



能源轉型下 儲能應用模式 及發展潛力

蕭宇喬／台灣綜合研究院 高級助理研究員

近年來隨著氣候變異，極端氣候災難頻傳，在 2050 年達成淨零碳排放目標已成為全世界最關注的議題，更加速再生能源的發展。許多國家再生能源發電量已超越傳統火力電廠的發電量，國際能源署（International Energy Agency, IEA）於 2020 年的報告顯示，雖然負載有了大幅度增長，但全球煤炭和石油需求已經達到頂峰，未來再生能源的占比將不斷提高。台灣自 106 年電業法修正通過後，政府積極推動能源轉型，目標提高再生能源於能源配比中之占比，與世界能源發展趨勢接軌，同時推動相關綠能產業發展。為達成能源轉型與降低溫室氣體排放目標，須搭配許多前瞻技術之發展與部署，如智慧電網、儲能設備、電動車等。

當電網發生突發電力變化時，傳統作法多由大型發電機組提供輔助服務如自動發電控制功能（Automatic Generation Control, AGC）或自動調頻功能（Automatic Frequency Control, AFC），以維持電網頻率；另外，為因應系統偶發事故，造成較大電能短缺之情況，某些機組則提供即時備轉（Spinning Reserve）或補充備轉（Supplemental Reserve or Non-Spinning Reserve）等輔助服務（Ancillary Service）。儲能設備具有快速充放電之特性，可有效率提供電力系統輔助服務，以維持系統穩定。

本文將於此背景下，首先針對儲能設備於再生能源發電端、電網端及消費端的應用，以及其於電力系統結構改變下之發展潛力進行綜合性的概述，接著依照我國積極推動且即將上線「輔助服務及備用容量交易平台」之架構下，進行儲能設備投資者參與輔助服務市場之成本效益案例分析。

前言

隨著再生能源設置量不斷成長，其發電特性對電力系統之影響將逐漸顯現，主要出現以下兩點問題：第一，太陽光電集中於白天發電，隨著陽光接近中午越強，出力越大，到了傍晚日落則出力驟降，導致扣除再生能源發電量的淨負載存在顯著的「鴨子曲線」效應，如圖 1 所示。第二，不論太陽光電或風力發電都屬間歇性發電資源，因其會受到光照或風速的迅速變動，而有出力不穩定的情形。

為了補足再生能源供電不穩定的情形，並降低其大量併網對電力系統之衝擊，電力系統將需要更多靈活且可供調度的資源，以隨時維持電力的供需平衡並確保供電安全。其中，儲能設備可快速反應之特性，適合用以提供調頻備轉輔助服務，或是執行再生能源輸出平滑化；而其可

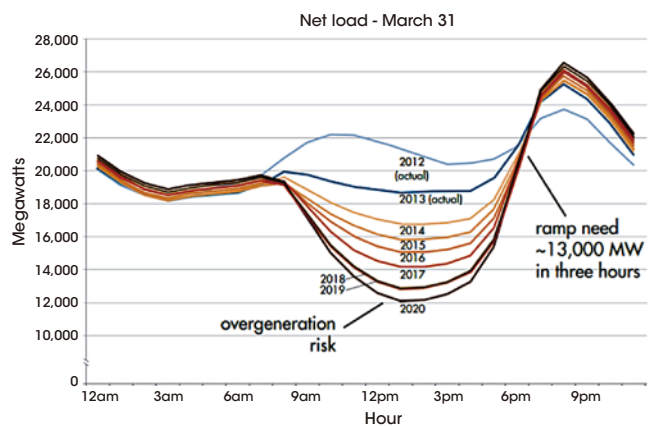


圖 1 因太陽光電滲透率提升而形成的鴨子曲線^[1]

大量儲存電能之特性，則適合用以削峰填谷、避免棄風棄光效應等，稍後我們將進一步從電力系統中各參與者的角度，介紹儲能設備常見的商業模式及應用。

儲能設備常見的商業模式及應用

發電端：穩定發電輸出、避免「棄風棄光」

歐美等先進國家因再生能源滲透率較高，其間歇性發電特性會影響電力系統之穩定運行，又考量其綠能產業發展趨於成熟，部分地區亦會要求或鼓勵再生能源之出力須符合平滑化限制。平滑化限制乃是規定再生能源的發電變動率在一定的時間內，不可超過某個上限值（如：5% / 分鐘、10% / 分鐘），這就必須透過將發電資源結合儲能設備才能達成。

