

บทที่ 5

ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล

5.1 อินทิเกรชันโมเดล

5.1.1 โมเดลของ Sekioka

ใช้สมการอินทิกรัลดังสมการ (5.1) และคำนวณค่า DE ได้จากสมการ(5.2) และ (5.3)

$$DE = \int_{T_0}^{T^B} (V(t) - V_0)^k dt \quad (5.1)$$

$$\text{ชั่วบวก} \quad DE=0.65D-0.04 \quad (5.2)$$

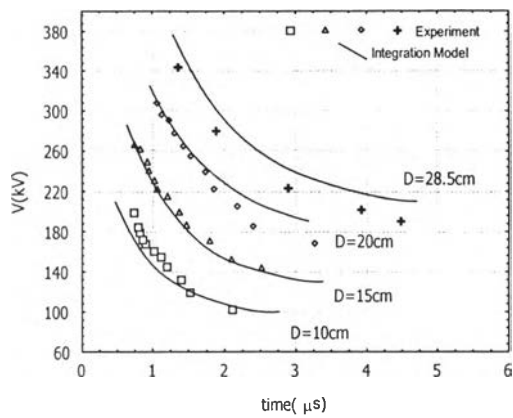
$$\text{ชั่วลบ} \quad DE=0.61D-0.15 \quad (5.3)$$

สมการหาค่า DE ข้างต้นเป็นสมการที่ใช้กับอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และยังไม่เคยมีการนำสมการ DE นี้ไปใช้กับอิเล็กโตรดชนิดอื่น จึงทำการเปรียบเทียบผลการใช้สมการหาค่า DE นี้กับอิเล็กโตรดแบบ rod-plane และลูกถ้วยแท่งก้านตรงด้วย แต่เนื่องจากในกรณีอิมพัลส์ชั่วลบ ค่า DE ที่คำนวณจากสมการข้างต้นจะมีค่าเป็นลบ เมื่อ $D < 24.6 \text{ cm}$ จึงต้องสร้างสมการหาค่า DE ขึ้นใหม่ โดยแก้สมการอินทิกรัลที่เกิดจากรูปคลื่นอิมพัลส์หลายๆรูปคลื่นกับข้อมูลเวลาเบรกดาวน์ที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเพื่อหาค่า DE โดยเวลาที่เริ่มอินทิเกรตคือเวลาที่แรงดันอิมพัลส์มีค่าเริ่มมากกว่า V_0 ซึ่งคือค่า 90% ของ $V_{50\%}$ และเวลาที่หยุดอินทิเกรตคือเวลาเบรกดาวน์ การแก้สมการอินทิกรัลหาค่า DE นั้นทำในกรณีของอิมพัลส์ $1.2/50 \mu\text{s}$ ชั่วลบ อิเล็กโตรดแบบ rod-rod ที่ระยะแก๊ป 3 ระยะ ได้แก่ 10, 15 และ 20cm ซึ่งได้ข้อมูลเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจาก[32] และสร้างความสัมพันธ์ใหม่ระหว่างค่า DE กับระยะแก๊ปได้ดังสมการ

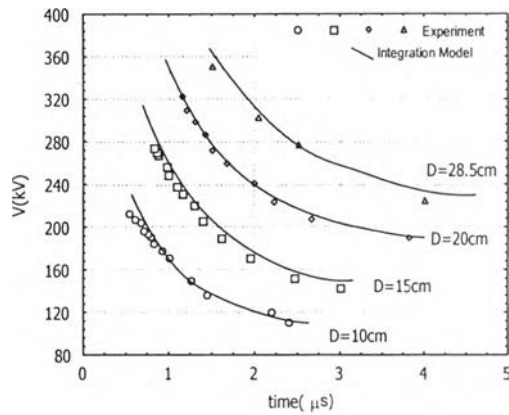
$$DE=0.586D-0.022 \quad (5.4)$$

5.1.1.1 กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และ rod-plane

ผลจากการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาปรากฏว่า สำหรับอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และ rod-plane กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ $1.2/50 \mu\text{s}$ ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ การใช้ค่า DE และ V_0 เป็นค่า 90% ของ $V_{50\%}$ ให้ผลการจำลองที่ดี แต่กรณี $5/50 \mu\text{s}$ จะให้ผลการจำลองที่สูงเกินจริงมาก ต้องเปลี่ยนค่า V_0 เป็นค่า 70% ของ $V_{50\%}$ จึงจะให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียง เพื่อให้ผลการอินทิเกรตมีค่าถึงค่า DE เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1-5.4 และสามารถสรุปการใช้ค่า DE และ V_0 เพื่อสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาในกรณีต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.1

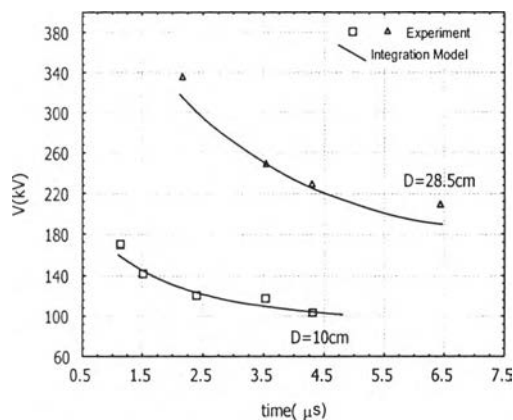


ก) ขั้วบวก

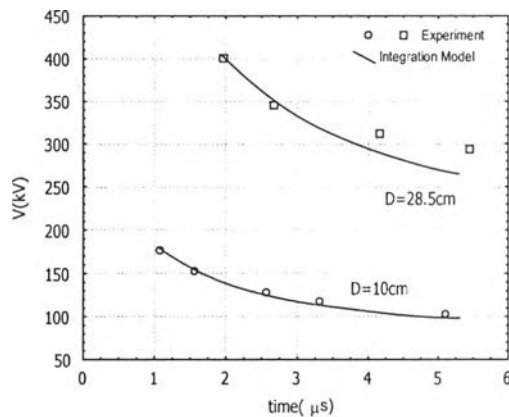


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.1 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μ s กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

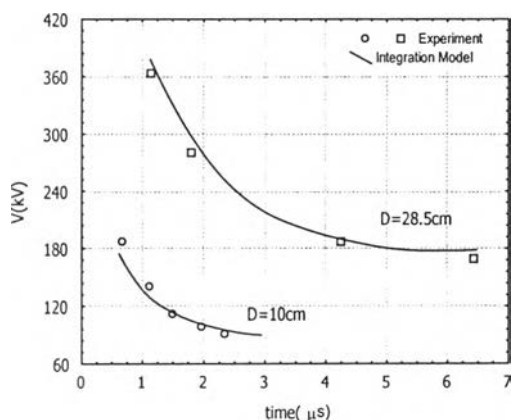


ก) ขั้วบวก

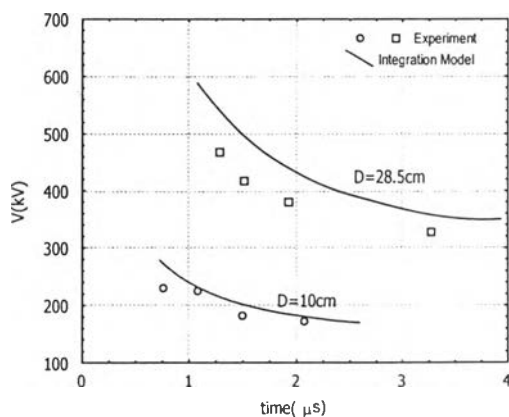


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.2 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μ s กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

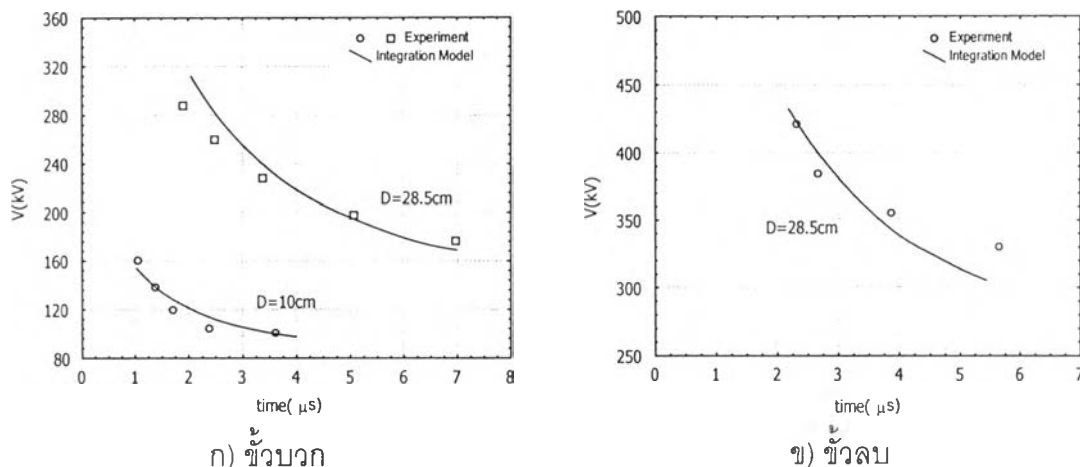


ก) ขั้วบวก



ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.3 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μ s กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane

ตารางที่ 5.1 ค่า DE และ V_0 ของอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และ rod-plane

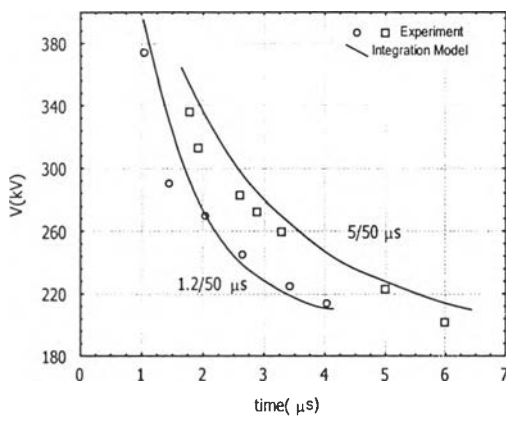
รูปคลื่น	ขั้ว	Rod-Rod	Rod-Plane
1.2/50	+	ขั้วบวก DE=0.65D-0.04, ขั้วลบ DE=0.586D-0.022 $V_0 = 0.9 \cdot V_{50\%}$	
	-		
5/50	+	ขั้วบวก DE=0.65D-0.04, ขั้วลบ DE=0.586D-0.022 $V_0 = 0.7 \cdot V_{50\%}$	
	-		

จากตารางสรุปได้ว่า สมการ(5.2) และ (5.4) ที่ใช้หาค่า DE กรณีอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ สามารถใช้ได้กับอิเล็กโตรดทั้ง rod-rod และ rod-plane โดยการใช้ค่า V_0 ขึ้นกับลักษณะของหน้าคลื่นแรงดัน ถ้าหน้าคลื่นยาวขึ้น ตัวคูณของ $V_{50\%}$ จะมีค่าลดลง เช่น หน้าคลื่นยาว 1.2 μs ต้องใช้ตัวคูณเป็น 0.9 แต่เมื่อหน้าคลื่นเป็น 5μs ต้องใช้ตัวคูณเป็น 0.7 นั่นคือตัวคูณมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้โมเดลของ Sekioka ในการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs เพื่อให้ประโยชน์ในการจัดสัมพันธ์ของฉนวนจึงสะดวกเป็นอย่างมากเพราะเพียงแค่ทราบค่า $V_{50\%}$ ก็สามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้ทันที แต่กรณีที่จะจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีที่แรงดันอิมพัลส์ไม่ใช่รูปคลื่นมาตรฐานจะไม่สะดวกเพราะต้องคำนวณหาตัวคูณที่เหมาะสมสำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นนั้นๆ

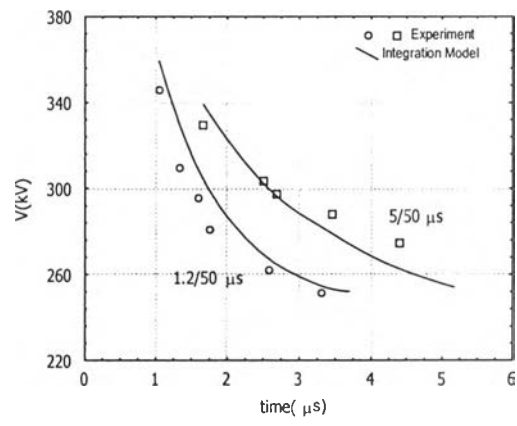
5.1.1.2 กรณีลูกถ้วยแท่งก้านตรง

สำหรับลูกถ้วยแท่งก้านตรงทั้งชนิด 56/57-2 และ 56/57-3 กรณีอิมพัลส์ขั้วบวก ทั้งรูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs สามารถใช้สมการ(5.2)เพื่อหาค่า DE ของขั้วบวกและใช้ค่า V_0 เป็นค่า 90% ของ $V_{50\%}$ ในการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6

โดยค่า D เป็นระยะทางที่วัดจากศูนย์กลางของร่องรับสายไฟฟ้าด้านข้างไปจนถึงฐานโลหะตามแนวตั้ง มีค่าเป็น 24cm และ 28cm สำหรับลูกถ้วยแท่งก้านตรงชนิด 56/57-2 และ 56/57-3 ตามลำดับ กรณีอิมพัลส์ชั่วคราวไม่สามารถใช้ค่า DE ที่คำนวณจากสมการ(5.3)และ(5.4)ได้ เพราะจะทำให้เส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่จำลองได้สูงเกินจริงไปมาก จึงต้องแก้สมการอินทิกรัลที่เกิดจากรูปคลื่นอิมพัลส์หลายๆรูปคลื่นกับข้อมูลเวลาเบรกดาวนที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเพื่อหาค่า DE ใหม่เป็นกรณีไปโดยใช้ V_0 เป็นค่า 90% ของ $V_{50\%}$ และใช้หลักการที่ว่า DE มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับลักษณะของรูปคลื่น ดังนั้นลูกถ้วยแบบเดียวกัน เมื่อป้อนชั่วแรงดันอิมพัลส์เหมือนกัน ไม่ว่าจะ เป็นรูปคลื่น 1.2/50 μs หรือ 5/50 μs ต้องให้ค่า DE ที่เท่ากัน จากการแก้สมการอินทิกรัล จะได้ว่า กรณีลูกถ้วยแท่งก้านตรงแบบ 56/57-2 ได้ค่า DE เป็น 0.051 และแบบ56/57-3 ใช้ค่า DE เป็น 0.096 ได้ผลการจำลองแสดงดังรูป 5.5-5.6 และสามารถสรุปการใช้ค่า DE และ V_0 เพื่อสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาในกรณีต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.2

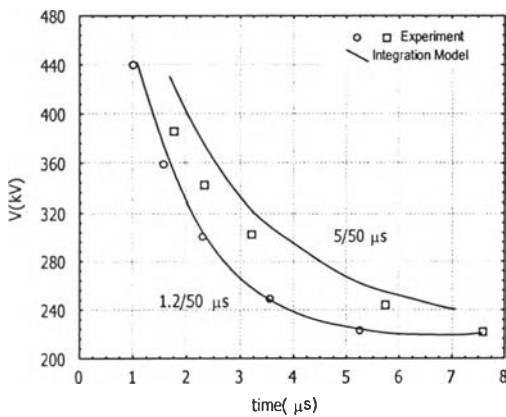


ก) ขั้วบวก

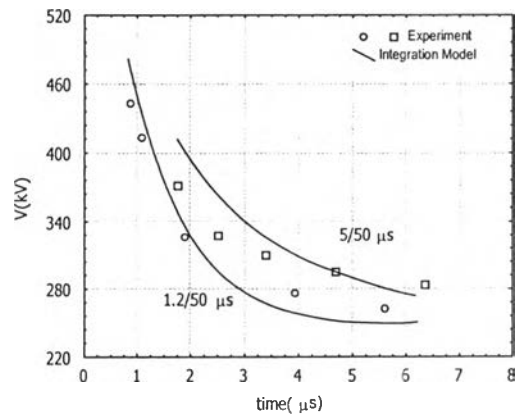


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.5 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณี ลูกถ้วยแท่งก้านตรงแบบ 56/57-2



ก) ขั้วบวก



ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีลูกถ้วยแท่งก้านตรงแบบ 56/57-3

ตารางที่ 5.2 ค่า DE และ V_o ของลูกถ้วยแท่งก้านตรง

ขั้ว	รูปคลื่น	Pin-Post	
		56/57-2	56/57-3
+	1.2/50	DE=0.65D-0.04, D=0.24m	DE=0.65D-0.04, D=0.28m
	5/50	$V_o = 0.9 \cdot V_{50\%}$	$V_o = 0.9 \cdot V_{50\%}$
-	1.2/50	DE=0.051	DE=0.096
	5/50	$V_o = 0.9 \cdot V_{50\%}$	$V_o = 0.9 \cdot V_{50\%}$

จากตารางสามารถสรุปได้ว่า กรณีอิมพัลส์ชั่วคราวที่มีเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 1.2-5 μs สามารถใช้สมการ(5.2)เพื่อหาค่า DE กรณีชั่วคราวได้เลยเมื่อใช้ค่า D เป็นระยะที่วัดจากศูนย์กลางของร่องรับสายไฟฟ้าด้านข้างไปจนถึงฐานโลหะตามแนวดิ่ง ซึ่งสะดวกในการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเป็นอย่างมากเพราะเพียงแค่ทราบค่า $V_{50\%}$ ในแต่ละกรณีก็สามารถจำลองเส้นโค้งแรงดันเวลาได้ทันที เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้สมการ(5.2)และใช้ค่า DE ตามข้อกำหนดดังกล่าวอาจจะนำไปประยุกต์ใช้กับลูกถ้วยแท่งก้านตรงอีก 2 ชนิด ซึ่งคือชนิด 56/57-1 และ 56/57-3 หรือใช้กับลูกถ้วยชนิดอื่นได้ ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

แต่ในกรณีอิมพัลส์ชั่วคราว จำเป็นจะต้องหาค่า DE ใหม่ในแต่ละกรณีจากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลอง โดยค่า V_o ที่ใช้เป็นค่า 90% ของ $V_{50\%}$ ไม่ขึ้นกับลักษณะหน้าคลื่น ซึ่งไม่สะดวกในการใช้งานเท่าที่ควร

อย่างไรก็ตามทั้งกรณีแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วคราวจะเห็นได้ว่าค่า DE ที่ใช้มีเท่ากันถึงแม้ว่ารูปคลื่นอิมพัลส์ที่ใช้จะมีเวลาหน้าคลื่นแตกต่างกัน ดังนั้นถ้ามีเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของลูกถ้วยแท่งก้านตรงสำหรับอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs อยู่แล้ว เมื่อหาค่า DE โดยการแก้สมการอินทิกรัลที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาดังกล่าวโดยใช้ค่า V_o เป็น 0.9 เท่าของ $V_{50\%}$ ก็จะสามารถนำค่า DE ที่ได้ไปจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาสำหรับรูปคลื่นใดๆที่มีหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 1.2-5 μs ได้ทันที โดยค่า DE และตัวคูณมีค่าเท่าเดิมไม่มีผลจากการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่น

5.1.2 โมเดลของ Chowdhuri, Mishra และ McConnell

ใช้สมการอินทิกรัลดังสมการ(5.5)

$$DE = \int_{T_0}^{T_b} (V(t) - V_o)^{\alpha \frac{V(t)}{V_o}} dt \quad (5.5)$$

ทำการจำลองโดยแทนค่า V_0 เป็นค่า $V_{0\%}$ ซึ่งคำนวณได้จาก $V_{0\%} = V_{50\%} - 3\sigma$ แล้วจึงแก้สมการอินทิกรัลเพื่อหาค่า DE และ α เป็นกรณีไป ยกเว้นกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μs ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ที่ระยะแกป 10,15,20 cm ที่ไม่สามารถทำได้เพราะไม่ทราบค่า σ และกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane รูปคลื่นอิมพัลส์ 5/50 μs ชั่วลบ ที่ระยะแกป 10cm ที่ไม่สามารถทำได้เพราะไม่สามารถหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลาในกรณีดังกล่าวได้

หาค่า DE และ α โดยแก้สมการอินทิกรัล 2 สมการซึ่งได้จากการสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอดแตกต่างกันเพียง 2 รูปคลื่นโดยใช้เวลาเบรกดาวนของแต่ละรูปคลื่นตามเวลาเบรกดาวนที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ถ้าเลือกรูปคลื่นอิมพัลส์มากกว่า 2 รูปคลื่นขึ้นไปซึ่งก็ต้องแก้สมการอินทิกรัลมากกว่า 2 สมการพบว่าจะแก้สมการยากขึ้นมากและการกำหนดค่า DE และ α คาดเดาเริ่มต้นเพื่อใช้แก้สมการต้องยิ่งใกล้เคียงกับค่า DE และ α ที่เป็นคำตอบสมการมาก จากการทดลองแก้สมการอินทิกรัลโดยใช้รูปคลื่นอิมพัลส์ตั้งแต่ 3 รูปคลื่นขึ้นไปพบว่าค่า DE และ α ที่ได้จากการแก้สมการอินทิกรัลจะให้ผลการจำลองที่ผิดพลาดมากไม่ว่าจะลองเปลี่ยนค่า DE และ α คาดเดาเริ่มต้นเป็นค่าใดก็ตาม และเมื่อลองใช้ค่า DE และ α นี้สร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาขึ้นพบว่าได้ลักษณะความโค้งเป็นลักษณะอื่นซึ่งไม่คล้ายกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเลยนั่นคือการแก้สมการอินทิกรัลตั้งแต่ 3 สมการขึ้นไปจะไม่ได้ค่า DE และ α ที่เป็นคำตอบหรือเข้าใกล้คำตอบของสมการอินทิกรัลเลย ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้รูปคลื่นอิมพัลส์เพื่อใช้แก้สมการอินทิกรัลเพียง 2 รูปคลื่นเท่านั้นโดยเลือกแรงดันอิมพัลส์ที่จะเกิดเบรกดาวนที่จุดบนเส้นโค้งแรงดัน-เวลาซึ่งมีค่าเวลาเบรกดาวนมากที่สุดและน้อยสุด

5.1.2.1 กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และ rod-plane

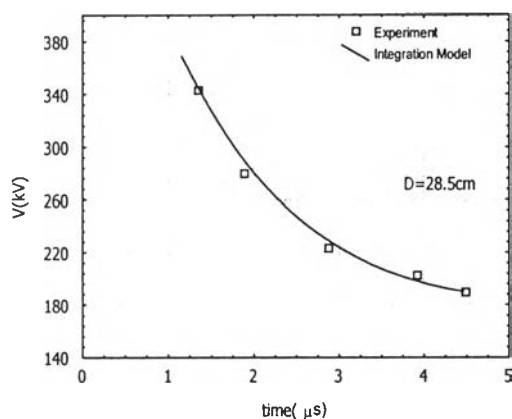
แสดงค่า DE, α และ V_0 ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 5.3 และ 5.4 และแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 5.7-5.10

ตารางที่ 5.3 ค่า DE, α และ V_0 ของอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

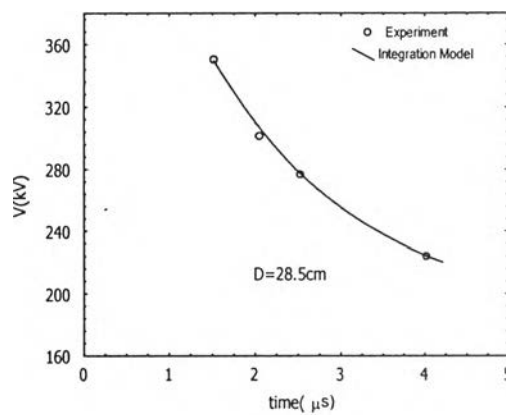
รูปคลื่น		10cm			28.5cm		
		DE	α	$V_0(\text{kV})$	DE	α	$V_0(\text{kV})$
1.2/50	+	-	-	-	1.08e-5	0.12	176.1
	-	-	-	-	2.212e-5	0.137	170.1
5/50	+	5.964e-6	0.139	90.07	3.528e-5	0.136	138
	-	4.152e-5	0.148	58.05	2.746e-5	0.213	249.5

ตารางที่ 5.4 ค่า DE, α และ V_0 ของอิเล็กโทรดแบบ rod-plane

รูปคลื่น		10cm			28.5cm		
		DE	α	V_0 (kV)	DE	α	V_0 (kV)
1.2/50	+	4.155e-6	0.101	77.63	1.983e-5	0.129	153.4
	-	5.246e-5	0.281	131.3	4.22e-5	0.172	225
5/50	+	4.04e-6	0.125	86.25	2.066e-5	0.172	156.9
	-	-	-	-	6.046e-6	0.146	312.3

