

## 一、綜合觀感與建議

- 一、雷擊突波、開關突波引起變壓器暫態過電壓，應用有限元素分析法，將可有效解決傳統低頻模型（等效電路）及塊狀參數模擬法（Lumped Parameter Model）由於渦流損、集膚效應、臨近效應、雜散電容、鐵心非線性等因素致產生數值模擬誤差。
- 二、有限元素分析法應用於電力設備最佳化設計，因全系統頻寬之複雜性，為有效掌握有限元素相關分析結果，宜僅著手於電力設備元件設計（或改進）。
- 三、變壓器有限元素分析法，請擇期舉辦專題研討會，以提供本所作為發、輸、配、售等單位之諮詢參考。

## 二、緣起與目的

變壓器故障/異狀持續發生在配電、供電、水火力發電、核能發電等單位，例如：明潭發電廠 #4 主變壓器、興達發電廠 GT5 主變壓器、因故障致停止運轉，造成本公司設備財物及發電效益損失。未來大型變壓器事故可能造成停電或工安問題，以及本公司經營危機。

國外已應用有限元素法，分析變壓器故障/異狀之暫態現象、應力、渦流等，以提昇變壓器可靠度。擬參加 MAGSOFT 公司之變壓器有限元素法相關短期訓練課程，擬作為公司技術服務之參考。

## 三、行程與主題

表 1：行程與主題內容

90年7月10日~ 90年7月11日	往程	台北 - 紐約 ALBANY - TROY - MAGSOFT 公司
90年7月12日~ 90年8月10日		研習「變壓器故障/異狀之有限元素分析法」
90年8月11日~ 90年8月13日	返程	TROY - ALBANY - 紐約 紐約 - 台北

## 四、線圈及繞組發生暫態之原理

### 4.1 線圈及繞組暫態特性

線圈/繞組由於雷擊、開關切換、部分放電等因素，引起狀態改變，造成線圈及繞組內電壓/電流非週期性變動。此非週期性變動過程，為線圈及繞組暫態現象。

線圈/繞組出現暫態現象時，元件的電壓/電流如已超過設計規範值，可能會破壞元件上的絕緣成分，導致線圈/繞組短路。如線圈/繞組耦合鐵心之非線性電感及系統之雜散電容 ( Stray Capacitance )，進一步將引發電力系統局部區域共振 ( 鐵磁共振 Ferroresonance ，或 RLC 諧振 )，產生過電壓/電流，足以破壞相關電力設備。

### 4.2 線圈及繞組暫態理論的發展過程

1. 塊狀參數模擬法 ( Lumped Parameter Model ) 於 1915 年，應用在線圈及繞組之暫態現象分析。
2. 1915~1960 年，應用駐波法、行進波法、類比模擬法 ( Analog Model ) 進行線圈及繞組之暫態現象分析，但無法模擬複雜幾何形狀。
3. 1960~1996 年，塊狀參數模擬法 ( Lumped Parameter Model ) 結合電子計算機相關數值分析法，模擬分析線圈及繞組暫態電壓。
4. 1996 年起，有限元素分析法耦合塊狀參數模擬法，有效解決傳統低頻模型 ( 等效電路 ) 及塊狀參數模擬法由於渦流損、集膚效應、臨近效應、雜散電容、鐵心非線性等因素所產生暫態電壓之數值模擬誤差。

### 4.3 塊狀參數模擬法 ( Lumped Parameter Model ) 分析暫態反應

塊狀參數模擬法 ( Lumped Parameter Model ) 分析暫態反應，假設條件如下：

1. 鐵心導磁率不變；材料之頻率特性不變；線圈/繞組對稱配置
2. 假性靜態反應 ( Quasi-Static Response )

3. 線圈/繞組分割不影響計算結果。

塊狀參數模擬法 ( Lumped Parameter Model ) 分析暫態反應 , 模擬過程分為以下三步驟 :

1. 將線圈依幾何形狀予於適當分割 ( 分割愈細 , 分析結果愈精確 )
2. 每一分割區域 , 再由塊狀元素 ( L:Inductance,C:Capacitance,and R:Resistance ) 組成 , 示如圖 4.3.1。
3. 進行數值模擬分析 ( 模擬分析公式 , 示如圖 4.3.2 )

