี่ต่ำ 50 Hz แรงดันอิมพัลส์วิกฤต $1.2/50 \text{ kV}/\mu\text{s}$ และการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น ปรากฏว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดาอาจเจาะทะลุได้ที่ความชันน้ำหนักคลื่น $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ แต่ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันไม่เกิดเจาะทะลุแม้ความชันจะสูงถึง $10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$

คำสำคัญ : แรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น การทดสอบเจาะทะลุ ลูกถ้วยฉนวน

Abstract

Project Code : HVE40-01
Project Title : Effects of Steep Front Impulse Overvoltage on Porcelain Insulators
Investigators : Assoc. Prof. Dr. Samruay Sangkasaad (Chulalongkorn University)
Mr. Narongchai Limsettagan (Chulalongkorn University)
Mr. Tomorn Soontornnapa (Chulalongkorn University)
Mr. Vitthawat Ngampradit (Chulalongkorn University)
Project Period : 1 July 1997 – 15 June 2001

Objectives

To study the effects of steep front impulse voltage with steepness $S \geq 2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ on porcelain insulators type B (IEC) produced in Thailand which can be occasionally punctured. To design porcelain insulator which will not be punctured by steep front impulse voltage.

Insulators type B classified by IEC-383 such as cap and pin suspension and pin insulators which are used for supporting high voltage overhead distribution and transmission lines can be punctured through porcelain body by lightning overvoltage. The insulators will be permanently damage. Such event affected the reliability of the power system. This report presents experimental investigation of puncture test of cap and pin suspension insulator and pin insulators under steep front impulse voltage. The generation of steep front impulse voltage was achieved by chopping a standard impulse voltage $1.2/50 \text{ kV}/\mu\text{s}$ obtained from a 1,000 kV 30 kJ normal impulse generator. The steepness of impulse voltage could be adjusted in a range of $1,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ up to $10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$. The testes were performed with positive and negative polarities at various steepness on cap and pin suspension insulators ANSI Class 52-1 and Class 52-4 and Pin insulator ANSI Class 56-2 which are made of normal porcelain and alumina porcelain. Oscillogram of applied steep front impulse voltage with different steepness at flashovered, punctured and after punctured are demonstrated. For solving puncture problem, double shed solid core suspension insulator was designed based on a string of two cap and pin suspension insulators Cl.52-4. The comparison of electrical characteristics of both insulators on 50 Hz flashover, critical impulse flashover $1.2/50 \mu\text{s}$ and punctured by steep front impulse voltage are shown. The results show that the normal cap and pin suspension insulator can be punctured by steep front impulse voltage with steepness of $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$, but the double shed solid core suspension insulator will not be punctured with higher steepness up to $10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$

Keywords : Steep front impulse voltage, Puncture test, Insulators.

คำนำ

ความเป็นมาของโครงการวิจัยนี้เกิดขึ้นมาจากการไฟฟ้าได้มีหนังสือสอบถามมายังคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และลงมาถึงหน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูงเมื่อปี 2535 ว่าทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ สามารถทดสอบการเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep front impulse voltage) ที่มาตรฐานได้กำหนดความชันของหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่น้อยกว่า $2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ได้หรือไม่ ทั้งนี้เนื่องมาจากการไฟฟ้าต่างๆ ในประเทศใช้ลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ตั้งแต่ระบบ 12 kV ไปจนถึงระบบ 500 kV ซึ่งส่วนใหญ่เป็นลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ต่างก็ประสบปัญหาที่ลูกถ้วยฉนวนจำนวนมาก เกิดการเจาะทะลุเมื่อพอร์ซเลนหลังจากได้ติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่ง และเชื่อว่าเกิดจากฟ้าผ่าที่มีความชันหน้าคลื่นสูง ทางกรไฟฟ้าต้องการให้มีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันก่อนนำไปใช้งาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า ลูกถ้วยฉนวนที่นำมาติดตั้งในระบบนั้นมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันนี้ได้ แต่การไฟฟ้าไม่อาจกำหนดคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันนี้ได้ เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวยังไม่สามารถทำได้ภายในประเทศ เพราะไม่มีอุปกรณ์ชุดทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันตามที่มาตรฐานกำหนด

ในประเทศไทยก็มีโรงงานที่ผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนได้แล้วหลายโรงงาน จึงสมควรที่จะได้มีการทดสอบการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าลูกถ้วยฉนวนมีคุณภาพ อันจะเป็นผลให้ระบบไฟฟ้าที่ใช้ลูกถ้วยฉนวนเหล่านี้ มีความเชื่อมั่นได้สูงขึ้น การทดสอบดังกล่าวจำเป็นต้องมีเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ทางหน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงได้ทำการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขึ้น โดยวิธีใช้สปาร์กแกปตัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ปกติ $1.2/50 \text{ kV}/\mu\text{s}$ เริ่มต้นด้วยการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติรูปคลื่น $1.2/50 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 1,000 kV 30 kJ ก่อน ซึ่งได้รับความสนับสนุนเงินทุนโครงการสิ่งประดิษฐ์จากฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ 1,000 kV 30 kJ ประสบผลสำเร็จเรียบร้อยใช้งานได้มีประสิทธิภาพตั้งแต่ปี 2538 ต่อจากนั้นผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช เมื่อปี 2537 เพื่อทำโครงการวิจัยเรื่อง การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน และประสบผลสำเร็จ เมื่อปี 2540 ซึ่งทันพอดีกับความต้องการใช้งานในโครงการวิจัยเมธีวิจัยอาวุโส สกว. เรื่องผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่สร้างขึ้น สามารถสร้างให้มีความชันได้ตั้งแต่ $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ขึ้นไปจนถึง $6000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ และมีขนาดแรงดันสูงมากพอที่จะทำให้เกิดวابلตามผิวลูกถ้วยฉนวนขนาดใหญ่ที่สุดคือ ANSI Class 52-8 ได้

การศึกษาวิจัยโครงการนี้เริ่มต้นด้วยการปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ ให้สามารถสร้างรูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ในกรณีที่ใช้ตัวเก็บประจุโหลดที่ C_0 ที่จะใช้เป็นตัวเก็บประจุคัปปลิงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีค่าสูงถึง 8 nF 1600 kV โดยการสร้างตัวความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d

เพิ่มเติม ปรับปรุงสปาร์กเกป SG แบบทรงกลมติดตั้งภายในท่อฉนวนบรรจุก๊าซ N₂ อัตราความดัน ทำการปรับระยะเกปและปรับความดันก๊าซ N₂ เพื่อให้ได้ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้สูงถึง 10,000 kV/ μ s

ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ใช้ในการศึกษาโครงการวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอาเซียน อินซูเลเตอร์จำกัด ช่วยผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนตัวอย่างในการศึกษาวิจัย ซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท B ที่มีระยะเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนสั้นกว่าครึ่งหนึ่งของระยะอาร์กหรือวาบไฟตามผิวผ่านอากาศรอบลูกถ้วยฉนวน คือ ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-1 Class 52-4 และลูกถ้วยก้านตรง ANSI Class 56-2 การทดสอบนอกจากจะศึกษาผลของความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์แล้ว ยังได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อการเจาะทะลุของเนื้อพอร์ซเลนแบบเนื้อธรรมดา กับเนื้ออะลูมินา ทำการทดสอบทั้งชั่วคราวและชั่วคราวเพื่อดูผลของชั่วแรงดัน

ผลของการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันพบว่า ลูกถ้วยแขวน Class 52-4 มีโอกาสเจาะทะลุได้ จึงขอให้ทางโรงงานทำการปรับปรุงเนื้อพอร์ซเลนหรือกรรมวิธีผลิต เพื่อให้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น โดยที่ลูกถ้วยแขวนนี้ยังเป็นที่ยอมรับของวิศวกรการไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งมีข้อดีในการติดตั้งและการซ่อมบำรุง ฉะนั้นการปรับปรุงความแข็งแรงของลูกถ้วยแขวนนอกจากจะปรับปรุงกระบวนการผลิตแล้ว ยังได้ทำการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน โดยอิงมิติและลักษณะสมบัติของลูกถ้วยแขวน Class 52-3 และ 52-4 สองลูกต่อกันเป็นพวง การต่อลูกถ้วยแขวนสองลูกนั้นเป็นเนื้อพอร์ซเลนคอตัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอตันที่พัฒนาออกแบบ สามารถทนการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้ถึงแม้ว่า ความชันหน้าคลื่นจะมีค่าสูงถึง 10,000 kV/ μ s อย่างไรก็ตามแม้ว่าการแก้ปัญหาการเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนธรรมดาได้ด้วยลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน แต่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมของลูกถ้วยฉนวนคู่คอตันจะยุ่งยากและราคาค่อนข้างสูง จึงเกิดความคิดที่จะพัฒนาลูกถ้วยแขวนชั้นเดียวคอตันขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายลูกถ้วยแขวนชั้นเดียวธรรมดา แต่มีคอตันเป็นเนื้อพอร์ซเลน มีฝาครอบเป็นอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองด้าน การศึกษาวิจัยในขั้นต้นได้เริ่มต้นแล้ว โดยแยกเป็นอีกโครงการหนึ่ง เป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทที่ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโรงงานอุตสาหกรรม บริษัทอาเซียนอินซูเลเตอร์จำกัด ผู้ผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนรายใหญ่แห่งหนึ่งของประเทศ

ความสำเร็จของโครงการวิจัยนี้นอกจากจะเป็นประโยชน์แก่การเรียนการสอนและการวิจัยแล้ว ยังมีคุณค่าอย่างยิ่ง ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนของประเทศ เป็นการส่งเสริมด้านเศรษฐกิจของประเทศ เพราะการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนใช้วัตถุดิบภายในประเทศมากกว่า 85 % การนำลูกถ้วยแขวนคู่คอตันไปใช้งานในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง จะช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าให้สูงขึ้น คุณประโยชน์อีกด้านหนึ่งก็คือ เป็นการเพิ่มสมรรถนะของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงในด้านบริการวิชาการทดสอบ ทำการวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับแรงดันทรานเซียนต์ที่มีผลกระทบต่อการณ์ของอุปกรณ์ เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและด้านอื่นที่เกี่ยวข้อง

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา	1
1.3 ผลงานที่เกี่ยวข้อง	2
1.4 ขอบข่ายงานวิจัย	2
บทที่ 2 ลักษณะสมบัติการฉนวนของลูกถ้วยฉนวน	3
2.1 การเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน	3
2.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง	4
2.3 เงื่อนไขการเกิดวาบไฟตามผิวหรือเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวน	5
2.4 ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน	6
2.4.1 ส่วนผสมลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน	7
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ซเลน	8
บทที่ 3 การสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นและข้อกำหนด	11
3.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น	11
3.1.1 ความชันน้ำหนักคลื่นแรงดันอิมพัลส์	11
3.1.2 ขนาดแรงดันทดสอบ	11
3.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น	12
3.2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s	12
3.2.2 วงจรเสริม II เพื่อสร้างอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น	13
3.2.3 สปาร์กแกปตัวรูปคลื่น SG	14
3.2.4 อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์	14
3.3 ข้อกำหนดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น	15
3.4 การติดตั้งลูกถ้วยทดสอบ	16
3.5 การป้อนและวัดแรงดัน	16
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	18
4.1 ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น	18
4.2 ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทดสอบ	20

4.3 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนทดสอบ	20
4.4 การป้อนแรงดันทดสอบ	20
4.5 ผลการทดสอบผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น	21
4.5.1 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนพอร์ชเลน Class 52-1	21
4.5.2 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนพอร์ชเลน Class 52-4	24
4.5.3 ผลการทดสอบลูกถ้วยก้านตรงพอร์ชเลน Class 56-2	27
บทที่ 5 การพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุ	31
5.1 แนวทางการแก้ปัญหาการเจาะทะลุ	31
5.1.1 ปรับปรุงเนื้อพอร์ชเลน	32
5.1.2 การเพิ่มความหนาเนื้อฉนวนพอร์ชเลน	32
5.2 การออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน	32
5.2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ	33
5.2.2 ข้อกำหนดในการเลือกมิติ	33
5.2.3 ผลการออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดันตามข้อกำหนด	35
5.3 ลักษณะแรงดันกระจายของลูกถ้วยฉนวน	36
5.4 การทดสอบทางไฟฟ้า	38
5.4.1 การทดสอบวาวไฟตามผิว	38
5.4.2 การทดสอบเจาะทะลุ	42
5.5 ลูกถ้วยแขวนคอดันชั้นเดียว	43
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	46
6.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	46
6.2 ประโยชน์และคุณค่าจากการศึกษาวิจัย	47
6.3 แผนงานต่อเนื่องและข้อเสนอแนะ	47
การสร้างทีมงานวิจัย	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก : ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์หรือเสนอในที่ประชุมวิชาการ	51

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2-1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับเวลาคงอยู่ของแรงดันที่ป้อน	4
2-2 แสดงเส้นทางการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยแบบ A และแบบ B	5
2-3 เส้นแรงดันเวลาวาวไฟตามผิวและเจาะทะลุเนื้อฉนวน	6
2-4 กราฟการขยายตัวระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่างๆ	8
2-5 ภาพจำลองโครงสร้างเนื้อพอร์ซเลนซึ่งยังมีส่วนผสมบางชนิดหลงเหลืออยู่	9
3-1 ส่วนประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น	12
3-2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ปกติ	13
3-3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่นทำด้วยทรงกลมทองแดงติดตั้งภายในท่อฉนวนพีวีซีบรรจุก๊าซ อัดความดัน	14
3-4 แสดงการติดตั้งลูกถ้วยทดสอบ	16
3-5 แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.38/50 μs (1) ถูกตัดด้วยสปาร์กแกปได้รูปคลื่นอิมพัลส์ หน้าคลื่นขั้น (2) มีความชัน 6,120 kV/ μs สเกลเวลา 0.5 $\mu\text{s}/\text{div}$ สเกลแรงดัน 79.1 kV/div	16
3-6 ภาพการคำนวณความชัน	17
4-1 ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นทดสอบการเจาะทะลุของลูกถ้วย ฉนวนพอร์ซเลน พร้อมอุปกรณ์วัดและควบคุม	19
4-2 ภาพถ่ายลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	20
4-3 ภาพถ่ายการติดตั้งลูกถ้วยแขวนเพื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น ก่อนเจาะทะลุและหลังการเจาะทะลุ	21
4-4 ตัวอย่างออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นที่ 2,500 kV/ μs (1) 5,500 kV/ μs (2) 6,500 kV/ μs (3) ขั้วลบ	22
4-5 รูปคลื่นอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นโดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาวไฟตามผิว (1) กับขณะเกิด เจาะทะลุ (2) มีความชัน 6,500 kV/ μs บนลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา	22
4-6 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาวไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยฉนวน Class 52-1	24
4-7 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นโดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาวไฟตามผิว (1) ขณะเกิดเจาะทะลุ (2) กับหลังจากเกิดเจาะทะลุ (3) ที่ความชัน 2,500 kV/ μs	25
4-8 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาวไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยฉนวน Class 52-4	27

4-9	ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2,500 kV/ μ s เนื้อพอร์ชเลนชนิดธรรมดา ของลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2	28
4-10	ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันโดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาบไฟตามผิว (1) ขณะเกิดเจาะทะลุ (2) และหลังจากเกิดเจาะทะลุ (3) ลูกถ้วยฉนวน Class 56-2 ที่ความชัน 9,200 kV/ μ s	28
4-11	กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาบไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2	30
5-1	ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลาที่เพิ่มความแข็งแกร่ง	31
5-2	ลูกถ้วยแขวนแบบธรรมดาและแบบคอดัน	33
5-3	a) ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815 b) ภาพหน้าตัดหัวครอบโลหะตาม IEC 575	34
5-3	c) ภาพถ่ายแขวนลูกถ้วยคอดันแบบแรกและแบบสอง	36
5-4	a) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนลูกถ้วยคอดัน b) กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนลูกถ้วยคอดันเริ่มต้น จากหัวครอบโลหะล่าง (100 kV) ไปสู่หัวครอบโลหะบน (0 kV)	37
5-5	ออสซิลโลแกรมแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนลูกถ้วยคอดันแบบแรกที่มีความชัน 10,000 kV/ μ s สเกลเวลา 75 kV/div สเกลแรงดัน 50 ns/div	42
5-6	ออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนลูกถ้วยคอดันแบบสองที่มีความชัน 10,000 kV/ μ s สเกลแรงดัน 192 kV/ μ s สเกลเวลา 0.1 μ s/ช่อง	43
5-7	ลูกถ้วยแขวนคอดันที่พัฒนาขึ้น	44
5-8	ภาพถ่ายลูกถ้วยแขวนคอดันเปรียบเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา	45

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อกำหนดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น	15
4.1 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-1	23
4.2 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดวาทไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-1	23
4.3 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-4	26
4.4 แรงดันเฉลี่ยวาทไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-4	26
4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยก้านตรงเนื้อพอร์ซเลน Class 56-2	29
4.6 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดวาทไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยก้านตรงเนื้อพอร์ซเลน Class 56-2	29
5.1 ลักษณะมิติลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4	34
5.2 มิติเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันกับลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน ANSI Class 52-4	35
5.3 ค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 815	36
5.4 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้งของลูกถ้วยแขวน Class 52-4 สองลูกต่อกัน	38
5.5 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก	39
5.6 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	39
5.7 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน	40
5.8 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก	40
5.9 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	41
5.10 ผลทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก (จำนวน 10 ลูก)	42
5.11 ผลทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง (จำนวน 20 ลูก) ที่ความชัน 10,000 kV/ μ s	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ลูกถ้วยฉนวน (insulators) ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง จะติดตั้งอยู่ในบรรยากาศ ซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนภายนอก ส่วนเนื้อฉนวนแข็ง เช่น พอร์ซเลนหรือแก้วเป็นฉนวนภายใน ถ้าเกิดวابلไฟตามผิว (flashover) ผ่านอากาศที่อยู่โดยรอบลูกถ้วยฉนวน แล้วสามารถกลับคืนสู่สภาพการฉนวนอย่างเดิมได้ โดยทั่วไปการออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจะทำให้เกิดวابلไฟตามผิวง่ายกว่าที่จะเกิดเบรคดาวน์เจาะทะลุเนื้อลูกถ้วยฉนวน เพราะถ้าให้เกิดเบรคดาวน์เจาะทะลุเนื้อฉนวนแล้วจะทำให้ลูกถ้วยฉนวนนั้นเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร ฉะนั้นเมื่อเกิดแรงดันเกินความถี่ต่ำ หรือเสิร์จสวิตชิ่ง หรือเสิร์จอิมพัลส์ปกติก็จะทำให้เกิดวابلไฟตามผิวลูกถ้วยเข้าไป แต่ในกรณีลูกถ้วยฉนวนประเภท B ซึ่งมีความหนาของเนื้อฉนวนตามแนวตรงระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะอาร์ก หรือระยะวابلไฟตามผิวได้แก่ ลูกถ้วยแขวน (cap and pin insulators) และลูกถ้วยก้านตรง (pin insulators) [1] เมื่อลูกถ้วยได้รับแรงดันเกินเสิร์จที่มีความชันมากๆ เช่น ในกรณีแรงดันเกินจากฟ้าผ่า ก็อาจทำให้เกิดเจาะทะลุเนื้อลูกถ้วยฉนวนแทนที่จะเกิดวابلไฟตามผิว [2] และเกิดผิวดร้งขึ้นในระบบ มีผลกระทบต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ ฉะนั้นเพื่อความเชื่อมั่นในคุณภาพของลูกถ้วยฉนวน มาตรฐานยุคใหม่จึงดำเนินการกำหนดให้มีการทดสอบการเจาะทะลุ (puncture test) ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน [3,4,5] สนับสนุนด้วยข้อคิดเห็นในเรื่องการทดสอบเจาะทะลุด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ ที่จุ่มลูกถ้วยฉนวนในน้ำมันหม้อแปลง ฉะนั้น ไม่สามารถแทนสถานะการณ์ใช้งานจริงได้หมด เพราะในทางปฏิบัติลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานในอากาศมิใช่จุ่มอยู่ในน้ำมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อลูกถ้วยได้รับแรงดันเกินสูงๆ การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่มีขนาดแรงดันอย่างน้อย 3 เท่าของแรงดันอิมพัลส์วิกฤต จะแทนสภาพเลวร้ายของการใช้งานจริงได้ [6]

1.2 ที่มาของปัญหา

การไฟฟ้าต่างๆ ในประเทศไทยก็ใช้ลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง คือ ตั้งแต่ระบบ 12 kV ไปจนถึงระบบ 500 kV ซึ่งส่วนใหญ่เป็นลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน และต่างก็ประสบปัญหาที่ลูกถ้วยฉนวนจำนวนมากเกิดการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลน หลังจากได้ติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่ง และเชื่อว่าเกิดจากฟ้าผ่าที่มีความชันหน้าคลื่นสูง ทางกรมไฟฟ้าจึงต้องการให้ลูกถ้วยที่นำมาใช้ติดตั้งในระบบมีคุณสมบัติทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ในประเทศไทยก็มีโรงงานที่ผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนได้เองแล้วหลายแห่ง แต่ยังไม่เคยมีการศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพความทนของเนื้อฉนวนของลูกถ้วยเหล่านี้ต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน การศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับผลของความชันของแรงดัน

อิมพัลส์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นและสมควรทำเพราะจะช่วยให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของลูกถ้วย
นวนเหล่านี้นี้ได้ อันจะนำไปสู่การทำให้เสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าสูงขึ้น

1.3 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

หน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ได้เริ่มศึกษาปัญหาของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นที่มีต่อลูกถ้วยนวน เริ่มต้นด้วยการออกแบบ
สร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1,000 kV 30 kJ [7] เพื่อนำไปเป็นตัวจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
มาตรฐานให้กับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น โดยใช้ตัวเก็บประจุโพลีเอทิลีนของเครื่องกำเนิดแรงดัน
อิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานเป็นตัวเก็บประจุคัปปลิง และใช้สปาร์กแกป (Crowbar spark gap) แบบติดตั้งใน
บรรยากาศ [8] ทำหน้าที่ตัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นบน
ลูกถ้วยนวน แต่ความชันของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นที่สร้างได้สูงไม่มากพอที่จะใช้ในการวิจัย เพราะ
กระบวนการเกิดเบรกดาวน์ในบรรยากาศไม่รวดเร็วพอ ทำให้ได้แรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นมีความชันต่ำ
จำเป็นต้องหาวิธีที่จะทำให้เกิดการตัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ปกติเป็นไปอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้แรงดัน
อิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นที่มีความชันสูงขึ้น วิธีหนึ่งที่ทำได้คือ ใช้สปาร์กแกปแบบติดตั้งในถังนวนบรรจุก๊าซ
อัดความดันแทนแบบติดตั้งในบรรยากาศ [8]

การผลิตลูกถ้วยนวนพอร์ซเลนในโรงงานอุตสาหกรรม โดยปกติลูกถ้วยก้านตรงจะทำด้วยเนื้อ
พอร์ซเลนชนิดธรรมดา (Normal porcelain) ซึ่งมีส่วนผสมพื้นฐานคือ ดินเหนียว (Ball clay หรือ Plastic
clay) ดินขาว (Kaolin) หินฟันม้า (Feldspar) และหินแก้ว (Quartz) ส่วนเนื้อพอร์ซเลนที่ใช้ทำลูกถ้วยแขวน
จะเป็นชนิดอะลูมินา (Alumina porcelain) โดยใช้ส่วนผสมผงอะลูมินาแทนหินแก้วของเนื้อพอร์ซเลนชนิด
ธรรมดา การเปลี่ยนส่วนผสมจากหินแก้วเป็นผงอะลูมินาเป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลมากขึ้น [9]
เนื่องจากลูกถ้วยแขวนจะต้องรับน้ำหนักของพวงลูกถ้วยและรับแรงดึงหลายรูปแบบในขณะใช้งาน

1.4 ขอบข่ายงานวิจัย

- 1) ศึกษาลักษณะสมบัติ และวิธีการสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นให้มีความชันได้ตั้งแต่
2,500 kV/ μ s ถึง 10,000 kV/ μ s
- 2) ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความคงทนต่อการเจาะทะลุของลูกถ้วยนวนพอร์ซเลนด้วย
แรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นทั้งชั่วคราวและชั่วคราว ระหว่างเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดากับเนื้อพอร์ซเลนชนิด
อะลูมินา
- 3) ทำการศึกษาและออกแบบลูกถ้วยแขวนต่อต้านเพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุเนื่องจากแรงดัน
อิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น

บทที่ 2

ลักษณะสมบัติการฉนวนของลูกถ้วยฉนวน

การฉนวนของลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในบรรยากาศ จะประกอบด้วยฉนวนภายนอก คือ ส่วนที่เป็นอากาศโดยรอบลูกถ้วยฉนวน และการฉนวนภายในคือ ส่วนที่เป็นเนื้อฉนวนแข็งซึ่งอาจเป็นเนื้อพอร์ซเลน หรือเนื้อแก้วเหนียว เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเกิน โดยทั่วไปก็จะเกิดเบรกดาวน์ผ่านอากาศรอบๆ ลูกถ้วย ซึ่งเป็นฉนวนภายนอก เรียกว่า เกิดวาบไฟตามผิว ในบางโอกาสแรงดันเกินอาจทำให้เบรกดาวน์ผ่านเนื้อฉนวนแข็ง เรียกว่า เจาะทะลุ (puncture) การเจาะทะลุเนื้อฉนวนแข็ง จะเป็นการเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร การเกิดวาบไฟตามผิวผ่านอากาศ การฉนวนของลูกถ้วยจะกลับคืนสู่สภาพปกติได้

2.1 การเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน

การเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนหมายถึง การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศที่อยู่โดยรอบลูกถ้วยฉนวน เป็นการเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า อันเนื่องมาจากมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในอะวาลานซ์มากพอ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการไอออไนเซชันตามทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์หรือทฤษฎีสตรีมเมอร์ ซึ่งเป็นกระบวนการต่อเนื่องจากกระบวนการของทาวน์เซนต์ การสร้างสะสมอิเล็กตรอนเพื่อให้มีจำนวนอิเล็กตรอนมากพอตามเงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซหรืออากาศนั้น ต้องใช้เวลา เวลาส่วนแรกเป็นเวลาเชิงสถิติ (Statistic time t_s) เพื่อให้ได้อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างอะวาลานซ์ เวลาส่วนที่สองก็คือ เวลาที่ใช้ในกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์ให้ได้ตามเงื่อนไข เรียกว่า เวลาก่อตัว (formative time t_f) ในกรณีของแรงดันสถานะคงตัว (DC หรือ AC) สนามไฟฟ้าจะคงอยู่เป็นเวลานานเหลือเพื่อ การเกิดเบรกดาวน์ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ สนามไฟฟ้าคงอยู่ในช่วงเวลาสั้น ฉะนั้นเมื่อแรงดันอิมพัลส์มีค่าเท่ากับแรงดันสถานะคงตัวจะยังไม่เกิดเบรกดาวน์ แรงดันจะต้องคงอยู่อีกช่วงระยะหนึ่ง เบรกดาวน์จึงจะเกิดขึ้นได้ เวลาที่ต้องล่าช้านี้เรียกว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ (time lag t_ℓ) นั่นคือ [10]

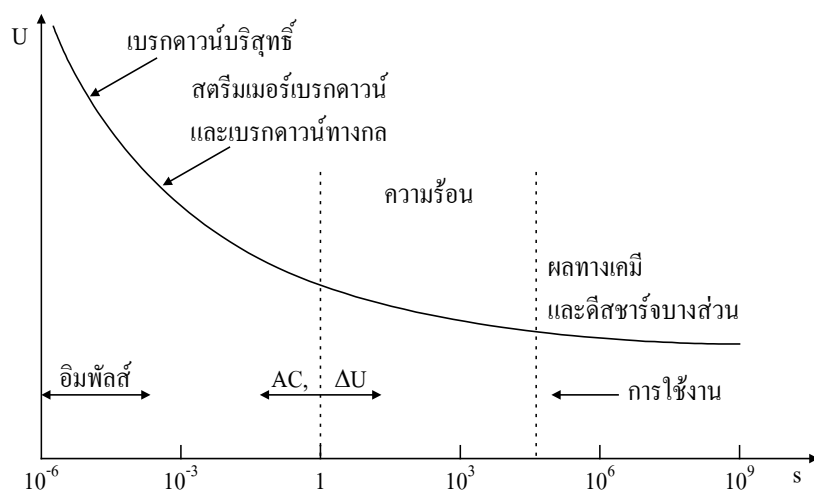
$$t_\ell = t_s + t_f$$

แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์สถานะคงตัว ผลของช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ กรณีช่วงเวลาแรงดันคงตัวอยู่น้อย จำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นคือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะสูงขึ้นถ้าช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันสั้น ตรงข้ามถ้าเวลาคงอยู่ของแรงดันนานมากขึ้น ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะน้อยลง ฉะนั้นเพื่อให้มองเห็นและทราบได้รวดเร็วถึงคุณสมบัติความคงทนของฉนวน จึงอาจแสดงได้ด้วยลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (voltage – time

characteristics) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์กับเวลาเบรกดาวน์หรือเวลาคลื่นตัด (chopped time) [11]

2.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง

การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการและรูปแบบของแรงดันที่ป้อนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน ฉะนั้นความคงทนของฉนวนแข็งต่อแรงดันไฟฟ้าจึงอาจแสดงได้ในเทอมของเวลาดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับเวลาคงอยู่ของแรงดันที่ป้อน

ในรูปที่ 2-1 เมื่อพิจารณาการเกิดเบรกดาวน์ในช่วงระยะเวลาดังนั้นๆ เช่น เบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์จะเป็นเบรกดาวน์บริสุทธิ์ (intrinsic breakdown) และเบรกดาวน์ทางไฟฟ้า ถ้าวัสดุฉนวนมีความบริสุทธิ์และเนื้อเดียวสม่ำเสมอ เมื่อป้อนแรงดันในช่วงสั้นๆ เช่น แรงดันอิมพัลส์รวดเร็ว ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ของฉนวนแข็งจะมีค่าสูงอาจถึง 10 MV/cm เรียกว่า เบรกดาวน์บริสุทธิ์ [12] เป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนแท้ๆ การเกิดเบรกดาวน์บริสุทธิ์เป็นการสูญเสียสภาพการฉนวนอย่างทันทีทันใด เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าในช่วงระยะสั้นมากๆ โดยไม่มีผลของความร้อนหรือคิซาร์จบางส่วน (PD) เกิดขึ้นก่อนเลย เป็นการเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ในเวลาเป็นนาโนวินาที

เบรกดาวน์บริสุทธิ์อาจเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์เบรกดาวน์ คือ เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในฉนวนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนเพียงพอที่จะกระโดดข้ามแถบพลังงานจากวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าเป็นจำนวนมากพอที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ ในวัสดุฉนวนเนื้อเดียวและบริสุทธิ์แถบนำไฟฟ้ากับแถบวาเลนซ์จะแยกห่างจากกันด้วยแถบพลังงานช่วงกว้าง ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนไม่สามารถได้รับพลังงานความร้อนได้เพียงพอที่จะข้ามแถบพลังงานได้ จึงไม่มีสภาพนำไฟฟ้าเลย คือ เป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติเนื้อฉนวนมักจะมีสิ่งอื่นเจือปน ซึ่งจะยอมสิ่งเจือปนมักจะมีอิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานระดับ

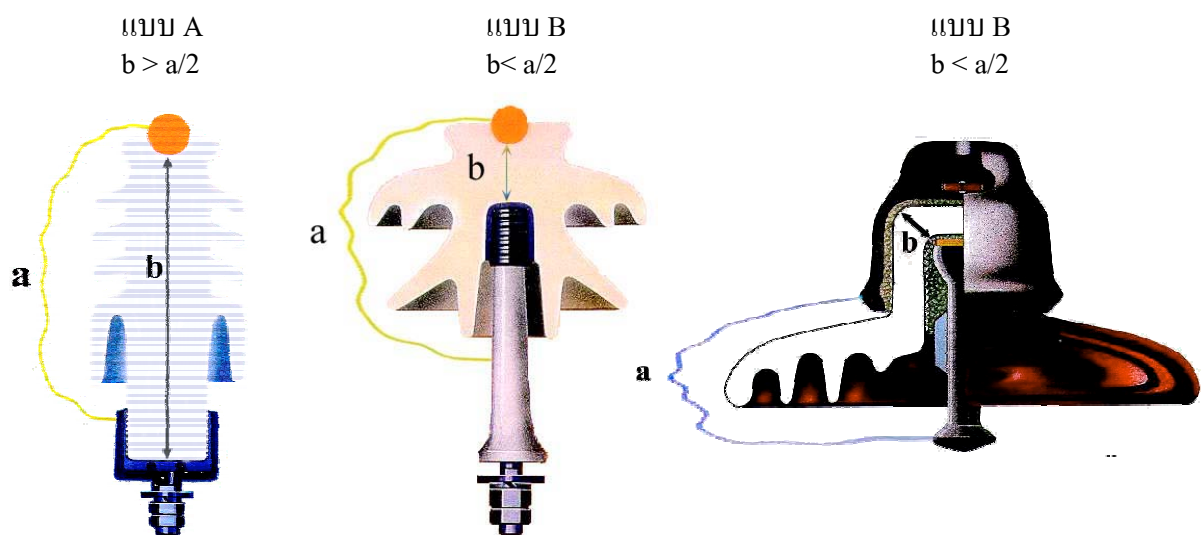
หนึ่ง และอยู่ติดกับแถบนำไฟฟ้า เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานและเพิ่มทวิเข้าไปอยู่ในกลุ่มอิเล็กตรอนนำไฟฟ้ามากขึ้น

อีกกระบวนการหนึ่งของการเกิดเบรกดาวน์ปริศนาก็คือ สตรีมเมอร์เบรกดาวน์ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดทำนองเดียวกับที่เกิดในก๊าซ ที่เกิดการสะสมอิเล็กตรอนอิสระจากการวิ่งชนแล้วเกิดไอออนในเซชันเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเกินค่าวิกฤตได้จำนวนอิเล็กตรอนถึงค่าวิกฤต จะเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์

2.3 เงื่อนไขการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวหรือเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวน

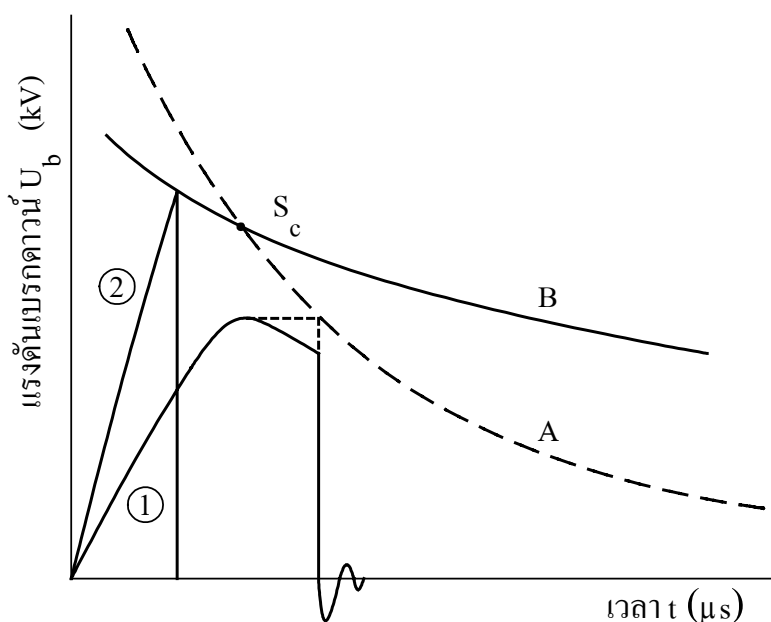
โดยทั่วไปการออกแบบลูกถ้วยฉนวน จะทำให้เกิดควาไฟฟ้าตามผิวง่ายกว่าการเกิดเจาะทะลุเนื้อฉนวน ลูกถ้วย เพราะการเกิดเบรกดาวน์ผ่านเนื้อฉนวนแข็งจะเป็นการเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร ไม่สามารถกลับคืนเป็นฉนวนได้อย่างเดิมเหมือนฉนวนภายนอกที่เป็นอากาศรอบลูกถ้วยฉนวน

เงื่อนไขที่กำหนดให้ลูกถ้วยเกิดควาไฟฟ้าตามผิว ผ่านอากาศรอบลูกถ้วยฉนวนก่อนการเบรกดาวน์ เจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็งจะเป็นจริงสำหรับกรณีแรงดันกระแสตรง หรือกระแสสลับความถี่ต่ำ แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง หรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าปกติ ($1.2/50 \mu s$) แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน เวลาของสนามไฟฟ้าที่ลูกถ้วยฉนวนได้รับมีช่วงเวลาสั้นเกินไปที่จะทำให้เกิดควาไฟฟ้าตามผิว หรือผ่านอากาศรอบลูกถ้วยฉนวนที่เป็นไปตามหลักการเกิดดีสชาร์จของก๊าซ ที่ต้องใช้เวลาในการสร้างอะวาลานซ์อิเล็กตรอนตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ [12] ในช่วงเวลาสั้นมากดังกล่าว ถ้าหากสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงจนถึงค่าวิกฤตที่ฉนวนแข็งของลูกถ้วยฉนวนจะทนได้ ก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุเนื้อฉนวนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความเป็นไปได้สูง ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนประเภท B [1] ได้แก่ ลูกถ้วยแขวนหรือลูกถ้วยก้านตรง มีแนวเจาะทะลุเนื้อฉนวนสั้นกว่าครึ่งหนึ่งของระยะควาไฟฟ้าตามผิวที่เป็นอากาศรอบนอกลูกถ้วยฉนวน ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 แสดงเส้นทางการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยแบบ A และแบบ B

กรณีของแรงดันอิมพัลส์ ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนจะเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (Voltage-time characteristics หรือเรียกว่า V-t curve) ดังเส้นกราฟ A ในรูปที่ 2-2 เช่นเดียวกับค่าแรงดันเบรกดาวน์หรือเจาะทะลุของฉนวน จะเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดันเวลาเช่นกัน คือ เส้น B, ในรูปที่ 2-3 ซึ่งมีลักษณะความชันเส้นกราฟแตกต่างไปจากเส้นวาบไฟตามผิว จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าแรงดันวาบไฟตามผิว หรือค่าแรงดันเบรกดาวน์ทะลุของฉนวนนั้นขึ้นอยู่กับความชันของรูปคลื่นแรงดันนั่นเอง จุดตัดของเส้นกราฟทั้งสอง S_c คือ ค่าวิกฤตของการประสานสัมพันธ์ระหว่างการฉนวนภายนอกกับการฉนวนภายใน ถ้าความชันของแรงดันมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต S_c ดังเช่นแรงดันรูปคลื่น 1 ก็จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวบนเส้นกราฟ A ตรงกันข้ามถ้าแรงดันมีความชันรูปคลื่นสูงกว่าค่าวิกฤตดังเช่นแรงดันรูปคลื่น 2 ก็อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุในฉนวนดังเส้นกราฟ B ได้ก่อนที่จะเกิดวาบไฟตามผิว ฉะนั้นความชันของแรงดันอิมพัลส์ จึงเป็นลักษณะหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวน์ของลูกถ้วยฉนวน



เส้น A : ลักษณะ v-t ของอากาศรอบลูกถ้วย

เส้น B : ลักษณะ v-t ของฉนวนลูกถ้วย

รูปที่ 2-3 เส้นแรงดันเวลาวาบไฟตามผิวและเจาะทะลุของฉนวน

2.4 ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

การศึกษาวิจัยในโครงการนี้ จะเน้นที่ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนที่สามารถผลิตได้เอง โดยใช้วัตถุดิบมากกว่า 85 % เป็นของภายในประเทศ [13]

2.4.1 ส่วนผสมลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

ส่วนผสมของเนื้อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนมีผลต่อคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนเป็นอย่างมาก ทั้งทางกลทางไฟฟ้า และทางความร้อน โดยที่ส่วนผสมหลักที่ใช้ทำเนื้อพอร์ซเลนมี 3 ส่วนด้วยกัน [14] คือ

- 1) ดินเหนียว (Ball Clay หรือ Plastic Clay) และดินขาว (Kaolin) มีประมาณ 50%
- 2) หินฟันม้า (Feldspar) มีประมาณ 25%
- 3) ททรายแก้ว (Quartz) มีประมาณ 25%

