

# 考量暫態溫升模型之不斷電系統隔離變壓器最佳化設計

## Optimal Design of UPS Isolation Transformer Considering Transient Thermal Model

張宏展                      郭政謙                      林毅桐                      陳政傳  
Hong-Chan Chang      Cheng-Chien Kuo      Yi-Tung Lin      Cheng-Chuan Chen  
國立台灣科技大學 電機工程系  
Department of Electrical Engineering,  
National Taiwan University of Science and Technology

### 摘要

目前變壓器設計對於溫升方面，多半採用穩態溫升模型進行估算，惟針對不斷電系統隔離變壓器之應用，需規範特定時間點之暫態溫升限制，以符合實際需求。有鑑於此，本文針對不斷電系統隔離變壓器，建立具有暫態溫升之變壓器數值模型，並結合基因演算法進行最小化成本之最佳化設計。最後，本研究以實際的80kVA不斷電系統隔離變壓器為例，其模擬結果顯示藉由改良製造廠商之原始設計，確可達到提升效率、降低溫升以及成本最小化之目的。  
關鍵字：最佳化設計、基因演算法、隔離變壓器、暫態溫升模型。

### Abstract

At present, the design estimation of the transformer about temperature mostly use steady-state thermal model. Only the isolated transformer which applied in the Uninterruptible Power System (UPS) needs to take care of the transient thermal constraint. According to the above reason, this thesis establishes a numerical model within transient thermal simulation for the isolated transformer of UPS system and combines Genetic Algorithm (GA) to realize the optimal design for minimum cost. Finally, this research uses an actually 80KVA UPS isolated transformer as an example. The simulation results show that the efficiency, temperature rising and cost can be improved by modification the original design of the actually transformer.  
Keywords: optimal design, genetic algorithm (GA), isolation transformer, transient thermal model.

### I. 簡介

變壓器是建立在法拉第定律(Faraday's Law)下的一個電能裝置，用於進行電壓準位的轉換，並廣泛應用在電力系統、電力電子領域上，具有高效率、穩定性高與使用年限長等特點。變壓器的設計需要電磁學、磁路分析、電路分析、機械損失、熱轉換等知識，並建立數值模型藉以估測變壓器的特性，再經由設計者的實務專業判斷後，試做樣品以進行驗證，因此數值模型對於變壓器設計上是非常重要的。

變壓器數值模型是連結幾何結構與其特性的重要工具，表示數值模型的詳細程度會影響計算其特性的準確度，因此學者們針對此領域有許多的研究文獻[1-3]，主要是為了將設計時所需考慮的效應，盡其可能呈現在特性上，然而光是擁有計算特性的工具是不夠的，變壓器的設計需要考量鐵心與導線材料、尺寸限制、材料成本等，且設計結果必須符合要求規格與工業標準，使得整體設計複雜度大幅提高，若要降低

成本或提高效率則需要反覆計算才能達到。早期的研究是利用電腦進行試誤法，並根據結果調整結構參數[4]，其方式完全取決於設計者的經驗與背景知識，使得設計流程變得相當冗長。為了解決上述問題，加入演算法進行最佳化輔助設計勢在必行。

變壓器最佳化設計主要是針對幾何結構利用演算法進行搜索，找尋最符合要求的設計，以達到降低材料成本及提高效率等目標。變壓器最佳化設計的目標函數是屬於非線性、離散、不可微分，求解過程相當困難。因此過去有相當多文獻利用最佳化理論探討變壓器設計的課題[5-7]，其中基因演算法因具高度求得全域最佳解，且不受目標函數及控制變數之限制，備受矚目，於變壓器最佳化設計之案例，包括：低頻方面有利用雙目標的概念針對電力變壓器進行材料與運轉成本最小化[5]，以及應用於配電變壓器的多目標權重最佳化[6]；對於高頻方面也有文獻採用改良型基因演算法進行最佳化設計[7]。上述論文對於變壓器溫度方面，多半採用穩態溫升模型進行估算，唯針對不斷電系統(Uninterruptible Power System, UPS)隔離變壓器之應用，需規範特定時間點之暫態溫升限制，以符合實際需求。

有鑑於此，本文主旨在於建立具有暫態溫升之變壓器數值模型，利用基因演算法具有求得全域最佳解與免於陷入局部最佳解的特性，結合上述數值模型進行最小化成本之最佳化設計，考量包含操作環境與負載條件對於特性上的影響，以及電氣特性、穩態溫升與暫態溫升等限制條件。最後，本研究以實際的80kVA不斷電系統隔離變壓器為例，進行最佳化設計。