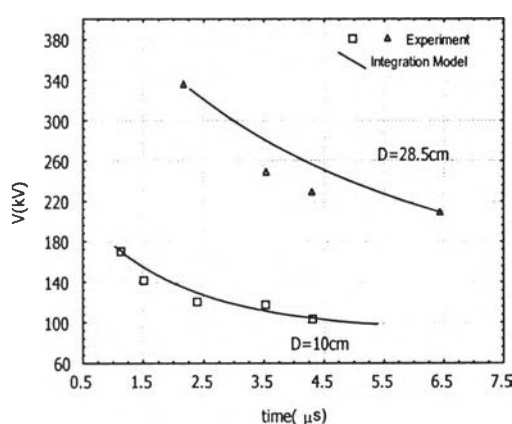


ก) ขั้วบวก

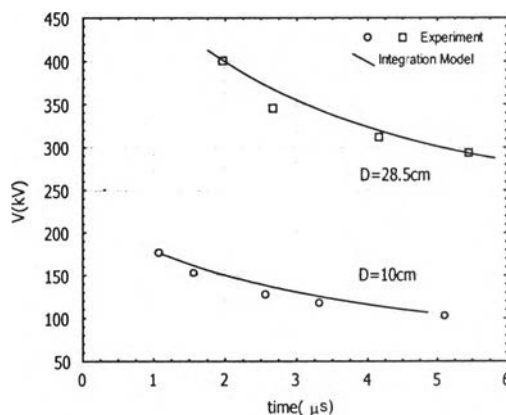


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.7 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μ s กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod

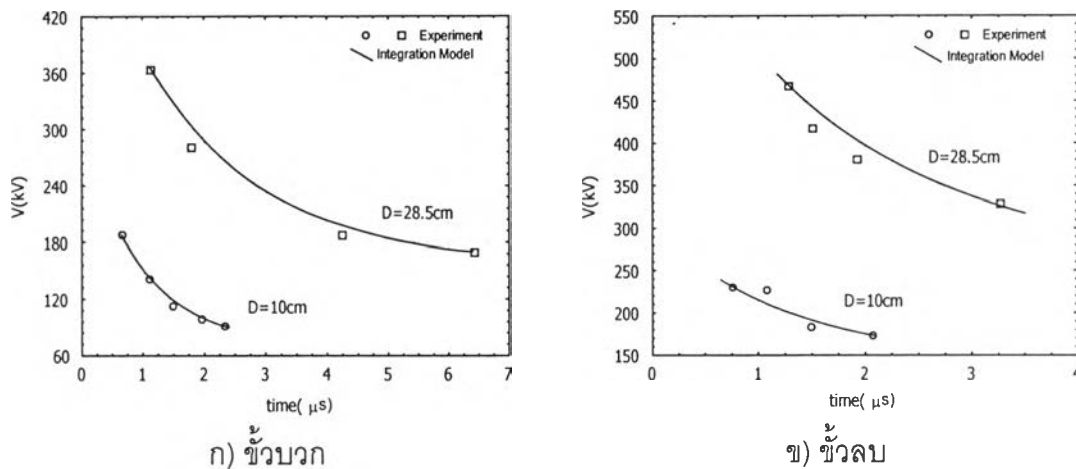


ก) ขั้วบวก

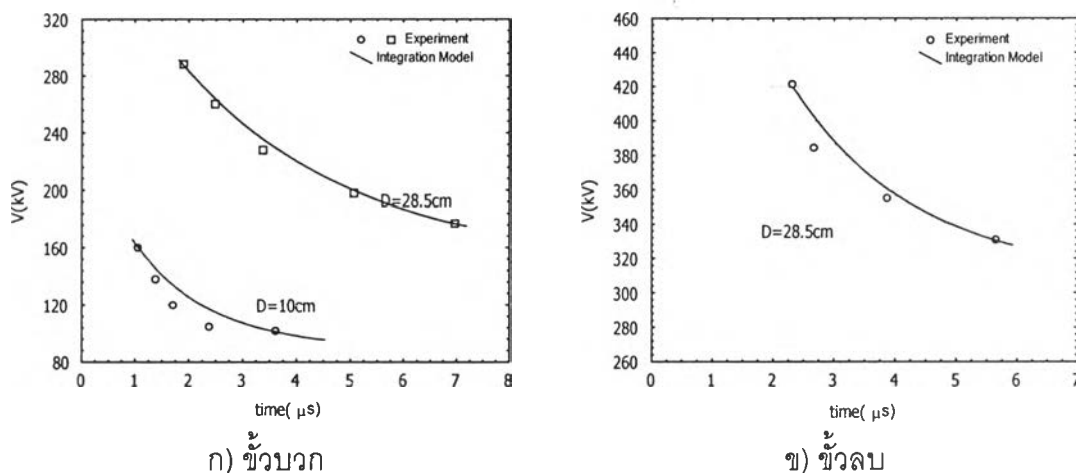


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.8 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μ s กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-plane



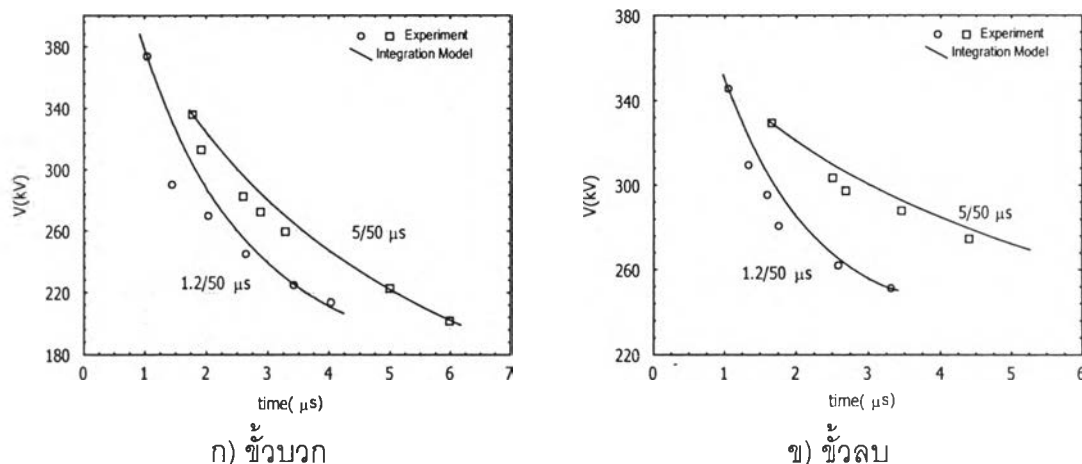
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μs กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-plane

5.1.2.2 กรณีลูกถ้วยแท่งก้านตรง

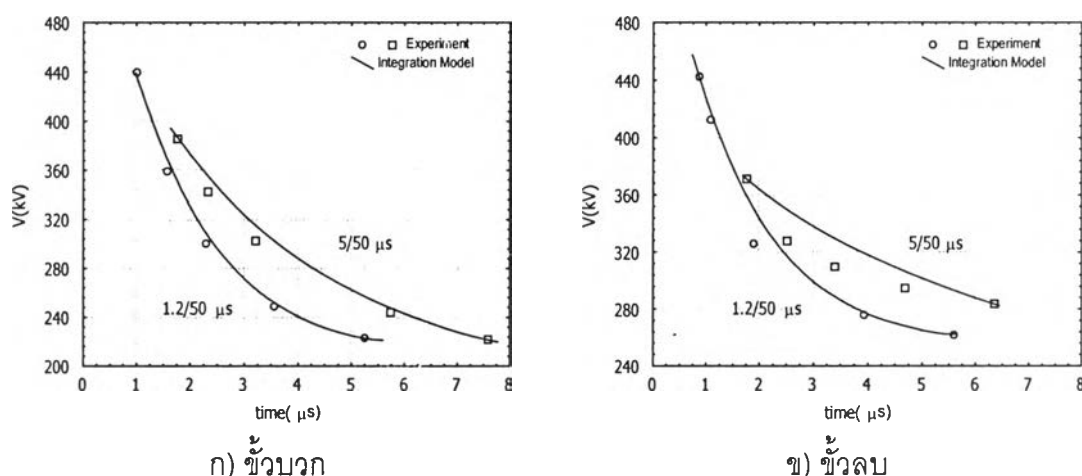
แสดงค่า DE, α และ V_0 ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 5.5 และแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 5.11-5.12

ตารางที่ 5.5 ค่า DE, α และ V_0 ของลูกถ้วยแท่งก้านตรง

รูปคลื่น	56/57-2			56/57-3			
	DE	α	V_0 (kV)	DE	α	V_0 (kV)	
1.2/50	+	2.475e-5	0.158	171.3	1.744e-5	0.149	208.8
	-	3.255e-5	0.271	234.3	5.061e-5	0.245	244.5
5/50	+	3.331e-5	0.134	128.8	2.372e-5	0.168	198.4
	-	6.602e-4	0.459	219.1	6.905e-4	0.378	212.7



