

## บทที่ 5

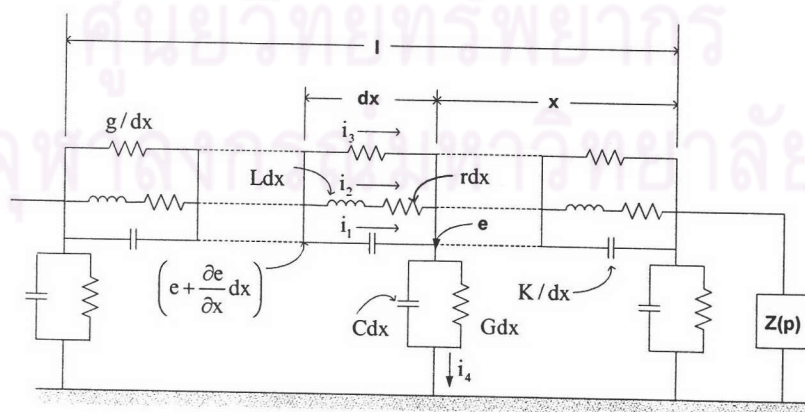
### การคำนวณการกระจายแรงดันเสิร์จภายในขดลวดหม้อแปลง

#### ด้วยหลักการของBewley

บทนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคำนวณหาการกระจายแรงดันภายในขดลวด ด้วยหลักการวิธีของ Bewley[5] ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยเพื่อใช้ผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5. สมการอนุพันธ์ทั่วไป

- รูปที่ 5.1 แสดงวงจรที่มีค่าคงที่เป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยความยาวของขดลวด โดย
- $L$  เป็นความเหนี่ยวนำไฟฟ้า
  - $M(x,y)$  เป็นความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างองค์ประกอบที่  $x$  และ  $y$
  - $C$  เป็นความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์
  - $K$  เป็นความจุไฟฟ้าอนุกรม
  - $G$  เป็นความนำไฟฟ้าเทียบกราวด์
  - $g$  เป็นความนำไฟฟ้าของขดลวด
  - $r$  เป็นความต้านทานอนุกรม
  - $n$  เป็นรอบต่อหน่วยความยาว



รูปที่ 5.1 วงจรของขดลวด

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่แต่ละจุดของขดลวดประกอบด้วย

$e$  เป็นแรงดันไฟฟ้าเทียบกราวด์

$i_1$  เป็นกระแสไฟฟ้าในขดลวดอนุกรม  $K$

$i_2$  เป็นกระแสไฟฟ้าในความเหนี่ยวนำ  $L$

$i_3$  เป็นกระแสไฟฟ้าในความนำไฟฟ้า  $g$

$i_4$  เป็นกระแสไฟฟ้างกราวด์ผ่าน  $G$  และ  $C$

$\phi$  เป็นฟลักซ์เกี่ยวคัลล์องรวม

$B$  เป็นความหนาแน่นฟลักซ์

$t$  เป็นเวลา

$p = \partial / \partial t$  เป็นอนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลา

$x, y$  เป็นจุดในตำแหน่งต่างๆของขดลวด วัดจากจุดนิวตรอล

$l$  เป็นความยาวของขดลวด

$L_n$  เป็นความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละรอบ

$l_e$  เป็นความยาวฟลักซ์รั่วไหล(leakage path)

จากวงจรได้ความสัมพันธ์พื้นฐานเป็น

$$i_1 = K \frac{\partial^2 e}{\partial x \partial t} \quad (5.1)$$

$$i_3 = g \frac{\partial e}{\partial x} \quad (5.2)$$

$$i_4 = \left( G + C \frac{\partial}{\partial t} \right) e = \frac{\partial}{\partial x} (i_1 + i_2 + i_3) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial x} = r i_2 + \frac{n}{10^8} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5.4ก)$$

$$= r i_2 + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^l M(x, y) i_2(y) dy \quad (5.4ข)$$

$$= r i_2 + \frac{\partial}{\partial t} \left\{ L i_2(x) + \int_0^l M(x, y) [i_2(y) - i_2(x)] dy \right\}$$

$$(5.4ค)$$

$$\text{เมื่อ } L' = \int_0^{\ell} M(x, y) dy$$

$$\phi = \phi_m + \phi_\ell = \phi_m + \frac{0.4\pi(Ln)n}{le} \int_0^{\ell} \int_x^{\ell} i_2 dy dx \quad (5.5)$$

เมื่อ  $\phi_m$  เป็นพังก์ชันรวมของขดลวดทั้งหมด

$\phi_\ell$  เป็นพังก์ชันเนื่องจากการเกี่ยวคดล้อย่อย

จาก สมการ(5.4ก) และ (5.5)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 e}{\partial x^4} &= r \frac{\partial^3 i_2}{\partial x^3} - \frac{0.4\pi n^2 (Ln)}{(le)10^8} \frac{\partial^2 i_2}{\partial x \partial t} \\ &= r \frac{\partial^3 i_2}{\partial x^3} - L \frac{\partial^2 i_2}{\partial x \partial t} \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\text{เมื่อ } L = \frac{0.4\pi n^2 (Ln)}{(le)10^8} \cdot \frac{1}{2}$$

