

บทที่ 2

ทฤษฎีการสวิตช์ตัวเก็บประจุ

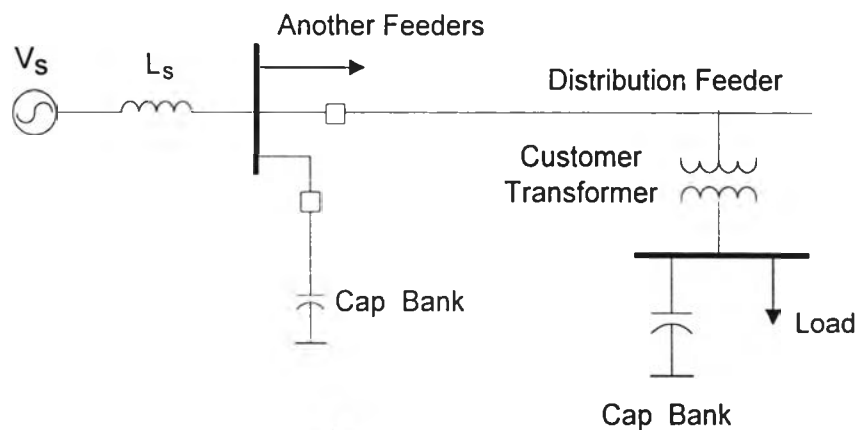
บทนำ

โดยทั่วไปการเกิดแรงดันเกินเนื่องจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้น เป็นผลมาจากคุณสมบัติของ วงจร RLC ซึ่ง มีได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การต่อของชุดตัวเก็บประจุว่าเป็นแบบ แยกเดี่ยวหรือ เป็นแบบหลายชุด (โดยทั่วไปจะพิจารณาเป็นการต่อแบบ Back-to-Back)

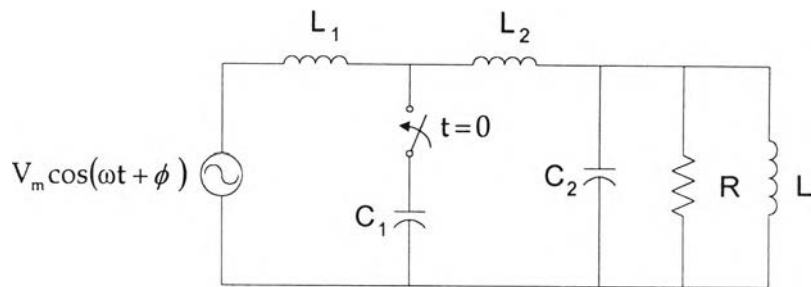
ในบทนี้ จะทำการศึกษาดัง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ และหาสมการที่เป็นสมการพื้นฐานในการอธิบายถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุ โดยจะทำการศึกษากับวงจรสมมูลที่มีความใกล้เคียงกับวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวเนื่องจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุ

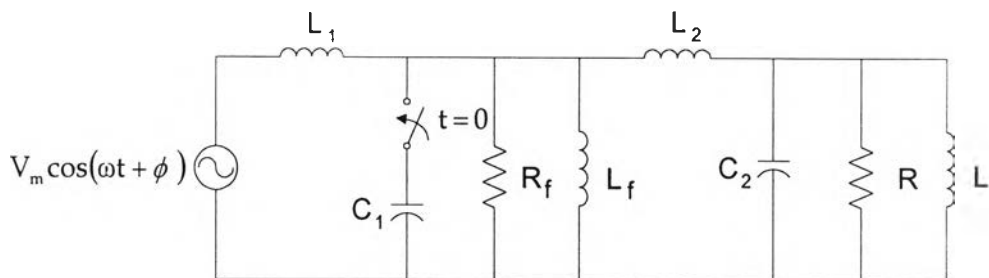
เนื่องจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้ามีความซับซ้อน และมีองค์ประกอบมาก ดังนั้นในบทนี้จะทำการศึกษาในรูปแบบของวงจรอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของวงจร รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพเส้นเดียวของวงจรอย่างง่าย



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของรูปที่ 2.1 เมื่อคิดโหลดของสายป้อน

จากรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 สามารถหาสมการแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ C_1 และ C_2 ได้โดยใช้ Kirchoff's Voltage Law พร้อมกับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

ในการแทนค่าตัวแปรเพื่อแก้สมการ ลักษณะเฉพาะ (2.1) เพื่อหา ฟังก์ชันเต็มเต็มของสมการเชิงอนุพันธ์

$$Am^4 + Bm^3 + Cm^2 + Em + F = 0 \quad (2.1)$$

จะใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้เป็นกรณีทั่วไป

1. $L_1 = 6.78 \text{ mH}$ (ผลรวมความเหนี่ยวนำในวงจรด้านต้นทาง กับความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง 115/24 kV)
2. $L_2 = 78.6 \text{ mH}$ (ผลรวมความเหนี่ยวนำของสายจำหน่าย กับความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง 24 kV / 416 V)
3. $C_1 = 19.89 \text{ } \mu\text{F}$ (3.6 MVar)
4. $C_2 = 0.5968 \text{ } \mu\text{F}$ (300 kVar, 400 V)

5. โหลดของผู้ใช้ขนาด 1300 kVA (3 เฟส) PF = 0.8 จะได้ $R = 1388 \Omega$
และ $L = 5893 \text{ mH}$
6. โหลดของสายป้อนขนาด 15 MVA (3 เฟส) PF = 0.875 จะได้ $R_r = 44 \Omega$ และ
 $L_r = 252 \text{ mH}$
7. $V_m = 1 \text{ V}$ (แรงดันค่ายอด)
8. $\phi = 0^\circ$ (มุมของแรงดันในขณะที่ทำการสวิตช์ตัวเก็บประจุ)

หมายเหตุ ค่าของพารามิเตอร์ อิงแรงดันที่ 24 kV และเป็นค่า ต่อเฟสสาย

2.1.1 การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวจากรูปที่ 2.2

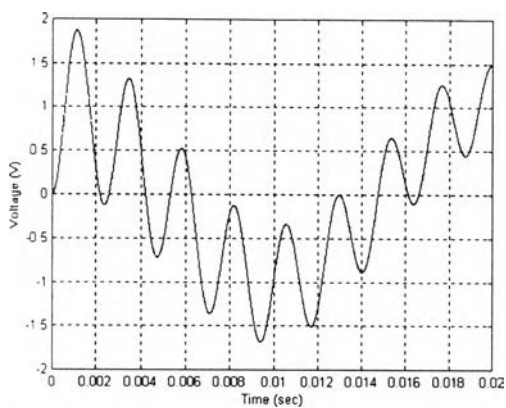
วิธีการหาสมการของแรงดันและ กระแส ของชุดตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ของรูปที่ 2.2 แสดงในภาคผนวก ก. จากสมการที่ได้ (สมการ (2.2) ถึง (2.5)) นำมาแทนค่าที่เวลาต่างๆ เพื่อนำมาแสดงในรูป ของความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดกับเวลา เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จาก โปรแกรม EMTP เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ

$$V_{C2}(t) = k_1 e^{at} \cos(bt) + k_2 e^{at} \sin(bt) + k_3 e^{ct} \cos(dt) + k_4 e^{ct} \sin(dt) + X \cos(\omega t + \phi) + Y \sin(\omega t + \phi) \quad (2.2)$$

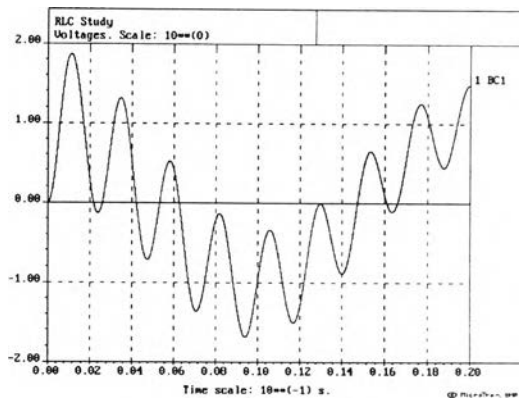
$$V_{C1}(t) = [\dots] \cdot k_1 + [\dots] \cdot k_2 + [\dots] \cdot k_3 + [\dots] \cdot k_4 + [\dots] \cos(\omega t + \phi) + [\dots] \sin(\omega t + \phi) \quad (2.3)$$

$$I_{C2}(t) = [\dots] \cdot k_1 + [\dots] \cdot k_2 + [\dots] \cdot k_3 + [\dots] \cdot k_4 + [\dots] \cos(\omega t + \phi) + [\dots] \sin(\omega t + \phi) \quad (2.4)$$

$$I_{C1}(t) = [\dots] \cdot k_1 + [\dots] \cdot k_2 + [\dots] \cdot k_3 + [\dots] \cdot k_4 + [\dots] \cos(\omega t + \phi) + [\dots] \sin(\omega t + \phi) \quad (2.5)$$