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณี ลูกถ้วยแท่งก้านตรงแบบ 56/57-2



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีลูกถ้วยแท่งก้านตรงแบบ 56/57-3

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าโมเดลนี้ให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงมากทั้งกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod, rod-plane และลูกถ้วยแท่งก้านตรง โดยเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่เราสร้างขึ้นทุกรูปจะผ่านจุดบนเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่มีเวลาเบรกดาวน้มากที่สุดและน้อยสุดซึ่งเป็นจุดที่เลือกมาใช้แก่สมการอินทิกรัลเสมอ แสดงว่าค่า DE และ α ที่ได้จากการแก่สมการอินทิกรัลและผลการจำลองขึ้นกับจุดเวลาเบรกดาวน้มที่เลือกมาใช้แก่สมการอินทิกรัลอย่างมาก ถ้าเลือกเวลาเบรกดาวน้มเพื่อนำมาแก่สมการอินทิกรัลไม่เหมาะสมก็อาจให้ค่า DE และ α ที่ทำให้ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาผิดจากความจริงไปมากได้ เมื่อพิจารณาผลการจำลองที่เวลาเบรกดาวน้มอยู่ในช่วงน้อยที่สุดถึงมากที่สุดพบว่าส่วนใหญ่แล้วผลการจำลองที่ได้จะสูงกว่าจุดบนเส้นโค้งแรงดัน-เวลา แสดงว่าการเลือกจุด 2 จุดเป็นจุดที่มีเวลาเบรกดาวน้มมากที่สุดและน้อยสุดเพื่อแก่สมการอินทิกรัลจะให้ผลการจำลอง

เส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่มีความโค้งน้อยเกินไป จึงต้องเลือกเวลาเบรกดาวนั้ 2 จุดใดๆตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองจริงที่สุด

อินทิเกรชันโมเดลชนิดนี้ถึงแม้ว่าจะให้เส้นโค้งที่ผ่านจุดซึ่งเลือกมาแก้สมการอินทิกรัลเสมอ ซึ่งถ้าเลือกจุดได้เหมาะสมก็จะสามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาทีใกล้เคียงกับของจริงได้ แต่ก็ไม่เหมาะกับการใช้งานทั่วไปเพราะต้องคำนวณหาค่า DE และ α จากเส้นโค้งแรงดันเวลาก่อนเสมอ และไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า DE และ α ที่มีต่อการเปลี่ยนชั่วแรงแรงดัน เวลาหน้าคลื่น หรือแม้แต่ระยะแยกได้เลย ที่สำคัญเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่จำลองได้มักให้ความโค้งน้อยเกินไป

5.1.3 โมเดล V_0 แปรตามเวลา

ใช้สมการอินทิกรัลดังสมการ(5.6)

$$DE = \int_{T_0}^{T^b} (V(t) - b \cdot V_{50\%} (1 - t^a)) dt \quad (5.6)$$

เริ่มจากแก้สมการอินทิกรัลโดยใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหลายๆรูปคลื่นซึ่งมีค่ายอดแรงดันที่ จะทำให้เกิดการเบรกดาวนั้ตามข้อมูลที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลา เช่นจากการทดลองด้วยวิธีระดับแรงดันคงที่ได้จุดตำแหน่งของแรงดันเบรกดาวนั้และเวลาเบรกดาวนั้เพื่อใช้ลากเส้นโค้งแรงดัน-เวลา 4 จุด ก็สร้างสมการอินทิกรัลที่มีค่ายอดแรงดันอิมพัลส์แตกต่างกัน 4 ค่าและให้เวลาเบรกดาวนั้ในสมการตามข้อมูลเวลาเบรกดาวนั้จากจุดทั้ง 4 จุด ดังนั้นจะได้สมการอินทิกรัลทั้งหมด 4 สมการ

จากการแก้สมการอินทิกรัลในกรณีที่มีข้อมูลเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของทั้งรูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs โดยถือว่าอิเล็กโตรดที่มีระยะแยกค่าหนึ่ง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีชั่วแรงแรงดันแบบหนึ่งไม่ว่าจะเป็นรูปคลื่นแบบใดก็ตาม เช่น 1.2/50 μs กับ 5/50 μs จะต้องให้ค่า DE และ b เท่ากัน ได้ค่า DE, a และ b ดังแสดงในตารางที่ 6.6-6.8 ยกเว้นกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane ระยะแยก 10cm แรงดันอิมพัลส์ 5/50 μs ชั่วลบ ที่ไม่มีเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเนื่องจากไม่สามารถหาการกระจายทางสถิติของเวลาเบรกดาวนั้ได้จึงไม่สามารถสร้างสมการอินทิกรัลเพื่อหาค่า DE, a และ b สำหรับใช้ในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane ระยะแยก 10cm ได้

5.1.3.1 กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และ rod-plane

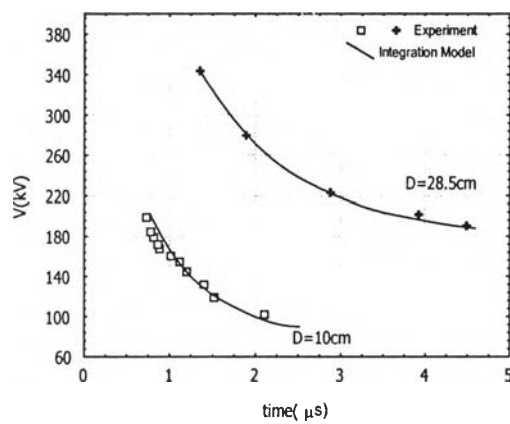
แสดงค่า DE, a และ b ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 5.6 และ 5.7 แสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 5.13-5.16

ตารางที่ 5.6 ค่า DE, a และ b ของอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

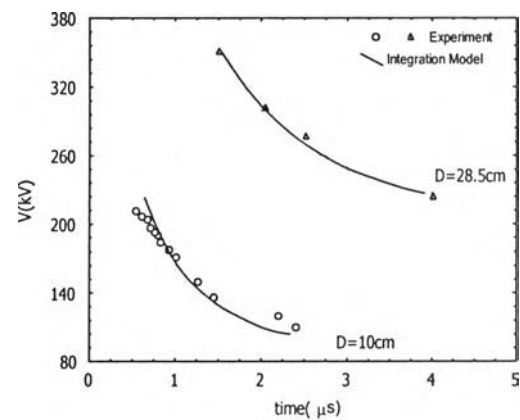
รูปคลื่น		10cm			28.5cm		
		DE	a	b	DE	a	b
1.2/50	+	0.08035	0.02461	0.83958	0.10614	0.14136	0.91355
	-	0.03907	2.78039	0.77769	0.1401	0.1382	1.01948
5/50	+	0.08035	0.006119	0.83958	0.10614	0.18632	0.91355
	-	0.03907	0.33814	0.77769	0.1401	0.06674	1.01948

ตารางที่ 5.7 ค่า DE, a และ b ของอิเล็กโตรดแบบ rod-plane

รูปคลื่น		10cm			28.5cm		
		DE	a	b	DE	a	b
1.2/50	+	0.03543	0.25272	0.90666	0.11709	0.81603	0.89552
	-	-	-	-	0.08406	2.56163	0.87923
5/50	+	0.03543	0.01163	0.90666	0.11709	0.15313	0.89552
	-	-	-	-	0.08406	0.23024	0.87923

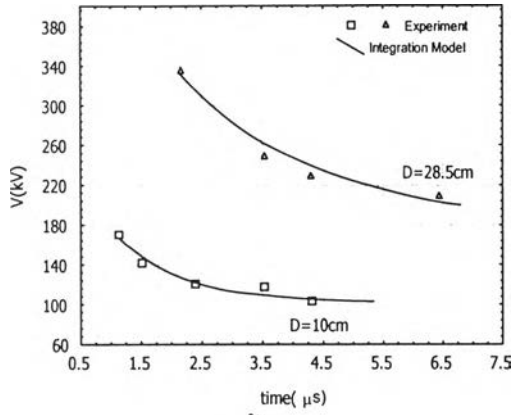


ก) ขั้วบวก

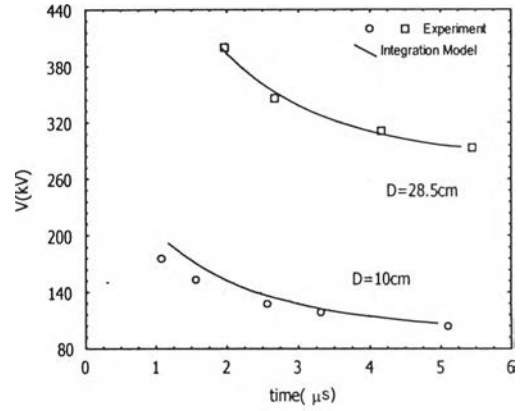


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.13 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μ s กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

