



台灣區電機電子工業同業公會
Taiwan Electrical and Electronic Manufacturers' Association

台灣儲能系統產業推動聯盟



Optimal battery schedule for grid-connected photovoltaic-battery systems of office buildings based on a dynamic programming algorithm

基於**動態規劃演算法**的辦公大樓**太陽能及儲能系統**電費優化調度

台灣儲能系統產業推動聯盟 李達生召集人
陳銘祥組長

202212月27日

簡報大綱

1.摘要

2.文獻探討

3.創新概念及主要架構圖

4.創新成效

5.電費最小化試算



Paper name	Optimal battery schedule for grid-connected photovoltaic-battery systems of office buildings based on a dynamic programming algorithm	Publication	Journal of Energy Storage Volume 50, June 2022, 104557
		Classification	Stand-alone microgridEnergy
High lights or Abstract	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Solar photovoltaic (PV) systems have become a widely-used form of renewable energy due to their various utilizations and eco-friendliness [3], [4]. However, unstable weather condition directly leads to the randomness and intermittence of PV systems. Thus, they could not match with fluctuating building loads. ❑ PV systems combined with energy storage systems are expected to improve the overall performance of the system and relieve the grid distribution stress by employing an optimal battery charging and discharging schedule. ❑ ToU pricing also realizes that the real-time marginal cost of power production is equal to the retail price with efficient variability [8], [9], Optimal price has become the development direction. 	<pre> graph LR PV[PV system] -- P_pv --> CC[Charge controller] CC <--> HI[Hybrid inverter] CC <--> BS[Battery system] HI -- P_pv + P_B --> Sum((+)) PG[Power grid] -- P_g --> Sum Sum -- P_d --> EL[Electricity load] </pre>	
Key word	Battery energy storage systemTime-of-Use (ToU)Low-energy buildingsDynamic programming algorithmSensitivity analysis		

基於動態動態規劃演算法的辦公大樓 併網光伏電池系統電池優化調度

電費管理策略最佳化

下載：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22005746>

作者：

Yi Li ^a , Jinqing Peng ^{a,b,*} , He Jia ^a , Bin Zou ^a , Bin Hao ^c , Tao Ma ^d , Xiaoyang Wang ^e ,

^a
College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan, China

^b
Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Changsha, Hunan, China

^c
Shenzhen Institute of Building Research Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, China

^d
School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

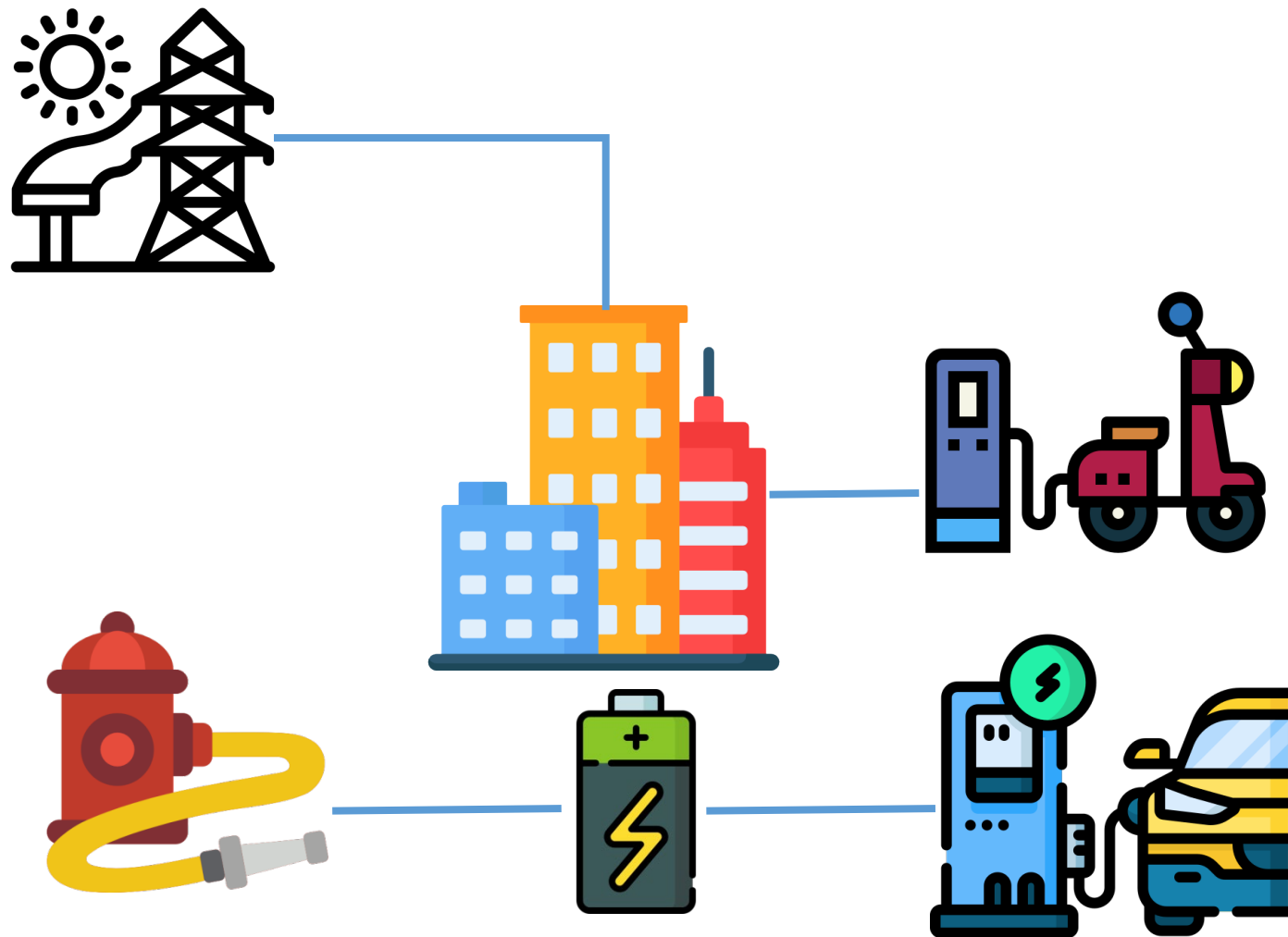
^e
University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan, Guangdong, China