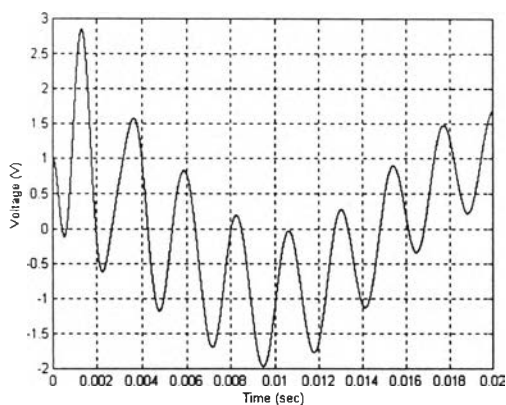


(ก) สมการ (2.3)

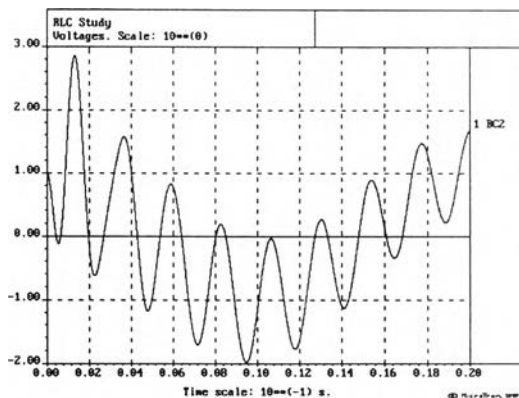


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.4 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

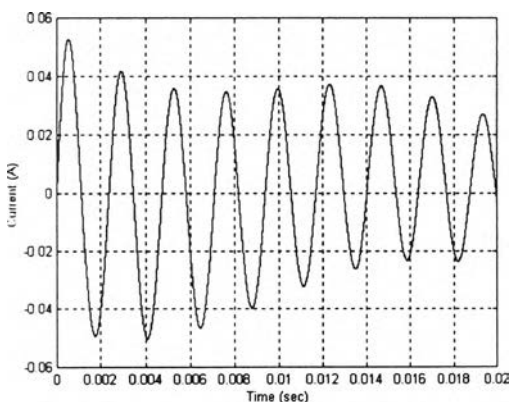


(ก) สมการ (2.2)

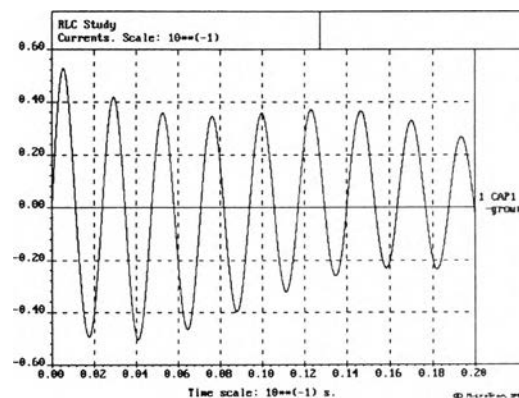


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.5 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

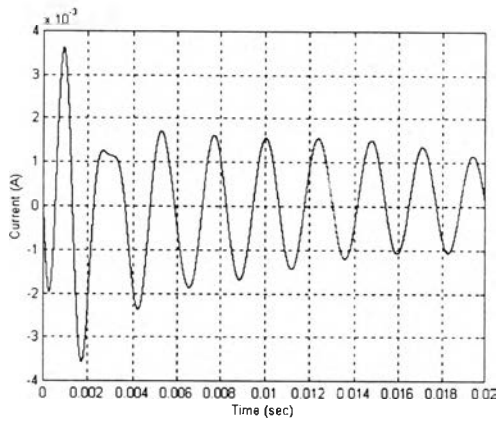


(ก) สมการ (2.5)

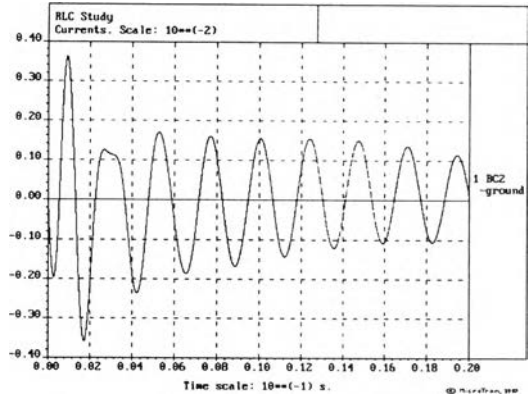


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

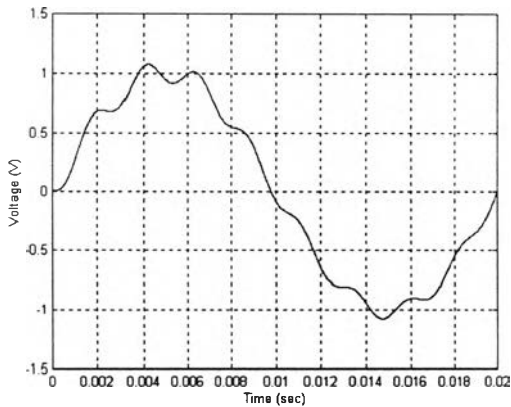


(ก) สมการ (2.4)

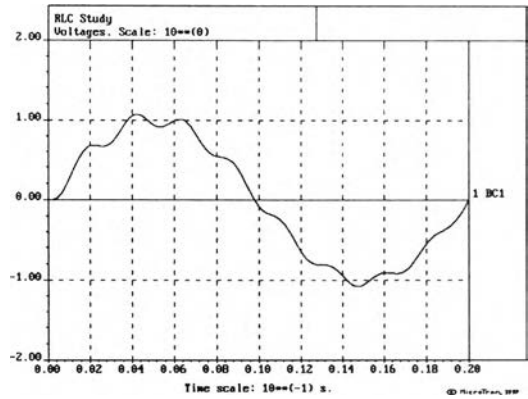


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.7 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

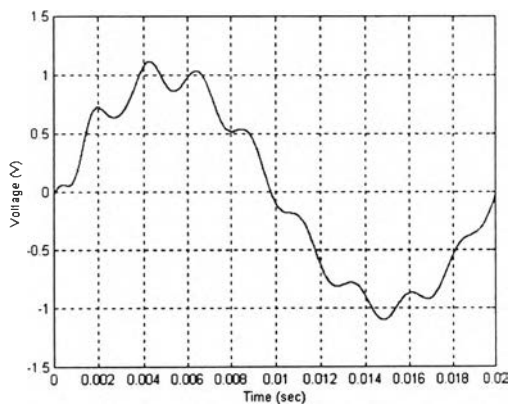


(ก) สมการ (2.3)

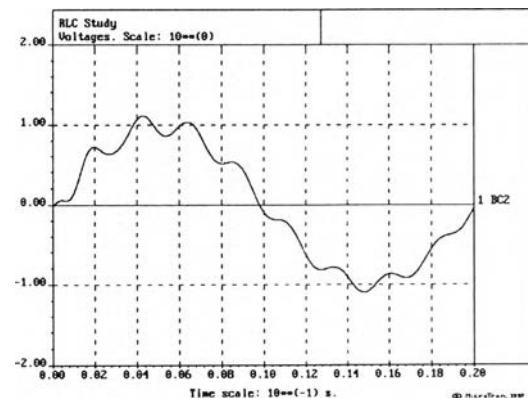


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.8 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$

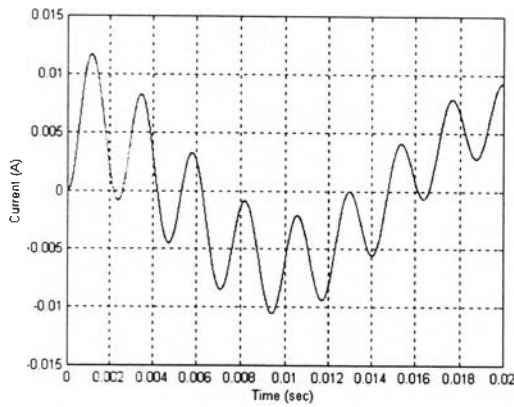


(ก) สมการ (2.2)

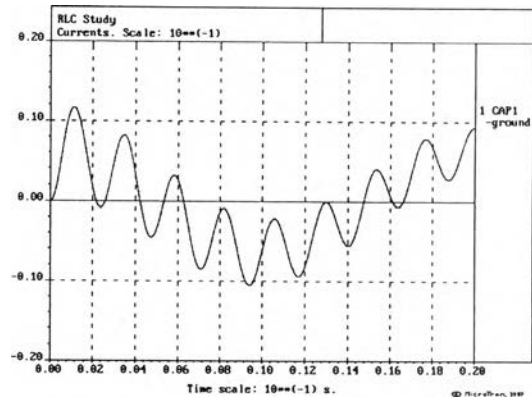


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.9 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$

