

影響未來的電源技術

■文：編輯部

2025 年，儘管全球經濟狀況仍處於不斷波動的狀況之下，但是，在能源轉型、電氣化進程加速以及 AI 等新興技術的強力驅動下，電源技術和市場的成长動力依然充沛。2023 年全球電源管理晶片市場規模已達到約 400 億美元，預計 2025 年將突破 500 億美元，年複合增長率保持在 10% 左右；2023 年僅功率半導體市場規模已突破 1000 億美元，預計 2030 年將超過 2000 億美元。

各國碳中和政策推動的可再生能源系統建設、全球汽車電動化浪潮，以及資料中心和

AI 基礎設施的迅猛發展。驅動因素全球電源技術市場持續增長的主要因素包括：

■可再生能源與電網升級：光伏發電累計裝機容量在 2024 年達 2TWp，市場對逆變器和儲能系統需求增長迅速。

■電動汽車普及：全球電動汽車普及加速，帶動車載充電器、電機驅動系統及電池管理技術需求。

■數位化轉型：資料中心和 AI 算力需求導致高密度電源需求增長，5G 基站、雲計算設施等新型基建加速電源技術反覆運算。

亞太地區已成為全球電源產品最大市場，佔據約 45% 的市場份額，這主要得益於中國在新能源發電、電動汽車和消費電子製造領域的全球領先地位。北美和歐洲市場則憑藉在高端電源管理系統、寬禁帶半導體技術和資料中心領域的優勢，分別佔據約 25% 和 20% 的市場份額。值得注意的是，隨著印度、東南亞等新興經濟體工業化進程加速，這些地區正成為電源技術市場新的增長點。

在產品方面，行業競爭日趨激烈。一方面，包括英飛凌、德州儀器、ADI 等傳統半導體巨頭憑藉完整的產品線和長期技術積累，主導著高端電源管理 IC 市場；另一方面，以中國廠商為代表的新興企業正通過技術進步和成本優勢，迅速擴大在中低端電源產品市場的份額。在 SiC、GaN 等寬禁帶半導體領域，Wolf speed、Navitas、ROHM、英飛凌、ST 等公司由於提前佈局，目前處於優勢位置。

從技術方向來看，電源技術的發展正在進入一個新的階段：

■高效：計算設備的電源效率已



從 80 年代的 60-70% 提升至現在的 94-96%，未來有望達到 98% 以上。同時，各國政府提高了對電源產品的效率要求，從以往在某個功率階段的高效率要求，變為要求電源能夠在主要功率模式下保持高效率的要求。這種提升需要製造商對拓撲結構進行優化（如 LLC 諧振轉換），並廣泛使用新型半導體材料。

■智能：通過數位控制技術實現的自我調整環路補償、多模式切換和預測性維護功能，正成為高端電源產品的標配。AI 技術在電源管理中的應用也初見端倪，主要用於負載預測和效率優化。

■集成：功率級與控制電路的 monolithic 集成（如 DrMOS）以及智慧功率模組（IPM）的廣泛應用，顯著減小了電源系統體積並提高了可靠性。

在政策環境方面，全球範圍內日益嚴格的能效標準正推動電源技術升級。歐盟 Ecodesign 指令、美國能源之星計畫以及中國的 GB20943 標準不斷抬高市場准入門檻。例如，最新的 DoE Level VI 標準要求外部電源在低負載（10%）下的效率不得低於 70%，這促使廠商廣泛採用變頻技術和同步整流方案。同時，各國政府對寬禁帶半導體產業的扶持政策（如

美國的 CHIPS 法案和中國的“十四五”規劃）也加速了 SiC/GaN 技術的商業化進程。

全球電源技術市場面臨的主要挑戰包括：供應鏈波動（如 2021-2022 年的晶片短缺）、地緣政治因素導致的產業鏈重構壓力，以及技術快速反覆運算帶來的投資風險。但在數位化和低碳化雙重趨勢下，電源技術市場未來十年仍將保持穩健增長，特別是在新能源汽車、可再生能源和工業自動化等關鍵領域。