โดย สมการ (5.1), (5.2) และ (5.3) จะได้

$$\begin{aligned} L \frac{\partial^2 i_2}{\partial x \partial t} &= L \left( G + C \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial e}{\partial t} - L \frac{\partial^2 i_1}{\partial x \partial t} - L \frac{\partial^2 i_3}{\partial x \partial t} \\ &= LG \frac{\partial e}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} - LK \frac{\partial^4 e}{\partial x^2 \partial t^2} - gL \frac{\partial^3 e}{\partial x^2 \partial t} \end{aligned} \quad (5.7)$$

และ

$$r \frac{\partial^3 i_2}{\partial t^3} = rG \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + rC \frac{\partial^3 e}{\partial x^2 \partial t} - rK \frac{\partial^5 e}{\partial x^4 \partial t} - gr \frac{\partial^4 e}{\partial x^4} \quad (5.8)$$

แทนสมการ (5.7) และ (5.8) ลงใน สมการ(5.6) จะได้สมการ

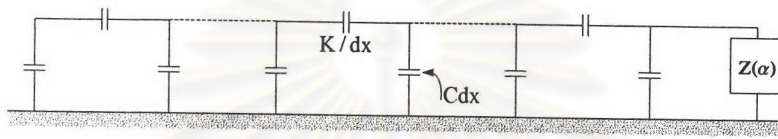
$$\begin{aligned} rK \frac{\partial^5 e}{\partial x^4 \partial t} + (1 + gr) \frac{\partial^4 e}{\partial x^4} - LK \frac{\partial^4 e}{\partial x^2 \partial t^2} - (rC + gL) \frac{\partial^3 e}{\partial x^2 \partial t} \\ - rG \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} + LG \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

ในกรณีที่ละเลยผลของความสูญเสีย สมการ (5.9) จะลดรูปได้เป็น

$$\frac{\partial^4 e}{\partial x^4} - LK \frac{\partial^4 e}{\partial x^2 \partial t^2} + LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} = 0 \quad (5.10)$$

### 5.1 การกระจายเริ่มต้น (Initial Distribution)

เมื่อจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่จุดปลายของขดลวด ทำให้กระแสที่ไหลในความจุไฟฟ้า ในช่วงเวลาแรกจะมีค่าสูงมากๆ เนื่องจากว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลามีค่า เป็นอนันต์ ในทางตรงกันข้ามกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นศูนย์และในความต้านทานจะมีกระแสอยู่ค่าหนึ่ง ดังนั้นในช่วงเวลานี้ การกระจายของแรงดันในช่วงเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า รูปที่ 5.2 และสามารถหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ได้โดยพิจารณาเฉพาะความจุไฟฟ้า เพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาเฉพาะความจุไฟฟ้าและรวมสมการ (5.1) และ (5.3) จะได้



รูปที่ 5.2 วงจรของขดลวดในสภาวะเริ่มต้น

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} - \frac{C}{K} e = \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} - \alpha^2 e = 0 \quad (5.11)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$$

ผลเฉลยของสมการ (5.11) จะอยู่ในรูป

$$e = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} \quad (5.12)$$

จากสมการ (5.1)

$$i = Kp \frac{\partial e}{\partial x} = Kp\alpha(Ae^{\alpha x} - Be^{-\alpha x}) \quad (5.13)$$

เมื่อ  $p \rightarrow \infty$  เพราะฉะนั้นจะทำให้กระแสที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นมีค่าเป็นอนันต์

กรณีที่ขดลวดต่อลงกราวด์ ที่  $x=0$  ผ่านอิมพีแดนซ์  $Z(p)$  และจ่ายแรงดัน  $E$  ที่จุด  $x = \ell$  ที่จุด

$$\left. \begin{array}{l} x = \ell \quad e = E = Ae^{\alpha \ell} + Be^{-\alpha \ell} \\ x = 0 \quad e = Z(p)i = Z(p)p\sqrt{CK}(A - B) = A + B \end{array} \right\} \quad (5.14)$$

จากสมการ (5.14) ได้ค่าคงที่

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \frac{[Z(p)p\sqrt{CK} + 1]E}{Z(p)p\sqrt{CK} \cosh \alpha l + \sinh \alpha l} \\ B &= \frac{1}{2} \frac{[Z(p)p\sqrt{CK} - 1]E}{Z(p)p\sqrt{CK} \cosh \alpha l + \sinh \alpha l} \end{aligned} \right\} \quad (5.15)$$

และการกระจายเริ่มต้นจะเป็น

$$e = E \frac{Z(p)p\sqrt{CK} \cosh \alpha x + \sinh \alpha x}{Z(p)p\sqrt{CK} \cosh \alpha l + \sinh \alpha l} \Big|_{p=\infty} \quad (5.16)$$

