

設計汽電共生廠低電壓保護解聯電驛

Design of Under Voltage Relay for an Industrial Plant with Cogeneration Units

許振廷
C. S. Hsu
南台科技大學
台灣 台南市
Department of Electrical Engineering
Southern Taiwan University
of Technology
Tainan, TAIWAN.

陳朝順 李奕德
C. S. Chen Y. D. Lee
國立中山大學電機工程系
台灣 高雄市
Department of Electrical Engineering
National Sun Yat-sen University
Kaohsiung, TAIWAN.

林嘉宏 黃正雄
C. H. Lin J. S. Huang
國立高雄應用科技大學
台灣 高雄市
Department of Electrical Engineering
National Kaohsiung University
of Applied Sciences
Kaohsiung, TAIWAN.

何姿瑩
C. Y. Ho
高苑科技大學
台灣 高雄縣
Department of
Electrical Engineering
Kao-Yuan University
Kaohsiung, TAIWAN.

摘要

本文主旨在以暫態穩定度分析制定汽電共生廠的解聯時機，文中詳細考慮研究系統的發電機、激磁系統及調速系統的模式，再經過台電鳳農事故後，設計一組低電壓解聯保護電驛以防止廠內重要性負載因電力搖擺而跳脫，最後再以暫態穩定度軟體(Cyme)模擬此一事故，用以驗證所設計之低電壓解聯電驛的正確性，其結果證明汽電共生廠在此事故後仍能繼續維持穩定獨立的運轉。

關鍵字：暫態穩定度,保護電驛,汽電共生

Abstract -The paper of this study is design of tie line tripping for a large customer system with multiple cogeneration units. The mathematical models of the generators, exciters and governors have been identified. After that the fault event of the Taipower of Fongnong, to design of under voltage relay prevents critical loads from tripping due to power swing. Finally, the transient stability software(Cyme) simulated this fault event. By this manner, the industrial power system is able to be isolated from the utility system in time to prevent the collapse of the industrial power system and the cogeneration units.

Key Work : transient stability,protective relay,cogeneration

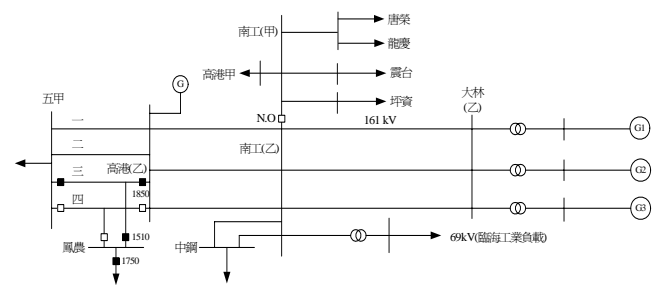
I. 緒論

本文以中國鋼鐵公司的汽電共生系統作為研究對象，由於中鋼電力系統不斷的擴充、廠內負載用電持續的成長及系統架構的變遷，導致既有的解聯系統可能無法針對各種台電系統的故障及時動作，使中鋼電力系統與台電系統正確解聯，維持工廠負載用電安全，因此有必要重新檢討修訂既有的解聯系統，以因應現階段及未來中鋼電力系統的改變，此外大部份的台電系統故障均會導致電壓下降，若工廠的低電壓解聯電驛設定太過靈敏，將會使中鋼系與台電系統解聯並執行卸載動作，造成部份負載不必要的停電，反之，若低電壓設定不靈敏，中鋼電力系統將無法與台電系統及時解聯，亦會導致許多負載因低電壓跳脫，且汽電共生機組可能因輔機系統失電而跳脫，因此聯結線上的低電壓解聯電驛動作時機將會影響廠內負載是否能夠於台電系統發生故障後持續運轉，本文利用暫態穩定度分析中鋼鄰近台電系統的故障臨界清除時間，用以決定聯結線上的低電壓保護設定。

