

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)

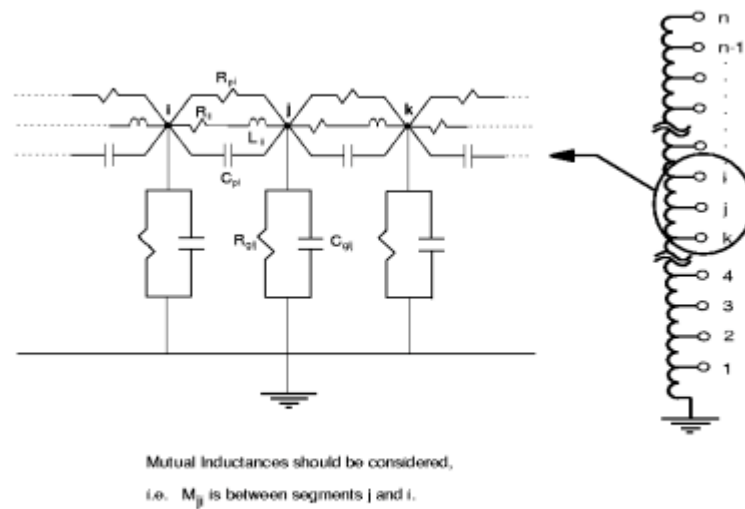


圖 4.3.1 塊狀參數模擬法相關分割區域之塊狀元素

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

$[I(s)]$ – 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。

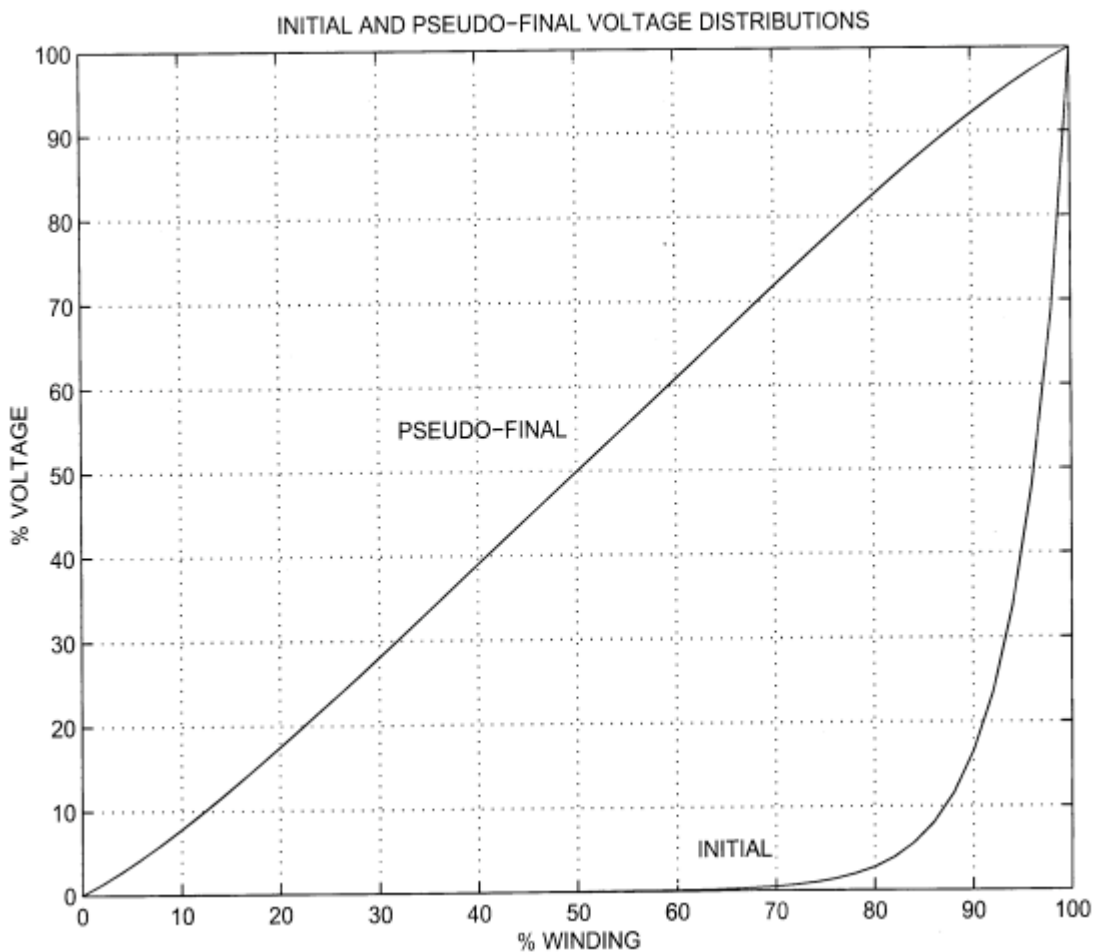


圖 4.4.1 線圈/繞組的時域暫態反應 (INITIAL：初始電壓/電流分佈期、PSEUDO-FINAL：電壓/電流週期震盪期)