寬能隙半導體技術的全面商業化突破

寬能隙半導體材料尤其是碳化矽（SiC）和氮化鎵（GaN）將在未來 5-10 年內實現從示範應用到大規模商業化的跨越。SiC 功率器件憑藉其高擊穿場強（是矽的 10 倍）、高熱導率（4.9W/cm·K）和低導通損耗等特性，將在新能源汽車、可再生能源和工業電源等領域實現全面應用。預計到 2027 年，全球 SiC 功率器件市場將達到 100 億美元，GaN 功率器件市場達 20 億美元，年增長率超過 30%。

■電壓等級與功率密度提升：SiC 器件電壓等級將從目前的 1.2-1.7kV 向 3.3kV、10kV 甚至 20kV 發展，滿足智慧電網和軌道交通的超高

壓需求。採用 SiC MOSFET 的逆變器效率已達 98.5% 以上，比矽基 IGBT 方案提高約 2%，在 WLTP 工況下可增加 5-8% 的續航里程。未來 SiC 模組的功率密度有望達到 25kW/kg 以上，體積縮小至傳統設計的 1/5。

■成本下降與產業鏈成熟：6 英寸 SiC 襯底價格從 2018 年的 2500 美元降至 2023 年的 800 美元，預計 2025 年 SiC 器件價格將比 2020 年下降 40-50%，到 2030 年有望與矽基 IGBT 價格持平。中國“十四五”規劃將寬能隙半導體列為重點，士蘭微、三安光電等企業已實現 6 英寸 SiC 量產，全球產業鏈趨於成熟。

■新型寬能隙材料探索：氧化鎵（ β -Ga₂O₃）和金剛石半導體將成為研發熱點。氧化鎵禁帶寬度達 4.8eV，臨界擊穿場強 8MV/cm，有望用於 10kV 以上應用；金剛石熱導率高達 22W/cm·K，是 SiC 的 4 倍，可解決 GaN HEMT 器件的散熱瓶頸，使其功率密度成倍提升。日本已開發出基於氧化鎵的功率器件原型，效率比 SiC 器件提高 10% 以上。

■集成化與智慧化發展：寬能隙半導體將向“單片集成”方向發展，將功率器件、驅

表：寬能隙半導體技術參數比較

編輯部整理

材料	能隙寬度 (eV)	擊穿場強 (MV/cm)	熱導率 (W/cm·K)	電子飽和速度 ($\times 10^7$ cm/s)	主要應用場景
Si	1.1	0.3	1.5	1.0	傳統電力電子
SiC	3.3	2.8	4.9	2.0	電動汽車、光伏逆變器、高壓電網
GaN	3.4	3.3	1.3	2.5	快充、5G 基站、資料中心電源
β -Ga ₂ O ₃	4.8	8.0	0.3	1.5	超高壓輸變電、軍工設備
金剛石	5.5	10.0	22.0	2.7	高功率密度器件散熱

動和保護電路集成到單晶片，如 Transphorm 的 GaN Power IC。同時，智慧功率模組將集成溫度傳感、故障診斷和自保護功能，實現納秒級回應和更高轉換效率。蘋果 M2 晶片採用的 FIVR (全集成電壓調節器) 技術將電壓調節模組集成到處理器封裝內，顯著提升了回應速度。

未來 5 年內，基於寬能隙半導體的電源系統將在效率 (提升 1-5 個百分點)、功率密度 (提高 3-5 倍) 和工作溫度 (最高達 300°C) 等方面實現突破，推動電力電子設備向小型化、輕量化和高效化方向發展。特別是在新能源汽車領域，SiC 逆變器將成為標配，使 800V 甚至更高的 1000V 高壓架構將電動汽車的充電時間縮短至 15 分鐘以內，續航里程增加 5-8%。

