美國 PJM 電力市場因應極端氣候之電力供需穩定機制探討

—包括緊急備用容量與電力調度、負載端管理、供電電壓調降等措施

李孟穎

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

美國 2014 年初受北極氣旋(1 月 6~8 日)與暴風雪(1 月 17~29 日)影響，在美國 PJM 電力調度機構供電區域造成持續低溫氣候與供電緊縮，除尖峰用電屢創歷史新高外，因氣候惡劣而造成電力機組強制停機率也較以往為高。PJM 透過既有之電力市場機制，並藉由完善之電力供需失衡緊急操作規劃，包括緊急備用容量與電力調度、緊急負載端管理、供電電壓調降等措施，輔以操作事件反應小組與相關業者及單位之即時分享電力供需狀況與因應措施，有效維持該電力市場區域的供電可靠度，使該地區免於停限電危機。

本次極端氣候事件中，PJM 透過需求端管理資源之自願性調度，有效協助抑低尖峰負載，凸顯需求端管理資源在維持電力供需穩定中之可靠性與價值。此外，PJM 透過極端氣候事件持續檢討其市場機制與相關調適行動，以盡可能降低未來電力部門因應極端氣候之潛在衝擊。其所提出之改善方向中，包括用電尖峰期間發電機組運作績效改善機制探討、用電尖峰期前電廠供電能力測試與驗證作法、發電機組織可用性與燃料來源之維護等，皆可作為我國氣候變遷調適策略規劃之參考。

一、前言

2014 年初冬季的極端氣候現象，造成北美氣溫新低紀錄與大量降雪現象，期間造成營業場所、學校與道路的關閉，以及大量飛機航班取消，嚴重影響加拿大與美國東岸各地之民生與經濟。根據 Planalytics 氣候情報公司分析，此次冬季嚴寒事件在美國影響經濟活

動、航班交通停擺與天然氣管線等受損，共計造成 50 億美元的損失，受影響人數共計達 2 億人。除了西部 WECC 區域與東南部 FRCC 區域外，美國各電力區域皆產生用電高峰，其中 8 個區域的用電尖峰負載破歷史新高(表 1)[1]。

表 1、極地氣旋期間美國各供電區域尖峰負載情形[2]

	MISO	PJM	NYISO	ISO-NE	South-eastern RC	TVA	VACS RC	SPP	ERCOT	FRCC
Previous Winter peak (% of previous peak)	99,855	136,675	25,541	22,818	46,259	43,384	42,983	32,635	57,265	36,926
6-Jan-14	109,307 (109.5%)	131,142 (95.5%)	23,197 (90.8%)	18,500 (81.1%)	44,871 (97.0%)	43,277 (99.8%)	50,659 (117.9%)	36,602 (112.2%)	56,031 (97.8%)	30,231 (81.9%)
7-Jan-14	104,746 (104.9%)	140,510 (103.5%)	25,738 (100.8%)	21,300 (93.3%)	48,279 (104.4%)	44,285 (102.1%)	44,654 (103.9%)	36,079 (110.6%)	57,277 (100.0%)	35,638 (96.5%)
8-Jan-14	100,154 (100.3%)	133,288 (98.1%)	24,551 (96.1%)	20,800 (91.2%)	47,005 (101.6%)	39,820 (91.8%)	43,203 (100.5%)	31,944 (97.9%)	45,281 (79.1%)	29,251 (79.2%)

此次極端氣候事件亦對能源產業，尤其是電力與天然氣部門造成重大衝擊。持續低溫造成用電需求與尖峰用電量屢創冬季新高，而極端氣候與暴風雪亦嚴重衝擊能源供給的穩定性，進而造成供電緊縮與停電風險。根據 PJM 電力市場統計，該市場供電區域史上前 10 名的冬季用電尖峰紀錄有 8 次發生在 2014 年 1 月間，期間之平均尖峰用電量較一般冬季平均尖峰用電量高出 35,000MW，相當於一般冬季尖峰用電量之 25%[3]。

PJM 電力調度中心為全美最大的電網營運商，其供電範圍包括美國東北部 13 州與華盛頓哥倫比亞特區，2013 年系統總裝置容量達 183,604 MW，共計供應約 6,100 萬人口之用電需求。PJM 主要權責除調度與協調區域內之發電、輸電與售電外，亦負責確保供電可靠性，發電容量足以滿足電力用戶的需求[4]。PJM 調度中心透過可靠性定價模型(Reliability Pricing Model, RPM)，以反映容量資源之長期價格訊號，透過拍賣市場與雙邊市場等機制之建立，確保長期電源充足，

