

電動農機技術——「電池管理系統」

作物環境科 副研究員 吳有恒 分機 343

前言

隨著全球淨零排放與智慧農業的快速發展，電動農機已成為農業機械的重要發展方向。相較於傳統燃油農機，電動農機具有低污染、低噪音、高能源效率及易於智慧化控制等優勢（吳與李, 2024）。而鋰離子電池因具備高能量密度、低自放電率及可重複充放電等特性，已成為電動農機主要的動力來源。然而，由於農業作業環境普遍不佳，具有高溫、高濕及高粉塵特性，加以農機通常需要長時間且在高變動負荷下作業，容易造成電池性能衰退與安全風險，因此如何有效管理電池組，成為電動農機技術發展的核心課題。在電動農機中，「電池管理系統」（Battery Management System, BMS）並非僅是單純的監控元件，而是維持整個動力系統穩定運作的核心。BMS可即時監測電池的電壓、電流、溫度與荷電狀態（State of Charge, SOC），並執行過充、過放、過熱保護及電池均衡控制，不僅能提升電池使用效率與續航能力，也能延長電池壽命並確保動力系統的安全運作。

BMS組成與功能

BMS是鋰離子電池系統中的核心控制單元，其主要功能為監測、分析、保護與控制電池組運作，確保電池在安全、穩定與高效的條件下運作。由於鋰離子電池對於電壓、電流及溫度變化相當敏感，因此BMS需即時掌握各項電池資訊，並透過

演算法與控制邏輯進行動態運算與管理。BMS核心控制邏輯主要分為單體電池參數量測、核心處理器、功能狀態決策、執行與控制輸出及資料記錄與通訊等五大部分（圖1）。

1. 單體電池參數量測

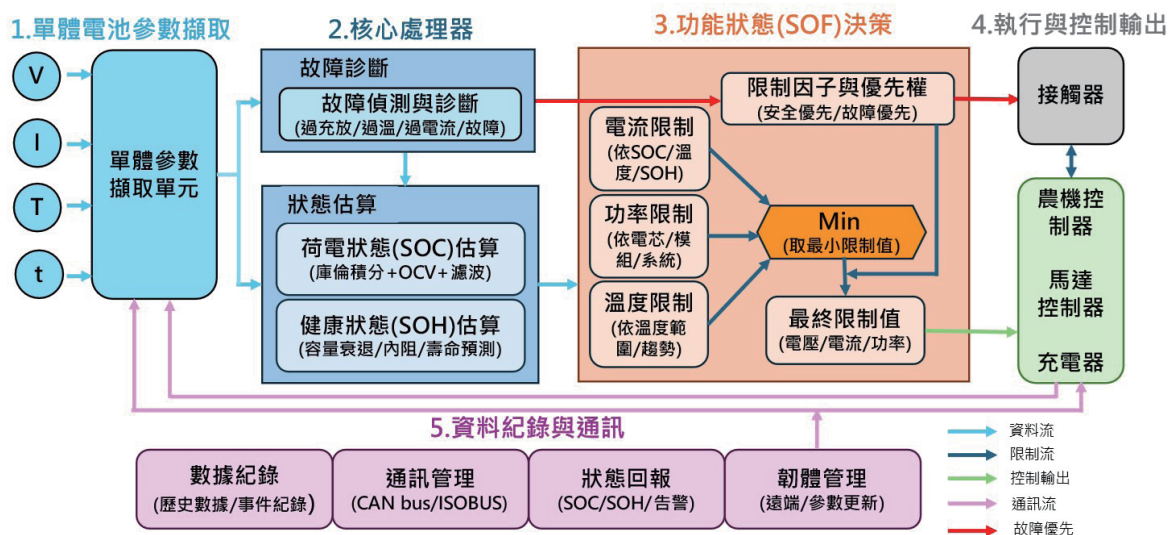
單體電池參數量測的目的在即時取得電池組內各單體電池的運行資訊，以作為後續判斷與控制的基礎。單體電池量測項目主要包含電壓、電流、溫度以及時間。其中，電壓可反映單體電池的荷電狀態與健康程度；電流則用於計算充放電能量與功率需求；溫度監測可避免高溫造成熱失控；而時間資訊則用於庫倫積分法（Coulomb Counting）與充放電歷程的分析。

在實際硬體架構中，每個單體都會配置單體參數擷取單元，透過感測器將感測訊號傳至BMS核心控制器。由於各單體間可能因製造誤差或環境因素而產生不一致現象，因此BMS必須監測每個單體，這也是鋰離子電池安全管理中最重要基礎工作。

2. 核心處理器

BMS核心處理器為整個「電池管理系統」的控制中心，負責接收各類感測資料、執行運算分析、判斷電池狀態以及輸出控制指令。其主要功能在於整合單體電池的電壓、電流、溫度與時間等資訊，透過內建演算法進行狀態估算與安全管理，

電動農機電池管理系統核心控制邏輯流程圖



▲ 圖 1. 電動農機「電池管理系統」核心控制邏輯流程圖。

確保鋰離子電池在安全範圍內穩定運作。由於電動農機在實際作業時常面臨長時間且高變動負荷運轉，以及戶外高溫與振動環境，因此BMS核心處理器必須具備快速與可靠的即時運算能力，以維持動力系統的穩定作業。