สำหรับจุดนิวตรอนต่อลงดิน  $Z(p) = 0$  จะได้

$$e = E \frac{\sinh \alpha x}{\sinh \alpha l} \quad (5.17)$$

จากสมการ (5.17) แสดงอยู่ในรูปของอนุกรมซายน์ครึ่งคาบ

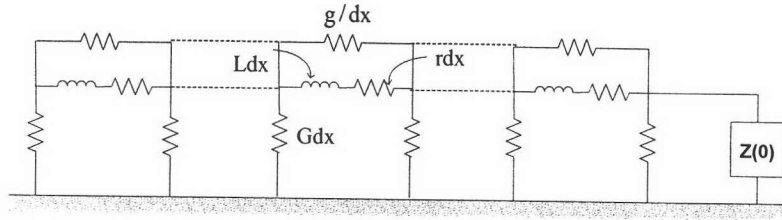
$$\begin{aligned} e &= 2 \sum_{s=1}^{\infty} \sin \frac{s\pi x}{l} \int_0^l e \sin \frac{s\pi x}{l} dx \\ &= E \sum_{s=1}^{\infty} -\frac{2s\pi \cos s\pi}{\alpha^2 l^2 + s^2 \pi^2} \sin \frac{s\pi x}{l} \end{aligned} \quad (5.18)$$

และกรณีแยกจุดนิวตรอล  $Z(p) = \infty$  จะได้สมการ

$$e = E \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha l} \quad (5.19)$$

## 5.2 การกระจายช่วงสุดท้าย(Final Distribution)

หลังจากอุปคลื่นทรานเซียนต์สี่เหลี่ยมที่เกิดขึ้นที่จุดปลายของขดลวดผ่านพ้นไป(ในทางทฤษฎีเวลาจะเป็นอนันต์) ทำให้องค์ประกอบที่เป็นความจุไฟฟ้าจะทำตัวเสมือนเปิดวงจร และองค์ประกอบที่เป็นความเหนี่ยวนำจะทำตัวเสมือนลัดวงจร การกระจายในช่วงเวลานี้จะหาได้โดยพิจารณาว่ามีองค์ประกอบเป็นความต้านทานประกอบอยู่ด้วย ตามรูปที่ 5.3 จากสมการ(5.2), (5.3),(5.4) จะได้สมการอนุพันธ์เป็น



รูปที่ 5.3 วงจรของขดลวดในสภาวะสุดท้าย

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} - RGe = \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} - \beta^2 e = 0 \quad (5.20)$$

เมื่อ  $R = \frac{r}{1+gr}$

$$\beta^2 = RG$$

ผลเฉลยของสมการ (5.20) จะอยู่ในรูป

$$e = Ae^{\beta x} + Be^{-\beta x} \quad (5.21)$$

และ หากเราได้จากการเทียบเคียงกับสมการ (5.2), (5.4) จะได้

$$i = \frac{1}{R} \frac{\partial e}{\partial x} = \sqrt{\frac{G}{R}} (Ae^{\beta x} - Be^{-\beta x}) \quad (5.22)$$

ใช้เงื่อนไขค่าขอบเขตเพื่อหาค่าคงที่ของผลเฉลย

$$\left. \begin{aligned} x = \ell & \quad e = E = Ae^{\beta \ell} + Be^{-\beta \ell} \\ x = 0 & \quad e = Z(p)i = Z(p)\sqrt{\frac{G}{R}}(A - B) = A + B \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

จะได้ค่าคงที่

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \frac{[Z(p)\sqrt{G/R} + 1]E}{Z(p)\sqrt{G/R} \cosh \beta \ell + \sinh \beta \ell} \\ B &= \frac{1}{2} \frac{[Z(p)\sqrt{G/R} - 1]E}{Z(p)\sqrt{G/R} \cosh \beta \ell + \sinh \beta \ell} \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

ดังนั้นการกระจายสุดท้าย (final distribution) จะเป็น

$$e = E \frac{Z(p)\sqrt{G/R} \cosh \beta x + \sinh \beta x}{Z(p)\sqrt{G/R} \cosh \beta \ell + \sinh \beta \ell} \Bigg|_{p \rightarrow 0} \quad (5.25)$$

กรณี จุดนิวตรอลต่อลงกราวด์  $Z(p) = 0$  จะได้สมการการกระจายเป็น

$$e = E \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta l} \quad (5.26)$$

กรณี จุดนิวตรอลแยกจากกราวด์  $Z(p) = \infty$  จะได้

$$e = E \frac{\cosh \beta x}{\cosh \beta l} \quad (5.27)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (5.25) และ (5.16) ซึ่งเป็นสมการการกระจายเริ่มต้น (initial distribution) และสมการการกระจายสุดท้าย (final distribution) มีรูปแบบของสมการเหมือนกัน

