

95 kW 太陽光電系統併入二次配電網之系統衝擊分析

System Impact Analysis of a 95 kW Photovoltaic System Interconnected onto a Secondary Network Distribution System

黃維澤^{1*}
Wei-Tzer Huang

姚凱超¹
Kai-Chao Yao

黃育新²
Yu-Hsin Huang

邱嘉宏³
Chia-Hung Chiu

¹ 國立彰化師範大學工業教育與技術學系
Department of Industrial Education and Technology, National Changhua University of Education

² 臺灣電力公司輸變電工程處中區施工處
Department of Transmission Line and Substation Projects, Central Region Construction Office, Taiwan Power Company

³ 建國科技大學電機工程系
Department of Electrical Engineering, Chienkuo Technology University

* vichuang@cc.ncue.edu.tw

摘要

本文之主要目的在於探討太陽光電系統併入配電系統之衝擊分析。首先，蒐集太陽光電系統架構、運轉控制方式以及國內外分散式再生能源發電系統併網制訂的相關規範；其次，選定台電南部地區二處配電網路刻正規劃併入太陽光電系統為例，進行學理探討與系統塑模、分析；最後，透過電力系統分析軟體 ETAP Power Station 進行嚴謹地系統衝擊分析與計算。本文完成太陽光電系統與分散式電源併網相關學術文獻、技術報告與實際運轉案例之蒐集與彙整、實際案例衝擊分析檢討，以及建立系統化之太陽光電系統併網衝擊分析方法，故研究成果可作為相關業界之參考與應用。

關鍵詞：太陽光電系統、分散式電源、系統衝擊分析、電力潮流、電力品質。

Abstract

The main purpose of this paper is to explore the impact of a 95 kW PV system interconnected onto a secondary network system. First of all, the PV system structure, operation control mode, and related regulations for distributed energy generation systems were collected and discussed in detailed. Secondly, a Taipower distribution network in the southern region of Taiwan were employed as the sample system, and then the system-impact analysis were accomplished by theoretical analysis, simulation, and rigorous calculation using ETAP (Electric Transient Analysis Program) PowerStation. Finally, the outcomes are helpful for the distribution engineer and related study to realize the system impact of the PV systems interconnected onto secondary network distribution systems.

Keywords: photovoltaic systems, distributed source, system impact analysis, power flow, power quality.

1. 前言

近年來，由於人為因素加劇地球溫室效應 (Greenhouse Effect) 造成全球暖化 (Global Warming) 日益嚴重與極端氣候現象。綜觀相關研究報告與文獻 [1-2]

可獲知其主因乃歸咎於工業革命後溫室氣體 (Greenhouse Gases) 排放量更甚於過去所導致，其中大量地使用煤、石油、天然氣等石化燃料 (Fossil Fuel) 造成目前全球的二氧化碳以每年約六十億噸的量增加，為加劇溫室效應的主要氣體 [3]。因此，緩和溫室效應的首要之務為安定大氣，亦即抑制大氣中二氧化碳的濃度，然若要顧及經濟發展與生活品質的情況下，除了降低能源的使用量及提高能源的效率外，大量使用潔淨無污染的再生能源 (Renewable Energy)，例如：太陽能 (Solar)、地熱 (Geothermal)、風力 (Wind Power)、水力 (Hydro Power) 及潮汐 (Tidal Power) 等，一方面可避免二氧化碳的產生，另一方面又能充分利用天然資源，盡可能達成使用潔淨能源且零排放 (Zero Emission) 之目標。

據此，政府先後發布重大的能源政策與推動計畫，全力推動再生能源發電，以期做到「千架風力機」與「陽光屋頂百萬座」目標，其中，政府計畫於 2015 年前完成設置太陽光電發電達 0.42 GW，以及 2020 年完成設置 1.02 GW (約 34 萬屋頂設置) 目標。另外，經濟部亦規劃，再生能源發展將於 2025 年提前達成使用目標量達 6.5 GW，2030 年目標達 12.502 GW，其中 2030 年使用太陽光電目標量為 3.1 GW 目標，千支海陸風力目標量為 4.2 GW，全體再生能源占發電裝置容量可望達 16~20% [4-5]。由此可見政府全力推動再生能源決心。屆時，可預期未來將大幅提高分散式再生能源發電系統併入配電系統的容量。

有鑑於此，國內外相關產官學界以及相關研究紛紛針對分散式再生能源發電系統 (或稱分散式電源) 併網制訂相關規範以利分散式再生能源發電系統有效管理與發展 [6-8]，本文以上述相關研究為基礎，參考相關規範進行一 95 kW 太陽光電系統併入台電南部郊區 11.4 kV 配電系統之衝擊分析，預期本文所得之結果可提供產官學界以及相關業界作為分析分散式電源併網衝擊之參考，更進一步有助於政府推動再生能源政策，達成節能減碳目標以及永續發展。

系統擬併入台電某二次變電所#1主變所屬F#1饋線 Bus 6 併接點，如圖 1 所示，該系統將經由低壓責任分界點併入台電低壓配電網路。

2. 系統衝擊分析相關參數資料

2.1 系統單線圖

本文所分析之系統為工廠屋頂型 95 kW 太陽光電

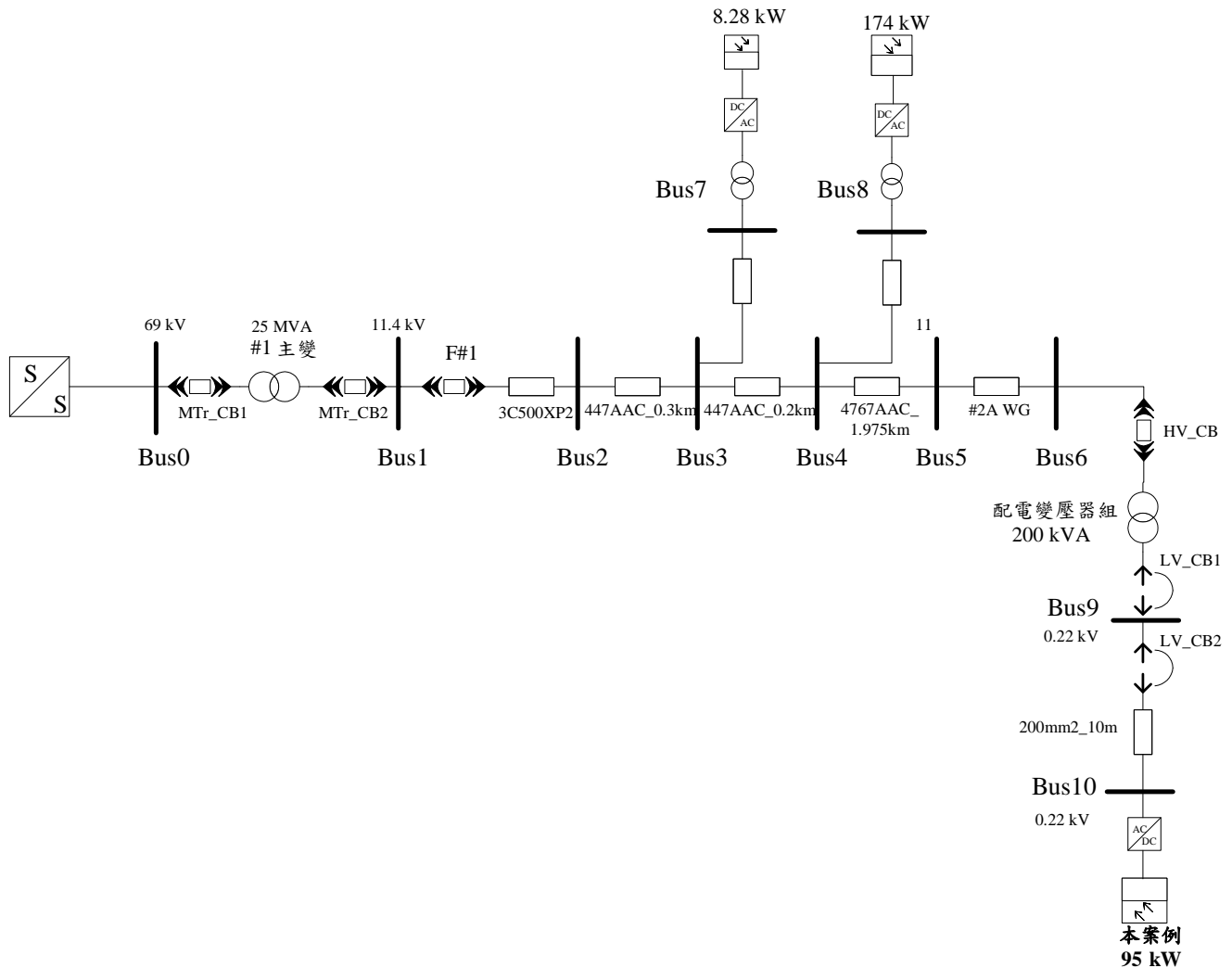


圖 1 95 kW 太陽光電系統及其上游電網之簡化系統單線圖

2.2 相關參數設定

本分析案例之上游系統變電所引接自 69 kV 次輸電系統，其短路容量為 1012 MVA、X/R 為 7.537；此外，#1 主變相關參數如表 1 所示，其額定容量為 25 MVA、額定電壓為 69 kV/11.4 kV，且一次側及二次側接線分別採用 Δ -Y 接地方式。另外，F#1 饋線 100 年度之最高負載量為 4.835 MVA，約為#1 主變最高負載量之 35%、最低負載量為 2.037 MVA，約為#1 主變最低負載量之 39%，如表 2 所示，而該饋線採用之配電饋線規格及其參數如表 3 所示，該饋線除了自變電所至第一個負載引接點(Bus2)採 3C500XP2 地下電纜外；其餘部分則採 3A477AAC 與#2AWG 架空線；另外，太陽光電發電系統至 F#1 饋線 Bus 6 之併網配電變壓器組採二台單相 100 kVA 變壓器(相關參數如表 4 所示)以 V-V 連接方式將三相 11.4 kV 轉為三相三線 220 V 方式供電，且二次配電線路採 200mm² 導線，其距離約 10 m。綜言之，由併接點至變電所饋線出口端之距離約為 4.965 km，故併

接點屬饋線中末段，相較於併入饋線前端者對系統穩態電壓變動率影響較大，因此有必要進行系統衝擊分析並予於檢討。

表 1 台電某 S/S 變電所#1 主變相關參數資料

#1主變				
額定容量	Z%	X/R	100年度最高負載量	100年度最低負載量
25 MVA	8.91	25	13.735 MVA	5.2 MVA

表 2 F#1 饋線負載資料

100年度最高負載量	100年度最低負載量
4.835 MVA	2.037 MVA

表 3 配電饋線規格及其阻抗參數

導線規格	三相正序阻抗
25 kV 500 MCM	0.1075+j0.1437 (Ω /km)
477 AAC	0.131+j0.364 (Ω /km)
25 kV #1AWG	0.5426+j0.1896 (Ω /km)
#2 AWG	0.945+j0.506 (Ω /km)
200 mm ²	0.101+j0.0878 (Ω /km)

表 4 配電變壓器規格及其阻抗參數

容量(kVA)	阻抗(Z%)	X/R
100	3.5	2.00

2.3 採用分析軟體與檢討案例說明

本案採用商用電力系統分析軟體 Electric Transient Analysis Program, ETAP PowerStation 進行系統衝擊分析與計算，分析及檢討內容涵蓋「台灣電力股份有限公司再生能源發電系統並聯技術要點」所列檢討項目。包括：

- ◆ 穩態電壓變動；
- ◆ 故障電流；
- ◆ 三相平衡；
- ◆ 功率因數；
- ◆ 直流成份；
- ◆ 諧波管制；

除了以上檢討項目外，因本案併入低壓三相三線 200 V 系統，故將在上述「穩態電壓變動」項下增列檢討配電變壓器容量、低壓導線線徑及其電壓變動率。使本案系統衝擊分析與檢討更臻完善。此外，本案例系統衝擊分析檢討之案例假設如表 5 所示，表中所列情境為系統極端情況，故以下針對所假設四個案例進行分析與檢討將涵蓋所有情況，因之，所檢討之結論具代表性。

表 5 本案系統衝擊分析檢討案例說明

案例	說明
Case#1A	饋線最高負載時，所有太陽光電發電系統未併網。
Case#1B	饋線最高負載時，所有太陽光電發電系統輸出最高額定且併入系統。
Case#2A	饋線最低負載時，所有太陽光電發電系統未併網。
Case#2B	饋線最低負載時，所有太陽光電發電系統輸出最高額定且併入系統。

3. 系統衝擊分析與檢討

3.1 穩態電壓變動分析與檢討

依據再生能源併網規範：「再生能源發電系統併接於台電公司系統造成責任分界點電壓變動率，加計同

變電所或同一變壓器已核准併網電網之影響，不含背景值應維持高低各百分之二點五以內。」，故本案執行電力潮流進行太陽光電發電系統併網前、後併聯接點之穩態電壓變動率計算公式如下：

$$VD\% = \frac{|V_{PV(with)}| - |V_{PV(w/o)}|}{|V_{PV(w/o)}|} \times 100\% \quad (1)$$

其中， $|V_{PV(with)}|$ 為太陽光電發電系統併網後之併接點電壓； $|V_{PV(w/o)}|$ 為太陽光電發電系統前之併接點電壓。

經電力潮流分析程式及公式(1)計算所得併接點穩態電壓變動結果，如表 6 所示，由計算結果可獲知不論在饋線最高負載或最低負載情況下，本案併接點穩態電壓變動率遠低於再生能源併聯技術要點之規定值 $\pm 2.5\%$ ，其中最大穩態電壓變動率均發生在饋線最高負載情況下，而且併接點低壓側穩態電壓變動率均高於高壓側，併接點高壓側最大穩態電壓變動率約為 0.113%，而併接點低壓側約為 0.873%。故符合規範值。此外，由於併網點配電變壓器額定容量為 200 kVA，本案太陽光電發電系統最大輸出功率為 95.04 kW，因此雖有逆送電力至高壓一次配電系統且低於其額定，但並無逆送功率至#1 主變；另外，低壓導線線徑採 200mm² 不論在導線安培容量以及所造成之電壓降以均符合規範。

表 6 Bus6 穩態電壓變動分析結果

案例 併接點	Case#1	Case#1	VD%	Case#2	Case#2	VD%
	A(pu)	B(pu)		A(pu)	B(pu)	
Bus6	0.9739	0.9750	0.113	0.9890	0.9900	0.101
Bus9	0.9739	0.9824	0.873	0.9890	0.9973	0.839

3.2 故障電流分析與檢討

本案例分析太陽光電發電系統併網前後各母線發生三相短路故障(3-Phase Fault)以及單線接地故障(Line-To-Ground Fault)之故障電流大小，表 7 所示為併網前各母線之三相短路故障電流(Duty ANSI C37)與單線接地故障電流(1/2 Cycle)分析結果。綜觀上述分析結果可得知，由於本案採用變流器額定電流 2 倍為其故障時提供之故障電流，因此該饋線三處太陽光電發電系統在故障期間貢獻至高壓側母線之故障電流約為 28.08 A，故太陽光電發電系統併網前後不論是三相短路故障電流或單線接地故障電流值均遠低於「再生能源發電設備運轉規範」之第一條所述發電機組加入後，系統三相短路電流應小於 10 kA 之規定。

例所採用之太陽能轉換器(ES5000)測試結果為最大輸出直流成份小於為 0.1 A，且交流輸出直流成份小於額定電流 0.5%，故符合台電管制標準。

表 7 各母線故障電流分析結果

故障型態 故障點	三相短路故障		單線接地故障	
	併網前	併網後	併網前	併網後
Bus2	6.9 kA	6.928 kA	7.2 kA	7.228kA
Bus7	5.0 kA	5.028 kA	5.2 kA	5.228 kA
Bus4	5.6 kA	5.628 kA	5.8 kA	5.828 kA
Bus8	2.3 kA	2.328 kA	2.4 kA	2.428 kA
Bus5	3.4 kA	3.428 kA	3.5 kA	3.528 kA
Bus6	3.1 kA	3.128 kA	3.1 kA	3.128 kA

3.3 三相平衡分析與檢討

台電目前對三相不平衡之限制為併接於低壓三相配電系統，其發電設備各相間不平衡容量不得大於 5 kW，本案太陽光電發電系統合計容量 95 kW，平均分配於三相，各相併接容量皆為 31.68 kW，經由變流器轉換連接至廠內低壓三相三線式配電盤，因此並不會對系統造成三相不平衡之影響。故符合規定。

3.4 功率因數分析與檢討

由再生能源發電系統併接技術要點得知，併接於高壓系統以下之發電廠，功率因數運轉原則：不論日間或深夜、例假日、國定假日、春節等期間，得維持 100%(亦即不逆送無效功率至本公司系統)。一般而言，變流器之運轉功因接近 100%，而本案例採用之太陽能轉換器(ES5000)運轉功因高於 99%。故符合併聯規範所設之規定值。

3.5 直流成份分析與檢討

由再生能源發電系統併接技術要點得知，發電設備輸出直流成份不得高於額定輸出電流之 0.5%。本案

3.6 諧波管制分析與檢討

由於太陽光電發電系統中的變流器，將直流電流轉至交流電流，並非完美的正弦波，因此會產生諧波，可能造成電力公司電網的諧波污染。依據台電「電力系統諧波管制暫行標準」，總諧波失真必須小於 5%，各次諧波限制百分比如表 8 所示。由廠商所提供之諧波測試數據顯示不論是各次諧波或總諧波失真均小於限制值，故符合台電管制標準。

表 8 諧波電流管制標準

奇次諧波	限制值	偶次諧波	限制值
3 至 9 次	<4%	2 至 10 次	<1%
11 至 15 次	<2%	12 至 16 次	<0.5%
17 至 21 次	<1.5%	18 至 22 次	<0.375%
23 至 33 次	<0.6%	24 至 34 次	<0.15%
大於 33 次	<0.3%	大於 34 次	<0.075%

3.7 總結

總體而言，本案例預定裝設 95 kW 太陽光電發電系統併入 F#1 饋線 Bus 6 三相三線 220 V 系統對配電系統所造成之衝擊影響，包括穩態電壓變動、故障電流、三相平衡、功率因數、直流成份，以及諧波管制等項目均依據「再生能源併聯技術要點」逐項予以評估分析，並採用信賴度極佳之商用電力系統分析軟體 ETAP PowerStation 分析所需的數據且利用相關公式正確地計算其結果，所得之結果均符合管制標準，如表 9 所示。

表 9 系統衝擊分析綜合檢討表

分析項目	分析值	規範值	是否符合規範
最大電壓變動率	0.873%	±2.5%	是
逆送功率	0	逆送功率不超過併接主變額定容量之 30%	是
最大故障電流	7.228 kA	10 kA	是
三相平衡	無	各相間不平衡容量不得大於 5 kW	是
功率因數	高於 99%	100%	是
最大直流成份	附錄 2，測試結果交流輸出直流成份小於額定電流 0.5%	0.5%	是
諧波管制	附錄 3，諧波測試數據顯示各次諧波及總諧波失真均小於限制值	台電「電力系統諧波管制暫行標準」	是

4. 結論

本文首先蒐集、彙整太陽光電系統架構、運轉控制方式以及國內外分散式再生能源發電系統併網制訂的相關規範；接者，選定台電南部地區配電網路刻正規劃併入太陽光電系統為例，進行學理探討與系統塑模、分析；最後，透過電力系統分析軟體ETAP PowerStation進行嚴謹地系統衝擊分析與計算，完成太陽光電系統併入配電網之系統衝擊與分析。簡言之，本文所完成之工程分析檢討結果以及建立之系統化太陽光電系統併網衝擊分析方法可作為相關業界之參考與應用；另外，本文之完成將有助於政府推動潔淨能源政策，藉以減少溫室氣體排放，減緩溫室效應。

誌謝

本文為國科會計畫之研究成果，計畫編號 NSC 101 - 2221 - E - 018 - 029，作者在此特申謝忱。

參考文獻

[1] Annex II Glossary, Intergovernmental Panel on

Climate Change, October 2010.

- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Chapter 1: Historical overview of climate change science.
- [3] http://www.ncu.edu.tw/~ncume_ee/tlyeh/shuan/greenhousegas.htm.
- [4] 經濟部能源局，經濟部能源局重大政策-穩健減核，逐步邁向非核家園，網址：<http://www.moeaboe.gov.tw/>
- [5] 經濟部能源局，2010 年能源產業技術白皮書，網址：<http://www.moeaboe.gov.tw/>
- [6] Schneider Electric, *Electric Installation Guide*, France: Schneider Electric 2010.
- [7] IEC 61000 4 30, Power quality measurement methods compliance report, International Electro technical Commission (IEC)
- [8] 台灣電力股份有限公司，台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點，網址：<http://www.taipower.com.tw/>