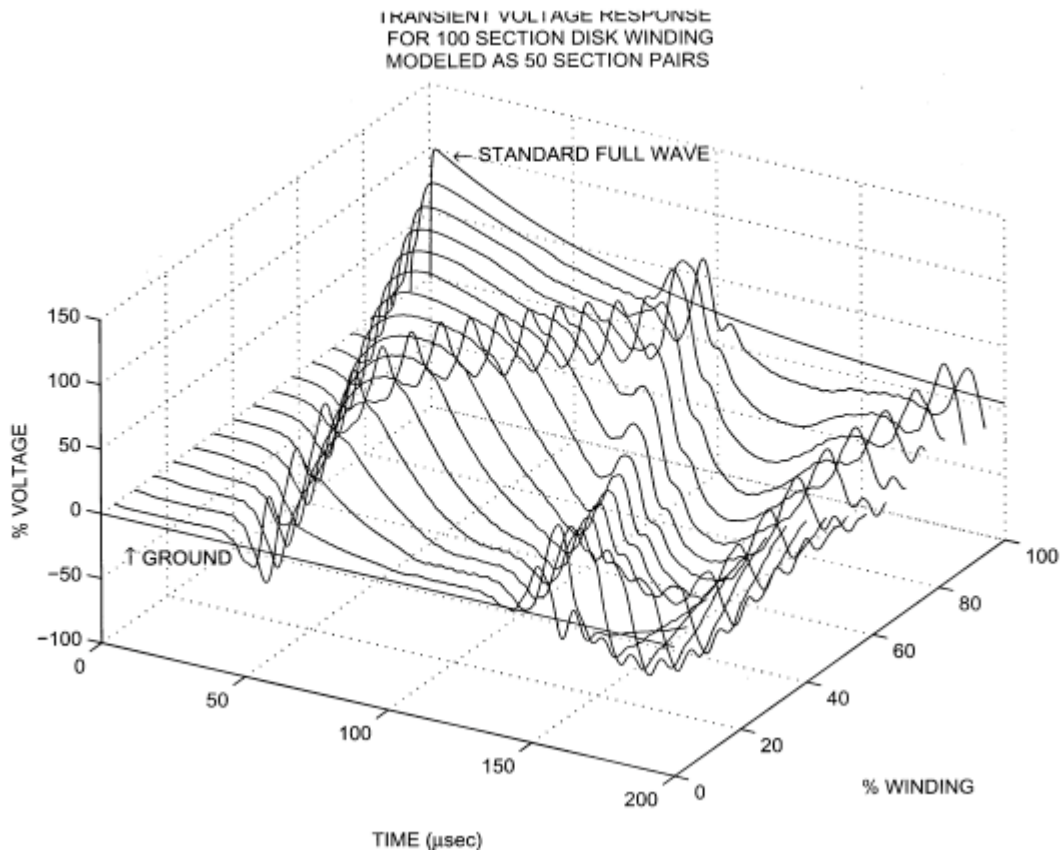


圖 4.4.2 線圈/繞組的時域暫態反應（電壓/電流非週期震盪期）

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。

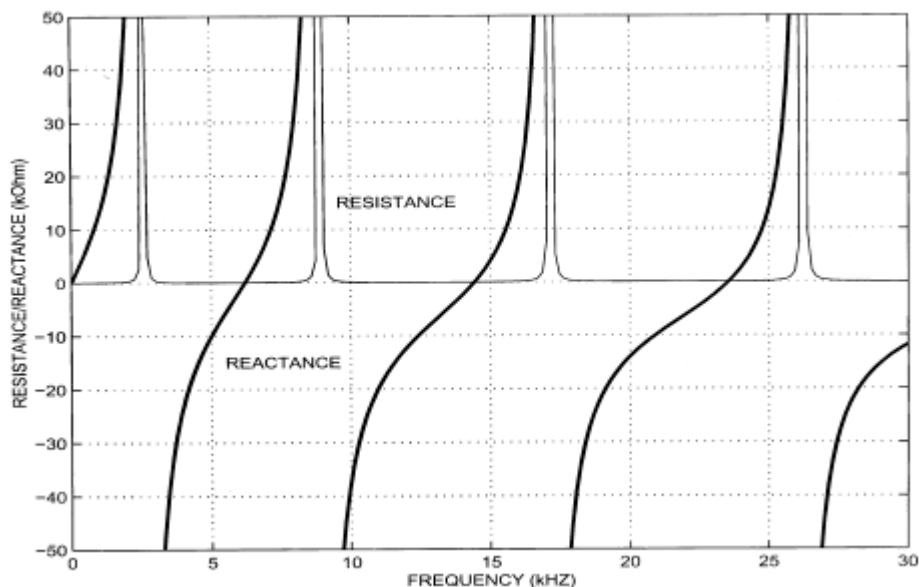