新能源汽車電源系統的革命性創新

新能源汽車作為電源技術最具革命性的應用領域，將在未來 5-10 年實現從能源供給到

管理系統的全方位革新。隨著全球主要國家設定燃油車禁售時間表，電動汽車電源系統正成為技術競爭的焦點，推動著電池技術、充電系統和電機驅動等關鍵部件的突破性發展。

■ 高壓電池技術與快充革命：

電動汽車電池電壓平臺將從當前主流的 400V 向 800V 全面升級，保時捷 Taycan、奧迪 Q6 e-tron 和現代 IONIQ 6 等車型已率先採用 800V 架構。800V 系統可使充電電流減半，電纜和連接器體積減小約 30%，並支援 350kW 以上的超快充，將 30-80%

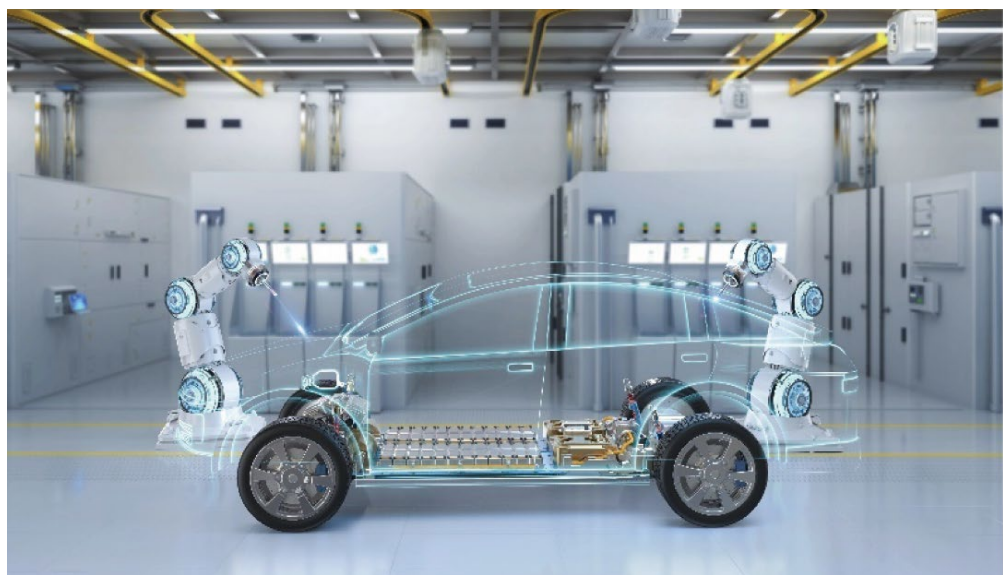
SOC 的充電時間縮短至 15 分鐘以內。

在 2025 中國上海的汽車展商，支持 1000V/1000A

的超大功率充電已經被展示向公眾。到 2030 年，固態電池有望商業化應用，其能量密度預計達 500Wh/kg (當前鋰離子電池的 2-3 倍)，充電時間進一步縮短至 10 分鐘以內，徹底解決續航焦慮。

■ 無線充電與 V2G 技術普及：

電磁共振式無線充電技術將在未來 5 年內實現突破，充電效率從目前的 85-90% 提升至 92% 以上，功率等級從 3.2kW (寶馬 530e) 提升至 11-22kW，充電距離從釐米級擴展至 30 釐米以上。動態無線充電技術在瑞典、以



色列等地開展試驗，通過在道路中埋設發射線圈，實現“邊行駛邊充電”。車網互動(V2G)技術將使電動車成為分散式儲能單元，日產 Leaf 和三菱 Outlander PHEV 等車型已具備 V2G 功能，未來結合區塊鏈技術，電動車使用者可通過電力交易獲得收益，這種模式在丹麥、日本等地已有試點。

■多電機驅動與集成化系統：高性能電動車將普遍採用多電機配置，特斯拉 Model S Plaid 搭載三電機系統，最大功率達 1020hp；Rimac Nevera 超跑採用四電機佈局，實現精確的扭矩向量分配。電機控制器效率將提升至 98.5% 以上，豐田等公司開發的“eAxle”三合一電驅系統將電機、減速器和逆變器集成，體積減小 40%，重量減輕 30%。集成化熱管理系統將電池冷卻、電機散熱和座艙空調整合，提升能源利用效率，在寒冷地區可增加 15-20% 的冬季續航。

■智慧化能源管理突破：基於 AI 的預測性能量管理系統(PEMS)將結合即時交通資訊、駕駛習慣和天氣資料，動態優化電池使用策略。賓士 EQXX 概念車通過這種系統實現了單次充電續航 1202 公里的記錄。電池健康狀態(SOH)的線上估計技術通過電化學阻抗譜(EIS)和機器學習演算法，實現對電池老化程度的精確評估，誤差控制在 3% 以內。太陽能充電車棚與儲能系統結合，可在白天收集電能供夜間充電使用，華為推出的“AI 閃充”解決方案能根據電網負荷智慧調節充電功率，避免對配電網造成過大衝擊。

未來 5 年，動力電池包價格有望從 2023 年的 132 美元 /kWh 降至 70 美元 /kWh，使電動車的購置成本與燃油車持平。歐洲推出的“Battery as a Service”(BaaS) 模式允許使用者租賃電池並快速更換，解決了充電等待和電池衰減問題。48V 輕度混合系統作為低成本

減排方案，將在入門級車型中廣泛應用，預計 2025 年全球市場規模將達 1500 萬套 / 年，為電源技術創新提供更多機會。

超大功率應用場景的電源技術解決方案

超大功率電源技術是支撐現代工業體系、重型裝備和大型運輸系統的關鍵基礎，其技術進步直接影響著能源利用效率和碳排放水準。未來 5-10 年，混合動力工程機械、全電動船舶和電網級儲能系統將推動電源技術向高電壓、高可靠性和系統集成化方向發展。

■工程機械混合動力系統：工程機械領域正經歷從純柴油驅動向電動化混合動力的轉型，現代混合動力挖掘機採用 200-600V 的高壓系統，由柴油發動機和鋰離子電池共同供電。小松 HB365LC-3 混合動力挖掘機採用獨特的電容器-電池混合儲能系統，可在制動時回收高達 70% 的能量，整體燃油效率

表：新能源汽车電源技術發展路線圖

編輯部整理

技術方向	2025 年	2028 年	2030 年
電池系統	800V 高壓平臺普及，能量密度 300Wh/kg	半固態電池應用，能量密度 400Wh/kg	全固態電池商業化，能量密度 500Wh/kg
充電技術	350kW 快充成為標配，無線充電 11-22kW	500kW 超快充，動態無線充電試驗	1000V/500A 充電，無線充電效率 >95%
電機驅動	三合一電驅系統，效率 98%	四電機扭矩向量控制，效率 98.5%	輪轂電機應用，效率 99%
能源管理	AI 預測性能量管理，續航提升 10%	自主充電技術商業化	生物燃料電池輔助供電

提升 25% 以上。利勃海爾 R 976-E 電動挖掘機創新性地採用 " 電動液壓 " 系統，將傳統液壓回路改為電控伺服驅動，消除了節流損失，效率提升 30% 以上。這類系統面臨的主要技術挑戰在於管理暫態大功率波動——挖掘作業時峰值功率可達 300-500kW，而待機時僅需 10-20kW。其電源管理系統採用基於模型預測控制 (MPC) 的演算法，可提前 0.5-1 秒預判操作意圖，優化能量分配。