2.4.1.1 ดินเหนียว

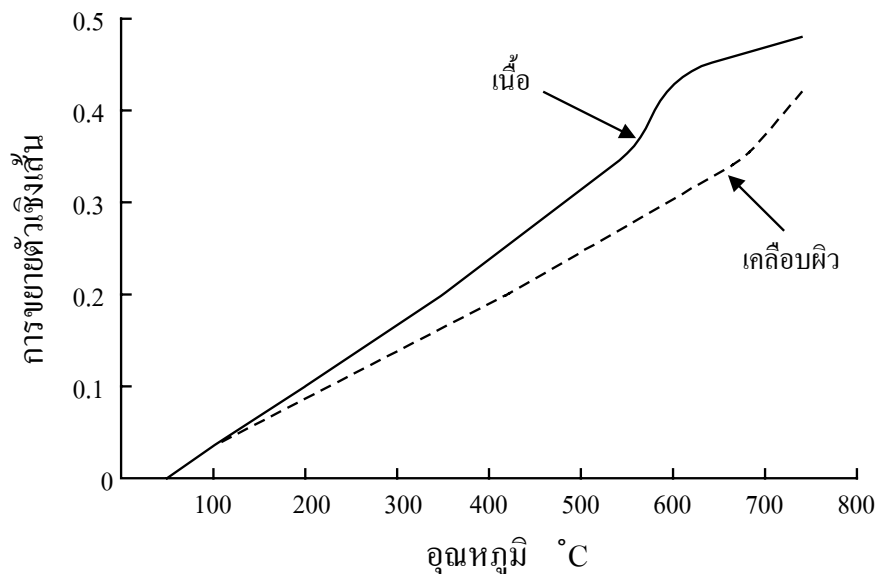
ดินเหนียวเป็นส่วนผสมที่สำคัญด้วยเหตุที่ดินเหนียวเมื่อผสมน้ำหรือมีความชื้น จะมีความยืดหยุ่นสามารถขึ้นรูปตามรูปร่างที่ต้องการได้ ดังนั้นปริมาณส่วนผสมของดินเหนียวจึงขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปและกระบวนการผลิตตามที่ต้องการ (แบบเป็ยกหรือแบบแห้ง)

2.4.1.2 หินฟันม้า

หินฟันม้าเป็นส่วนผสมอีกชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานหรือตัวเชื่อมโดยทำให้เกิดการรวมตัวกันของส่วนผสมเหลวขณะที่อุณหภูมิสูง หินฟันม้าหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัลคาไลน์ออลูมิเนียมซิลิเกต ($XO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) โดยที่ X คือโพแทสเซียม (Potassium) หรือโซเดียม (Sodium) หรือทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ซเลนตามที่ต้องการ [14] การเพิ่มส่วนผสมหินฟันม้าให้มากขึ้นเป็นการเพิ่มส่วนผสมของแก้วทำให้เนื้อพอร์ซเลนที่ได้มีความใสมากขึ้น

2.4.1.3 ททรายแก้ว

ททรายแก้วเป็นส่วนผสมที่เติมลงไปเนื้อพอร์ซเลน ทำหน้าที่ควบคุมการหดและขยายตัวขณะเพิ่มอุณหภูมิของเตาในกระบวนการเผาระหว่างเนื้อพอร์ซเลน ที่มีโครงสร้างผลึกกับส่วนผสมที่ยังหลงเหลืออยู่ และระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิว ดังรูปที่ 2-4 ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนบางชนิด เช่น ลูกถ้วยแขวนที่ต้องการความแข็งแรงทางกลสูง ได้มีการเปลี่ยนส่วนผสมจากททรายแก้วเป็นผงอะลูมินา โดยปกติแล้วภายในเนื้อพอร์ซเลนที่เสร็จจากกระบวนการเผา มักจะมีอนุภาคของส่วนผสมที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ดังรูปที่ 2-5 ในกรณีอนุภาคของส่วนผสมททรายแก้วมีคุณสมบัติทางความร้อน โดยเฉพาะคุณสมบัติการขยายตัวที่แตกต่างกับสารละลายในเนื้อพอร์ซเลนมาก รวมทั้งขนาดอนุภาคของททรายแก้วจะมีขนาดใหญ่ จึงเกิดปฏิกิริยาได้ช้า จึงส่งผลให้ไม่มีความต่อเนื่องของเนื้อพอร์ซเลน และมีผลกระทบต่อความคงทนทางกลโดยตรง แต่ในขณะที่คุณสมบัติของส่วนผสมผงอะลูมินาตรงข้ามกับที่ได้กล่าวมา จึงทำให้มีความคงทนทางกลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2-4 กราฟการขยายตัวระหว่างเนื้อพอร์ชเลนกับสารเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ชเลน

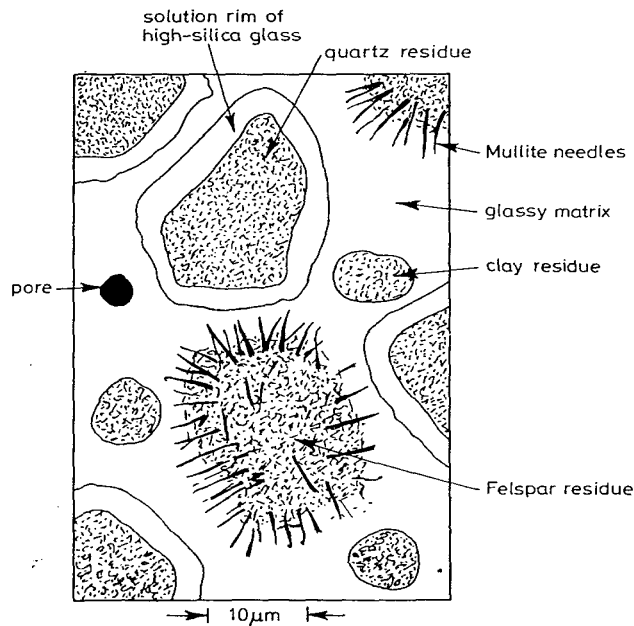
เมื่อพิจารณาไปถึงระดับโครงสร้างภายในของเนื้อพอร์ชเลนพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ชเลนมีอยู่ 2 ประการ [14] คือ

- 1) ความพรุนของเนื้อพอร์ชเลน
- 2) ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ชเลน

2.4.2.1 ความพรุนของเนื้อพอร์ชเลน

ความพรุนของเนื้อพอร์ชเลนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต การขึ้นรูปโดยกระบวนการเปียกหรือแห้งก็ตามต้องใช้เนื้อพอร์ชเลนที่มีความชื้นเป็นส่วนหนึ่ง กระบวนการรีดหรืออัดเนื้อพอร์ชเลนก่อนนำไปขึ้นรูป ถ้าหากรีดหรืออัดเนื้อพอร์ชเลนไม่แน่นจะทำให้ยังคงมีช่องว่างภายในเนื้อพอร์ชเลน หรือแม้กระทั่งกระบวนการเผาในเตาอบ ถ้าหากเผาที่อุณหภูมิต่ำจนเกินไปทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในเนื้อพอร์ชเลนเพื่อให้เป็นโครงสร้างผลึกคล้ายแก้วเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ย่อมส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าโดยตรง แต่ถ้าหากเผาที่อุณหภูมิสูงจนเกินไปจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งมาจากส่วนผสมภายในเนื้อพอร์ชเลนเริ่มระเหยออกมานั่นเองเป็นการเพิ่มช่องว่างหรือความพรุนมากขึ้น เพราะฉะนั้นความพรุนหรือช่องว่างในเนื้อพอร์ชเลนย่อมขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่

ความพรุนหรือช่องว่างในเนื้อพอร์ชเลนมี 2 แบบ คือ ช่องว่างแบบเปิด ซึ่งเกิดจากช่องว่างแต่ละจุดมาอยู่ใกล้กันหรือติดกันกลายเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ส่วนแบบที่สองคือ ช่องว่างแบบปิด เป็นช่องว่างแต่ละจุดที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ช่องว่างแบบเปิดจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้ามากกว่าช่องว่างแบบปิด [14]



รูปที่ 2-5 ภาพจำลองโครงสร้างเนื้อพอร์ซเลนซึ่งมีส่วนผสมบางชนิดหลงเหลืออยู่ [14]

การทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการเผาหลูกด้วยอุณหภูมิสูงจนเนื้อพอร์ซเลนนั้นส่วนใหญ่วัดจากความหนาแน่นของเนื้อพอร์ซเลนหลังการเผา แต่การใช้วิธีดังกล่าวให้ผลไม่ชัดเจนนักถึงแม้จะเผาเนื้อพอร์ซเลนที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป และผลที่ได้จากการทดสอบยังแตกต่างกันระหว่างเนื้อพอร์ซเลนที่เคลือบผิวกับไม่เคลือบผิว โดยเนื้อพอร์ซเลนที่ไม่ได้เคลือบผิวจะมีความหนาแน่นมากกว่าเนื้อพอร์ซเลนที่เคลือบผิว อันเนื่องมาจากสารที่เคลือบผิวของเนื้อพอร์ซเลนจะปิดกั้นไม่ให้ก๊าซซึมออกมาได้

โดยปกติแล้วการเผาหลูกด้วยอุณหภูมิสูงจนเนื้อพอร์ซเลนที่อุณหภูมิสูงจนเกินไปจะเกิดช่องว่างแบบเปิดที่มีขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากการระเหยเป็นก๊าซของส่วนผสมในเนื้อพอร์ซเลน ส่งผลให้ความคงทนทางไฟฟ้าและทางกลลดลง และที่สำคัญยังทำให้หลูกด้วยอุณหภูมิสูงจนเกินไปเกิดรอยร้าวที่สารเคลือบผิวได้ง่ายขณะทำการทดสอบแรงดึง อันเป็นสาเหตุให้หลูกด้วยอุณหภูมิสูงจนเกินไปได้ดียิ่งขึ้น ไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ การเผาหลูกด้วยอุณหภูมิสูงจนเกินไปนอกจากจะเกิดก๊าซดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังทำให้ส่วนผสมทรายแก้วและส่วนผสมอื่นๆ สามารถละลายเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น โดยเฉพาะรอยต่อระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิว จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิวไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อกระบวนการเผาในเตาได้ลดอุณหภูมิลงจะทำให้เนื้อพอร์ซเลนหดตัวใกล้เคียงกับสารเคลือบผิว ส่งผลให้เกิดแรงกดเข้าหากันที่ชั้นสารเคลือบผิวน้อย เมื่อนำหลูกด้วยอุณหภูมิสูงมาทำการทดสอบแรงดึง ทำให้แรงกดเข้าหากันที่ชั้นของสารเคลือบผิวที่มีอยู่เดิมช่วยหักล้างกับแรงดึงจากภายนอกได้ไม่มากนัก ส่งผลให้ชั้นสารเคลือบผิวต้องรับแรงดึงมาก อันเป็นสาเหตุให้ชั้นสารเคลือบผิวแตกหรือมีรอยร้าว ซึ่งเป็นสาเหตุให้หลูกด้วยอุณหภูมิสูงจนเกินไปทั้งหลูกตามมา [14] ดังนั้นควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม ที่ยังสามารถทำให้เนื้อพอร์ซเลนและชั้นสารเคลือบผิวยังคงมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวไว้ระดับหนึ่ง ส่งผลให้หลูกด้วยอุณหภูมิสูงมีความคงทนทางกลเพิ่มขึ้น

2.4.2.2 ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ซเลน

ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ซเลนมีผลต่อการเกิดรอยแตกหรือรอยร้าวในเนื้อพอร์ซเลน ที่มีผลกระทบต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้า รอยแตกหรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นนอกจากจะเป็นผลจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนผสมที่หลงเหลืออยู่ โดยที่ส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่และทำให้เกิดรอยแตกหรือรอยร้าวได้ง่ายคือ ส่วนผสมทรายแก้ว [14]

ขณะเดียวกันตำแหน่งของการเกิดรอยแตกหรือรอยร้าวยังขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนผสมทรายแก้ว เช่นเดียวกัน ถ้าหากขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าหรือเท่ากับระยะห่างระหว่างจุดของโครงผลึกแล้ว รอยแตกหรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นรอบๆ อนุภาคจะสามารถเชื่อมต่อถึงกันระหว่างจุดภายในโครงผลึก ส่งผลให้กระบวนการเผาไม่สามารถลดปริมาณช่องว่างแบบเปิดลงได้ แต่การบดส่วนผสมทรายแก้วให้ได้ขนาดเล็กตามที่ต้องการนั้นทำได้ยาก จึงได้นำส่วนผสมผงอะลูมินามาแทนส่วนผสมทรายแก้ว ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าส่วนผสมทรายแก้ว ทำให้ไม่เกิดรอยแตกหรือรอยร้าวของจุดในโครงผลึก ส่งผลให้มีความแข็งแรงทางกลและทางไฟฟ้าสูงขึ้น

บทที่ 3

การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันและข้อกำหนด

แรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน จะเป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ หรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งรูปคลื่น $250/2500 \mu s$ แต่แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะมีข้อกำหนดที่แตกต่างจากแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าว

3.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนนั้น ยังไม่มีมาตรฐานใดกำหนดรายละเอียดของการทดสอบอย่างชัดเจน แม้แต่มาตรฐานสากล IEC ก็เพิ่งจะออกฉบับตัวจริงเมื่อปี 1994 [3] อย่างไรก็ตามข้อกำหนดในมาตรฐานส่วนใหญ่จะอาศัยข้อมูลที่ได้จากรายงานของคณะทำงานของ CIGRE มาเป็นเกณฑ์อ้างอิง [15] ปัจจุบันการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน มีมาตรฐานที่พอจะใช้อ้างอิงอยู่ 3 มาตรฐาน คือ IEC 1211-1994 [3] AS2947.1-1989 [4] และ CAN/CSA-C411.1-M89-1989 [5]

ในมาตรฐานดังกล่าวจะกำหนดการทดสอบไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดแรงดันทดสอบอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน มี 2 ประการคือ

- 1) ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ (S)
- 2) ขนาดแรงดันอิมพัลส์

3.1.1 ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ความชันของแรงดันอิมพัลส์ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุเนื้อลูกถ้วยนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของลูกถ้วยแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อฉนวน (dielectric strength) [6] ค่าความชันของแรงดันอิมพัลส์จะต้องมากกว่าค่าความชันวิกฤต S_c ที่ได้จากจุดตัดของเส้น $v-t$ วาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกับเส้น $v-t$ แรงดันเบรกดาวน์เจาะทะลุเนื้อฉนวน (ดูรูปที่ 2-3) ในทางปฏิบัติมาตรฐาน IEC ไม่มีการกำหนดความชัน ส่วนมาตรฐาน AS และ CAN กำหนดความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีค่า $2,500 \text{ kV}/\mu s$ หรือมากกว่า

3.1.2 ขนาดแรงดันทดสอบ

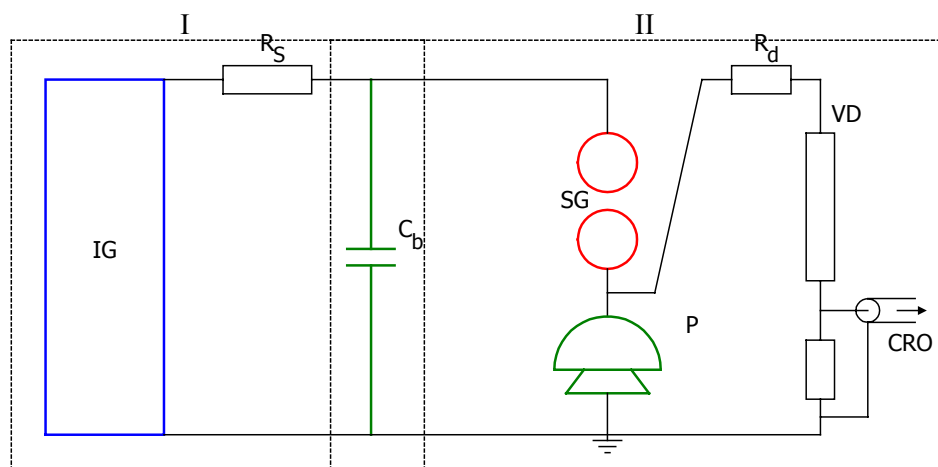
ค่าแรงดันที่จะใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนนั้นให้กำหนดเป็นจำนวนเท่า หรือ per unit (p.u.) ของค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของแรงดันที่มีรูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ คือ $U_{b50\%}$ ของลูกถ้วย

ทำให้ค่า $U_{b50\%}$ สูงกว่า เช่น 3 p.u. ในมาตรฐาน IEC กำหนดขนาดแรงดันทดสอบเท่ากับ 2-3 p.u. แต่มาตรฐาน AS และ CAN ไม่ได้กำหนดขนาดแรงดันทดสอบ

3.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยทั่วไปนิยมใช้การตัดรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ด้วยสปาร์กแก๊ปตัดรูปคลื่น [6] ซึ่งจะใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน IG ขนาดเพียง 1,000 kV เป็นตัวจ่ายแรงดัน อิมพัลส์ให้แก่ตัวเก็บประจุโหลด C_b ที่ต่อขนานไว้ด้วยสปาร์กแก๊ปทรงกลม SG ที่ต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบ P คือ ลูกถ้วยฉนวนดังวงจรแสดงในรูปที่ 3-1 แรงดันที่เกิดขึ้นบนลูกถ้วยฉนวนจะวัดด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ VD ที่มีผลตอบสนองรวดเร็วร่วมกับออสซิลโลสโคป CRO

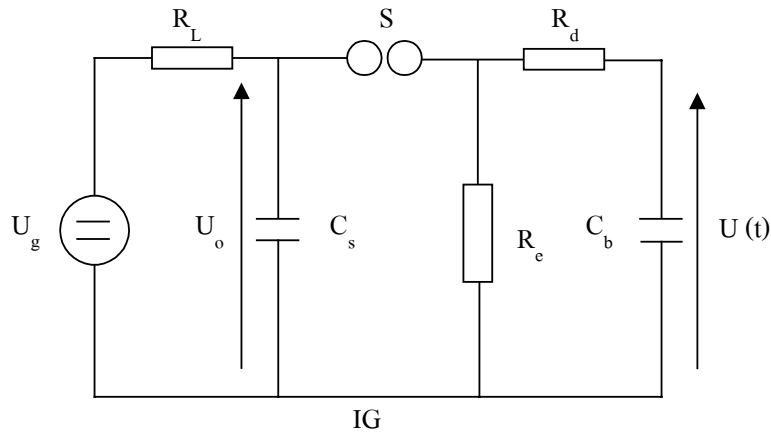
วงจรชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในรูปที่ 3-1 อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรก I เป็นวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน และส่วนที่สอง II คือ ส่วนเสริมที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยมีตัวเก็บประจุโหลด C_b ทำหน้าที่คัปปลิงวงจรทั้งสอง



รูปที่ 3-1 ส่วนประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน [5]

3.2.1 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s

ในรูปที่ 3-1 (I) เป็นส่วนวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน จะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง U_0 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s สปาร์กแก๊ปมีไกสวิตช์ (Trigger) S ความต้านทานปรับหน้าคลื่นคือ R_s และหางคลื่นคือ R_p และตัวเก็บประจุโหลด C_b ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคัปปลิงด้วย ดังในรูปที่ 3-2 [11]



รูปที่ 3-2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ปกติ

ส่วนประกอบวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นมาตรฐาน

U_o คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง

$U(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ปกติที่จ่ายออก

R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

S คือ สปรักแกปมีไกสวิตช์ (Trigger)

R_p คือ ความต้านทานปรับทางคลื่น

R_s คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น

C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลดทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุคัปปลิงให้กับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

หน้าคลื่นขึ้น

ประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ η คือ อัตราส่วนแรงดันที่จ่ายออกต่อแรงดันอัดประจุ

U_o คือ $\eta = U/U_o \leq C_s / (C_s + C_b)$

ฉะนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ และให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนด ควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ โดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10 C_b$ [10]

3.2.2 วงจรเสริม II เพื่อสร้างอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น

ในส่วนวงจรเสริม (II) ของรูปที่ 3-1 ตัวเก็บประจุโหลดคัปปลิงจะได้รับการคายประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และได้แรงดันตกคร่อม C_b มีรูปคลื่นมาตรฐานเต็ม เมื่อแรงดันคร่อม C_b มีค่าสูงมากพอจะทำให้เกิดสปรักแกปที่สปรักแกป SG ที่ต่อขนานกับ C_b ทำให้เกิดคลื่นตัดและมีความชันสูง ความชันนี้จะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับขนาดของ C_b