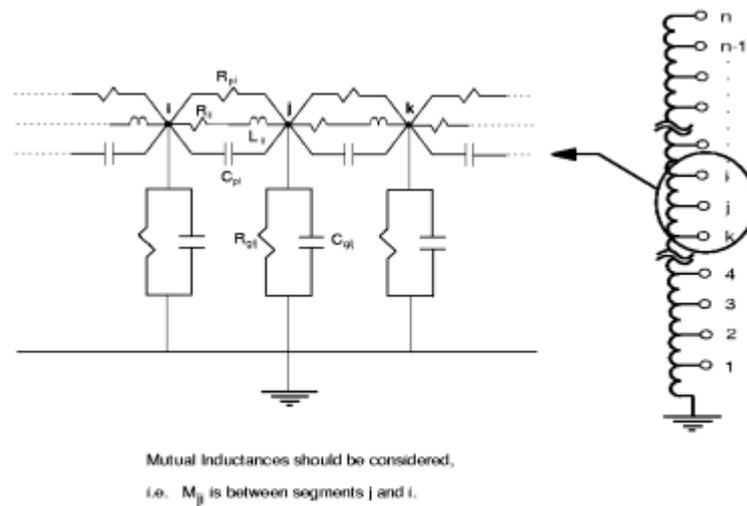


圖 4.3.1 塊狀參數模擬法相關分割區域之塊狀元素

$$[I(s)] = \left[ \frac{1}{s} [\Gamma_n] + [G] + s[C] \right] [E(s)]$$

$[I(s)]$  – Vector of Current Sources

$[\Gamma_n]$  – Inverse Nodal Inductance Matrix =  $[T][L]^{-1}[T]'$

$[G]$  – Conductance Matrix, for Complete Loss Model

$[C]$  – Nodal Capacitance Matrix

$[E(s)]$  – Laplace Transform of Nodal Voltages

圖 4.3.2 塊狀參數模擬法公式

#### 4.4 線圈/繞組之時域暫態反應

線圈/繞組之時域暫態反應，可分為以下三個期間：

1. 初始電壓/電流分佈期：線圈/繞組之暫態反應，主要由線圈/繞組之電容成分決定，示如圖 4.4.1。
2. 電壓/電流非週期震盪期：線圈/繞組之暫態反應，主要由線圈/繞組之電感成分決定，示如圖 4.4.2。
3. 電壓/電流週期震盪期：線圈/繞組暫態反應消失，並由線圈/繞組之電感、電容、電阻成分決定穩態反應，示如圖 4.4.1。

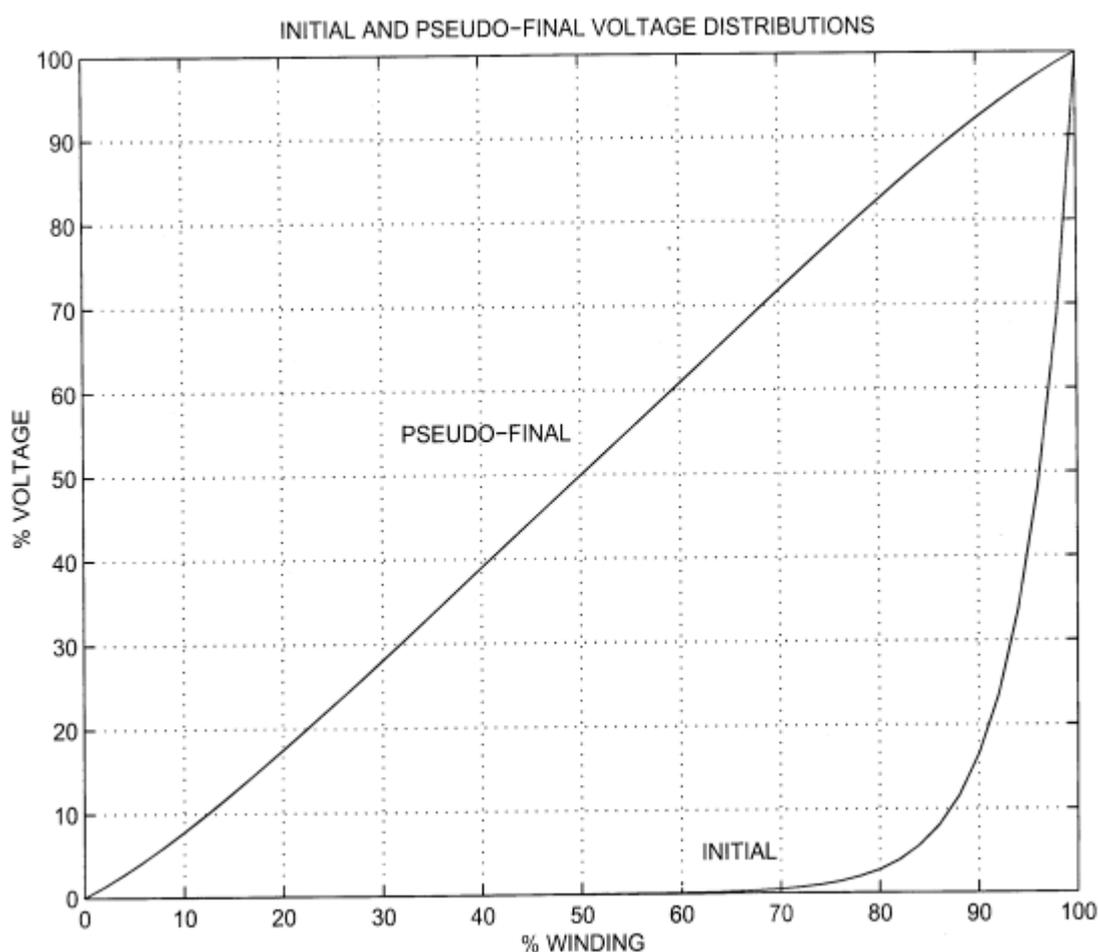


圖 4.4.1 線圈/繞組的時域暫態反應 ( INITIAL：初始電壓/電流分佈期、PSEUDO-FINAL：電壓/電流週期震盪期 )