### II. 考量暫態溫升之變壓器數值模型

#### 2.1 變壓器規格簡介

不斷電系統架構如圖1所示，外部交流電AC由左端輸入，經由整流器轉為直流電DC進行儲存或供應給變流器輸出，其變流器所進行的動作是利用切換式電路將直流電轉為低頻方波後，經由隔離變壓器升壓並輸出給負載。

本文所設計標的物規格如表1所示，其中電源頻率50Hz是根據變壓器所使用的國家而定，且變壓器具有三組初級繞組共同輸入與一組次級繞組輸出，而幾何結構如圖2所示，鐵心分為左右心柱且具有相同繞組結構相互並聯以達到分流目的。

其中  $D$  為鐵心積厚， $E_u$  為軛鐵寬度， $H_w$  與  $B_w$  為鐵心窗口高度與寬度， $h_p$  與  $b_p$  為初級導線高度與寬度， $h_s$  與  $b_s$  為次級導線高度與寬度， $A_{Cu,P}$  與  $A_{Cu,S}$  為初、次級導線截面積。

表 1 變壓器規格

規格	額定值
額定容量( $S$ )	80 kVA
輸入電源頻率( $f$ )	50 Hz
初級額定電壓 ( $V_P$ )	105/105/105 V
次級額定電壓 ( $V_S$ )	240 V
絕緣等級	CLASS H 180 °C
工業標準	IEC 60076-11、IEC 62040-1

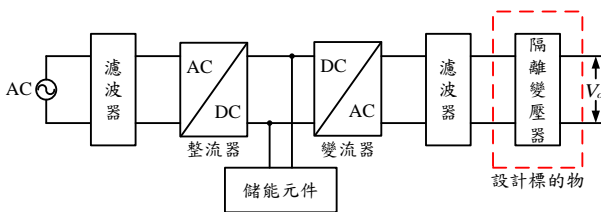


圖 1 不斷電系統架構圖

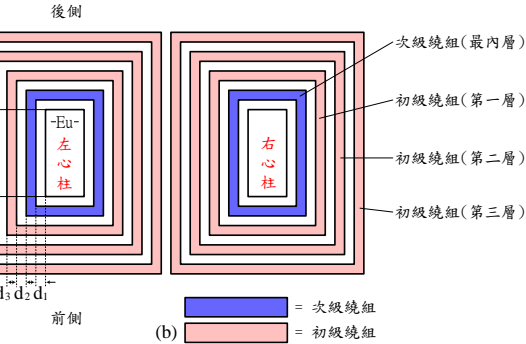
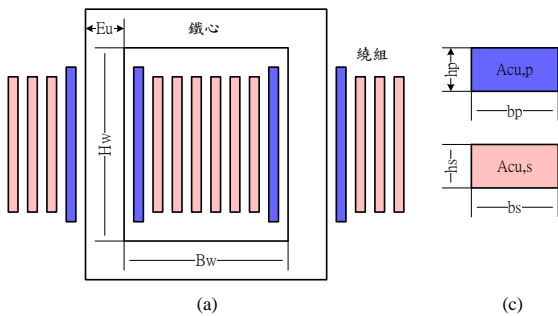


圖 2 (a) 變壓器前視截面圖 (b) 上視截面圖

(c) 初、次級導線截面圖

## 2.2 考量暫態溫升之變壓器數值模型

建立變壓器數值模型是進行設計時之必要步驟，目的是將幾何結構與規格參數經由理論計算出成本、電氣特性與溫升結果。本文所提出的數值模型計算流程如圖 3 所示，首先將設定完成的變壓器規格與模擬條件，連同式(1)所示之設計變數向量  $x$ ，經由幾何結構式計算出電氣特性，再依照負載條件(線性負載或非線性負載)計算諧波分量對鐵心損失  $P_c$  與繞組損失  $P_{Cu}$ ，所造成的增量損失影響。

$$x = [B, N_s, D, H_w, J_p, J_s, h_p, h_s] \quad (1)$$

其中  $B$  為磁通密度

$N_s$  為次級繞組匝數

$J_p$  與  $J_s$  為初、次級導線電流密度

其次，將損失造成的熱源、物件本身儲熱之體積熱容量  $C_{th}$ 、將熱散逸到室溫空間中的對流熱阻抗  $R_{conv}$  與各物件之間接觸傳導熱阻抗  $R_{cond}$ ，利用熱學與電學的類比性[8]，建立出如圖 4 所示暫態溫升模型，並計算每個物件在指定時間間距  $\Delta t$  內之暫態溫升，其中熱源與體積熱容量以並聯形式表示物件內能量的累積情形，而對流熱阻抗以可變形式表示空氣熱特性隨溫度而改變[9-11]。