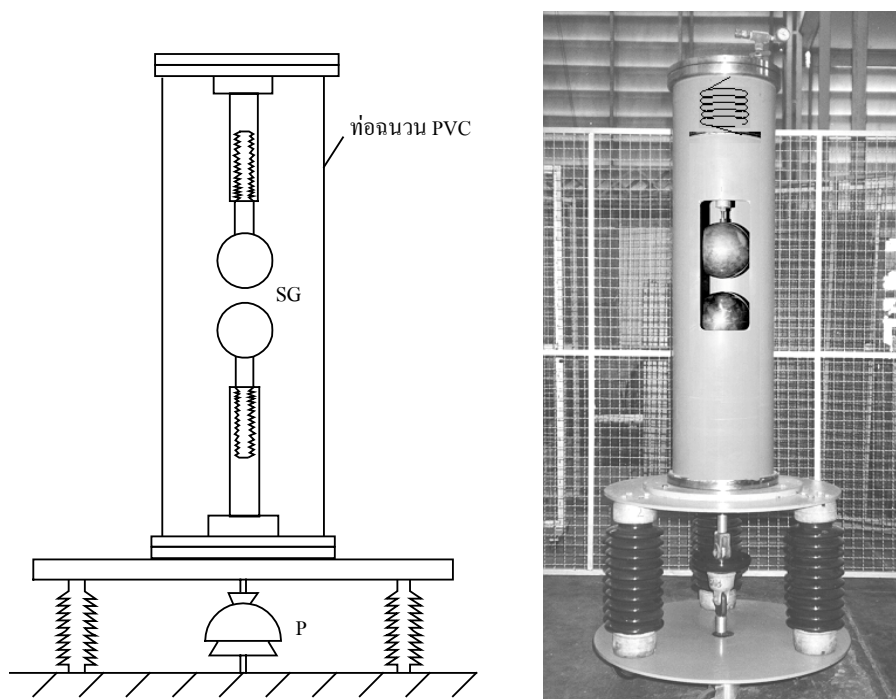
พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุโหลดคัปปลิง C_b ต้องมากพอที่จะจ่ายให้กับวัสดุทดสอบ คือ ลูกถ้วยฉนวนและค่าเก็บประจุอื่นๆ ที่ต่ออยู่หลัง C_b การเลือกขนาด C_b ควรเลือกตามเกณฑ์การเลือก C_s คือ [8]

$$C_b \geq 10 C_t$$

เมื่อ C_t คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบและอื่นๆ ที่ต่อขนานอยู่กับวัสดุทดสอบ ได้แก่ ค่าเก็บประจุสเตรย์ของฐานยึดลูกถ้วยฉนวน และของอุปกรณ์วัดแรงดันเป็นต้น

3.2.3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่น SG

สปาร์กแกปที่ทำหน้าที่ตัดรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ปกติในรูปที่ 2-4 แล้วทำให้เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขึ้น สปาร์กแกปตัดรูปคลื่นที่ให้ผลในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันที่ควบคุมได้ตั้งแต่ความชันต่ำๆ เช่น 1,000 kV/ μ s และปรับค่าให้สูงขึ้น เช่น สูงถึง 9,200 kV/ μ s จะใช้วิธีตัดรูปคลื่นด้วยสปาร์กแกปทรงกลมที่ติดตั้งในถังฉนวนบรรจุก๊าซอัดความดันที่สามารถปรับค่าความดันได้ ดังในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่นทำด้วยทรงกลมทองแดง ติดตั้งภายในท่อฉนวนพีวีซีบรรจุก๊าซอัดความดัน

3.2.4 อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์

ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะประกอบด้วย อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์และออสซิลโลสโคปที่มีเวลาตอบสนองค่อนข้างรวดเร็ว เพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนอันรวดเร็วของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

ตามคำแนะนำของ CIGRE [15] โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันควรเป็นประเภทความต้านทานต่ำ หรือชนิดอื่นที่มีความเร็วสูง

3.3 ข้อกำหนดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น

ข้อกำหนดที่สำคัญในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ อาจอ้างอิงได้จากมาตรฐานที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 คือ

- 1) IEC 1211-1994 [3]
- 2) AS 2947.1-1989 [4]
- 3) CAN/CSA-C411.1-M89-1989 [5]

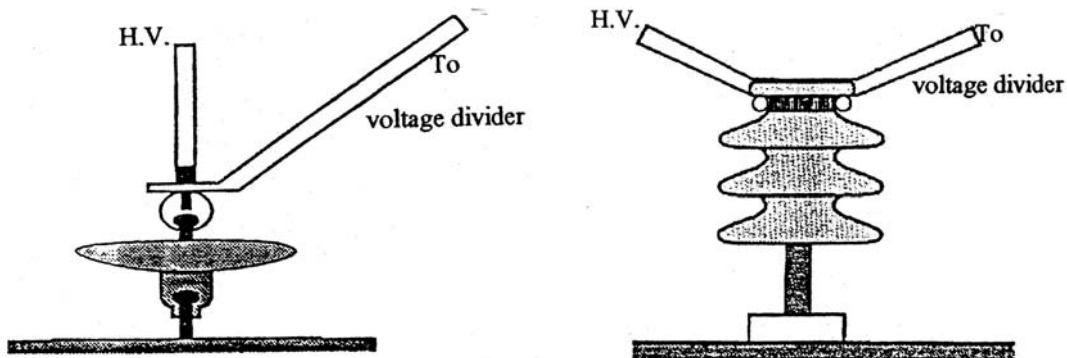
ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่น

ข้อกำหนด	มาตรฐาน		
	IEC 1211-1994	AS 2947.1-1989	CAN/CSA-C411.1M89-1989
1. จำนวนตัวอย่าง	5 ตัวอย่าง	5 ตัวอย่าง	10 ตัวอย่าง
2. แรงดันทดสอบ	2-3 เท่า (p.u.) ของค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 kV/ μ s ขั้วลบ*	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด
3. ความชันน้ำหนักคลื่น	ไม่ได้กำหนด	2500 kV/ μ s	≥ 2500 kV/ μ s
4. ช่วงเวลาตัดน้ำหนักคลื่น	ไม่ได้กำหนด	≤ 0.4 kV/ μ s	ไม่ได้กำหนด
5. วิธีการทดสอบ	ป้อนแรงดันชั่ววอก 10 ครั้ง ตามด้วยชั่ววอก 10 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1-2 นาที	ป้อนแรงดันชั่ววอก 5 ครั้ง ตามด้วยชั่ววอก 5 ครั้ง	ป้อนแรงดันชั่ววอก 10 ครั้ง ตามด้วยชั่ววอก 10 ครั้ง หลังจากนั้นทำการทดสอบวาบไฟตามผิวแห้ง ความถี่ต่ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง
6. การวิเคราะห์ผลและการยอมรับ	เมื่อดูด้วยตาเปล่าลูกถ้วยต้องไม่แตกหรือชำรุด รูปออสซิลโลแกรมต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง และอาจจะนำไปทดสอบด้วยค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ 2 ครั้ง	ลูกถ้วยต้องไม่แตกหรือชำรุด ถ้าไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยตาเปล่า ก็สามารถนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบประจำ (Routine test) เป็นเวลา 1 นาที (ป้อนด้วยแรงดันความถี่สูงก่อน 2-3 วินาทีแล้วตามด้วยแรงดันความถี่ต่ำ)	ลูกถ้วยฉนวนต้องไม่แตกหรือชำรุด และค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ ต้องไม่น้อยกว่า 95% ของค่าที่กำหนดของลูกถ้วยรุ่นนั้นๆ

* จะอ้างอิงขั้วที่มีค่าวาบไฟอิมพัลส์วิกฤตรูปคลื่นมาตรฐาน ($U_{b50\%}$) สูงกว่า

3.4 การติดตั้งลูกถ้วยทดสอบ

ลูกถ้วยฉนวนที่มีผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น ที่อาจจะเกิดการเจาะทะลุได้จะเป็นลูกถ้วยฉนวนแบบ B ซึ่งได้แก่ ลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนทดสอบจะต้องให้มีลักษณะเหมือน หรือใกล้เคียงกับเวลาใช้งานจริง คือ ลูกถ้วยแขวนจะให้ด้านที่เป็นก้าน (pin) ต่อกับสปาร์กแก๊ป SG ซึ่งเป็นต้นทางของแรงดันตัวจ่าย ส่วนฝาครอบ (cap) จะต่อเข้ากับด้านที่ต่อลงดินตามวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นในรูปที่ 3-1 ส่วนลูกถ้วยก้านตรงจะต่อสายป้อนแรงดันเข้าส่วนหัวของลูกถ้วย และก้านต่อลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 3-4 [3]



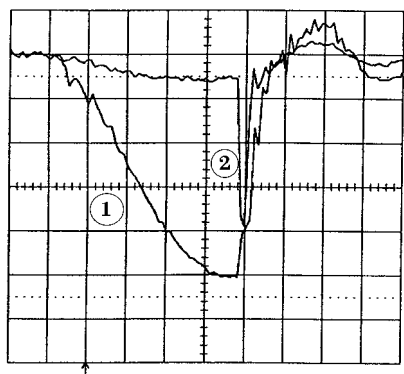
a) การติดตั้งลูกถ้วยแขวน

b) การติดตั้งลูกถ้วยก้านตรง

รูปที่ 3-4 แสดงการติดตั้งลูกถ้วยทดสอบ

3.5 การป้อนและการวัดแรงดัน

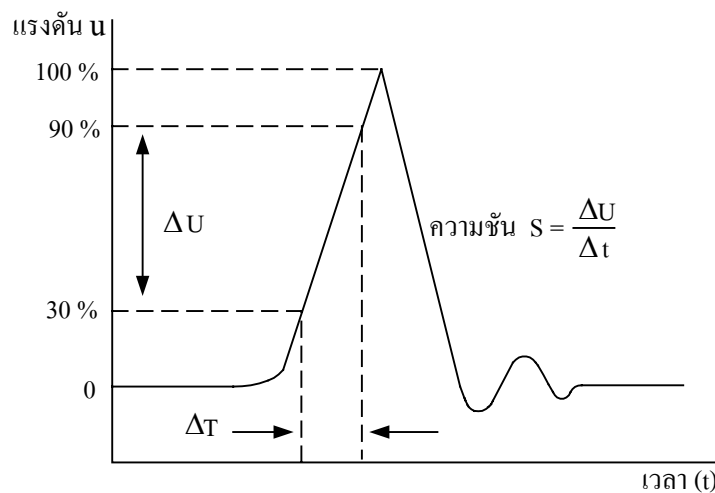
แรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานให้กับตัวเก็บประจุโหลด C_b ดังวงจรรูปที่ 3-1 เมื่อแรงดันถึงระดับหนึ่งก็จะเกิดสปาร์กผ่านสปาร์กแก๊ปตัวรูปคลื่น SG แรงดันส่วนหนึ่งจะตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน จะเกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น ดังในรูปที่ 3-5 แสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นเทียบกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs



รูปที่ 3-5 แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.38/50 μs (1) ถูกตัดด้วยสปาร์กแก๊ปได้รูปคลื่นอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น (2) มีความชัน 6,120 kV/ μs สเกลเวลา 0.5 μs /div สเกลแรงดัน 79.1 kV/div [8]

การป้อนแรงดันทดสอบ จะทดลองทั้งขั้วลบและขั้วบวก โดยจะป้อนขั้วแรงดันที่มีผลต่อการเจาะทะลุได้น้อยกว่าเป็นอันดับแรก กล่าวคือ ลูกถ้วยแขวนจะป้อนแรงดันขั้วบวกก่อนขั้วลบ เพราะขั้วลบทำให้เกิดเจาะทะลุลูกถ้วยง่ายขึ้นได้ง่ายกว่า ทั้งนี้เนื่องจากค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของขั้วลบมีค่าสูงกว่าของขั้วบวก แต่ละขั้วแรงดันจะป้อนแรงดันจนกว่าจะทะลุแต่ไม่น้อยกว่า 16 ครั้ง โดยมีระยะพักระหว่างการป้อนต่างกันในช่วง 1-2 นาที เพื่อมิให้มีผลกระทบจากการเกิดวาทไฟครั้งก่อน ที่อาจยังมีสภาพนำไฟฟ้าของอากาศโดยรอบผิวลูกถ้วย

การวัดหาค่าความชันจะคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันและเวลาในช่วง 30 % ถึง 90 % ของค่าสูงสุดของแรงดัน ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ภาพการคำนวณความชัน

บทที่ 4

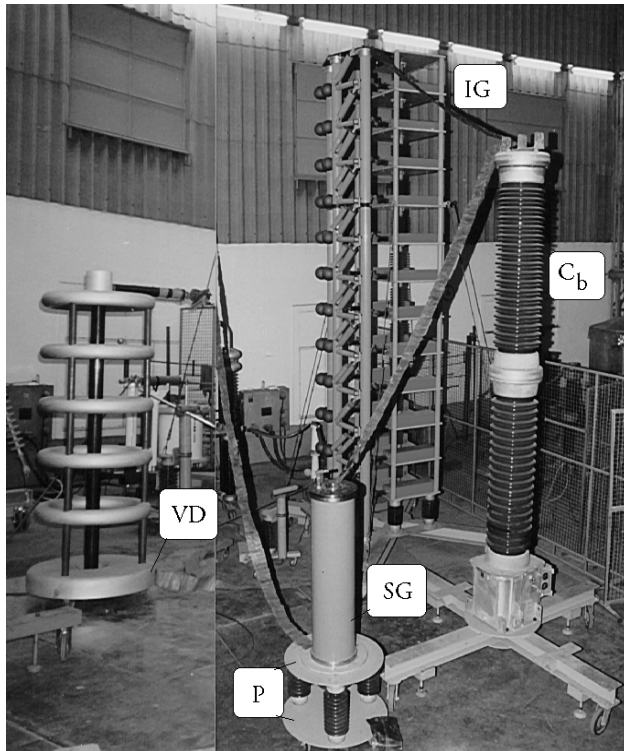
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

การศึกษาวิจัยโครงการนี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นที่มีต่อลูกถ้วยฉนวน แรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นจะได้จากชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น ที่ออกแบบสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ [16] และทำการทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนประเภท B คือ ลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง โดยศึกษาถึงผลของความชันของน้ำหนักลิ้นแรงดันอิมพัลส์ ผลของชั่วแรงดัน คือ ชั่วบวกและชั่วลบ ผลของเนื้อพอร์ซเลน และรวมถึงแนวทางการแก้ปัญหาการเจาะทะลุลูกถ้วยฉนวน

4.1 ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น

ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังในรูปที่ 4-1 โดยมีเงื่อนไขที่กำหนด คือ แรงดันอิมพัลส์มีความชันน้ำหนักลิ้น $S \geq 2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ และขนาดแรงดันที่สร้างขึ้น ขณะไม่มีวัสดุทดสอบประมาณ 3 เท่าของ $U_{b50} \%$ ของลูกถ้วยที่ต้องการทดสอบการเจาะทะลุ คือ 600 kV ดังนี้

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นปกติ IG 1.2/50 μs มีค่าที่กำหนดคือ 1,000 kV 30 kJ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิด 50 nF [7]
- 2) ตัวเก็บประจุคัปปลิง 8 nF 1,600 kV
- 3) สปาร์กแกปตัดคลื่น SG แบบทรงกลมทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ระยะแกป 5 ซม. ติดตั้งภายในท่อพีวีซีบรรจุก๊าซ N_2 อัดความดัน 4 บาร์
- 4) ที่ติดตั้งลูกถ้วยระหว่างหน้าแปลน
- 5) อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ VD แบบความต้านทานมีซีลด์ 600 kV ซึ่งมีเวลาตอบสนองแรงดันรูปขึ้น 13.7 ns
- 6) ออสซิลโลสโคป (CRO) ใช้บันทึกรูปคลื่นและขนาดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นมีแบนด์วิดท์ 1 GHz



IG เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1,000 kV 30 kJ

C_b ตัวเก็บประจุคัปปลิง 8 nF 1,600 kV

SG สปาร์กแกปัดรูปคลื่นแบบอัดความดันก๊าซ N_2

P ที่ติดตั้งลูกถ้วยระหว่างหน้าแปลน

VD อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์

CRO สำหรับบันทึกรูปคลื่นแรงดัน

CRO



รูปที่ 4-1 ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นทดสอบการเจาะทะลุ
ของลูกถ้วยนวนพอร์ซเลน พร้อมอุปกรณ์วัดและควบคุม [16]

4.2 ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบจะใช้ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบ B คือ ANSI Class 52-1, Class 52-4 และ Class 56-2 ดังรูปที่ 4-2 โดยมีเนื้อพอร์ซเลน 2 ชนิด คือ เนื้อพอร์ซเลนธรรมดา ซึ่งมีส่วนผสมทรายแก้ว และเนื้อพอร์ซเลนอะลูมินา มีส่วนผสมอะลูมินาแทนทรายแก้วชนิดละ 10 ลูก



Class 52-4

Class 52-1

Class 56-3

รูปที่ 4-2 ภาพถ่ายลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

4.3 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนทดสอบ

ลูกถ้วยฉนวนที่ต้องการทดสอบจะติดตั้งอยู่ระหว่างหน้าแปลนแผ่นเหล็ก 2 แผ่น แผ่นบนยึดอยู่บนลูกถ้วยหลัก (post insulator) และใช้รองรับสปาร์กแกปตัดคลื่น SG ที่ติดตั้งในท่อพีวีซีอัดก๊าซ N_2 ที่รับความดันก๊าซได้ถึง 4 บาร์ ส่วนหน้าแปลนแผ่นล่างรองรับลูกถ้วยหลักและต่อลงดินดังรูปที่ 4-3 ลักษณะการติดตั้ง ลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 1211-1944 [3] คือ ให้มีลักษณะการติดตั้งใกล้เคียงกับเวลาใช้งานจริง

4.4 การป้อนแรงดันทดสอบ

การทดสอบจะเริ่มทดสอบด้วยชั่วแรงดันที่มีผลต่อการเจาะทะลุน้อยกว่าเป็นอันดับแรก และตามด้วยชั่วแรงดันที่มีผลต่อการเกิดเจาะทะลุมากกว่ากล่าวคือ ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-1 และ 52-4 จะทดสอบด้วยชั่วบวกก่อน เสร็จแล้วจึงทดสอบด้วยชั่วลบ ตรงกันข้ามลูกถ้วยก้านตรง ANSI Class 56-2 จะเริ่มทดสอบด้วยชั่วลบก่อนแล้วตามด้วยชั่วบวก แต่ละชั่วแรงดัน ลูกถ้วยตัวอย่างทดสอบแต่ละลูกจะได้รับการป้อนแรงดันจนกระทั่งเจาะทะลุ แต่ไม่เกินลูกละ 16 ครั้ง โดยที่มาตรฐาน IEC และ CAN/CSA กำหนดให้ทดสอบชั่วละ 10 ครั้ง ช่วงระยะเวลาระหว่างการป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นแต่ละครั้งจะอยู่ในช่วง 1-2 นาที โดยคำนึงถึงกระแสป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบไม่สูงเกินไปด้วย



รูปที่ 4-3 ภาพถ่ายการติดตั้งลูกถ้วยแขวนเพื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น
ก่อนเจาะทะลุและหลังการเจาะทะลุ

4.5 ผลการทดสอบผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น

การทดสอบเพื่อศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นที่มีต่อความคงทนของลูกถ้วยฉนวน จะศึกษาผลดังต่อไปนี้

- 1) ผลของความชื้นของน้ำหนักชั้นแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น
- 2) ผลของชั่วแรงดัน ชั่วบวกกับชั่วลบ
- 3) ผลของเนื้อพอร์ซเลน ระหว่างเนื้ออะลูมินากับเนื้อธรรมดา

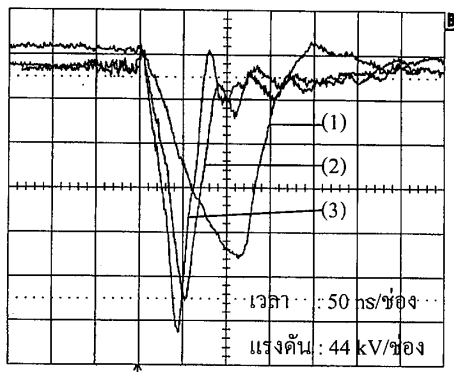
4.5.1 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class 52-1

การทดสอบจะเริ่มต้นด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้นที่มีความชัน $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ด้วยชั่วบวกก่อน โดยทำการทดสอบกับลูกถ้วยพอร์ซเลนเนื้ออะลูมินาและเนื้อธรรมดา ผลของการทดสอบที่ความชัน $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ดังรูปที่ 4-4 บนลูกถ้วยเนื้อพอร์ซเลนทั้งสองชนิดปรากฏว่าไม่มีการเจาะทะลุใดๆ ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ จึงทำการทดสอบที่ความชันสูงขึ้นเป็น $5,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ดังรูปคลื่นรูปที่ 4-4 บนลูกถ้วยชุดเดิม ซึ่งปรากฏว่าไม่มีลูกถ้วยใดเกิดการเจาะทะลุอีกเช่นกันทั้งชั่วบวกและชั่วลบ จึงทำการทดสอบด้วยความชัน เพิ่ม

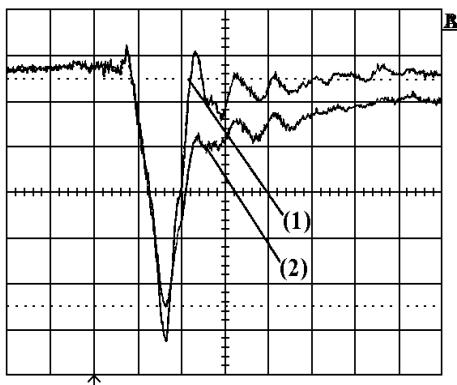
ขึ้นเป็น 6,500 kV/ μ s ดังรูปตัวอย่างรูปที่ 4-4 โดยใช้ลูกถ้วยชุดเดิมที่ผ่านการทดสอบ 2,500 kV/ μ s และ 5,500 kV/ μ s มาแล้ว ผลปรากฏว่าลูกถ้วยเนื้อพอร์ซเลนอะลูมินาเกิดเจาะทะลุจำนวน 5 ลูก คิดเป็น 50 % ส่วนเนื้อพอร์ซเลนธรรมดาเกิดเจาะทะลุเฉพาะข้อลับเช่นกันจำนวน 3 ลูก คิดเป็น 30 % ดังผลแสดงในตารางที่ 4.1 และในรูปที่ 4-5 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขณะเกิดวابلไฟตามผิวและขณะเกิดเจาะทะลุที่ความชัน 6500 kV/ μ s บนลูกถ้วยพอร์ซเลนเนื้ออะลูมินา

เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบเบื้องต้นที่แสดงให้เห็นว่า แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ 6500 kV/ μ s เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินามีความทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ต่ำกว่าเนื้อพอร์ซเลนธรรมดา จึงทำการทดสอบกับลูกถ้วยแขวน Class 52-1 ชุดใหม่เพิ่มเติมอีก 2 ชุด โดยไม่ผ่านการทดสอบที่ความชัน 2,500 kV/ μ s และ 5,500 kV/ μ s มาก่อน ผลการทดสอบปรากฏว่าลูกถ้วยเพิ่มเติมชุดที่ 1 เนื้อพอร์ซเลนอะลูมินาเกิดเจาะทะลุเฉพาะข้อลับจำนวน 6 ลูก จากจำนวน 10 ลูก หรือคิดเป็น 60 % ส่วนเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดาเกิดเจาะทะลุเฉพาะข้อลับเช่นกันจำนวน 2 ลูก คิดเป็น 20 % ดังผลแสดงในตารางที่ 4.1

ส่วนชุดที่สองเพิ่มเติมจะทำการทดสอบเฉพาะเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาซึ่งเป็นเนื้อพอร์ซเลนที่อยู่ในสายผลิตประจำอยู่แล้ว ส่วนเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดานั้นทางบริษัทต้องผลิตเป็นกรณีพิเศษจึงมีจำนวนลูกถ้วยจำกัด ผลการทดสอบปรากฏว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาเกิดเจาะทะลุเฉพาะข้อลับจำนวน 5 ลูก หรือคิดเป็น 50 % ดังผลแสดงในตารางที่ 4.1 และค่าแรงดันเฉลี่ยที่เกิดวابلไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยนวนได้แสดงไว้ในตาราง 4.2



รูปที่ 4-4 ตัวอย่างออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ 2,500 kV/ μ s (1), 5,500 kV/ μ s (2), 6,500 kV/ μ s (3) ข้อลับ



รูปที่ 4-5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันโดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวابلไฟตามผิว (1) กับขณะเกิดเจาะทะลุ (2) ที่ความชัน 6,500 kV/ μ s บนลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-1

พอร์ซเลน		ความชื้น (kV/μs)						จำนวนเจาะทะลุเกิดที่ 6500 kV/μs	
		2,500		5,500		6,500			
		+	-	+	-	+	-	+	-
A	A1	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	5/10	0	16/30
	A2	-	-	-	-	0/10	6/10		
	A3	-	-	-	-	0/10	5/10		
N	N1	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	3/10	0	5/20
	N2	-	-	-	-	0/10	2/10		

A2 : เนื้ออะลูมินา** N : เนื้อธรรมดา* Ax, Nx คือ ลำดับชุดที่ทดสอบชุดละ 10 ลูก

ตารางที่ 4.2 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดวาวไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-1

พอร์ซเลน		ความชื้น (kV/μs)						P (Σ%P)
		2,500		5,500		6,500		
		+	-	+	-	+	-	
A	F	210	232	250	260	281	300	16/30
	P	-	-	-	-	-	235	(53%)
N	F	200	235	247	263	280	298	5/20
	P	-	-	-	-	-	231	(25%)

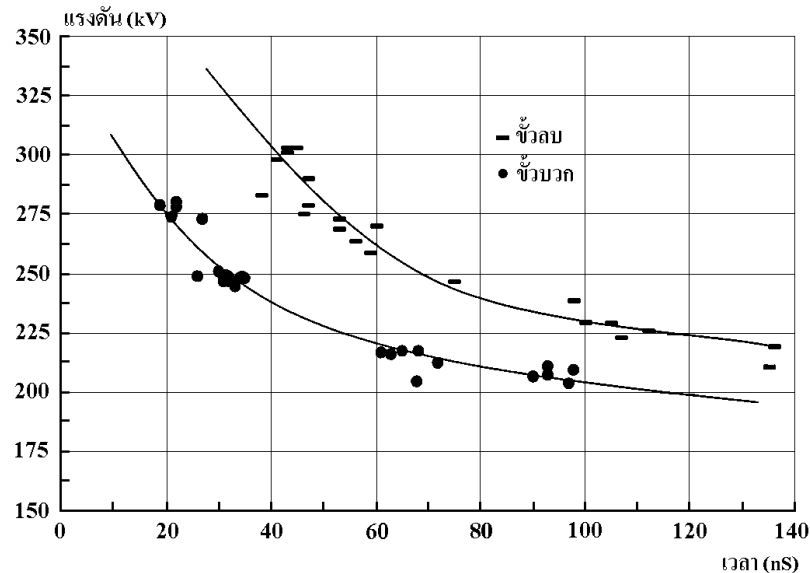
F : วาวไฟตามผิว และ P : เจาะทะลุ

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่า เหตุที่ลูกถ้วย Class. 52-1 เริ่มเจาะทะลุที่ความชื้น 6,500 kV/μs เนื่องจากมีระยะวาวไฟตามผิวน้อยจึงทำให้เกิดวาวไฟตามผิวได้ง่ายและเป็นผลให้แรงดันวาวไฟตามผิวดำ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดเจาะทะลุได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความชื้นเพื่อให้ ความเครียดสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะทำให้เกิดเจาะทะลุ ผลของข้อสรุปพบว่าข้อสรุปมีผลการเกิดเจาะ ทะลุมากกว่าข้อสรุป ส่วนเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดาแตกน้อยกว่าชนิดอะลูมินา

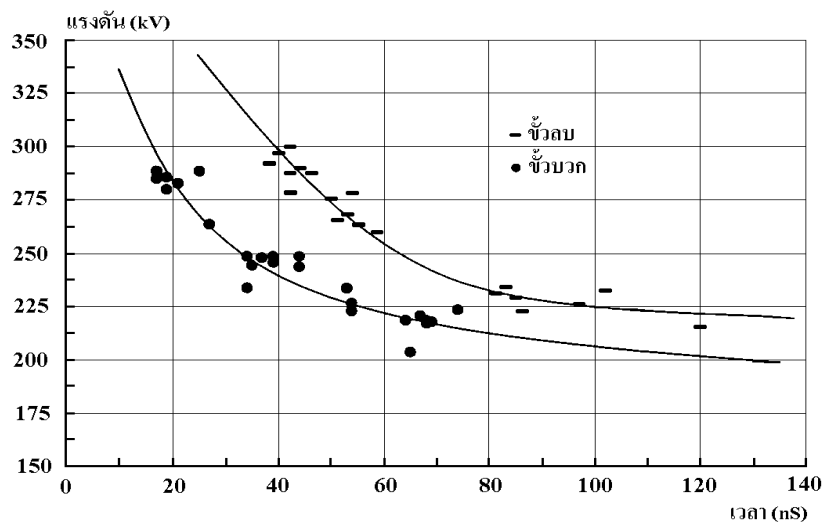
จากออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้นที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคป สามารถนำ ผลของเวลาและค่าแรงดันวาวไฟมาเขียนกราฟลักษณะแรงดัน-เวลา เฉพาะการเกิดวาวไฟตามผิวผ่านอากาศ ของลูกถ้วยจนวนพอร์ซเลนทั้งสองเนื้อทั้งข้อสรุปและลบ ดังรูปที่ 4-6 ส่วนลักษณะแรงดัน-เวลาของการ เจาะทะลุไม่อาจเขียนกราฟได้ เนื่องจากข้อมูลการเกิดเจาะทะลุมีจำนวนน้อยและเกิดเจาะทะลุที่ความชื้น 6,500 kV/μs เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบเส้นกราฟลักษณะแรงดัน-เวลา จะพบว่าของข้อสรุปอยู่สูงกว่าข้อสรุปของทั้งสองเนื้อ พอร์ซเลนแสดงว่าเมื่อเกิดแรงดันอิมพัลส์บนลูกถ้วยจนวน ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวของข้อสรุปจะต่ำกว่า

ข้อสรุป ทั้งนี้เป็นไปตามทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซระหว่างอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้ากระจายแบบไม่สม่ำเสมอ เช่น โลหะปลายแหลมกับระนาบ ที่ค่าแรงดันเบรกดาวน์ข้อสรุป (โลหะปลายแหลม) จะสูงกว่าข้อสรุป จึงทำให้ข้อสรุปมีโอกาสเกิดเจาะทะลุได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.1 จากข้อมูลที่ได้นำเสนอมาพบว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดามีความทนทานทางไฟฟ้ามากกว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาเมื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้น และทั้งสองเนื้อพอร์ซเลนเกิดเจาะทะลุภายในกรอบโลหะเท่านั้น



a) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา



b) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา

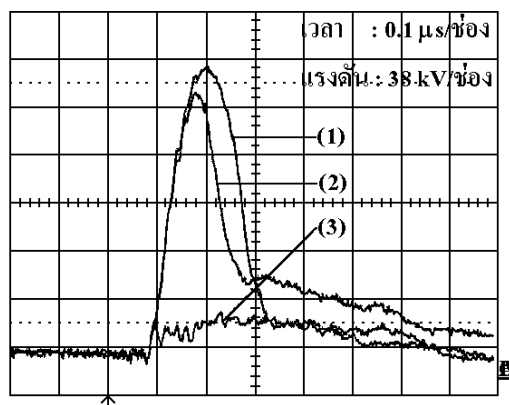
รูปที่ 4-6 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาวไฟตามผิว ผ่านอากาศของลูกถ้วยฉนวน Class 52-1

4.5.2 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class 52-4

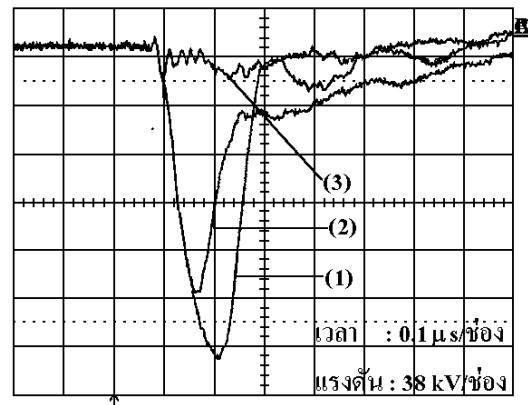
จากผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class 52-4 ปรากฏว่าที่ความชัน $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ สามารถทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนเกิดเจาะทะลุได้ โดยที่เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาเกิดเจาะทะลุข้อสรุปจำนวน

1 ลูก และข้าวลบจำนวน 4 ลูก รวมทั้งหมด 5 ลูกหรือคิดเป็น 50 % ส่วนเนื้อพอร์ชเลนชนิดธรรมดาเจาะทะลุ ข้าวบวกจำนวน 2 ลูกและข้าวลบจำนวน 3 ลูก รวมทั้งหมด 5 ลูก หรือคิดเป็น 50% รูปที่ 4-7 เป็นตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น 2,500 kV/ μ s ที่เกิดวาวไฟตามผิว และหลังการเจาะทะลุ

เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การเกิดเจาะทะลุทั้งเนื้อพอร์ชเลนชนิดอะลูมินา และชนิดธรรมดาเท่ากัน ไม่สามารถเปรียบเทียบความคงทนทางไฟฟ้าได้ จึงทำการทดสอบเพิ่มเติมขึ้นอีก 2 ชุด โดยการทดสอบเพิ่มเติมนี้ใช้เฉพาะเนื้อพอร์ชเลนชนิดอะลูมินา ผลการทดสอบดังแสดงในตาราง 4.3 และค่าแรงดันเฉลี่ยวาวไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ชเลน Class 52-4 แสดงในตารางที่ 4.4 ในรูปที่ 4-7 แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นขณะเกิดวาวไฟตามผิว ขณะเกิดเจาะทะลุและหลังจากการเกิดเจาะทะลุที่ความชัน 2,500 kV/ μ s ทั้งข้าวบวกและข้าวลบของลูกถ้วยเนื้อพอร์ชเลนธรรมดาและเนื้ออะลูมินา

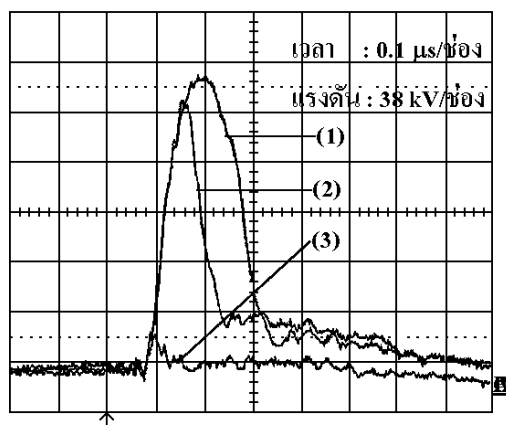


ข้าวบวก

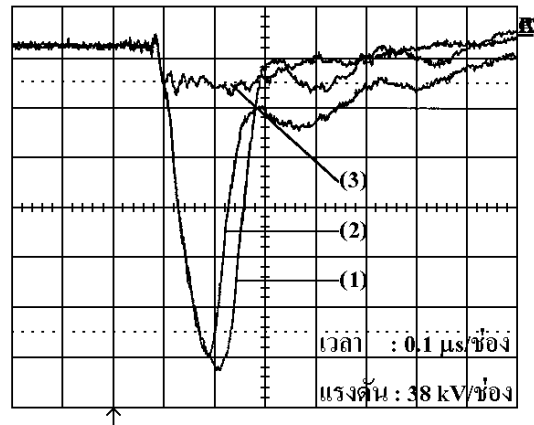


ข้าวลบ

a) เนื้อพอร์ชเลนชนิดอะลูมินา



ข้าวบวก



ข้าวลบ

b) เนื้อพอร์ชเลนชนิดธรรมดา

รูปที่ 4-7 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นโดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาวไฟตามผิว (1) ขณะเกิดเจาะทะลุ (2) กับหลังจากเกิดเจาะทะลุ (3) ที่ความชัน 2,500 kV/ μ s

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-4

พอร์ซเลน		ความชื้น (kV/ μ s)		Σ P	%P
		2,500			
		+	-		
A	A1	1/10	4/9	5/10	67%
	A2	5/10	2/5	7/10	
	A3*	2/4	6/10	8/10	
N	N1	2/10	3/8	5/10	50%

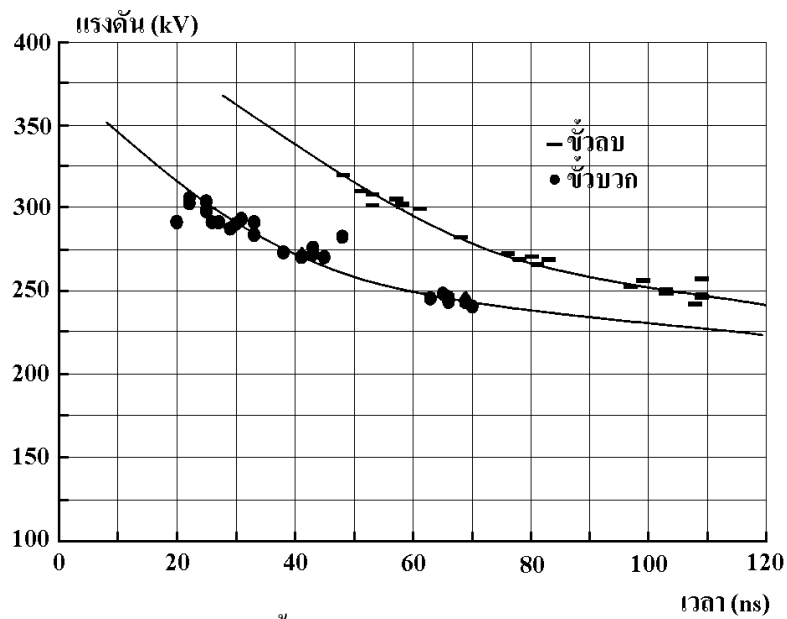
A3* ทดสอบชั่วคราวและตามด้วยชั่วคราว

ตารางที่ 4.4 แรงดันเฉลี่ยวาวไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน Class 52-4

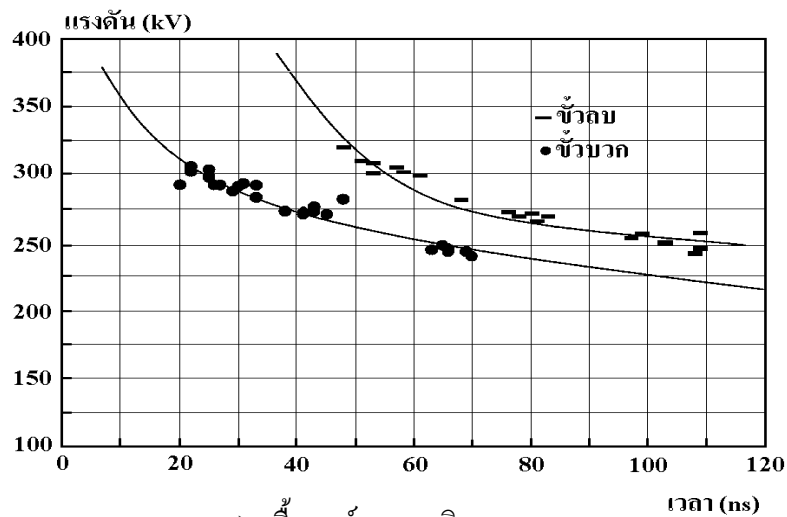
พอร์ซเลน		ความชื้น (kV/ μ s)	
		2,500	
		+	-
A	F	248	260
	P	232	230
N	F	242	263
	P	200	235

จากออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคป สามารถนำมาเขียนกราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาวไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยแขวนทั้งสองเนื้อชั่วคราวและชั่วคราว ดังรูปที่ 4-8 ส่วนลักษณะแรงดัน-เวลาของการเกิดเจาะทะลุเนื้อลูกถ้วยนั้นไม่อาจเขียนกราฟได้ เนื่องจากข้อมูลการเกิดเจาะทะลุมีจำนวนน้อยและได้ทำการทดสอบที่ความชื้น 2,500 kV/ μ s เท่านั้น

ในรูปที่ 4-8 a) และ b) กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาชั่วคราวและชั่วคราวของเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาและชนิดธรรมดาไม่แตกต่างกันนัก ซึ่งหมายถึงระยะหรือมิติภายนอกของทั้งสองเนื้อพอร์ซเลนเท่ากัน ส่วนกราฟลักษณะแรงดัน-เวลาของชั่วคราวสูงกว่าชั่วคราวทั้งสองเนื้อพอร์ซเลน แสดงว่าเมื่อเกิดแรงดันอิมพัลส์บนลูกถ้วยแขวน ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวของชั่วคราวจะต่ำกว่าชั่วคราว ซึ่งมีผลทำให้ชั่วคราวมีโอกาสเกิดเจาะทะลุน้อยกว่าชั่วคราว จากข้อมูลการทดสอบพบว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดามีความทนทางไฟฟ้ามากกว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาเมื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น และทั้งสองเนื้อพอร์ซเลนเกิดเจาะทะลุภายในกรอบโลหะเท่านั้น



a) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา

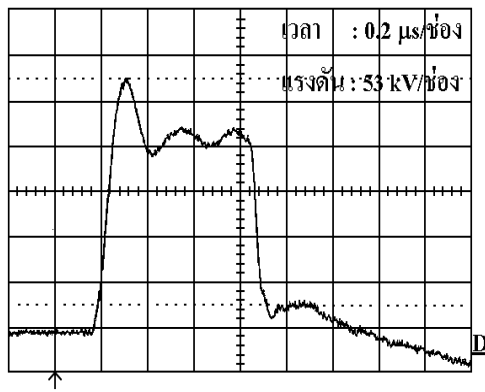


b) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา

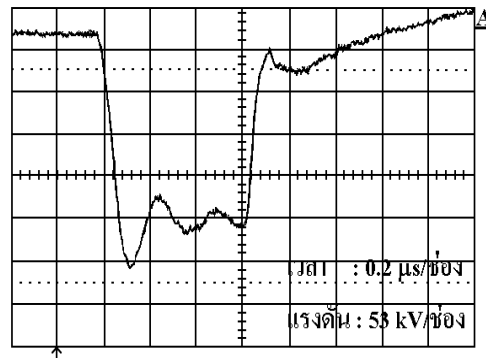
รูปที่ 4-8 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาบไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยฉนวน Class 52-4

