

風力發電機併網對配電系統電壓閃爍之影響

國立台灣科技大學電機系教授 辜志承
國立台灣科技大學電機系 黃少俞

摘要

電壓閃爍是影響電力品質的重要因素之一，也是目前電力系統所面臨的問題。隨著風力發電機數量與機組容量的增加，在不穩定的風速下，因輸出電壓及電流之變動，直接造成電壓閃爍的影響。本文主要目的在探討風機併網對電力系統電壓閃爍之衝擊，針對風機在不同短路容量、系統阻抗角、負載量與負載功因等運轉條件下，進行模擬與分析，並與實際量測結果相驗證。

關鍵詞：風力發電機、電壓閃爍、 ΔV_{10} 值

一、前言

自十八世紀工業革命開始，人類以機器生產取代傳統之勞力生產方式，因此各式能源的需求也大量的提高。隨著人口的增加和經濟的發展，依照目前的消耗速率，全球石油蘊藏量大約再過 50 年就會消耗殆盡；天然氣亦約可再維持七十年；煤炭較久，但亦僅能再供人們利用約二百年[1]，因此，除了提高能源的使用效率外，尋找新的再生能源已是刻不容緩的課題。

再生能源除了可彌補能源問題的不足外，亦可降低污染環境之速度，其發電方式主要可分為風力、水力、太陽能、地熱、沼氣、潮汐或生質能等，其中，由於風力發電在技術上已日趨成熟，因此，風力發電將是目前最具有大規模開發利用前景的再生能源。

我國為一海島地形，每年約有半年以上的東北季風期，沿海、高山及離島許多地區之年平均風速每秒皆超過 4 公尺，風能潛力相當優越，根據調查顯示，我國全省年平均風速每秒大於 4 公尺的區域、總面積約佔 2,000 km^2 ，可開發的風能潛力估計約佔 3,000 MW，因此，在我國中西部海濱及離島地區，都很適合風力發電[2]。

電壓閃爍形成的原因主要來自於電力系統中俱有快速變動特性的負載。但隨著風力發電機裝設數量及裝設容量的增加，在不穩定的風速下，風力發電機的輸出電壓與輸出電流皆會產生大小不同的變動，劇烈的輸出電壓變動可能會造成電壓閃爍的現象[3]。

電壓閃爍會造成日光燈或白熾燈等燈具的光度閃變，使人眼睛有不舒適的感覺[4,5]，長期而持續的閃爍會造成視力的疲勞與衰退，因此電壓閃爍最重要的考量點應是照明閃爍對眼睛的影響。除此之外，如電視機影像大小亦會隨電壓的閃爍而變動，電視螢幕也有白點或白線產生，各種精密電子設備亦有可能產生不同程度的不良影響[6]。為能了解風機對電壓閃爍的影響，IEC61400-21[7]與 IEEE 1547[8]中，皆有詳細的規範與限制。

我國在電壓閃爍的規範上並非十分完備，目前僅在「屋內線路裝置規則」中有相關之規定，其中第四百三十一條規定「電弧爐等遽變負載在共同點之電壓閃爍值，以 ΔV_{10} 不超過 0.45%為準」。

風機在不穩定的風速下所造成的電壓閃爍，隨著風力發電機裝設數量及裝設容量的增加，其影響將愈為嚴重。另外，由實際量測中發現，在不同的短路容量、系統阻抗角及風機數量時，風機運轉所造成的電壓閃爍皆有所不同。因此，本文將研究風機對電力系統電壓閃爍之影響，並利用實測與模擬的方式，來探討風機在不同風速下運轉時，併接點容量、系統阻抗角、負載量及負載功因與電壓閃爍之關係。

二、風場電壓閃爍量測資料分析

本文先後對國內目前已商轉之 A、B

兩風場進行量測，其中 A 風場風力發電機組主要是由 6 台額定容量 660 kW 風機組合而成，並以專線的方式併入電網，B 風場風力發電機組則是由 2 台額定容量 1.75 MW 風機所組成，主要為廠內供電用途。量測時間方面以 7 天為原則，量測點包括風機高低壓端、PCC 點及主變二次側。各風場之基本資料及其系統單線圖分別如表 1，圖 1 及圖 2 所示[9、10]。

表 1 各風場基本資料

風場名稱	供電等級	風機型式	量測時間
A 風場	11.4kV	感應機	94 8/24~94 8/30
B 風場	11.4kV	雙饋式感應發電機	94 8/31~94 9/7

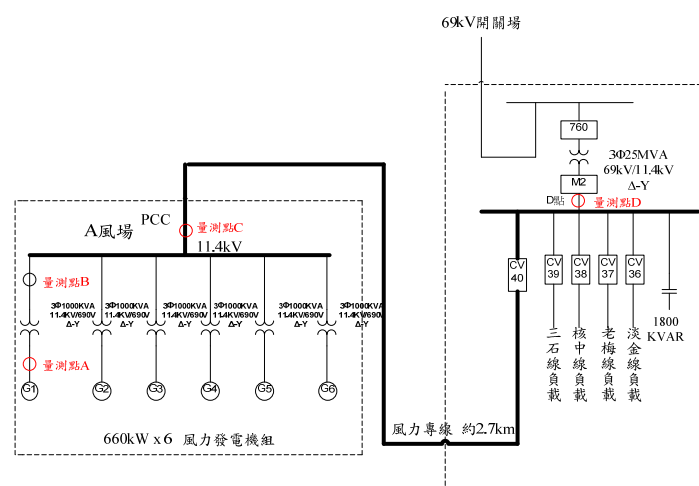


圖 1 A 風場系統單線圖

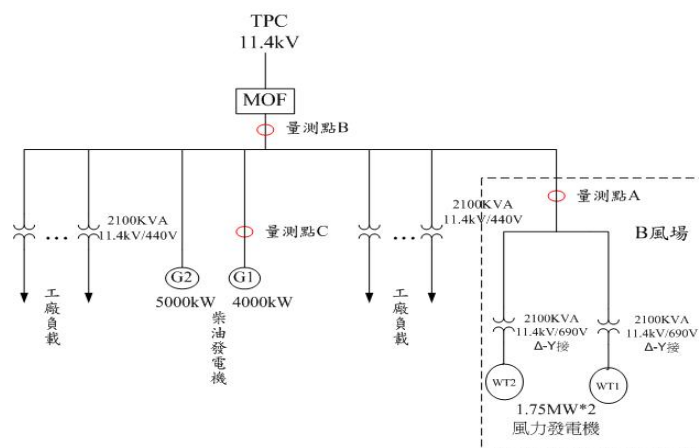


圖 2 B 風場系統單線圖

在量測資料的選擇上，由於風力資源不具穩定性，因此本文主要是擷取風機有運轉時之電力資料來進行分析，其分析時間如表 2 所示。另一方面由於風機電氣特性雖不具常態分佈模式，但對於大量的數值並以統計歸納分析仍可找到一致性而得到相當不錯的結果，因此將量測後所得到風機三相有效電力(P)、無效電力(Q)電壓閃爍值(ΔV_{10})等資料，以統計方式的 5 % 反累積機率值(即 95%累積機率值)作為代表值；另考量量測時可能受到雜訊的干擾，將 97.5%累積機率值定義為最大值，2.5%累積機率值為最小值。

表 2 各風場分析時間

量測地點	時段	擷取時間	風場平均輸出功率
A 風場	a	8/26 00:10~01:20	296 kW
	b	8/28 18:25~22:25	193 kW
B 風場	a	8/31 17:30~20:20	3330 kW
	b	9/4 10:00~18:00	985 kW

以下將分別針對 A 風場平均輸出功率為(a)296 kW 與(b)193 kW 兩時段來進行分析：

當為(a)時段時：

1 號風機低壓端三相有效輸出功率範圍為 46.96~241.88 kW；無效吸收功率範圍為 7.41~21.77 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.065~0.123 %，代表值為 0.119 %。

1 號風機高壓端三相有效輸出功率範圍為 34.88~231.64 kW；無效吸收功率範圍為 9.41~26.05 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.04~0.051 %；代表值為 0.049 %。

PCC 點三相有效輸出功率範圍為 106.16~478.19 kW；無效吸收功率範圍為 25.71~56.15 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.048~0.059 %，代表值為 0.058 %。

主變二次側三相有效輸出功率範圍為 5950.14~6414.65 kW；無效輸出功率範圍為 270.16~444.06 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.024~0.035 %，代表值為 0.033 %。

當為(b)時段時：

1 號風機高壓端三相有效輸出功率範圍為-16.07~188.15 kW；無效吸收功率範圍為 8~26.2 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.04~0.055 %；代表值為 0.051 %。

PCC 點三相有效輸出功率範圍為-37~518.2 kW；無效吸收功率範圍為 7.9~67.53 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.052~0.067 %，代表值為 0.064 %。

主變二次側三相有效輸出功率範圍為 7724~9217 kW；無效輸出功率範圍為 1031~1813 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.025~0.042 %，代表值為 0.036 %。

以下將分別針對 B 風場平均輸出功率為(a)3330 kW 與(b)985 kW 兩時段來進行分析：

當為(a)時段時，PCC 點三相有效輸出功率範圍為 2466.61~3576.19 kW；無效吸收功率範圍為 135.03~267.52 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.06~0.139 %，代表值為 0.104 %。

當為(b)時段時，PCC 點三相有效輸出功率範圍為 280.38~2074.78 kW；無效吸收功率範圍為 6.19~96.41 kvar； ΔV_{10} 範圍為 0.054~0.162 %，代表值為 0.117 %。

由表 3 中各風場 PCC 點 ΔV_{10} 量測結果可知，目前風機對系統電壓閃爍的影響皆不嚴重，均符合台電管制值 0.45%。由 A 風場各點 ΔV_{10} 量測結果可知，當量測點愈靠近主變二次側時，由於短路容量與系統阻抗角較大的關係，其電壓閃爍不甚嚴重；當量測點愈遠離主變二次側時，由於短路容量與系統阻抗角較低的關係，其電壓閃爍則較為嚴重。另外，由一號機高壓

端與 PCC 點的量測資料可知，由於併接風機數量的不同，對電壓閃爍的影響亦有所不同。

表 3 各風場運轉之量測資料統計

風場名稱	風場平均輸出功率(kW)	量測點	P (kW)	Q (kvar)	ΔV_{10} (%)
A	296	1 號機低壓側	236.14	21.11	0.119
		1 號機高壓側	223.49	25.08	0.049
		PCC 端	459.16	54.95	0.058
		主變二次側	6381.4	-430.5	0.033
B	193	1 號機高壓側	165.4	23.67	0.051
		PCC 端	462.50	61	0.064
		主變二次側	9186	1772	0.037
	3330	PCC 端	3560.4	265.34	0.104
	985		1907.1	82.94	0.117

一般在評估電壓閃爍時，主要是以有效電力變動(ΔP)與無效電力變動(ΔQ)來評估。如表 4 所示，由於風機運轉時，有效電力變動(ΔP)往往大於無效電力變動(ΔQ)的關係，因此在評估風機電壓閃爍時，可以有效電力變動(ΔP)的方式來進行評估。

表 4 各風場輸出功率變化情形

風場名稱	風場平均輸出功率	量測點	ΔP (kW)	ΔQ (kvar)	ΔV_{10} (%)
A	296 kW	1 號機高壓側	196.76	16.64	0.049
		PCC 點	372.03	30.44	0.058
	193 kW	1 號機高壓側	204.2	18.2	0.0513
		PCC 點	555.3	59.4	0.064
B	3330kW	PCC 點	1109.58	132.49	0.104
	985kW		1794.38	90.22	0.117

三、風機運轉電壓閃爍模擬分析

圖 1 所示為 A 風場系統單線圖，該系統一次側短路容量為 550.58 MVA，主變壓器額定容量為 25 MVA，額定電壓為

69 kV-11.4 kV，百分比阻抗值為 8.9 %。專線部份則是採取 25 kV 600A XLPE CU 500 MCM 電纜作連接，其線路阻抗值為 $0.0901+j0.1325 \Omega / \text{km}$ [9]，在線路負載方面則取該年 8 月線路平均負載量，負載功因為 0.9 來進行分析，如表 5 所示。由於一般台電為改善功率因數，皆會於線路上裝設一電力電容器，本線路電容量為 1800 kvar。

表 5 A 風場線路負載情形

	負載量(kW)	負載量(kvar)	功率因素(%)
三石線	2254	1090	90
核中線	119	57	90
老梅線	2704	1309	90
淡金線	2189	1060	90

在風機方面，本文則是採用 Matlab 內建感應型風力發電機與雙饋式感應型風力發電機模型來進行模擬。在 Matlab-Simpower 中，選用單台額定容量 2.75 MVA 傳統感應型發電機與兩台額定容量為 1.5MW 的雙饋式感應型風力發電機，分別經由風機內部 480 V/11.4 kV 及 575/11.4 kV 之升壓變壓器升壓後，以專線的方式併接於主變二次側匯流排，其專線長度約為 2.7 公里。

另外，由於傳統感應型發電機併網運轉時，除向電網輸出有效功率外，亦將從系統消耗虛功，而造成系統電壓的擾動，故一般皆在風機內部裝設一電容器以作補償之用，此裝設容量為 750 kvar。在雙饋式感應型風力發電機的控制模式上，具有電壓控制與虛功控制兩種模式。在不同的控制模式下，風機運轉所造成電壓閃爍皆會有所不同。因此本文在進行模擬時，將 2 台雙饋式感應型風力發電機均採用電壓控制與虛功控制的模式及一台為電壓控制

模式，另一台為虛功控制的模式來進行分析。其中，電壓控制是將 V_f 設定為

1pu，而虛功控制則是將虛功設定為零。其系統模擬方塊分別如圖 3 及圖 4 所示。

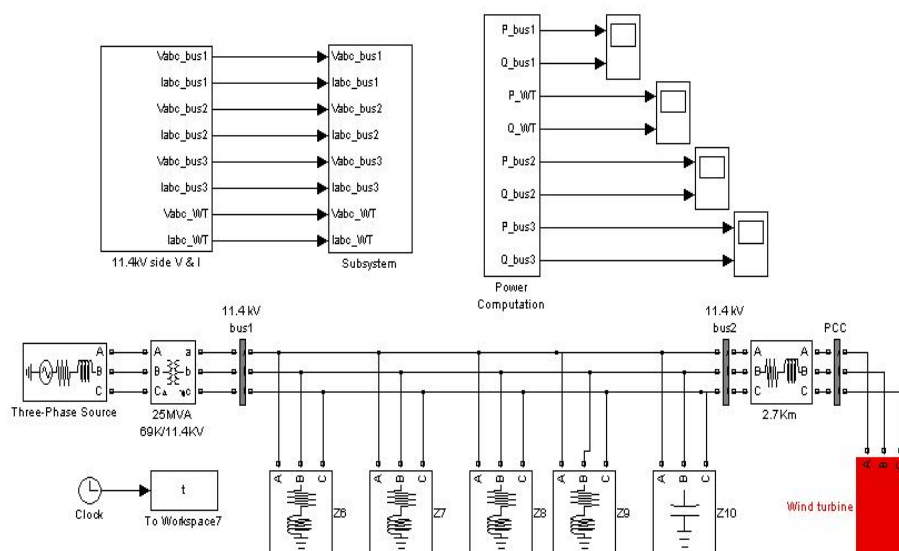


圖 3 A 風場系統模擬方塊圖（感應型風力發電機）

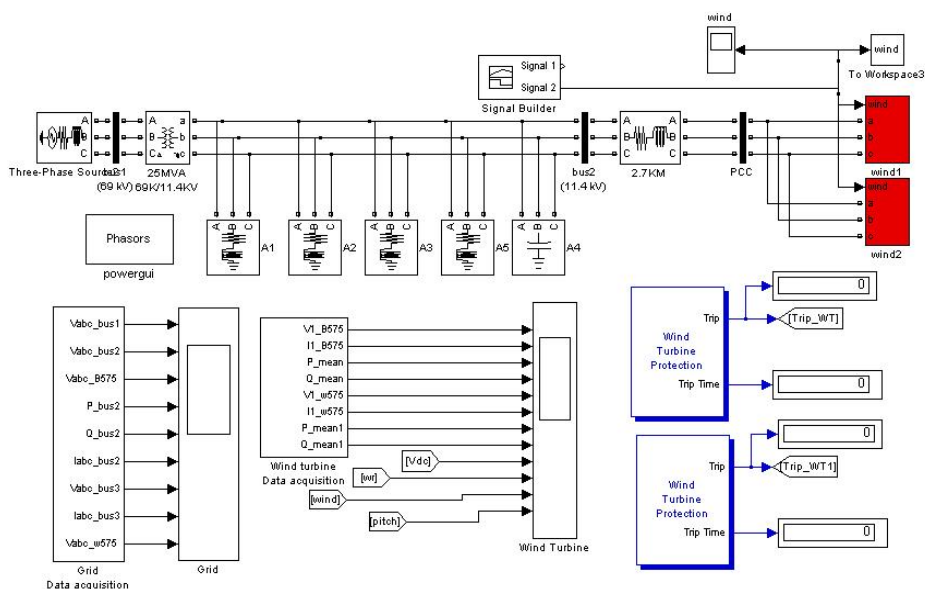


圖 4 B 風場系統模擬方塊圖（雙饋式感應型風力發電機）

在風速方面，由於在不同風速下，風機運轉所造成電壓閃爍皆有所不同，因此本文主要是採取隨機型風速的方式來進行

模擬，其取樣時間為風速變化時段，如圖 5 所示。在隨機型風速的表達上，則是以平均風速變化率的方式來表示。

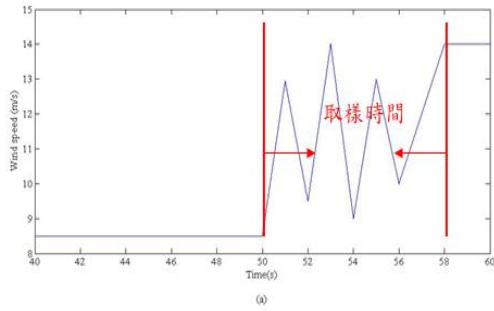


圖 5 隨機型風速圖

圖 6 為感應型風力發電機在不同平均風速變化率下，相對應 PCC 點短路容量之電壓閃爍曲線，圖 7 為雙饋式感應型風力發電機在不同控制模式下，平均風速變化率分別為 3.77 m/s^2 與 1.88 m/s^2 時，相對應 PCC 點短路容量之電壓閃爍曲線。由圖 6 與圖 7 可知，當風速變化大或短路容量小時，風機運轉所造成的電壓閃爍較為嚴重；反知，當風速變化小或短路容量大時，風機運轉所造成的電壓閃爍則較為輕微。以斜率觀點而言，如圖 8 所示，當風速變化較激烈時，風機運轉所造成的電壓閃爍較易隨短路容量的不同而有所變

動，而當短路容量較小時，電壓閃爍的變動則較大。以風機控制模式而言，當為電壓控制時，由於電壓控制主要是將風機的輸出電壓維持為定值的一種控制模式，在此控制模式下，風機的輸出電壓受風速變動的影響程度很小，所造成的電壓閃爍也較虛功控制時來的輕微。

圖 9 為感應型風力發電機在不同平均風速變化率下，相對應系統阻抗角之電壓閃爍曲線，圖 10 為雙饋式感應型風力發電機在不同控制模式下，平均風速變化率分別為 3.77 m/s^2 與 1.88 m/s^2 時，相對應於系統阻抗角之電壓閃爍曲線。由圖 9 與圖 10 可知，當風速變化大或系統阻抗角小時，風機運轉所造成的電壓閃爍較為嚴重；反之，當風速變化小或系統阻抗角大時，風機運轉所造成的電壓閃爍則較為輕微。以風機控制模式而言，由於電壓控制主要是將風機的輸出電壓維持為定值的一種控制模式，在此控制模式下，風機的輸出電壓受風速變動的影響程度很小，所造成的電壓閃爍也較虛功控制時來的輕微。

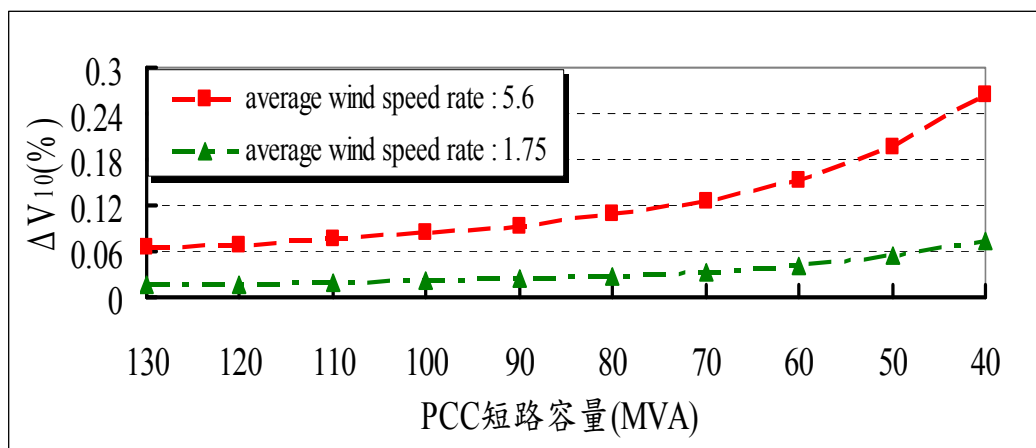


圖 6 感應型風力發電機在不同平均風速變化率下，相對應 PCC 點短路容量之電壓閃爍曲線

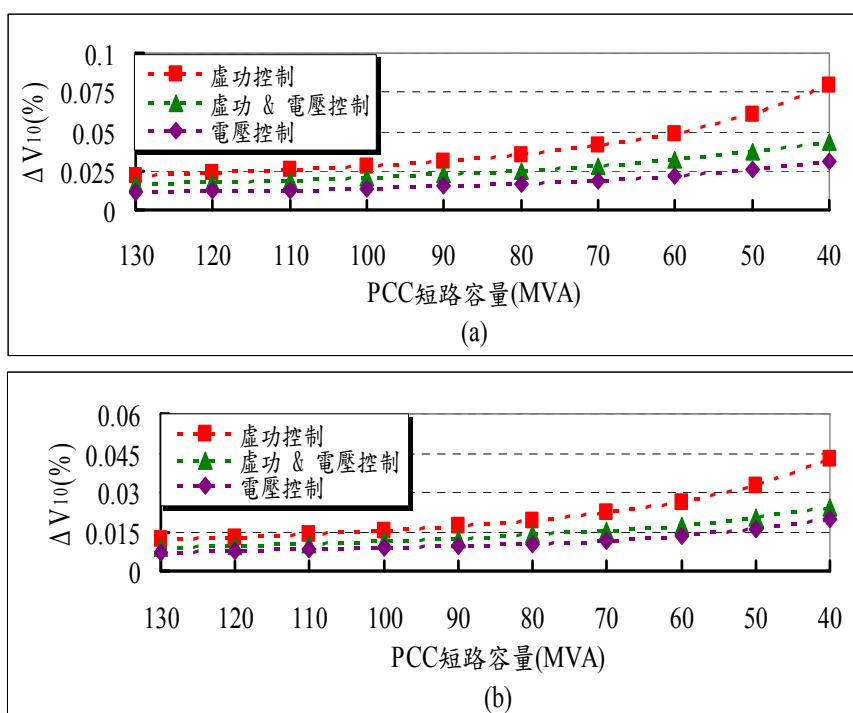


圖 7 雙饋式感應型風力發電機在不同控制模式下，平均風速變化率為(a)3.77 m/s (b)1.88m/s²時，相對應 PCC 點短路容量之電壓閃爍曲線

表 8 不同風速變化下，各風機電壓閃爍斜率變化情形

風機類型	平均風速變化(m/s ²)	控制模式	130-90 MVA	80-40 MVA	ΔV_{10} (%)
感應型風力發電機	5.6	無	0.0007	0.0039	0.058
	1.75	無	0.0002	0.0012	0.064
雙饋式感應型風力發電機	3.77	電壓控制	0.00009	0.00035	0.117
		虛功控制&電壓控制	0.00015	0.00045	
		虛功控制	0.00023	0.00110	
	1.88	電壓控制	0.00006	0.00023	
		虛功控制&電壓控制	0.00008	0.00026	
		虛功控制	0.00012	0.00058	

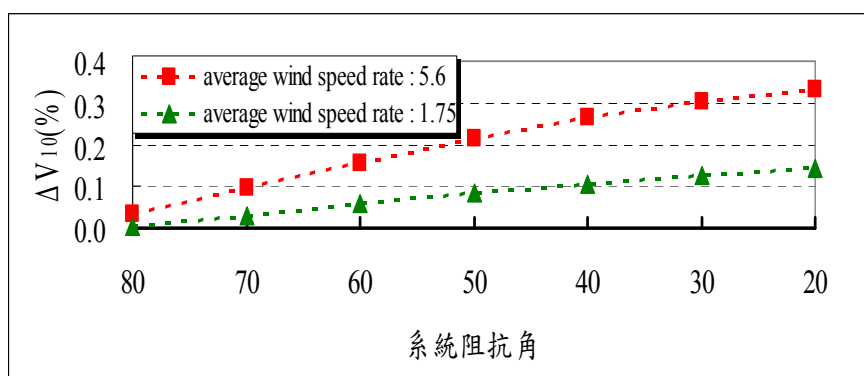


圖 9 感應型風力發電機在不同平均風速變化率下，相對應系統阻抗角之電壓閃爍曲線

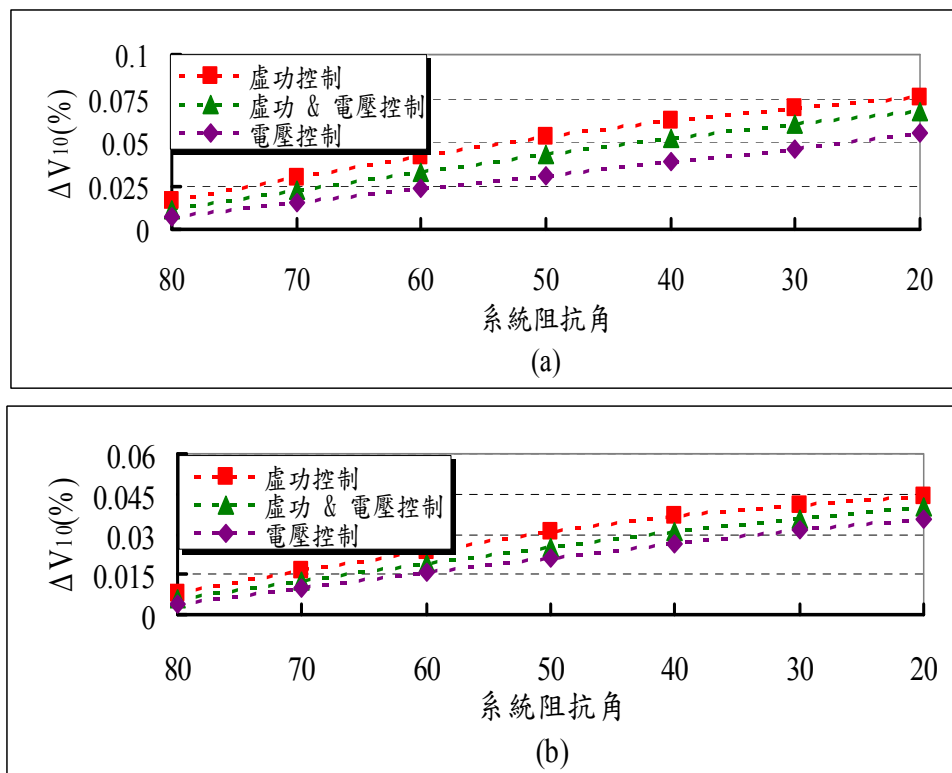


圖 10 雙饋式感應型風力發電機在不同控制模式下，平均風速變化率為(a) 3.7 m/s^2 (b) 1.88 m/s^2 時，相對應系統阻抗角之電壓閃爍曲線

圖 11 為感應型風力發電機在平均風速變化率分別為 5.6 m/s^2 與 1.75 m/s^2 時，相對應各負載量及負載功因之電壓閃爍曲線。圖 12~圖 14 分別為兩雙饋式感應型風力發電機控制模式皆為虛功控制、電壓控制及一為電壓控制，一為虛功控制的模式下，平均風速變化率分別為 3.77 m/s^2 與 1.88 m/s^2 時，相對應各負載量及負載功因之電壓閃爍曲線。由圖 11~圖 14 中可知當風速變化較大或負載量大時，風機運轉所造成的電壓閃爍較為嚴重；反之，當風速變化小或負載量小時，風機運轉所造成的電壓閃爍則較為輕微。另外，由負載功因可知，在相同負載量的條件下，當負載功因較高時，風機運轉所造成的電壓閃爍較為嚴重；反之，當負載功因較低時，風機運轉所造成的電壓閃爍則較為輕微。以風機控制模式而言，當為電壓控制時，由於電

壓控制主要是將風機的輸出電壓維持為定值的一種控制模式，在此控制模式下，風機的輸出電壓受風速變動的影響程度很小，所造成的電壓閃爍也較虛功控制時來的輕微。

四、結論

本文主要研究目的在探討風機運轉時對電力系統電壓閃爍之影響。首先以實際量測風場後所得到的電力資料來探討風機運轉時對電力系統電壓閃爍之影響，最後再以 Matlab 模擬範例電力系統的方式作驗證。

風力發電機運轉時，由於風機輸出功率會隨風速而有所變動，因此目前在風力發電的應用上，仍是以風力發電機與電網併聯的方式為主流。綜合本文研究的結果，得到以下結論：

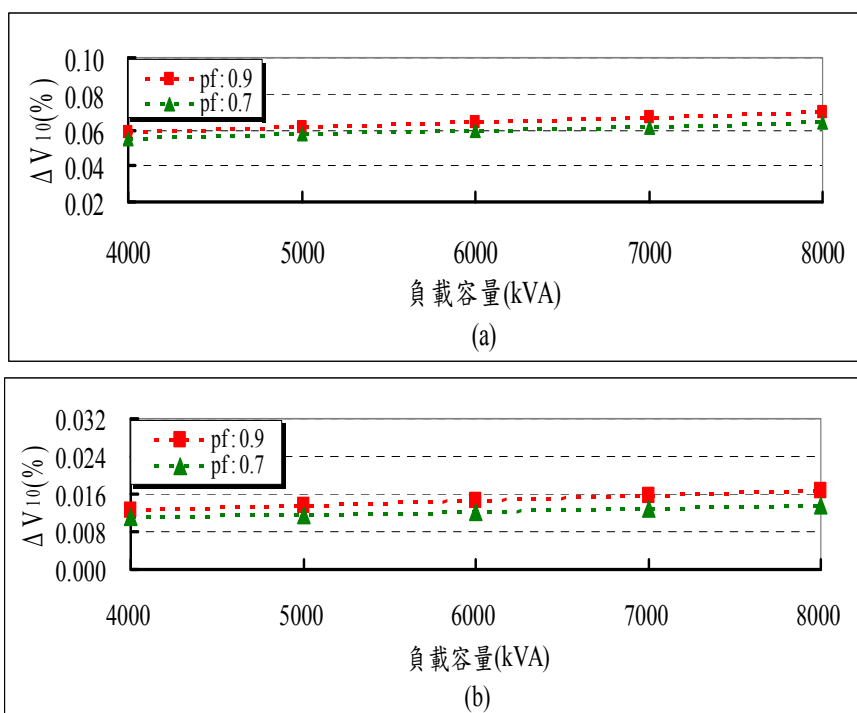


圖 11 感應型風力發電機在(a)平均風速變化率 5.6 m/s^2 與(b)平均風速變化率 1.75 m/s^2 時，相對應各負載量及負載功因之電壓閃爍曲線

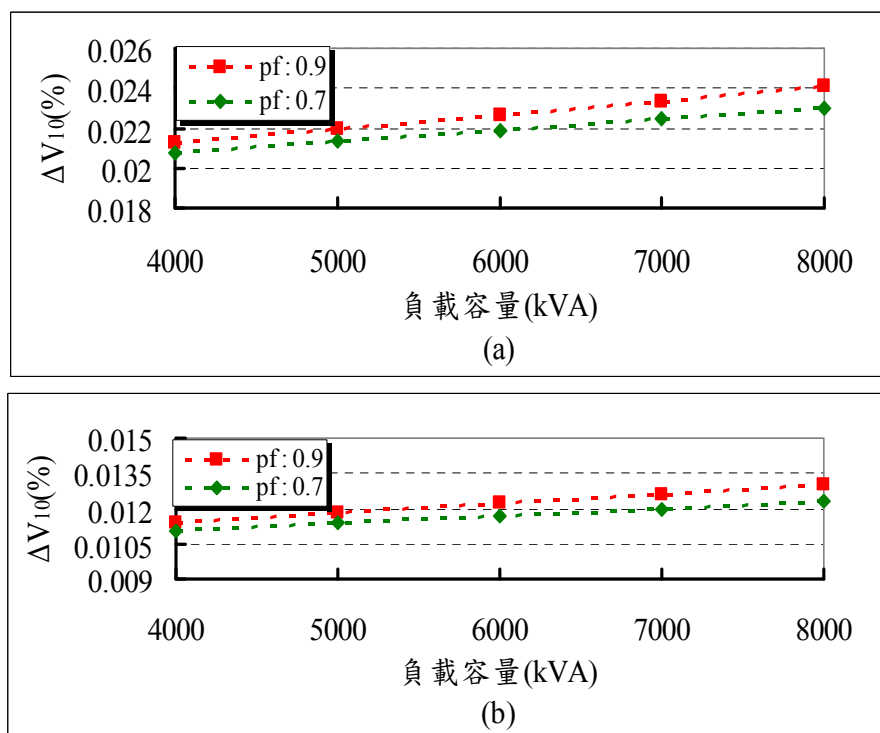


圖 12 兩雙饋式感應型風力發電機皆為虛功控制模式下，平均風速變化率分別為(a) 3.77 m/s^2 與(b) 1.88 m/s^2 時，相對應各負載量及負載功因之電壓閃爍曲線

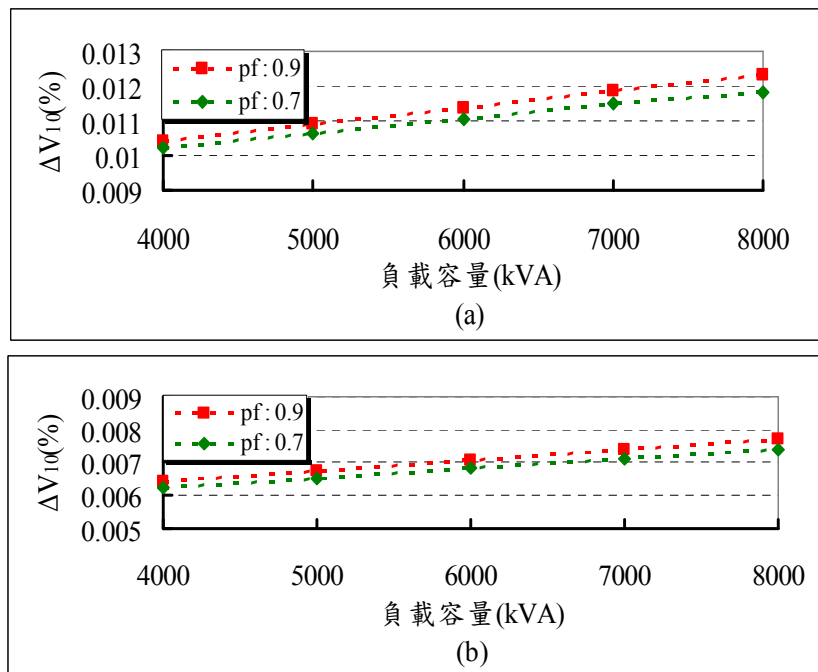


圖 13 兩風機皆為虛功控制模式下，平均風速變化率分別為(a)3.77m/s² 與(b)1.88 m/s²時，相對應各負載量及負載功因之電壓閃爍曲線

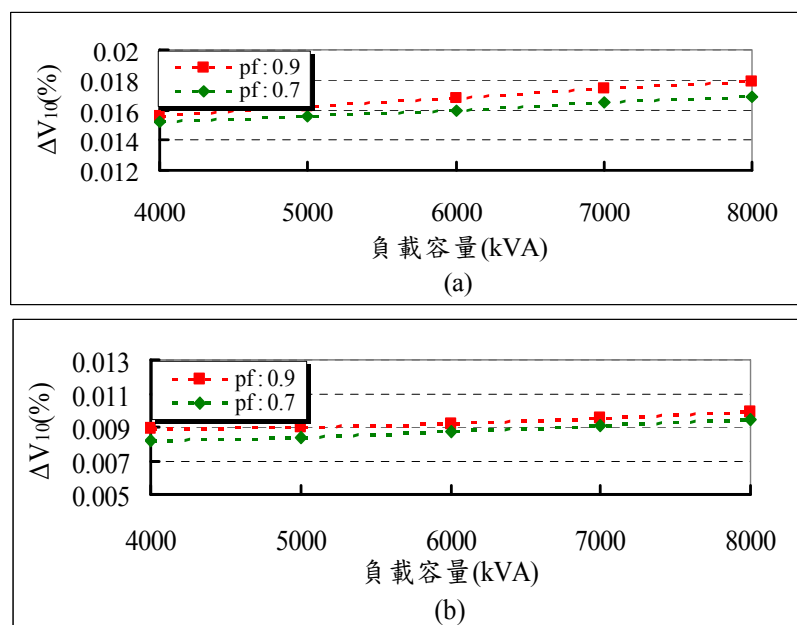


圖 14 兩風機分別為電壓控制與虛功控制模式下，平均風速變化率分別為(a)3.77 m/s² 與(b)1.88 m/s²時，相對應各負載量及負載功因之電壓閃爍曲線

1. 從實際量測結果發現，目前國內風力發電機運轉所造成的電壓閃爍值不甚嚴重，均符合台電管制值 0.45%。
2. 經由量測資料分析與模擬結果可知，

風機運轉所造成的電壓閃爍值會隨風速變化、併接點短路容量、系統阻抗角、負載量與負載功因而會有所不同。

3. 一般在評估電壓閃爍時，主要是考慮有效電力與無效電力的變動，經實際量測與模擬後發現，風機運轉時無效功率的變動很小，因此在評估風機電壓閃爍時，可以有效功率的變動來評估。
4. 在不同雙饋式感應型風力發電機的控制模式下，風機運轉所造成的電壓閃爍值皆有所不同，當控制模式為電壓控制時，由於電壓控制主要是將風機的輸出電壓維持為定值的一種控制模式，故風機輸出電壓受風速變動的影響程度很小，所造成的電壓閃爍也較虛功控制時來的輕微。

五、參考文獻

- [1] 財團法人工業技術研究院風力計畫推
劃網頁(<http://wind.erl.itri.org.tw>)
- [2] 台灣電力公司網站
(<http://www.taipower.com.tw/>)
- [3] 羅天賜，「風力發電與電力品質評
估」，中國工程師學會會刊，民國九
十四年。
- [4] “G. Manchur and C. C. Erven, “Devel-
opment of A Model for Predicting
Flicker from Electric Arc Furnaces” ,
IEEE Transactions on Power Delivery,
Vol. 7, No. 1, pp. 416-426, 1992.
- [5] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Caval-
lini, L. Pitti, and D. Zaninelli, “Arc-
Furnace Model for Study of Flicker
Compensation in Electrical Networks” ,
IEEE Transactions on Power Delivery,
Vol. 9, No. 4, pp. 2026-2036, 1994.
- [6] 辜志承與吳啟瑞，「高壓端對電壓閃
爍源對低壓用戶之影響」，台電電力
綜合研究所，專題研究計劃報告，民
國八十三年。
- [7] IEC 61400-21, 2001, Wind turbine gen-
erator systems-part 21: measurement and
assessment of power quality characteris-
tics of grid connected wind turbines.
- [8] IEEE Std 1547, Standard for Intercon-
necting Distributed Resources with Elec-
tric Power System, IEEE SCC21, 2003.
- [9] 「核一廠風力發電機組新建工程系統
衝擊分析報告」，中興電工。
- [10] 「台南縣北門鄉風力發電併聯計畫及
系統衝擊分析報告」，民國九十三年。