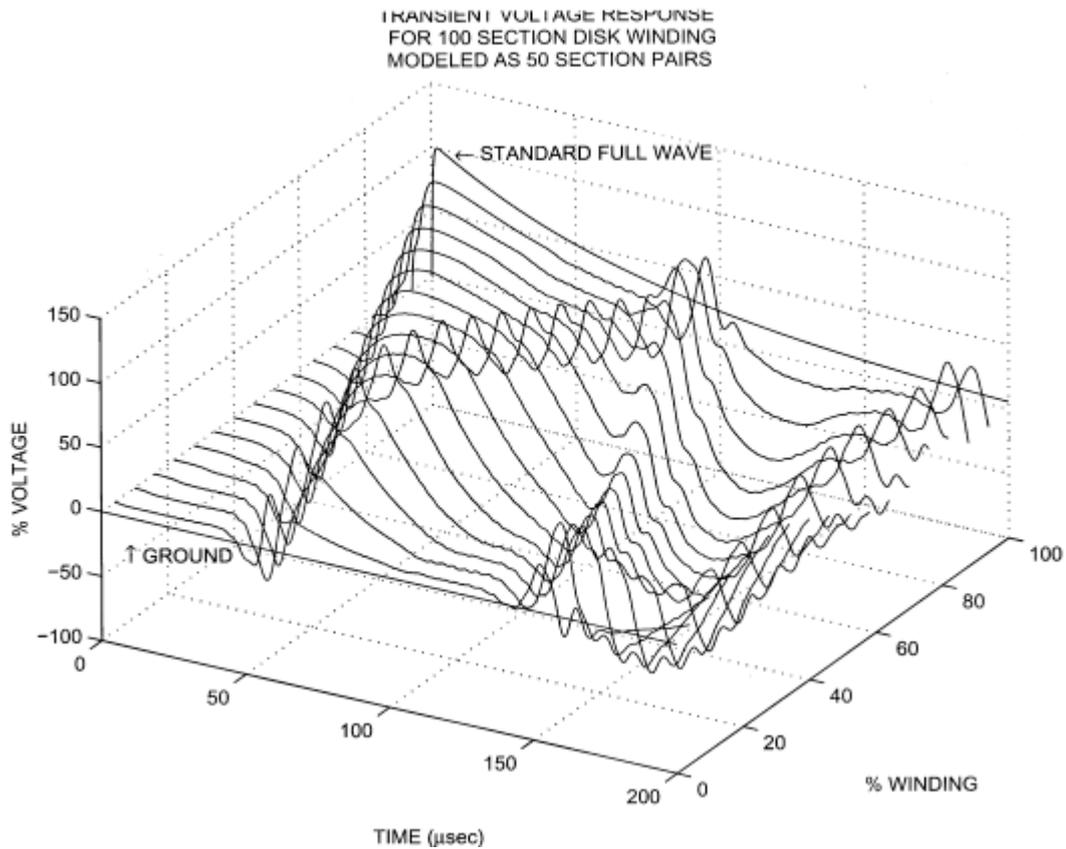


圖 4.4.2 線圈/繞組的時域暫態反應（電壓/電流非週期震盪期）

#### 4.5 線圈/繞組之頻域暫態反應

線圈/繞組之暫態反應頻寬約數百 kHz，並於頻域內含數個自然共振頻率；線圈/繞組的阻抗與頻率關係，示如圖 4.5.1。

當線圈/繞組被其自然共振頻率激發時，線圈/繞組的阻抗為兩自然共振頻率間之最小，然線圈/繞組的電流為兩自然共振頻率間之最大。線圈/繞組之頻域暫態反應相對放大因素，示如圖 4.5.2；由此圖，可知線圈/繞組之頻域暫態反應與線圈/繞組距離無關，僅與激發頻率有關。