在BMS核心處理器中，最重要的功能為狀態估算。由於鋰離子電池無法直接量測剩餘電量，因此需透過演算法估算SOC。SOC顯示的是目前電池剩餘能量的百分比，BMS通常會利用庫倫計算法、開路電壓法 (Open Circuit Voltage, OCV) 或卡爾曼濾波 (Kalman Filter) 等方式 (Hannan *et al.*, 2017)，綜合分析充放電電流與電壓變化，藉以推算電池剩餘能量。另一個功能狀態是電池健康狀態 (State of Health, SOH)，用於評估電池的老化程度，是以電池容量衰退、內部阻抗增加或循環壽命變化作為判斷依據。

隨著電池長時間充放電，其化學材料會逐漸劣化，造成可用容量下降與輸出能力減弱。BMS透過長期監測與數據分析，可推估電池剩餘壽命，協助使用者進行維護管理與電池更換規劃，進而降低電動農機的維修成本與停機風險。

故障診斷是BMS核心處理器的另一個重要功能。BMS會持續監控電池運作狀態，當系統發現異常，如過充、過放、過電流、過溫、短路或感測器失效時，BMS會啟動保護機制，透過限制輸出功率、降低充放電電流或切斷高壓接觸器等方式，以避免電池受損或熱失控。

3. 功能狀態 (State of Function, SOF) 決策

SOF決策是BMS的重要控制機制，其主要目的在評估當前狀態下電池能安全提供的輸出能力，包括最大允許電流、輸出功率以及充放電能力。由於鋰離子電池的

輸出能力會受到剩餘電量、溫度、老化程度與單體一致性等因素影響，因此BMS必須透過SOF模組即時分析電池狀態，並動態調整輸出限制。

SOF決策模式是在整合各項限制條件後，判斷目前電池系統所允許的最大安全輸出。BMS會依據SOC判斷電池剩餘電量，當電量過低，系統會限制放電電流，以避免過放造成電池的損壞。如在電動農機長時間作業後，若SOC已位於低電量區，BMS便會降低馬達輸出功率或限制高速運轉，以保護電池。

溫度限制也是SOF的重要判斷依據。鋰離子電池在高溫環境下容易劣化，甚至可能引發熱失控；而在低溫環境下，電池內阻會增加，輸出能力下降。因此BMS需持續監控電池溫度，當溫度超過安全範圍，系統會自動降低電流與功率的輸出。如在夏季高溫的農田作業時，若電池溫度持續升高，BMS將會降低馬達負載或限制快速充電，以避免系統過熱。

SOH亦為SOF決策的重要參數。隨著電池使用時間增加，其容量會逐漸衰退、內阻上升，可承受最大電流能力下降。當BMS偵測到電池老化程度提高時，便會降低系統允許輸出的最大功率與電流，以減少高負載對老化電池造成的損害。此功能可有效延長電池壽命，並避免因老化造成輸出不穩定或異常發熱。

除了SOC、溫度與SOH外，單體電壓限制也是SOF的重要控制條件。由於電池組是由多顆單體串聯而成，若其中一顆單體電壓異常偏高或偏低，即可能造成整體

系統的風險。因此BMS需持續監測每顆單體的電壓狀態，當單體接近過充或過放電壓時，即使整組電池仍有足夠容量，系統仍會限制充放電能力，以保護最弱單體，避免電池失衡惡化。

在完成各項限制條件分析後，SOF模組會執行最小值選擇邏輯 (Guo *et al.*, 2023)，也就是將SOC限制、溫度限制、SOH限制以及單體限制等條件進行比較，選擇其中最嚴格的限制值作為最終輸出條件。如某一時刻SOC允許輸出100 A、溫度允許80 A、SOH允許90 A，而單體電壓僅允許60 A，則系統最終將設定輸出限制為60 A。透過此最小值選擇機制，BMS可確保電池始終運作於最安全的範圍內，避免任何單一因素超出安全限制。

此外，SOF模組中亦包含限制因子與優先權邏輯功能。當系統性能需求與安全保護發生衝突時，BMS會優先考慮安全性。如操作人員可能希望電動農機維持高輸出作業，但若系統判斷電池溫度過高或單體異常時，BMS會強制降低功率輸出。

4. 執行與控制輸出

在BMS完成電池SOC、SOH、SOF狀態估算與安全限制判斷後，系統便會進入執行與控制輸出階段。此階段的目的是將BMS分析後的結果轉換為實際控制命令，並傳送至動力系統，使電池系統、動力系統與充電系統能協調運作。

在馬達控制器控制方面，BMS會根據目前電池狀態，提供馬達控制器最大允許功率、最大放電電流以及扭矩限制等控制參數。馬達控制器則依據BMS所提供的限

制值，調整馬達輸出能力。如當電池SOC較低時，BMS會限制最大放電電流，以避免電池過放；當電池溫度過高時，系統則會降低馬達輸出功率與扭矩，以減少電池負載與發熱。此種動態功率管理模式，不僅可保護鋰電池安全，也能避免因過大電流導致電壓驟降或電池快速衰退。在電動農機的應用中，由於田間作業負載變化大，例如爬坡、耕耘或搬運作業瞬間需要高功率輸出，都需要BMS與馬達控制器間即時的調控。

在充電器控制部分，BMS負責監控並管理整個充電過程，以確保電池在安全條件下完成充電。BMS會依據電池的SOC、溫度及單體電壓狀態，控制充電電流、充電電壓以及充電截止條件。當電池電量較低時，系統通常採用較大的定電流（Constant Current, CC）進行快速充電；當電壓逐漸接近上限時，則轉換為定電壓（Constant Voltage, CV）模式，逐步降低充電電流，以避免過充造成電池的損壞。此種CC-CV充電策略為目前鋰離子電池最常見且最安全的充電方式。此外，若BMS偵測到電池溫度異常升高、單體電壓不平衡或充電設備異常時，也會立即降低充電速率，甚至中止充電，以避免危險。

接觸器是高壓電池系統中的主電源開關，負責控制高壓電源是否與動力系統連接。在系統啟動時，BMS會先利用預充電電阻緩慢為控制器內部電容充電，以避免瞬間大電流衝擊造成元件損壞。如當系統發生過電流、短路、絕緣異常或過溫等重

大故障時，BMS會立即斷開接觸器，切斷高壓電源輸出，防止設備損壞。

5. 資料記錄與通訊

除了電池監測與控制功能外，BMS亦負責資料記錄與通訊管理，其目的在建立完整的電池運行資訊，使系統不僅能即時控制電池，也能進行後續分析、故障追蹤、遠端監控與智慧化管理。

在數據記錄方面，BMS會紀錄電池於運行過程中的各項資訊，包括充放電歷史、溫度變化、故障事件、循環次數、最大與最小電壓、最大電流以及異常警報紀錄等。這些資料會被儲存在BMS內部記憶體或外部的儲存裝置中，形成完整的電池運行履歷。透過長期資料的累積，系統可分析電池的使用狀況與劣化趨勢，進而作為後續管理與維修的依據。

電池的充放電歷史可反映電池的實際使用強度與能源消耗情形，是SOC與SOH估算修正的重要資料。溫度變化紀錄則可協助分析電池是否長時間處於高溫運作環境，以判斷是否存在散熱不足或過載問題。故障事件記錄能保存過充、過放、過溫、短路或感測器異常等歷史資訊，維修人員可據此快速追蹤問題來源，提高電池故障診斷效率。BMS所記錄的循環次數是評估鋰離子電池壽命的重要指標。由於鋰電池容量會隨充放電循環次數逐漸衰退，因此系統可透過循環數據推估剩餘使用壽命，協助使用者規劃電池更換時機。

在通訊管理上，BMS需與農機內外部設備進行即時資料交換，以確保整個電動系統協同運作。控制器區域網路

(Controller Area Network, CAN bus) 與 ISOBUS (用於曳引機與農機具間的通訊協定) 是目前汽車與農機常見的通訊協定 (ISO, 2018) 。

在電動農機應用上，BMS會與車輛控制器 (Vehicle Control Unit, VCU)、馬達控制器 (Motor Control Unit, MCU)、充電器、人機介面顯示器以及雲端監控平台等進行通訊。BMS會將SOC、SOH與功率限制資訊傳送至VCU，以調整動力策略；也會向馬達控制器提供最大允許電流與扭矩限制，避免電池超載運作。同時，BMS也控制充電器的充電電流與截止條件，確保充電的安全。

在韌體管理方面，BMS多具備遠端更新能力。系統可透過無線網路進行韌體升級，進行控制參數、保護邏輯、SOC/SOH演算法及故障診斷策略的更新。透過韌體更新，不僅可快速修正系統問題，也能持續優化BMS性能與安全性，由於更新時無需拆卸設備或更換控制器，也大幅提升系統維護效率與後續擴充能力。

結論

BMS不僅是電動農機的監測元件，更是確保動力系統在農業嚴苛環境下穩定運作的核心大腦。BMS透過即時量測電壓、電流與溫度等參數，運用SOC與SOH估算電池狀態，並結合SOF決策機制與最小值選擇邏輯，在安全優先的原則下動態調整馬達、充電器與接觸器的輸出限制。此

外，藉由數據紀錄、CAN Bus通訊及遠端韌體更新，BMS可智慧化進行管理並大幅降低停機風險，有效提升電池的使用效率與壽命，對於電動農機技術的發展有關鍵性的影響。

參考文獻

1. 吳有恒、李汪盛 (編)。2024。電動農機研發及技術應用研討會論文集。農業部桃園區農業改良場。
2. Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., and Mohamed, A. 2017. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 78: 834–854.
3. Guo, R., Hu, C., and Shen, W. 2023. An electric vehicle-oriented approach for battery multi-constraint state of power estimation under constant power operations. IEEE Transactions on Vehicular Technology 73 (3) : 3300–3310.
4. International Organization for Standardization. 2018. Tractors and machinery for agriculture and forestry—Serial control and communications data network (ISO Standard No. 11783) .