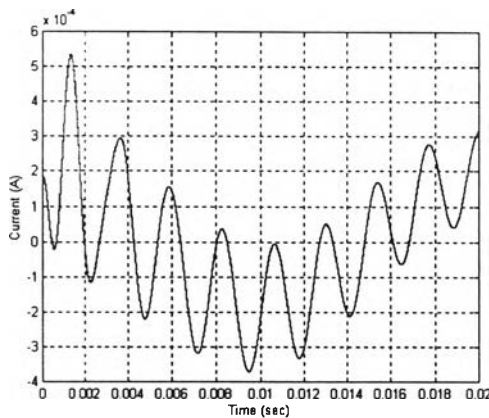


(ก) สมการ (2.5)

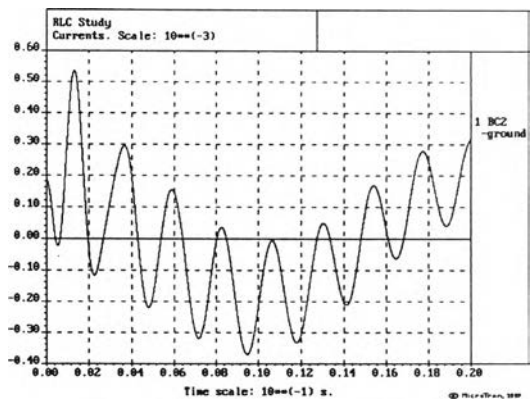


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.10 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$



(ก) สมการ (2.4)



(ข) การจำลองด้วย EMTP

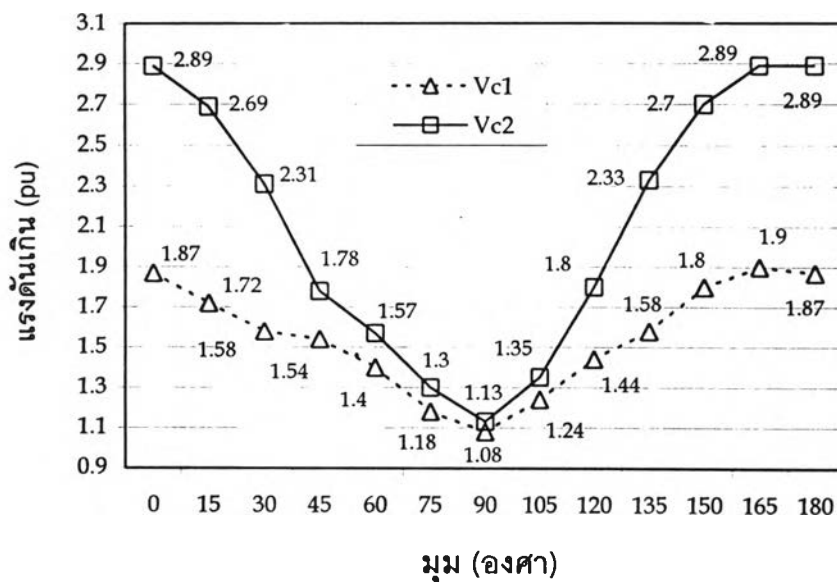
รูปที่ 2.11 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าสูงสุดของแรงดัน และกระแส

$\phi = 0^\circ$	Vc1, max (V)	Vc2, max (V)	Ic1, max (A)	Ic2, max (A)
MatLab	1.87148	2.85851	0.0527117	0.0036233
EMTP	1.87150	2.85856	0.0527122	0.0036233
$\phi = -90^\circ$	Vc1, max (V)	Vc2, max (V)	Ic1, max (A)	Ic2, max (A)
MatLab	1.07525	1.11637	0.0116920	0.0005359
EMTP	1.07524	1.11636	0.0116916	0.0005359

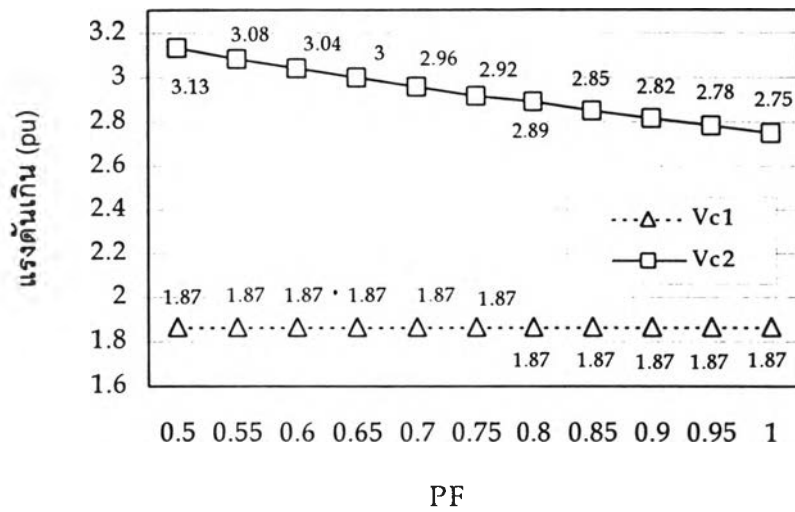
จากผลที่ได้ แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของสมการ สำหรับการพิจารณา พารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเกินชั่วคราว สรุปได้ดังนี้

1. แปรค่ามุมที่ทำการสวิตช์ตัวเก็บประจุ (แปรค่า ϕ) ได้ผลสรุปคือ จะเกิดแรงดันเกินสูงสุดเมื่อทำการสวิตช์ขณะที่แรงดันคร่อม C1 มีค่าสูงสุด และแรงดันเกินจะน้อยที่สุดเมื่อทำการสวิตช์ขณะที่แรงดันคร่อม C1 มีค่าเป็นศูนย์

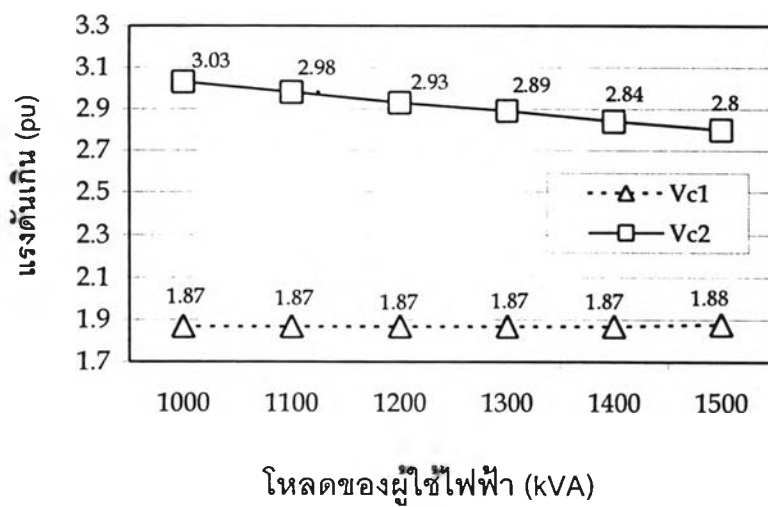


รูปที่ 2.12 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ

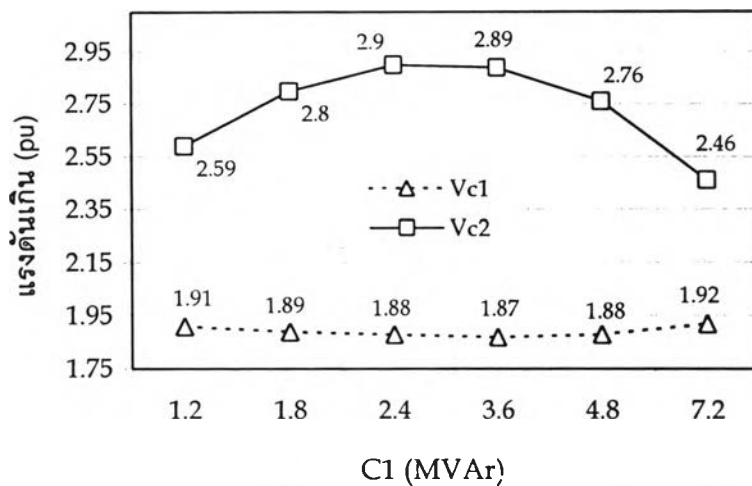
2. แปรค่าโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า ได้ข้อสรุปคือ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นที่ C2 จะลดลงเมื่อ โหลดของผู้ใช้ไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น
3. แปรค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สรุปได้ว่า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าใกล้ 1 มากขึ้นจะทำให้ขนาดของแรงดันเกินที่ C2 มีค่าลดลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า โหลดที่เป็นชนิดความต้านทาน จะลดขนาดของแรงดันเกิน ได้ดีกว่าโหลดชนิดความเหนี่ยวนำ
4. แปรค่าขนาดตัวเก็บประจุ C1 จะพบว่า ขนาดของแรงดันเกินที่ C1 เมื่อ C1 มีค่าน้อย จะมีขนาดไม่มาก และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ C1 มีค่ามากขึ้น จนถึงจุดหนึ่ง ขนาดของแรงดันเกินจะค่อยๆ ลดลง
5. แปรค่าขนาดตัวเก็บประจุ C2 จะได้ผลคล้ายกับในกรณีของ ข้อ 4.



