หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

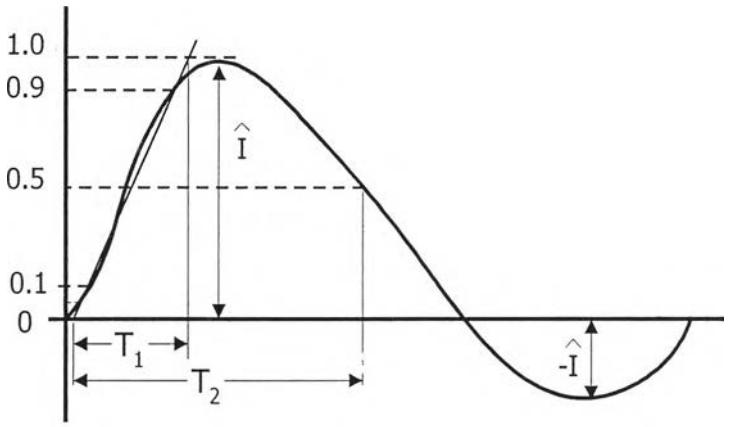
บทที่ 2

หลักการสร้างกระแสอิมพัลส์

หลักการสร้างกระแสอิมพัลส์จะเริ่มจากการศึกษามาตรฐานรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า หรือกระแสอิมพัลส์ การสร้างกระแสอิมพัลส์ และการคำนวณแบบนอมัลไลซ์ของวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์

2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

ลักษณะสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระแสอิมพัลส์ คือลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 [3] ได้กำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานขึ้น โดยพยายามเลียนแบบรูปคลื่นให้ใกล้เคียงมากที่สุดกับที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC

ในการทดสอบกับดักเสิร์จ ลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่พิจารณามีดังนี้

1) เวลาหน้าคลื่น (Front time, T_1 หรือ T_f) จะคำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% จนถึง 90% ของค่ายอด เมื่อจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์ (O_1) คือจุดตัดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่ด้านหน้าคลื่น

2) เวลาหลังคลื่น (Tail time, T_2 หรือ T_t) ให้คำนวณจากเวลาจากจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์ จนถึงเวลาที่กระแสอิมพัลส์ลดค่าลงสู่ค่า 50% ของค่ายอดเป็นครั้งแรก

3) ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม (Peak value of opposite polarity of an impulse, $-\hat{I}$)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากมาตรฐานการทดสอบกับดักเสิร์จได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 2.1 [1]

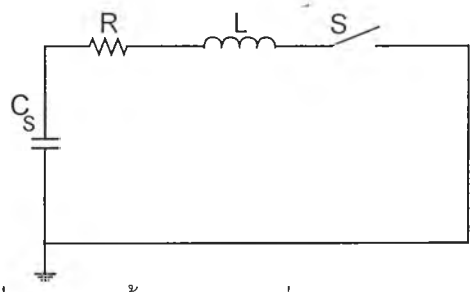
ตารางที่ 2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ยอมรับได้

ลักษณะของกระแสอิมพัลส์	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	
	4/10 μs	8/20 μs
1.เวลาหน้าคลื่น T_f (μs)	3.5-4.5	7-9
2.เวลาหลังคลื่น T_t (μs)	9-11	18-22
3.ค่ายอด $\hat{I}$ (%)	90-110 ของ $\hat{I}$	90-110 ของ $\hat{I}$
4.ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม - $\hat{I}$ (%)	ไม่เกิน 20% ของ $\hat{I}$	ไม่เกิน 20% ของ $\hat{I}$

2.2 การสร้างกระแสอิมพัลส์

การสร้างกระแสอิมพัลส์ขนาดสูงจะอาศัยการเก็บพลังงานไว้ถึงระดับที่ต้องการ แล้วคายพลังงานที่เก็บไว้ออกมาอย่างเร็ว การเก็บพลังงานดังกล่าวโดยทั่วไปจะใช้ตัวเก็บประจุ เนื่องจากตัวเก็บประจุมีความสะดวกในการอัดประจุคือใช้ไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบป้อนผ่านวงจรเร็กติไฟเออร์แปลงเป็นไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ ที่สามารถเก็บพลังงานได้เป็นเวลานาน ทำให้สะดวกในการอัดประจุจนได้พลังงานที่ต้องการ

