บทที่ 2

แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

แรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน จะเป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งมีรูปคลื่น 1.2/50 μs หรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมีรูปคลื่น 250/2500 μs [5] แต่แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะมีข้อกำหนดที่แตกต่างจากที่กล่าว

2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน มี 2 ประการ[6] คือ

1) ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์
2) ขนาดแรงดันอิมพัลส์

2.1.1 ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ความชันของแรงดันอิมพัลส์ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุเนื้อลูกถ้วยนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของลูกถ้วยแล้วยังขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อฉนวน(Dielectric strength) [7] ค่าความชันของแรงดันอิมพัลส์จะต้องมากกว่าค่าความชันวิกฤต S_c ที่ได้จากจุดตัดของเส้นลักษณะแรงดัน-เวลาการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกับเส้นลักษณะแรงดัน-เวลาการเกิดเจาะทะลุเนื้อฉนวน ในทางปฏิบัติจึงกำหนดให้ความชันของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีค่ามากกว่า 2500 kV/μs

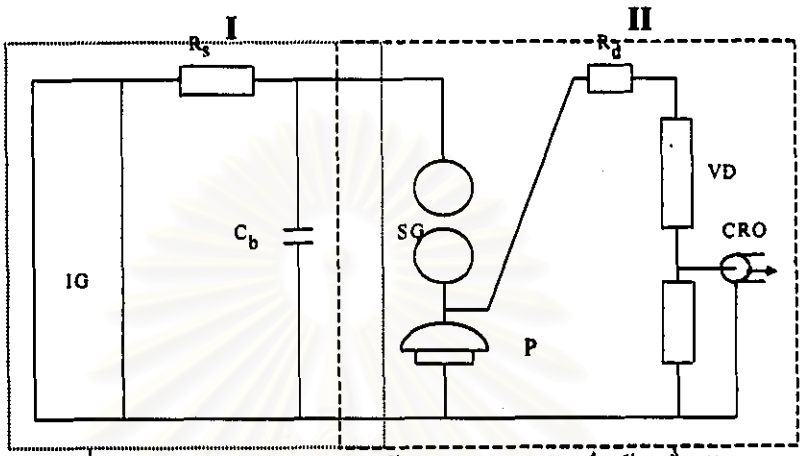
2.1.2 ขนาดแรงดันทดสอบ

ค่าแรงดันที่จะใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนนั้นให้กำหนดเป็นจำนวนเท่าหรือ Per unit (p.u.) ของค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ขั้วลบคือ $U_{b,50\%}$ ของลูกถ้วยนั้น เช่น 3 p.u. อย่างไรก็ตามในมาตรฐาน IEC 36B ฉบับร่าง[8] ได้แนะนำไว้ว่าแรงดันของเครื่องกำเนิดขณะไม่มีวัสดุทดสอบ 600 kV ก็เพียงพอ

2.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันวิธีที่ง่ายและนิยมกันทั่วไปคือ ใช้การตัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ด้วยสปาร์กแกปตัดรูปคลื่น[9] ซึ่งจะใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน (IG) ขนาดเพียง 1000 kV เป็นตัวจ่ายแรงดันอิมพัลส์ให้แก่ ตัวเก็บประจุโหลด (C_b)ที่ต่อ

ขนานไว้ด้วยสปาร์กแกปทรงกลม (SG) ต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบ (P) คือ ถูกถ้วยฉนวนดังวงจรแสดงในรูปที่ 2.1 แรงดันที่เกิดบนถูกถ้วยฉนวนจะวัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ (VD) ที่มีผลตอบสนองรวดเร็วร่วมกับออสซิลโลสโคป (CRO)

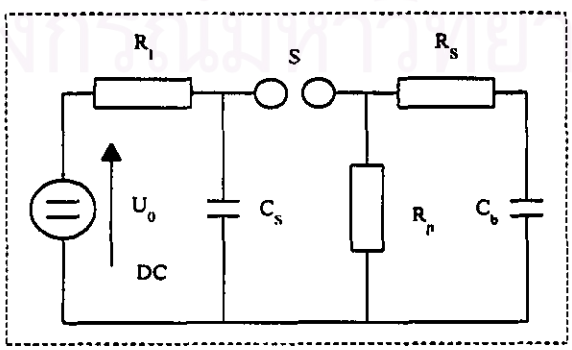


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน [6]