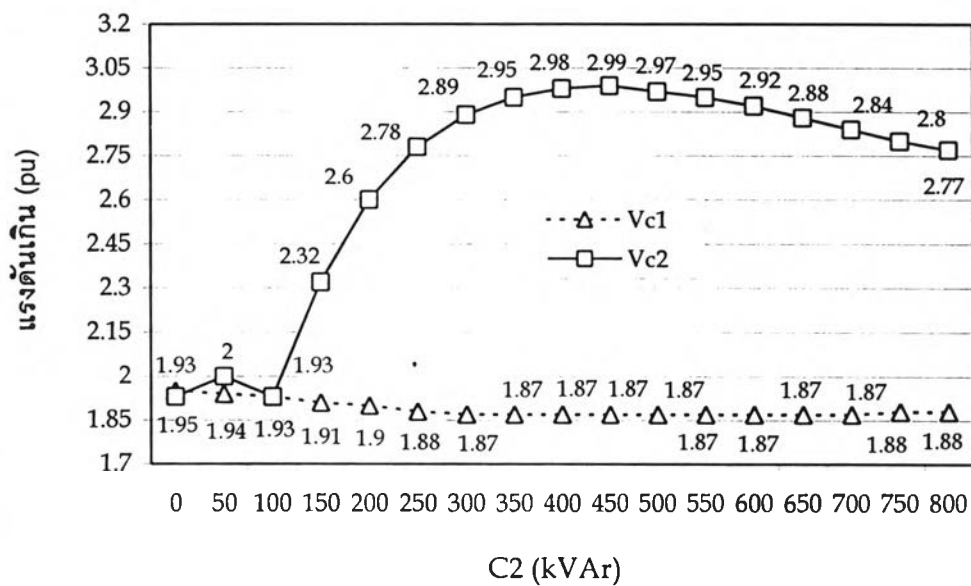
รูปที่ 2.13 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ



รูปที่ 2.14 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ

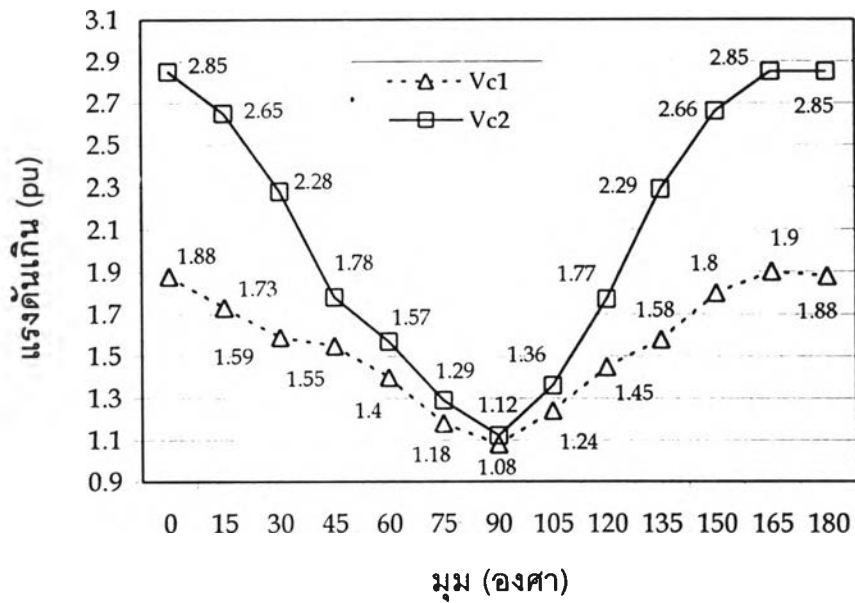


รูปที่ 2.15 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1

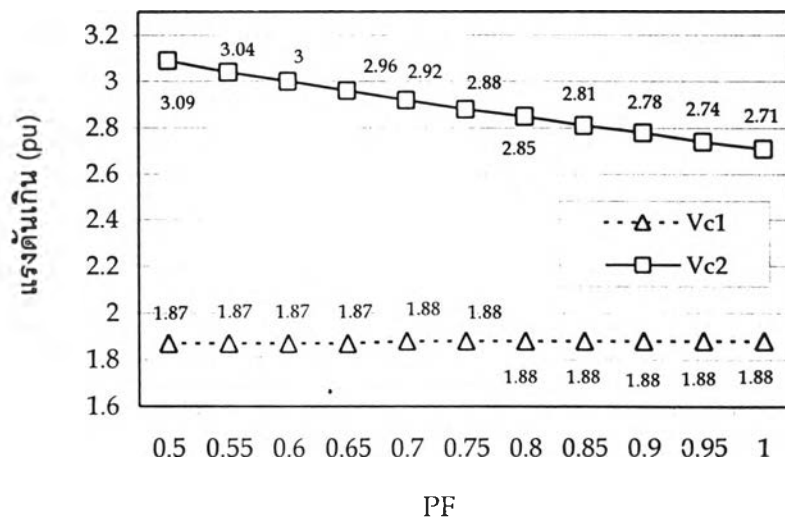


รูปที่ 2.16 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2

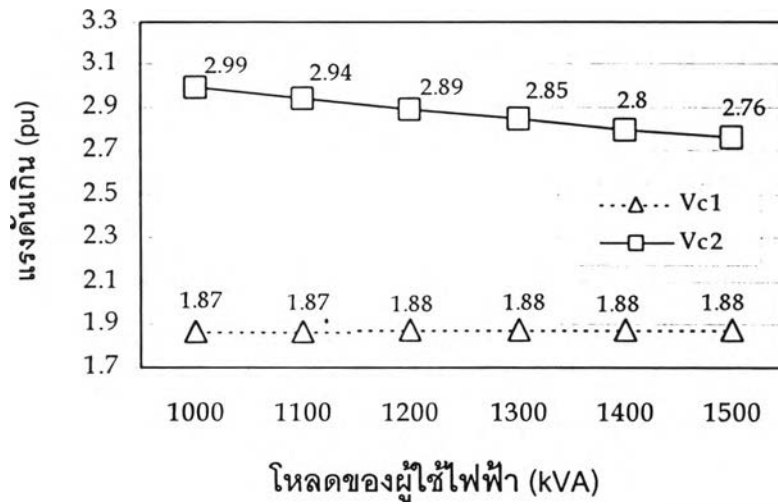
ในการใช้งานจริง ชุดแก้ตัวประกอบกำลังที่ใช้ทางด้านแรงดันต่ำจะมี แรงดันพิกัดอยู่ 2 ระดับ คือ ที่ 400 V และ 415 V ฉะนั้นจึงควรพิจารณาระบบที่ใช้ชุดแก้ตัวประกอบกำลังที่ใช้งานกับระดับแรงดัน 415 V ด้วย ซึ่งจะได้ค่า $C_2 = 0.5545 \mu\text{F}$ (300 kVar, 415 V)



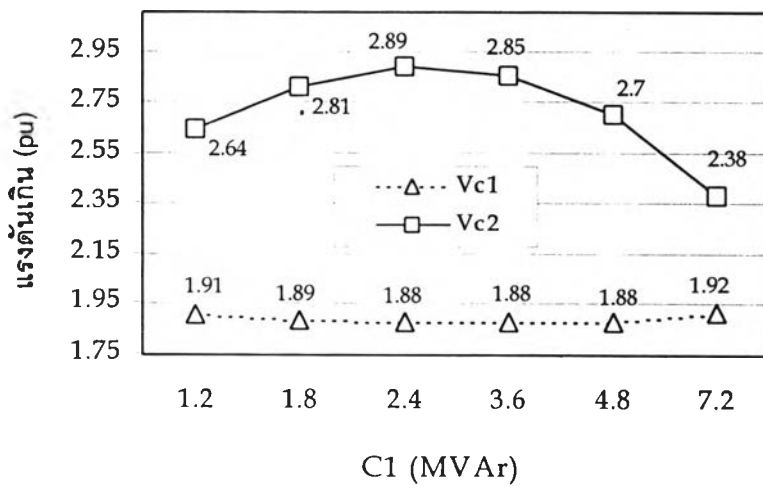
รูปที่ 2.17 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ (C2: 415 V)