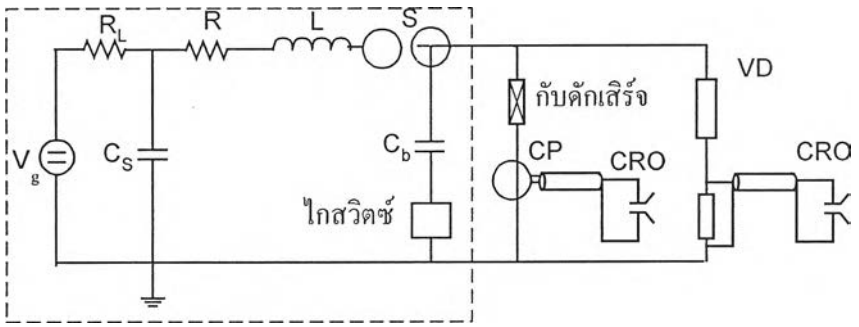
วงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์เป็นลักษณะของวงจรทรานเซียนต์แบบหน่วง ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_S ตัวเหนี่ยวนำ L และความต้านทาน R ดังวงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.2 [4]



รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

ในทางปฏิบัติการสร้างกระแสอิมพัลส์จะอาศัยวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรง V_g เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_S ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุหลายตัวต่อขนานกัน เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตซ์ และผ่านตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_b เกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S ทำให้เกิดการคายประจุของตัวเก็บประจุไปยัง

วัสดุทดสอบผ่านความต้านทาน R ที่มีความเหนี่ยวนำ L เกิดเป็นรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ในส่วนของวงจรวัดประกอบด้วยตัวแบ่งแรงดัน (Voltage divider, VD) ใช้วัดแรงดัน และ โพรบวัดกระแส (Current probe, CP) ใช้วัดกระแสอิมพัลส์ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์พร้อมอุปกรณ์วัด

ความหมายในวงจร

V_g = แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงใช้ป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์

R_L = ตัวต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

C_S = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

R = ความต้านทานปรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

L = ความเหนี่ยวนำปรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

S = สปาร์กแกปทำหน้าที่เป็นสวิตซ์

C_b = ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวของไกสวิตซ์

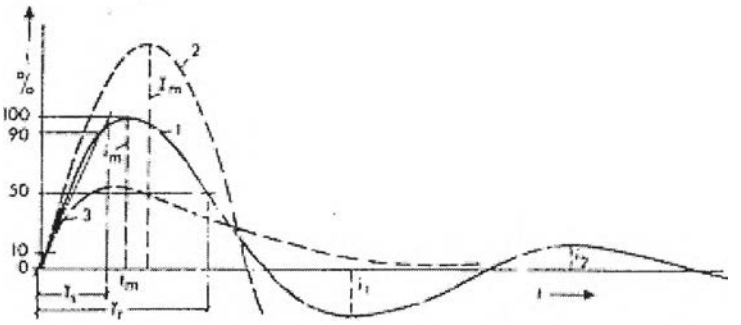
CP = โพรบวัดกระแส

VD = ตัวแบ่งแรงดัน

CRO= ออสซิลโลสโคป

2.3 การคำนวณองค์ประกอบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ด้วยวิธีนอมัลไลซ์

การคำนวณองค์ประกอบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ด้วยวิธีนอมัลไลซ์ [5] จะอาศัยตัวแปรหลักของกระแสอิมพัลส์ ที่แสดงให้เห็นรูปแบบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ทั้งที่เป็นรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบหน่วงเป็นคาบ (Damping period) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบหน่วงไม่เป็นคาบ (Aperiodic range) และรูปคลื่นกระแสแบบไม่หน่วงดังในรูปที่ 2.4



(1) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบหน่วงเป็นคาบ

(2) รูปคลื่นกระแสแบบไม่หน่วง

(3) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบหน่วงไม่เป็นคาบ

รูปที่ 2.4 รูปแบบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงวิเคราะห์ กับตัวแปรเชิงเทคนิคของกระแสอิมพัลส์ที่กำหนดให้ได้แก่ เวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่น รวมทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบวงจรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาด และคาบของสัญญาณ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์เพื่อให้ได้กระแสอิมพัลส์รูปคลื่นต่างๆกันได้

วงจรอย่างง่ายดังรูปที่ 2.2 เป็นวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ที่ต่อวงจรเป็นแบบอนุกรม R, L และ C โดยมีสมการที่ใช้วิเคราะห์การเกิดกระแสอิมพัลส์ จากความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเชิงเทคนิค กับลักษณะสมบัติเชิงวิเคราะห์ของกระแสอิมพัลส์ ความสัมพันธ์นี้เป็นความสัมพันธ์พื้นฐานที่หาได้ด้วยวิธีการนอมัลไลซ์

2.3.1 วิธีการนอมัลไลซ์

การหาค่านอมัลไลซ์สมการกระแสอิมพัลส์ และเทอมต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง เช่น ค่ากระแส เวลา ความหน่วง และอื่นๆดังตารางที่ 2.2 โดยค่าเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติเชิงเทคนิคของวงจร

ตารางที่ 2.2 ค่านอมัลไลซ์ของสมการกระแสอิมพัลส์ [5]

Designation	Definition
a) Normalized damping	$R_r = R/R_{ap}$ (1)
- Damping resistance for aperiodic critical oscillation	$R_{ap} = 2Z$ (2)
- Circuit impedance	$Z = (L / C)^{1/2}$ (3)
b) Normalized current	$i_n = I/I_m$ (4)
- Amplitude of the nondamped current oscillation	$I_m = V/Z$ (5)
c) Normalized time	$t_n = t/T$ (6)
- Time constant	$T = (LC)^{1/2}$ (7)
d) Normalized maximum power	$\hat{P}_n = \hat{P}/P_k$ (8)
- Maximum power	$\hat{P} = i_m^2 R$ (9)
- Characteristic power	$P_k = V^2/Z$ (10)
e) Normalized voltage drop across resistor	$V_{Rm} = V_R/V$ (11)
- Voltage drop across resistor	$V_R = i_m R$ (12)
f) Relative current overshoot	$i_{lr} = i_1/i_m$ (13)

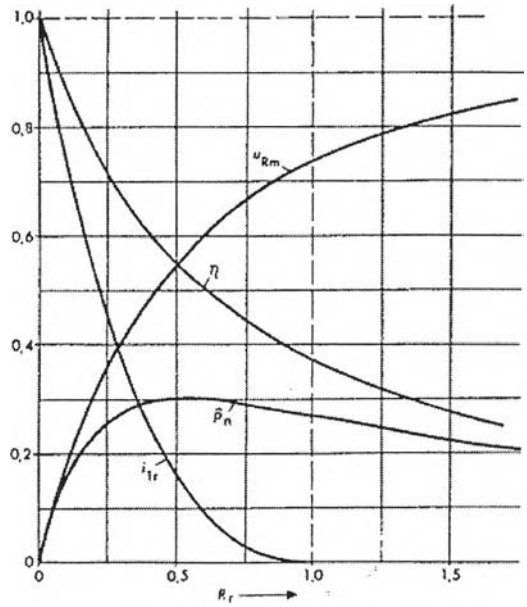
รูปแบบของสมการกระแสจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของการหน่วง จากผลของความสัมพันธ์นี้เราจะได้ตัวแปรเชิงวิเคราะห์คือค่านอมัลไลซ์ความหน่วง ดังสมการที่ (1) โดยกระแสอิมพัลส์จะอยู่ในช่วงที่หน่วงแบบเป็นคาบเมื่อ $0 < R_r < 1$ ช่วงที่หน่วงแบบไม่เป็นคาบ เมื่อ $R_r > 1$ และจุดเริ่มเกิดการหน่วงแบบไม่เป็นคาบที่ $R_r = 1$ และวงจรนี้จะไม่มีการลดทอนเลย (ไม่เกิดความหน่วงเลย) เมื่อ $R_r = 0$ ดังนั้นค่านอมัลไลซ์ความหน่วง R_r เป็นตัวแปรอิสระที่เป็นประโยชน์ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรกระแสอิมพัลส์ ทั้งในช่วงที่เป็นคาบและไม่เป็นคาบ ลักษณะสมบัติอื่นๆ ของกระแสอิมพัลส์เช่นประสิทธิภาพ (η) กำลังไฟฟ้า (P_n) แรงดันคร่อมตัวต้านทาน (V_R) และค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม (i_{lr}) ล้วนเป็นฟังก์ชั่นของค่านอมัลไลซ์ความหน่วง ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 โดยสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ได้ตามกราฟรูปที่ 2.5 [5] ในช่วงตั้งแต่การกำเนิดอย่างเป็นคาบจนถึงการกำเนิดอย่างไม่เป็นคาบ

ตารางที่ 2.3 สมการนอมัลไลซ์ [5]