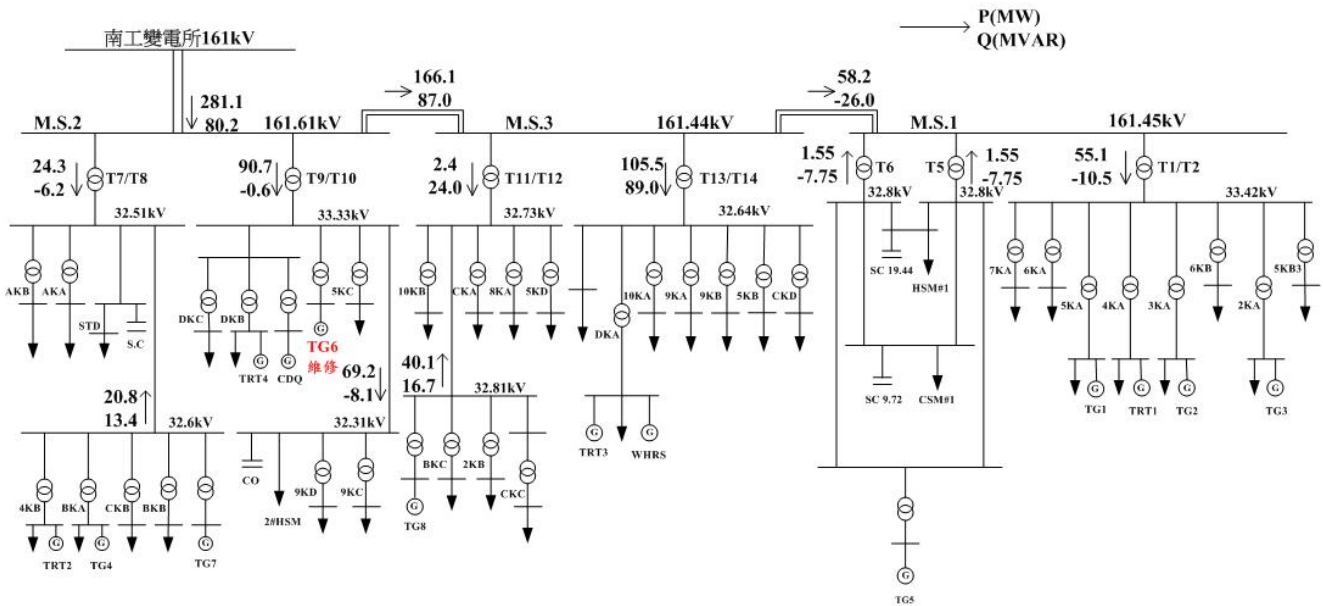
II. 系統簡介

(a) 台電系統

中鋼位於高雄市小港臨海工業區，其鄰近台電系統網路架構如圖一所示，當台電系統發生故障時，如大林發電廠之發電機組跳脫，南工、高港及五甲變電所匯流排或傳輸線路故障等，中鋼電力系統勢必會受台電系統暫態擾動而影響，為了確保中鋼汽電共生機組能夠持續穩定運轉，並維持廠內重要負載供電，有必要重新檢討聯結線之保護電驛設定，於適當時機與台電系統解聯，或工廠內部解聯進行獨立運轉，因此將鄰近台電系統網路納入中鋼之電力系統，分析中鋼汽電共生系統之暫態穩定度。中鋼電力系統由台電南工變電所之匯流排(乙)以雙迴路161kV引進至該廠第二主變壓站(MS2)，早期此匯流排亦提供電力給唐榮、龍慶及震台鋼鐵工廠之特高壓161kV工業用電用戶，為了避免遭受中鋼電力系統之負載用電干擾，台電將此特高壓用電系統遷移，並由南工變電所匯流排(甲)來供電，而南工161kV匯流排甲、乙乃以常開斷路器相互連絡，此外，台電系統透過二次變電站將南工(乙)161kV降壓至69kV，供電至其它臨海工業區之負載。在此區域還包括台電大林電廠，三部火力發電機組G1、G2、G3容量分別為300MVA、300MVA、375MVA，以三迴路161kV傳輸線送電至南工變電所(乙)，經三迴路連結至高港特高壓變電所161kV匯流排(乙)，再透過四迴路連結至五甲變電站以構成整個中鋼鄰近之台電系統網路，並以G代表其餘台電系統之等效發電機組。