圖 4.5.1 線圈/繞組的阻抗與頻率關係

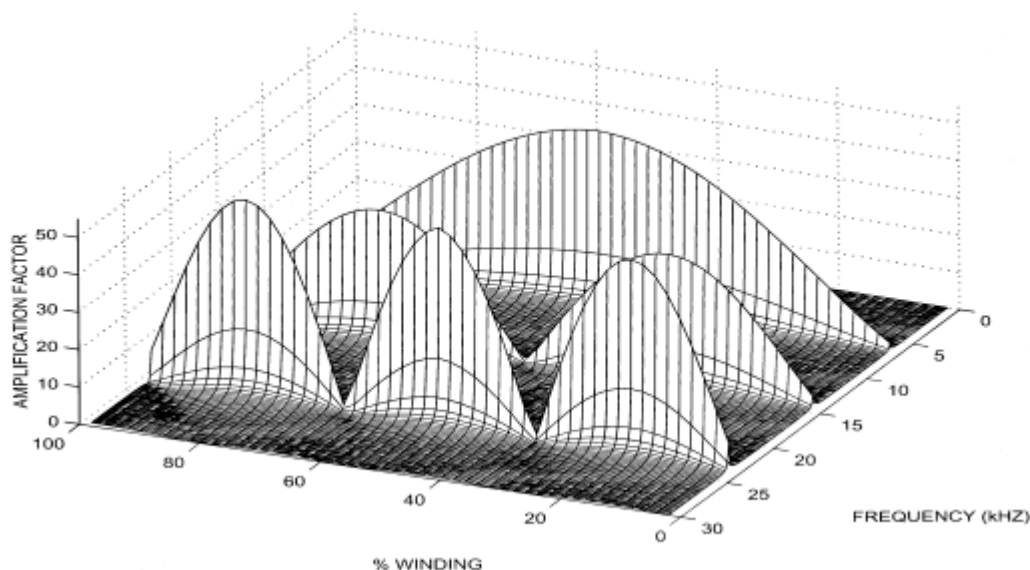


圖 4.5.2 線圈/繞組頻域暫態反應的相對放大因素

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。

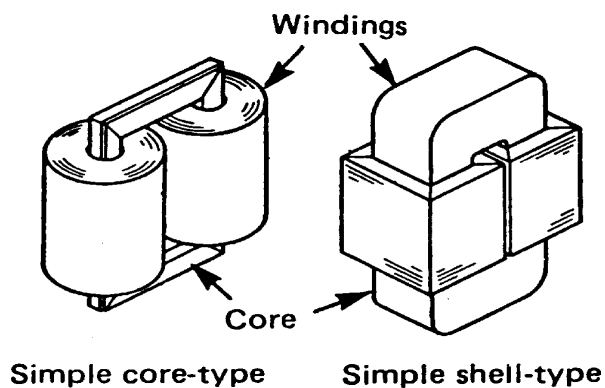


圖 4.6.1 基本內鐵式及外鐵式變壓器構造（圖中，Winding：繞組，Core：鐵心）

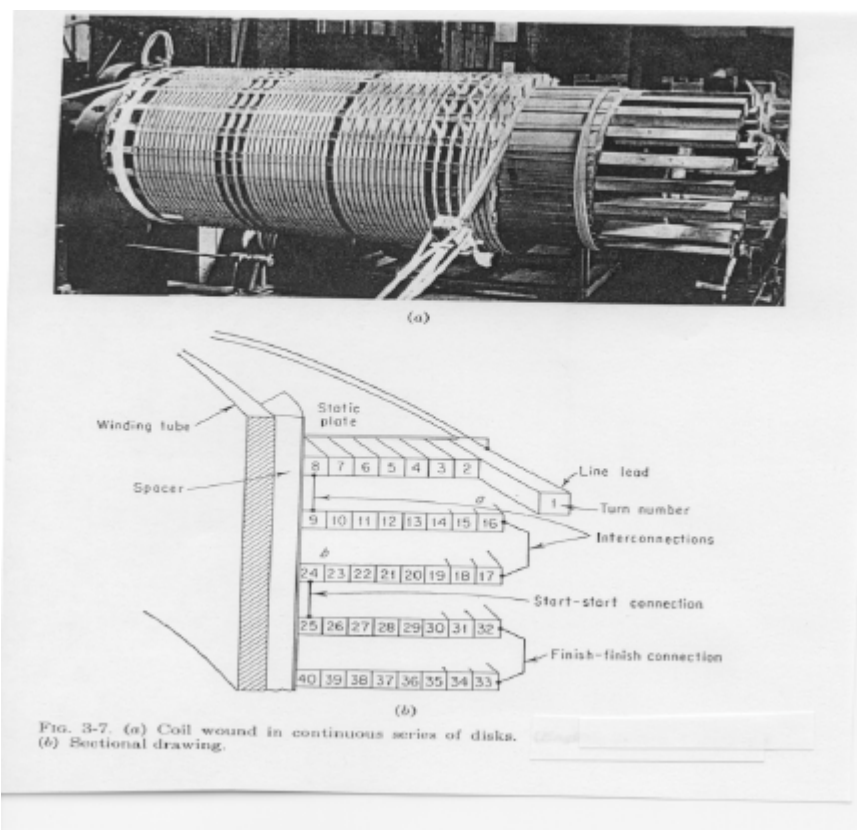


圖 4.6.2 內鐵式變壓器，圓盤型繞組（圖上部）及分割型繞組（圖下部）構造

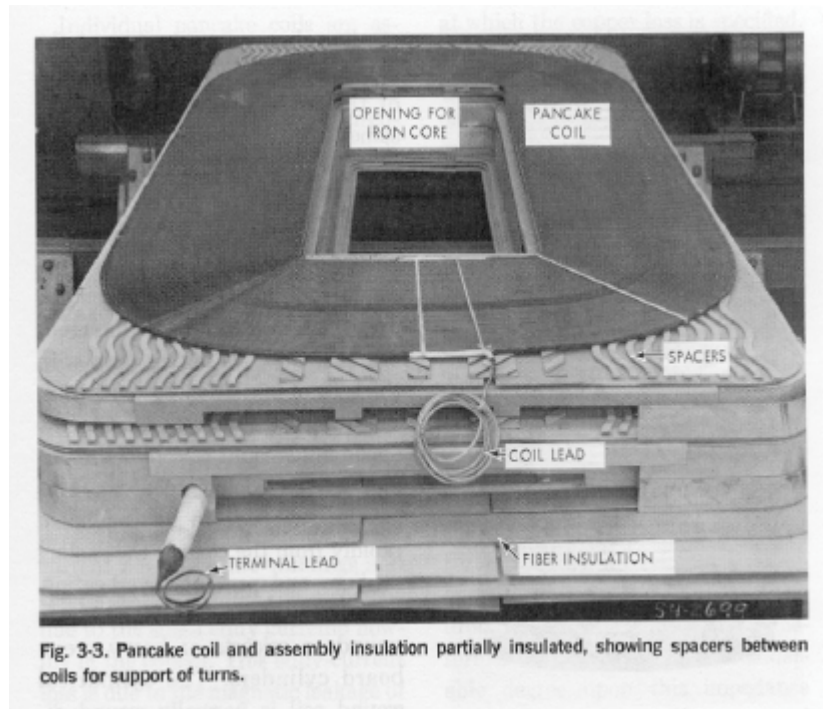


圖 4.6.3 外鐵式變壓器煎餅型繞組構造。

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

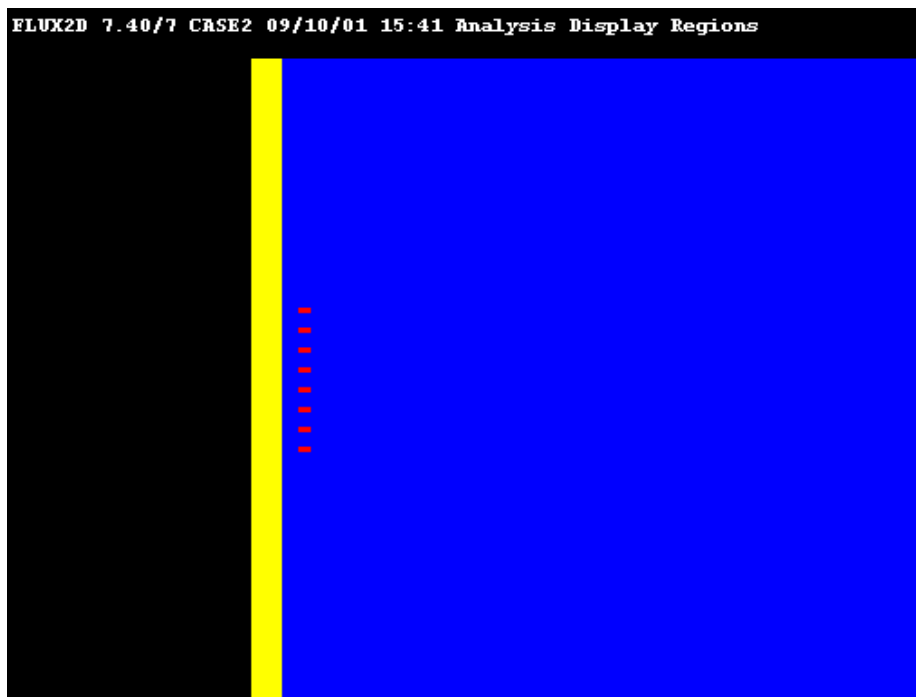


圖 5.3.1 內鐵式變壓器有限元素分析區域(圖中,灰色小長方形:圓盤線圈,白色大長方形:鐵心,其他部分:絕緣油及外箱)