Quantity	Oscillation range	
	Damped period (0<Rr<1)	Aperiodic (Rr>1)
Damping factor	$\delta = R/2L$ (14)	
Damping criterion	$\delta^2 < 1/LC$	$\delta^2 > 1/LC$
Current course	$i = I_1 e^{-\delta t} \sin\omega t$ (15)	$i = 2I_2 e^{-\delta t} \sinh(t\sqrt{\delta^2 - \frac{1}{LC}})$ (16)
Current constant	$I_1 = \frac{V}{\omega L}$ (17)	$I_1 = \frac{V}{\sqrt{R - 4\frac{L}{C}}}$ (18)
Circuit frequency	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$ (19)	
Peak time	$t_m = \frac{1}{\omega}\arctan\frac{\omega}{\delta}$ (20)	$t_m = \frac{\ln(\sqrt{LC\delta^2 - 1} + \delta\sqrt{LC}}{\sqrt{\delta^2 - \frac{1}{LC}}}$ (21)

ตารางที่ 2.4 สมการนอมัลไลซ์จากการวิเคราะห์ [5]

Current course	$i_n = \frac{e^{-R_r t_n}}{\sqrt{1-R_r^2}} \sin(t_n\sqrt{1-R_r^2})$ (22)	$i_n = \frac{e^{-R_r t_n}}{\sqrt{R_r^2 - 1}} \sinh(t_n\sqrt{R_r^2 - 1})$ (23)
Peak time	$t_{mn} = \frac{\arctan\sqrt{(1-R_r^2)/R_r^2}}{\sqrt{1-R_r^2}}$ (24)	$t_{mn} = \frac{\ln(R_r + \sqrt{R_r^2 - 1}}{\sqrt{R_r^2 - 1}}$ (25)
Efficiency	$\eta = \exp(-\frac{R_r}{\sqrt{1-R_r^2}}\arcsin\sqrt{1-R_r^2})$ (26)	$\eta = (R_r + \sqrt{R_r^2 - 1})^{-R_r/\sqrt{R_r^2-1}}$ (27)
Power	$\hat{P}_n = 2R_r.\exp(-\frac{2R_r}{\sqrt{1-R_r^2}}\arcsin\sqrt{1-R_r^2})$ (28)	$\hat{P}_n = 2R_r.\exp(-\frac{2R_r}{\sqrt{1-R_r^2}}\arcsin\sqrt{1-R_r^2})$ (29)
Relative overshoot	$i_{lr} = \exp(-\frac{\pi R_r}{\sqrt{1-R_r^2}})$ (30)	



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η), กำลังไฟฟ้า (P_n), แรงดันคร่อมตัวต้านทาน (V_{RM}) และค่ากระแสขั้วตรงข้าม (i_{1r}) กับนอมัลไลซ์ความหน่วง (R_r)

ค่ากระแสขั้วตรงข้ามจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความหน่วงเพิ่มขึ้น นั่นคือค่านอมัลไลซ์ความหน่วง $R_r = 1$ เป็นจุดวิกฤตที่เริ่มเกิดสัญญาณไม่เป็นคาบ ซึ่งให้ผลไม่ค่อยดี เพราะว่าจุดนี้มีประสิทธิภาพเพียง 36.8 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือสัญญาณที่เกิดแบบไม่เป็นคาบจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าสัญญาณที่เกิดแบบเป็นคาบ

ถ้ารู้ประสิทธิภาพ สามารถคำนวณหากระแสค่ายอด จากแรงดันที่ป้อนสัมพันธ์กับสมการที่ 5 จะได้ [4]

$$i_m = \frac{\eta V}{Z} \qquad (2.1)$$

โดยที่ $\eta = \frac{i_m}{I_m}$ = ประสิทธิภาพ

Z = อิมพิแดนซ์ของวงจร

i_m = ค่ายอดกระแสกรณีมีการหน่วง

I_m = ค่ายอดกระแสกรณีไม่มีการหน่วง

2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเชิงเทคนิคกับลักษณะสมบัติเชิงวิเคราะห์

การออกแบบวงจรกระแสอิมพัลส์เพื่อให้ได้ค่ากระแส รวมทั้งตัวแปรเชิงเทคนิคได้แก่เวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นตามต้องการ จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเชิงเทคนิคกับลักษณะสมบัติเชิงวิเคราะห์ของกระแสอิมพัลส์ ได้แก่ค่านอมัลไลซ์ความหน่วง และ ค่าคงตัว