以滿足區域中長期電力需求[5]。

除了確保區域中長期電源充裕外，PJM 電力批發市場透過各種供需預測與調度機制確保電力穩定供應。PJM 每日透過日前市場(Day-ahead Market)與即時市場(Real-Time Market)進行電力交易，確保電力供需平衡[4, 6]。而當 PJM 判斷短期電力供應因系統異常、容量超載、燃料短缺、天災或人為意外造成備用容量不足等情形時，將會啟動緊急操作程序(Emergency Operations)，指引各供電區域關係者(包括地區電網傳輸、電廠、需量反應服務提供者等)立即執行指定的緊急措施，以即時降低負載[7]。

本文以 2014 年初北美極端氣候事件為例，探討 PJM 電力調度中心確保電力供應穩定之市場操作模式，以及在電力供應吃緊期間，如何透過事前規劃之緊急措施操作程序，使供電維持穩定，協助美國東北部地區度過低溫與暴風雪挑戰。而此次事件中，緊急操作程序的啟動亦造成電力價格上升，本文亦將探討 PJM 調度中心對此現象之檢討與後續策略。因應氣候變遷造成極端氣候現象加劇，我國亦應及早研擬相關措施以減緩其對能源系統之衝擊，而 PJM 電力市場的經驗對於我國在相關調適策略與電力供需失衡時之緊急操作程序研擬上具有參考價值。

二、PJM 確保供電可靠性機制

PJM 確保供電可靠性機制可分由市場運作與緊急操作程序兩方面探討，而電力市場主要分為長期容量市場、電能市場與輔助服務市場 3 類，PJM 主要藉由電能市場之日前市場與即時市場機制，觀測電力交付日的電力供需狀態，並判斷是否啟動緊急操作程序。以下分就市場運作機制與緊急操作程序兩方面分別說明。

(一)市場運作機制：

1. 長期容量市場：

透過可靠性定價模型(Reliability Pricing Model, RPM)建立三

年期的遠期容量市場，反映容量資源之長期價格訊號，確保長期電源充足，並透過長期合約鼓勵新容量的投資與加入市場，進入容量市場之資源有受 PJM 調度運轉之義務[5]。

2. 電能市場：

PJM 的電力拍賣市場運作模式可分為日前市場(Day-ahead Market)與即時市場(Real-Time Market)兩部分，其日常運作方式可由圖 1 時間軸示意圖表示[3,6]。

圖 1、PJM 電能拍賣市場運作時程[3, 6]

為確保一市場運作日的電力供應，PJM 調度中心在一週前即開始運作，進行針對該日的電力負載預測分析，並持續根據最新資訊與系統狀態更新其預測資料；在運作日 3 天前，PJM 會進一步了解電力供應端的資源現況，包括正在停機的電廠或進行維修的輸配電纜，若現有電力供應量可能無法滿足最新負載預測值，則 PJM 將預先通知電力供應端，視情況可能需要於運作日啟動機組或恢復電力傳輸工作；在運作日 2 天前，則將根據電力供需狀態的最新資訊，設定隔日的日前市場狀態，包括機組停機與輸電中斷的最新情形，與最新用電需求預測等。

在運作日 1 天前，日前市場開啟，至中午 12 時前，欲參與市場的買方與賣方可分別輸入資訊，PJM 隨後會就輸入資訊進行結算，並於下午 4 點就結算結果公布運作日的逐時排程以及區域

邊際定價(Locational Marginal Price, LMP)。日前市場將確保電力供給能在最低成本的排程下，且顧及各發電端的容量限制，滿足逐時電力負載。通常負載服務者(Load Serving Entities, LSE)會設定在日前市場購買系統備轉容量加上電力需求推估值的90%-95%電量，以保留負載預測不確定性之彈性，不足的量則會在即時市場購買補足。而在下午 4~6 點之間，所有未進入隔日發電排程的發電端皆可更新其開價資訊，作為即時市場的買賣資訊。而在運作日當日，PJM 會持續評估最新電力供需狀態，並進行即時市場操作與即時電力調度[3, 6]。

3. 輔助服務市場：

輔助服務市場目的為協助維持電力傳輸的可靠度，主要包括即時備用容量市場(Synchronized Reserve)與調頻(Regulation)市場，輔助服務市場資源須因應可靠度需求而被即時調度，因此具有可快速反應之特性，通常包含抽蓄水力、需求端資源、天然氣發電等[6]。

(二)緊急操作程序：

緊急操作程序可分為警報(Alerts)、警告(Warnings)與行動(Actions)。所有緊急程序會以“All-Call”方式通知地方輸電、發電與削減負載服務業者，並即時更新於緊急程序網頁或程式中。而決定緊急供電程序啟動與否之主要依據為備用容量率之即時數據[7]。

1. 警報(Alerts)：事件前一日發布，預先提供相關單位隔日的負載預測狀況，並事先警告相關單位 PJM 可能啟動的緊急程序。
2. 警告(Warnings)：當日視電力負載狀況而即時發布，通常提前數小時。
3. 行動(Actions)：伴隨警告即時發布，PJM 成員需即時反應，確保缺電情形可於 30 分鐘內緩解。

