

Fonte immagini: Vitesco, ale

Partner: © A&W Verlag AG / SVBA-ASETA-ASITA / AGVS/UPSA / Andreas Lerch

Sponsor: **DERENDINGER**

Gli inverter sono prodotti da diversi grandi fornitori come BorgWarner, Bosch, Denso, Vitesco, ecc. Poiché ogni veicolo ibrido o BEV necessita di un inverter, questi vengono prodotti in grandi quantità. Dato che si tratta di un segmento di mercato redditizio, i vari produttori cercano di superarsi a vicenda in termini di qualità e di rendersi il più attrattivi possibile in termini di prezzo.

La richiesta di una maggiore autonomia da parte dei clienti e gli sviluppi nel settore delle batterie hanno spinto le tensioni di alimentazione fino a 800 V. Per queste tensioni, sono stati scoperti nuovi materiali semiconduttori con proprietà migliori rispetto al silicio.

In definitiva, i progettisti devono vigilare sull'intero sistema di propulsione, comprendente batteria, inverter e motore. Nell'elettromobilità, non è necessariamente vero che rendimenti individuali più bassi si traducano sempre in una migliore efficienza complessiva. Questo aspetto viene precisamente determinato dall'inverter, dando inizio alla ricerca del miglior compromesso.

## Perdite di energia

Sebbene il 75% delle perdite di un BEV siano attribuibili al veicolo stesso, è necessario sviluppare miglioramenti laddove esiste un potenziale, come nel caso dei veicoli alimentati da motori a combustione interna. Nel 2020, Vitesco è riuscita a ridurre le perdite dell'inverter del 56% passando dall'IGBT al silicio al MOSFET al carburo di silicio (SiC), risparmiando così circa il 3% di energia nel ciclo WLTP. Riducendo le perdite, è possibile aumentare l'autonomia mantenendo invariata la capacità della batteria, oppure riducendo le dimensioni della batteria mantenendo invariata l'autonomia. Questo consente peraltro di ridurre i costi.

Negli ultimi anni sono stati compiuti grandi progressi nello sviluppo di materiali semiconduttori, che presentano vantaggi per alcuni tipi di applicazioni. I transistor SiC sono prevalentemente impiegati per tensioni superiori a 400 V, poiché a tensioni più elevate le perdite degli IGBT-Si risulterebbero eccessive. Tali perdite si suddividono in perdite di conduzione e di commutazione.

Le perdite di conduzione si riferiscono all'energia che si perde quando il transistor viene commutato.

$$E_{\text{persa}} = \Delta U \cdot I \cdot t$$

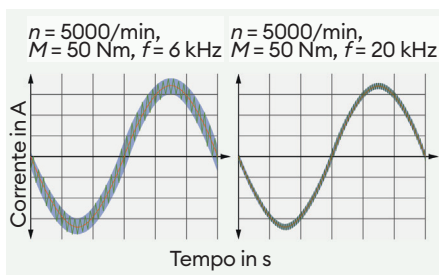


Fig. 2: frequenze più elevate consentono di modellare con maggiore precisione l'onda sinusoidale.

La perdita di tensione nel canale di conduzione del MOSFET è definita  $\Delta U$ .

Le perdite del circuito sono correlate all'incremento della curva della corrente. Non è di fatto possibile che la corrente aumenti da 0 a 1000 A, ad esempio, senza alcun ritardo. Il ritardo è nell'ordine dei nanosecondi (ns). Durante questo intervallo di tempo, l'energia elettrica viene convertita in energia calorica. Aumentando la frequenza di commutazione, tali perdite aumentano linearmente. Tuttavia, frequenze di commutazione più elevate consentono una migliore mappatura della curva sinusoidale della corrente.

Sono stati apportati miglioramenti anche alla progettazione del circuito stampato, ottenendo una bassa induttanza di dispersione. La velocità di commutazione è ulteriormente migliorata grazie allo smorzamento delle oscillazioni indesiderate tramite l'implementazione di circuiti speciali.

## Frequenze di commutazione variabili

Per l'alimentazione trifase di un motore a corrente alternata, l'esatta mappatura della forma sinusoidale è cruciale. Solo quando lo sfasamento è esattamente di  $120^\circ$  e le curve non presentano angoli o spigoli, la somma delle tre tensioni di fase sarà nulla in qualsiasi punto. Tuttavia, se le tensioni non rispecchiano esattamente la forma d'onda sinusoidale, i campi magnetici associati non seguiranno un andamento sinusoidale, generando vibrazioni e rumori. Ciò può portare a una riduzione dell'efficienza complessiva del motore. La figura 2 evidenzia le differenze nella forma d'onda a frequenze di commutazione di 6 kHz e 20 kHz.