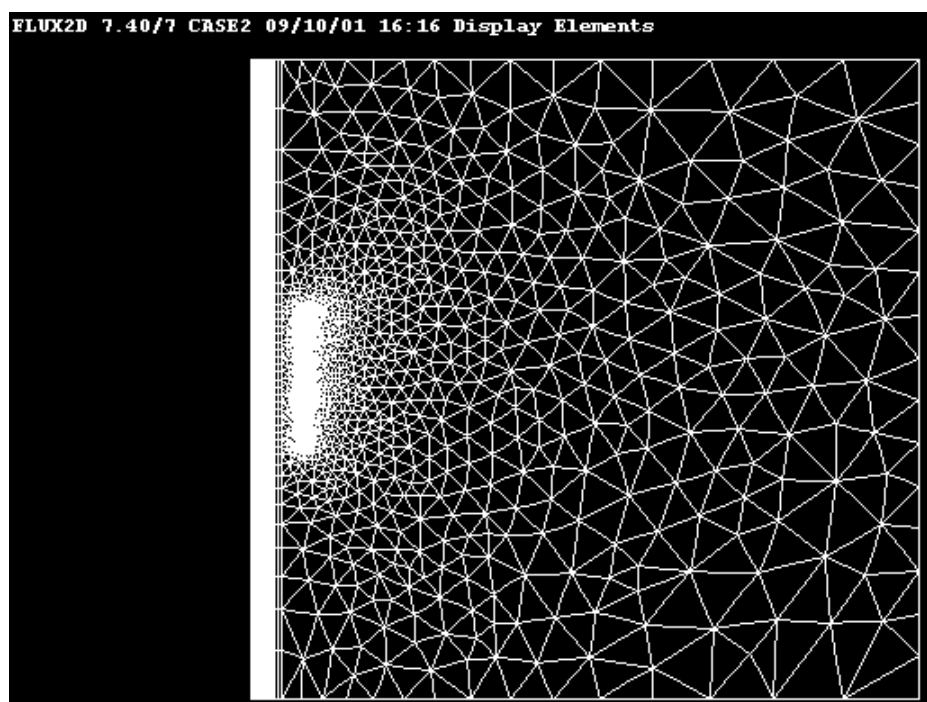


圖 5.3.2 內鐵式變壓器 (圓盤線圈) 有限元素結構

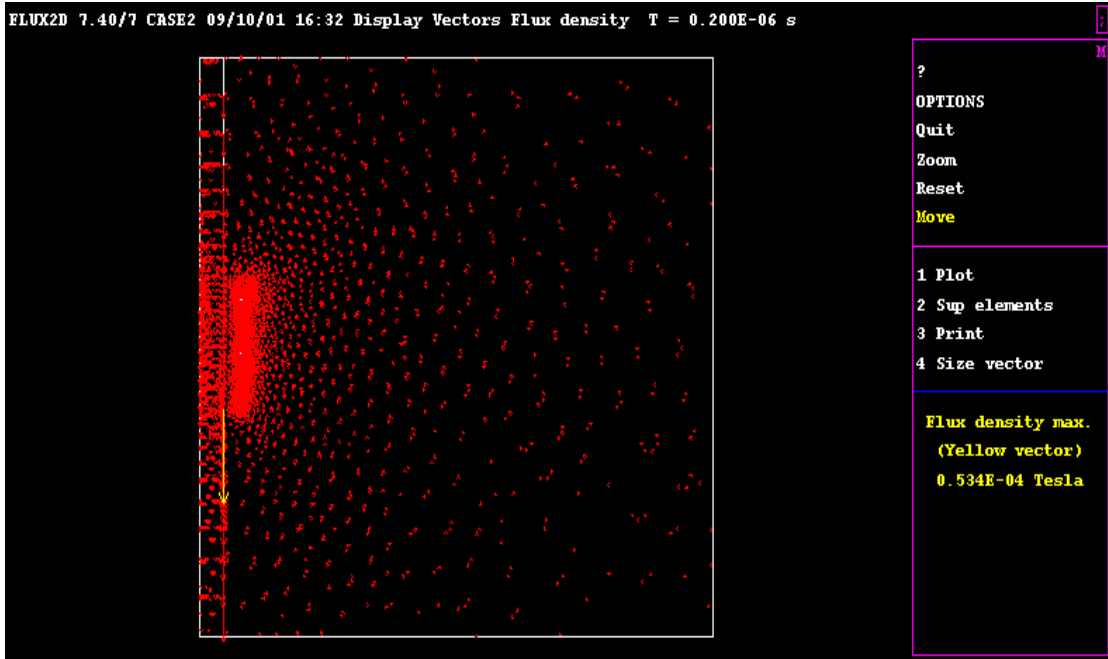


圖 5.3.3 內鐵式變壓器（圓盤線圈）磁通密度向量分佈