4.5.3 ผลการทดสอบลูกถ้วยก้านตรงพอร์ซเลน Class 56-2

การทดสอบลูกถ้วยก้านตรงพอร์ซเลน Class 56-2 ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน เริ่มต้นที่ระดับความชัน $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ทั้งขั้วลบและขั้วบวก ผลปรากฏว่าเนื้อฉนวนพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาและชนิดธรรมดาสามารถทนต่อการทดสอบที่ความชันดังกล่าว โดยไม่มีลูกถ้วยใดเกิดเจาะทะลุ รูปที่ 4-9 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันพัลส์หน้าคลื่นชัน $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ จะพบว่าต้องใช้เวลาระยะหนึ่งก่อนจะเกิดวาบไฟตามผิวปรากฏการณ์เช่นนี้อาจมีสาเหตุมาจากการมีระยะวาบไฟตามผิวมากขึ้น



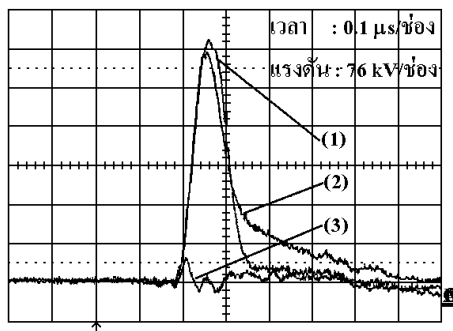
ฟ้าผ่า



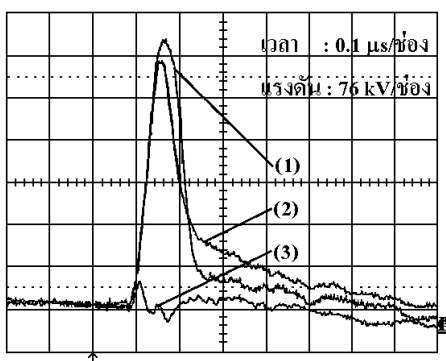
ฟ้าผ่า

รูปที่ 4-9 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2500 kV/μs เนื้อพอร์ชเลนชนิดธรรมดา
ของลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2

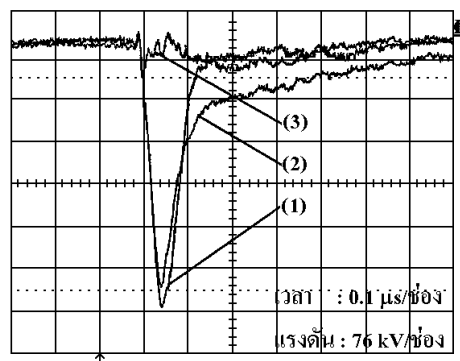
เพื่อให้เกิดการเจาะทะลุจึงได้เพิ่มความชันของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันให้สูงขึ้นเป็นลำดับ จนกระทั่งที่ความชัน 9,200 kV/μs จึงเกิดเจาะทะลุ คือ เนื้อพอร์ชเลนชนิดอะลูมินาเกิดเจาะทะลุเฉพาะฟ้าผ่าเท่านั้นจำนวน 6 ลูก หรือคิดเป็น 60 % ส่วนเนื้อพอร์ชเลนชนิดธรรมดาเกิดเจาะทะลุฟ้าผ่าจำนวน 1 ลูก และฟ้าผ่าจำนวน 1 ลูก รวมทั้งหมด 2 ลูก หรือคิดเป็น 20 % ดังผลทดสอบในตาราง 4.6 และ 4.7 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันและขณะเกิดเจาะทะลุที่ความชัน 9200 kV/μs ดังแสดงในรูป 4-10



a) เนื้อพอร์ชเลนชนิดอะลูมินา(ฟ้าผ่า)



b) เนื้อพอร์ชเลนชนิดธรรมดา (ฟ้าผ่าและฟ้าผ่า)



รูปที่ 4-10 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันโดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาบไฟตามผิว (1)
ขณะเกิดเจาะทะลุ (2) และหลังจากเกิดเจาะทะลุ (3) ลูกถ้วยฉนวน Class.56-2 ที่ความชัน 9,200 kV/μs

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยก้านตรงเนื้อพอร์ซเลน Class 56-2

พอร์ซเลน	ความชื้น (kV/μs)				P	%P
	2,500		9,200			
	-	+	-	+		
A	0/10	0/10	0/10	6/10	6/10	60%
N	0/10	0/10	1/10	1/9	2/10	20%

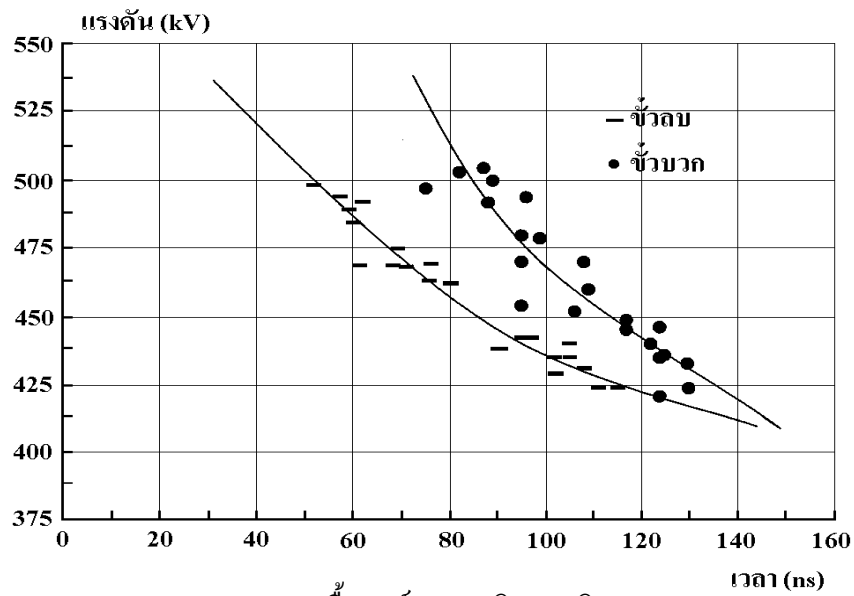
ตารางที่ 4.6 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดวาวไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยก้านตรงเนื้อพอร์ซเลน Class 56-2

พอร์ซเลน		ความชื้น (kV/μs)			
		2,500		9,200	
		-	+	-	+
A	F	315	328	495	506
	P	-	-	-	444
N	F	310	325	498	524
	P	-	-	485	458

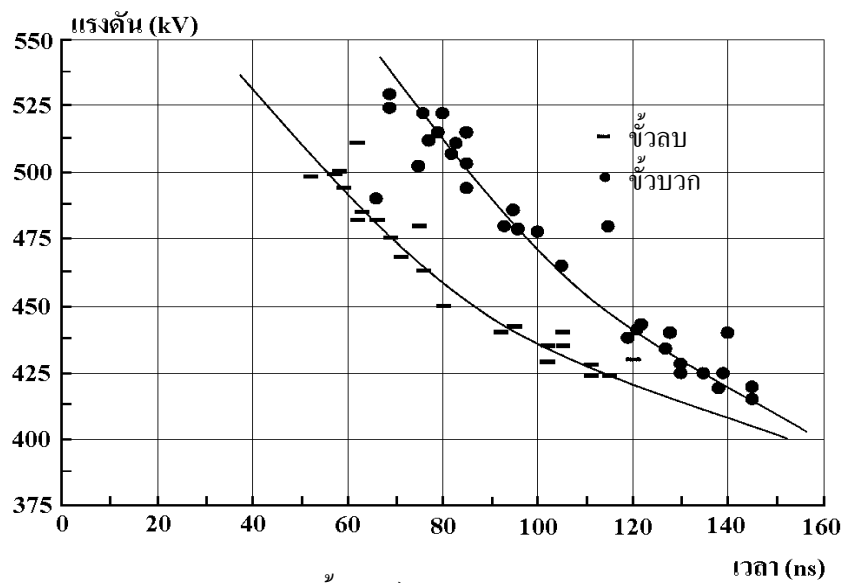
เนื่องจากลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2 มีความหนาของเนื้อฉนวนพอร์ซเลนมากกว่าของลูกถ้วยแขวน ต้องใช้แรงดันสูงขึ้นและความชื้นสูงถึง 9,200 kV/μs จึงจะทำให้เกิดเจาะทะลุได้ ผลของข้อนี้พบว่า ขั้วบวกมีผลการเกิดเจาะทะลุมากกว่าขั้วลบ ทั้งนี้เนื่องจากรูปลักษณะของลูกถ้วยก้านตรง จะป้อนแรงดันสูงเข้าที่ส่วนหัว คือ ร่องพาดสายและมีสายรัดโลหะพันรอบ ส่วนก้านยึดต่อลงดิน ฉะนั้นอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ก้านยึดต่อลงดิน จึงทำให้แรงดันอิมพัลส์วิกฤตวาวไฟตามผิว (ค่าวาวไฟตามผิว 50 %) ขั้วบวก (ขั้วของแรงดันที่ป้อนให้กับลูกถ้วยที่ส่วนหัวร่องพาดสาย) จะมีค่าสูงกว่าขั้วลบ จึงทำให้มีโอกาสเจาะทะลุได้ง่ายกว่าขั้วลบ ซึ่งตรงกันข้ามกับลูกถ้วยแขวนที่ป้อนแรงดันเข้าที่ก้านค่าวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (ค่า 50 %) ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก ขั้วลบจึงเจาะทะลุได้ง่ายกว่าขั้วบวกสำหรับกรณีลูกถ้วยแขวน

ผลของข้อนี้สำหรับลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2 อาจพิจารณาได้จากเส้นกราฟ v-t ในรูปที่ 4-11 ซึ่งเส้นกราฟ v-t ของขั้วบวกมีระดับสูงกว่าของขั้วลบ

เรื่องผลของความชื้นต่อเนื้อพอร์ซเลนจะพบว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดามีความคงทนต่อการเจาะทะลุได้สูงกว่าชนิดอะลูมินาเช่นกัน



a) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา



b) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา

รูปที่ 4-11 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาบไฟตามผิวผ่านอากาศของ
ลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2

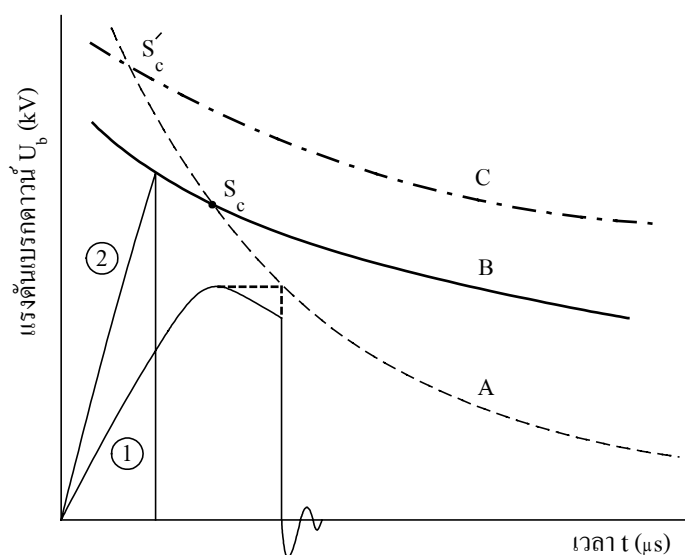
บทที่ 5

การพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุ

จากผลของการศึกษาวิจัยการเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีผลทำให้ลูกถ้วยฉนวนประเภท B เกิดการเจาะทะลุได้ ซึ่งการเจาะทะลุขึ้นอยู่กับความชันของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ชนิดของเนื้อพอร์ซเลน และลักษณะรูปแบบของลูกถ้วยฉนวน การเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนจะทำให้ลูกถ้วยฉนวนเสียหายการฉนวนอย่างถาวร ซึ่งมีผลกระทบต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ จึงจำเป็นต้องหาทางพัฒนาเพื่อป้องกันมิให้เกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของลูกถ้วย

5.1 แนวทางการแก้ปัญหาการเจาะทะลุ

จากเส้นกราฟแรงดันเวลารูปที่ 2-3 จะเห็นได้ว่าแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดฉนวนไฟตามผิวหรือเจาะทะลุขึ้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับความชันของแรงดันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ลูกถ้วยได้รับด้วย ดังนั้นวิธีป้องกันมิให้เกิดการเจาะทะลุวิธีหนึ่งอาจทำได้คือ เพิ่มคุณสมบัติความคงทนต่อเนื้อฉนวนแข็งให้เส้นลักษณะแรงดันเวลาของฉนวนแข็งเพิ่มสูงขึ้น [17] ดังเช่นเส้นกราฟ C ในรูปที่ 5-1



เส้น A : ลักษณะ v-t ของอากาศรอบลูกถ้วย

เส้น B : ลักษณะ v-t ของเนื้อฉนวนลูกถ้วย

เส้น C : ลักษณะ v-t ของเนื้อฉนวนลูกถ้วยที่เพิ่มความแข็งแรง

รูปที่ 5-1 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลาที่เพิ่มความแข็งแรง

ในรูปที่ 5-1 เส้นกราฟแรงดัน – เวลา C มีระดับสูงขึ้น ซึ่งตัดกับเส้น $v-t$ ของอากาศที่ s'_c ก็จะทำให้ลูกถ้วยเกิดฉนวนไฟตามผิวผ่านอากาศแทนที่จะเกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็ง การเพิ่มความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนอาจทำได้ 2 วิธี คือ

- 1) ทำการปรับปรุงเนื้อพอร์ซเลนให้มีความทนต่อแรงดันได้สูงขึ้น โดยปรับปรุงส่วนผสมของเนื้อสารที่ใช้ผลิตลูกถ้วย
- 2) เพิ่มความหนาเนื้อฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดให้มากขึ้น

5.1.1 การปรับปรุงเนื้อพอร์ซเลน

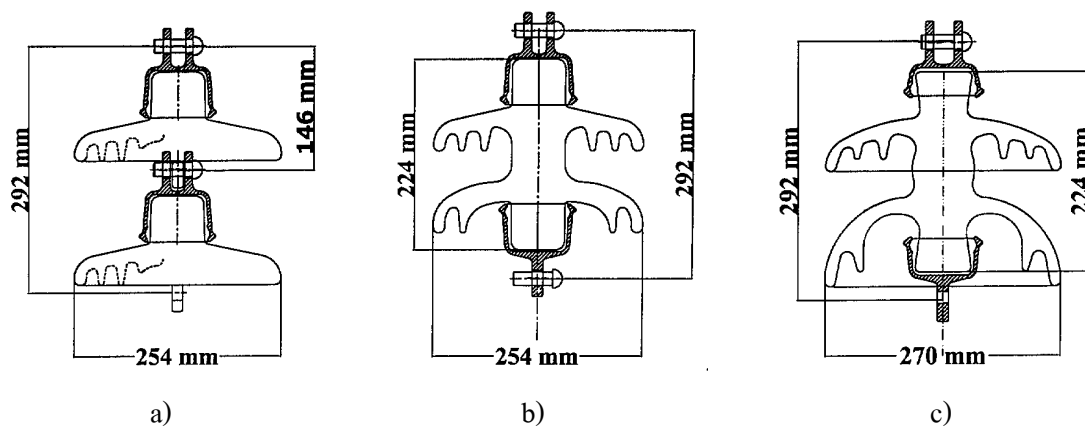
ในกรณีการเพิ่มความทนของลูกถ้วยโดยการปรับปรุงเนื้อพอร์ซเลน เพื่อให้เนื้อพอร์ซเลนมีความแข็งแรงมากขึ้น จะไม่ดำเนินการโดยการปรับปรุงเนื้อส่วนผสมโดยตรง เพราะจะต้องใช้ห้องปฏิบัติการเฉพาะทางด้านวัสดุศาสตร์ ซึ่งเกินขอบข่ายของโครงการนี้ แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างทำการศึกษาวิจัยผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน มีผลอย่างเด่นชัดแสดงให้เห็นว่าลูกถ้วยแขวนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ลูกถ้วยแขวน Class 52-4 มีโอกาสเกิดการเจาะทะลุเมื่อลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้น ตามที่มาตรฐานกำหนดให้ทดสอบได้ จึงขอให้โรงงานผู้ผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ได้นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ และได้พบสาเหตุว่ามีความบกพร่องบางประการในกระบวนการผลิต และได้ทำการปรับปรุงแก้ไขกรรมวิธีที่บกพร่องในการผลิตลูกถ้วยพอร์ซเลน นำลูกถ้วยฉนวนที่ปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตแล้วมาทดสอบการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นใหม่ ผลปรากฏว่าลูกถ้วยแขวน Class 52-4 ที่ได้รับการแก้ไขแล้วมีคุณภาพดีขึ้น สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้น $\geq 2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ได้ตามมาตรฐานกำหนด

5.1.2 การเพิ่มความหนาเนื้อฉนวนพอร์ซเลน

การเพิ่มความทนต่อแรงดันของลูกถ้วยฉนวนที่ทำได้ในที่นี้ก็คือ การปรับปรุงรูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวน โดยเพิ่มความหนาเนื้อฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดให้มีความมากขึ้น มีลักษณะเป็นแกนกลางของลูกถ้วยแขวนเป็นเนื้อพอร์ซเลนตัน เรียกว่า ลูกถ้วยแขวนคอตัน

5.2 การออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตัน

การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคอตันเป็นแนวคิดการแก้ปัญหาการเจาะทะลุลูกถ้วยฉนวนประเภท B ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาของเนื้อพอร์ซเลนตามแนวการเจาะทะลุ คือ แนวที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรด หัวครอบกับก้านต่อ ในขั้นต้นใช้วิธีการนำลูกถ้วยแขวนแบบธรรมดา ดังรูป 5-2 a) สองลูกมาต่อกันมีลักษณะเป็นคอตันด้วยเนื้อพอร์ซเลน โดยไม่คำนึงถึงลักษณะทางมิติมากนัก ดังรูป 5-2 b) เป็นผลให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่ำกว่าค่ากำหนด จึงต้องทำการออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตันที่ต้องพิจารณาทางด้านมิติด้วย ดังรูปที่ 5-2 c)



- a) ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ต่อเป็นพวงสองลูก
 b) ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก
 c) ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

รูปที่ 5-2 ลูกถ้วยแขวนแบบธรรมดาและแบบคอดัน

5.2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคู่คอดันยังมิได้มีการออกแบบสร้างขึ้นภายในประเทศ และเพื่อนำลูกถ้วยแขวนคู่คอดันนี้ไปใช้งานจริงหรือเป็นต้นแบบ จึงจำเป็นต้องมีเงื่อนไขในการพิจารณาออกแบบดังต่อไปนี้

- 1) การออกแบบจะให้ลูกถ้วยมีลักษณะเป็นลูกถ้วยแขวนคู่คอดันโดยมีมิติอิงสมนัยกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกันเชื่อมด้วยเนื้อพอร์ซเลนตัน ลักษณะเป็นดังรูปที่ 5-2 b) และ 5-2 c) ตามลำดับ
- 2) ลักษณะทางด้านมิติใช้ ANSI C29.2 [18] ซึ่งมิติที่พิจารณาคือ ระยะรั้ว ระยะอาร์ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะตามแนวแกนกลาง และเนื่องจากลูกถ้วยจนวนเวลาใช้งานจริงจะได้รับสิ่งปะทะเปื้อนจึงใช้มาตรฐาน IEC 815 [19] ประกอบการพิจารณาออกแบบเพื่อให้มีการทำความสะอาดตัวเองได้ การไม่ให้เกิดน้ำฝนไหลเป็นสายเชื่อมต่อระหว่างปีกเวลาเกิดฝนตก ไม่ให้เกิดความไฟฟ้าข้ามปีกที่อยู่ใกล้กัน นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีในการออกแบบด้วยเพื่อลักษณะการวางไฟตามผิวที่ดีขึ้น
- 3) วัสดุจนวนที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้เนื้อพอร์ซเลนแบบอะลูมินา เหตุที่ใช้เนื้อวัสดุแบบนี้เพราะเป็นเนื้อที่อยู่ในสายการผลิตที่มีคุณสมบัติทนต่อแรงดึงทางกล และเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเป็นเชิงอุตสาหกรรมได้แล้วภายในประเทศเป็นเวลานานหลายปี

5.2.2 ข้อกำหนดในการเลือกมิติ

เนื่องจากการใช้งานของลูกถ้วยจนวนพบว่าลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 เป็นแบบหนึ่งที่มีเกิดการเจาะทะลุ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ 3 ลูกในระบบ 33 kV การไฟฟ้านครหลวงใช้ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-3 จำนวน 4 ลูก สำหรับระบบ 69 kV การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-3 จำนวน 7 ลูก สำหรับระบบ 115 kV ลูกถ้วยทั้งสองแบบ คือ Class 52-3 กับ