最後，由於電氣特性與溫升會隨時間點而不同，因此數值模型的計算必須採用疊代方式來計算，本文在此以 1 分鐘為時間間距，持續疊代至加載時間後，則視為達到停止條件。此時，將成本、電氣特性與溫升結果進行輸出動作，以便進一步的分析或後續處理。

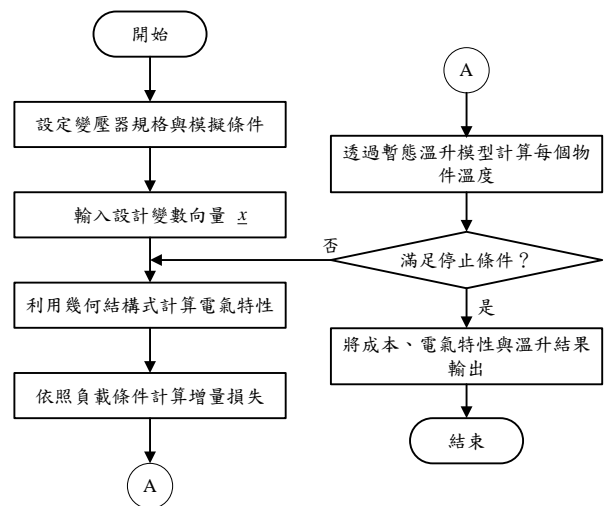


圖 3 數值模型計算流程图

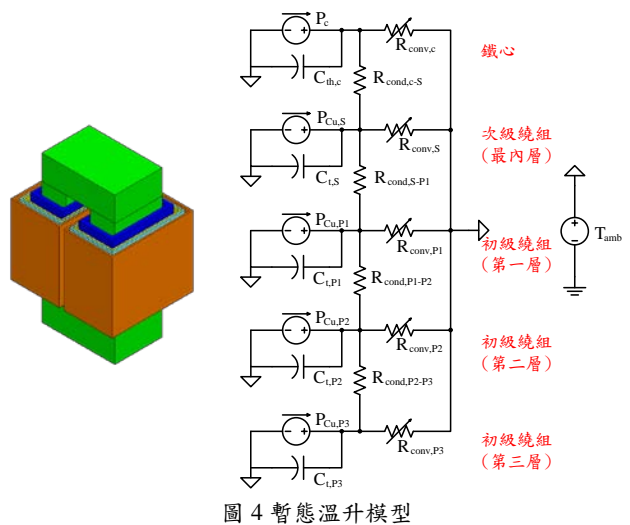


圖 4 暫態溫升模型

## 2.3 模擬與結果分析

為了確保整體數值模型的準確度，本文以前述 80kVA 不斷電系統隔離變壓器為例，輔以廠商所提供之實測資料，進行機箱內加載 85 分鐘模擬，其中變壓器是置於 3/4 面封閉之箱體中，箱體大小約寬 1M\*深 0.8M\*

高 2M，且箱內佈滿各種電器，最後將模擬數據與實測數據進行比較分析，若誤差度在許可範圍內，則可認定此數值模型在相同材料與工法下，改變其幾何結構時，也能準確估算出其電氣特性與溫升情形。

模擬與暫態溫升如圖 5 至 6 圖所示，其加載時間為 85 分鐘時模擬與實測數據比較如表 2 所示，可看出鐵心損失較實測高，其原因是經驗估算式所造成的誤差，若以額定容量為 80kVA 來看，影響幅度並不大，可視為鐵心損失估算較為保守。此外，鐵心溫升誤差最多為 6.9%，而繞組溫升誤差最多為 2.7%，分析其原因為材料熱特性無法完整精確的描述，以及暫態溫升模型是採用簡化模型，只考量表面平均溫度，此情形與實際上具有梯度變化之現象有些許差異。綜合而言，此模型對於初步估算變壓器特性，具有相當不錯的準確度。