摘要

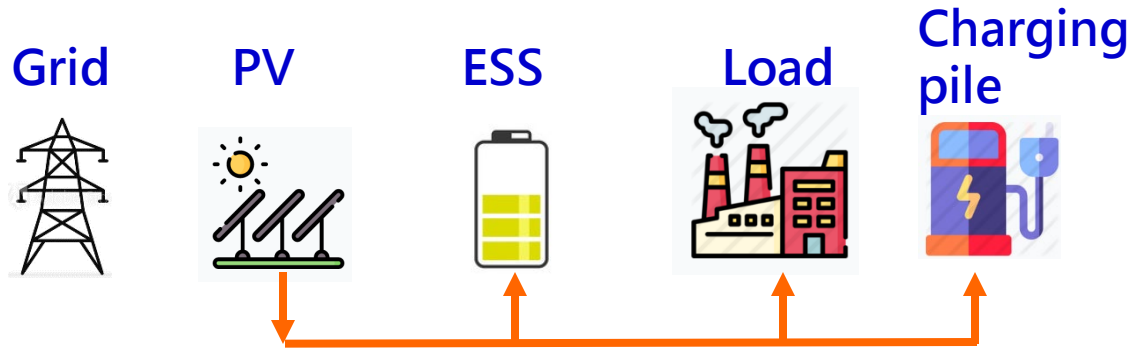
- 建築能耗逐年增加，2020年占總能耗的30% [1]。超過30%的建築能源消耗直接由電力供應，這導致化石燃料資源的快速消耗和環境問題[1], [2]。
- 近年來，隨著零能耗建築 (ZEB) 的普及，將可再生能源融入建築具有廣闊的發展前景。太陽能光伏 (PV) 系統由於其多種用途和生態友好性已成為一種廣泛使用的可再生能源形式[3], [4]。
- 光伏系統屬於間歇性能源。因此，它們無法與波動的建築負荷相匹配。受光伏發電與居民用電需求時間不匹配的影響。
- 光伏電池儲能系統 (PV-BESS) 成為可再生能源在建築領域應用的發展方向。
- 分時電價 (ToU) 根據電力生產的實時邊際成本反映到零售電價，故可利用儲能系統在低電價時儲電，高電價時放電使用，達到優化電價的目標。

摘要

- 新型的儲能系統是時候引用到建築物所需**緊急用電設備供電**，
- 除了可在一般停電、火災停電提供照明、消防等應用之外，
- 亦可當成平日**再生能源的儲存**、**時間電價優化**、**參加台電需量反應賺取電費價差**
- 及配套**電動車充電設施**之**供電電源設施**使用。

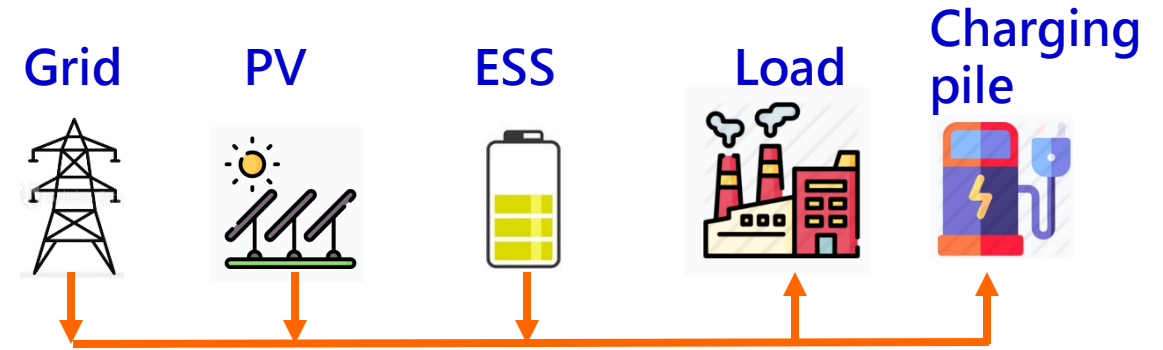


PV > Loading



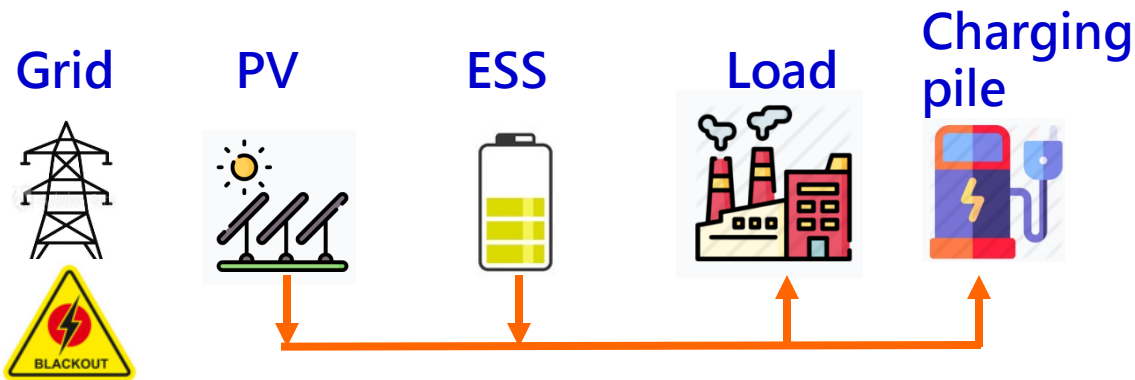
✓ 將多餘的太陽能電力儲存起來

Contract < Loading



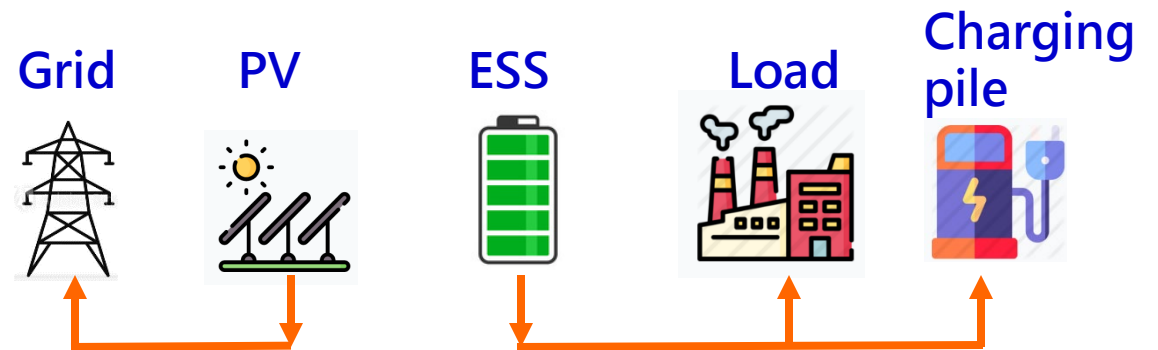
✓ 將儲能系統的電力釋放出來，供應負載，避免超約

Blackout



✓ 當電網中斷時，儲能系統可以釋放自救(參加台電需量反應)

電價優化

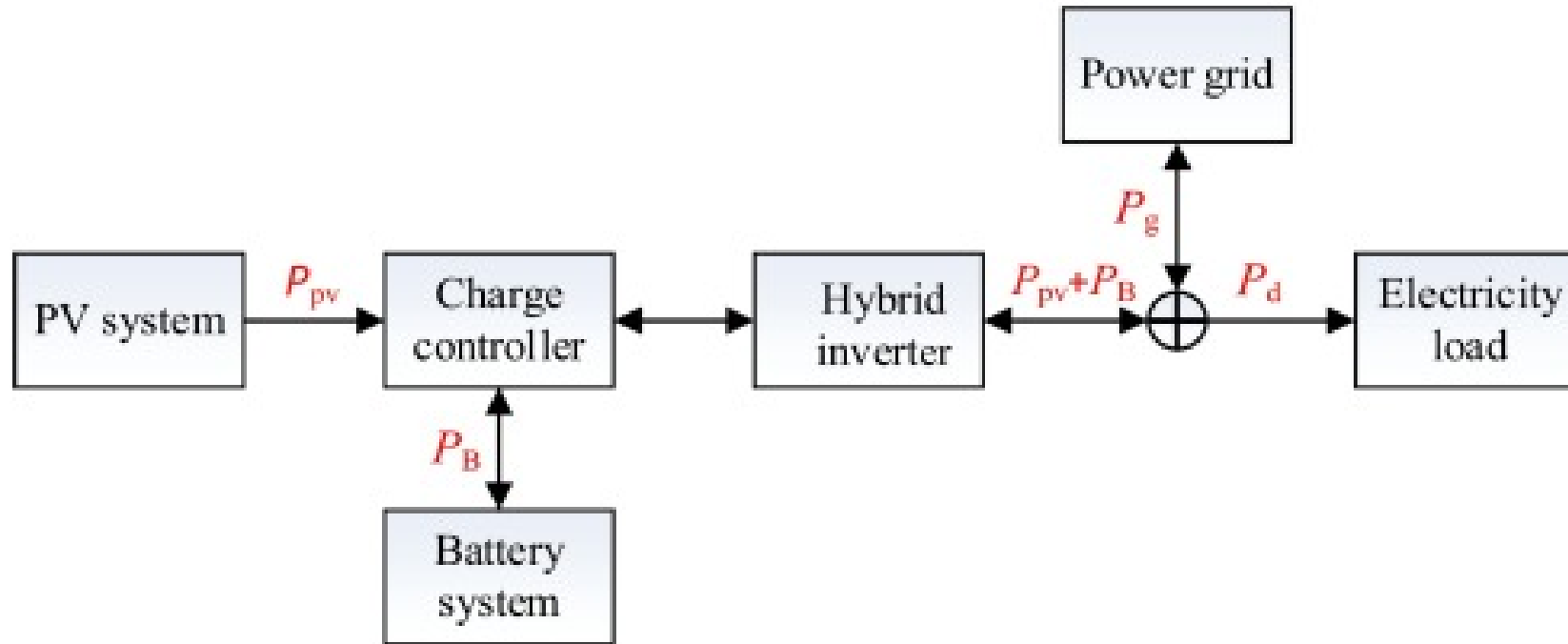


✓ 離峰電價儲存電力，白天儲能系統可以釋放供應負載，太陽能可以賣給電網

- 自耗最大化 (Self-consumption maximization , SCM) 已成為一種常用的運營策略，以充分利用太陽能資源的潛力[11] , [12] , [13]。
- [15] , [16] , 最大自耗率 (SCR)的系統高度依賴於電池容量與負載需求的匹配程度。
- 上網電價 (FiT) 和分時電價 (ToU) 也在十年間被納入優化策略。
- Arghandeh 等人。[22]開發了一個調度系統，通過使用基於梯度的啟發式方法來完成電池充電和放電控制。結果發現，儲能系統可以滿足電力系統的可靠性和容量需求，但所提出的優化運行策略大大增加了系統的成本。
- 隨著人工智能技術的快速發展，近年來提出了一些用於實現能源管理系統的神經網絡模型[34] , [35] , [36]。根據電價和可再生能源可用性，Jin 等人。[35]基於日前調度的思想開發了具有需求響應的微電網優化調度 (MOD-DR)。

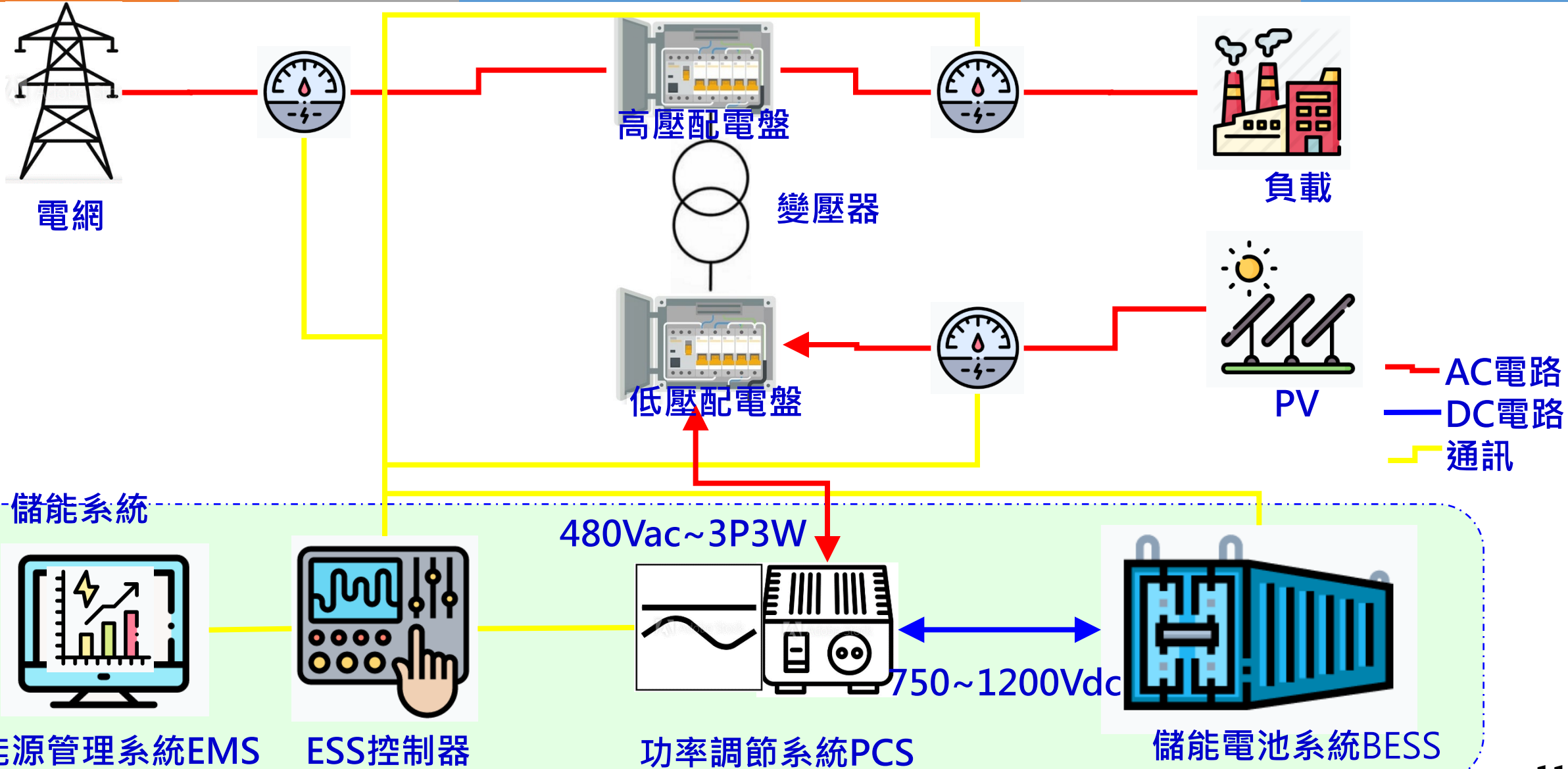
- 基於以往的研究，重點研究了在使用時間 (ToU) 定價方案下併網 PV-BESS 的優化和經濟分析。本研究的創新點可簡要概括如下：
- (1) 提出一種基於動態規劃演算法的能量運行策略，考慮電池退化、光伏發電、實時負荷和本地 ToU 定價，以優化中國寒冷地區辦公大樓併網光伏電池系統。
- (2) 進行靈敏度分析，評估電池儲能容量(kWh)和電池單位成本(\$/kWh)對系統淨現值(NPV)的影響。
- (3) 將所提出的策略與其他廣泛使用的策略下的技術經濟績效進行比較，以實現整體評估。該研究的研究成果可用於優化分佈式PV-BESS的設計，以實現太陽能光伏電力在城市地區的更高滲透率。

- 典型的分佈式光伏電池儲能系統 (PV-BESS) 的主要組成部分包括公用電網、太陽能光伏系統、儲能系統和建築物負載。系統示意圖如圖所示。分佈式光伏儲能系統與公用電網共同實施“自用、併網、調度”的運行機制



創新概念及主要架構圖

系統配置



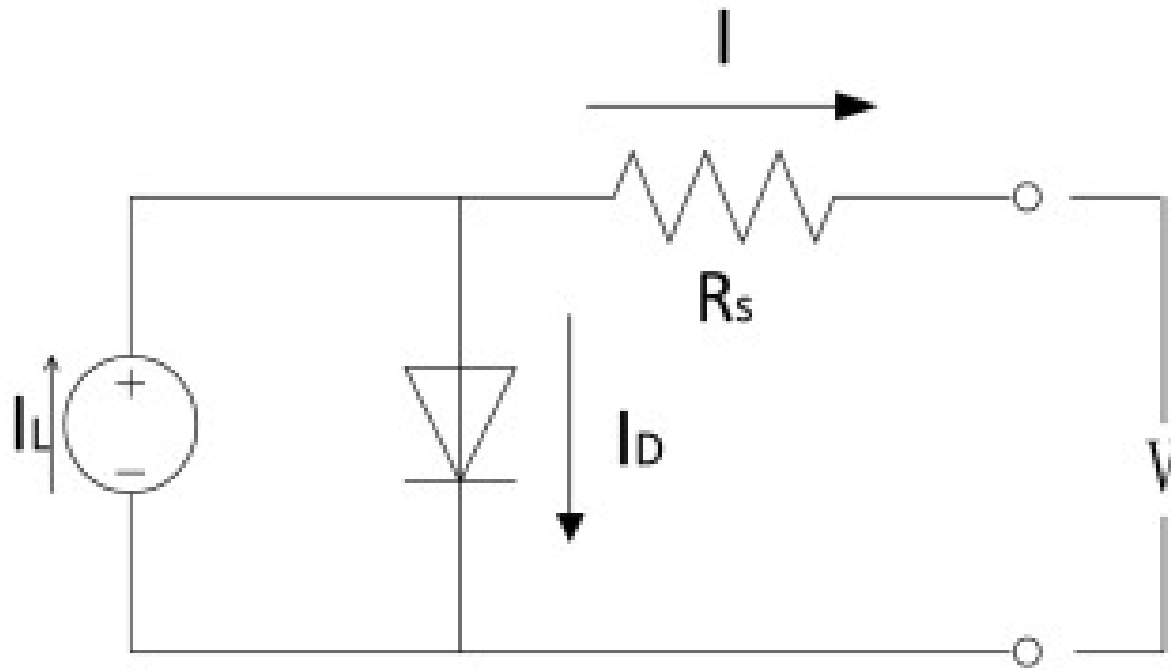
能源管理系統EMS

ESS控制器

功率調節系統PCS

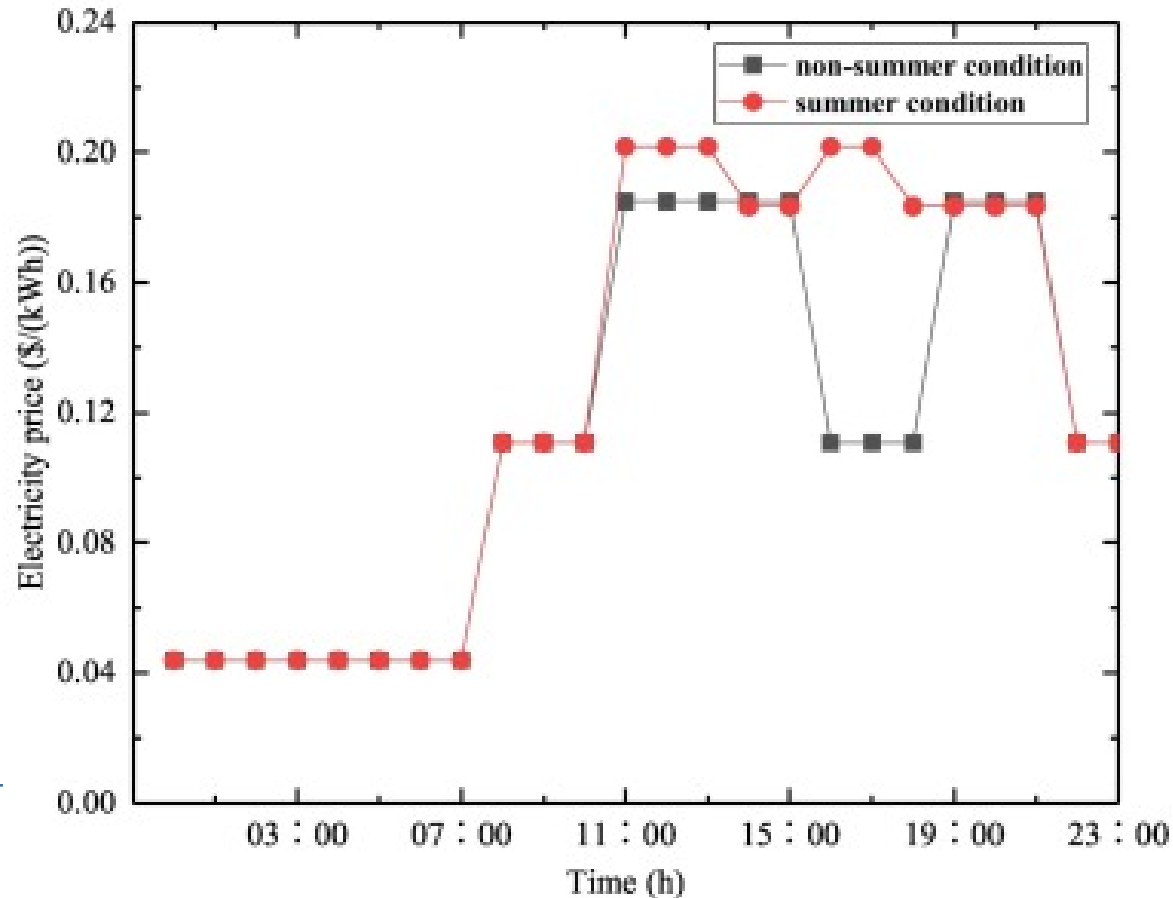
儲能電池系統BESS

➤ “四參數” 等效二極管模型 [41] 用於預測晶矽（單晶和多晶）光伏組件的發電量。該模型中的四個參數是光電流， I_L, ref ；二極管反向飽和電流， I_0, ref ；IV 曲線經驗擬合參數， γ ；光伏組件串聯電阻 R_s ，一般可以通過參數代數分離法得到。計算光伏發電的等效二極管模型如圖所示。



- 電池作為分佈式儲能系統的重要形式，儲存多餘的可再生能源。通常，電池儲能系統 (BESS) 由電池、控制器和功率調節系統 (C-PCS) [42]組成。本研究同時採用電池循環老化模型[43]和電池成本模型計算電池充放電控制過程中的電池折舊成本和循環老化。
- 電池循環老化模型-本研究採用“雨流”計數模型，根據放電深度 (DoD) 對應的充放電失效循環次數計算每次電池運行的等效老化次數[44]。
- 電池成本模型-總資本成本 (TCC) 的計算涵蓋了 BESS 的採購、交付和安裝過程，包括功率轉換系統成本、儲能相關成本和功率平衡 (BOP) 成本[49]。

➤使用時間 (ToU) 定價方案是調整電力供應和負載需求平衡的重要手段。圖 3 表示了北京一般工商業用戶的電價[51]。在目前的市場情況下，非夏季條件下，峰期電價定為\$0.1849/(kWh)，平期電價定為\$0.1107/(kWh)，谷期電價定為\$0.0439/(kWh)。



- 分佈式光伏電池儲能係統（**PV-BESS**）可以通過儲能系統的優化控制動作來緩解電源與負載需求之間的不匹配。此外，儲能系統的運行是提高**PV-BESS**整體性能的重要途徑。本研究以系統運行成本最小為優化目標，建立目標函數和儲能優化調度模型。所提出的模型旨在優化電池系統充電和放電循環，以最大限度地減少典型年份的系統運行成本。
- 系統應適當考慮設備的技術性、經濟性、可靠性等因素，受制於運行約束和策略。優化的目標函數，如方程式所示。(8)、是實現典型年系統運行成本最低。

$$\min C = \sum_{t=0}^{8760} (U_t C_g^t + V_t C_{pv}^t + W_t C_B^t - R_t C_{FIT}^t)$$

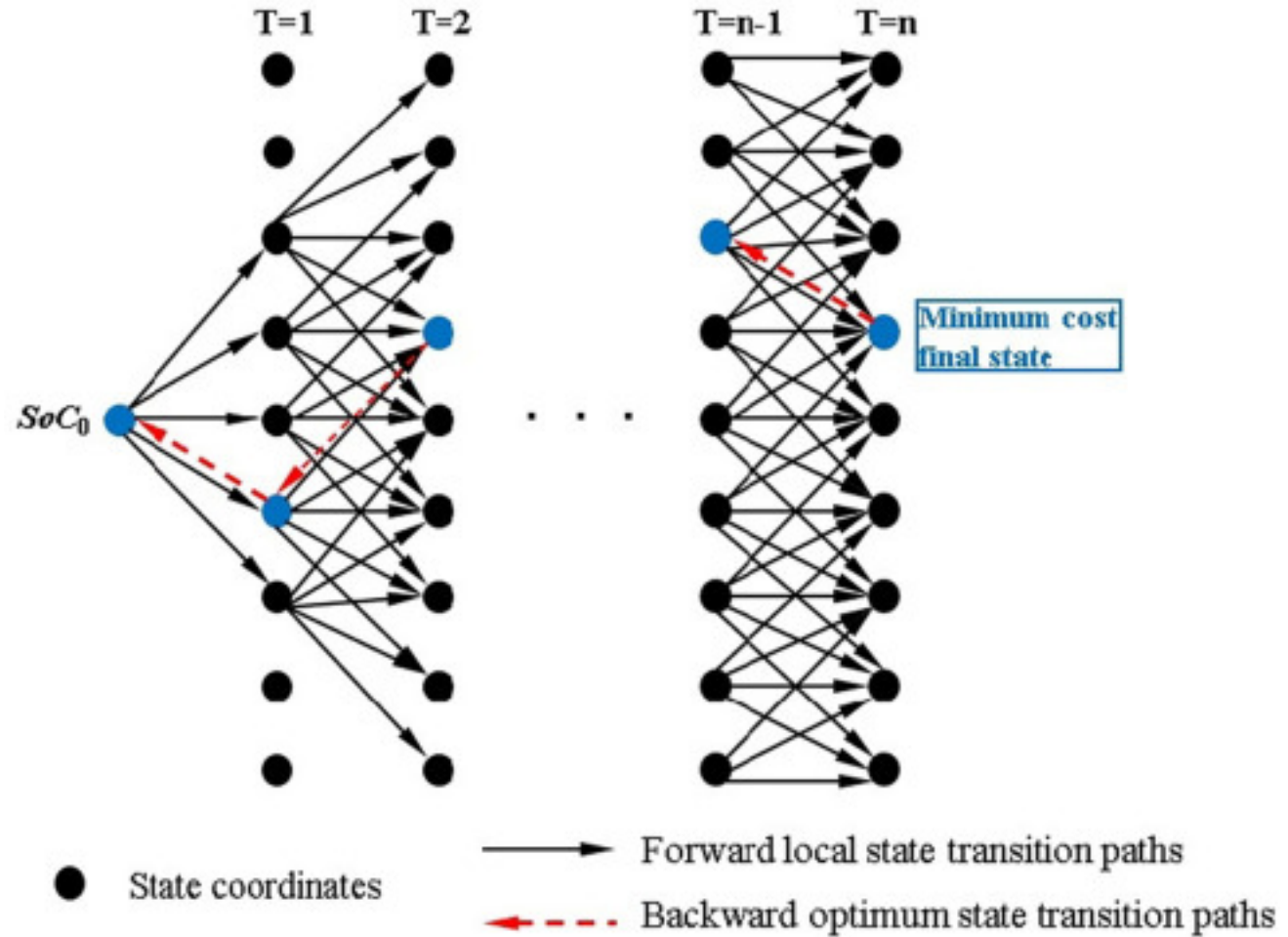
創新概念及主要架構圖

優化方法

➤ PV-BESS的年度優化控制是一個典型的多階段過程。它指出當第一個決策形成的階段和狀態被視為初始條件時，無論初始狀態和初始狀態如何，其餘決策也將構成剩餘問題的最優策略決定。這意味著問題可以通過從最終狀態回溯來解決，成本函數會考慮未來的最優決策 [53]。

➤ 根據動態規算法，電池系統的年度優化控制以1小時為間隔分為8760個階段。無法在每個時間間隔 $[t, t + \Delta t]$ 中單獨接收最佳決策。 t 步決策的選擇取決於當前狀態，對 $t + 1$ 步後的整體優化結果有影響。

➤ 每個時間間隔內的電池控制操作由以下兩個方面決定：（1）操作的預期利潤，以及（2）決策產生的老化成本。



創新概念及主要架構圖

優化方法

Stage 1:

S_1	d_1	$f(S_1, d_1)$	$f(S_1, d_1) + g^*(S_0)$	$g^*(S_1)$	d_1^*
$S_0 = T, g^*(S_0) = g^*(T) = 0$					
C ₁	T	7	7 + 0	7	T
C ₂	T	9	9 + 0	9	T
C ₃	T	8	8 + 0	8	T

Stage 2:

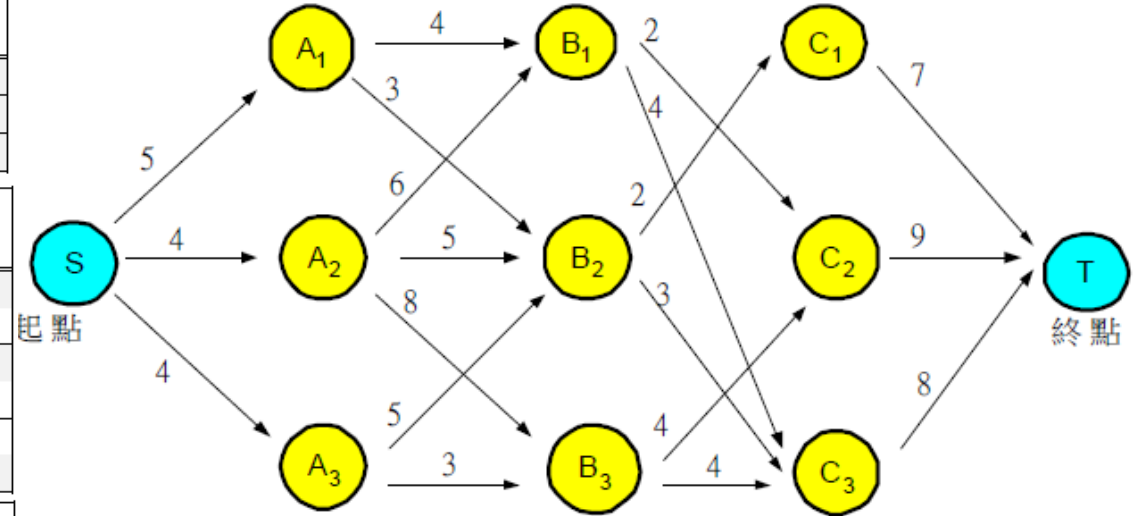
S_2	d_2	$f(S_2, d_2)$	$f(S_2, d_2) + g^*(S_1)$	$g^*(S_2)$	d_2^*
$S_1 = d_2$					
B ₁	C ₂	2	2 + 9	11	C ₂
	C ₃	4	4 + 8		
B ₂	C ₁	2	2 + 7	9	C ₁
	C ₃	3	3 + 8		
B ₃	C ₂	4	4 + 9	12	C ₃
	C ₃	5	4 + 8		

Stage 3:

S_3	d_3	$f(S_3, d_3)$	$f(S_3, d_3) + g^*(S_2)$	$f^*(S_3)$	d_3^*
$S_2 = d_3$					
A ₁	B ₁	4	4 + 11	12	B ₂
	B ₂	3	3 + 9		
A ₂	B ₁	6	6 + 11	14	B ₂
	B ₂	5	5 + 9		
	B ₃	8	8 + 12		
A ₃	B ₂	5	5 + 9	14	B ₂
	B ₃	3	3 + 12		

Stage 4:

S_4	d_4	$f(S_4, d_4)$	$f(S_4, d_4) + g^*(S_3)$	$g^*(S_4)$	d_4^*
$S_3 = d_4$					
S	A ₁	5	5 + 12	17	A ₁
	A ₂	4	4 + 14		
	A ₃	4	4 + 14		



後推式解法(Backward approach) -- 令
 $g^*(X) = X$ 到 T 之最短路線長度
 $f(X, Y) = X$ 到 Y 之長度 (X, Y 相鄰)
 $g^*(S) = S$ 至 T 之最短路徑長度(最佳解)

由階段 4 可知由 S 到 T 的最短路徑長度是 17,
 倒推回去便可求得最短路徑如下:

S → A₁ → B₂ → C₁ → T

➤ 能量流分析-基於動態規劃算法，對電池充放電決策進行了優化。以某中型辦公大樓為例，評估該策略在華北寒冷地區的適用性。裝機容量最大的大樓屋頂安裝了太陽能光伏系統。PV-BESS的詳細規格如表1所示，表2為建築圍護結構熱工參數

Parameter	Value	Parameter	Value
Building scale (m^3)	49.9 * 33.3 * 11.9	Battery capacity (kWh)	300
PV panel size (m^2)	1.66 * 1	SoC	20%–100%
Short-circuit current I_{sc} (A)	9	Charge-discharge cycles (DoD)	>3200 (80%)
Open-circuit voltage V_{OC} (V)	36	Maximum charge/discharge rate	0.2C
Number of photovoltaic modules	30 * 20	Operating temperature ($^{\circ}C$)	0–50

Note: the fitting factors (u_0, u_1) in Eq. (5) for the battery adopted are $u_0 = 0.65$ and $u_1 = -0.47$.

Table 1. Key parameters of the PV-BESS.

Building envelope	Heat transfer coefficient ($W/m^2 \cdot K$)
External wall	0.48
Roof	0.35
Floor	0.48
Window	1.82

Table 2. Thermal parameters of the building envelopes.

► 本案例研究了兩種情況下採用和不採用動態電價方案的 PV-BESS 的優化結果。圖 7 為 7 月 15 日和 16 日典型夏季日的優化結果，圖 8 為 10 月 28 日和 29 日典型非夏季日的優化結果。其中，7 月 16 日和 10 月 29 日為非工作日。

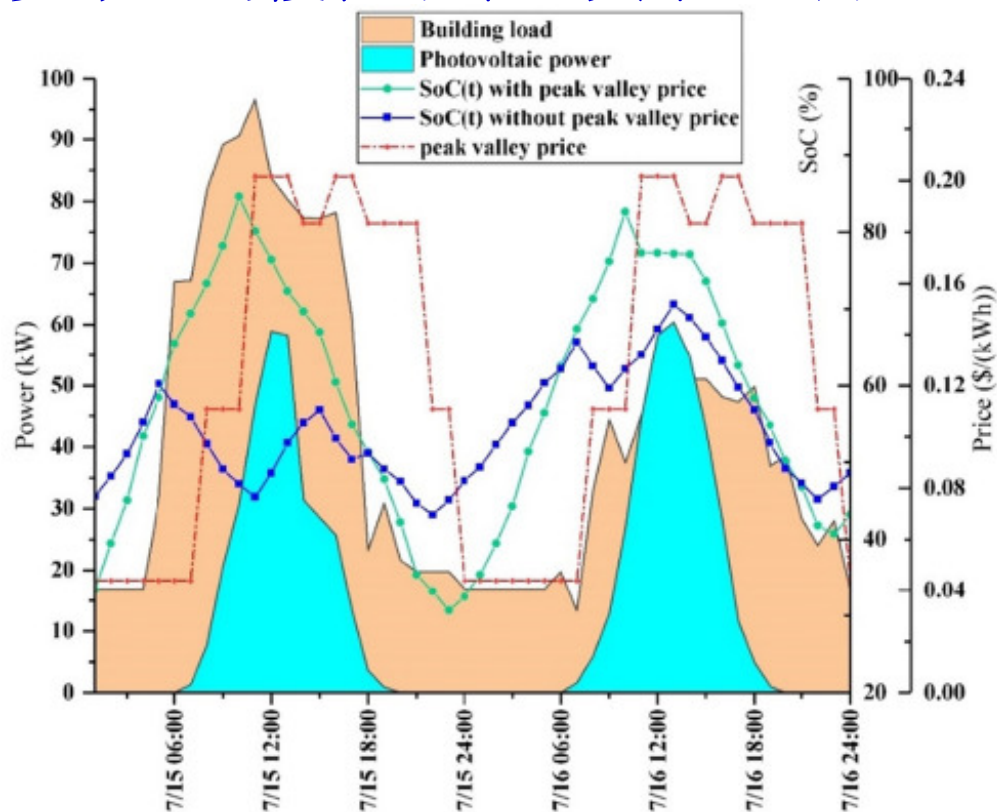


圖 7。夏季典型日子的系統優化結果。

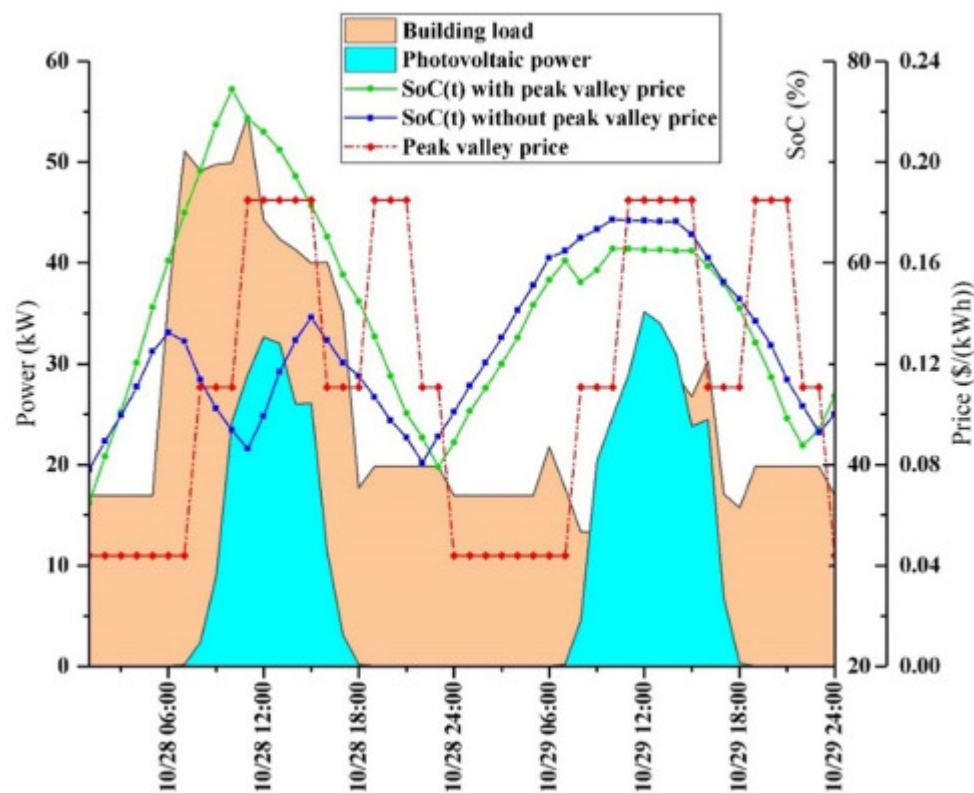


圖 8。非夏季典型日子的系統優化結果。

- 以下是夏季採用分時計價（**ToU**）定價的優化結果分析。
- 7月15日凌晨0:00-6:00左右，系統以相對較低的價格從公用電網進口電力為電池充電。
- 7月15日早上7:00-9:00，隨著太陽升起，建築物負荷增加，蓄電池以相對較低的充電功率進行套利充電。
- 7月15日10:00-19:00左右，隨著電價上漲至峰頂或高峰電價，電池放電以大功率彌補光伏供電不足。
- 7月15日11:00-13:00至16:00-17:00為高峰期，放電功率達到最大值。
- 7月16日晚，作為非工作日，系統採取與工作日類似的決策，利用峰谷價差來節費。
- 但7月16日11:00-13:00光伏發電量大於建築用電需求，電池充電功率受電池容量限制，剩余光伏電量饋入公用電網，發揮槓桿作用。相對較高的價格。

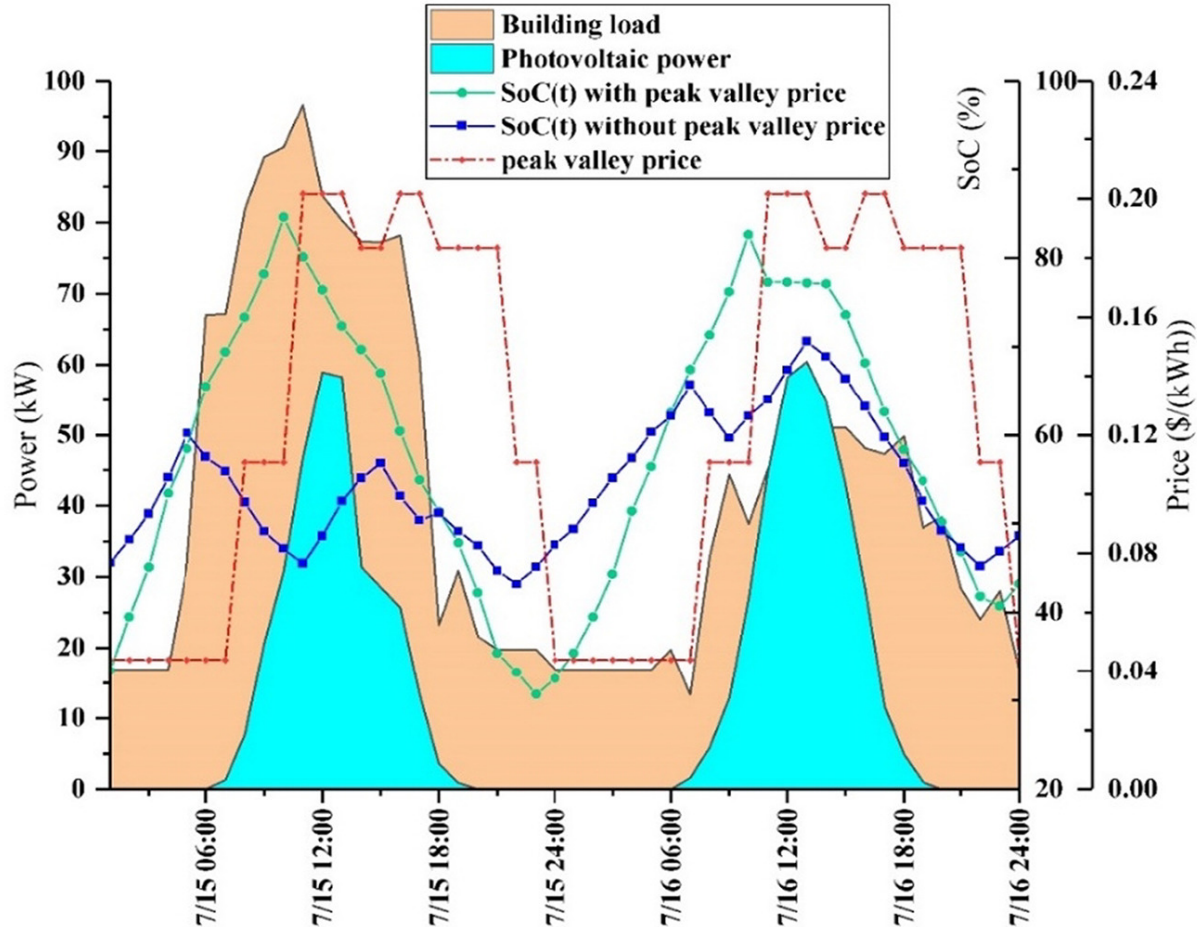
➤ 通過對以上結果的分析，動態規劃算法可以綜合考慮建築用電需求、光伏發電等因素，實現ToU電價方案下電池的最優調度。該算法根據供需能量以及定價信息，確定合適的充放電操作，達到提高並網PV-BESS經濟性的目的。同時，在光伏發電過剩時，靈活規劃剩余光伏電量的流向。這樣的規劃不僅可以通過將多餘的電力出售給電網來產生收入流，還可以充分利用電池來降低從公用電網進口電力的成本。

➤在這項研究中，提出了一種基於動態規劃算法的優化模型，通過調度電池運行策略來優化並網光伏電池儲能係統 (PV-BESS) 的上網電價收入流。主要結論如下：

- (1)通過利用動態規劃算法的計算靈活性，電池控制提高了配備電池的光伏系統的經濟效益。操作策略解決了在老化懲罰下電池充電/放電決策的優化。通過實踐應用表明，該方法可以通過調度電池運行策略來最大化現有PV-BESS的上網電價收入流。
- (2)對比儲能單位成本和儲能容量對PV-BESS盈利範圍的影響，得出的結論是，在儲能單位成本下降到100\$/kWh左右的同時，系統可以在倍數下獲得收益ToU 電費。
- (3)評價輸入變量對最優經濟效益影響的敏感性分析表明，電價是對系統淨現值最敏感的變量。優化後的敏感性分析結果對系統設計和管理具有一定的參考意義。
- (4)將所提出的運營策略和其他策略下的並網 PV-BESS 的技術經濟性能進行比較，以實現整體評估。結果表明，所提出的策略比其他策略具有更大的靈活性，並且具有取得更好經濟績效的優勢。

案例試算

電費最小化求解



(2)三段式

分		類		夏月 (6/1至9/30)			
基本電費	按戶計收			每戶每月	75.00		
流動電費	週一至週五	尖峰時間	夏月	10:00~12:00 13:00~17:00	每度	6.20	
			半尖峰時間	夏月		07:30~10:00 12:00~13:00 17:00~22:30	4.07
		離峰時間		非夏月	07:30~22:30	每度	1.80
		離峰時間		00:00~07:30 22:30~24:00		每度	1.80
	週六、週日及離峰日	離峰時間		全日	每度	1.80	
每月總度數超過2,000度之部分				每度	加0.96		

➤使用論文中的7/15日的負載及光伏數據，套用台灣的夏日三段電價，採用EXCLE動態規劃功能求最低電費解/儲能系統每度電成本NT\$10,000/可充放5000次(可買電動車 SoH低於80%第二梯次電池，利用到SoH低於60%，同時也達到循環經濟梯次化利用)

最佳化試算結果

電費最小化

規劃求解參數

設定目標儲存格:

等於: 最大值 最小值 目標值:

變數儲存格:

限制式:

-
-
-
-
-
-
-

	用電量KW	光伏發電量KW	電網電費	不使用儲能電費小計	電池SoC(充放電策略不考慮峰谷)(充電是正1,放電是負1)	電池充放電策略(不考慮峰谷)(充電是正1,放電是負1)UNKOW	充放電效益	使用儲能削峰填谷電費小計	項目	變動值	unknow
0715-01	17.00	0.00	1.80	30.60	38.13	1	87.88	120.48	儲能起始度數(SoC)	15KW	15
0715-02	17.00	0.00	1.80	30.60	61.25	1	87.88	120.48	儲能系統充放電成本每C	1=<C=<2元	2
0715-03	17.00	0.00	1.80	30.60	84.38	1	87.88	120.48	每小時充電容量	5~20度	23.125
0715-04	35.00	0.00	1.80	63.00	107.50	1	87.88	152.88			
0715-05	50.00	0.00	1.80	90.00	130.63	1	87.88	179.88	限制		
0715-06	65.00	20.00	1.80	81.00	153.75	1	87.88	170.88	儲能建置容量200度	<200KWH	200
0715-07	72.00	1.00	1.80	127.80	176.88	1	87.88	217.68			
0715-08	80.00	8.00	4.07	293.04	200.00	0	0.00	295.04	儲能每度電建置成本	充或放共可10000次	每次充或放成本
0715-09	85.00	17.00	4.07	276.76	200.00	0	0.00	278.76	20000	10000	2
0715-10	88.00	30.00	6.20	359.60	200.00	-1	-189.63	171.98			
0715-11	90.00	48.00	6.20	260.40	176.88	-1	-189.63	72.78	結論		
0715-12	95.00	59.00	4.07	146.52	153.75	0	0.00	148.52	當儲能建置容量在200KWH以下,功率在20KW以下		
0715-13	85.00	58.00	6.20	167.40	153.75	-1	-189.63	-20.23	儲能充放電功率在18.5KW		
0715-14	80.00	31.00	6.20	303.80	130.63	-1	-189.63	116.18	儲能充電或放電一度電成本在1元的時候		
0715-15	76.00	28.00	6.20	297.60	107.50	-1	-189.63	109.98	才能夠節費		
0715-16	77.00	26.00	6.20	316.20	84.38	-1	-189.63	128.58			
0715-17	45.00	14.00	6.20	192.20	61.25	-1	-189.63	4.57	另外可透過降低契約容量達到節費的目標		
0715-18	25.00	3.00	4.07	89.54	38.13	0	0.00	91.54			
0715-19	22.00	1.00	4.07	85.47	38.13	0	0.00	87.47	台灣電價太便宜,就算峰谷值已拉大,還是很難實現收益		
0715-20	21.00	0.00	4.07	85.47	38.13	0	0.00	87.47	此外假日的時候光伏發電量短暫超過負載		
0715-21	20.00	0.00	4.07	81.40	38.13	0	0.00	83.40	也可以賣電回電網以一度電5元計算		
0715-22	20.00	0.00	1.80	36.00	38.13	1	87.88	125.88			
0715-23	18.00	0.00	1.80	32.40	61.25	1	87.88	122.28			
0715-24	18.00	0.00	1.80	32.40	84.38	1	87.88	143.40	收益/每天		
總計				3509.80				3130.30		379.50	

電費最小化

簡報完畢 謝謝聆聽



台灣區電機電子工業同業公會
能源與儲能委員會
台灣儲能系統產業推動聯盟
陳銘祥組長



alan@teema.org.tw



886-2-87926666#324



www.teema.org.tw