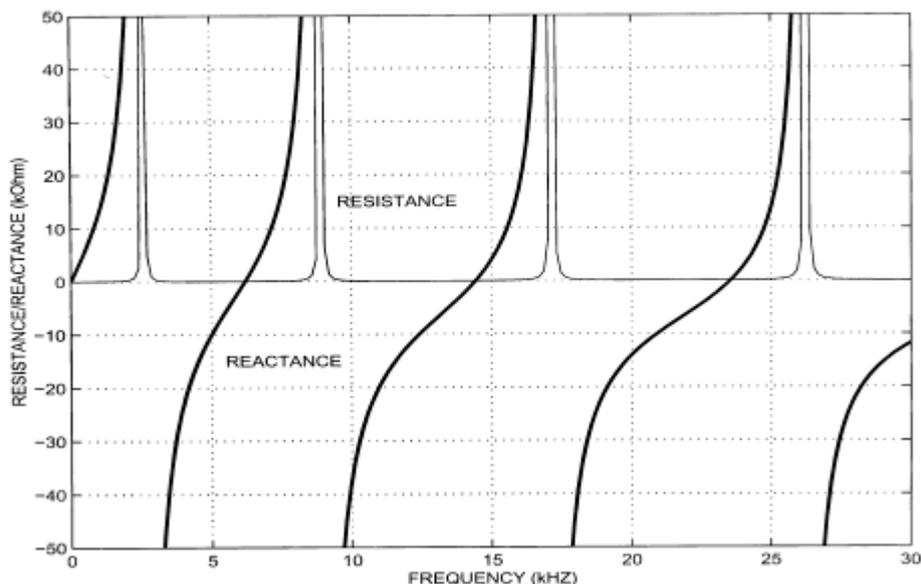


圖 4.5.1 線圈/繞組的阻抗與頻率關係

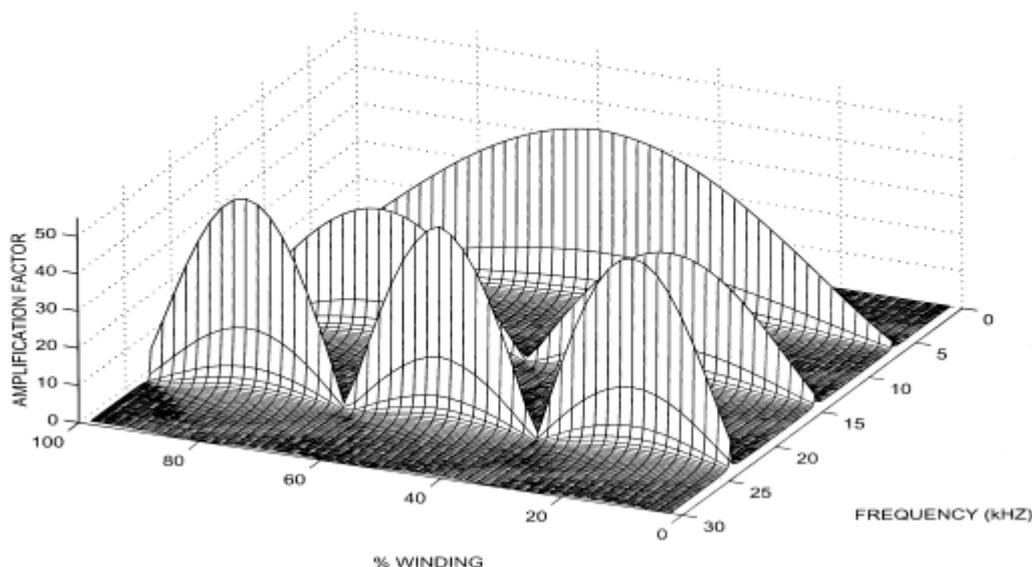


圖 4.5.2 線圈/繞組頻域暫態反應的相對放大因素

#### 4.6 線圈/繞組及鐵心構成策略

變壓器線圈/繞組及鐵心之構造，可分為內鐵式（Core type）及外鐵式（Shell type）兩型，示如圖 4.6.1。內鐵式變壓器用銅較多，散熱良好，機械強度較差；外鐵式變壓器用鐵較多，機械强度高，散熱較差，適合高電壓及大容量。

內鐵式變壓器，依線圈/繞組裝置，再分為：圓盤型（如圖 4.6.2 上部）

螺旋型（如圖 4.6.1 之線圈部分） 分割型（如圖 4.6.2 下部） 外鐵式變壓器，依線圈/繞組裝置，有螺旋型（如圖 4.6.1 之線圈部分）及煎餅型（如圖 4.6.3）兩型。

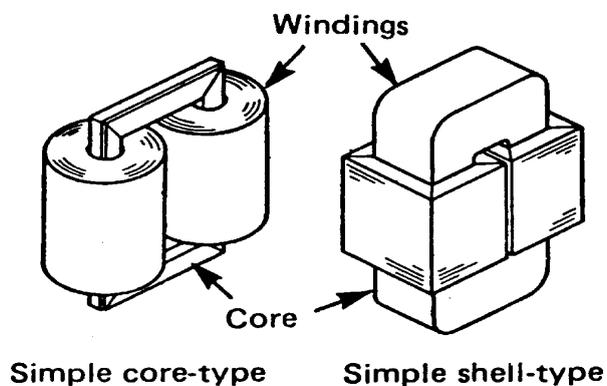


圖 4.6.1 基本內鐵式及外鐵式變壓器構造（圖中，Winding：繞組，Core：鐵心）

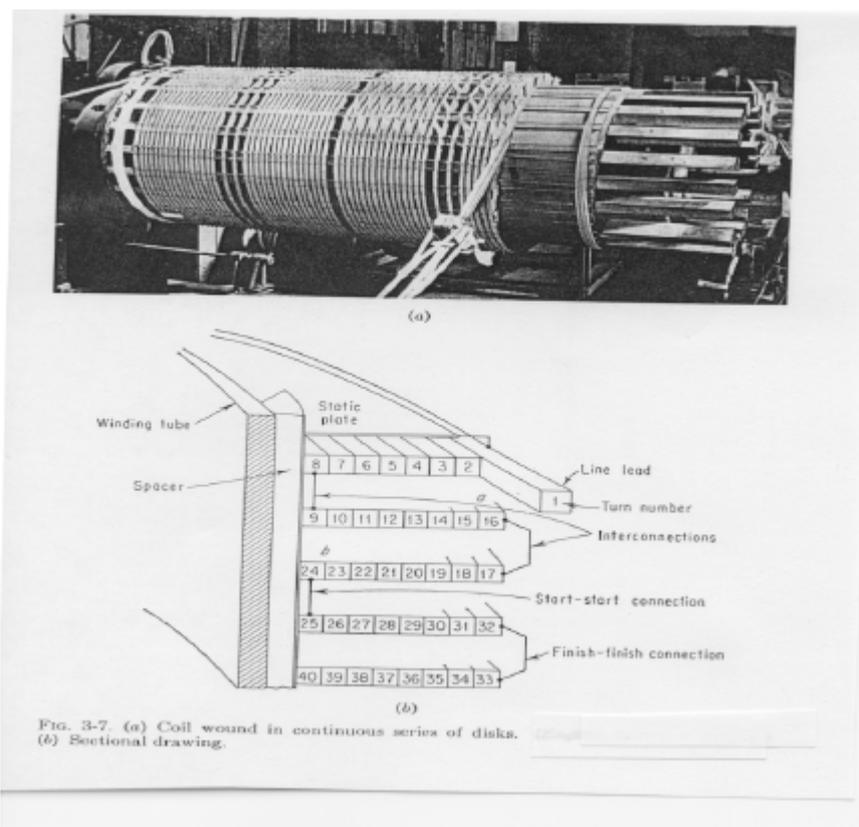


圖 4.6.2 內鐵式變壓器，圓盤型繞組（圖上部）及分割型繞組（圖下部）構造

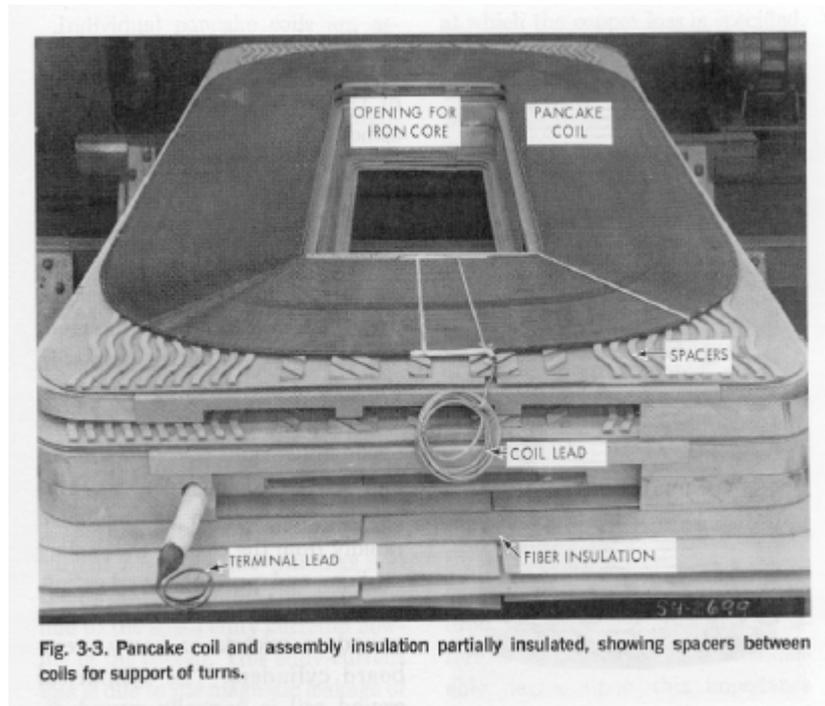


圖 4.6.3 外鐵式變壓器煎餅型繞組構造。

## 五、變壓器有限元素分析

### 5.1 有限元素分析法之歷史背景

1. 結構及連續力學於 1960 年代，應用 Variational schemes/Galerkin weighted residual technique 至有限元素，進行工程分析。
2. 1960 年代後，有限元素分析法，被廣泛應用於分析電磁場。
3. 1990 年起，新有限元素分析法耦合封閉形式之數值技巧，已能針對浮動邊界條件，進行電磁場相關問題分析。

### 5.2 變壓器之有限元素分析相關數值模擬程序

1. 藉微分方程式，定義/限定電磁場之待解問題的邊界值。
2. 求解微分方程式相關 variational formulation，以 energy-related functional 表示之。
3. 分割電磁場為許多三角形或四角形之小區域；分割數量端視待解問題之難易性或複雜性。

4. 選擇試驗解，並以待解問題之節點值定義/限定。
5. 最小化待解問題之節點值所屬 energy-related functional。
6. 解聯立代數方程式，並得電磁場之待解問題的分析值。

### 5.3 變壓器有限元素分析法之實例

壹內鐵式變壓器配置有八個圓盤線圈，其幾何尺寸如表一。於圓盤線圈之末端接頭，施加 10 伏特電壓；應用有限元素分析法，模擬分析變壓器暫態電壓反應。

內鐵式變壓器（八個圓盤線圈）有限元素分析區域示如圖 5.3.1；有限元素結構如圖 5.3.2；磁通密度向量分佈示如圖 5.3.3；相關有限元素與塊狀元素(L,C,and R)關係示如圖 5.3.4；末端接頭電壓/時間之關係示如圖 5.3.5；線圈中點的暫態電壓反應示如圖 5.3.6。

表 2 變壓器有限元素分析法實例之幾何尺寸

名稱	尺寸 ( mm )
鐵心半徑	47
鐵心長度	976
變壓器窗口寬度	976
分段線圈高度	10.4
分段線圈寬度	20
圓盤線圈內徑	71
兩連續圓盤線圈之中心距離	30
變壓器窗口與線圈末端之垂直距離	377.8
線圈軸長	230.8

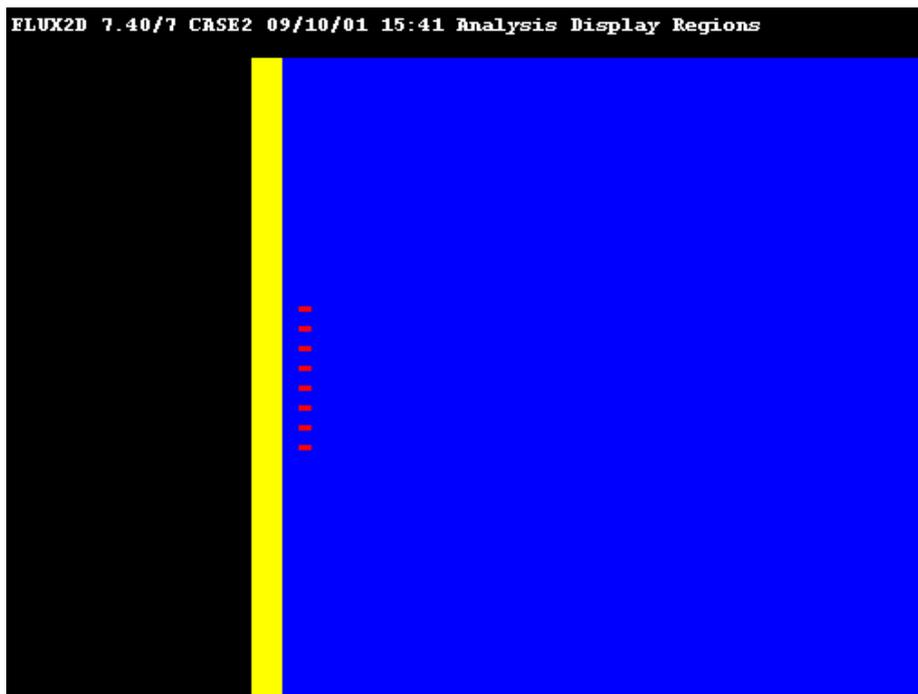


圖 5.3.1 內鐵式變壓器有限元素分析區域( 圖中,灰色小長方形:圓盤線圈,白色大長方形:鐵心,其他部分:絕緣油及外箱)