### 5.3 ผลเฉลยกรณีขดลวดนิวตรอลต่อลงกราวด์

สมมติผลเฉลยของสมการ (5.9) เป็น

$$e = E \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta l} + \sum A e^{ax+bt} \quad (5.28)$$

เทอมแรกของผลเฉลยจะเป็นแกนของการแกว่ง (oscillation) และเทอมของผลรวมซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองแทนค่าลงในสมการอนุพันธ์ แทนสมการ (5.28) ลงใน (5.9)

$$\begin{aligned} rKa^4b + (1+gr)a^4 - LKa^2b^2 - (rC+gL)a^2b - rGa^2 \\ + LCb^2 + LGb = 0 \end{aligned} \quad (5.29)$$

หาผลเฉลย b ในสมการ (5.29)

$$\begin{aligned} b = -\frac{rKa^4 - (rC+gL)a^2 + LG}{2L(C-Ka^2)} \\ \pm \frac{\sqrt{(rKa^4 - rCa^2 - gLa^2 + LG)^2 - 4L(C-Ka^2)(a^4 + gra^4 - rGa^2)}}{2L(C-Ka^2)} \\ = -\gamma \pm j\omega \end{aligned} \quad (5.30)$$

ให้  $\lambda^2 = -a^2$  หรือ  $a = \pm j\lambda$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ(5.28) อยู่ในรูป

$$e = E \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta \ell} + \sum e^{-\gamma t} (A \sin \lambda x \cos \omega t + B \sin \lambda x \sin \omega t + C \cos \lambda x \cos \omega t + D \cos \lambda x \sin \omega t) \quad (5.31)$$

เปรียบเทียบสมการนี้ที่เวลา  $t=0$  กับสมการ (5.18) .ในการกระจายเริ่มต้นจะได้ว่า  $C = 0$  และ

$$\lambda = \frac{s\pi}{\ell}$$

เมื่อ  $x = \ell$  สมการ (5.31) จัดสมการได้ในรูป

$$e = E + \sum e^{-\gamma t} (C \cos \omega t + D \sin \omega t) \cos s\pi \quad (5.32)$$

และเนื่องจาก  $e = E$  และ  $x = \ell$  ทำให้ได้  $C = D = 0$  ฉะนั้น

$$e = E \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta \ell} + \sum_{s=1}^{\infty} e^{-\gamma_s t} (A_s \cos \omega_s t + B_s \sin \omega_s t) \sin \frac{s\pi x}{\ell} \quad (5.33)$$

สัมประสิทธิ์  $A_s$  หาได้โดยการเปรียบเทียบสมการ (5.17) กับ สมการ (5.33) ที่เวลา  $t=0$

$$\begin{aligned} E \sum_{s=1}^{\infty} \frac{-2s\pi}{\beta^2 \ell^2 + \pi^2 s^2} \cos s\pi \sin \frac{s\pi x}{\ell} + \sum_{s=1}^{\infty} A_s \sin \frac{s\pi x}{\ell} \\ = E \sum_{s=1}^{\infty} \frac{-2s\pi}{\alpha^2 \ell^2 + s^2 \pi^2} \cos s\pi \sin \frac{s\pi x}{\ell} \end{aligned}$$

ฉะนั้น

$$A_s = \frac{2s\pi(\cos s\pi)(\alpha^2 - \beta^2)\ell^2}{(\alpha^2 \ell^2 + s^2 \pi^2)(\beta^2 \ell^2 + s^2 \pi^2)} E \quad (5.34)$$

สัมประสิทธิ์  $B_s$  หาจากเงื่อนไขที่ว่ากระแส  $i_2$  ที่ผ่านความเหนี่ยวนำจะเป็นศูนย์ ที่เวลา  $t=0$  โดยสมการ (5.1),(5.2) และ (5.3)

$$\frac{\partial i_2}{\partial x} = Ge - g \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + C \frac{\partial e}{\partial t} - K \frac{\partial^3 e}{\partial x^2 \partial t}$$



นำสมการ (5.33) มาแทนในสมการ ที่เวลา  $t=0$  จะได้ผลเป็น

$$0 = (G - \beta^2 g)E \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta l} + \sum_1^{\infty} \left\{ A_s \left[ \left( G + g \frac{s^2 \pi^2}{\ell^2} \right) - \gamma_s \left( C + K \frac{s^2 \pi^2}{\ell^2} \right) \right] + B_s \omega_s \left( C + K \frac{s^2 \pi^2}{\ell^2} \right) \right\} \sin \frac{s\pi x}{\ell}$$

ทำการกระจายชายดีไฮเปอร์โบลิก ให้อยู่ในรูปของอนุกรมชายดีครึ่งคาบและจัดรูปจะได้

$$B_s = \left[ \gamma_s + \frac{G - \beta^2 g}{C - \beta^2 K} - \frac{G\ell^2 + s^2 \pi^2 g}{C\ell^2 + s^2 \pi^2 K} \right] \frac{A_s}{\omega_s} = \frac{\tau_s}{\omega_s} A_s \quad (5.35)$$