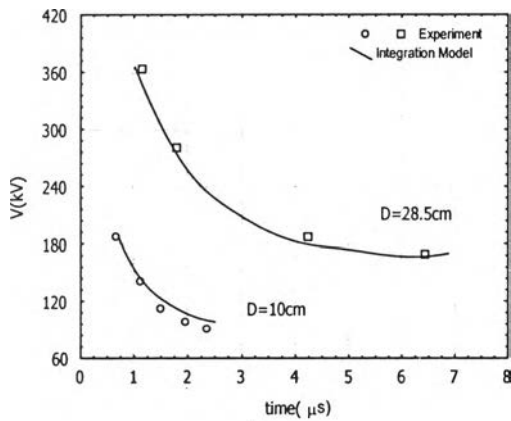


ก) ขั้วบวก

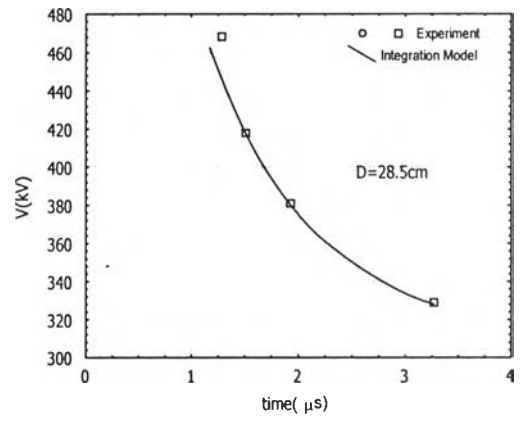


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.14 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

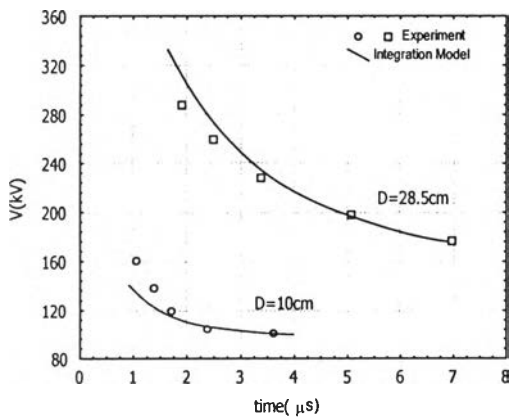


ก) ขั้วบวก

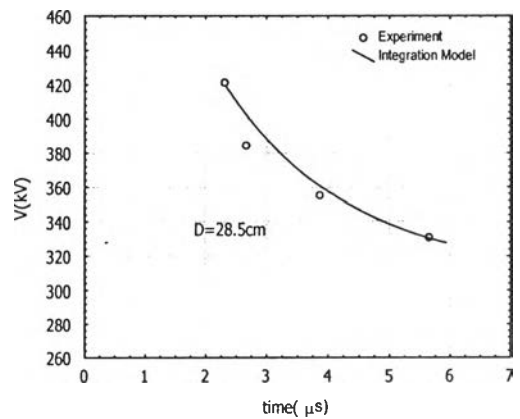


ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.15 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane



ก) ขั้วบวก



ข) ขั้วลบ

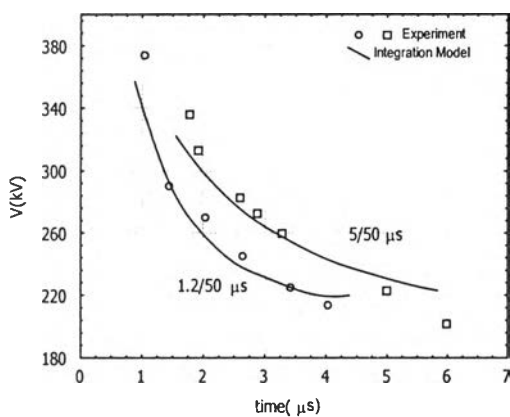
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane

5.1.3.2 กรณีลูกถ้วยแห้งก้านตรง

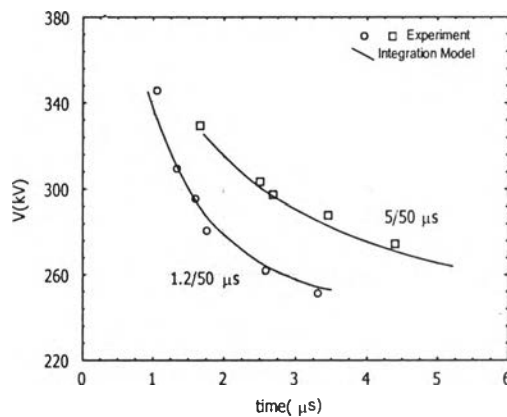
แสดงค่า DE,a และ b ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 5.8 และแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 5.17-5.18

ตารางที่ 5.8 ค่า DE, a และ b ของลูกถ้วยแห้งก้านตรง

รูปคลื่น		56/57-2			56/57-3		
		DE	a	b	DE	a	b
1.2/50	+	0.05285	0.31768	1.07618	0.0814	3.48973	1.00442
	-	0.02929	0.23013	0.98583	0.05704	0.71183	0.98567
5/50	+	0.05285	0.28288	1.07618	0.0814	0.20834	1.00442
	-	0.02929	2.23493	0.98583	0.05704	0.37858	0.98567

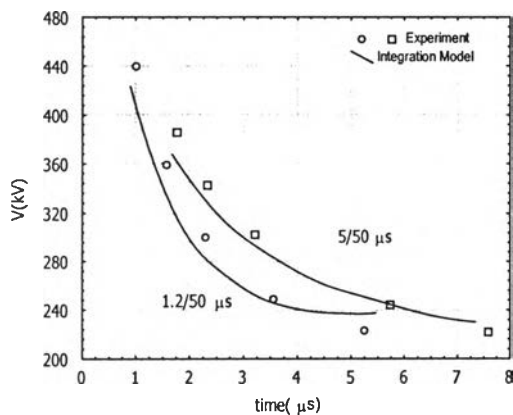


ก) ชั่วบวก

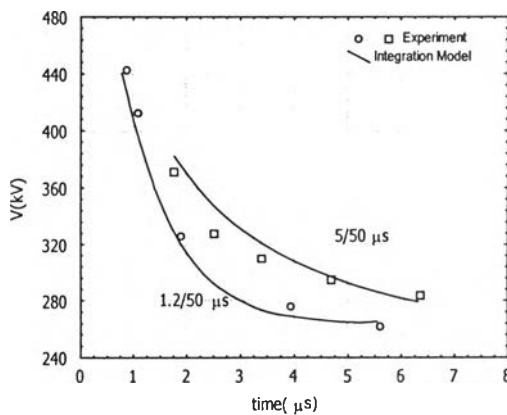


ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.17 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณี ลูกถ้วยแห้งก้านตรงแบบ 56/57-2



ก) ชั่วบวก



ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.18 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณี ลูกถ้วยแห้งก้านตรงแบบ 56/57-3

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า ผลการจำลองทั้งกรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod, rod-plane และลูกถ้วย ที่ได้ใกล้เคียงกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองมาก โดยค่า DE และ b ที่ใช้สำหรับอิเล็กโทรดแต่ละกรณีมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่เปลี่ยนไป ดังนั้นสำหรับอิเล็กโทรดแต่ละชนิด ถ้ามีการทดลองหาค่า DE และ b ในหลายๆระยะแกปก็จะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE และ b กับค่าระยะแกปเป็นสมการเพื่อความสะดวกในการใช้งานโมเดลนี้ต่อไปในอนาคตได้เหมือนกับสมการ DE ในอินทิเกรชันโมเดลของ Sekioka เมื่อพิจารณาค่า a พบว่ามีค่าไม่แน่นอนไม่สามารถหาความสัมพันธ์กับลักษณะของรูปคลื่นหรือระยะแกปได้

อย่างไรก็ตามอินทิเกรชันโมเดลอันนี้ก็ยังไม่เหมาะกับการใช้งานในทางปฏิบัติ เพราะต้องหาค่า a เป็นกรณีไป จึงทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเมื่อเปลี่ยนแรงดันอิมพัลส์เป็นรูปคลื่นอื่นจากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่มีอยู่แล้วได้

5.2 ลิตเตอร์โมเดล

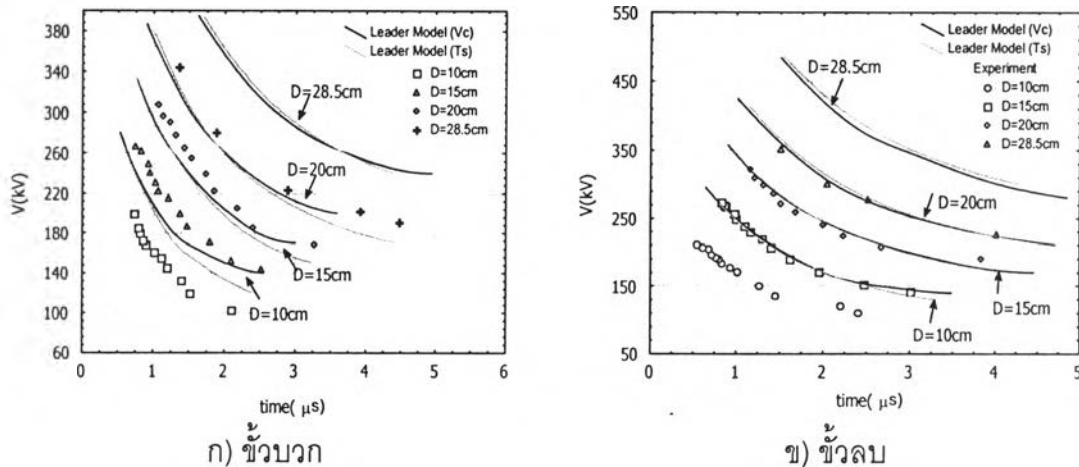
5.2.1 โมเดลของ Shindo และ Suzuki

5.2.1.1 กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod

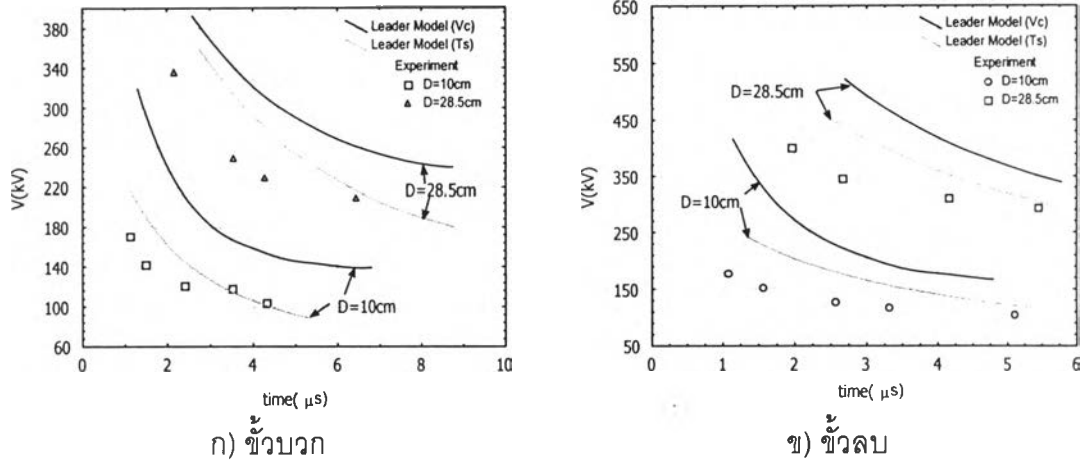
กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod ได้ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้สมการค่า T_s และ V_c ดังสมการ (5.7) และ (5.8) ในการเริ่มต้นคำนวณความยาวลิตเตอร์ก่อนเพื่อพิจารณาว่าแบบใดให้ผลการจำลองที่ดีกว่า โดยได้ผลการจำลองดังรูปที่ 5.19-5.20

$$T_s = A / (\frac{V_p}{D} - B) \tag{5.7}$$

$$V_c = PD + Q \tag{5.8}$$



รูปที่ 5.19 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod



รูปที่ 5.20 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

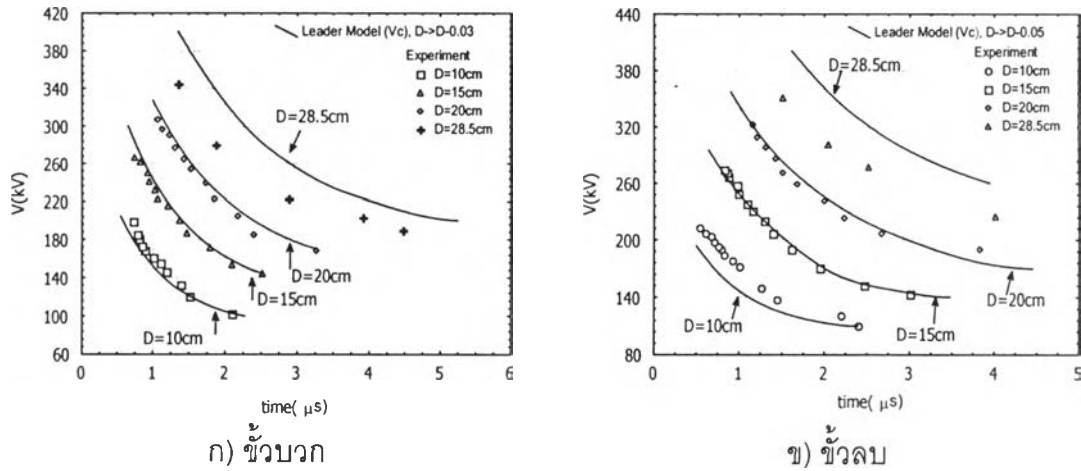
จะเห็นได้ว่า ในกรณีอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs ผลจากการใช้สมการค่า T_s และ V_c ในการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งรูปคลื่นชั่ววอกและลบ แต่กรณีรูปคลื่น 5/50 μs จะให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน นั่นคือสมการค่า V_c ไม่สามารถใช้แทนสมการค่า T_s ได้สำหรับทุกรูปคลื่นอิมพัลส์ จะใช้แทนได้อย่างดีเพียงรูปคลื่น 1.2/50 μs เท่านั้น

จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าผลการจำลองจากทั้ง 2 กรณีข้างต้นเมื่อเทียบกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองให้ค่าสูงเกินจริงมากในกรณีอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs แต่ในกรณีรูปคลื่น 5/50 μs ผลการจำลองกรณีที่ใช้สมการค่า T_s จะให้ค่าใกล้เคียงผลการทดลองขึ้น การที่ผลการทดลองคลาดเคลื่อนอย่างมากน่าจะเป็นเพราะพารามิเตอร์ที่ใช้ในลีดเดอร์โมเดลนี้คำนวณจากการเกิดเบรกดาวน์ที่ระยะแกปกว้างหลายเมตร แต่งานวิจัยนี้นำมาใช้จำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ระยะแกปสั้นๆ จึงมีคลาดเคลื่อนไปมาก และอาจเป็นเพราะที่ระยะแกปเล็กๆอาจเกิดเบรกดาวน์ก่อนที่จะเกิดลีดเดอร์ขึ้นดังนั้นการใช้ลีดเดอร์โมเดลจึงทำให้ได้ผลการจำลองที่ผิดพลาด

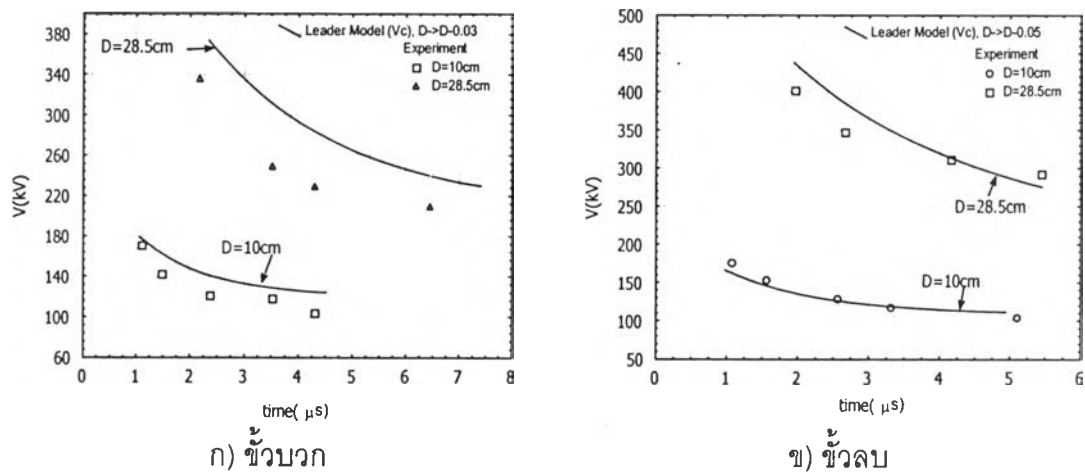
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงลักษณะความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองที่ได้จากสมการค่า T_s และ V_c จะเห็นได้ว่า การใช้สมการค่า V_c นั้นจะให้ลักษณะความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองที่สูงเกินจริงโดยไม่ขึ้นกับลักษณะรูปคลื่นอิมพัลส์ นั่นคือถ้าสามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนส่วนนี้ได้ ก็จะทำให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงมากขึ้น

ทำการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของลีดเดอร์โมเดลที่ใช้สมการค่า V_c ดังนี้ ในกรณีอิมพัลส์ 1.2/50 μs ชั่วลบนั้น ผลการจำลองที่ได้จากระยะแกป 10cm และ 15cm ไปทับกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองที่ระยะแกป 15cm และ 20cm ตามลำดับ นั่นคือเกิดความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองเนื่องจากตัวแปร D ในลีดเดอร์โมเดลนี้เป็นค่า 5cm ดังนั้นถ้าแทนค่าระยะแกป D ทั้งหมดในลีดเดอร์โมเดลนี้เป็น D-0.05(m) (0.05 คือระยะที่คลาดเคลื่อน 5cm) ก็น่าจะได้ผลการจำลองที่ถูกต้อง และในกรณีอิมพัลส์ 1.2/50 μs ชั่วบวก พบว่าผลการจำลองที่ได้น่าจะจะมี

ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวแปร D ประมาณ 3cm จึงเปลี่ยนค่าระยะแกป D ทั้งหมดในโมเดลนี้เป็น D=0.03(m) จากนั้นทำการจำลองใหม่และได้ผลการจำลองใหม่ดังรูปที่ 5.21-5.22



รูปที่ 5.21 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

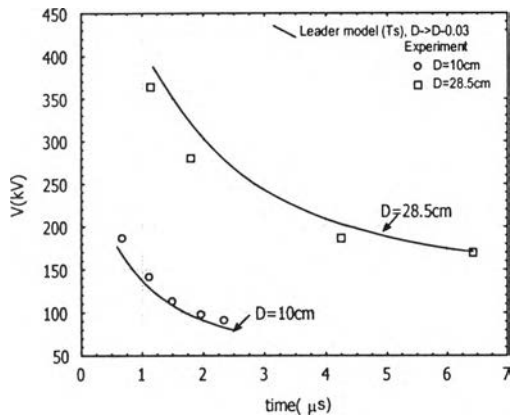


รูปที่ 5.22 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 5/50 μs กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

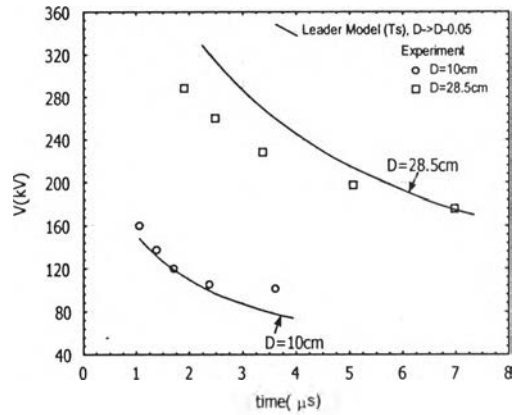
เมื่อปรับตัวแปร D ดังกล่าวข้างต้นแล้ว พบว่าผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิเล็กโตรดแบบ rod-rod กรณีอิมพัลส์ 1.2/50 μs ทั้งข้อบวกและลบ โดยใช้ลีดเดอร์โมเดลที่ปรับปรุงตัวแปร D นี้สามารถใช้จำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้ดีมากในช่วงระยะแกป 10-20cm เท่านั้น ที่ระยะแกปมากกว่า 20cm ขึ้นไปผลการจำลองมีแนวโน้มที่จะสูงเกินจริงออกไปเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และลีดเดอร์โมเดลที่ปรับปรุงตัวแปร D แล้วนี้ยังใช้ได้ดีในกรณีอิมพัลส์ 5/50 μs ข้อลบ ทั้งระยะแกป 10 และ 28.5 cm อีกด้วย

5.2.1.2 กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane

ในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane โมเดลนี้จำลองได้เพียงอิมพัลส์ชั่ววอกเท่านั้น และการเริ่มคำนวณค่าความยาวลีดเดอร์ต้องใช้สมการ T_s แต่ก็ยังทำการจำลองโดยเปลี่ยนค่าระยะแก๊ป D เหมือนกับที่เปลี่ยนในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod และได้ผลการจำลองดังรูปที่ 5.23 ซึ่งให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงมากเช่นกันโดยเฉพาะกับกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ $1.2/50 \mu s$



ก) $1.2/50 \mu s$

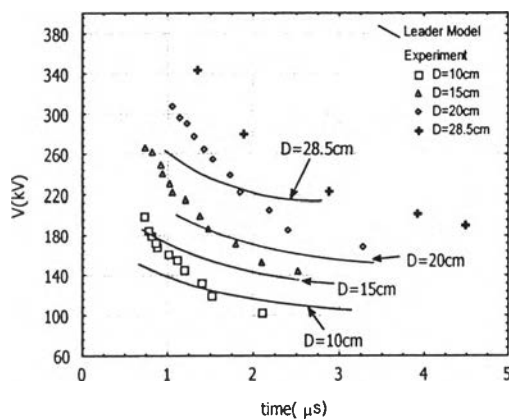


ข) $5/50 \mu s$

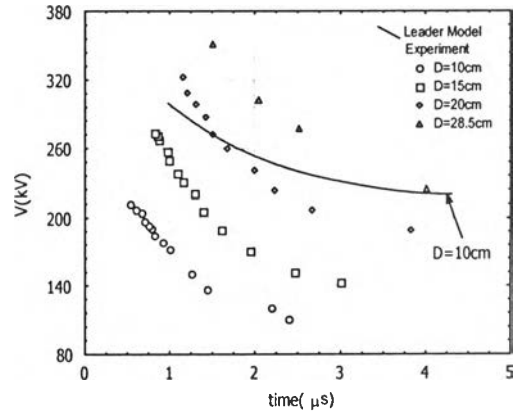
รูปที่ 5.23 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ชั่ววอก กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane

ดังนั้นสรุปได้ว่ากรณีอิมพัลส์ชั่ววอก ให้เปลี่ยนค่าตัวแปร D ในลีดเดอร์โมเดลเป็น $D-0.03$ และกรณีอิมพัลส์ชั่วลบ ให้เปลี่ยนค่าตัวแปร D เป็น $D-0.05$ และในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod ให้เริ่มคำนวณความเร็วลีดเดอร์โดยใช้สมการ V_c แทนการใช้สมการ T_s แต่กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane สามารถใช้สมการ T_s ได้

5.2.2 โมเดลของ Hideki Motoyama



ก) ชั่ววอก



ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.24 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ $1.2/50 \mu s$ กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

จากรูปที่ 5.24 จะเห็นได้ว่า โมเดลนี้ให้ผลคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมากทั้งกรณีอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วคราว และยังมีลักษณะความโค้งที่ไม่เหมือนเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองเลย ในกรณีชั่วคราวยังให้ค่าสูงเกินจริงอย่างมากด้วย ถึงแม้ว่าโมเดลนี้จะนำเสนอสำหรับแรงดันอิมพัลส์ที่มีหลังคลื่นสั้น แต่ก็ควรให้ผลการจำลองในช่วงที่เวลาเบรกดาวนมีค่าต่ำๆตรงกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองจริง เช่น ที่เวลาเบรกดาวนน้อยกว่า $2 \mu\text{s}$ เป็นต้นไป เพราะว่ารูปคลื่นอิมพัลส์ที่ใช้มีเวลาหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s}$ ซึ่งอยู่ในช่วง $1-1.4 \mu\text{s}$ อันเป็นช่วงเวลาหน้าคลื่นที่งานวิจัย [14] ใช้อ้างอิงว่าสามารถใช้โมเดลนี้จำลองการเกิดเบรกดาวนได้ดี จึงสรุปได้ว่าไม่สามารถใช้โมเดลนี้ในการจำลองการเกิดเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบ rod-rod ที่ระยะแกปอยู่ในช่วง $10-28.5 \text{ cm}$ ได้เลย