ทางเวลาของวงจร $T = \sqrt{LC}$ ความสัมพันธ์ที่แสดงนี้เป็นค่าความสัมพันธ์แบบนอมัลไลซ์ ดังรูปที่ 2.4 เมื่อกำหนดให้

t_{1n} คือ เวลาที่ขนาดของกระแสมีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสสูงสุด

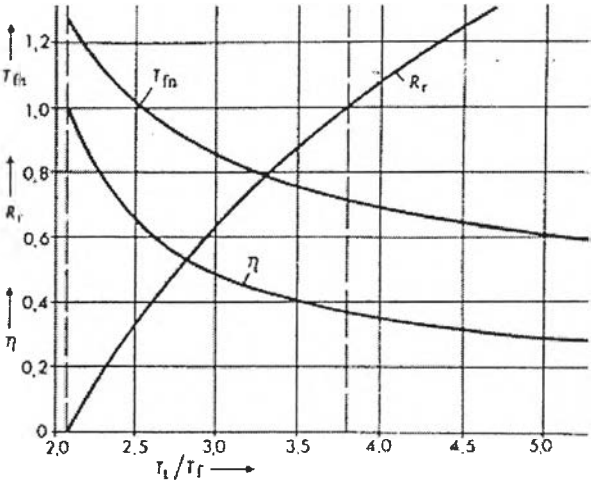
t_{2n} คือ เวลาที่ขนาดของกระแสมีค่าเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสสูงสุด

t_{3n} คือ เวลาที่ขนาดของกระแสมีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสสูงสุด

นอมัลไลซ์ความหน่วงที่เปลี่ยนแปลงในช่วง ΔR_r เท่ากับ 0.05 เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับนอมัลไลซ์ของเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$T_{fn} = T_f/T = 1.25(t_{2n} - t_{1n}) \quad (2.2)$$

$$T_{tn} = T_t/T = t_{3n} + 0.125(t_{2n} - 9\,t_{1n}) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η), นอมัลไลซ์ความหน่วง (R_r), นอมัลไลซ์เวลาหน้าคลื่น (T_{fn}) กับอัตราส่วนเวลา (T_f / T_t)

การคำนวณในทางปฏิบัติโดยทั่วไปต้องกำหนดค่า T_t และ T_f ขึ้นมาก่อน จากกราฟรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลักเทียบกับค่าอัตราส่วนเวลา T_t / T_f ทำให้รู้ค่าประสิทธิภาพ (η) นอมัลไลซ์ความหน่วง (R_r) และ นอมัลไลซ์เวลาหน้าคลื่น (T_{fn}) และจากค่านอมัลไลซ์ความหน่วง (R_r) ก็จะรู้กำลังไฟฟ้า (P_n), แรงดันคร่อมตัวต้านทาน (V_{RM}) และค่ากระแสขั้วตรงข้าม (i_{lr}) ดังกราฟรูปที่ 2.5

2.3.3 การคำนวณองค์ประกอบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์

การออกแบบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์เริ่มต้นจากข้อมูลที่กำหนดของกระแสอิมพัลส์ คือ T_f , T_t , i_m จากนั้นเลือกตัวแปรอื่นได้แก่ แรงดันอัดประจุ ค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ

จากค่าตัวแปรหลักที่ต้องการได้แก่ T_f , T_t และ i_m จะได้ค่า T_t / T_f ทำให้สามารถหาค่า T_{fn} , R_r , η ได้จากกราฟรูปที่ 2.6 แต่ก่อนที่จะคำนวณต่อควรตรวจสอบค่าโอเวอร์ชูตสัมพัทธ์ว่าอยู่ในช่วงที่เรายินยอมหรือไม่ โดยดูกราฟรูปที่ 2.5 ขั้นต่อไปก็สามารถหาค่าคงตัวทางเวลา $T= T_f / T_{fn}$ และ อิมพิแดนซ์ของวงจรจากสมการ $Z = \eta V / i_m$ จากตัวแปรทั้ง 2 คือ T และ Z ก็สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้จากตารางที่ 2.2 สมการ (3) และ (7) ซึ่งสามารถสรุปสมการที่ใช้หาค่าองค์ประกอบได้ดังนี้

$$T = T_f / T_{fn} \tag{2.4}$$

$$L=T^2 / C \tag{2.5}$$

และจากตารางที่ 2.2 สมการ (1) กับ (2) จะให้ค่าความต้านทานหน่วง

$$R = 2R_rZ \tag{2.6}$$