จากค่าคงที่ที่หาได้จะได้ผลเฉลยที่สมบูรณ์ในรูป

$$\begin{aligned} e &= E \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta l} + E \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2(-1)^s s\pi(\alpha^2 - \beta^2)\ell^2}{(\alpha^2 \ell^2 + s^2 \pi^2)(\beta^2 \ell^2 + s^2 \pi^2)} e^{-\gamma_s t} \\ &\quad \left( \cos \omega_s t + \frac{\tau_s}{\omega_s} \sin \omega_s t \right) \sin \frac{s\pi x}{\ell} \\ &\equiv E \frac{\sin \beta x}{\sin \beta l} + \sum_{s=1}^{\infty} A_s e^{-\gamma_s t} \cos \omega_s t \sin \frac{s\pi x}{\ell} \end{aligned} \quad (5.36)$$

กรณีที่ไม่นพิจารณาค่าความสูญเสีย ( $r = g = G = 0$ ) และ  $\beta = 0$  สมการ(5.30) จะลดรูปได้เป็น

$$\begin{aligned} b &= \pm \frac{\sqrt{-4L(C - Ka^2)}a^4}{2L(C - Ka^2)} = \pm j \frac{\lambda^2}{\sqrt{L(C + K\lambda^2)}} \\ &= \pm j \frac{s^2 \pi^2 / \ell^2}{\sqrt{L \left( C + K \frac{s^2 \pi^2}{\ell^2} \right)}} = \pm j \omega_s \end{aligned} \quad (5.37)$$

ดังนั้นผลเฉลยที่ไม่นพิจารณาความสูญเสียจะเป็น

$$\begin{aligned} e &= E \frac{x}{\ell} + E \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2 \cos s\pi}{s\pi} \\ &\quad \left( \frac{\alpha^2 \ell^2}{\alpha^2 \ell^2 + s^2 \pi^2} \right) \sin \frac{s\pi x}{\ell} \cos \frac{s^2 \pi^2 t}{\ell^2 \sqrt{L \left( C + K \frac{s^2 \pi^2}{\ell^2} \right)}} \end{aligned} \quad (5.38)$$

#### 5.4 ผลของลักษณะรูปคลื่นที่จุดปลายขดลวด

สมการ (5.36) เป็นสมการที่ได้เมื่อเกิดแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่จุดปลายขดลวด แต่ถ้ารูปคลื่นที่เกิดขึ้นเป็น  $E(t)$  ผลเฉลยจะใช้ทฤษฎีของ Duhamel [4] ซึ่งแสดงได้ 2 แบบ[5]คือ

$$e = \frac{\sinh \alpha x}{\sinh \alpha l} E(t) - \sum_{s=1}^{\infty} \int_0^t A_s e^{-\gamma_s(t-\tau)} [\gamma_s \cos \omega_s(t-\tau) + \omega_s \sin \omega_s(t-\tau)] E(\tau) \sin \frac{s\pi x}{l} d\tau \quad (5.39n)$$

$$e = \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta l} E(t) + \sum_{s=1}^{\infty} A_s \left\{ E(t) - \int_0^t e^{-\gamma_s(t-\tau)} [\gamma_s \cos \omega_s(t-\tau) + \omega_s \sin \omega_s(t-\tau)] E(\tau) d\tau \right\} \sin \frac{s\pi x}{l} \quad (5.39ข)$$

กรณีไม่พิจารณาค่าความสูญเสียจากสมการ (5.39ข) จะได้

$$e = \frac{x}{l} E(t) + \sum_{s=1}^{\infty} A_s \left\{ E(t) - \int_0^t \omega_s \sin \omega_s(t-\tau) E(\tau) d\tau \right\} \sin \frac{s\pi x}{l} \quad (5.40)$$

โดยพิจารณา

$$\frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta l} \cong \frac{x}{l} \quad (5.41)$$

กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่า รูปคลื่นจะมีลักษณะเป็นเอกซโพเนนเชียลทั้งหน้าคลื่นและหางคลื่น โดยอยู่ในรูปสมการ (5.42)

$$E(t) = E(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (5.42)$$

จากสมการ (5.40) จะได้ผลเฉลยเพื่อใช้ในการหาแรงดันที่เกิดขึ้นบนขดลวดที่ตำแหน่ง และที่เวลาใดๆได้เป็น

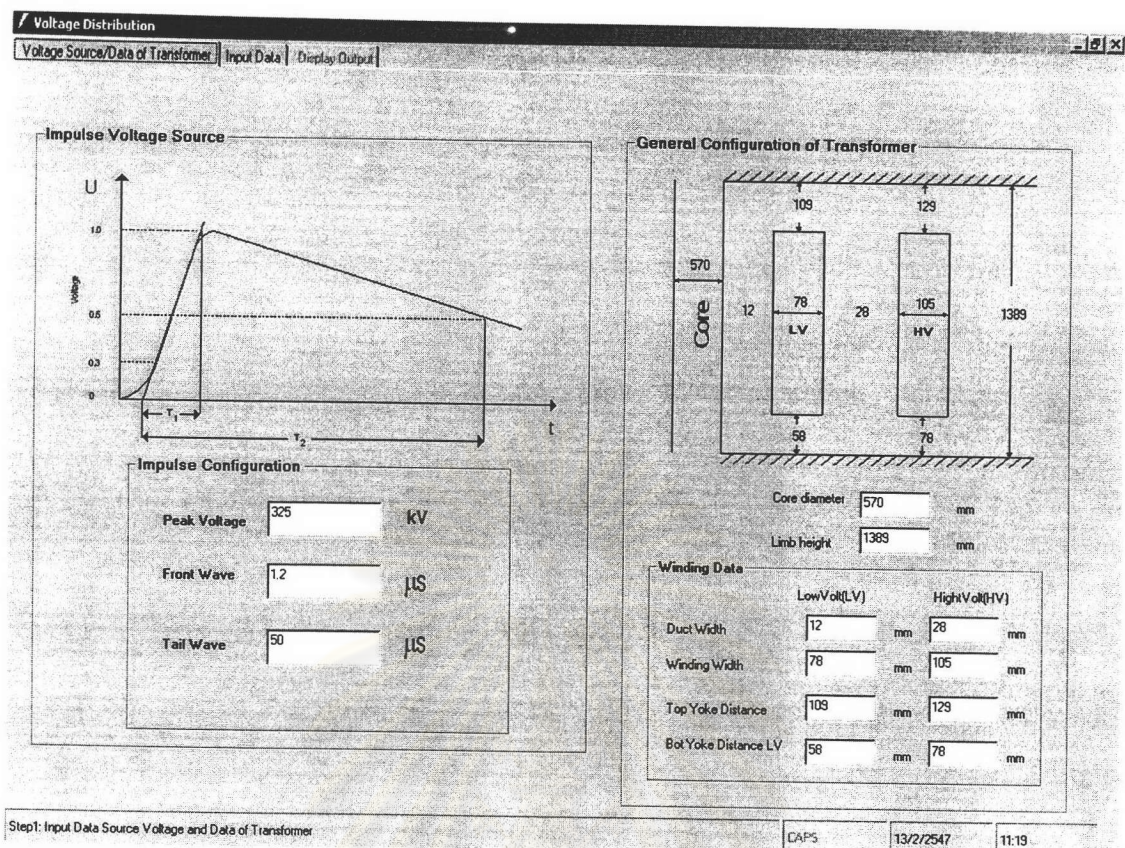
$$e = E(e^{-at} - e^{-bt}) \frac{x}{l} + E \sum_{s=1}^{\infty} A_s \sin \frac{s\pi x}{l} \left[ \frac{a^2 e^{-at}}{a^2 + \omega_s^2} - \frac{b^2 e^{-bt}}{b^2 + \omega_s^2} + \frac{\omega_s}{\sqrt{a^2 + \omega_s^2}} \cos \left( \omega_s t + \tan^{-1} \frac{a}{\omega_s} \right) - \frac{\omega_s}{\sqrt{b^2 + \omega_s^2}} \cos \left( \omega_s t + \tan^{-1} \frac{b}{\omega_s} \right) \right] \quad (5.43)$$

## 5.5 การสร้างโปรแกรมคำนวณการกระจายของแรงดันในขดลวดหม้อแปลง

เนื่องจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของขดลวดแต่ละตัวค่อนข้างจะยุ่งยาก ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะอาศัยข้อมูลของหม้อแปลงและข้อมูลขดลวดในการคำนวณ เพื่อนำพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นี้มาใช้เป็นข้อมูลหาการกระจายแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆของขดลวด ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงได้สร้างโปรแกรมคำนวณการกระจายของแรงดันในขดลวดหม้อแปลง อาศัยหลักการวิธีของ Bewley[5]ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 5.1 ถึง หัวข้อที่ 5.4 ในกรณีขดลวดนิวตรอลต่อลงกราวด์โดยใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 [14,15]และ โปรแกรม Mathematica 4.0[15] อ้างอิงสมการ(5.43)ในการคำนวณ ส่วนของการคำนวณค่าพารามิเตอร์จะใช้วิธีของ A.Greenwood โปรแกรมแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.6

