

VALUTAZIONE DELL’AFFIDABILITÀ DI CONVERTITORI ISOLATI AD ALTA POTENZA BASATI SU DISPOSITIVI WIDE-BANDGAP

J.Y. Geng, R. Mandrioli, M. Ricco

Dipartimento di Ingegneria dell’Energia Elettrica e dell’Informazione - DEI
Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, Bologna

La ricarica rapida dei veicoli elettrici (EV) è diventata sempre più popolare negli ultimi anni a causa della crescente adozione degli EV. Il convertitore dual-active-bridge (DAB) è emerso come un'area di interesse e focus significativo nell'applicazione della ricarica rapida dei EV grazie ai vantaggi dell'isolamento galvanico, della commutazione soft, dell'elevata potenza e della facile espansione della capacità. Tuttavia, i componenti elettronici del DAB, in particolare i dispositivi di commutazione, che sono tra i componenti più sensibili ai guasti in un sistema elettronico di potenza, sono ancora invariabilmente soggetti a elevati livelli di tensione e corrente, poiché i sistemi di ricarica rapida per EV attualmente disponibili richiedono livelli di potenza fino a 350 kW e tensioni di uscita che raggiungono gli 800 V [1], rendendo i dispositivi elettronici più suscettibili a danni fisici e comportando costi maggiori per garanzia e manutenzione. Pertanto, per garantire che il sistema di alimentazione abbia un basso tasso di guasti, è necessario prevederne la durata e valutarne l'affidabilità durante la fase di progettazione [2].

Oggi, la previsione della durata di vita basata sul profilo di missione è uno dei metodi più interessanti per valutare le prestazioni di affidabilità a livello di componente e di sistema. Si tratta di una procedura chiave per tradurre il profilo di missione in un profilo di temperatura mediante l'utilizzo di un modello elettrotermico che comprende sia il modello di perdita di potenza che la rete termica a parametri concentrati. Successivamente, la stima della durata di vita e dell'affidabilità può essere effettuata in modo statistico, secondo le fasi della progettazione per l'affidabilità come mostrato in Figura 1 [3]. Diversi metodi analitici come l'algoritmo di conteggio Rainflow, il metodo Monte Carlo, l'analisi della distribuzione di Weibull e l'analisi dei blocchi di affidabilità possono essere utilizzati per stimare l'affidabilità a livello di sistema.

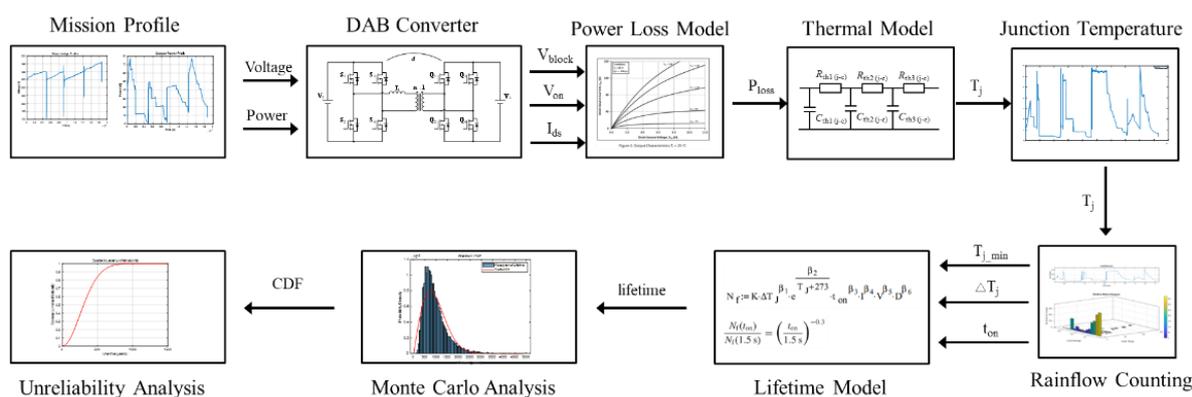


Figura. 1 Schema a blocchi del processo di valutazione dell'affidabilità dei dispositivi di potenza.