■船舶中壓直流綜合電力系統：現代全電動船舶採用中壓直流綜合電力系統 (MVDC IPS)，工作電壓通常在 3.3-12kV 之間，功率範圍 5-100MW。美國 " 朱姆沃爾特 " 級驅逐艦和中國 " 福建艦 " 航母都採用了此類技術。船舶電力推進系統的核心技術包括高功率密度發電機 (現代渦輪發電機功率密度達 1.5-2.5kW/kg，採用超導技術的下一代產品有望達到 5kW/kg 以上)、全回轉吊艙推進器 (如 " 天一 " 號起重船採用的 Schottel SRP550

推進器，單台功率 900kW) 和智慧配電系統。船舶中壓直流系統面臨故障保護方面的技術挑戰，短路電流上升速度高達 20kA/ms，要求保護裝置在 1-2ms 內動作，解決方案包括基於電流變化率的保護演算法、固態限流器 (SFCL) 和區域選擇性聯鎖 (ZSI) 技術。

■電網級儲能與固態變壓器：大型儲能電站正朝著吉瓦級規模發展，中國青海共和電站規模達 2.8GWh。這類電站採用 " 四統一 " 規劃思路 (統一規劃、統一建設、統一調度、統一管理)，應用高壓級聯拓撲通過 H 橋模組串聯直接接入 6-35kV 電網，省去升壓變壓器，效率提升 3-5%。電池管理系統 (BMS) 採用分散式架構，每個電池包配備從控單元，通過光纖通信與主控連接，測量精度達到 $\pm 5\text{mV}$ (電壓) 和 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (溫度)。基於 SiC 器件的 10kV/1MVA 固態變壓器體積僅為傳統產品的 1/5，可實現智慧電網中的靈活電壓轉換和故障隔離。

■超高壓與新型冷卻技術：超大功率電源將向 10kV 以上電壓等級發展，減少大電流導致的損耗。兩相浸沒式冷卻技術可將功率密度提升 3-5 倍，特別適用於資料中心和電力電子變壓器。金剛石基 GaN 技術利用金剛石的高熱導率 ($>2000\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)，能夠迅速匯出 GaN HEMT 器件的熱量，有望使功率密度提高 2-3 倍。未來超高壓 SiC 器件 (20kV 以上) 將應用於智慧電網固態斷路器和軌道交通牽引系統，Wolfspeed 已推出 12kV/10A SiC IGBT，導通壓降僅 3.5V。

例如：國際海事組織 (IMO) 對靠港船舶的排放限制促使岸電 (Shore Power) 技術快速發展，大型集裝箱船的岸電需求已高達 11kV/60Hz/10MVA。這種高功率電能傳輸場景面臨複雜的保護問題：不同國家和港口的電網特性差異可能導致電壓波動和諧振過電壓。Littelfuse 的高壓氣體放電管特別適合此類應用，其 EP 型號 (擊穿電壓 184-276V) 可用於多級保護電路，有效抑制來自電

表：超大功率電源技術應用場景與關鍵技術

編輯部整理

應用領域	典型功率範圍	工作電壓	關鍵技術	效率提升
工程機械	300-500kW(峰值)	200-600V	混合儲能系統、電動液壓、MPC 能量管理	25-30%
船舶電力	5-100MW	3.3-12kV	中壓直流 IPS、超導發電機、固態斷路器	15-20%
電網儲能	100MW-1GW	6-35kV	高壓級聯拓撲、混合儲能、電壓源型控制	3-5%
礦山機械	1-5MW	1.5-3.3kV	超級電容 - 電池混合、能量回收	20-25%