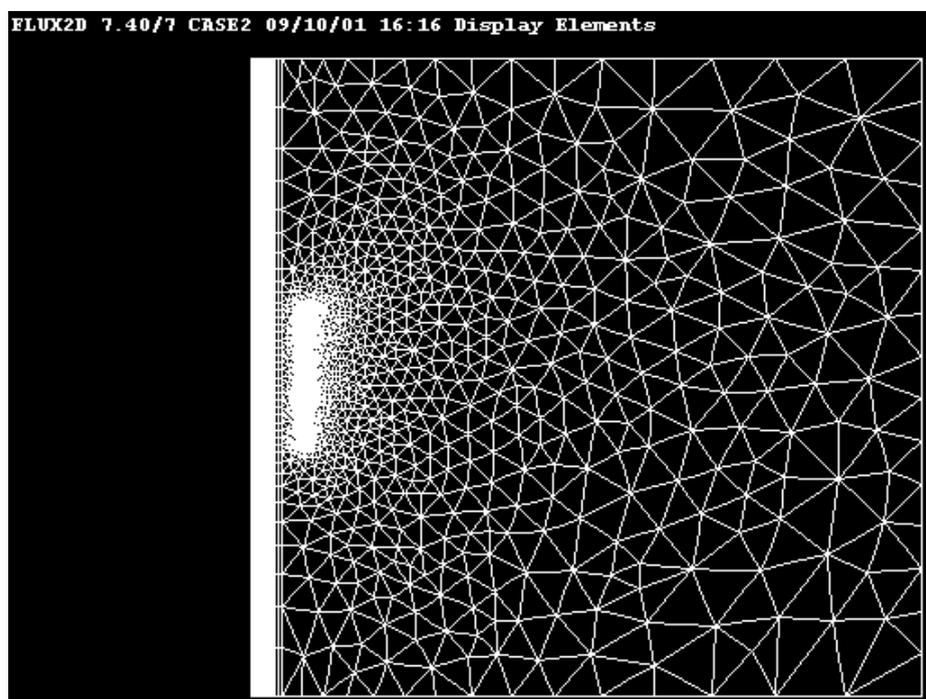


圖 5.3.2 內鐵式變壓器 (圓盤線圈) 有限元素結構

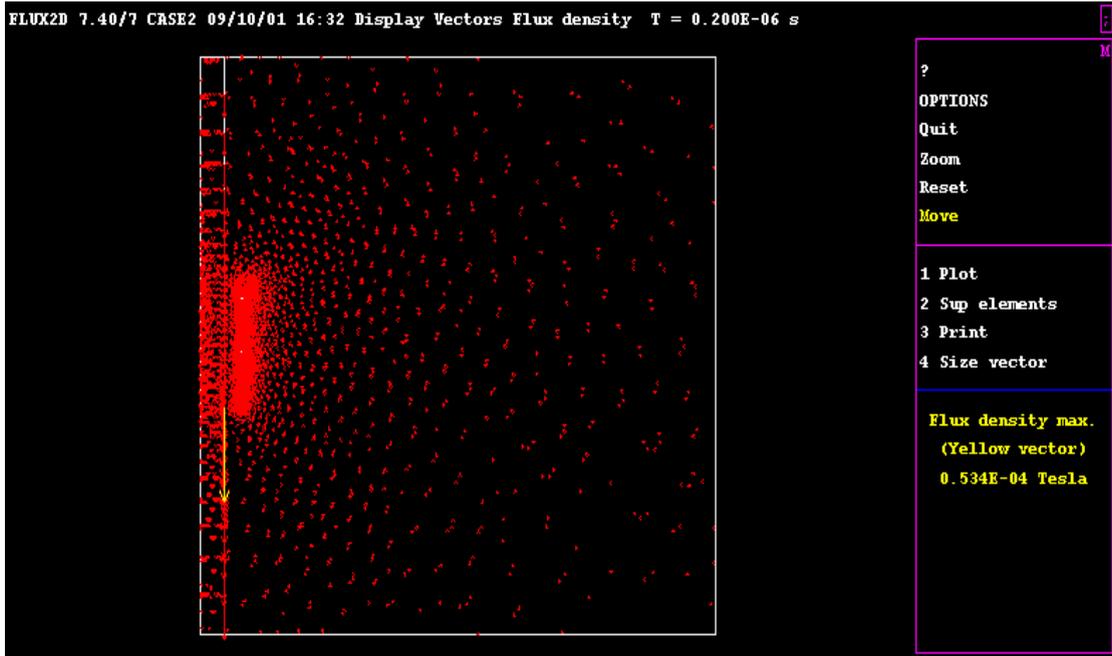


圖 5.3.3 內鐵式變壓器（圓盤線圈）磁通密度向量分佈

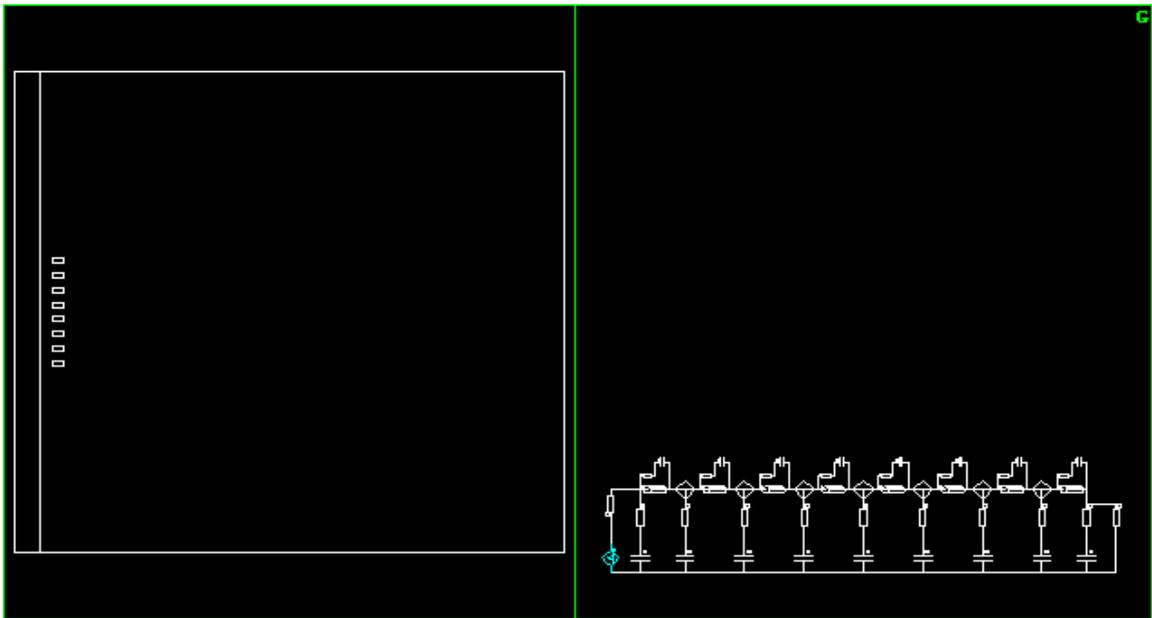


圖 5.3.4 內鐵式變壓器（圓盤線圈）有限元素與塊狀元素(L,C,and R)關係

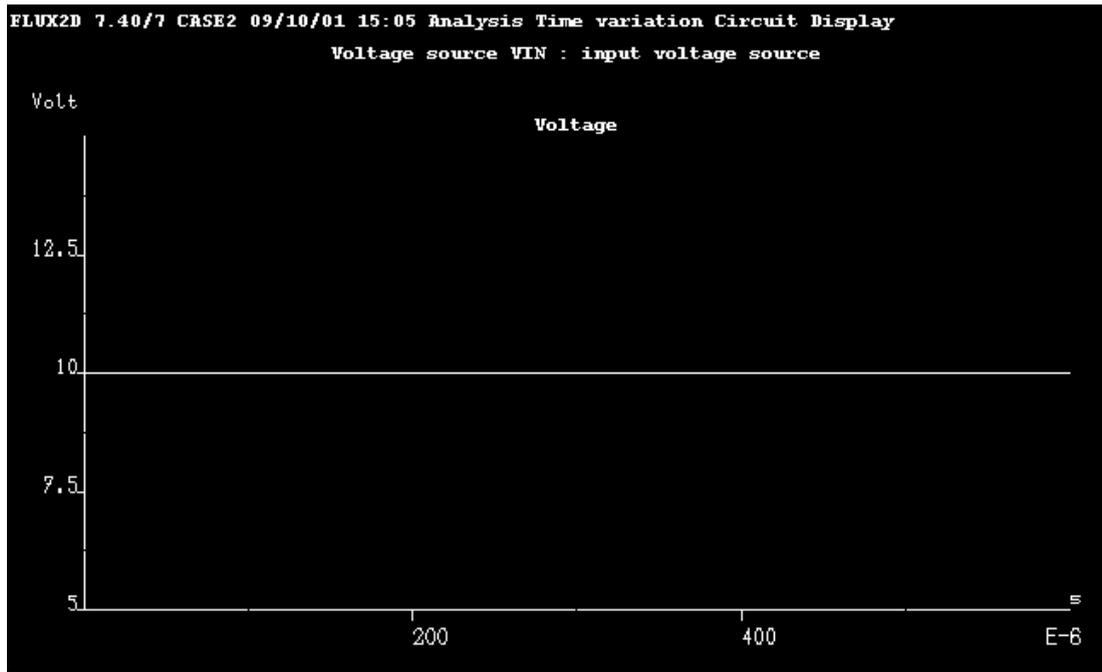


圖 5.3.5 內鐵式變壓器（圓盤線圈）末端接頭的電壓/時間關係

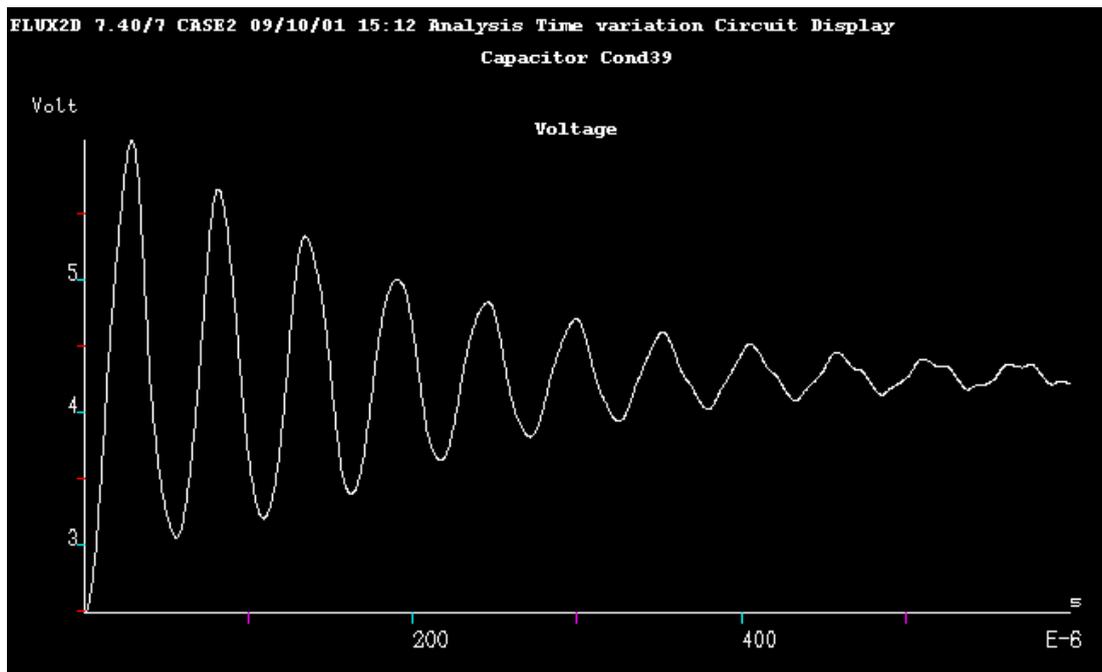


圖 5.3.6 內鐵式變壓器（圓盤線圈）之線圈中點的暫態電壓反應

#### 5.4 變壓器有限元素分析法之優點

1. 可多方面應用於工程分析。
2. 可模擬不規則幾何形狀及固定/浮動邊界條件。
3. 可達成穩定、準確之模擬分析。
4. 可處理非線性材料及渦流等問題。

#### 5.5 變壓器有限元素分析法之參考文獻

1. Greenwood 著作教科書：Electrical Transients in Power Systems.
2. Chari and Salon 著作教科書：Numerical Methods in Electromagnetism.