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในรูปที่ 2.1 อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน(I) และส่วนที่สองคือ ส่วนเสริมที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (II) โดยมีตัวเก็บประจุโหลด C_b ทำหน้าที่คับปลิงวงจรทั้งสอง

2.2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs

ในรูปที่ 2.1 (I) เป็นส่วนวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน จะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง U_o ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s สปาร์กแกปมีไกสวิตช์ (Trigger) ความต้านทานปรับหน้าคลื่นคือ R_s และหางคลื่นคือ R_p และตัวเก็บประจุโหลด C_b ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคับปลิงด้วย ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนประกอบวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน

U_o คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง $U(t)$ คือ แรงดันที่จ่ายออก

R_l คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

S คือ สปาร์กแกปมีไกสวิตช์ (Trigger) R_p คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น

R_s คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลดทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุคับปลิงให้กับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

ประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ η คือ อัตราส่วนแรงดันที่จ่ายออกต่อแรงดันอัดประจุ U_o , $\eta = U/U_o \leq C_s/(C_s+C_b)$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆและให้ได้รูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด ควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆโดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10\, C_b$ [10]

2.2.2 วงจรเสริมเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

ในส่วนวงจรเสริม ของรูปที่ 2.1 (II) ตัวเก็บประจุโหลดจะได้รับการคายประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และได้แรงดันตกคร่อม C_b มีรูปคลื่นมาตรฐานเต็ม เมื่อแรงดันคร่อม C_b มีค่าสูงมากพอก็จะทำให้เกิดสปาร์กที่แกป SG ที่ต่อขนานกับ C_b ทำให้เกิดคลื่นตัดและมีความชันสูง ความชันนี้จะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับขนาดของ C_b

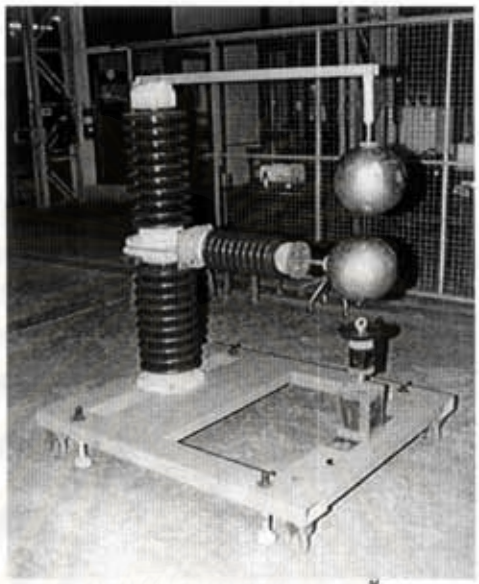
2.2.3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่น SG

สปาร์กแกปที่ทำหน้าที่ตัดรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ปกติในรูปที่ 2.2 แล้วทำให้เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขึ้น สปาร์กแกปตัดรูปคลื่นที่พัฒนาออกแบบสร้างในที่นี้มี 2 แบบ คือ

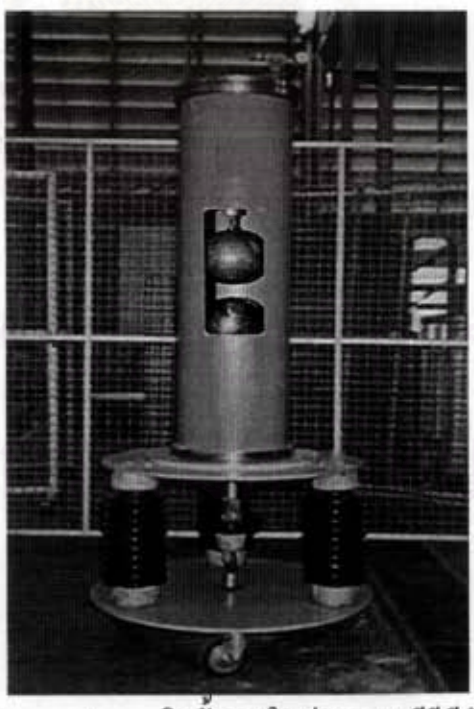
1) สปาร์กแกปแบบที่หนึ่ง เป็นสปาร์กแกปแบบแรกที่ออกแบบสร้าง ทำด้วยทรงกลมทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ซม. ติดตั้งอยู่ในบรรยากาศ ดังในรูปที่ 2.3 การใช้สปาร์กแกปแบบติดตั้งอยู่ในบรรยากาศนี้มีขีดจำกัดในการสร้างความชันของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งได้ความชันต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด คือ ต่ำกว่า 2500 kV/μs