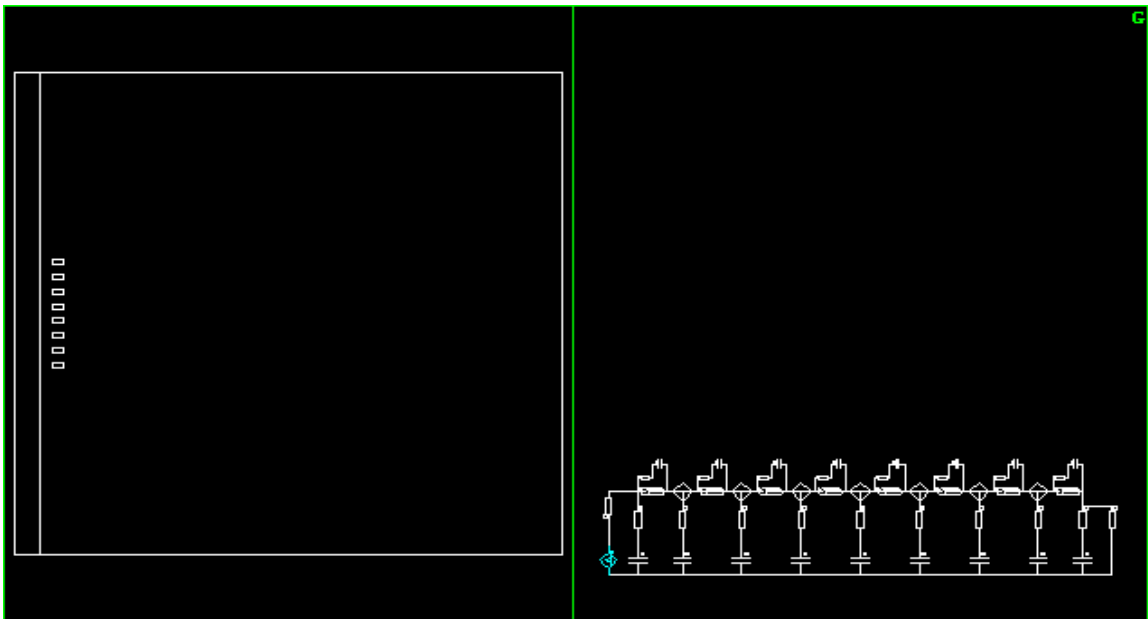


圖 5.3.4 內鐵式變壓器（圓盤線圈）有限元素與塊狀元素(L,C,and R)關係

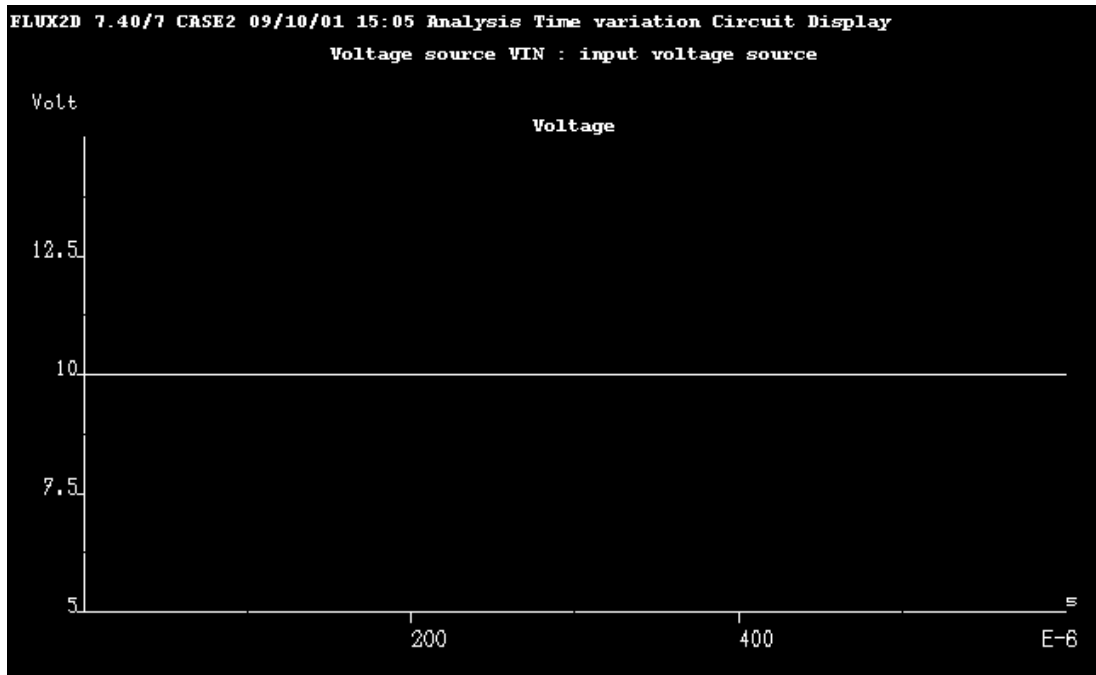


圖 5.3.5 內鐵式變壓器（圓盤線圈）末端接頭的電壓/時間關係