3. Rudenberg 著作教科書：Electrical Shock Waves in Power Systems.
4. Abbetti, Degenoff, Deleon, Wilcox 等著作論文

### 六、研習心得

- 一、引進有限元素分析法，有助於提昇變壓器故障/異狀、應力、渦流等之分析能力。
- 二、完成變壓器壓暫態現象相關分析實例，有助於模擬分析「電力系統局部區域可靠度」。
- 三、MAGSOFT 公司贈送 Flux 2D 7.4 及 Flux 3D 3.2 版 模擬程式，有助於與 MAGSOFT 公司持續進行技術交流。
- 四、Chari/Salon 贈送教科書(Numerical Method in Electromagnetism)，可提供有限元素分析法之理論參考。

### 七、變壓器有限元素分析之未來工作

- 一、變壓器有限元素分析法，需先予於頻域界定，以確保模擬分析正確性。
- 二、變壓器有限元素分析法，需進行模擬測定：引起暫態過電壓之共振頻率（或節點），以增進分析效率。
- 三、有限元素分析法，除應用於變壓器暫態過電壓研究之外，尚需應用於

其他電力設備（如電纜、套管、開關等）之暫態現象。上述模擬實例，可提供作為專題研討會之講義資料。

四、電力系統局部區域可靠度，將藉有限元素進行模擬分析。分析結果期能提供本所技術（或諮詢）服務參考。