表 2 加載時間為 85 分鐘模擬與實測數據比較表

項目	模擬數據	實測數據	誤差值
鐵心損失 $P_c$	499 W	425 W	17.4 %
繞組損失 $P_{Cu}$	1601 W	1621 W	1.2 %
滿載損失 $P_c + P_{Cu}$	2100 W	2046 W	4.6 %
效率 $\eta$	96.9 %	97.1 %	0.2 %
鐵心溫度	59.1 °C	65.5 °C	6.9 %
次級繞組(最內層)溫度	137.9 °C	136.9 °C	0.7 %
初級繞組(第一層)溫度	155.8 °C	160.1 °C	2.7 %
初級繞組(第二層)溫度	123.3 °C	121.6 °C	1.4 %
初級繞組(第三層)溫度	105.2 °C	104.7 °C	0.5 %

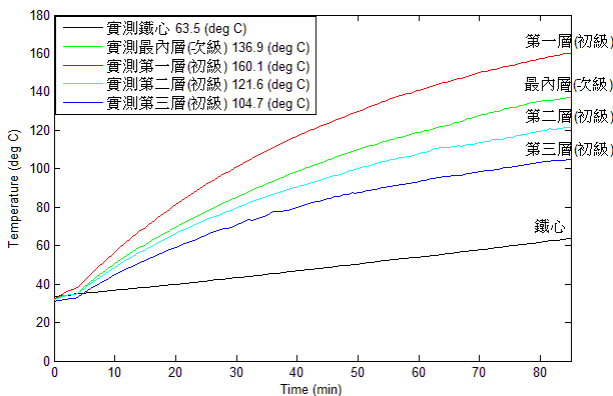


圖 5 實測 85 分鐘暫態溫升圖

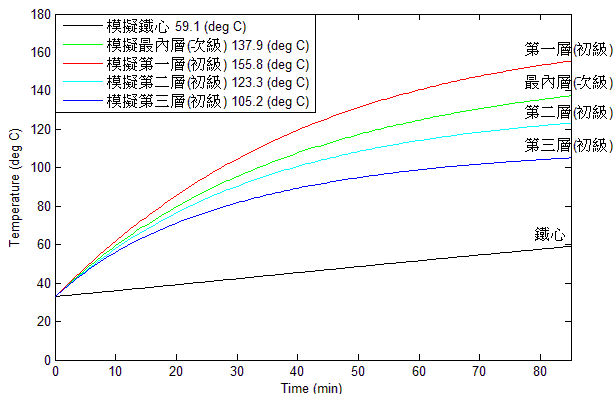


圖 6 模擬 85 分鐘暫態溫升圖

### III. 不斷電系統隔離變壓器之最佳化設計

#### 3.1 問題描述

不斷電系統隔離變壓器之最佳化設計問題，主要是依據規格設計值，經由決定變壓器的幾何結構來達到最小化成本的要求。本文的目標函數即是評估建製變壓器所需要花費的金錢，稱為材料成本(以符號 cost 表示)，定義如式(2)所示，在滿足所有的限制條件下，尋找一組設計變數向量  $\underline{x}$ ，使得 cost 最小化。

$$\text{cost}(\underline{x}) = c_1 m_c + c_2 m_{Cu} \quad (2)$$

其中  $c_1$  為每公斤矽鋼片價錢， $c_2$  為每公斤導線價錢， $m_c$  為鐵心重量， $m_{Cu}$  為導線重量。

針對目標變壓器之最佳設計問題，在幾何結構與電氣特性上有許多實際的限制條件必須考慮，以符合實際應用上的需求，因此本文將相關的限制條件分成兩大部分表示，分別為式(3)至式(5)幾何結構限制條件，以及式(6)至式(12)電氣特性限制條件，詳細如下所列：

$$D \leq H_w \quad (3)$$

$$\begin{cases} N_P \cdot h_P \leq 0.9 H_w \\ N_S \cdot h_S \leq 0.9 H_w \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} TL \leq TL_{\max} \\ TW \leq TW_{\max} \\ TH \leq TH_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_c \leq NLL_{\max} \\ P_c + P_{Cu} \leq LL_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$B \leq B_{sat} \quad (7)$$

$$I_e \leq I_{e,\max} \quad (8)$$

$$\eta \geq \eta_{\min} \quad (9)$$

$$VR \leq VR_{\max} \quad (10)$$

$$\%Z \leq \%Z_{\max} \quad (11)$$

$$\Delta T \leq \Delta T_{\max} \quad (12)$$

其中  $TL$ 、 $TW$ 、 $TH$  為變壓器整體之長度、寬度、高度尺寸， $NLL$  與  $LL$  為鐵心損失與滿載損失， $B_{sat}$  為磁通密度飽和點， $I_e$  為無載電流， $\eta$  為效率， $VR$  為電壓調整率， $\%Z$  為短路阻抗值， $\Delta T$  為溫升值。

#### 3.2 基因演算法求解過程

基因演算法是利用基因組成的染色體來描述問題，且都會對應至一適合度來判別染色體的優劣，因此整個問題的求解便在適合度進化的過程中進行，透過染色體複製、基因交換與基因突變三個動作，持續進化以求得適合度最高的染色體[12]。有鑑於基因演算法運用於此領域有相當多成功的案例[5-7]，因此本文便選用基因演算法來進行不斷電系統隔離變壓器之最佳化設計，以達到最小化成本之目的，最佳化流程如圖 7 所示，首先進行參數設定與變數初始化，接著隨機產生初始族群中每個染色體之基因，其中染色體代表變壓器設計變數向量，初始族群產生完畢後，將設計變數向量輸入變壓器數值模型求得材料成本，再計算出所對應之適合度。本文最佳化問題之目標為成本最小化，所以其適合度函數為式(13)，目的是將最小化的問題轉換成最大化的問題，以符合適合度需求。

$$\text{Fitness} = (\text{cost})^{-1} \quad (13)$$

隨著繁衍過程的進行，直到繁衍代數超過最大允許子代數或最佳解維持一定子代數皆無改變為止，本文所設定的最大允許子代數為 1000 代，最佳解維持 100 代不變則視為收斂，便進行結果輸出，而本文所有研究皆以 MATLAB 來達成。

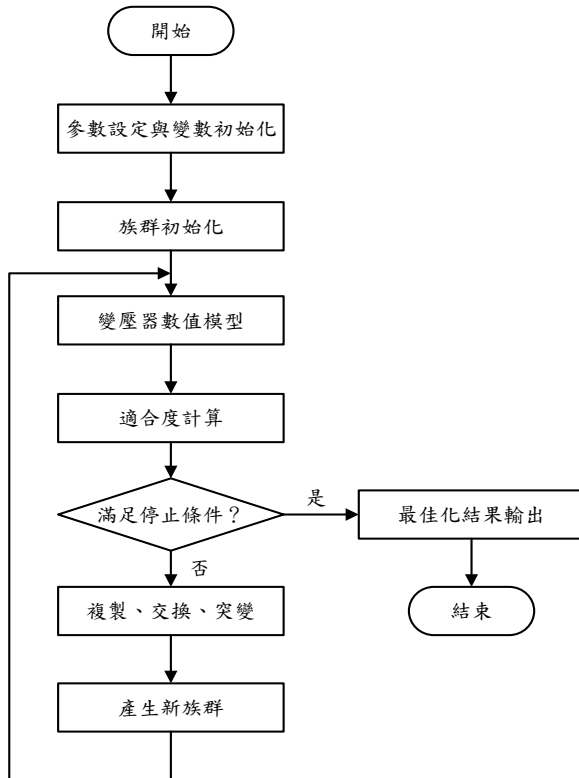


圖 7 以基因演算法求解變壓器最佳化流程圖

### 3.3 實例應用

本文以前述之 80kVA 不斷電系統隔離變壓器為對象，利用基因演算法進行其設計變數最佳化，以改良此變壓器，達到提升效率、降低溫升以及成本最小化之目的。

模擬條件為將變壓器置入不斷電系統機箱內環境，其詳細設定如表 3 所示，其中電源波形為切換式電路所輸入的低頻方波，且調整輸出電壓保持 220V，而散熱形式則為部分強制對流，即機箱內有風扇吹送風速 0.07 (m/s) 之強制對流，施加於鐵心與次級繞組間之氣道，其餘則保持自然對流形式，此外，負載條件為功率因數 0.8 之非線性負載。限制條件設定值如表 4 所示，其中  $\Delta T_{S,max}$  為 IEC 60076-11 規範的穩態溫升限制， $\Delta T_{2H,max}$  為客戶要求之 2 小時暫態溫升限制。

經由基因演算法求解之最佳化結果表 5 所示，項目包含設計變數向量及成本與電氣特性兩部分，其中原始結構則代表最佳化前的幾何結構與變壓器特性，可看出溫升部分超過限制值，且效率也低於 97%，因此原始結構並不合乎規定，有鑑於此而進行基因演算法最佳化設計，使其特性能夠符合規範要求。從最佳化後之結果可看出，改良結構後其穩態溫升與 2 小時暫態溫升皆低於限制值，且效率也提升至 97%，雖然材料成本增加了 2858(NTD)，但整體而言，本文所提出的最佳化運作流程，成功達到改良原始架構以符合效率與溫升限制之目的。

表 3 模擬條件設定表

項目	設定值	項目	設定值
電源波形	方波 50 Hz	功率因數	0.8
輸入電壓	依負載而變	散熱型式	部分強制對流
輸出電壓	220 V	環境室溫	33 °C
負載條件	非線性負載		

表 4 限制條件設定表

項目	限制值	項目	限制值
$TL_{max}$	450 mm	$I_{e,max}$	10 A
$TW_{max}$	450 mm	$\eta_{min}$	97 %
$TH_{max}$	700 mm	$VR_{max}$	2 %
$NLL_{max}$	600 W	$\%Z_{max}$	4 %
$LL_{max}$	2200 W	$\Delta T_{S,max}$	125 °C
$B_{sat}$	1.40 T	$\Delta T_{2H,max}$	120 °C

表 5 原始結構與最佳化結果比較表

項目	原始結構	改良後結構	
設計變數向量	$B$ (T)	1.39	1.37
	$N_s$ (turns)	41	41
	$D$ (mm)	195	229
	$H_w$ (mm)	400	481
	$J_p$ (A/mm <sup>2</sup> )	1.32	1.10
	$J_s$ (A/mm <sup>2</sup> )	1.39	0.99
	$h_p$ (mm)	16.0	22.7
	$h_s$ (mm)	8.0	6.7
	$N_p$ (turns)	18	18
	$E_u$ (mm)	100	86
	$B_w$ (mm)	100	107
	$b_p$ (mm)	6.0	5.0
	$b_s$ (mm)	15.0	25.0
成本與電器特性	cost (NTD)	16950	19808
	$NLL$ (W)	499.1	536.6
	$LL$ (W)	2179.5	1977.5
	$I_e$ (A)	9.45	9.66
	$\eta$ (%)	96.7	97.0
	$VR$ (%)	1.68	1.39
	$\%Z$	2.93	2.98
	$\Delta T_S$ (°C)	147	124
$\Delta T_{2H}$ (°C)	135	102	

## VI. 結論

本文所建立的不斷電系統隔離變壓器之數值模型，除了利用幾何結構式計算電氣特性外，更考量負載條件造成的損失增量，以及計算特定時間點溫度之暫態溫升模型，使數值模型能夠完整呈現出變壓器的材料成本、電氣特性與溫升結果，並利用基因演算法具有求得全域最佳解與免於陷入局部最佳解的特性，結合上述數值模型進行最小化成本之最佳化設計，結果顯示本文所提出的方法確能成功達到改良原始架構以符合效率與溫升限制之目的，足以驗證其實用性。

### 參考文獻

- [1] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, and A. G. Kladas, "Transformer Design and Optimization: A Literature Survey," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1999-2024, 2009.
- [2] 鄭至焜, 「應用非對稱線圈結構降低變壓器湧入電流之研究」, 博士論文, 國立成功大學電機工程研究所, 2004年。
- [3] S. Charap, and F. Judd, "A core loss model for laminated transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 10, no. 3, pp. 678-681, 1974.
- [4] A. Rubaai, "Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1174-1181, 1994.
- [5] H. Li, L. Han, B. He et al., "Application research based on improved genetic algorithm for optimum design of power transformers," *The Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2001, vol.1, pp. 242-245.
- [6] S. Elia, G. Fabbri, E. Nistico et al., "Design of cast-resin distribution transformers by means of genetic algorithms," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2006, pp. 1473-1477.
- [7] C. Versele, O. Deblecker, and J. Lobry, "Multiobjective optimal design of high frequency transformers using genetic algorithm," *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009, pp. 1-10.
- [8] G. Swift, T. S. Molinski, and W. Lehn, "A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 171-175, 2001.
- [9] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, "Dynamic thermal modelling of power transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197-204, 2005.
- [10] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, "Dynamic thermal modeling of distribution transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 1919-1929, 2005.
- [11] I. Villar, U. Viscarret, I. Etxeberria-Otadui et al., "Transient thermal model of a medium frequency power transformer," *IEEE Conference on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1033-1038.
- [12] 郭政謙, 「應用多目標規劃法之配電自動化決策軟體」, 博士論文, 國立台灣科技大學電機工程研究所, 1998年。