2) สปาร์กแกปแบบที่สอง ซึ่งเป็นแบบที่พัฒนาต่อเนื่องจากแบบแรก คือทำด้วยทรงกลมทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. และติดตั้งในถังฉนวนพีวีซีบรรจุกาซ N_2 อัดความดัน ดังในรูปที่ 2.4

การเกิดเบรกดาวน์ในกาซอัดความดัน จะทำให้กลไกการเกิดเบรกดาวน์เป็นไปด้วยความรวดเร็ว จึงทำให้เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นชันสูงขึ้น



รูปที่ 2.3 Crowbar spark gap แบบติดตั้งในบรรยากาศ



รูปที่ 2.4 Crowbar spark gap ติดตั้งภายในท่อฉนวนพีวีซีอัดความดันกาซ
(มีการตัดต่อภาพให้เห็นภายใน)

2.2.4 อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์

ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะประกอบด้วย อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์และออสซิลโลสโคปที่มีเวลาตอบสนองค่อนข้างรวดเร็วเพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงอันรวดเร็วของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ตามคำแนะนำของ CIGRE [11] โวลเตจดิไวเดอร์ที่ใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันควรเป็นประเภทความต้านทานต่ำ หรือชนิดอื่นที่มีความเร็วสูง

2.3 การออกแบบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

การออกแบบและประกอบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในที่นี้ จะใช้ส่วนประกอบวงจรตามรูปที่ 2.1 โดยมีเงื่อนไขที่กำหนด คือ แรงดันอิมพัลส์มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับ 2500 kV/μs และขนาดแรงดันที่สร้างขึ้นตอนไม่มีวัสดุทดสอบมีค่าประมาณ 3 เท่าของ $U_{b,50\%}$ ขั้วลบของลูกถ้วยที่ต้องการทดสอบการเจาะทะลุในการวิจัยนี้จะใช้แรงดันอิมพัลส์วิกฤตขั้วลบ คือ 600 kV โดยใช้ส่วนประกอบดังต่อไปนี้

2.3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน

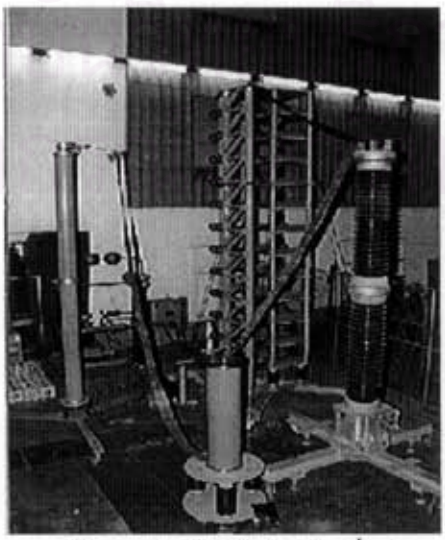
เครื่องกำเนิดที่ใช้เป็นตัวจ่ายมีค่ากำหนดดังนี้ [2]

1) มีขนาด 1000 kV 30 kJ 12 ชั้นๆ ละ 100 kV

2) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ มีความจุไฟฟ้ารวม C_s = 50 nF

3) ตัวเก็บประจุโหลดปรับเปลี่ยนได้ 1 , 2 , 4 และ 8 nF

4) ค่าองค์ประกอบความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d = 56-336 Ω และความต้านทานปรับหลังคลื่น R_c = 1380 Ω สร้างรูปคลื่นมาตรฐานได้ T_1 = 1.03 - 1.38 μs, T_2 = 50 - 51 μs