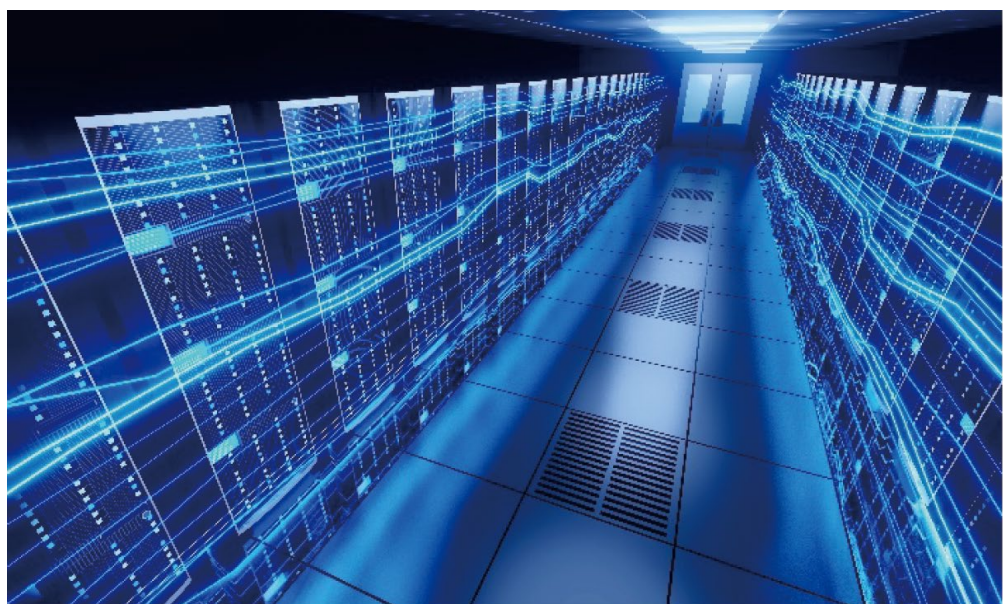
網側的瞬態過電壓。挪威郵輪公司“愛彼號”的岸電系統採用三級保護設計：第一級超高壓氣體放電管處理納秒級極高壓瞬變，第二級 MOV 吸收微秒級中等能量浪湧，第三級 TVS 二極體箝制殘餘過壓，這種組合方案將靠港期間的電源故障率降低了 90% 以上。

未來 5-10 年，超大功率電源技術將在人工智慧管理方面取得突破，通過深度學習預測負載變化，優化系統效率。數位孿生技術將即時類比系統狀態，預測剩餘使用壽命 (RUL) 準確率達 90% 以上。隨著各國“雙碳”政策深入實施，超大功率電源技術將在工業、交通、能源等領域發揮越來越重要的作用，成為支撐可持續發展的關鍵技術之一。

資料中心與 AI 驅動的電源技術轉型

資料中心作為數字經濟的核心基礎設施，其能耗已占全球電力消耗的約 2%，在 ICT 產業發達地區如愛爾蘭更高達 18%。AI 技術的迅猛發展，特別是大規模語言模型的訓練與部署，對電源技術提出了前所未有的高密度、高可靠性需求，推動著供電架構和管理模式的深刻變革。

■供電架構革新：現代超大規



模資料中心正從傳統集中式架構向分散式架構轉型。集中式架構採用 480V 交流或 380V 直流配電，通過大型 UPS 為整個機房供電，存在單點故障風險；而分散式架構在每個機櫃或伺服器配備單獨電源模組，如 Facebook 的 Open Rack v3 標準採用 12V 直流母線直接為伺服器供電，效率可達 94% 以上。AI 計算集群推動機櫃功率密度從傳統的 5-10kW 發展到 30-50kW，NVIDIA DGX SuperPOD 甚至達到 70kW/櫃，這要求供電系統在有限空間內提供更大功率。微軟與 OpenAI 合作的 AI 超級電腦採用鋰離子電池替代 UPS，每個機架配備嵌入式電池備用單元，轉換效率高達 99%，並結合高壓直流