以太陽光電平滑化為例，業者設定一太陽光電輸出變動率上限值後，若其瞬時輸出太多或太少，則會透過儲能設備儲存多餘電量或輸出應補足的電量平滑化其輸出，以滿足目標之輸出變動率，經過結合儲能設備實施平滑化的太陽光電輸出如圖 2 所示。

當再生能源輸出變動率過高時，區域的饋線容量可能無法承受其輸出量，而必須將部分的電給捨棄（Curtailment），而造成了「棄風棄光」情形。事實上，棄風棄光效應主要來自於兩個因素的影響：第一，該地區的再生能源瞬時出力超越饋線容量，造成電網壅塞而必須捨棄；第二，當電力系統中的再生能源滲透率過高，而造成系統慣量不足時，其於第二尖峰（即鴨子曲線上接近傍晚的時段）用於替補太陽光電消失的火力機組升載速度過慢，而必須提前安排調度時，都可能使調度單位在中午至下午時段捨棄大量的太陽光電。

圖 4 以太陽光電為例，顯示棄光的可能路徑及原因，前者是源於電網因素，而後者是有關整體電力系統之穩定及調度考量。由於棄光量最大的時段約為正中午附近，藉由儲能設備整合太陽光電之輸出（如圖 3），在棄光機率最高的時段抑制太陽光電之輸出水平，使儲能設備之 SOC 不斷上升，待太陽下山時段再釋放儲存的電能，便可獲得原本可能被棄光電之電能收益。

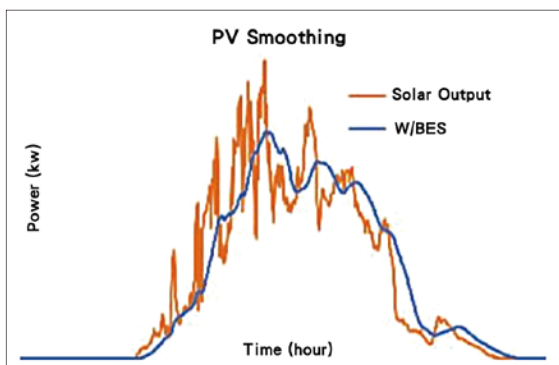


圖 2 儲能設備結合太陽光電實施平滑化 [2]

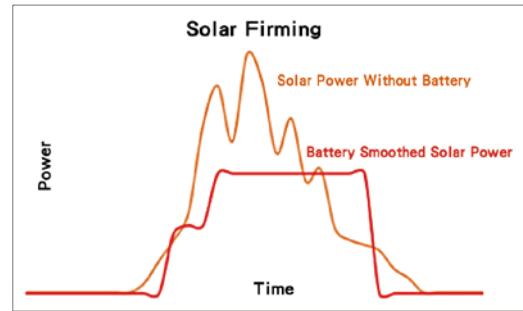


圖 3 儲能設備應用於避免棄光之輸出情形 [2]

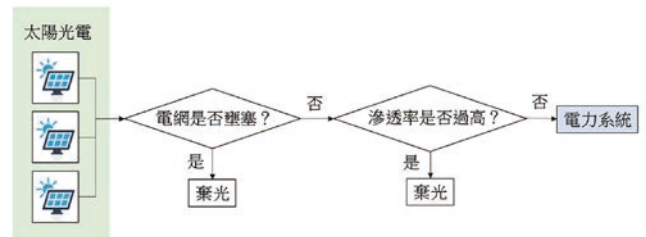


圖 4 影響棄光的原因及路徑

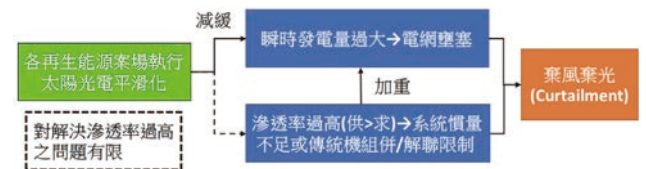


圖 5 執行再生能源輸出平滑化及棄風棄光效應之關係

資料來源：台灣綜合研究院繪製

以再生能源發展著名的加州為例，其 2020 年平均再生能源滲透率已達 27%，其中太陽光電約占 2/3、風力發電約占 1/3。在再生能源發電充裕且負載較低的時段，其瞬時功率可達負載之 80%，此時棄風棄光量亦可達發電量的 10% 至 15%。目前台灣再生能源滲透率仍較低，且有綠電先行政策鼓勵再生能源發展，如未來滲透率逐漸提升，則借鏡國外經驗，政府可能首先會要求再生能源業者輸出平滑化，再者於調度單位考量系統安全及穩定供電之下，亦有可能於中午時段執行大量的棄風棄光，此時再生能源業者若已裝置儲能設備因應各項輸出限制，將可獲得額外的收益。

電網端：增加電網彈性、延緩電網開發成本

儲能設備具有快速充放電之特性，對於電力系統即時的供需平衡、頻率穩定有重大功用，適合用來提供電力系統所需的調頻服務輔助服務。調頻備轉輔助服務係指透過不斷調整電力系統能量供需平衡，以維持其頻率穩定。在傳統電力結構中，主要由傳統具備 AGC 功能之火力機組來進行調頻備轉輔助服務，然而儲能設備之執行效率優於傳統火力機組。

隨著再生能源併網比例逐步提高，電力系統的等效短期負載變動加劇、調頻需求增加，而儲能設備資源的加入將更可快速的平衡供需，增加電網運轉彈性。

如前述一些要求再生能源發電業者必須符合輸出平滑化限制的地區，通常其輔助服務成本的支出也較高，故將部分維持電力系統穩定之責任轉由再生能源發電業者負擔。

此外，負載隨著經濟、人口、氣溫等各樣因素而變化，長期之下通常會不斷上升，且不同區域負載的成長情況有所不同。在傳統「發電－輸電－配電」的電網路架構下，有時某些負載成長較高的地區，會迫使原有的輸配電網路必須重新佈署或是進行升級（即擴大電網容量），此時若在合適的區域設置儲能設備，就可以延緩升級輸配電網路的投資成本。

那麼為什麼要「延緩」投資輸配電網路資產呢？這是因為雖然可以預測到某些地區的負載會增加，或已經觀察到它正在穩定增加中，但卻不確定需要將輸配電網路升級到何種程度、會不會因為預測失準而過度投資、又或是投資不足而常常需要重新施工，這些都是很挑戰的問題。因此，若能夠等到負載變化的趨勢更為明確以後，再進行投資輸配電資產的決策，就得以解決上述問題；而在短期之內，我們可以透過於輸配電網路中設置儲能設備，解決局部性容量不足的問題。

假設傳輸到某地區的饋線容量有限，如圖 6 所示，在每日 12 至 20 時之間該地區的負載量會超越其輸線容量上限值，我們可以將儲能設備設置於該地區的系統中，預先在區域負載量較低時儲存電量，待午後負載升高時再釋出電量，便可以達到暫緩升級輸配電網路容量的目的。

觀察圖 6 可以發現利用儲能設備延緩升級輸配電網路投資的操作模式，其實就是對地區性的負載曲線進行削峰填谷；擴大來看，儲能設備亦可以對全國性的負載曲線進行削峰填谷。由於調度單位必須於尖峰時啟用較昂貴的發電資源，若能減少供電結構於尖峰及離峰的差異，便可以減少平均供電成本，甚至避免掉尖峰的電源開發成本、提升每日尖峰的備轉容量率、減少缺電事件的發生。

消費端：優化用電品質及用電成本

國外已開放電力市場的地區，市場參與者可以透過市場的電能價格訊號來決定是否投資儲能設備，以

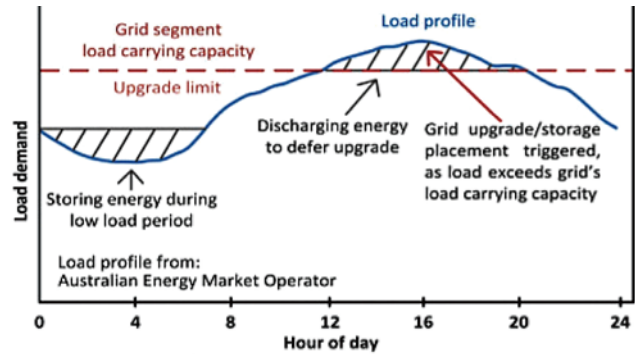


圖 6 利用儲能設備延緩升級輸配電網路投資的運作情形^[3]

進行電能套利並轉移電能的供需時段。台灣目前並未開放電力市場，若要推動儲能設備應用於削峰填谷的發展，需求面管理是不可或缺的一環；現階段台電公司有以下兩種需求面管理措施^[4]：

1. 價格型 (Price-Based)：台電公司根據各個時段之供電成本訂定各種隨時間變動之差別費率，使用戶可根據台電公司公布之不同時段費率，調整其不同時段之用電行為（如抑低尖峰用電或移轉至離峰時段），以減輕電費負擔，如現行之季節電價、二段式及三段式時間電價、尖峰時間可變動電價等。
2. 誘因型 (Incentive-Based)：用戶與台電公司透過事先約定之方式，於電力系統尖峰期間或調度需要時，配合降載以獲得電費扣減，如現行之各類減少用電措施、需量競價措施、空調週期性暫停用電措施等。

上述需求面管理之目的為了能夠對負載曲線進行削峰填谷。要符合其獎勵措施，用戶除了可以改變自身的用電習慣外，亦可透過儲能設備調節各時段的用電量，以維持原本的用電模式，即所謂的表後型 (Behind the Meter, BTM) 用戶側儲能。

近年來政府鼓勵太陽光電發展，並積極推動公民參與再生能源設置（如公民電廠），有越來越多的工廠、農業設施、商用及民宅開始大量建置屋頂型太陽光電。有別於以往傳統集中式發電之結構，上述新的發電結構使得部分用戶也可以自己產生電能、消費電能，並得將剩餘的電力售予其他消費者，而其他消費者取得的電力管道也不局限於台電公司，形成了一種新的商業模式，如圖 7。再這樣的架構下，由於電力供給來自於許多分散式資源，必須透過儲能設備、智慧電表等硬體設施，



圖 7 結合綠能屋頂、區域儲能及智慧電表的推動模式^[5]

才可以更好的整合電力供需資訊給能源技術服務業、聚合商等營運平台，以達成該商業模式的運作。國外亦有許多文獻探討在分散式發電結構下，儲能的重要性及其扮演的角色。

我國儲能產業發展之契機與展望 輔助服務及備用容量交易平台之產業商機

過去儲能設備多以需量反應的方式（即用戶側儲能）參與至電力系統的調度，然而在政府不斷推動再生能源發展及促進電力自由化的背景下，未來儲能設備設置者將擁有另一種的選擇。經濟部已於 109 年 12 月 24 日公告「輔助服務及備用容量交易試行平台設置作業要點」，未來不論是國營發電業或是外部業者欲提供輔助服務，每日都必須於平台上投標，台電公司亦將於該平台取得每日所需的輔助服務準備量；其中，為鼓勵儲能設備資源加入，特別設置了「併網型儲能設備」之交易態樣：只要是通過併網審查程序、獨立併網、且只參與輔助服務市場交易的儲能設備，就不需如用戶側儲能之態樣負擔契約容量費用，僅需繳納以淨計量計算之流動電費。此外，儲能設備參與交易而獲得的輔助服務價金並非以電費扣抵之方式結算，而是採實際金流給付，這將大幅提升各方業者投資儲能設備的意願。

台電公司於日前輔助服務市場規劃之交易商品依功能分為調頻備轉容量、即時備轉容量及補充備轉容量，各項商品及其技術規格如表 1 所示。調頻備轉容量主要

用於修正電力系統頻率偏差，或用以減緩系統頻率的變動幅度。台電公司參考北美、愛爾蘭等電力市場之商品技術規格，規劃推出動態調頻備轉容量（Dynamic Regulation, dReg）及靜態調頻備轉容量（Static Regulation, sReg）兩種規格。提供調頻備轉容量的交易資源，並不會接受台電公司之調度，但必須具備主動偵測電力系統頻率之能力，在得標時段據此自動響應提供服務，反應時間依商品規格要求而定。即時備轉容量及補充備轉容量則為於電力系統發生事故或短期電能不平衡時，提供電能補充之商品。提供即時備

表 1 日前輔助服務市場之交易商品^[6]

項目	調頻備轉輔助服務		即時備轉輔助服務	補充備轉輔助服務
	dReg	sReg		
反應時間	≤ 1秒 (AFC) 每 4秒 (AGC)	≤ 10秒	≤ 10分鐘	≤ 30分鐘
持續時間	追隨系統頻率 進行上下調頻	追隨系統頻率 進行向上調頻	1小時以上	2小時以上
最小報價區間	1小時		1小時	1小時
容量費	競價		競價	競價
電能費	無		依日前邊際價格結算	依日前報價結算
效能費	依資源反應效能給定		依資源反應效能給定	無

表 2 各項交易商品價格表^[6]

交易商品項目	容量價格上限 (新臺幣/MW-h)	效能價格 (新臺幣/MW-h)			電能價格 (新臺幣/MWh)
		調頻備轉 效能級數	效能價格	適用規格	
調頻備轉容量	600	1	350	dReg _{0.25} dReg _{0.5} 、sReg (其他火力機組)	無
		2	275		
		3	200		
		4	125		
		5	50		
即時備轉容量	400	即時備轉 效能級數	效能價格	反應時間測試	依日前電能邊際價格結算
		1	100	<1分鐘	
		2	60	<3分鐘	
3	40	<5分鐘			
補充備轉容量	350	不適用			依實際報價結算 上限為10,000

轉容量或補充備轉容量的交易資源，於得標時段處於待命狀態，當接獲調度指令時，則須在指定反應時間內，提供電能輸出以協助系統恢復穩定。

台電公司目前規劃併網型儲能設備可參與表 1 中的交易商品為調頻備轉容量及即時備轉容量輔助服務；其中，調頻備轉容量所競價之容量費，以及另給予依調頻效能表現而訂定之效能費，皆高於即時備轉輔助服務，從而提供了儲能設備投資者足夠的誘因選擇參與調頻備轉容量輔助服務。

表 2 為各項交易商品之價格訊號。調頻備轉容量輔助服務又分為 dReg_{0.25}、dReg_{0.5} 及 sReg 三種商品規格，由於 dReg_{0.25} 之反應速度及充放電頻率高於 dReg_{0.5} 及 sReg，因此具有較高的效能價格。

投資儲能設備參與輔助服務市場之效益評估

為了解開放輔助服務市場對於儲能產業發展的影響，本文將以一案例試算投資儲能參與輔助服務市場的成本效益。由於儲能設備應用於調頻備轉容量輔助

服務之作動方式為淺充淺放、充放電頻率高，考量適合上述運作條件且技術較為成熟之儲能電池，本文以 1MW/1MWh 之鋰電池參與 dReg_{0.25} 調頻備轉容量輔助服務作為分析假設，其建置成本及營運成本資訊如表 3。

收益方面，台電公司於 109 年 11 月 11 號第二次公開說明會所提供之調頻備轉容量輔助服務價金結算公式如下：

調頻備轉容量月結算價金

$$= \sum_{d=1}^{\text{當月天數}} \sum_{h=1}^{24} (\text{容量費}_{d,h} + \text{效能費}_{d,h}) \times \text{服務品質指標}_{d,h}$$

本文假設容量價格為過去台電公司內部日前競價市場之歷史平均價格 450 元 / MW-h，調頻備轉 dReg_{0.25} 效能價格為 350 元 / MW-h。此外，服務品質指標為一檢視交易資源之執行實績是否符合商品規格要求之指標，若交易者未能達到規格要求，其所得價金將被打折或倒扣；在此假設交易者皆符合規格要

表 3 鋰電池之建置成本及營運成本

項目	說明	參數估計值	單位
電池成本	有關電池之能量儲存相關之建置元件，如：儲能電池模組及電池櫃等。	8,130,000	元 / MW · h
PCS ¹ 相關成本	PCS、電池管理系統、保護設備、高低壓配電盤、主變壓器、輔助變壓器、保護電驛、控制及量測用電表等。	8,640,000	元 / MW
配套設備相關成本	聯網測試、變壓器互聯、EMS 能源管理系統建置、電網控制系統建置與整合測試、軟硬體架構整合測試、運轉功能測試等	3,000,000	元 / MW
施工與測試成本	高低壓配電及配線設計、機電配管配線、空調及消防設計與施設、土建基礎(座)建置、隔間工程、吊裝、顧問費、併聯審查工程等。	3,990,000	元 / MW · h
期初總成本估計 (1MW/1MWh) ^註			23,760,000 元
營運成本	每年須經常性支用之固定費用，與充放電能量無關，包含專案管理、EMS 系統管理、系統維護、技術顧問費用、場地租金、公共安全保險等。	1,240,000	元 / 年
電損成本	以台電歷史頻率資料推估儲能參加 dReg _{0.25} 每年等效全充全放電次數約為 785 次，假定其充放電效率為 85%、台電平均購成本為 2.5 元 / kWh。	346,324	元 / 年
每年固定成本估計			1,586,324 元

註：使用 2019 美國能源部 (DOE) 公布之資料，並以匯率 30 NTD/USD 計算。

¹ PCS：Power Conditioning System 電力調節系統，亦稱功率調節系統。

表 4 儲能參與輔助服務市場之成本效益試算案例

期間 (年)	收益	成本	淨額	累積淨現值	內部報酬率
0	0	23,760,000	-23,760,000	-23,760,000	
1	7,008,000	1,586,324	5,421,676	-18,444,631	
2	7,008,000	1,586,324	5,421,676	-13,233,486	
3	7,008,000	1,586,324	5,421,676	-8,124,519	
4	7,008,000	1,586,324	5,421,676	-3,115,729	
5	7,008,000	1,586,324	5,421,676	1,794,850	4.56%
6	7,008,000	1,586,324	5,421,676	6,609,143	9.79%
7	7,008,000	1,586,324	5,421,676	11,329,039	13.29%
8	7,008,000	1,586,324	5,421,676	15,956,387	15.72%

求，服務品質指標為 1。

由於容量價格之結清方式為系統邊際價格 (System Marginal Price, SMP)，且市場開設初期外部資源較少，業者只要有投標幾乎都可以得標。綜上所述，儲能投資者每小時可獲得 800 元之調頻備轉輔助服務價金，一年之收益為 7,008,000 元。


假設鋰電池運轉壽命為 8 年、計算投資案淨現值之折現率為 2%，表 4 為該案例試算之成本效益分析簡表。如表所述，以 1MW/1MWh 之儲能設備參與輔助服務市場，回收年限約為 5 年，投資案之內部報酬率為 15.72%，淨現值達 15,956,387 元，方案應具可行性。


結語

儲能設備應用於大量電能移轉時，不僅可以平均降低整體的供電成本及用電成本、延緩輸配電網路的升級投資、減少棄風棄光之情形，其快速充放電的特性亦可維持電力系統頻率穩定，有助於提升再生能源滲透率；尤其未來將不斷地走向分散式電力系統，屆

時電力供需界線變得模糊，而儲能則成為提供電網彈性及具有緩衝作用的重要資產。

參考資料

1. Paul Denholm, Matthew O'Connell, Gregory Brinkman, and Jennie Jorgenson (2015). Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart. National Renewable Energy Laboratory
2. NC State Senior Design (2017). Battery Storage Utility Grid Controller. Retrieved from https://caper-usa.com/wp-content/uploads/2017/11/Session-I-SDP1-NCSU-Team_11-8-17.pdf (2021/6/7)
3. Markos Katsanevakis, Rodney A. Stewart, Junwei Lu (2016). Aggregated applications and benefits of energy storage systems with application-specific control methods: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
4. 台灣電力公司，什麼是「需量反應」？檢自 https://www.taipower.com.tw/tc/faq2_info.aspx?mid=80&id=197&chk=02717373-b7ca-4d5c-b877-1bfa514155df¶m=pn%3D7 (2021/6/7)
5. 經濟部能源局 (2017)。綠能屋頂全民參與行動方案。「加速投資臺灣專案會議」第 3 次會議
6. 輔助服務及備用容量交易試行平台第三次公開說明會 (2021)。檢自 <https://sites.google.com/tri.org.tw/platform0505> (2021/6/7)
7. K Mongird V Fotedar, V Viswanathan, V Koritarov, P Balducci, B Hadjerioua, J Alam (2019). Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. Hydrowires. 



A & GOOD
A & GOOD CONSTRUCTION PRODUCTS

安得固

AD減隔震系列

AEC 碳纖維

AEG錨固系列

建築修復結構補強
STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM

AE結構補強系列

AM智能監測

AC無收縮水泥
AEX 樹脂砂漿

A 安固 ANCHORS
專業·品質·服務

免費服務電話 台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
0800-009-666 桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw