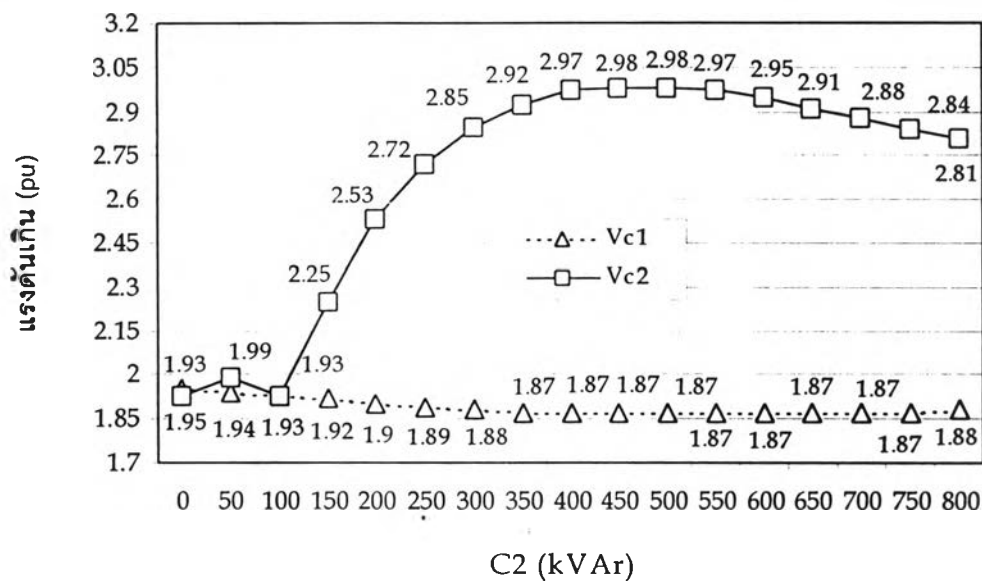
รูปที่ 2.18 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ (C2: 415 V)



รูปที่ 2.19 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ (C2: 415 V)



รูปที่ 2.20 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1 (C2: 415 V)



รูปที่ 2.21 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2 (C2: 415 V)

เมื่อพิจารณาถึงผลที่ได้จะพบว่า แรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นกับชุดแก้ตัวประกอบกำลังที่มีแรงดันพิกัด 415 V มีขนาดน้อยกว่า ที่ระดับแรงดันพิกัด 400 V อยู่เล็กน้อย

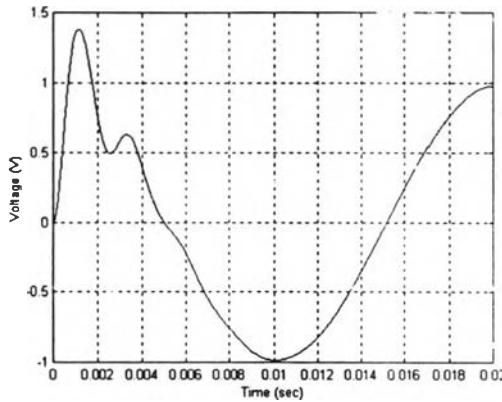
2.1.2 การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวจากรูปที่ 2.3

ทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.1.1 เพียงแต่เพิ่มโหลดของสายป้อนเข้าไปพิจารณาเพิ่มเติม

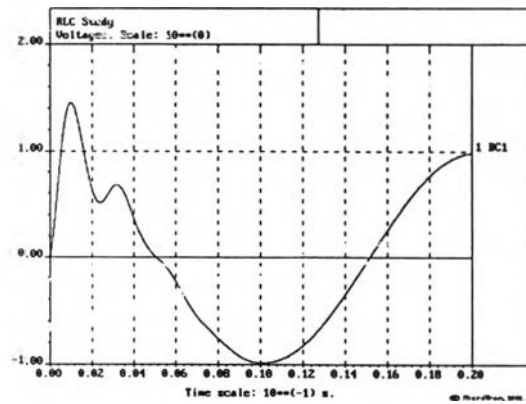
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าสูงสุดของแรงดัน และกระแส

$\phi = 0^\circ$	Vc1, max (V)	Vc2, max (V)	Ic1, max (A)	Ic2, max (A)
Matlab	1.38495	2.19103	0.0396288	0.0029340
EMTP	1.45676	2.20086	0.0389309	0.0026990
$\phi = -90^\circ$	Vc1, max (V)	Vc2, max (V)	Ic1, max (A)	Ic2, max (A)
Matlab	0.93611	0.92788	0.00841	0.00038
EMTP	0.98466	0.97601	0.00884	0.00041

ค่าในตารางที่ 2.2 ใช้ให้เห็นว่าค่าที่ได้จาก Matlab กับ EMTP ไม่ใกล้เคียงกัน เหมือนกับในกรณีของหัวข้อ 2.1.1 นั่นคือในกรณีที่วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้นการจำลองด้วยการแก้สมการอนุพันธ์ดูจะไม่เหมาะสมนัก

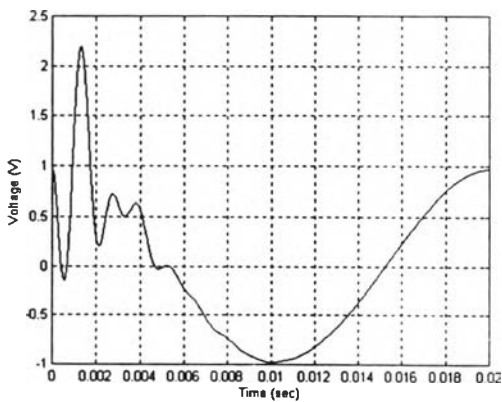


(ก) สมการอนุพันธ์

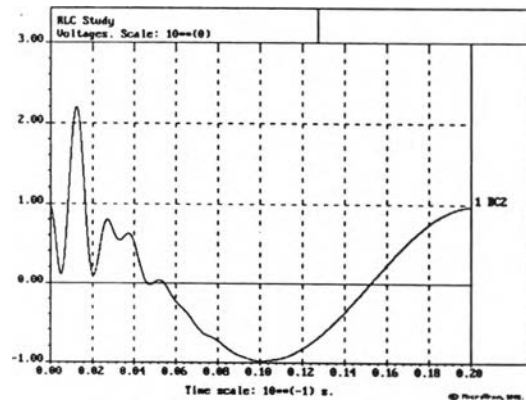


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.22 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

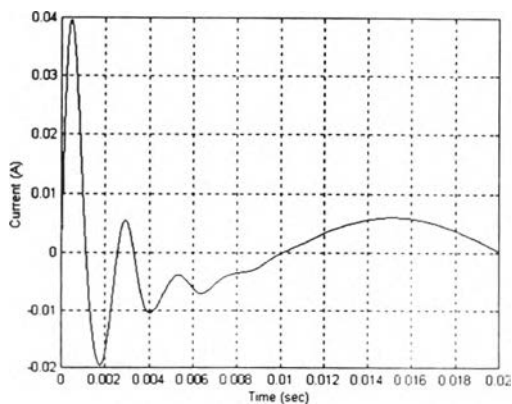


(ก) สมการอนุพันธ์

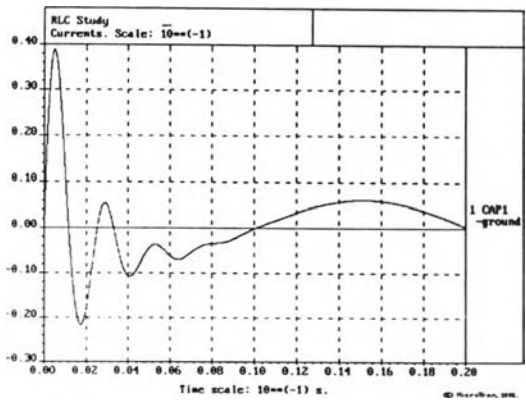


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.23 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