Class 52-4 ต่างกันเพียงที่โลหะต่อยึดลูกถ้วยเท่านั้น ประกอบกับโรงงานผลิตลูกถ้วย Class 52-4 มีหัวครอบโลหะแบบ Clevis and tongue อยู่แล้ว ฉะนั้นลักษณะด้านมิติจึงเลือกใช้ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 เป็นแนวและเกณฑ์การออกแบบ

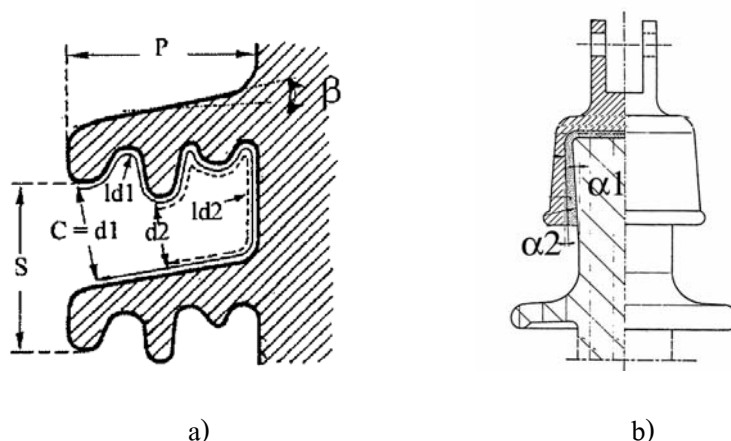
พวงลูกถ้วยแขวนที่ใช้ในระบบการไฟฟ้าต่างๆ มีจำนวนลูกถ้วยต่อพวงเป็นจำนวนคู่หรือคี่ ทั้งนี้ขึ้นกับระดับแรงดันใช้งานของระบบ ระดับความเชื่อมั่น ระดับความประอะเปื้อนในแต่ละท้องถิ่น ฉะนั้นเพื่อให้สามารถนำลูกถ้วยขนวนไปใช้งานได้กับทุกระบบจึงมีข้อกำหนดในการเลือกมิติดังนี้

1) ลักษณะมิติของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันมีมิติอิงตามลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 จำนวน 2 ลูกต่อกันเชื่อมด้วยเนื้อพอร์ซเลนตัน ซึ่งลักษณะมิติต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.2 ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ลักษณะมิติลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

ลักษณะมิติ	ค่ามิติต่อ 1 ลูก (มม.)
- ระยะร้าว	292 (ค่าต่ำสุด)
- ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางปีก	273 (ค่าสูงสุด)
- ระยะความยาวตามแนวแกน	146 ± 3

2) ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันยังไม่มีมาตรฐานรูปแบบ แต่ลักษณะลูกถ้วยแขวนคู่คอตันมีลักษณะใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกัน และลูกถ้วยแขวนคอตันยาวซึ่งมาตรฐาน IEC 815 ให้คำแนะนำในการออกแบบลูกถ้วยในสภาวะประอะเปื้อน ปีกของลูกถ้วยขนวนจะออกแบบให้มีลักษณะดังรูปที่ 5-3



รูปที่ 5-3 a) ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815

b) ภาพหน้าตัดหัวครอบโลหะตาม IEC 575

โดยปีกของลูกถ้วยขนวนจะต้องออกแบบให้มีค่าต่างๆ คือ

$$C \geq 30 \text{ mm} \text{ เพื่อหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อของสายฝนระหว่างปีก}$$

$S/P \geq 0.8$ เพื่อให้สามารถเกิดการทำความสะอาดตัวเองเนื่องจากการสะท้อนของน้ำฝน
ระหว่างปีก

$L_{dx/dx} < 5$ เพื่อกันการรวบไผ่จากครีบบนปีกบนเข้ามายังปีกล่าง

$\beta > 5_0$ เพื่อการชำระสิ่งสกปรกได้ดีขึ้น

$C.F. \leq 4$ สำหรับสภาวะเปราะเปื้อนระดับ 4

$P.F. > 0.7$ สำหรับสภาวะเปราะเปื้อนระดับ 4

เมื่อ $C =$ ระยะทางที่วัดจากปลายครีบนอกสุดของปีกบนลงมาถึงปีกล่าง

$S =$ ระยะทางที่วัดจากปลายครีบนอกสุดของปีกบนลงมาถึงปลายครีบนอกสุดของปีกล่าง

$P =$ ระยะทางที่วัดจากคอดันออกมายังขอบนอกสุดของปีก

$L_{dx} =$ ระยะตามผิวที่วัดระหว่างจุดปลายระยะ d_x

$d_x =$ ระยะทางที่วัดจากปลายครีบบนปีกบนลงมาถึงปีกล่าง

$\beta =$ มุมเอียงของปีกบนที่ทำกับแนวระดับ

$C.F. =$ อัตราส่วนระหว่าง ระยะรั้วต่อระยะอาร์กแห่ง

$l =$ ระยะตามผิวที่วัดระหว่างจุดปลายระยะ S

$P.F. = (2P + S) / l$

3) การออกแบบที่ยึดให้ทนทานต่อแรงดึงทางกล มุม α_1 และ α_2 ดังรูปที่ 5-3 b) มีความสำคัญมาก โดยตามมาตรฐาน IEC 575 [20] แนะนำค่ามุมทั้งสองควรอยู่ในช่วงระหว่าง $4^\circ - 12^\circ$ โดยปกติใช้ 8°

5.2.3 ผลการออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดันตามข้อกำหนด

ผลการออกแบบตามข้อกำหนดให้มีลักษณะมิติสมนัยกับลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันได้ผลตามตารางที่ 5.2 และผลการออกแบบอิงตามมาตรฐาน IEC 815 ได้ผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 มิติเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน กับลูกถ้วยแขวนพอร์ชเลน ANSI Class 52-4

ลักษณะมิติ	ข้อกำหนด ANSI Class 52-4 (mm)		ลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน (mm)	
	ตามมาตรฐาน 2 ลูก	เชิงปฏิบัติ 2 ลูก	1 ลูกปีกสองชั้น แบบแรก	1 ลูกปีกสองชั้น แบบสอง
ระยะรั้ว	584 (min)	607	585	720
ระยะอาร์กแห่ง	ไม่กำหนด	370	285	375
เส้นผ่านศูนย์กลาง	273 (max)	248	248	270
ความยาวตามแนวนอน	292 ± 6	292	292	292

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 815

พารามิเตอร์	C	S/P	L_{dl} / dl	β	C.F.	P.F.
ค่ามาตรฐาน	> 30 mm	≥ 0.8	< 5	> 5°	≤ 4	> 0.7
แบบแรก	37 mm	1.02	5.5	13°	2.0	0.8
แบบสอง	60 mm	1.2	4.89	8.5°	2.1	0.88

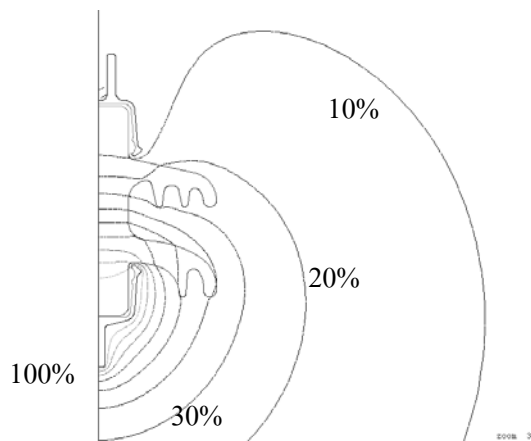
ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกเป็นแบบที่ยังมิได้พิจารณาถึงลักษณะทางด้านมิติเช่น ระยะรั้ว ระยะอาร์ก และข้อกำหนดในการเลือกมิติ จึงส่งผลให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าต่ำกว่าของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ซึ่งมีมิติที่พิจารณาให้มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง คือ ระยะอาร์ก เพราะระยะอาร์กจะมีผลต่อค่าวับไฟตามผิว และผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเป็นไปตามข้อกำหนด



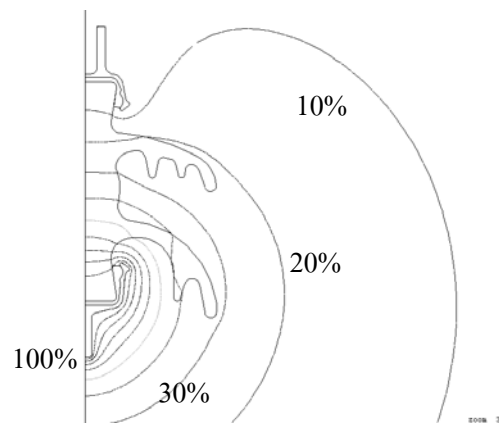
รูปที่ 5-3 c) ภาพถ่ายลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกและแบบสอง

5.3 ลักษณะแรงดันกระจายของลูกถ้วยฉนวน

ลักษณะแรงดันกระจายบนลูกถ้วยมีผลอย่างสำคัญต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน เพื่อใช้ประกอบการออกแบบลูกถ้วยฉนวน โดยทำการจำลองแบบลูกถ้วยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [21] จำลองแบบลูกถ้วยในลักษณะต่างๆ ได้ผลแสดงให้เห็นว่าการออกแบบปีกลูกถ้วยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น จำนวนครีบก้นมากขึ้น ความหนาเพิ่มขึ้นสามารถทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าดีขึ้น ดังลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก และแบบสองในรูปที่ 5-4 จากรูปจะเห็นได้ว่าการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีลักษณะการกระจายที่ดีกว่าแบบแรก เนื่องจากความหนาของเนื้อฉนวนพอร์ซเลนระหว่างอเล็กโทรดมีค่ามากขึ้น และเส้นผ่านศูนย์กลางปีกมากขึ้น เมื่อพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าในส่วนหัวครอบโลหะส่วนบนของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเมื่อเทียบกับแบบแรกพบว่า ในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีกว่าแบบแรกในส่วนแกนกลางที่เป็นคอดันเนื้อพอร์ซเลนจะเห็นได้ชัดว่ามีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีกว่า เมื่อพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กที่เริ่มต้นระยะจากหัวครอบโลหะแรงสูง(ในที่นี้จำลองป้อนแรงดันที่ 100 kV ให้กับหัวครอบโลหะล่าง) ไปสู่หัวครอบโลหะบน(จำลองป้อนแรงดันที่ 0 kV) ดังรูปที่ 5-4

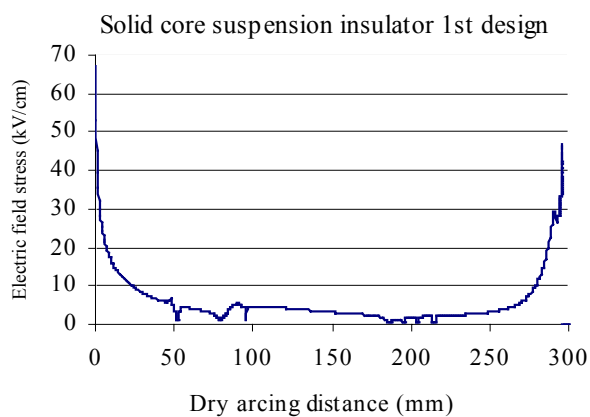


แบบแรก

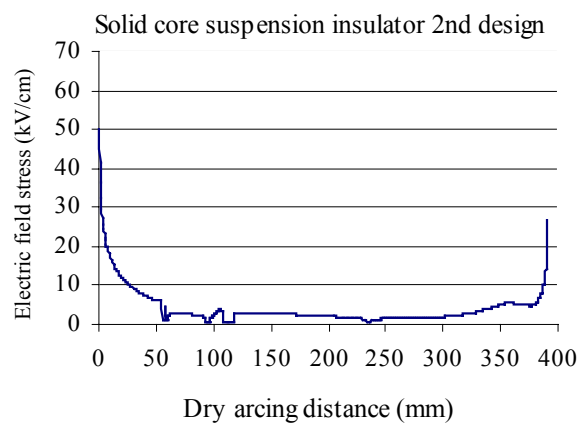


แบบสอง

รูปที่ 5-4 a) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน



แบบแรก



แบบสอง

รูปที่ 5-4 b) กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน
เริ่มต้นจากหัวกรอบโลหะล่าง (100 kV) ไปสู่หัวกรอบโลหะบน (0 kV)

ผลของการจำลองแบบหาแรงดันกระจายบนลูกถ้วยปรากฏชัดว่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณหัวกรอบโลหะแรงสูงของทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันที่ 67 kV/cm แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนหัวกรอบโลหะบนในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าต่ำกว่าแบบแรก 43 % โดยแบบสองมีค่า 27 kV/cm ส่วนในแบบแรกมีค่า 47 kV/cm

5.4 การทดสอบทางไฟฟ้า

5.4.1 การทดสอบวาวไฟตามผิว

เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคู่คอดันนี้ยังไม่มีมาตรฐานกำหนดทดสอบ จึงจัดอยู่ในเรื่องการทดสอบเฉพาะแบบ โดยจะอิงข้อกำหนดของลูกถ้วยขนวนแบบแขวนที่สมนัยกันเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบในขั้นต้นได้ทำการทดสอบดังต่อไปนี้

1) ทดสอบแรงดันวาวไฟตามผิวแห่ง 50 Hz กับพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ที่ต่อกันสองลูกจำนวน 20 คู่ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกจำนวน 3 ลูก ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจำนวน 20 ลูก

2) ทดสอบแรงดันวาวไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วบวกและลบกับพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ที่ต่อกันสองลูกจำนวน 20 คู่ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกจำนวน 3 ลูก ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจำนวน 20 ลูก

5.4.1.1 ผลการทดสอบการวาวไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้ง

ผลการทดสอบค่าวาวไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้งของลูกถ้วยแขวนธรรมดาตารางที่ 5.4 ทดสอบป้อนแรงดันให้เกิดการวาวไฟอย่างน้อย 5 ครั้งต่อคู่ แล้วหาค่าเฉลี่ย ผลค่าวาวไฟตามผิว 50 Hz เฉลี่ยทั้งหมดของลูกถ้วยแขวนธรรมดามีค่า 155 kV ในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าวาวไฟ 127 kV ตารางที่ 5.5 ส่วนในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าวาวไฟ 142 kV ตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.4 ผลทดสอบค่าวาวไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้งของลูกถ้วยแขวน Class 52-4 สองลูกต่อกัน

ลำดับที่	ค่าแรงดันวาวไฟ (kV)	ลำดับที่	ค่าแรงดันวาวไฟ (kV)	ค่าเฉลี่ย
1	154	11	153	155 (S.D. = 2.16)
2	151	12	157	
3	155	13	152	
4	159	14	156	
5	158	15	156	
6	155	16	154	
7	157	17	154	
8	153	18	157	
9	158	19	157	
10	157	20	155	

หมายเหตุ : ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแต่ละค่าได้จากการป้อนแรงดันอย่างน้อยลูกละ 5 ครั้ง

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50 Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก

ลำดับ	ค่าแรงดันวาทไฟ (kV)	ค่าเฉลี่ย (kV)
1	129	127 (S.D. = 2.08)
2	128	
3	125	

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50 Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

ลำดับที่	ค่าวาทไฟตามผิว (kV)	ลำดับที่	ค่าวาทไฟตามผิว (kV)	ค่าเฉลี่ย (kV)
1	144	11	155	145 (S.D. = 2.29)
2	145	12	150	
3	143	13	150	
4	147	14	149	
5	149	15	146	
6	150	16	149	
7	150	17	146	
8	147	18	149	
9	149	19	143	
10	146	20	142	

การทดสอบลูกถ้วยแขวนคอดันเมื่อเทียบกับลูกถ้วยแขวนต่อพวง 2 ลูก ได้ผลดังต่อไปนี้

1) ค่าวาทไฟตามผิวเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกเมื่อเทียบกับค่าวาทไฟของลูกถ้วยแขวนธรรมดาที่มีค่าต่ำกว่า 28 kV คิดเป็น 18 % ทั้งนี้เนื่องจาก ระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าน้อยกว่าของลูกถ้วยธรรมดา 85 มิลลิเมตร

2) ค่าวาทไฟตามผิวเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเมื่อเทียบกับค่าวาทไฟของลูกถ้วยแขวนธรรมดาที่มีค่าต่ำกว่า 10 kV คิดเป็น 6.5 % แม้ระยะอาร์กของลูกถ้วยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่ามากกว่า 5 มิลลิเมตรก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากระยะอาร์กในส่วนตามผิวลูกถ้วยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่ามากกว่าของลูกถ้วยแขวนแบบธรรมดาเฉลี่ยอยู่ 40 มิลลิเมตร และผลของการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนธรรมดาส่งผลกระทบต่อแบบที่เป็นลักษณะคอดัน

3) ค่าวาทไฟตามผิวเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเมื่อเทียบกับค่าวาทไฟของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าสูงกว่า 18 kV คิดเป็น 12.4 % ของแบบสอง เนื่องจากระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่ามากกว่าแบบแรก 90 มิลลิเมตร และผลของการจำลองแบบการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจะส่งผลกระทบต่อของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกดังที่กล่าวแล้ว

5. 4.1.2 ผลการทดสอบวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s

การทดสอบหาค่าวาทไฟอิมพัลส์วิกฤตใช้วิธีระดับแรงดันป้อน ขึ้น-ลง (up and down) [10] จำนวนครั้งทดสอบ 20 ครั้ง ต่อ 1 ลูกถ้วยต่อขั้ว ทำการทดสอบลูกถ้วยแขวนธรรมดาและลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน ทั้งในขั้วบวก และขั้วลบ ผลค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนธรรมดาขั้วบวกและลบมีค่า 236 kV และ 244 kV ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.7 ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกค่าวาทไฟเฉลี่ยขั้วบวกและลบมีค่า 223 kV และ 202 kV ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.8 และผลค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองขั้วบวก และขั้วลบมีค่า 247 kV และ 231 kV ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.7 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน

ขั้วบวก				ขั้วลบ			
ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)	ลำดับที่	$U_{b50\%}$	ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)	ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)
1	235	11	235	1	242	11	244
2	237	12	236	2	248	12	242
3	235	13	236	3	240	13	238
4	239	14	235	4	242	14	239
5	237	15	238	5	241	15	250
6	235	16	237	6	245	16	247
7	235	17	234	7	249	17	245
8	233	18	235	8	242	18	243
9	239	19	236	9	239	19	244
10	236	20	240	10	245	20	248
ค่าเฉลี่ย = 236 kV $\sigma = 1.8$				ค่าเฉลี่ย = 244 kV $\sigma = 3.5$			

ตารางที่ 5.8 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก

ลำดับ	ค่าแรงดันวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s (kV)			
	$U_{b50\%} +$	$U_{b50\%} + (\text{averg.})$	$U_{b50\%} -$	$U_{b50\%} - (\text{averg.})$
1	219	223 (S.D. = 3.51)	199	202 (S.D. = 2.65)
2	223		203	
3	226		204	

ตารางที่ 5.9 ผลทดสอบค่าวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\%}$) ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

ขั้วบวก				ขั้วลบ			
ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)	ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)	ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)	ลำดับที่	$U_{b50\%}$ (kV)
1	246	11	250	1	235	11	228
2	250	12	251	2	238	12	228
3	247	13	246	3	236	13	232
4	242	14	255	4	218	14	236
5	244	15	244	5	232	15	233
6	253	16	238	6	233	16	235
7	244	17	253	7	231	17	220
8	243	18	246	8	234	18	224
9	245	19	244	9	231	19	230
10	250	20	252	10	234	20	231
ค่าเฉลี่ย = 247 kV $\sigma = 4.4$				ค่าเฉลี่ย = 231kV $\sigma = 5.2$			

จากผลการทดสอบวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตรูปคลื่นมาตรฐานพบว่า

1) ค่าแรงดันวาทไฟอิมพัลส์วิกฤตขั้วบวกในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ส่วนแรงดันวาทไฟขั้วลบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าต่ำกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา 28 kV คิดเป็น 12% ทั้งนี้เนื่องจากระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าต่ำกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา

2) ผลการทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วบวก ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองทั้ง 20 ลูกพบว่าค่าเฉลี่ย 247 kV มากกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา 11 kV คิดเป็น 4.72 % และมากกว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก 13 kV คิดเป็น 5.5 % ทั้งนี้เนื่องจากระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่ามากกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา 5 มิลลิเมตร และมากกว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก 90 มิลลิเมตร และเหตุผลเนื่องจากผลของรูปลักษณะอิเล็กโทรดด้วย อิเล็กโทรดของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเมื่อเทียบกับแบบแรกมีลักษณะที่เล็กกว่า จึงมีความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์สูงกว่า ส่งผลให้ค่าแรงดันวาทไฟอิมพัลส์วิกฤตขั้วบวกมีค่าสูงไม่มากนักเมื่อเทียบกับระยะอาร์กที่เพิ่มขึ้น

3) เมื่อพิจารณาในแต่ละชนิดลูกถ้วยพบว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่า $U_{b50\%}$ ขั้วบวกสูงกว่าค่า $U_{b50\%}$ ขั้วลบอยู่ 21 kV ส่วนลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 มีค่า $U_{b50\%}$ ขั้วลบสูงกว่าค่า $U_{b50\%}$ ขั้วบวกอยู่ 8 kV ทั้งนี้เนื่องจากผลของลักษณะอิเล็กโทรดของลูกถ้วยทั้งสองมีลักษณะต่างกัน ลูกถ้วยแขวนธรรมดามี

อิเล็กโตรดเป็นหัวครอบโลหะกับก้านโลหะจึงมีลักษณะแบบระนาบ-ร็อด (plane-rod) ส่วนลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีหัวครอบโลหะทั้งสองด้านหัวและท้าย จึงมีลักษณะแบบแกปทรงกลม (sphere gap) คืออิเล็กโตรดสองด้านเหมือนกันแต่ด้านหนึ่งต่อลงดินซึ่งขั้วบวกจะมีค่าสูงกว่าขั้วลบ

5.4.2 การทดสอบเจาะทะลุ

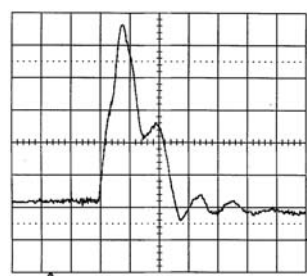
วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาออกแบบทำลูกถ้วยแขวนคู่คอดันก็เพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุ จึงทำการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 1211 [3] CAN/CSA-C411.1-M89 [4] และ AS2947.1 [5] ที่ความชันเริ่มต้น 2,500 kV/ μ s ทำนองเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ที่ออกแบบสร้างในบทที่ 3

5.4.2.1 การทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก

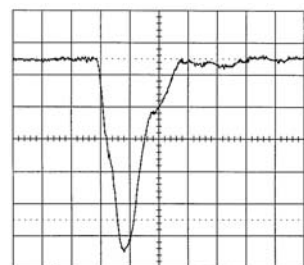
สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมาจำนวน 10 ลูก ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ความชันเริ่มต้น 2,500 kV/ μ s ขั้วลบก่อน และตามด้วยขั้วบวก เนื่องจากค่า $U_{b50\%}$ ขั้วลบ มีค่าต่ำกว่าค่า $U_{b50\%}$ ขั้วบวกของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก แต่ละขั้วทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 16 ครั้ง พบว่าเมื่อทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ความชัน 2,500 kV/ μ s ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกไม่เกิดการเจาะทะลุหรือแตกร้าวแต่อย่างใด จึงได้ทำการทดสอบที่ความชันต่อไปที่ 7,500 kV/ μ s และที่ความชัน 10,000 kV/ μ s ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.10 และลักษณะรูปคลื่นทดสอบเป็นดังรูปที่ 5-5

ตารางที่ 5.10 ผลทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก (จำนวน 10 ลูก)

การทดสอบ	ความชัน (kV/ μ s)			
	7,500		10,000	
	ขั้วบวก	ขั้วลบ	ขั้วบวก	ขั้วลบ
แรงดันวาบไฟ (kV)	409	425	514	500
เวลาวาบไฟ (ns)	61	63	44	45



ขั้วบวก



ขั้วลบ

รูปที่ 5-5 ออสซิลโลแกรมแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก

ที่ความชัน 10,000 kV/ μ s สเกลแรงดัน 75kV/div สเกลเวลา 50 ns/div

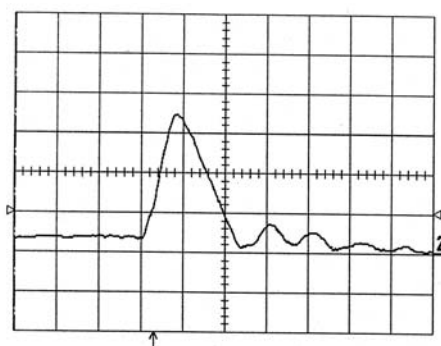
5.4.2.2 การทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

ใช้ตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจำนวน 20 ลูก ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันทั้ง ขั้วบวกและขั้วลบ โดยเริ่มทดสอบขั้วบวก ขั้วลบเช่นเดียวกับลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก ป้อนแรงดัน อิมพัลส์หน้าคลื่นชันลูกละ 16 ครั้งต่อขั้ว เนื่องจากผลการทดสอบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก สามารถทนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ระดับสูงสุดได้ คือ 10,000 kV/ μ s โดยไม่เกิดเจาะทะลุหรือ แตกร้าว ฉะนั้นการทดสอบลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง จึงทดสอบด้วยความชัน 10,000 kV/ μ s ผลการ ทดสอบพบว่าไม่เกิดการเจาะทะลุหรือแตกร้าวประการใด ได้ค่าแรงดันวาวไฟตามผิว ระยะเวลาวาวไฟ ดังแสดงตารางที่ 5.11 และออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดันทดสอบดังรูปที่ 5-6

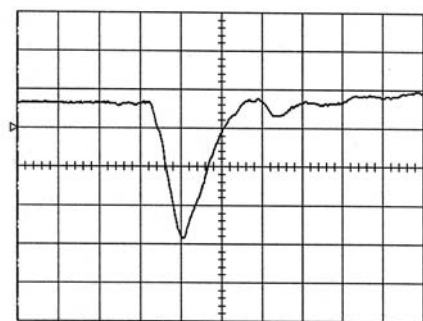
ตารางที่ 5.11 ผลทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง (จำนวน 20 ลูก) ที่ความชัน 10,000 kV/ μ s

การทดสอบ	ขั้วบวก	ขั้วลบ
ค่าทดสอบวาวไฟ (kV)	661	718
เวลาวาวไฟ (ns)	82	85

หมายเหตุ ค่าความชันของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะแปรตั้งแต่ค่าต่ำสุด 9,257 kV/ μ s สูงสุด 10,300 kV/ μ s ค่าเฉลี่ย 9,794 kV/ μ s



ขั้วบวก



ขั้วลบ

รูปที่ 5-6 ออสซิลโลแกรมของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองที่ความชัน 10,000 kV/ μ s สเกลแรงดัน 192 kV/ μ s สเกลเวลา 0.1 μ s /ช่อง

5.5 ลูกถ้วยแขวนคอดันชั้นเดียว

แม้ว่าการพัฒนาแก้ปัญหาการเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนธรรมดาจะประสบผลสำเร็จด้วยลูกถ้วยแขวนคู่คอดันที่ทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่มีความชันได้สูงถึง 10,000 kV/ μ s ก็ตาม แต่ในเรื่องการ ผลิตเป็นเชิงอุตสาหกรรม จะมีความยุ่งยากและต้นทุนสูง เพราะต้องใช้การขึ้นรูปด้วยการกลึง จึงได้เกิด การพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนคอดันชั้นเดียว ซึ่งสามารถทำการผลิตได้ง่ายกว่า โดยการขึ้นรูปด้วยการอัด

ลงในแบบ มีน้ำหนักเบาใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวนชั้นเดียวธรรมดา ผลของการทดสอบขั้นต้นเกี่ยวกับการเจาะทะลุ พบว่าลูกถ้วยแขวนคอดันชั้นเดียวมีความทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักชิ้นได้ ตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด แต่ยังมีคุณลักษณะของลูกถ้วยแขวนที่จะต้องทำการศึกษาทดสอบต่อไปอีกหลายประการ ซึ่งต้องใช้เวลาและเงินขอบข่ายของโครงการวิจัยนี้ จึงได้แยกออกเป็นโครงการวิจัยอีกโครงการหนึ่งให้เป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของนิสิตวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ดำเนินการต่อไป เชื่อกันว่าจะประสบผลสำเร็จในปลายปี 2544 นี้ และจะเป็นผลงานที่นำไปสู่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ในอนาคตอันใกล้

ลูกถ้วยแขวนคอดันชั้นเดียวจะมีรูปลักษณะเปรียบเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันดังในรูปที่ 5-7 และรูปที่ 5-8



a)



b)



c)



d)

- a) ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน
- b) ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก
- c) ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง
- d) ลูกถ้วยแขวนคอดันชั้นเดียว

รูปที่ 5-7 ลูกถ้วยแขวนคอดันที่พัฒนาขึ้น



ลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน



ลูกถ้วยแขวนชั้นเดียวสองลูกต่อกัน



ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

รูปที่ 5-8 ภาพถ่ายลูกถ้วยแขวนคอดันเปรียบเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

โครงการศึกษาวิจัยเรื่องผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ได้ทดลองกับตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-1 Class 52-4 และลูกถ้วยก้านตรง ANSI Class 56-2 ซึ่งเป็นลูกถ้วยประเภท B (IEC 383-1983) คือ มีระยะเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวาวไฟตามผิวในอากาศ ทำการศึกษาระยะเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่ได้จากเครื่องกำเนิดที่ปรับความชันได้ตั้งแต่ 1,000 kV/ μ s ถึง 10,000 kV/ μ s โดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อการเจาะทะลุ คือ ผลของความชัน ขั้วของแรงดันที่ป้อน ชนิดของเนื้อพอร์ซเลน ทำการแก้ปัญหาการเจาะทะลุด้วยการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบใหม่ เป็นลูกถ้วยแขวนคอตัน ทดแทนลูกถ้วยแขวนธรรมดา

6.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

ผลของการศึกษาวิจัยทั้งโครงการอาจสรุปได้ดังนี้

- 1) แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นเท่ากับหรือมากกว่า 2,500 kV/ μ s ทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนประเภท B (IEC) เกิดเจาะทะลุได้ เป็นวิธีที่สามารถนำมาทดสอบการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงด้วยแรงดันความถี่ต่ำได้
- 2) ความชันของหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดการเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจะมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะอาร์กหรือค่าวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต รูปแบบของลูกถ้วย และความหนาของฉนวนแข็งตามแนวเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนที่มีค่าวาวไฟตามผิวสูง มีโอกาสทำให้เกิดเจาะทะลุได้มากกว่า
- 3) ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดเจาะทะลุประมาณ 50% ของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-1 Class 52-4 และลูกถ้วยก้านตรง ANSI Class 56-2 ที่ความชัน 6,500 kV/ μ s 2,500 kV/ μ s และ 9,200 kV/ μ s ตามลำดับ ถ้าความชันของหน้าคลื่นยิ่งสูงขึ้นจะมีโอกาสทำให้อัตราการเกิดเจาะทะลุมากขึ้น
- 4) ค่าวาวไฟตามผิวของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่ทำให้ลูกถ้วยเจาะทะลุจะมีค่าประมาณ 3.0 เท่าของค่าวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่วลรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s สำหรับลูกถ้วยแขวน Class 52-1 และลูกถ้วยก้านตรง Class 56-2 และมีค่าประมาณ 2 เท่าสำหรับลูกถ้วยแขวน 52-4
- 5) ขั้วแรงดันที่มีค่าวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตรูปคลื่นมาตรฐานสูงกว่า จะทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นขั้วนั้นง่ายกว่า

6) ลูกถ้วยฉนวนเนื้อพอร์ซเลนธรรมดา มีความทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้นได้สูงกว่าลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนอะลูมินา

7) การเกิดเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลนทั้งชนิดเนื้ออะลูมินาและเนื้อธรรมดาของลูกถ้วยแขวน Class 52-1 และ Class 52-4 จะเกิดเจาะทะลุในหัวครอบโลหะเท่านั้น

8) ลูกถ้วยแขวนคู่คอตตันจะไม่เกิดเจาะทะลุ แม้ว่าความชันของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้นจะมีค่าสูงถึง 10,000 kV/ μ s จึงกล่าวได้ว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอตตันจะแก้ปัญหาการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลนได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ได้แก่ ค่าวบไฟตามผิวสภาพแห้งความถี่ต่ำ 50 Hz และค่าวบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยแขวนคู่คอตตันจะมีค่าใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันเป็นพวง

6.2 ประโยชน์และคุณค่าจากการศึกษาวิจัย

1) ผลของการศึกษาวิจัยทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจกลไกการเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

2) เกิดประสบการณ์และการพัฒนาเทคนิคการทดสอบการเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้นตามมาตรฐานกำหนดในการให้บริการวิชาการแก่หน่วยงานภายนอก ช่วยให้โรงงานอุตสาหกรรมและการไฟฟ้าต่างๆ สามารถส่งลูกถ้วยทดสอบความทนต่อการเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้นได้ภายในประเทศ

3) กระตุ้นและส่งเสริมโรงงานอุตสาหกรรมผลิตลูกถ้วยฉนวนในประเทศให้เกิดการพัฒนาคุณภาพของลูกถ้วยฉนวน อันจะมีผลทำให้ความเชื่อถือได้และเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าสูงขึ้น

4) เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีและบุคลากร

6.3 แผนงานต่อเนื่องและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีแก้ปัญหาการเจาะทะลุเป็นวัตถุประสงค์หลักประการหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ จากผลของการศึกษาทำให้เกิดแผนงานต่อเนื่องและข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1) การออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอตตันสามารถแก้ปัญหาการเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อคำนึงถึงเรื่องการผลิตเชิงอุตสาหกรรมจะมีความยุ่งยากและต้นทุนสูง จึงได้เกิดการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนคอตตันชั้นเดียวสามารถผลิตได้ง่าย น้ำหนักเบา ราคาไม่แพง ผลของการทดสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าสามารถทนต่อการเจาะทะลุตามที่มาตรฐานกำหนดได้ แต่ยังมีคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและทางกลที่ต้องศึกษาอีกหลายประการ จึงได้กำหนดเป็นโครงการวิจัยที่จะดำเนินการต่อเนื่องจากโครงการนี้ เพื่อให้สามารถผลิตเป็นเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

2) ผลการศึกษาพบว่าชนิดของเนื้อพอร์ซเลนมีผลต่อความทนต่อแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้น จึงขอเสนอแนะว่าน่าจะได้มีการศึกษาวิจัยหาสารผสมของเนื้อพอร์ซเลนที่เหมาะสมที่มีความทนต่อการเจาะทะลุได้สูงขึ้น

การสร้างทีมวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง “ผลของแรงดันอิมพัลส์น้ำคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” ดำเนินการวิจัยโดยคณะวิจัยดังต่อไปนี้

1) รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นหัวหน้าโครงการ และผู้วิจัยหลักตลอดโครงการ

2) นายณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์ นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผู้ช่วยวิจัย ช่วยดำเนินโครงการวิจัยส่วนหนึ่งเป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทในหัวข้อ “ผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์น้ำคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” และสำเร็จการศึกษาปริญญาโท (วศม.) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2542

3) นายโตรมร สุนทรนภา นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผู้ช่วยวิจัย ช่วยดำเนินโครงการวิจัยส่วนหนึ่งเป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทในหัวข้อ “การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันสำหรับสายส่งแรงสูง” และคาดว่าจะจบการศึกษาปริญญาโทในปลายปี พ.ศ. 2544 นี้

4) นายวิทวัส งามประดิษฐ์ ช่างปฏิบัติการด้านเทคนิค วุฒิการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า ช่วยดูแลด้านอุปกรณ์ทดสอบและแนะนำการใช้อุปกรณ์การวิจัย

อนึ่งลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการศึกษาวิจัยโครงการนี้ ได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากบริษัท อาเซียนอินซูเลเตอร์ จำกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publ. 383-1983, “Test on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V”, 1983.
- [2] Parraud, R., Lumb, C., “Lightning stress on overhead lines”, IEEE conference on lightning and protection, Bangkok, 1988.
- [3] IEC Publ. 1211-1994, “Insulators of ceramic material or glass, for overhead lines with a nominal voltage greater than 1,000 V Puncture testing”.
- [4] 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”.
- [5] Canadian Standard, CAN/CSA-C411.1M89, “AC Suspension Insulator”.
- [6] Garbagati, E., Fusar Poli, E., Ghirelli, L., Pigini, A., Puncture tests of Cap and pin insulators under impulse voltages, CIGRE 33.85 (WG 03)...IWD.
- [7] สํารวย สํงษ์สะอาด และวีระพันธ์ รังสีจิตรประภา, “การออกแบบและสร้างเครื่องกํานัดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ”, วิศวกรรมสาร เล่มที่ 2 กุมภาพันธ์ 2539, หน้า 47-56.
- [8] สํารวย สํงษ์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์, ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์ “ การออกแบบสร้างชุดกํานัดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น”, วิศวกรรมสาร เล่มที่ 12 ธันวาคม 2542, หน้า 125-131.
- [9] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, “เซรามิกส์”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, 2527 หน้า 339-340.
- [10] Staub, B., “Introduction to high-voltage technique”, Chulalongkorn University, 1968.
- [11] สํารวย สํงษ์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528 หน้า 125-131.
- [12] Kuffel, E., Zaengl, W., “High voltage engineering fundamental”, Pergamon press, Oxford, 1984 P 394.
- [13] สํารวย สํงษ์สะอาด, “เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง”, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [14] Looms, J.S.T., “Insulators for high voltage”, Peter Pergrinus Ltd., London, UK.
- [15] CIGRE 33-89, (TF07.01) 85, “Puncture testing of ceramic and glass insulators”, Final report of CIGRE Task Force 33.07.01, June 6, 1990.

- [16] ตำรวย สังข์สะอาด, “การพัฒนาออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชัก”, รายงานผลการวิจัยทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช, เสนอฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรกฎาคม 2541.
- [17] Naito, K., Susuki, Y., “Insulators selection criteria for transmission line reliability”, NGK Review, Overseas Edition No. 14 , Dec. 1990 pp. 8-9.
- [18] ANSI C29.2-1992 , “American national standard for electrical power insulators –Wet Process Porcelain and Toughened Glass Suspension type”.
- [19] IEC Publ. 815-1986 “Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions”.
- [20] IEC 575-First edition 1977 “Thermal-mechanical performance test and mechanical performance test on string insulator units”.
- [21] “Maxwell 2 D field simulation”, Program ANSOFT Co., Ltd.

ภาคผนวก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์หรือเสนอในที่ประชุมวิชาการ

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร

1. ตำราย สังข์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์, ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์, “การออกแบบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน” (Design and Construction of Steep Front Impulse Voltage Generating Set), วิศวกรรมสาร ปีที่ 51 เล่มที่ 12 ธันวาคม 2541, หน้า 125-131.
2. ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์, ตำราย สังข์สะอาด, “แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีผลทำให้ถูกฉนวนฉนวนเจาะทะลุ”, วิศวกรรมสาร ปีที่ 52 เล่มที่ 8 สิงหาคม 2542 , หน้า 70-75.

การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

1. ตำราย สังข์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์ ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์, “การออกแบบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 (EECON-21), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 12-13 พฤศจิกายน 2541, PW 012 หน้า 73-76.
2. Sangkasaad, S., Ngampradit, V., Limsetthagan, “**Steep Front Impulse Voltage for Puncture Test on Cap and Pin Insulators**”, Proceedings of the International Power Engineering Conference (IPEC-99), Singapore, May, 1999 Vol I, P. 358-362.
3. ตำราย สังข์สะอาด, ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์, “แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีผลทำให้ถูกฉนวนฉนวนเจาะทะลุ” (Steep Front Impulse Voltage Causing Insulators Punctured), การสัมมนาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลังปี 2000, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 21-22 พฤศจิกายน 2542, Vol I, EMC-06 หน้า 1-9.
4. อารีย์ ภูไพบูลย์, “การพัฒนาชุดฉนวนทดสอบเพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุ” การสัมมนาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังปี 2000, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 21-22 พฤศจิกายน 2542, Vol. I, EMC07 หน้า 1-12.
5. ตำราย สังข์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์, ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์, “การศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันทำให้ถูกฉนวนฉนวนเจาะทะลุ” (Study effect of steep front impulse voltage causing insulators punctured), การสัมมนาวิชาการเรื่อง วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอีเอ็มซี, กรุงเทพฯ, 21-22 พฤศจิกายน 2543, HVE-1 หน้า 1-13.

6. โคมร สุนทรนภา, ตำรวย สังข์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์, “การพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอตันเพื่อแก้ปัญหาเจาะทะลุ” (Design and development of solid core suspension insulator for solving a punctured problem), การสัมมนาวิชาการเรื่อง วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอีเอ็มซี, กรุงเทพฯ, 21-22 พฤศจิกายน 2543, HVE-3 หน้า 1-13.
7. ตำรวย สังข์สะอาด, ณรงค์ชัย ถิมเศรษฐกานต์, “ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” (Effect of Steep Front Impulse Voltage on Porcelain Insulators), การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 (EECON-22), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2-3 ธันวาคม 2542, PW 074 หน้า 653-656.
8. S. Sangkasaad, N. Limsetthagan, T. Soontornnapa, “**Effect of Steep Front Impulse Voltage on Insulators**”, The xth Asian Conference on Electrical Discharge (ACED2000), Kyoto, Japan, November 6-7, 2000 : B-204.