Per il sistema di ricarica ad alta potenza per veicoli elettrici, i convertitori DAB modulari sono ampiamente utilizzati per ridurre lo stress di corrente dei componenti. Durante i processi di ricarica reali, i requisiti di potenza variano tra i diversi veicoli elettrici, pertanto le strategie di allocazione della potenza tra i moduli nelle configurazioni modulari sono fondamentali. Vengono studiate l'affidabilità e l'efficienza di diverse strategie di condivisione della potenza con la tecnica di

modulazione a fase singola (SPS) per convertitori DAB modulari. Le strategie includono la condivisione uniforme della potenza, il distacco del modulo orientato alla massima potenza con e senza rotazione e il distacco del modulo orientato all'efficienza con e senza rotazione. Per le strategie di rotazione, viene anche studiato l'impatto delle diverse frequenze di rotazione [4,5].

I risultati indicano che il distacco dei moduli orientato all'efficienza può migliorare sia l'affidabilità che l'efficienza del sistema complessivo. Mentre il distacco dei moduli rotanti migliora l'efficienza, l'integrazione di una frequenza di rotazione appropriata ne aumenta ulteriormente l'affidabilità. Oltre all'SPS, altre tecniche di modulazione come l'Extended Phase Shift (EPS) e il Dual Phase Shift (DPS) offrono un ulteriore grado di libertà di controllo. Questa maggiore libertà consente l'ottimizzazione dei rapporti di sfasamento interno ed esterno, riducendo efficacemente la potenza di circolazione portando a una maggiore efficienza complessiva. Tuttavia, l'impatto di queste tecniche di modulazione sull'affidabilità dei componenti non è stato ancora studiato a fondo. Per affrontare questo problema, vengono analizzate le prestazioni di affidabilità dei dispositivi di commutazione in SPS, EPS e DPS con potenza di riflusso minima [6].

I risultati rivelano che la modulazione SPS supera EPS e DPS in termini di affidabilità in tutte le strategie, grazie alle sue superiori prestazioni termiche. EPS e DPS, invece, presentano una minore affidabilità a causa dell'aumento dello stress termico, in particolare in condizioni operative di media e alta potenza. La strategia di condivisione della potenza rotante dimostra il potenziale per migliorare il bilanciamento del carico, incrementando l'affidabilità complessiva del sistema. Per EPS e DPS, i valori di sfasamento possono essere determinati anche utilizzando la corrente di picco di minima e la corrente RMS minima. I diversi metodi portano a risultati variabili in termini di efficienza e affidabilità. Pertanto, la ricerca futura si concentrerà sull'analisi dei compromessi tra efficienza e affidabilità con queste tecniche di modulazione e strategie di condivisione della potenza, al fine di trovare la modulazione ottimale per le configurazioni DAB modulari.

Referenze

- [1] K. Drobnic, G. Grandi, M. Hammami, R. Mandrioli, M. Ricco, A. Viatkin, and M. Vujacic, "An output ripple-free fast charger for electric vehicles based on grid-tied modular three-phase interleaved converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 6102–6114, 2019.
- [2] J. Karunarathna, U. Madawala, C. Baguley, F. Blaabjerg and M. Sandelic, "Reliability Analysis of Fast Electric Vehicle Charging Systems," *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia)*, Singapore, Singapore, 2021, pp. 1607-1612.
- [3] J. He, A. Sangwongwanich, Y. Yang and F. Iannuzzo, "Lifetime Evaluation of Three-Level Inverters for 1500-V Photovoltaic Systems," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 4285-4298, Aug. 2021.
- [4] M. A. Alharbi, A. M. Alcaide, M. Dahidah, and et al., "Rotating phase shedding for interleaved dc-dc converter based EVs fast dc chargers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 2, pp. 1901–1909, 2023.
- [5] J. Geng, R. Mandrioli, A. Sangwongwanich, and M. Ricco, "Impacts of SPS, DPS, and EPS Modulations on the Reliability of Modular DAB EV Chargers," *2025 IEEE 19th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Antalya, Turkey, 2025, pp. 1-6.
- [6] J. Geng, R. Mandrioli, A. Sangwongwanich, and M. Ricco, "Impacts of Reliability-Oriented Phase Shedding in Modular DAB EV Charging," *2025 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo + Electric Aircraft Technologies Symposium (ITEC + EATS 2025)*, Anaheim, CA, USA, 2025, pp. 1-6.