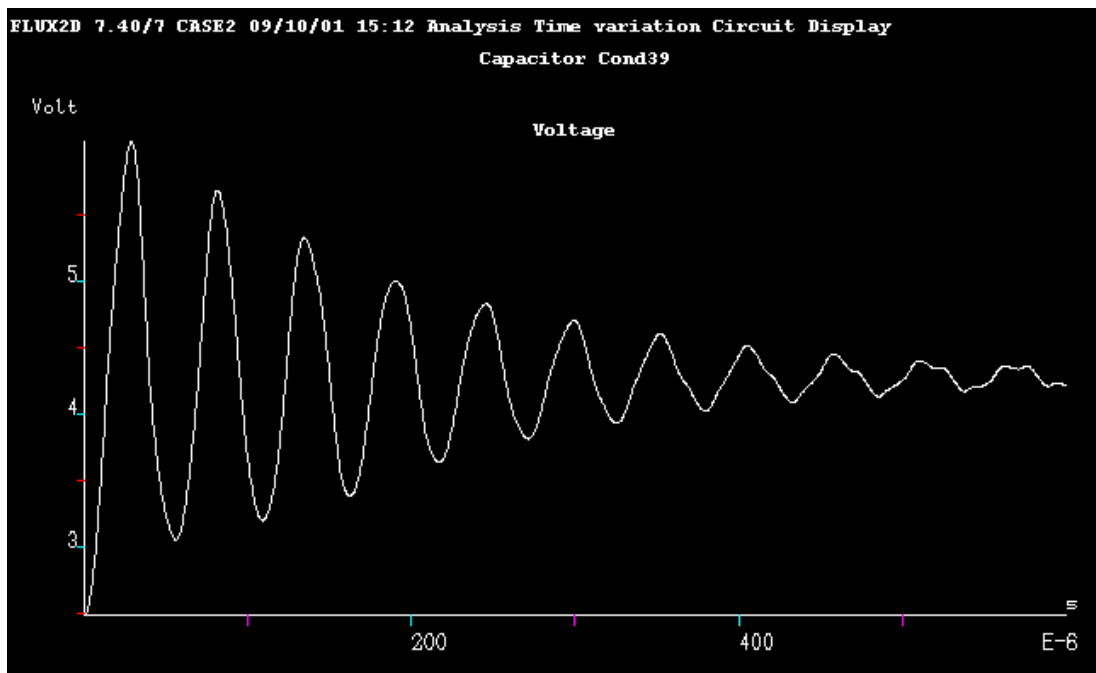


圖 5.3.6 內鐵式變壓器（圓盤線圈）之線圈中點的暫態電壓反應

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。