表 2、PJM 供電短缺緊急操作程序[3, 7, 12]

類別	程序	啟動	市場影響
警報 (Alerts)	最大能源供給警報 (Maximum Energy Generation Alert)	整體備轉容量低於要求	對市場價格無直接影響，主要作為供電短缺情形的預告
	一級備用容量警報 (Primary Reserve Alert)	一級備轉容量低於要求	
	電壓調降警報 (Voltage Reduction Alert)	同步備轉容量低於要求	
警告 (Warnings)	一級備用容量警告 (Primary Reserve Warning)	一級備轉容量低於要求，但維持同步備轉容量	1. 備用容量市場價格上升 2. 非緊急發電電源需預備作為同步備轉容量
	電壓調降與降低非關鍵負載 (Voltage Reduction Warning Reduction of Non-Critical Plant Load)	同步備轉容量低於要求	
	手動卸載警告(Manual Load Dump Warning)	一級備轉容量低於最大機組容量或輸電設備異常	
行動 (Actions)	強制性需求端資源調度 (Emergency Mandatory Load Management Reduction)	在 PJM 部分區域中需要負載調節，緊急需量反應啟動	1. 緊急資源(包括緊急需量反應、緊急跨區購電、一級備用容量機組發電等)可進入即時市場 2. 某些情況啟動短缺定價(反映缺電現況) 3. 電價上升
	自願性需求端資源調度 (Energy Only Option Emergency Load Response)		
	最大緊急供電(Maximum Emergency Generation)	即時電力需求已大於即時市場中排定可供電量	
	配電電壓調降與非必要住宅用電削減(Curtailment of Non-Essential Building Load Voltage Reduction)	當設備因高負載造成不穩定，需要降低負載時，或輸電量提升造成電壓調整需求時	
	手動卸載(Manual Load Dump)	當其他手段皆無法滿足即時供電穩定且系統頻率降低時	

歸納 PJM 確保供電可靠性之機制，以既有市場結構取得長期電力容量資源，並透過電力市場確保短期與即時供電調度，最後透過緊急操作程序確保即時供電穩定，PJM 透過此機制成功度過 2013 年 9 月熱浪與 2014 年 1 月極地氣旋等極端氣候之尖峰負載威脅。

三、2014 年冬季極端氣候事件與 PJM 因應措施

2014 年 1 月時，PJM 首先透過氣象觀測發現 1 月 6~8 日可能的極端氣候現象，並著手預備因應極端氣候當日尖峰負載預測、電力供需情形，以下分就 PJM 市場在前期電能市場因應措施、1 月 6~8 日電力供需狀況以及 PJM 緊急操作程序啟動情形進行說明。

(一)PJM 電能市場因應措施

依照電能市場運作模式，PJM 於一週前進行氣象追蹤與負載預測，並提前告知配電與發電業者取消計畫性停機排程。在事件前三日，PJM 通知相關電力業者，要求其預備所有可調度資源，並與天然氣輸配業者溝通用量需求之預測資訊。在事件前兩日，PJM 根據最新預測趨勢設定日前市場，並持續與相關業者溝通預測現況與可能之調度需求。在日前市場中，因應所預測的系統備轉容量狀況，PJM 啟動緊急操作程序並發出警示訊號；而在交易當日的即時市場中，除持續依照負載情形進行調度外，亦啟動緊急操作程序中的警告與行動，使緊急能源進入即時市場，緩解尖峰負載供電緊縮情形[3]。

圖 2、2014 年 1 月極地氣旋期間 PJM 電能市場因應措施[3]

(二)極地氣旋期間(2014 年 1 月 6~8 日)電力供需情形[3]：

- **電力供需情形**：氣溫由 1 月 6 日下午開始顯著下降，導致發生負載轉移現象，由 3am 到 8pm 需增加近 50,000MW 容量，升載幅度變

大造成備轉電力高達 45%啟動失敗率；1 月 7 日電力尖峰負載創歷史新高(達 141,846MW)，遠高於 1 月尖峰負載歷史值 106,182MW，備轉容量率亦持續低於標準值(圖 3)；同時因為極端氣候造成強制停機率高達 22%(包含燃煤、燃氣與核能)，其停機率遠高於冬季歷史平均值(7%)。若單就各機組而言，燃氣機組因天然氣管線傳輸受氣候影響，強制停機率為各機組中最高(35%)，其次為燃煤(19%)與核能機組(4%)(圖 4)。

- **因應措施**：此期間 PJM 幾乎啟動所有緊急操作程序行動，包含最大緊急供電調度、對外超額購買緊急電源、啟動緊急負載管理措施、配電電壓調降等。其中 PJM 在 1 月 7 日啟動兩次緊急需量反應行動，雖然需量反應在冬季為非強制性，當天兩度自願性需量反應指令仍分別達到約 1,850MW 與 2,300MW 的抑低尖峰效果，約達總需量反應潛力的 25%，也使 1 月 7 日當天不需啟動配電電壓調降等較強制性的行動。緊急需量反應成效顯著之主因為高市場價格造成之強烈誘因。
- **結果**：成功維持電力穩定供應，但需量反應與電力儲量短缺導致電價之 LMP 上升最高達 1,841 美元/MWh，輔助市場價格更因此顯著上升。