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ

2.3.2 ตัวเก็บประจุโหลดคับปลิง C_b

ในที่นี้ได้ทำการทดลองใช้ค่า C_b หลายค่า คือ 1, 2, 4 และ 8 nF ซึ่งแต่ละตัวมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 700 kV

2.3.3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่น

สปาร์กแกปตัดคลื่นเลือกแบบกาซอัดความดันทำด้วยทรงกลมทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. บรรจุติดตั้งภายในท่อฉนวนพีวีซีบรรจุกาซ N_2 อัดความดันปรับค่าได้ 1 ถึง 4 บาร์ ใต้ล่างของตัวสปาร์กแกปมีที่ยึดถูกถ้วยฉนวนที่ต้องการทดสอบเจาะทะลุซึ่งมองเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 2.4

2.3.4 โวลเตจดิไวเดอร์และออสซิลโลสโคป

การวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันด้วยอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ซึ่งมีเวลาตอบสนอง 13.7 ns บันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยออสซิลโลสโคป มี Rise time ไม่เกิน 10 ns

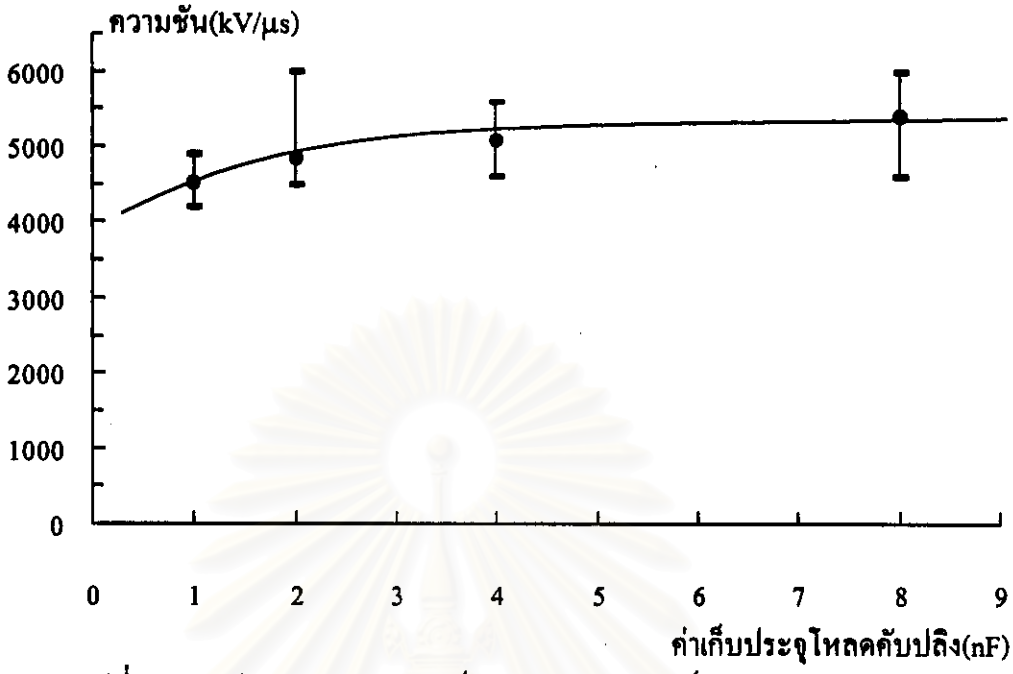
2.4 ผลการสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

เพื่อประเมินผลของการประกอบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน จึงทำการสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในกรณีต่อไปนี้