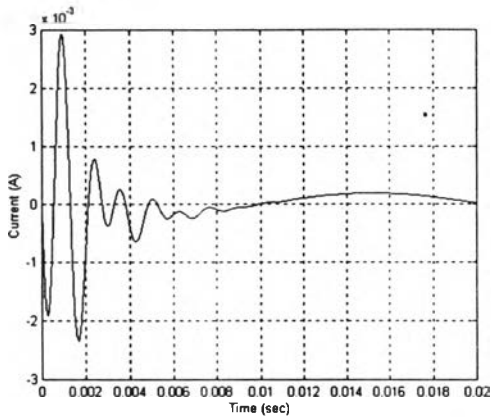


(ก) สมการอนุพันธ์

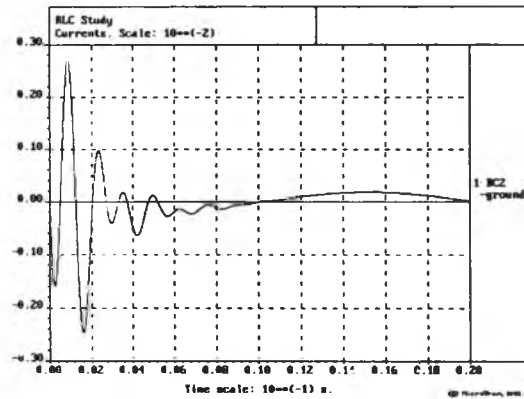


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.24 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

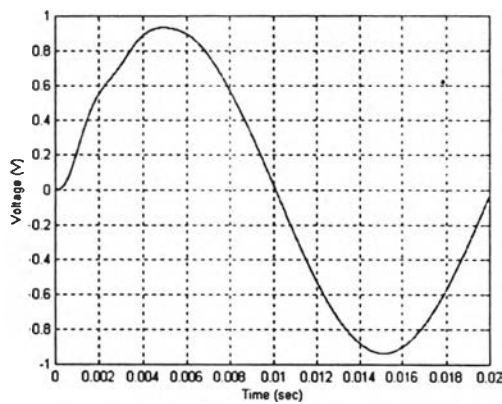


(ก) สมการอนุพันธ์

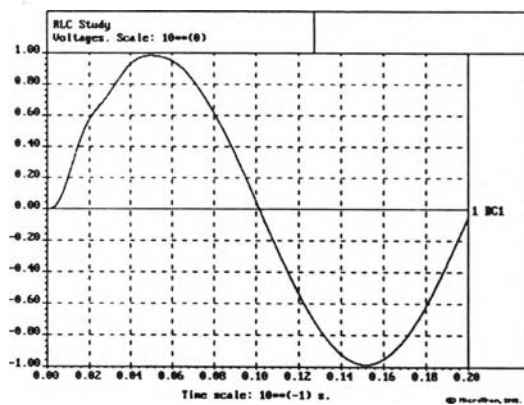


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.25 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$

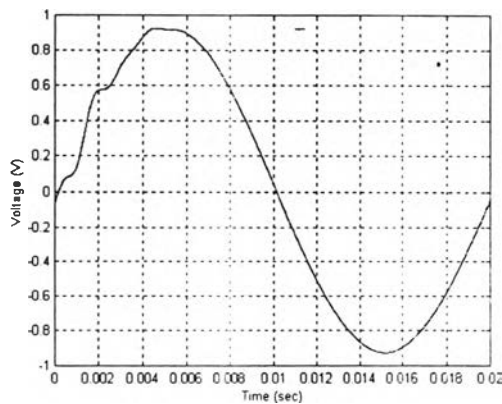


(ก) สมการอนุพันธ์

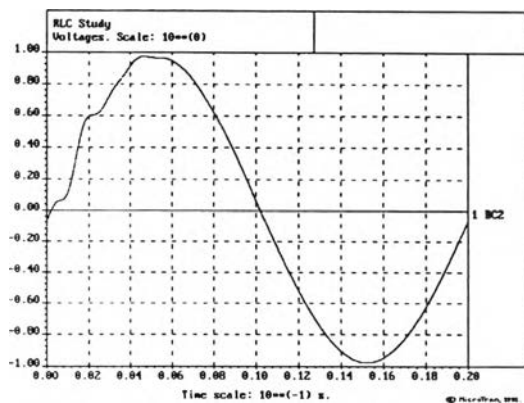


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.26 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$

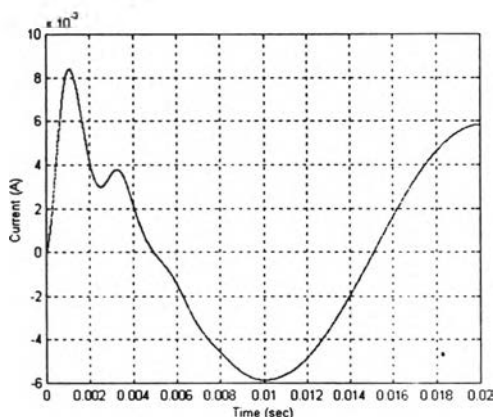


(ก) สมการอนุพันธ์

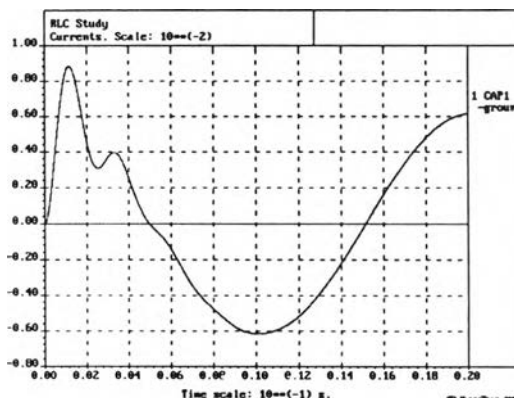


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.27 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$

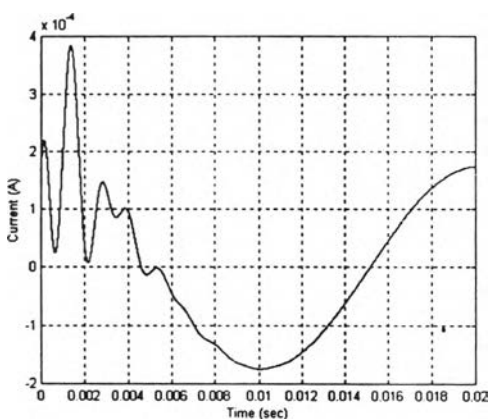


(ก) สมการอนุพันธ์

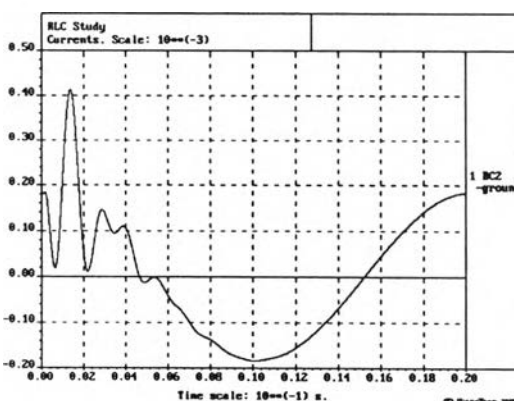


(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.28 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$



