

單相感應發電機之 運轉模擬與分析

聖約翰科技大學 潘仲葳
臺北市立南港高級工業職業學校 圖書館主任 丁一能 推薦

摘 要

本研究針對單相感應發電機 (Single-Phase Induction Generator, SPIG) 的穩態運轉進行模擬分析，並對單相感應發電機之主繞組外接並激電容與串激電容後產生的自我調整特性進行研究。本文將研究短並聯與長並聯的自我調整架構應用於單相感應發電機系統，分析改善單相感應發電機電壓調整率的效果。

此外，本文並提出一套快速疊代模擬演算法，本演算法以兩相對稱分量等效電路 (two-phase symmetrical components equivalent circuit) 為基礎可以迅速而正確地模擬單相感應發電機各種運轉狀態。為測試本方法之可行性，本文以一具馬達驅動單相感應發電機進行測試，實測數據與模擬結果極為接近，結果證明本方法兼具效率與可靠性。

關鍵詞：單相感應發電機，短並聯自我調整架構，長並聯自我調整架構，兩相對稱分量

壹、緒論

由於石化能源日漸減少，傳統能源供給日漸短絀已是不爭的事實。此外，環保議題逐漸受到重視，在 2015 年 12 月巴黎全球氣候峰會已通過歷史性協議，力保在本世紀結束之前，全球均溫上升不超過攝氏 2 度，致力遏止全球暖化，全球二氧化碳的總排放量將受到管制。因此，裝置容量大之集中式熱力發電機組的增設將日益困難，小型分散式發電系統將成為電源開發的新途徑。而風力、太陽能與小型水力發電正是分散式再生發電的主流，因此，風力、太陽能與小型水力發電的開發已成為電力工程中極為重要的課題。

風力發電是綠色發電系統中少數技術成熟且符合經濟考量的發電方式，風力發電的能源來自風，台灣有得天獨厚的風力資源，每年約有半年以上的東北季風，而台灣西部沿海風力資源豐富，風力發電機組裝設數量非常多。尤其在用電量日增的台灣，風力發電的技術開發更是刻不容緩的。近年來風力發電機組已大量的設置在台灣西部海岸，主要原因是風力發電具有高效率 and 低污染的特性。台灣的河川水力資源豐沛，但由於水權與環保爭議，大型水庫的開發已達飽和，故而在本島大型水力發電機組的增設，可能性極低。但利用河川之自然落差，仍可在不需增建水庫的條件下，裝設小型發電機組。由於可供開發的水力資源極多，因此，在台灣小型水力發電機組也是極具發展性的。

現有各種風力與小型水力發電機中以感應發電機使用最為廣泛，由於小型發電系統之負載往往只需單相電源，因此，三相發電機並不適用於裝置容量小於 1kW 之小型風力或水力發電機。解決方法有兩種：第一種為三相感應發電機之單相運轉，三相繞組處於不平衡運轉狀態，且設備利用率較低 (Chan, et al 2004)。另一種為直接使用單相感應發電機 (Haque, 2012)，本研究將針對獨立運轉之單相感應發電機進行模擬與穩態運轉特性的探討。

由於單相感應發電機缺少自身的激磁源，以致無法產生發電機所需的虛功率，因此獨立運轉的單相感應發電機必須在主繞組輸出端並聯電容以供應虛功率並利用電容自激 (Capacitor Self Excitation)。但獨立運轉之自激式單相感應發電機運轉的最大缺點是其電壓調整極差，即使原動機維持固定轉速，由於負序分量的影響，

發電機的輸出電壓與頻率仍隨負載電流巨幅變動，且電壓變動率遠大於三相感應發電機。由典型獨立運轉感應發電機之外部特性曲線觀察可知其電壓變動很大，而且輸出電流只到達額定值的 45%。

針對此缺點已有研究進行研究改良，提出在發電機主繞組與負載間串聯電容器以供應額外的虛功率補償，進而改善電壓調整率，這是相當可行的解決策略 (Murthy, et al 2012)。利用串聯與並聯電容器對感應發電機主繞組之輸出端電壓進行自我調整 (Self Regulated)，而串聯電容器接線方式可分為長並聯 (Long Shunt) 與短並聯 (Short Shunt) 兩種接線。本文將分別針對長並聯與短並聯架構進行研究，以快速疊代模擬演算法模擬發電機在各種架構下的運轉狀態。分析在不同的串並聯電容組合下，電壓調整率的變化結果。

本論文共分為伍節，第壹節緒論之後，其餘各節的內容分別是：第貳節敘述單相感應發電機短並聯架構之運轉模擬。第參節提出單相感應發電機長並聯架構之運轉模擬。第肆節提出各種架構之單相感應發電機運轉模擬數據與實測結果，並進行分析討論。

貳、單相感應發電機短並聯架構之運轉模擬

現有研究中對自激式單相感應發電機的等效電路分析有兩種方法：兩相對稱分量等效電路 (Chang, et al 2016) 與 d q 軸等效電路 (d-axis & q-axis equivalent circuit) (Ojo, et al 2012)。本文採用兩相對稱分量等效電路，發電機的主繞組連接串聯電容器 (C_{sc}) 和並聯電容器 (C_{sh})，發電機的主繞組再外接負載，單相感應發電機短並聯架構如圖 1 所示

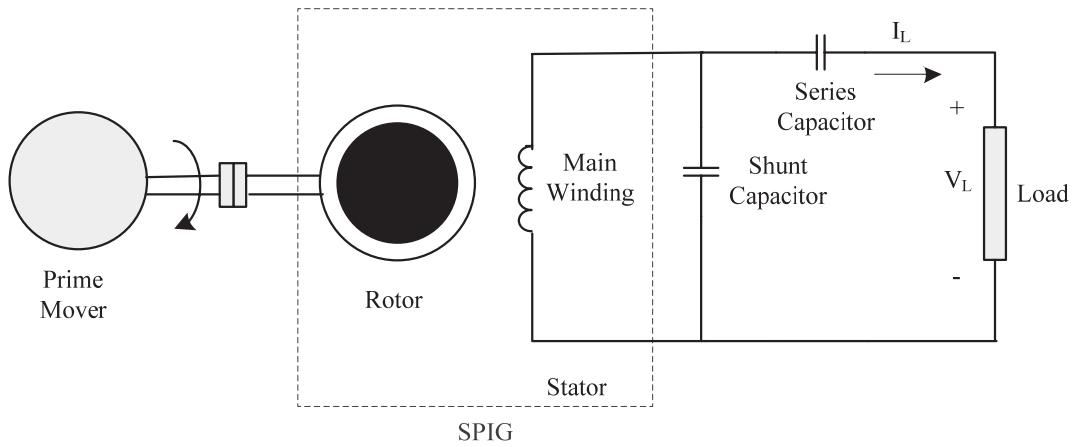


圖 1 單相感應發電機之短並聯架構

單相感應發電機短並聯架構之兩相對稱分量等效電路如圖 2 所示，在圖 2 等效電路中各符號的定義詳見附錄。由於圖 2 等效電路較複雜不易分析，因此將圖 2 化簡為 4 個阻抗 (Z_1, Z_{2b}, Z_{2f}, Z_3) 串聯之簡化電路如圖 3 所示。

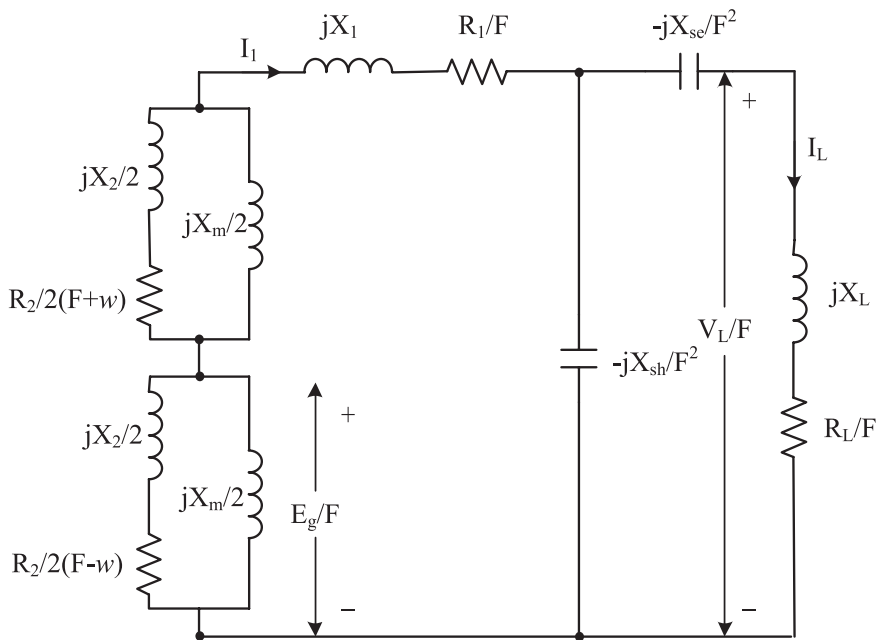


圖 2 短並聯單相感應發電機之兩相對稱分量等效電路

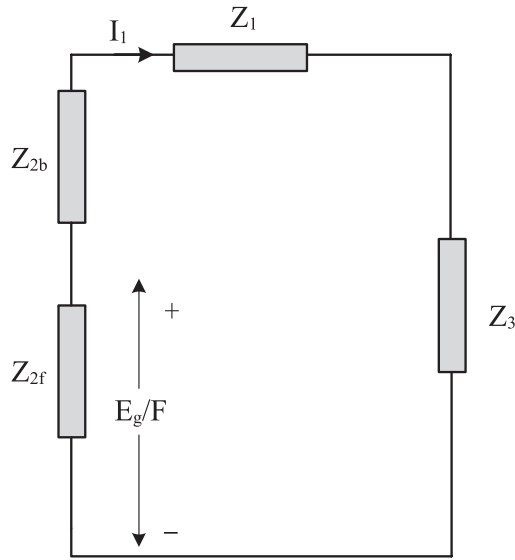


圖 3 短並聯單相感應發電機之簡化電路

由圖 3 可列出下列 4 個阻抗方程式：

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \quad (1)$$

$$Z_{2b} = \left(\frac{1}{j\frac{X_m}{2}} + \frac{1}{\frac{R_2}{2(F+\omega)} + j\frac{X_2}{2}} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$Z_{2f} = \left(\frac{1}{j\frac{X_m}{2}} + \frac{1}{\frac{R_2}{2(F-\omega)} + j\frac{X_2}{2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$Z_3 = \left(\frac{1}{-j\frac{X_{sh}}{F^2}} + \frac{1}{\frac{R_L}{F} + jX_L - j\frac{X_{se}}{F^2}} \right)^{-1} \quad (4)$$

令迴路阻抗 $Z_{loop} = Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3$ ，則圖 3 迴路之克希荷夫電壓方程式 (KVL) 如下：

$$I_1 \times (Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3) = I_1 \times Z_{loop} = 0 \quad (5)$$

由於在正常發電機之運轉狀態下 $I_1 \neq 0$ ，故 (5) 式可改寫成 (6) 式：

$$Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3 = Z_{loop} = 0 \quad (6)$$

在 (6) 中迴路阻抗 Z_{loop} 可分解為實部與虛部如 (7) 式與 (8) 式：

$$R_{loop} = \text{Re}\{Z_{loop}\} = \text{Re}\{Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3\} = 0 \quad (7)$$

$$X_{loop} = \text{Im}\{Z_{loop}\} = \text{Im}\{Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3\} = 0 \quad (8)$$

在等效電路中伴隨不同的發電機轉速 ω ，有兩個未知數： F 與 X_m 待解，由等效電路可得 F 與 X_m 之非線性多項式 (7)、(8) 式，求解過程非常繁瑣。本文針對兩個未知數 F 與 X_m ，提出一套快速疊代模擬演算法，其演算方法如下：

令 F 之起始值為 1.0，可由 (7) 式求解 X_m ，將 (7) 式疊代求解出的 X_m 代入 (8) 式即可解得 F ，如此反覆疊代求解。由於起始值接近最終解，因此能在很少次疊代內收斂，是一種快速而有效的疊代演算法。

至於發電機之正序感應電壓 E_g ，則可由 (7)、(8) 式解得 X_m 經由如圖 4 所示之磁化曲線，對應求得正序感應電壓 E_g ，在圖 4 中 E_g 與 X_m 之關係可用 n 次多項式表示如下：

$$E_g = \sum_{i=0}^n K_i X_m^i \quad (9)$$

其中 K_i 為依磁化曲線特性決定之常數。

E_g 決定後，可由電路原理求得感應發電機電流 I_l ：

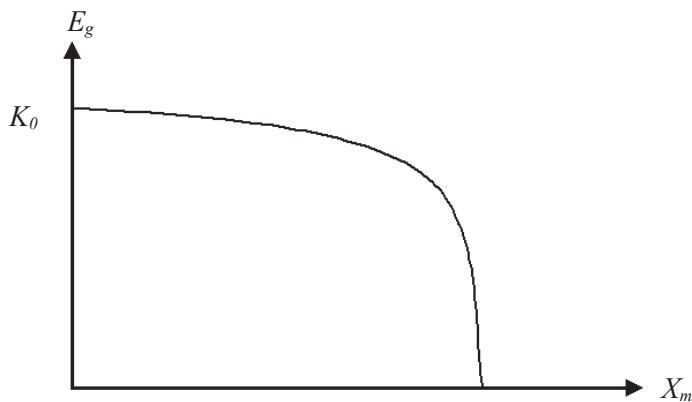


圖 4 單相感應發電機磁化曲線

$$I_1 = \frac{E_g}{F \times Z_{2f}} = \frac{E_g}{F} \times \left(\frac{1}{j \frac{X_m}{2}} + \frac{1}{\frac{R_2}{2(F-\omega)} + j \frac{X_2}{2}} \right) \quad (10)$$

負載電流 I_L :

$$I_L = I_1 \times \frac{-j \frac{X_{sh}}{F^2}}{\frac{R_L}{F} + jX_L - j \frac{X_{se}}{F^2} - j \frac{X_{sh}}{F^2}} \quad (11)$$

負載端電壓 V_L :

$$V_L = I_L \times F \times Z_L = I_1 \times F \times \left(\frac{R_L}{F} + jX_L \right) \quad (12)$$

參、單相感應發電機長並聯架構之運轉模擬

單相感應發電機長並聯架構如圖 5 所示，單相感應發電機長並聯架構之兩相對稱分量等效電路如圖 6 所示，在等效電路中各符號的定義詳見附錄。由於圖 6 等效電路較複雜不易分析，因此將圖 6 化簡為 4 個阻抗 (Z_1, Z_{2b}, Z_{2f}, Z_3) 串聯之簡化電路如圖 7 所示。

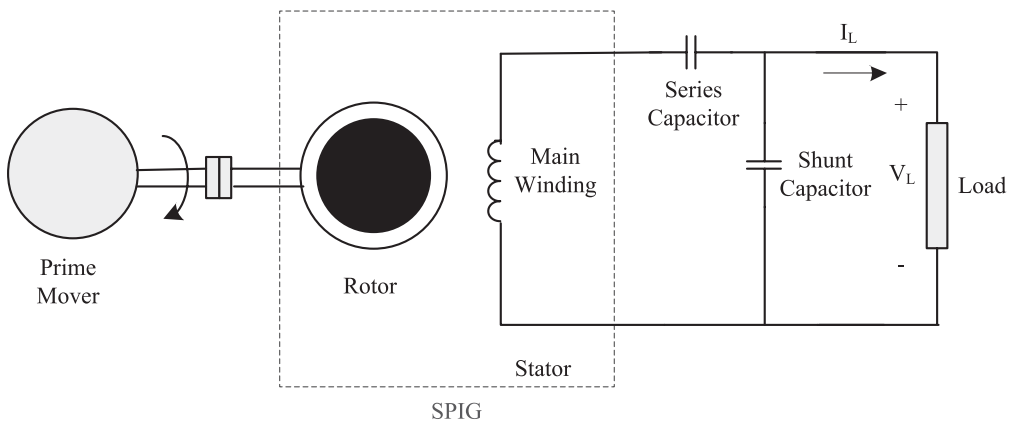


圖 5 單相感應發電機長並聯架構

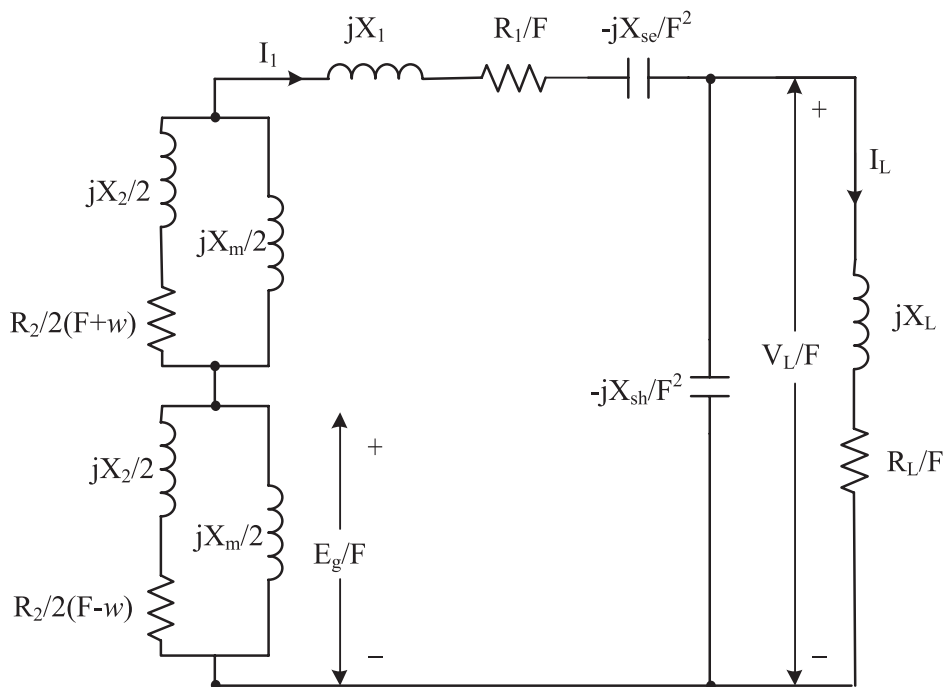


圖 6 長並聯單相感應發電機之兩相對稱分量等效電路

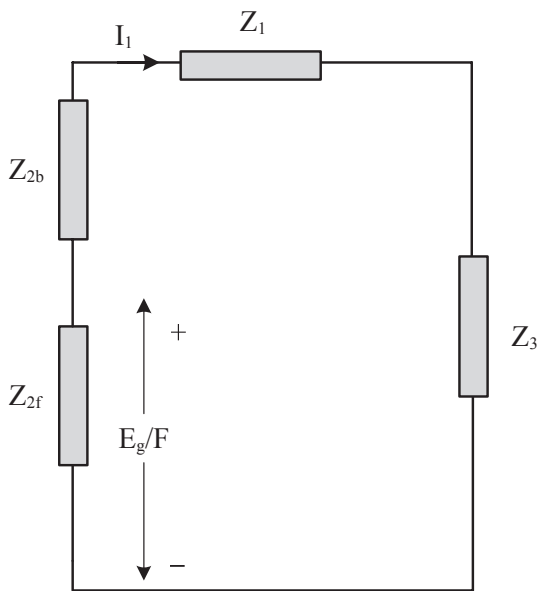


圖 7 長並聯單相感應發電機近似等效電路

由圖 7 可列出下列 4 個阻抗方程式：

$$Z_1 = R_1 / F + jX_1 - jX_{se} / F^2 \quad (13)$$

$$Z_{2b} = \left(\frac{1}{j \frac{X_m}{2}} + \frac{1}{\frac{R_2}{2(F+\omega)} + j \frac{X_2}{2}} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$Z_{2f} = \left(\frac{1}{j \frac{X_m}{2}} + \frac{1}{\frac{R_2}{2(F-\omega)} + j \frac{X_2}{2}} \right)^{-1} \quad (15)$$

$$Z_3 = \left(\frac{1}{-j \frac{X_{sh}}{F^2}} + \frac{1}{\frac{R_L}{F} + jX_L} \right)^{-1} \quad (16)$$

令迴路阻抗 $Z_{loop} = Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3$ ，則圖 7 迴路之克希荷夫電壓方程式 (KVL) 如下：

$$I_1 \times (Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3) = I_1 \times Z_{loop} = 0 \quad (17)$$

由於在正常發電機之運轉狀態 $I_1 \neq 0$ ，故 (17) 式可改寫成 (18) 式：

$$Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3 = Z_{loop} = 0 \quad (18)$$

在 (18) 中迴路阻抗 Z_{loop} 可分解為實部與虛部如 (19) 式與 (20) 式：

$$R_{loop} = \text{Re}\{Z_{loop}\} = \text{Re}\{Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3\} = 0 \quad (19)$$

$$X_{loop} = \text{Im}\{Z_{loop}\} = \text{Im}\{Z_1 + Z_{2b} + Z_{2f} + Z_3\} = 0 \quad (20)$$

在等效電路中伴隨不同的發電機轉速 ω ，有兩個未知數： F 與 X_m 待解，由等效電路可得 F 與 X_m 之非線性多項式 (7)、(8) 式，求解過程非常繁瑣。本文針對兩個未知數 F 與 X_m ，提出一套快速疊代模擬演算法，其演算方法如下：

令 F 之起始值為 1.0，可由 (19) 式求解 X_m ，將 (19) 式疊代求解出的 X_m 代入 (20) 式即可解得 F ，如此反覆疊代求解。由於起始值接近最終解，因此能在很少次疊代內收斂，是一種快速而有效的疊代演算法。

至於發電機之正序感應電壓 E_g ，則可由 (19)、(20) 式解得 X_m 經由如圖 4 所示之磁化曲線，對應求得正序感應電壓 E_g ，在圖 4 中 E_g 與 X_m 之關係可用 n 次多項式表示如下：

$$E_g = \sum_{i=0}^n K_i X_m^i \quad (21)$$

其中 E_i 為依磁化曲線特性決定之常數。

E_g 決定後，可由電路原理求得感應發電機電流 I_1 ：

$$I_1 = \frac{E_g}{F \times Z_{2f}} = \frac{E_g}{F} \times \left(\frac{1}{j \frac{X_m}{2}} + \frac{1}{\frac{R_2}{2(F-\omega)} + j \frac{X_2}{2}} \right) \quad (22)$$

負載電流 I_L ：

$$I_L = I_1 \times \frac{-j \frac{X_{sh}}{F^2}}{\frac{R_L}{F} + jX_L - j \frac{X_{sh}}{F^2}} \quad (23)$$

負載端電壓 V_L ：

$$V_L = I_L \times F \times Z_L = I_L \times F \times \left(\frac{R_L}{F} + jX_L \right) \quad (24)$$

肆、模擬與測試結果

為驗證本方法之可行性，本文以一部單相四極鼠籠型感應機進行測試。感應機由一部 200 V、3 馬力之分激式直流電動機驅動，且維持轉速為 1800 rpm。

感應機之額定電壓為 220 V，額定電流為 4.87 A，等效電路之參數如下：
 $R_1=0.0398$ pu， $R_2=0.0549$ pu， $X_1=0.0608$ pu， $X_2=0.0608$ pu。

將同步試驗所得的數據，經由最小平方誤差法 (Least-mean-square error) 之曲線匹配 (curve fitting) 計算，可得 X_m 與 E_g 之特性曲線方程式如下：

$$\begin{aligned} E_g &= -58.7X_m^5 + 430X_m^4 - 1253X_m^3 + 1814.5X_m^2 - 1305.7X_m + 374.6, & X_m < 1.88 \\ E_g &= 0, & 1.88 \leq X_m \end{aligned} \quad (25)$$

一、短並聯架構單相感應發電機之測試結果

(一) 狀況一：

如圖 1 之短並聯架構，當並聯電容值為 $71.5\mu\text{F}$ ，在串聯電容為 $250\mu\text{F}$ 的情形下，外接純電阻負載時，感應發電機的實測滿載輸出電壓為 210.42 V ，經由 Matlab 程式模擬的滿載輸出電壓為 209.56 V ，實測數據與模擬結果極為接近。由測試結果可知，在短並聯架構下，發電機之電壓降可獲得較大幅度的改善，且輸出電流亦可增加，而到達額定值。

(二) 狀況二：

如圖 1 之短並聯架構，當串聯電容值 C_s 減少為 $200\mu\text{F}$ ，在並聯電容 C 仍為 $71.5\mu\text{F}$ 的情形下，外接純電阻負載時，感應發電機的實測滿載輸出電壓為 206.31 V ，經由 Matlab 程式模擬的滿載輸出電壓為 205.72 V ，實測數據與模擬結果極為接近。由測試結果可知，減少串聯電容值，發電機之電壓降較大，但輸出電流仍可到達額定值。

二、長並聯架構單相感應發電機之測試結果

(一) 狀況一：

如圖 5 之長並聯架構，當並聯電容值為 $125\mu\text{F}$ ，在串聯電容為 $300\mu\text{F}$ 的情形下，外接純電阻負載時，由測試結果可知，感應發電機的實測滿載輸出電壓為 171.67 V ，經由 Matlab 程式模擬的滿載輸出電壓為 170.87 V ，實測數據與模擬結果極為接近。由測試結果可知，在長並聯架構下，發電機之電壓降可獲得較大幅度的改善，且輸出電流亦可增加，但端電壓低於額定值。

(二) 狀況二：

如圖 5 之長並聯架構，當並聯電容值為 $125\mu\text{F}$ ，在串聯電容增為 $375\mu\text{F}$ 的情形下，外接純電阻負載時，由測試結果可知，感應發電機的實測滿載輸出電壓為 182.84 V ，經由 Matlab 程式模擬的滿載輸出電壓為 181.23 V ，實測數據與模擬結果極為接近。由測試結果可知，在長並聯架構下，增加串聯電容值，發電機之端

電壓可獲得大幅度的改善。

由短並聯架構與長並聯架構之測試結果比較可知，在短並聯架構下，發電機之電壓與電流特性皆較其他架構為佳。因此，短並聯架構可以獲得單相感應發電機的最佳運轉特性。此外，短並聯架構的並聯電容值與串聯電容值，皆小於長並聯架構的並聯電容值與串聯電容值，因此短並聯架構的裝置成本亦較低。總之，短並聯架構是單相感應發電機的最佳選擇。

伍、結論

本文提出雙繞組自激式單相感應發電機快速疊代模擬演算法。實測資料證實本方法誤差極小，是一種有效的疊代演算法。本方法的計算速度快且不易發散，是一種非常有效的雙繞組單相感應發電機運轉模擬工具。

經實測與模擬資料驗證，在短並聯架構下，發電機之電壓與電流特性皆較其他架構為佳，發電機之電壓與電流特性皆較其他架構為佳，可以獲得單相感應發電機的最佳運轉特性，是獨立運轉單相感應發電機的最佳選擇。而適當選擇此架構下的並聯電容值與串聯電容值，則可由本文提出之快速疊代模擬演算法求得，可加快發電系統架構之研發速度。

依據本研究模擬與測試所得的結果，針對裝置容量小於 1 kW 之小型風力發電系統與小型水力發電系統，本研究建議採用短並聯架構之單相感應發電機，可以獲得較佳之電壓與電流特性。

在未來用電量持續成長的情形下，多元化電源開發計畫將更為重要。由於本方法可以有效地模擬自激式單相感應發電機各種運轉狀態，使獨立風力發電系統與小型水力發電系統的架構研發與性能評估更有效率。對分散式發電系統的推展，具有相當的助益。

陸、參考文獻

- Chan T.F., & Lai, L.L.(2004), A novel excitation scheme for a stand-alone three-phase induction generator supplying single-phase loads. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(1), 136-142.
- Chang, W.Y., Lin, Y.W., Tu, Y.C., Ruan, Y.T., Lin, J.X., & Li, G.T.(2016), Optimal single winding self-excitation configuration for the single-phase induction generator. *Proceedings of the International Research Symposium on Engineering and Technology*, 187-194.
- Haque, M.H.(2012), Steady state characteristics of stand-alone single-phase induction generators. *Proceedings of the 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference*, 1-6.
- Murthy, S.S., Singh, B., & Sandeep, V.(2012), A novel and comprehensive performance analysis of a single-phase two-winding self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 117-127.
- Ojo, O., & Bhat, I.(1995), An analysis of single-phase self-excited induction generators: model development and steady-state calculations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(2), 254-260.

柒、附錄：符號定義

f : 頻率

F : 標么頻率, $F = f / f_{base}$

n : 轉子轉速

ω : 標么轉速, $\omega = n / n_{base}$

C_{sh} : 並聯電容值 \times

X_{sh} : 並聯電容抗, $X_{sh} = 1 / (2\pi \times f \times C_{sh})$

C_{se} : 串聯電容值

X_{se} : 串聯電容抗, $X_{se} = 1 / (2\pi \times f \times C_{se})$

E_g : 正序氣隙感應電壓

G : 電導

B : 電納

I_l : 感應發電機定子電流

R_l : 感應發電機定子主繞組電阻

R_l : 感應發電機換算至定子側主繞組的轉子電阻

X_l : 感應發電機定子主繞組漏磁電抗

X_2 : 感應發電機換算至定子側主繞組的轉子漏磁電抗

R_L : 負載電阻

X_L : 負載電抗

X_m : 感應發電機磁化電抗

V_L : 感應發電機電流負載端電壓

I_L : 感應發電機電流負載電流