(380V) 配電，減少交流－直流轉換環節，整體效率提升 5 個百分點。

■綠色能源與智能調度：“高能效＋新能源”正成為綠色資料中心的標配解決方案。蘋果丹麥維堡資料中心採用風電供能，實現 100% 可再生能源運行；亞馬遜西班牙 AWS 區域大規模部署太陽能板，年發電量達 1.2TWh。Google 開發的智慧負載等化器可根據不同地區資料中心的新能源可用量和碳排放強度，動態分配計算任務，在 2022 年已減少約 10% 的碳足跡。未來資料中心將更多採用電力購買協議 (PPA)，與可再生能源發電場簽訂長期購電合同，並結合碳抵消投資，實現淨零排放。

■電源管理與製冷技術融合：電

表：資料中心電源技術發展指標與目標

編輯部整理

技術參數	2025 年現狀	2030 年目標	關鍵技術
PUE	1.15(先進資料中心)	≤1.10	間接蒸發冷卻、液冷技術
功率密度	30-50kW/ 機櫃	100kW/ 機櫃	高壓直流配電、兩相浸沒冷卻
供電效率	94-96%	≥98%	GaN 電源模組、AI 動態調優
可再生能源比例	30-50%	100%	智慧負載均衡、綠電採購協議
電池備用系統	鋰離子電池	固態電池	高溫穩定性、快速充放

源管理與熱管理系統走向深度集成，微軟 "Natick" 水下資料中心利用海水自然冷卻，PUE 低至 1.07；阿裡巴巴千島湖資料中心採用湖水製冷，全年約 90% 時間無需機械製冷。液冷系統與電源熱管理集成利用伺服器廢熱提高電池效率，兩相浸沒式冷卻技術可將功率密度提升 3-5 倍。AI 技術在電源管理中的應用日益廣泛，包括通過 LSTM 神經網路提前 15 分鐘預測 IT 負載變化，調整 UPS 工作模式；分析 PDU 歷史資料識別潛在故障，準確率達 85% 以上；以及利用強化學習演算法動態調整伺服器電壓頻率，節省 5-8% 能耗。

■ **48V 直流配電與晶片級供電**：48V 直流配電系統將在 2025 年開始在邊緣資料中心普及，降低傳輸損耗，提高功率密度。Intel 的 "FIVR" 全集成電壓調節器技術將電源管理 IC 與 CPU 封裝在一起，減少傳輸損耗；TSMC 的 InFO-PoP 技術可將 PMIC 與處理器 3D 堆疊，進一步

縮小體積。伺服器級微型電網技術使每個伺服器機櫃形成獨立微電網，實現毫秒級故障隔離，提高供電可靠性。熱電聯產系統利用燃料電池同時供電供冷，總能效可達 85% 以上，特別適用於高緯度地區資料中心。

未來 5 年，全球資料中心耗電量可能達到當前水準的 3 倍，AI 計算需求呈指數級增長。區塊鏈技術在資料中心能源管理中的應用開始嶄露頭角，IBM "Green Horizon" 專案利用區塊鏈記錄能耗和碳排放資料，通過智慧合約自動交易綠電證書。微軟測試的 "AI+ 區塊鏈" 混合系統能即時優化資料中心與電網的互動，在加州 2022 年熱浪期間成功通過需求回應避免了停電事故。只有通過革命性的電源技術突破，才能平衡數位經濟發展與能源可持續發展的關係。

新型電力系統中的電源技術角色

構建以新能源為主體的新型電力系統是世界各國的 " 雙

碳 " 目標，最為樂觀的預計，到 2050 年全球風電、光伏等可再生能源在電力系統中的比例將上升至 85%。這種轉型使電

力系統面臨靈活性需求激增而調節能力不足的挑戰，需要電源技術在靈活性資源整合、協同控制和優化調度等方面發揮核心作用。

■ **靈活性資源整合**：新型電力系統需要統籌 " 源網荷儲 " 全環節靈活性資源。電源技術使分散式電源 (DG)、儲能設備和可控負載通過逆變器接入電網，大大增加了電網控制和運行模式的靈活性。根據國際可再生能源署 (IRENA) 報告，到 2050 年全球需新增 12TW 可再生能源裝機，其中風電和光伏占比超過 80%。氫能儲能與燃料電池技術為長時儲能提供解決方案，燃料電池發電效率達 60%，結合 CO₂ 捕獲技術可實現近零排放，適用於社區、醫院和學校等大型公共場所的熱電聯供。虛擬電廠 (VPP) 技術聚合分散式資源形成可調度單元，參與能量與輔助服務市場，美國特斯拉在澳大利亞建設的 Hornsdale VPP 通過鋰電池儲能提供頻率調節服務，將電網穩定性提升 30%。

表：新型電力系統中電源技術的應用場景 編輯部整理

技術領域	核心挑戰	電源技術解決方案	應用案例
高比例可再生能源接入	波動性、間歇性	寬禁帶半導體逆變器、虛擬同步機	國家電網張北風光儲輸示範工程
系統靈活性提升	調頻、調峰資源不足	分散式儲能聚合、需求回應	特斯拉 Hornsdale 儲能電池
分散式資源協同	海量設備管控複雜	分散式協同控制演算法、區塊鏈	德國 PeerEnergy 點對點交易
孤島運行保障	供電可靠性要求高	混合儲能系統、MPC 優化	南海島嶼微電網專案

■協同控制技術：分散式協同控制演算法正逐步取代傳統集中式控制，避免單點故障並提高系統可靠性。事件觸發一致性演算法僅在本地狀態變化超過閾值時才通信，減少 90% 以上的通信流量。微電網採用分層控制架構：一次控制（下垂控制）實現功率自主分配；二次控制消除電壓和頻率偏差；三次控制優化經濟運行。國家電網“雲邊協同”系統將雲計算與邊緣計算結合，實現百萬級分散式資源的協同調度。孤島微電網能量管理系統通過模型預測控制（MPC）和隨機優化應對可再生能源的波動性，保證系統的穩定運行，同時降低儲能成本，提高能源利用效率。

■不確定性調度：高比例可再生能源帶來顯著的不確定性，電力系統調度模型從確定性

向隨機性和魯棒性優化轉變。Wait-and-See 模型將不確定性視為“先觀察後決策”，適合預測精度高的場景；Here-and-Now 模型則考慮即時決策風險，採用隨機規劃或魯棒優化方法。深度強化學習演算法通過類比數十萬種場景訓練調度策略，在光伏出力預測誤差達 30% 時仍能保持系統穩定。區塊鏈技術實現分散式能源的點對點交易，德國 PeerEnergy 專案允許光伏使用者直接交易綠電，減少中間環節成本。

■輔助服務市場創新：傳統以火電為主的輔助服務模式無法滿足新型電力系統需求，英國國家電網開發了增強型頻率回應產品（EFR），要求 200ms 內滿功率回應。快速頻率回應（RFR）解決系統低慣性問題，儲能電池可在 1 秒內實現充放電狀態切換。

向下調節服務應對光伏午間出力過剩，澳大利亞市場引入“負電價”機制激勵靈活負荷消納綠電。電源技術使電動汽車、智慧家電等柔性負荷參與需求回應，中國冀北電網通過智慧電錶實現分鐘級負荷調控，2023 年調節能力達 1.2GW。

未來 5-10 年，新型電力系統將呈現“雙高”特徵（高比例可再生能源、高比例電力電子設備），電源技術需在以下方向突破：固態變壓器實現 10kV/1MVA 智慧電壓轉換；AI 演算法實現日前-日內-即時的多時間尺度優化調度；“雲邊端”協同架構整合千萬級分散式資源。隨著《能源轉型之電網靈活性》報告的實施，全球電力系統將逐步適應 85% 可再生能源占比的極端場景，電源技術作為關鍵使能技術，其創新進展將直接決定能源轉型的成敗。CTA

下期預告

6G、衛星通信