2.4.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ C_b ค่าต่างๆ

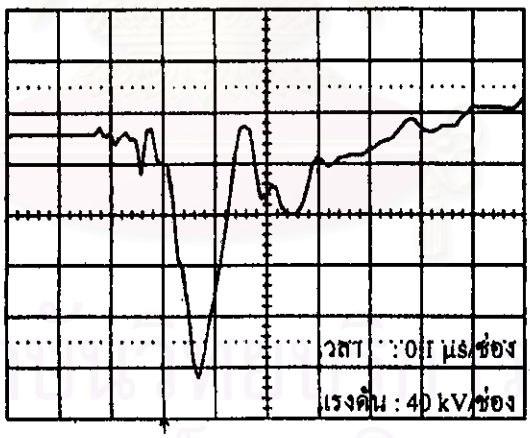
การทดลองใช้วงจรตามรูปที่ 2.5 สปาร์กแกปอัดความดัน N_2 ที่ความดัน 4 บาร์ มีค่าเก็บประจุโหลดคับปลิง C_b = 1, 2, 4, และ 8 nF แรงดันอัดประจุ 600 kV แต่ละค่าเก็บประจุ C_b ป้อนแรงดันอย่างน้อย 7 ครั้ง บนถูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว Class. 52-8 สามารถสร้างความชันได้ตั้งแต่ 4200 ถึง 6000 kV/μs ดังรูปที่ 2.6

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่สร้างได้ดังตัวอย่างรูปที่ 2.7 ซึ่งได้จาก C_b = 8 nF ที่ความดันกาซของสปาร์กแกป 4 บาร์ แรงดันอัดประจุ 600 kV ได้ความชันเฉลี่ย 5585 kV/μs



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความชันกับค่าเก็บประจุคับปลิง (C_b)

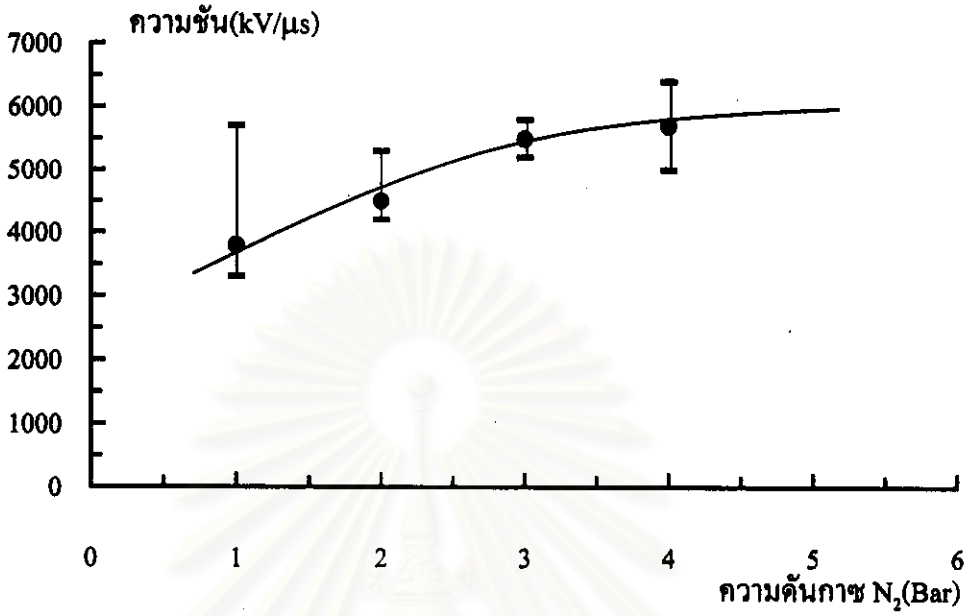
● คือค่าเฉลี่ย ⊥ คือค่าต่ำสุดและสูงสุด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ที่ได้จาก C_b = 8 nF

2.4.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ใช้สปาร์กแกปอัดกาซ N_2 ที่ความดันต่างๆ

การทดลองใช้ค่าเก็บประจุโหลดคับปลิง C_b = 8 nF แรงดันอัดประจุ 720 kV ระยะสปาร์กแกป 5 ซม. และอัดความดันกาซ N_2 4 ค่า คือ 1 ถึง 4 บาร์ ได้ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตั้งแต่ 3800 ถึง 6000 kV/μs ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความชันของหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของความดันกาซ ในท่อฉนวนติดตั้งสปาร์กแกป SG

● คือค่าเฉลี่ย ⊥ คือค่าต่ำสุดและสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย