

# 考慮年負載與分散式能源模型之多重微電網最佳聯絡開關配置

## Optimal Tie-Switch Placement between Multi-Microgrids Considering Annual Load and Distribution Energy Resources Patterns

李宗泰<sup>1</sup>  
Zong-Tai Li  
林韋辰<sup>1</sup>  
Wei-Chen Lin

黃維澤<sup>1,\*</sup>  
Wei-Tzer Huang  
蕭耀賢<sup>1</sup>  
Chai-Hsien Hsiao

連國龍<sup>2</sup>  
Kuo-Lung Lian  
李立淳<sup>1</sup>  
Li-Chun Li

<sup>1</sup> 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  
\*vichuang@cc.ncue.edu.tw

<sup>2</sup> 國立台灣科技大學電機工程學系  
Department of Electrical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology  
ryanlian@mail.ntust.edu.tw

### 摘要

依據 IEEE Std. 1547.4，可將配電系統當作許多微電網之集合，以增進未來配電系統的控制性與運轉的穩定性。因此，本文提出求解多重微電網邊界開關配置問題，以改變微電網動態邊界來達到靠近最佳拓普結構，提高配電網的運轉效能與供電的可靠度。本文假設 48 種情境求取最大機率分布下之最小電流段建立微電網的動態邊界，預期除了可以避免主變、配電饋線過載與提高配電系統運轉效能，還可以在氣候災難下造成的配電系統事故，不須經過繁冗的傳統復電方式，改由多重微電網的自主運轉提供電力的穩定性與品質性。

**關鍵詞：**動態邊界、多重微電網、分散式電源、OpenDSS。

### Abstract

According to the IEEE Std 1547.4, distribution systems can be clustered into a number of microgrids to facilitate powerful control and operation infrastructure. Consequently, this paper proposes an approach to solve the tie-switch placement problem between multi microgrids. It will be helpful for changing the dynamic boundary of multi microgrids to reach the optimal topologies and to improve the operation efficiency and reliability of distribution networks. This paper assumes 48 scenarios to establish the dynamic boundary of the microgrid. The outcomes of this paper is not only to avoid the overloading of main transformers and distribution feeders, and improving the normal operating performance of distribution systems, but also to restore power effectively by the adaptive self-adequate operating of dynamic microgrids without traditional restore procedure under contingencies in natural disasters.

**Keywords:** dynamic boundary, multiple microgrids, distribution energy resources, OpenDSS.

### I. 簡介

台灣的電力系統目前仍以火力、核能、水力等大型集中式發電機組為主，在輔以積極發展之太陽光電

(Photovoltaic, PV)與風力(Wind Turbine, WT)發電等再生能源機組，集中式機組優點是供電量大，但經發電、輸電、配電流程到用戶端，除了容易造成長遠傳輸的電力損失，若在任何一個環節當中發生故障，即有產生供電匱乏情形，甚或造成經濟損失。目前全球正處於能源轉型的階段，台灣也因 2025 非核家園目標大力的推動再生能源發展，例如：太陽光電、風力發電、水力發電等綠能，這些分散式發電更靠近負載地區，可以減少長途傳輸所需消耗的損失，且部分電網系統故障時，仍可維持其他區域正常供電。由上述可知，分散式發電系統以及儲能併入配電網的佔比將逐年提高，因此再生能源高滲透之配電網將有機會形成主動電網，即便在失去上游輸電網電力供應下仍有能力供應區域配電網電力需求，顯見配電網以微電網運轉的重要性，微電網是由負載以及分散型能源(分散式電源與儲能設備)所構成之單一且可控制的小型電力系統[1-11]，圖 1 為微電網系統架構圖[12]。

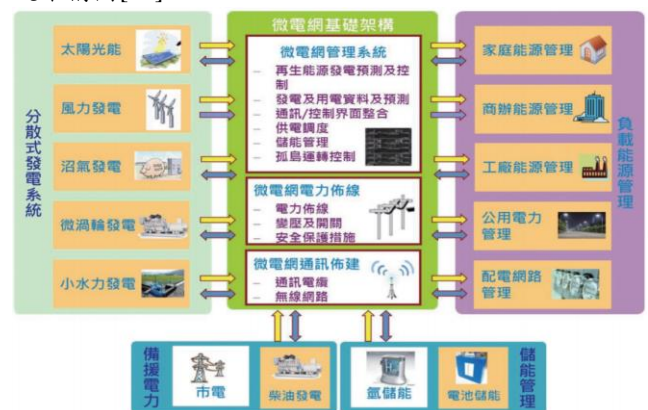


圖 1 微電網系統架構

本文擬定以文獻[13]所提之配電網為標的，探究大量分散式能源併網後若以多重、動態微電網方式運轉，各微電網之間邊界與聯絡開關需如何配置，以期使用智慧電網中的資通訊進行切換聯絡開關與分段開關的狀態，當系統的上游故障時，可以用設定中的動態邊界，讓配電網以多重微電網方式運轉，提高供電可靠度。

## II. 系統架構與情境設定

多重微電網可以想像為擁有自主性的微電網，可以依據目前的負載情況與發電量去做電網中的平衡，讓微電網保持運轉。若微電網中有一處的微電網發生故障時，可以依據故障區域進行隔離，讓其他微電網可以保持自身運轉的安全性。

### 2-1 系統模擬建構流程

本文提出多重微電網動態邊界配置方法，以此法可進行區域獨立運轉之模擬分析，圖 2 為微電網動態邊界配置流程。步驟 1 與 2 考慮到負載變動性及分散式能源(太陽光電、風力)的間歇供電特性，以北美加州區域之年度負載與分散式電源發電歷史資料作為系統參考依據，進行資料分析並彙整出用電和發電的特性，並建構一年之中最符合的運轉情境設定。步驟 3 則是對各種情境進行動態邊界的制定，制定的方法是去計算電網中每一條線路的機率電力潮流(Probabilistic Power Flow, PPF)，找出每條線路當中最大機率的負載線路，並找相對較低的負載線路做為候選線路(Candidate Lines, CLs)，其相鄰的母線則稱為邊界母線(Boundary Buses, BBs)，此方法可以保證 2 個 CLs 間微電網的供電。步驟 4 將全部的情境 CLs 取聯集，每個 CLs 間會形成子微電網，爾後會依據不同的情境將各個子微電網相互合併進行獨立運轉。

有虛擬邊界的微電網進行虛擬併網，依照情境的 CLs 上的隔離開關打開，進而改變微電網之邊界達到微電網自足的能力。上述的虛擬電網並非實際上併網，而是將選擇的微電網去做情境的運轉合併，進而將隔離開關切換，所以虛擬併網是整個配電網進行解聯。



圖 2 多重微電網聯絡開關配置求解流程

### 2-2 情境設定與數據分析

在現今的電力系統之中分散式能源的供電模式與負載特性誕生了新的電力型態，故在模擬試驗一年長期的系統前，應該先對北美區域的負載及分散式能源發電歷史資訊進行分析。圖 3~圖 10 分別為北美地區太陽光電發電、風力發電、電池發電、燃料電池、汽電共生燃料電池、汽電共生柴油以及住宅與商業/工業的日與年負載，圖 3 為 PV 年發電量，可依據月份的不同，PV 的日照時間、日照強度與發電量都會有所差異，夏季的日照時間與強度相較冬季來的多，春秋兩季則相差

遠；圖 4 為風力年發電量，依據月份的不同風力所產生的電量也會有不同，由於北美加州冬季吹西風，故其冬季的電量較夏季多，日夜差異較無明顯規律；圖 5 為電池年充放電量、圖 6 為燃料電池年發電量、圖 7 為汽電共生燃料電池年發電量及圖 8 為汽電共生柴油年發電量，則以小時為單位可以較為了解充放電的變化；圖 9 為北美加州住宅(藍線)與商業/工業(橘線)日負載，可以得知日間是商業/工業負載較高於住宅，而夜間則是住宅負載較高於商業/工業，亦可得知日夜之間白天總負載較高於夜間總負載；圖 10 為北美加州住宅(藍線)與商業/工業(橘線)年負載，可以得知在月份之中夏季負載較高於冬季。從上述的資訊可匯集統整出負載及分散式能源在月份、工作日與非工作日和日夜都有不同的特性，所以可以將情境設定中分為 12 個月份、工作日與非工作日及日夜，共 48 種情境(12\*2\*2)。PV 只有在白天會發電，則夜晚不會有發電量為 0，則月份可以分 PV1~PV12；風力發電跟 PV 可分為 WT1~WT12；負載因為月份加上工作日與非工作日和日夜之分，故可區分為 L1~L48；其他發電皆為固定值無其他情境，故維持 48 種情境，如表 1，以達模擬動態微電網在不同情境設定中，所改變的邊界結果。

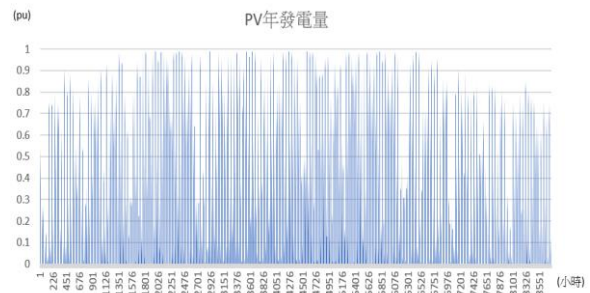


圖 3 PV 年發電量

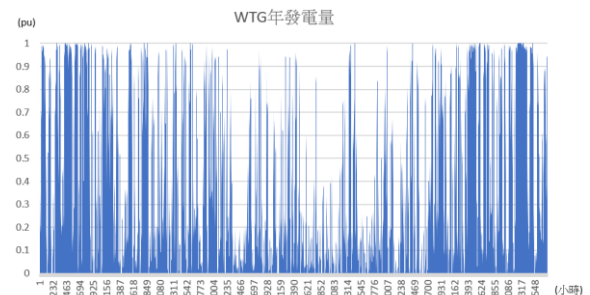


圖 4 風力發電年發電量

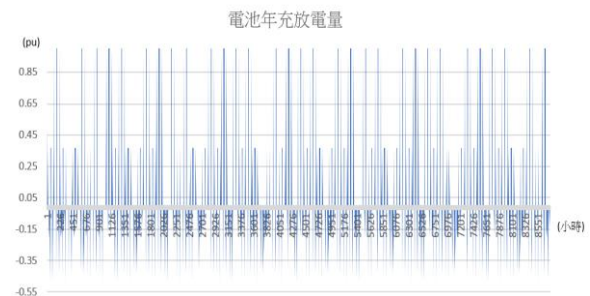


圖 5 電池年充放電量

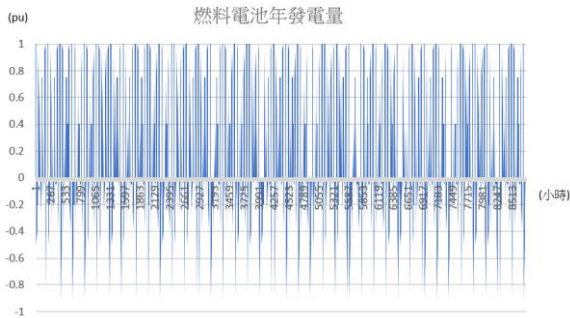


圖 6 燃料電池年發電量

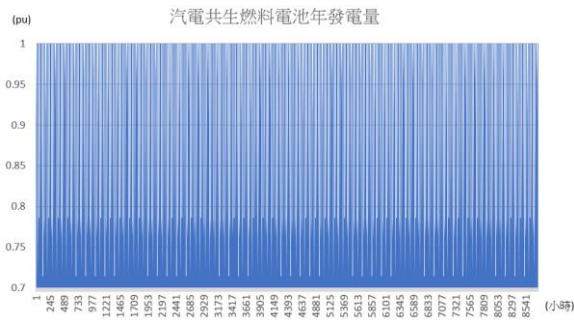


圖 7 汽電共生燃料電池年發電量

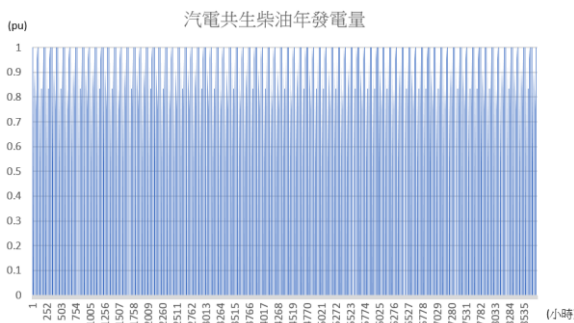


圖 8 汽電共生柴油年發電量

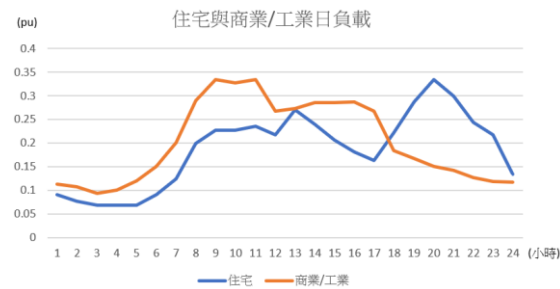


圖 9 住宅與商業/工業日負載

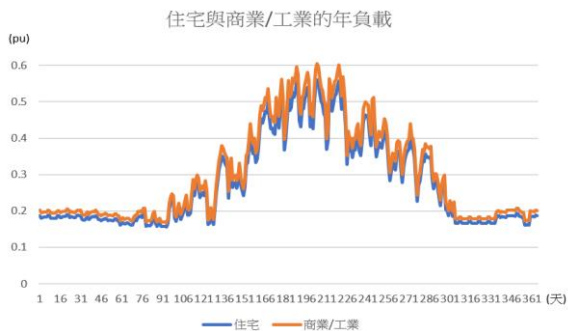


圖 10 住宅與商業/工業年負載

表 1 各運轉情境之負載與 DER 輸出特性

Scenario			PV	Wind	Load
1	Jan (1月)	Weekday	Day	PV1	L1
2			Night	0	L2
3		Weekend	Day	PV1	L3
4			Night	0	L4
5	Feb (2月)	Weekday	Day	PV2	L5
6			Night	0	L6
7		Weekend	Day	PV2	L7
8			Night	0	L8
9	Mar (3月)	Weekday	Day	PV3	L9
10			Night	0	L10
11		Weekend	Day	PV3	L11
12			Night	0	L12
13	Apr (4月)	Weekday	Day	PV4	L13
14			Night	0	L14
15		Weekend	Day	PV4	L15
16			Night	0	L16
17	May (5月)	Weekday	Day	PV5	L17
18			Night	0	L18
19		Weekend	Day	PV5	L19
20			Night	0	L20
21	Jun (6月)	Weekday	Day	PV6	L21
22			Night	0	L22
23		Weekend	Day	PV6	L23
24			Night	0	L24
25	Jul (7月)	Weekday	Day	PV7	L25
26			Night	0	L26
27		Weekend	Day	PV7	L27
28			Night	0	L28
29	Aug (8月)	Weekday	Day	PV8	L29
30			Night	0	L30
31		Weekend	Day	PV8	L31
32			Night	0	L32
33	Sep (9月)	Weekday	Day	PV9	L33
34			Night	0	L34
35		Weekend	Day	PV9	L35
36			Night	0	L36
37	Oct (10月)	Weekday	Day	PV10	L37
38			Night	0	L38
39		Weekend	Day	PV10	L39
40			Night	0	L40
41	Nov (11月)	Weekday	Day	PV11	L41
42			Night	0	L42
43		Weekend	Day	PV11	L43
44			Night	0	L44
45	Dec (12月)	Weekday	Day	PV12	L45
46			Night	0	L46
47		Weekend	Day	PV12	L47
48			Night	0	L48

### III. 微電網邊界

#### 3-1 機率電力潮流計算

本研究是利用全年負載及再生能源發電量的資料，用 OpenDSS 軟體來求解三相電力潮流後，再以 Python 數值運算軟體來計算線路潮流之機率密度函數 (PDF)，即為機率電力潮流。

本研究使用 Python 與 OpenDSS 協同模擬分析平台計算 PPF，找出最大機率之線路負載並以此選擇微電網邊界 CLs，程式流程與架構如圖 11 所示[14-20]。首先建立測試系統網路拓樸，其包含母線位置、線路阻抗、母線額定負載，以及分散式再生能源位置與額定容量，接著輸入年度再生能源 PV、WT、燃料電池等等發電量以及負載的標么資料，以動態的模式求解全年度 8760 小時每個時間點的三相電力潮流。再以 Python 透過 COM 界面特別擷取線路負載出來，將這 8760 筆資料依據前一章所述之 48 個情境劃分，分別計算 48 筆資料之 PDF，得到各情境之 PPF，最後將最大機率之線路負載列出並除以額定值之線路負載，若其低於額定之 15% 則將其選為微電網邊界 CLs。

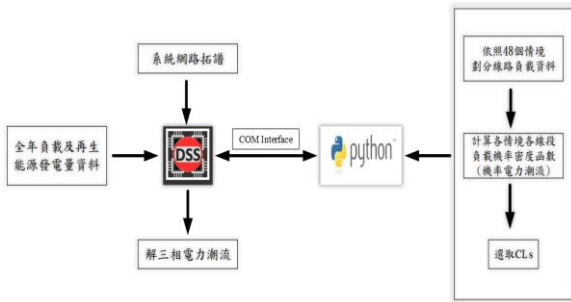


圖 11 機率電力潮流運算流程

### IV. 結果與討論

本研究以假設 48 種情境建立微電網的動態邊界，預期除了可以避免主變、配電饋線過載與提高配電系統運轉效能，還可以在氣候災難下造成的配電系統事故，不須經過繁冗的傳統復電方式，改由多重微電網的自主運轉提供電力的穩定性與品質性。

#### 4-1 系統架構

本文所提標的系統單線圖如圖 12、13 所示[13]，其中分散式能源(DER)的位置與容量最佳配置於[21-26]中已有深度的探討，不再贅述，相關線路數據、負載與饋線阻抗參數如文獻[13]所示，DER 的位置以及額定功率如表 2 所示[13]。

圖 14 是依據 48 個模擬情境中制定的全部邊界 CLs 取聯集所切割出來的子微電網，則分成 A1 與 A2 子微電網，表 3 為 48 種情境所選定的邊界線路 CLs 以及邊界母線 BBs，在緊急事件時，可依照當下狀態將子微電網進行虛擬併網，各種的情境下系統可分成不同架構的微電網，以達到自足的動態邊界設定。

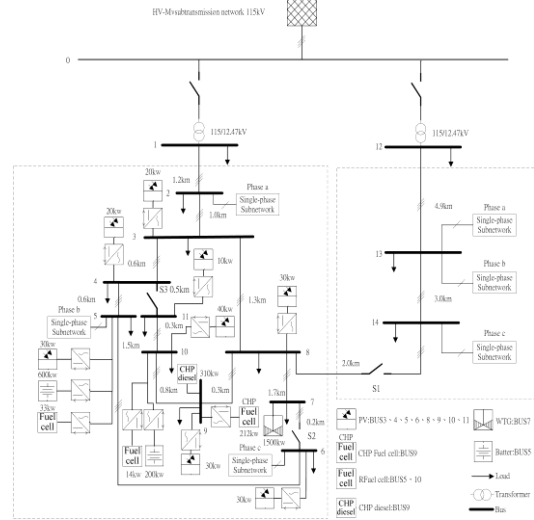


圖 12 標的三相系統單線圖

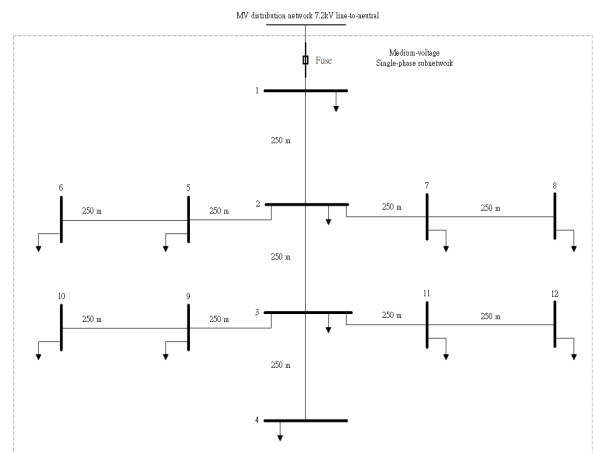


圖 13 標的單相系統單線圖

表 2 北美配置之 DER 位置、類型、最大功率

Bus	DER Type	P <sub>max</sub>
		[kW]
3	Photovoltaic	20
4	Photovoltaic	20
5	Photovoltaic	30
5	Battery	600
5	Residential fuel cell	33
6	Photovoltaic	30
7	Wind turbine	1500
8	Photovoltaic	30
9	Photovoltaic	30
9	CHP diesel	310
9	CHP fuel cell	212
10	Photovoltaic	40
10	Battery	200
10	Residential fuel cell	14
11	Photovoltaic	10

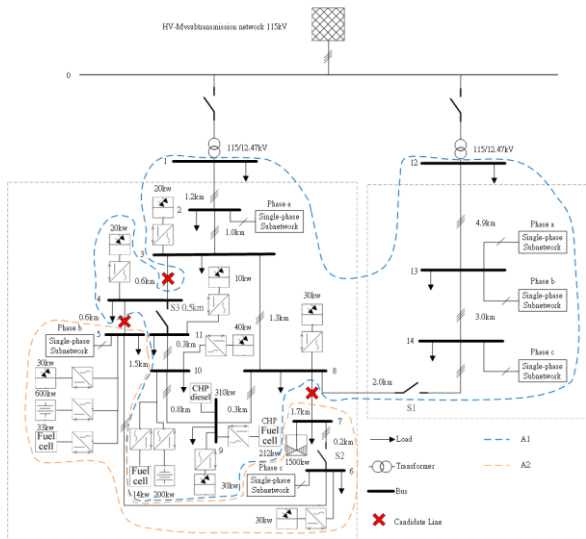


圖 14 微電網邊界制定結果

表 3 各運轉情境之微電網邊界

Scenario	CLs	BBs
1	4	(4-5)
2	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
3	4	(4-5)
4	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
5	4	(4-5)
6	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
7	4	(4-5)
8	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
9	4	(4-5)
10	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
11	4	(4-5)
12	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
13	4	(4-5)
14	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
15	4	(4-5)
16	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
17	4	(4-5)
18	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
19	4	(4-5)
20	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
21	4	(4-5)
22	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
23	4	(4-5)
24	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
25	4	(4-5)
26	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
27	4	(4-5)
28	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
29	4	(4-5)
30	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
31	4	(4-5)
32	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
33	4	(4-5)
34	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
35	4	(4-5)
36	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
37	4	(4-5)

38	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
39	4	(4-5)
40	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
41	4	(4-5)
42	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
43	4	(4-5)
44	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
45	4	(4-5)
46	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
47	4	(4-5)
48	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)
Union	3,4,9	(3-4),(4-5),(7-8)

## V. 結論

本文以年負載與分散式電源發電量並考慮 48 種情境進行模擬分析，計算最低電流段並取其聯集建立多重微電網的聯絡開關，所建立之聯絡開關除了可以避免主變、配電饋線過載與提高配電系統運轉效能，還可以在氣候災難下造成的配電系統事故，不須經過繁冗的傳統復電方式，改由多重微電網的自主運轉提供電力的穩定性與品質性。

## 誌謝

本研究承蒙科技部計畫編號 109-3116-F-006-019 -CC1 之經費補助，特此感謝。

## 參考文獻

- [1] EPRI, Integrating Distributed Generation Into the Electric Distribution System, *Distributed Resources: Information for Business Strategies*, February 2002.
- [2] R.H.Lasseter, Fellow, "MicroGrids," *IEEE Power and Energy Magazine*, Volume 5, issue4, July-Aug. 2007 Page(s):78 – 94.
- [3] T. H. Chen, M. S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, and E. A. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 1146-1152, 1991.
- [4] T. H. Chen, M. S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, and E. A. Chebli, "Three-phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, pp. 1671-1681, 1998.
- [5] T. H. Chen and W. C. Yang, "Modeling and Analysis of Three-phase Four-wire Distribution Transformers with Mid-tap on the Secondary Side", *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, Vol. 2, 3-5 pp. 723-727, 1998.
- [6] T. H. Chen, J. D. Chang, Y. L. Chang, "Models of Grounded Mid-tap Open-wye and Open-delta Connected Transformers for Rigorous Analysis of A Distribution System," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, No. 1, pp. 82-88, 1996.
- [7] T. H. Chen and Y. L. Chang, "Integrated Models of Distribution Transformers and Their Loads for Three-phase Power Flow Analyses", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No.1, pp. 507-513, Jan. 1996.
- [8] T. H. Chen and J. T. Cherng, "Optimal Phase Arrangement of Distribution Transformers Connected to a Primary Feeder for System Unbalance Improvement and Loss Reduction Using a Genetic Algorithm, "Proceeding of the 21th International Conference on Power Industry Computer Applications, pp.

- 145-151(1999).
- [9] C.-H. Lin, C.-S. Chen, H.-J. Chuang, and C.-Y. Ho, "Heuristic rulebased phase balancing of distribution systems by considering customer load patterns", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp 709- 716, May 2005.
- [10] M.-Y. Huang, C.-S. Chen, C.-H. Lin, M.-S. Kang, H.-J. Chuang and C.- W. Huang, "Three-phase balancing of distribution feeders using immune algorithm." *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 3, pp. 383-392, 2008.
- [11] C.-H. Lin, C.-S. Chen, H.-J. Chuang, M.-Y. Huang, and C.-W. Huang, "An expert system for three-phase balancing of distribution feeders", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp 1488-1496, August 2008.
- [12] 陳貽評、彭兆國, "電力技術專欄-微電網概述," *電力人* • 第十六期 2014年11月 P16.
- [13] Kai Strunz and Ehsan Abbasi, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources," , pp. 27-42, 2014.
- [14] R.C. Dugan, T.E. McDermott, "An open source platform for collaborating on smart grid research," 011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 24-29 July 2011.
- [15] T. Niknam, A. K. Fard, A. Seifi, "Distribution feeder reconfiguration considering fuel cell/wind/photovoltaic powerplants," *Renewable Energy*, Vol. 37, pp.213-225, 2012.
- [16] R. A. Hooshmand, and S. Soltani, "Fuzzy Optimal Phase Balancing of Radial and Meshed Distribution Networks Using BF-PSO Algorithm," *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 27, No. 1, pp. 47-587, February 2012.
- [17] V. Ramachandran, *Modeling of Utility Distribution Feeder in OpenDSS and Steady State Impact analysis of Distributed Generation*, Master of Science in Electrical Engineering, West Virginia University.
- [18] R. C. Dugan, Thomas E. McDermott, "An Open Source Platform for Collaborating on Smart Grid Research," *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 24-29 July 2011, pp. 1-7.
- [19] D. Montenegro, M. Hernandez, G. A. Ramos, "Real time OpenDSS framework for distribution systems simulation and analysis," 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 3-5 Sept. 2012, pp. 1-5.
- [20] Applications, Volume 45, Issue 2, pp. 575 - 581, March-April 2009.
- [21] IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution Systems, IEEE C57.105™-1978 (R2008)
- [22] W. H. Kersting, W. H. Phillips and W. Carr "A New Approach to Modeling Three Phase Transformer Connection," *IEEE Transaction on Industry Applications* Jan/Feb 2000.
- [23] M. W. Siti, D. V. Nicolae, A. A. Jimoh, and A. Ukil, "Reconfiguration and load balancing in the LV and MV distribution networks for optimal performance", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp 2534- 2540, Oct. 2007.
- [24] K. Mahmoud and M. Abdel-Akher, Analysis of Hybrid Photovoltaic and Wind Energies Connected to Unbalanced Distribution Systems, 2010 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), Nov 29 - Dec 1, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 79-84.
- [25] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "A Three-Phase Power Flow Approach for Integrated 3-Wire MV and 4-Wire Multigrounded LV Networks With Rooftop Solar PV," *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 1728-1737, November 2012.
- [26] T. Boehme, A. R. Wallace, and G. P. Harrison, "Applying Time Series to Power Flow Analysis in Networks With High Wind Penetration," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 951-957, August 2007.