### 5.5.1 พารามิเตอร์ที่ป้อน

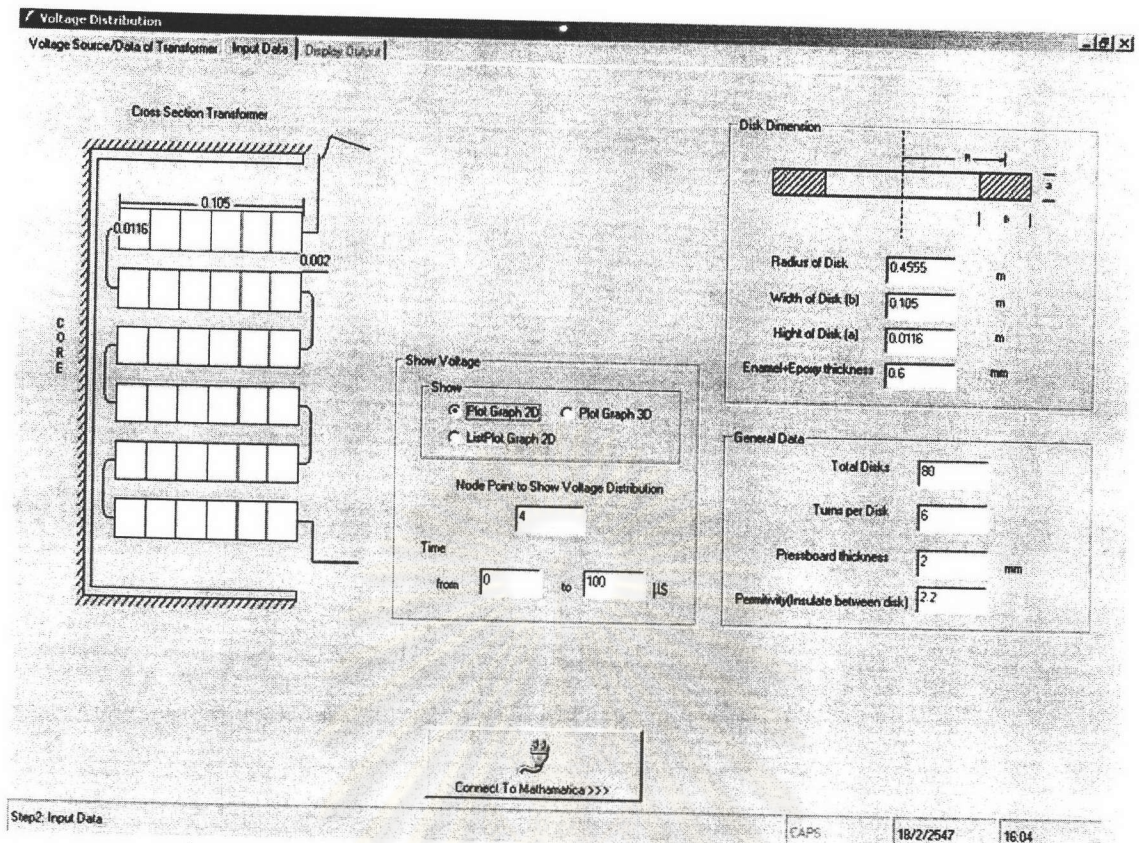
- a) เสรีจแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่าหรืออิมพัลส์
  - 1) ขนาดค่ายอดของรูปคลื่น (kV)
  - 2) เวลาคู่หน้าคลื่น ( $\mu s$ )
  - 3) เวลาคู่หลังคลื่น ( $\mu s$ )
- b) รายละเอียดของหม้อแปลง
  - 1) ขนาด dimension ของแกนเหล็ก (mm)
  - 2) ความสูงของ limb (mm)
  - 3) ความกว้าง duct ของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ (mm)
  - 4) ความกว้าง duct ของขดลวดทางด้านแรงดันสูง (mm)
  - 5) ขนาดความกว้างของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ (mm)
  - 6) ขนาดความกว้างของขดลวดทางด้านแรงดันสูง (mm)
  - 7) ระยะ top yoke ของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ (mm)
  - 8) ระยะ top yoke ของขดลวดทางด้านแรงดันสูง (mm)
  - 9) ระยะ bottom yoke ของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ (mm)
  - 10) ระยะ bottom yoke ของขดลวดทางด้านแรงดันสูง (mm)



รูปที่ 5.4 แสดงหน้าต่างป้อนข้อมูลแหล่งจ่ายและหม้อแปลง

c) รายละเอียดของขดลวดภายในหม้อแปลง

- 1) รัศมีของขดลวดดิสก์ (m)
- 2) ความกว้างของขดลวดดิสก์ (m)
- 3) ความสูงของขดลวดดิสก์ (m)
- 4) ความหนาของสารเคลือบขดลวด Epoxy (mm)
- 5) จำนวนดิสก์ทั้งหมดของขดลวดทางด้านขดลวดแรงดันสูง
- 6) จำนวนรอบของขดลวดที่พันใน 1 ดิสก์
- 7) ความหนาของเฟรมบอร์ด (mm)
- 8) ค่าเปอร์มิติวิตีของฉนวนระหว่างขดลวด