圖 3、2014 年 1 月 7 日負載曲線與備轉容量曲線[3]

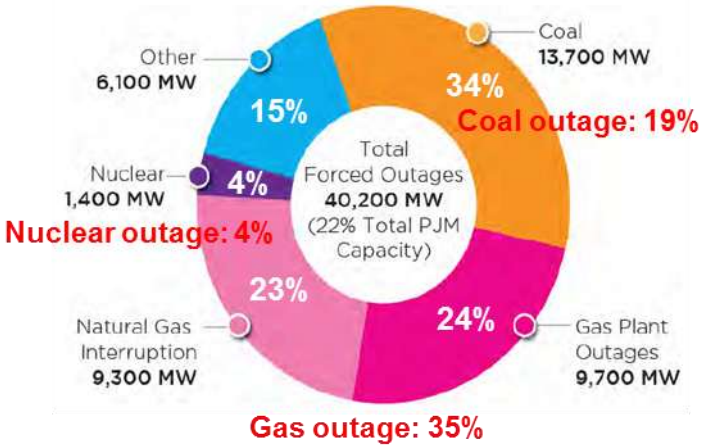

圖 4、2014 年 1 月 7 日機組停機原因與各機組停機率[3]

(三)暴風雪期間(2014 年 1 月 17~29 日)電力供需情形[3]：

- **電力供需情形**：本次持續低溫時間較北極氣旋期間更長，共有六次尖峰負載超越 135,000MW 的紀錄。由於長期低溫造成天然氣管線傳輸問題，此期間供電最大挑戰在於天然氣供應限制，以及天然氣與電力市場購買時程無法協調。
- **因應措施**：鑒於 1 月初北極氣旋期間大量機組停機現象，PJM 花費高額大量購買備轉容量。而因應天然氣價格上升導致燃氣發電成本上揚，取消電力日前市場電力購買價格上限。在負載管理部分，共對供電較為吃緊的部分東部區域執行四次緊急需量反應調度，分別達到約 130MW、610MW、960MW 與 590MW 的尖峰抑低效果。
- **結果**：此期間電力浮動成本(uplift cost)飆升，主因包括：(1)天然氣價格上升，且因供氣不確定性高，為確保供電穩定需簽訂多日購買合約，因此燃氣電廠常在不符合經濟效益狀態下仍需全日發電；(2)電力供給與需求預測失準，導致 PJM 額外購買過多備用容量與電力，其成本無法由市場價格平衡，導致浮動成本上升。

PJM 於兩次極端氣候期間數度啟動電力緊急操作規劃，包括緊急備用容量與電力調度、緊急負載端管理、供電電壓調降等措施，各操作日之啟動措施類別詳見附件。

四、PJM 電力市場緊急需量反應措施

PJM 市場在北極氣旋期間共計啟動 3 次緊急型需量反應調度行動 (非需量反應強制調度期間，全為自願型)，其中於 1 月 7 日之調度完成率達 76%~101%，降載最高達 2,379MW，約占 PJM 總需量反應資源容量的 25%；而 1 月 8 日之緊急需量反應調度，因於預定需量反應事件啟動前，跨區電力大量流入，使供電量回到正常值，PJM 即取消調度，但已開始降載或降載需維持一定時間者，仍可繼續完成並獲取回饋，共計緊急需量反應完成量仍達到約 1,100MW(圖 5)。顯示需量反應資源(Demand Response, DR)於全年皆具有降載能力與可靠性價值[3]。以下就 PJM 需量反應資源參與市場之機制加以說明。

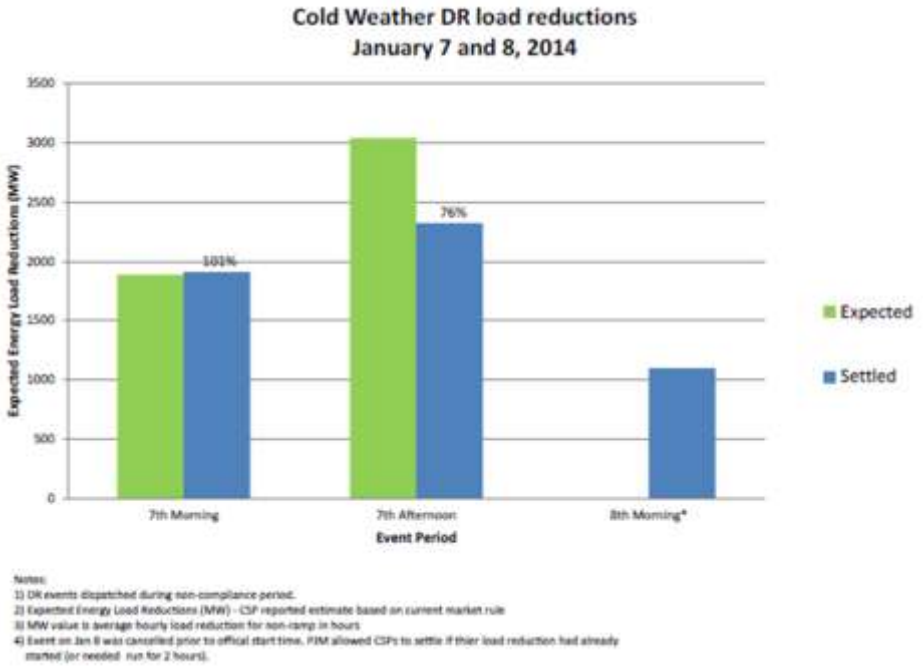

圖 5、極地氣旋期間自願型緊急需量反應調度成果[8]

在 PJM 電力市場中，所有電力用戶皆可選擇透過削減負載服務業者(Curtailment Service Provider, CSP)，依據電力市場設計的各種需量反應資源條件，與其他發電資源於各類電力批發市場中競爭。整體而言，需量反應在 2 種情形下會被調度[9]：(1)當 LMP 大於市場淨利價格(Net Benefit Pricing)時；(2)系統供電可靠度(Reliability)過低時。

而依據被調度程序、參與市場、強制或自願性規範之不同，需量反應資源可分為兩類，電力用戶可自由選擇參加各種類別之需量反應計畫[10]：

(一) 緊急型(Emergency)需量反應資源：主要參與容量市場，所出清之容量即為在供電吃緊時可被強制調度之容量，若未降載將受懲罰。除參與容量市場外，當 PJM 啟動緊急操作程序時，此類型在無強制調度之情況下，亦可自願性加入即時電能市場，進行降載並獲得報酬。

(二) 經濟型(Economic)需量反應資源：在 LMP 高於市場淨利價格時，可自願參與電能市場，取代發電資源。而其調度特性符合輔助服務需求的特定資源，亦可參與輔助服務市場，所出清之容量在系統需要時將被強制調度。

若以批發市場類型區分，緊急型需量反應資源主要參與容量市場與電能市場，而經濟型需量反應資源則參與電能與輔助服務市場，各種需量反應資源類型與其調度條件說明見表 3。

表 3、PJM 市場需量反應資源類型與其調度條件[10]

批發市場類型	DR 資源類型	資源條件說明
容量市場	緊急型 DR，或稱限制型(Limited) DR	在容量市場結清後，於交付年 6 月至 9 月間工作日之中午 12 點至下午 8 點間強制調度。需於通知後 1 小時(short lead)或 2 小時(long lead)內降載，降載時間最長 6 小時，每年不超過 10 天
電能市場	緊急型 DR	緊急程序中可自願降載，將被支付即時市場價格(LMP)，此時 DR 資源不被支付容量價格
	經濟型 DR	經由市場價格(經濟因素)決定調度與否
輔助服務市場	經濟型 DR	日前排程備轉容量市場：收到調度通知需於 30 分鐘內降載
	經濟型 DR	同步備轉容量市場：收到調度通知需於 10 分鐘內降載，視為備轉容量
	經濟型 DR	頻率調節市場：需能即時進行升降載以穩定系統

PJM 市場自 2007 年 PJM 採用可靠度定價模型，實施三年期的遠期容量市場後，帶動緊急型 DR 之需求，資源容量超越經濟型 DR。

根據目前遠期容量市場合約，2014/15 年緊急型 DR 資源量預計將達到 15,000MW[11]。而輔助服務市場資源量因對資源調度速度、型態與容量的需求，參與度較低，但自 2012 年降低參與門檻，由原先的 1MW 調降為 0.1MW 之後，參與家數逐年增加[10]。由圖 6 可知，需量反應資源提供者的年度營收來源，自 2008 年起開始以容量市場營收為主，且呈現持續成長之趨勢。而緊急調度之需量反應資源營收亦有成長趨勢[13]。

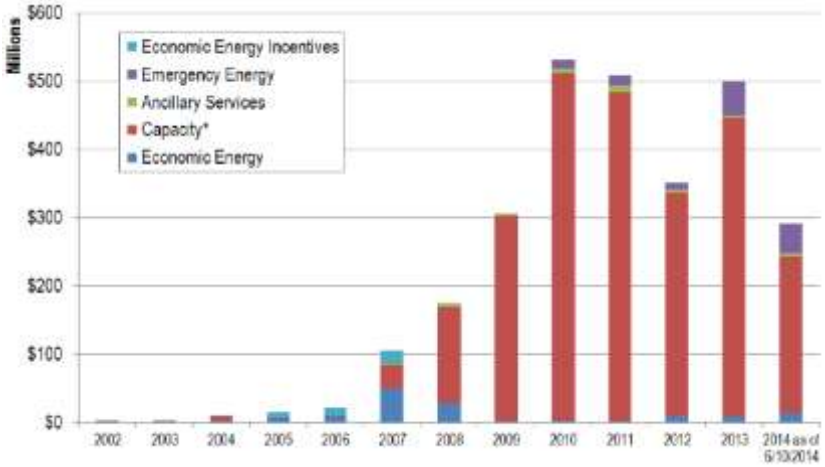

圖 6、PJM 市場需量反應資源提供者年度營收來源趨勢[13]

以 1 月 7 日 PJM 電力市場資源調度為例，兩次調度時間分別為上午 5:30~11:00 與下午 16:00~18:16，此兩段期間緊急需量反應資源執行降載之逐時容量如圖 7A 所示，由短期啟動(Short-lead)資源開始逐漸遞增並加入長期啟動(Long-lead)資源，並分別於上午 9 時與下午 18 時達到負載抑低之高峰。由圖 7B 亦可知，在需量反應資源調度期間，尖峰負載不再持續成長，後有逐漸下降之趨勢。然而此負載趨勢與冬季平時負載趨勢相似，未有顯著的負載轉移或抑低之現象，且其尖峰抑低效果缺乏負載基線值加以比較計算，因此 PJM 僅能了解需量反應資源自願性調度之總容量值，而未能確實量化其尖峰負載抑低量[8]。因此，需量反應資源實際成效之測量與驗證方法為現階段美國各電力調度中心持續探討之重點項目。

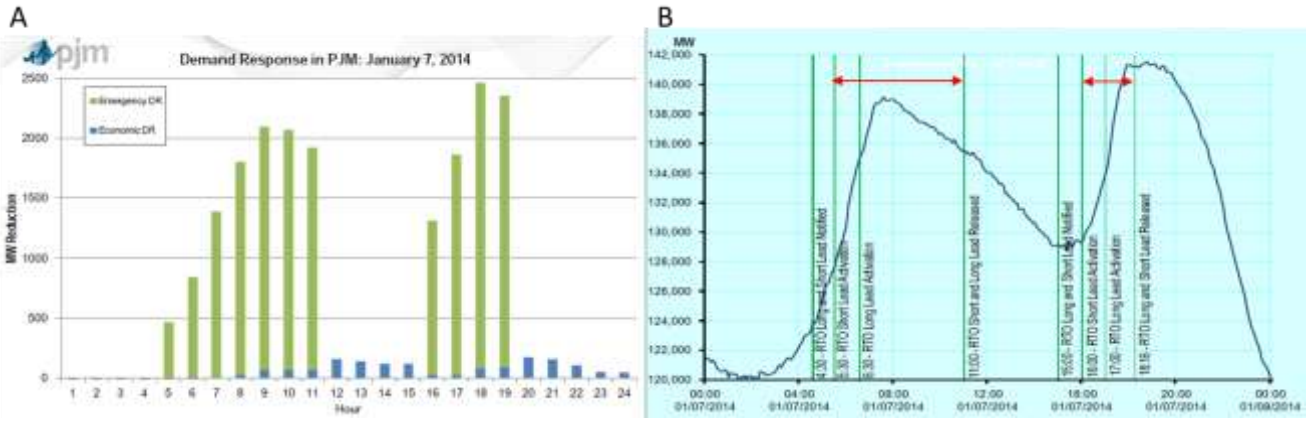

圖 7、2014 年 1 月 7 日需量反應資源逐時調度容量(A)與尖峰負載(B)變動情形[8]

五、極端氣候之市場衝擊

PJM 電力市場雖成功透過供電短缺緊急操作程序度過 2014 年 1 月之極端氣候供電挑戰，然大量調度備用與緊急資源亦造成市場價格上升，市場價格之變動可由電能市場 LMP 與浮動成本(uplift cost)探討。

一般情況下，電能市場規範市場資源的價格上限(market cap)以穩定市場價格，PJM 規範電能市場之價格上限為 900 美元/MW，而為鼓勵需量反應資源發展，其價格上限訂為 1800 美元/MW。在極地氣旋供電短缺期間，PJM 向聯邦能源管制委員會(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)申請暫時取消價格上限限制，加上供電端機組停機率高，導致在尖峰用電期間即時市場 LMP 價格高達 1,841 美元/MW，超過日前市場 LMP 價格的三倍。輔助服務市場中，備用容量市場的同步與非同步備用資源價格亦高達其價格上限，分別達 800 美元/MW 與 400 美元/MW；調頻市場則因部分作為調頻之尖載機組調度作為發電使用，市場價格亦一度上升達 3,296 美元/MW[3]。

除電能市場 LMP 外，因供電不確定性提高，機組停機率高於預期，為降低缺電風險，PJM 市場啟動緊急電源調度，包括備轉發電機組調度與負載端資源等，此緊急調度行為係於市場定價機制之外，因此其調度成本即為所造成之浮動成本。因應 2014 年 1 月極端氣候期

間，PJM 系統總浮動成本達 5.97 億美元[3]。

以 2014 年 1 月 17~29 日暴風雪期間為例，長時間持續低溫除了造成尖峰負載多次超越 135,000MW 之外，亦造成天然氣管線傳輸問題。而天然氣短缺使其價格攀升至 120 美元/MMBtu(2013-2014 年平均價格約 4 美元/MMBtu)，天然氣與電力市場之購買時程無法協調，且受限於較長的購買合約(1~3 天)，致使燃氣電廠需於高成本下持續發電。此外，鑒於北極氣旋期間大量機組停機現象，PJM 花費高額大量購買備轉容量，造成該期間內浮動成本飆升，且與天然氣價格波動走勢一致(圖 8)[3]。

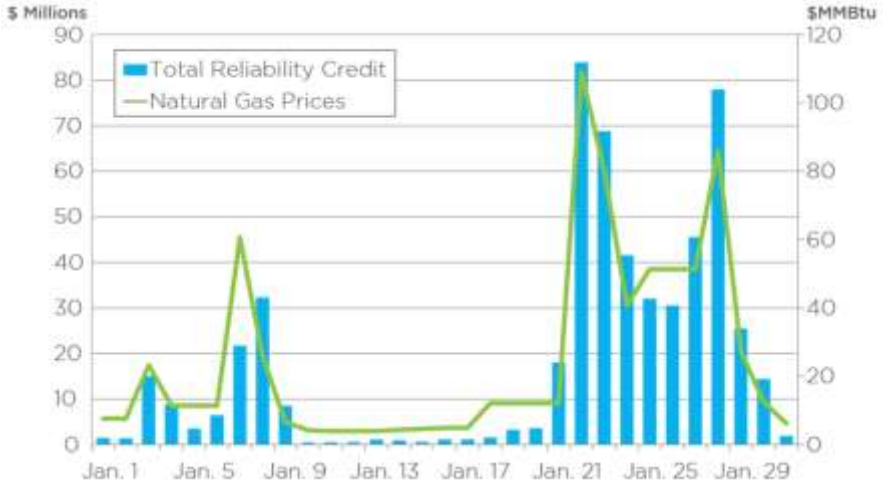

圖 8、2014 年 1 月間 PJM 浮動成本與天然氣價格關係[3]

PJM 透過緊急供電程序，成功度過 2014 年 1 月的極端氣候供電挑戰，其成本代價反映在高額電力市場價格與浮動成本上，因此如何降低緊急供電程序帶來之市場衝擊，並合理化成本分攤機制，為 PJM 持續探討之方向。

六、結論與我國可借鏡之處

2014 年 1 月期間，PJM 尖峰負載創歷史新高，且其史上前 10 高尖峰負載紀錄，有 8 次於此期間發生。此段期間 PJM 數度啟動供電短缺緊急程序，透過最大緊急能源與負載管理(需量反應與自發性節

能)行動，成功維持備轉容量，期間僅需執行一次電壓調降，而緊急型需量反應資源於此事件中，顯示其於供電短缺緊急程序中的可調度性。然上述行動亦造成 LMP 與浮動成本上升，對參與 PJM 電力批發市場之業者造成衝擊。

綜觀 PJM 地區在 2014 年 1 月間的供電危機，除了透過完整的事前規劃因應措施，有效提升供電能力，並透過自願性負載管理抑低尖峰用電外，PJM 亦成立操作事件反應小組(Operation Event Response Team)，透過線上討論會議、電子郵件與網路公告等方式，與 PJM 成員、州委員會、緊急管理單位、消費端代表等持續更新氣候與負載預測、備轉容量現況、系統現況、緊急操作程序等[3]。PJM 認為提升溝通與資訊之流通，是促使自願性需量反應措施成功抑低負載的關鍵因素之一。PJM 亦根據此次供電挑戰之經驗，提出未來操作與市場機制改善方向：

(一)改善電廠在極端氣候狀況下的操作狀況：鑒於 2014 年 1 月間之高機組停機率，PJM 持續探討對發電機組在用電尖峰期間運作績效的改善機制。

(二)在冬季開始前進行電廠供電能力驗證與測試：包括機組運作能力與燃料供應情形測試，此外將標準化機組停機原因之類別以利進行驗證。

(三)持續與產業界及電力調度單位探討電力與天然氣市場互相協調的機制：探討可能的市場機制調整方式，除了使天然氣與電力市場採購時程可配合外，亦使天然氣燃料成本可更真實反映在市場價格上，而非以浮動成本支出。

(四)增進發電機組的可用性與使用彈性，包括確保燃料來源與機組雙燃料使用：提升各機組燃料使用彈性等資訊分享，增進 PJM 進行調度之準確性，此外詳加探討天然氣機組在極端氣候下的緊急調度程序。

(五)探討並研擬電力供需失衡的緊急狀況下，如何最小化浮動成

本，以及其合理分攤方式：探討浮動成本合理分攤方式之計算機制，並檢視電力市場機制，探討使浮動成本回歸市場價格的方法。

極端氣候對於能源系統之影響在全球各地屢有案例發生，除了對發電設備供電能力造成挑戰外，電力需求端之尖峰負載亦屢創新高。由 PJM 經驗可知，PJM 藉由其市場機制與緊急操作程序，調度各類型電力資源以維持供電穩定。我國因應核四封存之規劃，至既有核電廠除役後，備用容量率降低之情況下，極端氣候對整體能源系統造成之衝擊將更加顯著。我國為獨立電網系統，相較美國各供電區域大多電網相連可相互支援，更應完善規劃緊急電力穩定供應之因應策略，而 PJM 之經驗突顯電力負載管理在維持電力穩定供應之重要性，我國在規劃緊急因應措施時應全面思考需求端管理資源之角色，妥善設計強制性與自願性策略之配套措施與誘因，建立我國需求端資源發展條件。而 PJM 於緊急操作程序中，亦強調其透過電力系統現況與氣候即時資訊更新與溝通方式，提升各相關單位與電力用戶配合應變措施之能力與意願，為成功進行負載管理的主要原因，此經驗亦可作為我國發展需求端管理策略之參考。

除緊急操作程序外，PJM 持續根據極端氣候事件之經驗，全面檢討能源系統遭受之衝擊與可能的調適策略，而適當的市場機制調整與相關調適策略可降低系統遭受極端氣候影響的風險，進一步降低電力負載預測之不確定性，並減少因應緊急措施所衍生的浮動成本。PJM 所提出之具體措施，包括用電尖峰期間發電機組運作績效改善機制探討、用電尖峰期前電廠供電能力測試與驗證作法、發電機組可用性與燃料來源之維護等，可作為我國新建或更新電廠設計標準與確保發電端供電能力做法之參考。此外透過本土化研究，確實將極端氣候帶來的電力供需衝擊納入電力負載預測中，亦為我國氣候變遷調適策略規劃時應加以考量之工作項目。

參考文獻：

1. Minnesota Public Radio News, Polar vortex economic shock wave. http://blogs.mprnews.org/updraft/2014/05/polar-vortex-economic-shock-wave/ (Accessed on 2014/12)
2. NERC(2014), Polar Vortex Review
3. PJM(2014), Analysis of Operational Events and Market Impacts During the January 2014 Cold Weather Events
4. PJM website - Markets & Operations, http://www.pjm.com/markets-and-operations.aspx (Accessed on 2014/11)
5. PJM(2010), A Review of PJM's Reliability Pricing Model
6. PJM & MISO(2005), Day-Ahead Energy Market Overview
7. PJM(2014), Emergency Operations Manual
8. PJM(2014), PJM Demand Response Activity January 7-8, 2014
9. PJM(2014), End-Use-Customer Fact Sheet
10. PJM(2014), Demand Response in PJM
11. PJM(2014), Emergency Demand Response (Load Management) Performance Report 2013/2014
12. PJM(2013), Shortage Pricing Refresher Training
13. PJM(2014), Demand Response in PJM: Past Successes and the Murky Legal Future of Demand Response

附件：極地氣旋期間(2014 年 1 月 6~8 日)PJM 緊急操作程序啟動情形[3, 12]

緊急操作程序類別		1/6	1/7	1/8	1/22	1/23	1/24	1/27	1/28	1/29	1/30	備註
Alerts	Cold Weather	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	Max Emergency		●	●		●	●		●			
	Voltage Reduction					●			●			
	Primary Reserve								●			
Warnings	Voltage Reduction	●	●				●				●	
	Primary Reserve		●									
Actions	Max Emergency	●	●	●	●	●					●	所有發電資源調度：二級備用提升至一級備用、延遲所有排定之檢修工作
	Voltage Reduction	●										
	Reserve Action	●	●		●							
	Shortage Pricing	●	●									在備轉容量短缺時，反映其短缺成本的方法，於下列情況下自動啟動： 1. 一級或同步備轉容量低於要求 2. 電壓調降或手動卸載行動執行
	Emergency Energy		●	◎		◎						向鄰近電網區購買緊急電力
	Load Management		●	◎	●	●	●					自願性需求端負載管理
	C2 Conservation	●	●			●			●			公開呼籲自發性節能(成效未能量化)

註：●代表該緊急資源確實受調度；◎代表該緊急資源被要求啟動但最終未受調度。