Maggiore è la frequenza di commutazione, migliore è l'efficienza del motore, ma peggiore è l'efficienza dell'elettronica di potenza, poiché i semiconduttori di potenza devono commutare più frequentemente. Ciò è mostrato dalle curve della figura 3. Le perdite nell'elettronica di potenza aumentano linearmente con la frequenza, mentre le perdite nel motore diminuiscono significativamente fino a una frequenza di commutazione di 16 kHz. Nel diagramma, il punto a 6 kHz (A) per l'elettronica di potenza e a 20 kHz (B) per il motore è assunto pari a zero. Questo significa che è necessario trovare un compromesso o regolare la frequenza di commutazione durante il funzionamento.

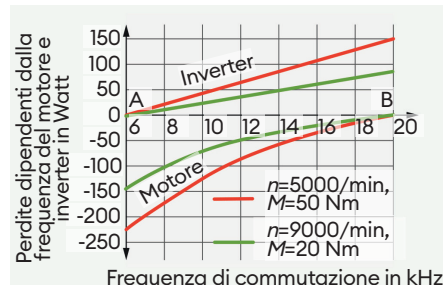


Fig. 3: perdite misurate in relazione ai punti di riferimento A (inverter) e B (motore).

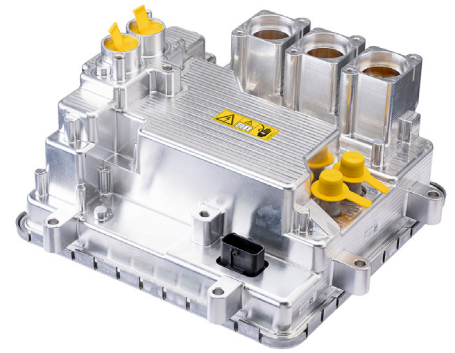


Fig. 1: l'inverter in tecnologia SiC presentato da Vitesco nel 2020.

L'efficienza è altresì influenzata dalla temperatura e dalle coppie richieste. Pertanto, un'ottimizzazione tridimensionale o multidimensionale della frequenza di commutazione (considerando velocità, coppia, temperatura, ecc.) sarebbe ideale per massimizzare le prestazioni del sistema. Tuttavia, i costi di sviluppo, programmazione e archiviazione sarebbero stati maggiori e il prodotto più costoso. Vitesco ha quindi optato per 4 frequenze di 6, 12, 16 e 20 kHz nella mappa operativa motorizzata (fig. 4). La mappa comprende la coppia erogata rispetto alla velocità in modalità di guida e di recupero. I punti grigi indicano i punti di funzionamento durante il ciclo WLTP.

## SiC contro Si

Oltre all'efficienza, i costi giocano sempre un ruolo importante nel processo decisionale della costruzione di un veicolo. Per il momento, i transistor Si-IGBT verranno utilizzati per tensioni inferiori a 400 V. Sono meno efficienti e hanno tempi di commutazione più lunghi, ma sono più economici dei transistor SiC. Questo li rende al momento imbattibili nel settore dei veicoli elettrici, sensibile ai prezzi. Poiché i veicoli elettrici a batteria (BEV) risultano ancora fondamentalmente troppo costosi, i MOSFET SiC non sono (ancora) implementati nei veicoli più piccoli. Questi richiedono infatti controlli da parte di circuiti speciali per consentire commutazioni molto rapide, contribuendo così a un ulteriore aumento dei costi. Ciò significa che nella tecnologia delle trazioni alternative non vengono utilizzate solo le soluzioni migliori, ma talvolta anche quelle più convenienti.

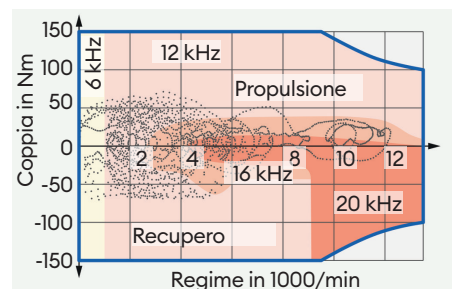


Fig. 4: mappa con i punti di funzionamento WLTP e le frequenze di commutazione selezionate.