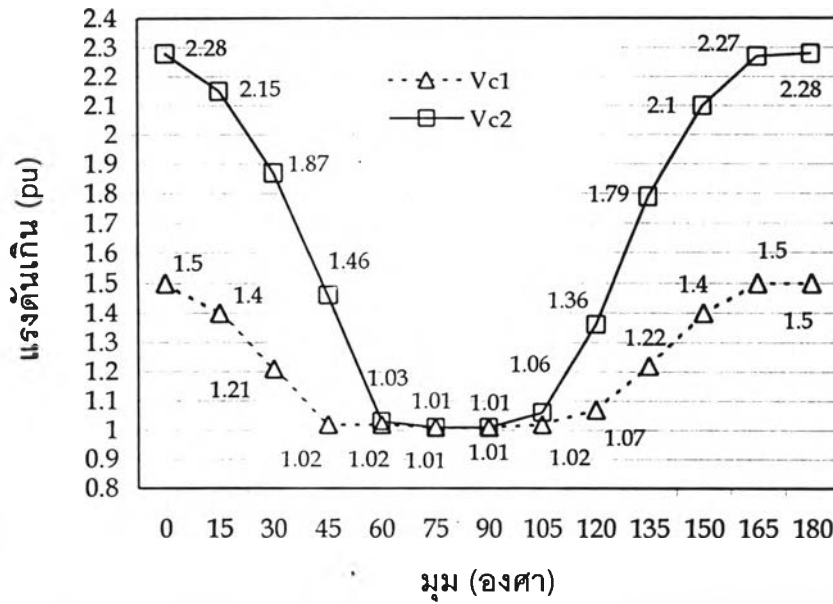
(ก) สมการอนุพันธ์



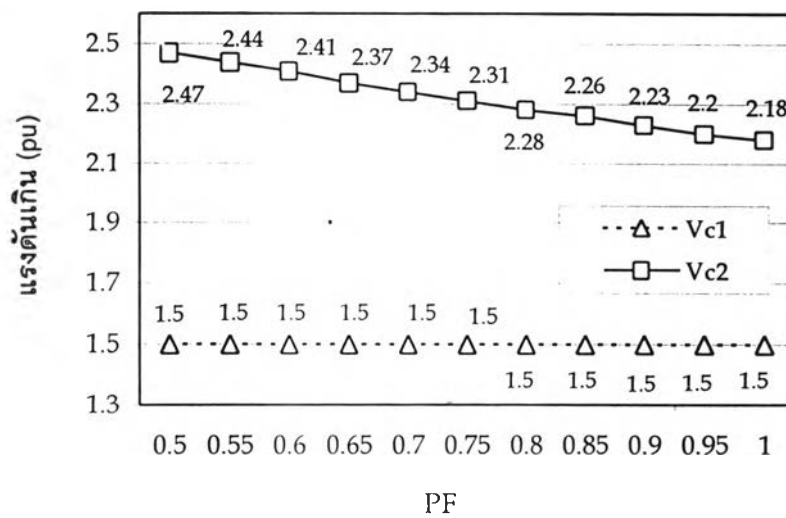
(ข) การจำลองด้วย EMTP

รูปที่ 2.29 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$

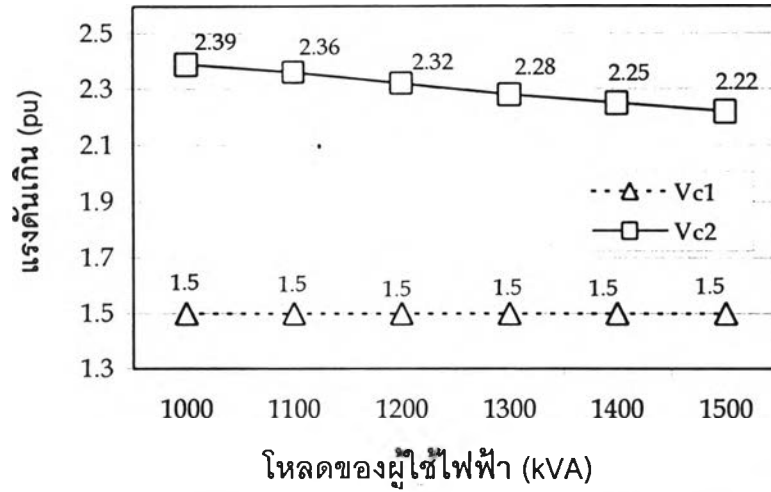
สำหรับผลของพารามิเตอร์ศึกษานั้น แนวโน้มทุกอย่างเหมือนกับในหัวข้อที่แล้ว ต่างกันตรงที่ขนาดของแรงดันเกินในกรณีนี้มีขนาดน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากโหนดของสายป้อน คือทำให้มีส่วนที่จะมาหน่วงแรงดันเกินเพิ่มมากขึ้น และการแปรขนาดโหนดของสายป้อนก็ให้ผลเช่นเดียวกับการแปรขนาดโหนดของผู้ใช้ไฟฟ้าคือ ขนาดของแรงดันเกินจะลดลงเมื่อโหนดของสายป้อนมีขนาดมากขึ้น



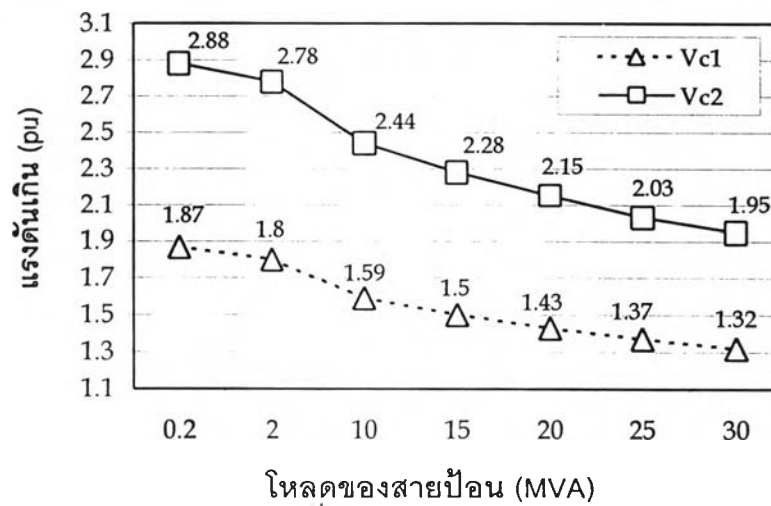
รูปที่ 2.30 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ



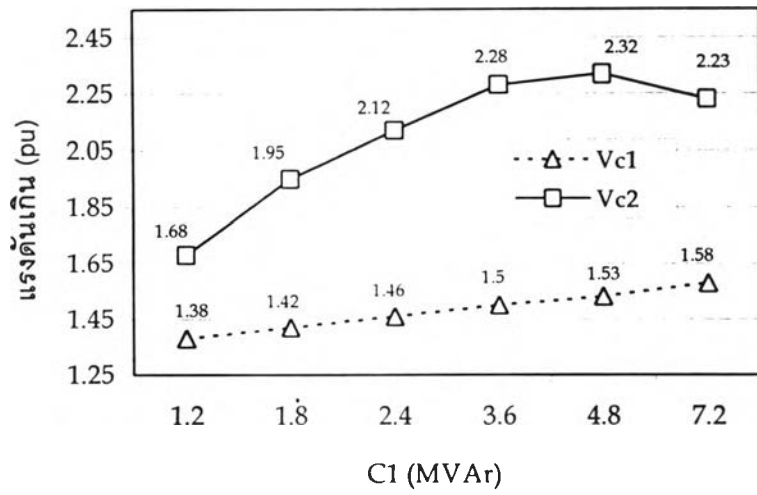
รูปที่ 2.31 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ



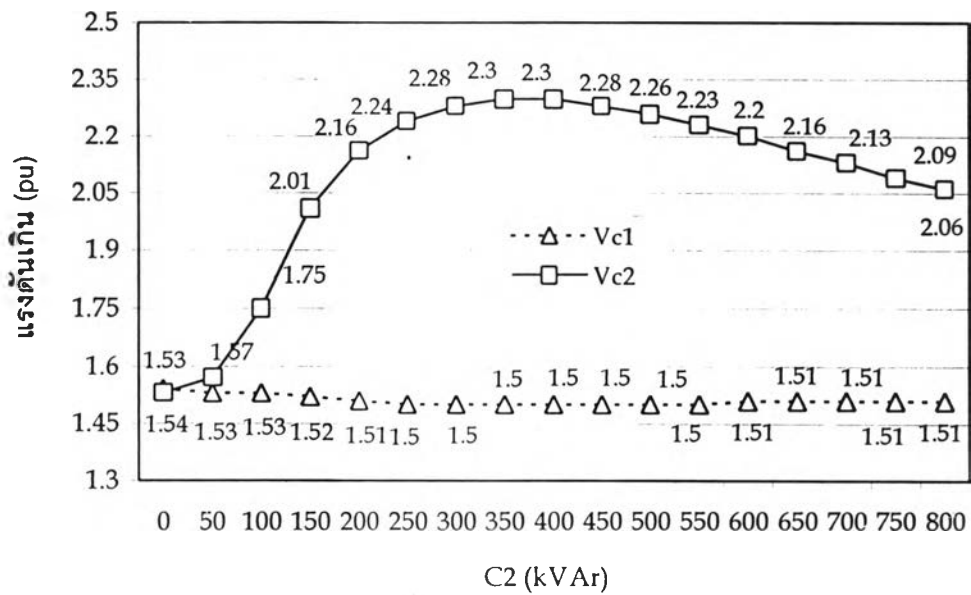
รูปที่ 2.32 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ



รูปที่ 2.33 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดสายป้อนขนาดต่างๆ

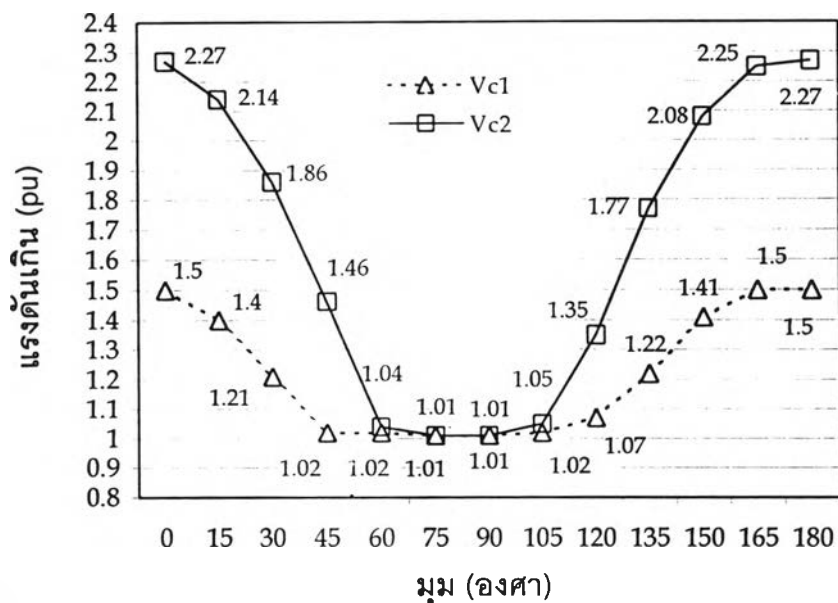


รูปที่ 2.34 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1

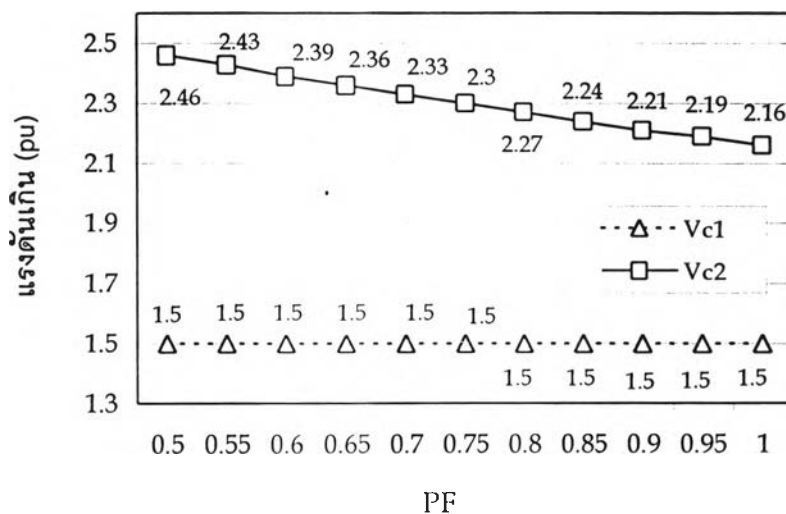


รูปที่ 2.35 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2

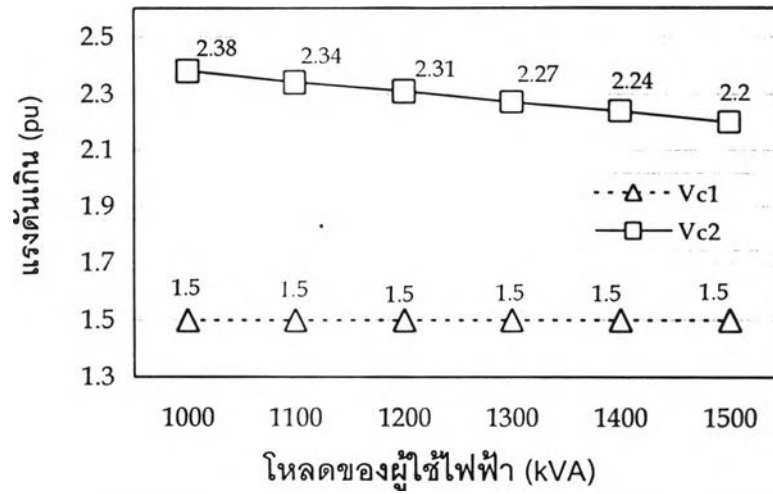
ในกรณีที่แรงดันพิกัดของ C1 เป็น 415 V นั้นได้ผลเหมือนกับที่แรงดันพิกัด 400 V เพียงแต่ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย



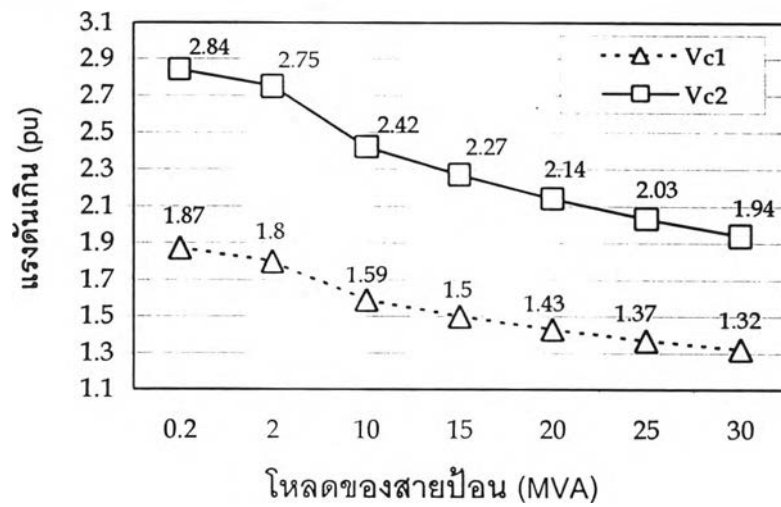
รูปที่ 2.36 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ (C2: 415V)



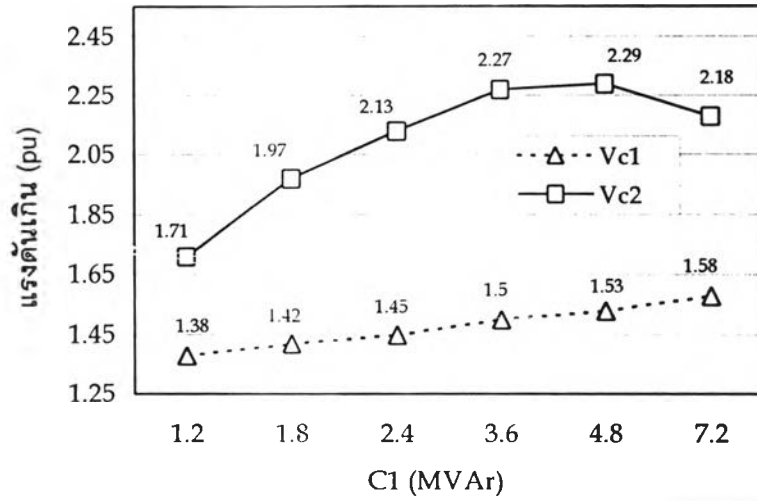
รูปที่ 2.37 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ (C2: 415V)



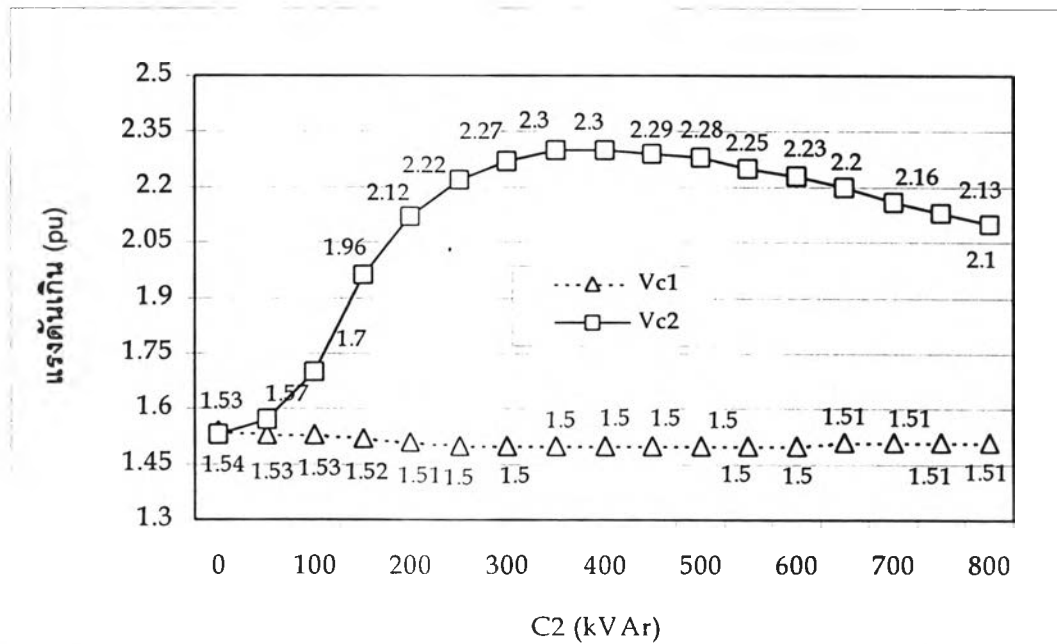
รูปที่ 2.38 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ (C2: 415V)



รูปที่ 2.39 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดสายป้อนขนาดต่างๆ (C2: 415V)



รูปที่ 2.40 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1 (C2: 415V)



รูปที่ 2.41 แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1 (C2: 415V)