圖一 台電系統單線圖



圖二 中鋼電力系統單線圖

(b) 中鋼電力系統架構及負載潮流分析

中鋼為一大型汽電共生工廠，圖二為中鋼電力系統單線圖及系統負載潮流分析，用以做為系統暫態穩定度分析之初始運轉條件，中鋼電力系統第二主變電站(MS2)除由台電南工變電所 161kV 引接雙迴路以常閉式斷路器並聯，另外經由雙迴路併聯至第三主變電站(MS3)及第一主變電站(MS1)，其中第一、二主變電站之 33kV 匯流排經 33kV 電纜線路供應一、二號冷軋及熱軋場之 33kV 大型軋鋼馬達負載，再經 33kV/11.5kV 變壓器降壓至 11.5kV 用電等級至其它製程工場，包括一、二號冷軋及熱軋輔助軋鋼負載工場、燒結場、煉鋼場、煉焦場、鋼板場、線材場，及其它重要公用系統負載，如氧氣一、二、三場及一、二號動力場，其中氧氣場共含 8 組氧氣機組(#1~#8)，分別由變壓器 3KA、CKA、CKB、CKC 及 CKD 供電，而動力一場主要供應 TG1、TG2、TG3 及 TG8 發電機所需之輔助動力系統，動力二廠則供應 TG4、TG5、TG6 及 TG7 之輔助負載用電，廠內發電機組 TG1~TG4、TRT1~TRT4、WHRS 均直接與工場 11.4kV 匯流排併聯，而 TG5~TG8 及 CDQ 則經升壓變壓器與系統 33kV 匯流排併聯。經擴廠計劃及系統架構變遷後，全廠平均負載用電約 560MW~630MW，最高可達 730MW，且整廠發電機組總裝置容量為 567MVA，汽電共生機組約可產生 360MW，足以供應中鋼廠內 50%~60%之負載用電。

III. 系統元件模型之推導

由於電力系統由發電機、激磁系統、調速系統、負載、網路及其它設備所構成，所以在執行暫態穩定度分析之前，須先建立這些元件的數學模型，以下分別針對本研究系統部份重要設備的等效模型加以說明。

(a) 發電機模型

在 P.M. Anderson 所著之"Power System Stability Control"及 P.C. Krause 所著之"Analysis of Electric Machinery"中對發電機模型的推導過程皆有詳細之說

明，利用派克轉換將定子端三相電壓、電流、磁通鏈轉變成以 $q-d$ 軸表示之方程式，並由一連串複雜的推演將發電機以雙軸理論模型表示。依據系統實際的需求和各發電機參數的取得，可選用不同發電機模型，中鋼發電機組 (TG1~TG8、TRT1~TRT4、CDQ、WHRS) 模型及台電系統大林廠之發電機組 (G1~G3) 模型均詳細考慮暫態及次暫態效應，在 q 、 d 軸上各設置有二組阻尼繞組(damper winding)，並且考慮發電機的飽和效應以模擬較為準確之暫態響應。

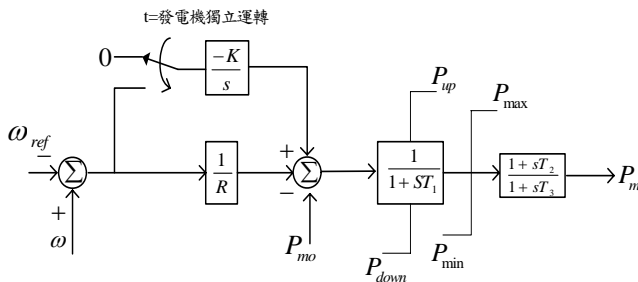
(b) 激磁系統模型

激磁系統可用來控制發電機輸出端電壓及調整虛功率大小，主要的控制模組包括電壓調整器、激磁機及電力系統穩定器，其控制流程為先將發電機端電壓(V_i)經由比壓器(PT)降壓，由整流線路濾波後做為回授訊號，與參考電壓(V_{ref})比較得到端電壓偏移量(ΔV_i)訊號，再與電力系統穩定器之輸出一起輸入電壓調整器，最後由電壓調整器來控制激磁機以改變磁場電壓(E_{fd})的大小，其電壓調整器的控制模式又可分為定功率因數及定電壓控制兩種，以定功因控制模可維持發電機之輸出功率因數，而定電壓控制模式則可維持發電機之輸出端電壓，由於中鋼廠內軋鋼負載變動量大，造成系統電壓不穩定，因此部份發電機組以定電壓控制模式來運轉，提供虛功率補償維持系統電壓。台電系統大林廠發電機組 G1~G3 的激磁系統則為 IEEE Type 1 型式，而中鋼發電機組 TG6~TG8、CDQ 的激磁系統為 IEEE Type 2，TG1~TG5 的激磁系統為 IEEE Type 3。

(c) 調速系統模型

發電機調速控制系統係用來控制發電機組原動機的轉速及調整輸出實功率大小，此控制系統即以發電機的轉子轉速(ω)做為回授訊號，與參考轉速(ω_{ref})比較得到轉速偏差($\Delta\omega$)訊號，經調速控制器放大，並轉為控制伺服馬達的功率訊號，以改變蒸汽汽閥的位置來調整進入渦輪機的蒸汽大小，最後影響渦輪機之輸出機械功率(P_m)

以維持發電機在同步轉速運轉。一般汽電共生機組的轉速差調整器可做定壓力控制或定頻率控制，當汽電共生機組與台電系統併聯運轉時，系統頻率將無法單獨由汽電共生機組來調整，因此採用定壓力控制模式運轉，即依據工廠所能產生原動機之輸入功率大小，調整汽電共生機組的輸出功率，用以維持蒸汽系統壓力平衡；當汽電共生機組與台電系統解聯時，為了調整獨立系統頻率，TG6、TG7及TG8汽電共生機組的調速系統則改作頻率控制如圖三所示，其中T1為調速伺服器的時間延遲，T3為蒸氣櫃的時間常數。



圖三 中鋼發電機組調速系統頻率控制模型

(d) 負載模型

電力系統負載模型可分為傳統負載模型和動態負載模兩種。傳統負載模型為定功率(與電壓無關)、定電流(與電壓一次方成正比)、定阻抗(與電壓平方成正比)的組合。動態負載模型則考慮感應電動機的特性參數於感應電動機的模型，使用較詳細的感應電動機模型，可得到較精確的結果，然而由於系統感應馬達的數目相當多，如果每個馬達皆使用其動態模型，將會使整個穩定度的分析花費過長的時間及過大的記憶空間，雖然此問題可在不同的匯流排使用感應馬達之等效聚集模型加以改善，但在實際電力系統中取得這些感應電動機的參數並不容易，所以本研究電力系統中的負載均假設為定功率負載，並在電壓小於0.7 p.u.時變成定阻抗負載；另外本廠之負載以低壓感應馬達為主，當頻率上升時馬達負載會增加而頻率下降時馬達負載會減少，對於因頻率變動所造成之負載變量亦加以考慮，此負載變量之大小與馬達特性相關，而本廠之負載則假設當系統頻率變動1%時，負載變動2%，即負載阻尼常數(load-damping constant) D 設定為2。

IV. 卸載策略

當台電系統發生擾動故障，若汽電共生廠與台電系統解聯，將造成汽電共生系統獨立運轉，若廠內自發電量不足供應本身負載需求，將會導致獨立運轉系統頻率下跌，若廠內無適當的卸載措施，則系統頻率將無法回升，使得汽電共生機組因低頻運轉而跳脫，全廠發電量將會減少而更加無法滿足廠內負載，最終將導致工廠全黑狀態；反之，若汽電共生系統的發電量多於廠內負載本身需求，則此獨立運轉電力系統的頻率將會上升，此時除了可跳脫發電機外，廠內部份發電機將有必要調整降低輸出功率，避免原動機於高速運轉跳脫。由於中鋼大部份負載用電仍向台電購買，因此有必要制定一套完整的卸載策略，當中鋼電力系統與台電系統解聯後，執

行事先設定的卸載量，用以維持汽電共生系統的頻率，而表一為中鋼電力系統現階段的解聯卸載策略，表二、三所示分別為中鋼卸載系統三個階段所切除的變電站負載，其中每段卸載量將依據中鋼系統為輕載、中載與重載時，分別做調整。

表一 中鋼現階段的解聯卸載策略

		現階段設定
卸載條件	1 st	86-1 動作後立即卸載
	2 nd	(1)執行卸載 1 st 2 秒後 f<59.2Hz (2)執行卸載 1 st 1 秒後 V<0.85p.u. (3)執行卸載 1 st 0.5 秒後 V<0.6p.u.
	3 rd	(1)執行卸載 1 st 2 秒後 f<59.2Hz (2)執行卸載 1 st 1 秒後 V<0.85p.u. (3)執行卸載 1 st 0.5 秒後 V<0.6p.u.

表二 第一階段卸載量

第	BUS	輕載(MW)	中載(MW)	重載(MW)
一	10KA	11.0	13.0	14.2
	1CSM	0.0	22.0	40.8
	1HSM	0.0	25.0	50.0
	2CSM	15.0	15.0	19.0
	2HSM	50.0	50.0	91.0
	4KB	15.0	16.0	17.1
	5KB3	0.2	10.2	16.8
	6KA	24.0	25.0	26.9
	9KA	11.0	13.0	14.9
	9KB	21.0	23.0	24.0
卸載	9KC	12.0	13.0	14.3
	9KD	5.0	7.0	7.7
	AKB	11.0	12.0	13.1
	DKA	20.0	22.0	23.8
	DKB	23.0	24.0	25.0
Total		218	290	399

表三 第二及第三階段卸載量

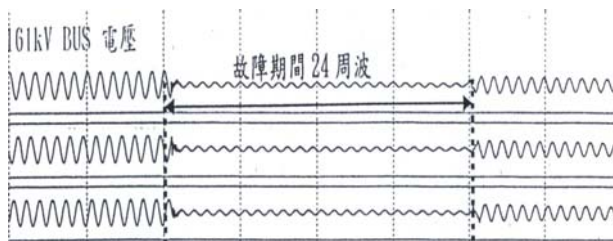
第	BUS	輕載(MW)	中載(MW)	重載(MW)
二	7KA	7.0	8.0	8.8
	8KA	5.0	7.0	7.3
	3KA	22.2	22.2	22.2
	5KA	10.0	11.0	12.0
	AKA	16.0	17.0	18.1
	AKB	11.0	12.0	13.1
	5KC	13.0	14.0	15.2
Total		84	91	97
三	CKB	11.0	12.0	13.2
	BKA	28.0	29.0	30.5
Total		39	41	44

V. 實例模擬

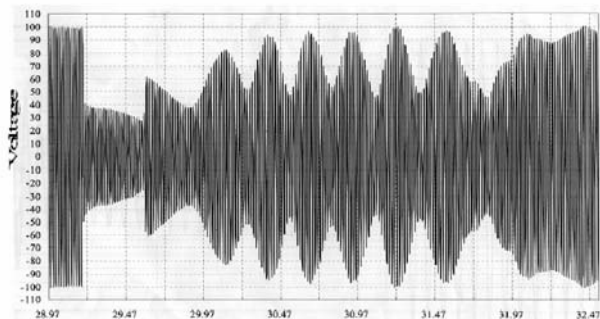
台電系統故障實例分析：

此故障實例為台電鳳農變電所 161kV 匯流排發生三相接地故障，當台電系統 161kV 匯流排或輸電線路故障，台電主保護電驛均設計在 6 週波內立即動作將故障清除，而針對此鳳農事故，由於圖一中的#1510 斷路器未能夠有效的開啟，因此作動台電後衛保護系統，並於故障發生 24 週波後跳脫高港#1850 斷路器及五甲#1580 斷路器，此時台電系統才與鳳農匯流排的故障隔離，在故障期間，由五甲變電所記錄的實際電壓變動如圖四所示，當故障清除後，台電系統電壓並未立即恢復正常，且出現電力搖擺現象持續 3.5 秒以上，造成大林發電廠三部火力發電機組 G1、G3 及 G2 的輔機系統電壓過低，分別於事故發生 3.4 秒、4.4 秒及 9.4 秒後相繼跳脫。除此之外，因系統故障持續 0.4 秒後才被清除。此事例之暫態穩定度分析，即依據上述台電系統所記錄到的電壓和頻率變化，配合當時中鋼所發生的電力事故，模擬中鋼電力系統暫態響應。

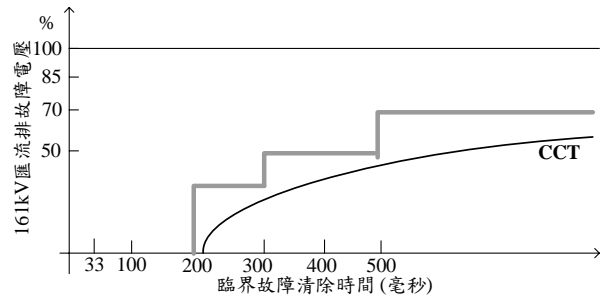
當鄰近中鋼的台電系統發生故障時，大部份均會導致系統電壓的下降，使中鋼電力系統受到較大的衝擊；圖五為 94 年 12 月所發生的台電鳳農事故時中鋼電力系統 161kV 匯流排實際電壓變化曲線，在此台電事故中，中鋼 161kV 聯結線上的解聯電驛並未動作，且當台電將故障清除時，系統電壓發生振盪，造成許多負載及發電機輔機系統跳脫。經由暫態穩定度的分析，中鋼 MS2 匯流排的臨界清除時間(CCT)如圖六所示，若增加兩段低電壓電驛保護設定($V < 0.5p.u.$ 、 $TD = 0.3$ 秒及 $V < 0.3p.u.$ 、 $TD = 0.2$ 秒)如圖七，針對鄰近較嚴重的台電系統故障，可迅速解聯以避免類似的事故再次發生。



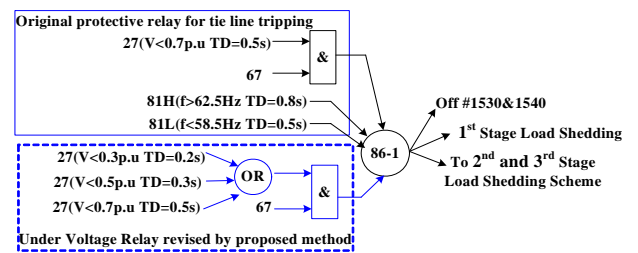
圖四 五甲變電所電壓曲線



圖五 鳳農事故中鋼系統實際電壓曲線



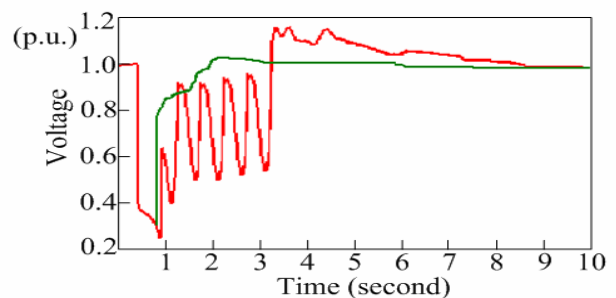
圖六 中鋼 MS2 匯流排的故障臨界清除時間



圖七 主解聯卸載系統電驛設定修訂

VI. 暫態穩定度分析

針對台電系統如此嚴重的 161kV 匯流排接地故障事例，若中鋼電力系統未能及時與台電系統解聯，將會導致重大的經濟損失，包括發電機組跳脫及負載設備停電，如此必須耗費人力與時間，才能將中鋼整個製程系統恢復正常運轉，若在主解聯系統上增加二組低電壓電驛串聯方向性過電流電驛(一組 $V < 0.5p.u.$ 、 $TD = 0.3$ 秒；一組 $V < 0.3p.u.$ 、 $TD = 0.2$ 秒)，則在此事故情況下中鋼電力系統會與台電系統解聯而獨自運轉；圖八為中鋼電力系統和台電系統外部未解聯與解聯獨立運轉時的電壓響應，此時中鋼電力系統較接近輕載運轉，故卸載 218MW 即可使整個電力系統回復正常，系統電壓不會有電力搖擺的情況發生，同時可迅速的回升至額定值運轉。



圖八 中鋼系統未解聯與解聯獨立運轉之電壓響應

VII. 結論

本論文主要為探討在汽電共生廠發生電力事故後，如何經由電力系統暫態穩定度分析，重新增加一組低電壓解聯保護電驛，使得汽電共生廠能在電力系統故障發生期間及清除後，仍能回復穩定運轉而避免機組受損或因跳機而導致全廠停電造成重大損失。本文所設計的低電壓保護解聯電驛在經過暫態穩定度軟體(Cyme)

模擬後，確可有效及時的與台電系統解聯，並經由適當的卸載量，即可維持廠內重要的負載不會跳脫。

IX. 參考文獻

- [1] C. T. Hsu, C. S. Chen, J. K. Chen, "The Load Shedding Scheme Design for an Integrated Steelmaking Cogeneration Facility," IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 33, No. 3, May 1997, pp. 586-592.
- [2] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, ser. Series on Power Engineering, New York: IEEE Press, 2000.
- [3] D. J. Won, S. J. Ahn, S. I. Moon, "A Modified Sag Characterization Using Voltage Curve for Power Quality Diagnosis," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, October 2005, pp. 2638-2643.
- [4] Saša Z. Djokić, Jovica V. Milanović, and Daniel S. Kirschen, "Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Undervoltage Transients," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004, pp. 1299-1307.
- [5] Saša Z. Djokić, Jovica V. Milanović, and Daniel S. Kirschen, "Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp. 494-504.
- [6] José Luis, Durán-Gómez, Prasad N. Enjeti, and Byeong Ok Woo, "Effect of Voltage Sags on Adjustable-Speed Drives: A Critical Evaluation and an Approach to Improve Performance," IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 35, No. 6, Nov. / Dec. 1999, pp. 1440-1449.
- [7] C. T. Hsu, "Cogeneration System Design for a High-Tech Science-Based Industrial Park," IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 39, No. 5, Sep. /Oct. 2003, pp. 1486-1492.
- [8] J. C. Das, "Transient Stability of Small Plant Generators Connected to a Weak Utility System-A Case Study," IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 41, No. 1, Jan. / Feb. 2005, pp. 155-162.
- [9] W. J. Lee, M. S. Chen and L. B. Williams, "Load Model for Stability Studies," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 1, Jan. / Feb. 1987, pp. 159-165.
- [10] Chuvychin, V.N., Gurov, N.S., Venkata, S.S., and Brown, R.E. "An Adaptive Approach to Load Shedding and Spinning Reserve Control during Underfrequency Conditions", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996, pp. 1805-1810.
- [11] *CYMSTAB User Guide*, CYME International Inc., Canada, 1997.
- [12] 陳朝順, 許振廷, "中油林園廠電力系統暫態穩定度分析與保護協調研究", 中華民國八十七年八月