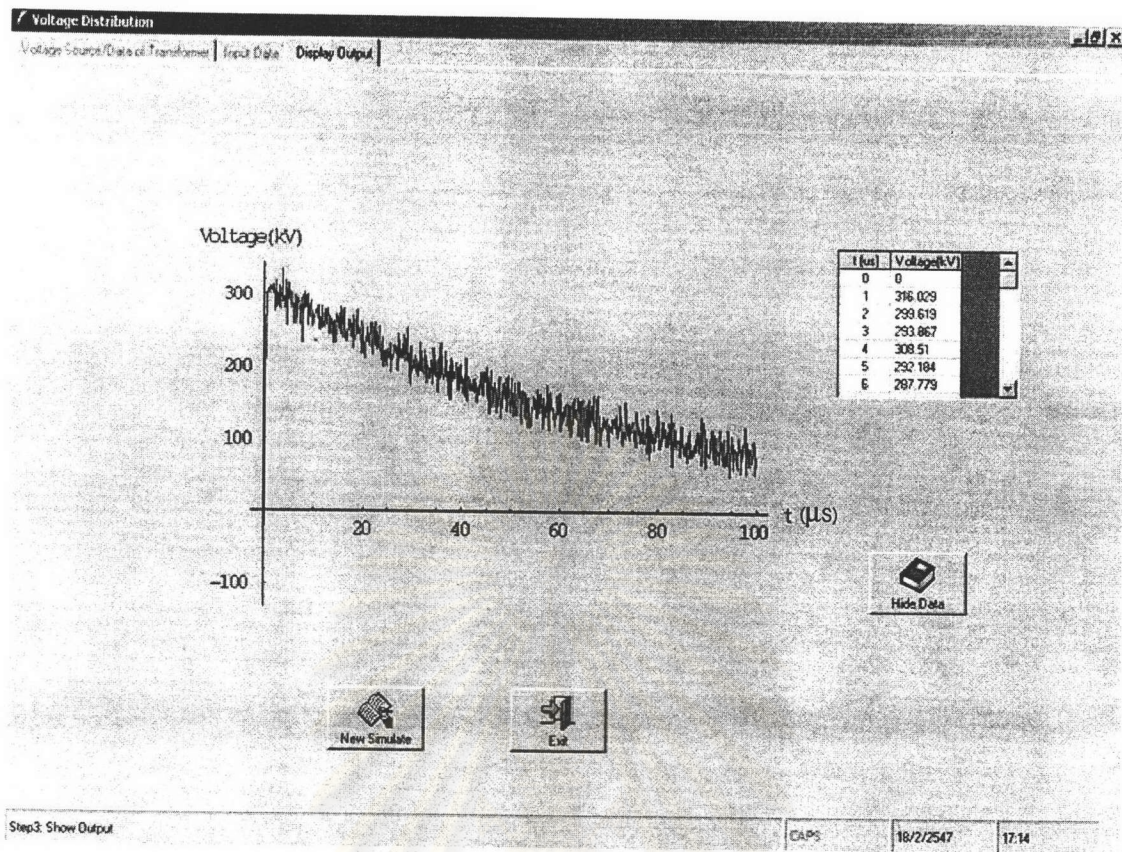


รูปที่ 5.5 แสดงหน้าต่างป้อนข้อมูลขดลวด ตำแหน่งและเวลาในการจำลอง

- d) ตำแหน่งที่ต้องการทราบการกระจายของแรงดันของขดลวดทางด้านแรงดันสูงซึ่งมีการพันขดลวดเป็นแบบขดดิสก์โดยระบุตำแหน่งต่างๆ ของขดลวดเป็นโนนด(Disc no.)
- e) ช่วงเวลาในการแสดงผล ( $\mu s$ )

### 5.5.2 การทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมจะประกอบด้วยหน้าต่างการทำงานอยู่ 3 หน้าต่าง แสดงได้ตามรูปที่ 5.4 ถึง รูปที่ 5.6พัฒนาด้วยโปรแกรม Visual Basic 6.0 ร่วมกับ โปรแกรม Mathematica โดยจะต้องป้อนข้อมูลของเลิร์จ ซึ่งในที่นี้จะเป็นข้อมูลของรูปคลื่นฟ้าผ่าและข้อมูล Dimension ของหม้อแปลงรวมทั้งของขดลวดภายในหม้อแปลงในหน้าต่างของโปรแกรม ดังในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 เพื่อจะนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของขดลวดหม้อแปลง เช่น ความเหนียวนำไฟฟ้าของขดลวด ความจุไฟฟ้า ความยาวของลวดต่อ 1 ดิสก์ เป็นต้น โดยเขียนคำสั่งในการคำนวณภายในโปรแกรม Visual Basic เป็นข้อมูล text file จากนั้นส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังโปรแกรม Mathematica เพื่อทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นบนขดลวดในตำแหน่งที่กำหนด พร้อมทั้งพล็อตรูปคลื่นของแรงดันที่คำนวณได้ จากนั้นส่งผลมาแสดงยังโปรแกรม Visual Basic ดังแสดงในหน้าต่างรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 หน้าต่างแสดงผลการจำลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย