
AZIONAMENTI ABB

Guida tecnica n° 8

Frenatura elettromeccanica



Frenatura elettromeccanica

Gru, ascensori, centrifughe, nastri trasportatori per cave e banchi prova sono esempi tipici di applicazioni con frenatura. La scelta della soluzione di frenatura ottimale è dettata da numerosi fattori, fra cui l'efficienza del sistema, l'ingombro e la complessità dell'installazione, i costi di investimento e i consumi energetici.

Sommario

04	Introduzione
04	Generalità
05	Mappa degli azionamenti in base alla velocità e alla coppia
06	Valutazione della potenza di frenatura
06	Principi dimensionali generali per la frenatura elettromeccanica
07	Fondamenti della descrizione del carico
07	Coppia costante e coppia quadratica
07	Valutazione della coppia e della potenza di frenatura
11	Riepilogo e conclusioni
12	Soluzioni di frenatura elettromeccanica negli azionamenti
12	Frenatura con ottimizzazione del flusso del motore
13	Chopper e resistenza di frenatura
13	La capacità di accumulo di energia degli azionamenti
14	Principio di funzionamento del chopper di frenatura
16	Configurazione di ponti di tiristori
17	Raddrizzatore rigenerativo
18	Tecnologia a matrice
19	Unità di frenatura rigenerativa
20	Configurazione del ponte IGBT
20	Principi generali delle unità di rigenerazione basate su IGBT
20	Rigenerazione basata su IGBT: obiettivi di controllo
21	Controllo attivo degli IGBT per ridurre il contenuto di armoniche
22	Dimensionamento di un'unità di rigenerazione IGBT
23	Common DC bus
25	Valutazione dei costi dei diversi metodi di frenatura elettromeccanica per l'intero ciclo di vita
25	Calcolo del costo diretto dell'energia
25	Valutazione del costo dell'investimento
26	Calcolo del costo per l'intero ciclo di vita
26	Caso 1 – Frenatura occasionale
27	Caso 2 – Applicazione per gru
28	Caso 3 – Applicazione per centrifuga
29	Confronto fra diverse tecnologie di frenatura
30	Simboli e definizioni

Introduzione

Generalità

La presente guida, che si aggiunge alla serie di guide tecniche ABB, descrive le possibili soluzioni pratiche atte a ridurre l'energia immagazzinata, riutilizzandola come energia elettrica. La guida si propone di fornire alcune indicazioni pratiche relativamente alle diverse soluzioni di frenatura.



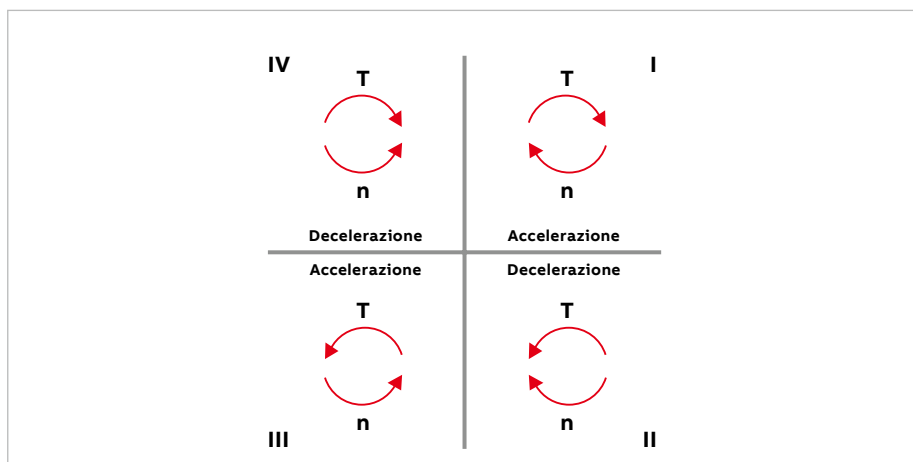


Figura 1.1 Mappa degli azionamenti in base alla velocità e alla coppia.

Mappa degli azionamenti in base alla velocità e alla coppia

Gli azionamenti possono essere suddivisi in tre categorie principali, in funzione della velocità e della coppia. Il sistema di azionamento in c.a. più diffuso consiste in un'applicazione a un unico quadrante in cui velocità e coppia hanno sempre la stessa direzione e, pertanto, il flusso di potenza (che equivale alla velocità moltiplicata per la coppia) va dall'inverter al processo. Si tratta normalmente di applicazioni per pompe e ventilatori con comportamento quadratico della coppia di carico, spesso definite applicazioni a coppia variabile. Alcune applicazioni a un unico quadrante, come gli estrusori o i nastri trasportatori, sono applicazioni a coppia costante in cui la coppia di carico non varia automaticamente al variare della velocità.

La seconda categoria consiste nelle applicazioni a due quadranti, dove la direzione di rotazione rimane invariata, ma può cambiare la direzione della coppia, e pertanto il flusso di potenza può andare sia dall'azionamento al motore che viceversa. L'azionamento a un unico quadrante può trasformarsi in un sistema a due quadranti, ad esempio qualora un ventilatore venga rallentato a una velocità superiore a quella che si otterrebbe naturalmente con le perdite meccaniche. Inoltre, in molti settori industriali, l'esigenza di consentire l'arresto di emergenza dei macchinari può richiedere il funzionamento a due quadranti, sebbene il processo di per sé sia di tipo a un unico quadrante.

La terza categoria comprende applicazioni a quattro quadranti, dove la direzione della velocità e della coppia possono cambiare liberamente. Esempi tipici di queste applicazioni sono gli elevatori, i verricelli e le gru, ma numerosi processi meccanici, quali i processi di taglio, piegatura, tessitura e i banchi di prova motore possono richiedere ripetuti cambiamenti di velocità e di coppia. È possibile inoltre citare i processi a un unico quadrante in cui il flusso di potenza avvenga prevalentemente dalla macchina all'inverter, ad esempio negli avvolgitori o nei nastri trasportatori con direzione dall'alto verso il basso.

Si ritiene normalmente che, nell'ottica del risparmio energetico, i motori in c.a. associati a un inverter siano preferibili ai metodi di controllo di tipo meccanico, come le valvole di strozzatura. Tuttavia, oltre a non prestare abbastanza attenzione al fatto che numerosi processi comportano naturalmente un flusso di potenza dal processo all'azionamento, non vengono considerate le modalità per sfruttare questa energia nel modo più economico.

Valutazione della potenza di frenatura

Principi dimensionali generali per la frenatura elettromeccanica

La valutazione della necessità di frenatura inizia dalla meccanica. Normalmente si presenta l'esigenza di frenare un sistema meccanico entro un tempo stabilito, oppure vi sono sottocicli nell'ambito del processo nei quali il motore funziona come generatore a velocità costante o leggermente variabile.

È importante notare che i dispositivi utilizzati per la frenatura elettromeccanica sono dimensionati in base alla potenza di frenatura. La potenza di frenatura meccanica dipende dalla coppia e dalla velocità di frenatura, come risulta dalla formula (2.1). La potenza, che aumenta in modo direttamente proporzionale alla velocità, viene trasferita a un determinato livello di tensione e di corrente. All'aumentare della tensione si riduce il livello di corrente necessario per ottenere la stessa potenza, in base alla formula (2.2). La corrente è la componente principale per calcolare il costo negli azionamenti in c.a. a bassa tensione.

Nella formula (2.2) compare il termine $\cos\phi$. Esso definisce la quantità di corrente utilizzata per magnetizzare il motore. La corrente di magnetizzazione non determina alcuna coppia e pertanto può essere ignorata.

D'altro canto, la corrente di magnetizzazione del motore non deriva dall'alimentazione in c.a. che alimenta il convertitore, e quindi la corrente verso l'inverter è inferiore alla corrente alimentata al motore. Ciò implica che, sul lato alimentazione, il $\cos\phi$ normalmente si avvicina a 1,0. Si noti che nella formula (2.2) si suppone che la conversione dalla potenza in c.c. alla potenza in c.a. non dia luogo a perdite. In realtà si verificano alcune perdite durante la conversione, ma in questo contesto possono essere ignorate.

$$(2.1) \quad P_{\text{mech}} = T * \omega = T * \frac{n}{60} * 2 \pi$$

$$(2.2) \quad P_{\text{electrical}} = U_{\text{DC}} * I_{\text{DC}} = \sqrt{3} * U_{\text{AC}} * I_{\text{AC}} * \cos\phi$$

Fondamenti della descrizione del carico

I carichi tipici possono essere distinti tra carichi a coppia costante e carichi a coppia quadratica. Coppia di carico quadratica significa che la coppia di carico è proporzionale al quadrato della velocità. Significa inoltre che la potenza corrisponde alla velocità elevata al cubo. Nelle applicazioni a coppia costante, la potenza è direttamente proporzionale alla velocità.

Coppia costante e coppia quadratica

Coppia costante:

C: costante

$$(2.3) \quad T_{\text{load}} = C$$

$$(2.4) \quad P_{\text{load}} = T * \omega = C * \omega$$

Coppia quadratica:

$$(2.5) \quad T_{\text{load}} = C * \omega^2$$

$$(2.6) \quad P_{\text{load}} = T * \omega = C * \omega^2 * \omega = C * \omega^3$$

Valutazione della coppia e della potenza di frenatura

In caso di funzionamento a regime (l'accelerazione angolare α è uguale a zero) la coppia del motore deve fare corrispondere la coppia di attrito in maniera proporzionale alla velocità angolare e alla coppia di carico a quella determinata velocità angolare. La coppia e la potenza di frenatura necessarie in relazione al tempo variano in modo cospicuo tra le due tipologie di carico.

$$(2.7) \quad T_{\text{motor}} = -[J * \alpha + \beta * \omega + T_{\text{load}}(\omega)]$$

Iniziamo a considerare il caso in cui il carico sia di tipo a coppia costante e il sistema azionante non sia in grado di generare la coppia di frenatura, e quindi l'azionamento stesso è di tipo a singolo quadrante. Per calcolare il tempo di frenatura necessario è possibile applicare la seguente equazione. Si noti che la formula (2.7) sottolinea che la coppia necessaria per l'accelerazione (o decelerazione), l'attrito e la coppia di carico avvengono in direzione opposta alla coppia del motore.

$$(2.8) \quad 0 = -[J * \alpha + \beta * \omega + T_{\text{load}}(\omega)]$$

In pratica, è difficile definire l'effetto dell'attrito in modo preciso. Supponendo che l'attrito sia uguale a zero, il tempo è calcolato in modo cautelativo.

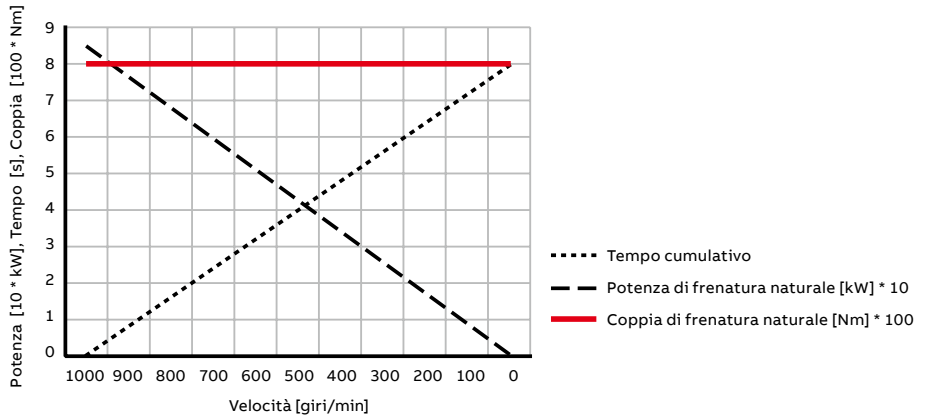


Figura 2.1 Tempo di frenatura cumulativo, potenza di carico di frenatura e coppie in funzione della velocità.

$$(2.9) \quad T_{load}(\omega) = J * \alpha = J * \frac{(\omega_{start} - \omega_{end})}{t} = J * \frac{(n_{start} - n_{end}) * 2 \pi}{t * 60}$$

Risolviendo t si ottiene la formula:

$$(2.10) \quad t = J * \frac{(n_{start} - n_{end}) * 2 \pi}{60 * T_{load}(\omega)}$$

Supponendo che l'inerzia del carico sia pari a 60 kgm^2 e che la coppia del carico sia superiore di 800 Nm all'intera gamma di velocità, se il carico gira a 1.000 giri/min e la coppia del motore è a zero, il carico raggiunge la velocità zero entro il tempo:

$$(2.11) \quad t = J * \frac{(n_{start} - n_{end}) * 2 \pi}{60 * T_{load}(\omega)} = 60 * \frac{(1000 - 0) * 2 \pi}{60 * 800} = 7.85 \text{ s}$$

Questo vale per le applicazioni in cui la coppia di carico rimane costante all'inizio della frenatura. Nel caso in cui la coppia di carico scompare (ad esempio in caso di rottura nel nastro trasportatore) l'energia cinetica dei componenti meccanici non varia, ma la coppia di carico che dovrebbe ridurre la velocità di tali componenti in questo momento non è attiva. In questo caso se il motore non frena la velocità diminuisce solo per effetto dell'attrito meccanico.

Se consideriamo un caso con la stessa inerzia e coppia di carico pari a 1.000 giri/min , ma in cui la coppia di carico vari in maniera quadratica, se la coppia del motore viene forzata a zero, la coppia di carico si riduce in proporzione quadratica alla velocità. Esprimendo il tempo di frenatura cumulativo in funzione della velocità, il tempo naturale di frenatura per raggiungere la velocità inferiore, ad esempio da 200 giri/min a 100 giri/min , risulta molto più elevato rispetto alla frenatura da 1.000 giri/min a 900 giri/min .

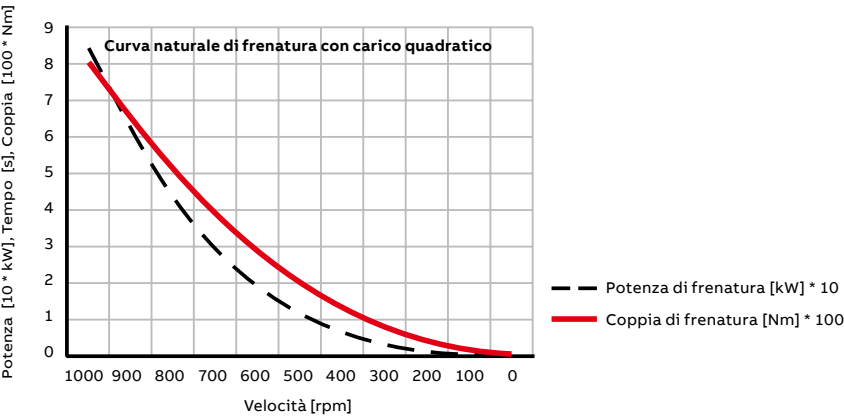


Figura 2.2 Curva naturale di frenatura per un ventilatore da 90 kW con ptenza di carico di frenatura e coppia in funzione della velocità.

È facile tracciare una curva di frenatura naturale in base alla potenza e alla velocità al punto nominale, applicando le formule (2.5) e (2.6).

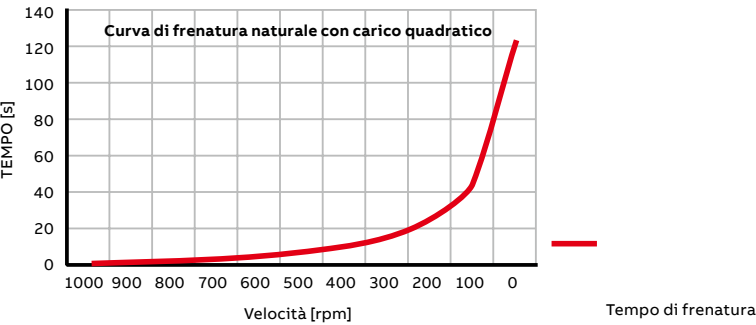


Figura 2.3 Esempio di tempo cumulativo di frenatura per un ventilatore da 90 kW.

Consideriamo ora il caso in cui un sistema meccanico debba essere frenato in un tempo specifico, a partire da una velocità specifica.

Il ventilatore da 90 kW ha un'inerzia di 60 kgm². Il punto di funzionamento nominale del ventilatore è pari a 1.000 giri/min. Il ventilatore deve essere fermato in 20 secondi. L'effetto della frenatura naturale determinata dalle caratteristiche del carico raggiunge il livello massimo all'inizio della frenatura. La massima energia inerziale può essere calcolata con la formula (2.12). La potenza di frenatura media può essere calcolata dividendo l'energia di frenatura per il tempo. Il valore ottenuto è necessariamente molto prudente poiché non si tiene conto delle caratteristiche di carico del ventilatore.

$$(2.12) \quad W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t$$

$$(2.13) \quad P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{1000}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{20} = 16.4 \text{ kW}$$

Se si desidera ottimizzare il dimensionamento del chopper di frenatura per un tempo di frenatura specifico, si consiglia di osservare la figura (2.3). La velocità si riduce rapidamente da 1.000 a 500 giri/min senza ulteriore frenatura. L'effetto di frenatura naturale è massimo all'inizio della frenatura. Ciò dimostra chiaramente come non occorra necessariamente iniziare a frenare il motore con la suddetta potenza di 16 kW. Come risulta dalla figura (2.3), la velocità scende da 1.000 giri/min a 500 giri/min senza ulteriori interventi di frenatura in meno di 10 secondi. A questo punto la coppia di carico non supera il 25% della coppia nominale e l'energia cinetica conservata nel ventilatore non supera il 25% dell'energia a 1.000 giri/min. Se il calcolo effettuato per 1.000 giri/min viene ripetuto per 500 giri/min, è necessaria una potenza di frenatura di circa 8 kW per scendere da 500 giri/min a 0. Come affermato nei precedenti calcoli, anche questo valore è altamente prudente, poiché non si tiene conto della curva di frenatura naturale determinata dalle caratteristiche del carico.

Per sintetizzare, il risultato desiderato a fronte di un tempo di decelerazione di 20 secondi da 1.000 giri/min a 0 giri/min si ottiene facilmente con un chopper di frenatura e con una resistenza dimensionati per 8,2 kW. Impostando il limite di potenza rigenerativa dell'azionamento a 8,2 kW, la potenza di frenatura viene impostata a un livello adeguato.

$$(2.14) \quad W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t$$

$$(2.15) \quad P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 8.2 \text{ kW}$$

Riepilogo e conclusioni

Vi sono due tipologie principali di carico: a coppia costante e a coppia quadratica

Applicazioni a coppia costante:

- Le caratteristiche della coppia di carico non dipendono dalla velocità. La coppia di carico rimane più o meno costante in tutta la gamma di velocità.
- La potenza aumenta linearmente all'aumentare della velocità e viceversa.
- Tipiche applicazioni a coppia costante: gru e nastri trasportatori.

Applicazioni a coppia quadratica:

- L'aumento della coppia di carico è pari al quadrato della velocità.
- All'aumentare della velocità, l'aumento della potenza è pari al cubo della velocità.
- Tipiche applicazioni a coppia quadratica: pompe e ventilatori

Valutazione della potenza frenante:

- Le caratteristiche del carico quadratico comportano una decelerazione naturale rapida, pari al 50-100% delle velocità nominali. Tale caratteristica può essere sfruttata per dimensionare la potenza di frenatura in base alla necessità.
- Con una coppia di carico quadratica, la decelerazione naturale alle basse velocità è principalmente determinata dall'attrito.
- La coppia di carico costante si contraddistingue per la costanza della decelerazione naturale.
- La potenza di frenatura varia in funzione della coppia e della velocità nel punto di funzionamento specificato. Il dimensionamento del chopper di frenatura in base al picco di potenza di frenatura conduce normalmente a un sovradimensionamento.
- La potenza di frenatura non è in funzione della corrente nominale del motore (coppia) o della potenza tale e quale.
- Se la coppia di carico scompare all'inizio della frenatura l'effetto della frenatura naturale è ridotto. Ciò influisce sul dimensionamento del chopper di frenatura.

Soluzioni di frenatura elettromeccanica negli azionamenti

I moderni azionamenti in c.a. consistono in un raddrizzatore in ingresso atto a convertire la tensione in c.a. in tensione in c.c., che viene immagazzinata negli appositi condensatori. L'inverter riconverte la tensione in c.c. in tensione in c.a., che va ad alimentare il motore in c.a. alla frequenza desiderata. La potenza di processo necessaria arriva al motore attraverso il raddrizzatore, il bus in c.c. e l'inverter. Poiché la quantità di energia immagazzinata nei condensatori in c.c. è molto piccola rispetto alla potenza necessaria, il raddrizzatore deve erogare sempre la potenza necessaria al motore più le perdite che si verificano nell'azionamento.

Frenatura con ottimizzazione del flusso del motore

La frenatura con ottimizzazione del flusso è un metodo basato sulle perdite a livello del motore. Quando è necessario frenare, aumentano sia il flusso del motore che la componente di corrente magnetizzante utilizzata dallo stesso. Il controllo del flusso si ottiene facilmente applicando il principio del controllo diretto di coppia o DTC (per ulteriori informazioni in merito al DTC si veda la Guida tecnica N. 1). Mediante il DTC l'inverter è controllato direttamente perché raggiunga i valori di coppia e di flusso necessari al motore. Durante la frenatura con ottimizzazione del flusso, il motore è sottoposto a controllo diretto di coppia, che assicura una frenatura conforme a una rampa di velocità specifica. Questo sistema si differenzia nettamente dalla frenatura con iniezione in c.c. normalmente utilizzata negli azionamenti. Con il metodo dell'iniezione in c.c., la corrente in c.c. viene fornita al motore, cosicché il controllo del flusso del motore si interrompe durante la frenatura. La frenatura con ottimizzazione del flusso del motore basata sul sistema di controllo DTC consente, se necessario, un rapido passaggio del motore dalla potenza frenante alla potenza motrice.

Nella frenatura con ottimizzazione del flusso del motore, l'aumento di corrente significa aumento delle perdite all'interno del motore. La potenza di frenatura pertanto aumenta, sebbene la potenza di effettivamente trasferita verso l'azionamento rimanga invariata. A un maggiore livello di corrente corrisponde un aumento delle perdite a livello delle resistenze del motore. Ad un maggiore valore di resistenza corrisponde una maggiore dissipazione dell'energia di frenatura all'interno del motore. Normalmente, nei motori a bassa potenza (sotto i 5 kW) il valore di resistenza del motore è relativamente elevato a fronte della corrente nominale. La resistenza del motore rispetto alla sua corrente si riduce proporzionalmente alla potenza e alla tensione. In altre parole, il flusso di frenatura si rivela più efficace nei motori a bassa potenza.

I principali vantaggi della frenatura con ottimizzazione del flusso del motore sono:

- Utilizzando il metodo del controllo diretto di coppia non sono necessari componenti aggiuntivi e non vi sono costi supplementari.
- Durante la fase di frenatura il motore è controllato, a differenza della frenatura con iniezione in c.c. normalmente utilizzata negli azionamenti.

I principali svantaggi del flusso di frenatura sono:

- Maggiore sollecitazione termica in corrispondenza del motore se la frenatura si ripete a brevi intervalli.

- La potenza di frenatura è limitata dalle caratteristiche del motore, ad esempio la resistenza.
- Il flusso di frenatura è particolarmente utile nei motori a bassa potenza.

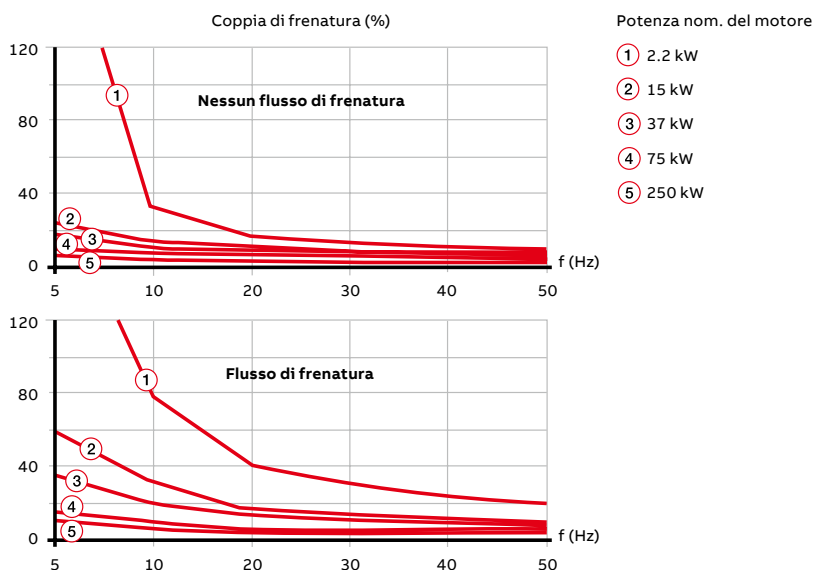


Figura 3.1 Percentuale della coppia di frenatura motore della coppia nominale in funzione della frequenza di uscita.

Chopper e resistenza di frenatura

La capacità di accumulo di energia degli azionamenti

Negli azionamenti standard si utilizza normalmente un raddrizzatore a diodi a 6 o 12 impulsi in grado di trasferire potenza dalla rete in c.a. al bus in c.c., ma non viceversa. Se il flusso di potenza cambia come nelle applicazioni a due o quattro quadranti, la potenza generata dal processo carica i condensatori in c.c. in base alla formula (3.1) e la tensione del bus in c.c. inizia ad aumentare. Negli azionamenti in c.a. la capacitance C è un valore relativamente basso che comporta un rapido aumento della tensione, e i componenti del convertitore di frequenza possono sopportare solo tensioni fino a un determinato livello.

$$(3.1) \quad W = P \cdot t = \frac{C \cdot U_{dc}^2}{2}$$

$$(3.2) \quad U_{dc} = \sqrt{\frac{2 \cdot W}{C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot t}{C}}$$

Per impedire un aumento eccessivo della tensione del bus in c.c. sono possibili due opzioni: lo stesso inverter impedisce il flusso di potenza dal processo al convertitore di frequenza. Ciò è possibile limitando la coppia di frenatura al fine di mantenere un livello costante di tensione nel bus in c.c. Questa funzione è denominata controllo di sovratensione ed è una funzione standard di quasi tutti i più moderni azionamenti. Tuttavia, questo significa che il profilo di frenatura della macchina non viene eseguito in base alla rampa di velocità specificata dall'utente.

La capacità di magazzinaggio di energia dell'inverter è normalmente molto ridotta. Ad esempio, per un azionamento da 90 kW, il valore di capacitanza è normalmente pari a 5 mF. Se l'azionamento viene alimentato a 400 V AC, il bus in c.c. ha un valore pari a $1,35 * 400 = 565$ V DC. Supponendo che i condensatori possano sopportare un valore massimo di 735 V DC, il tempo necessario per trasferire una potenza nominale di 90 kW ai condensatore in c.c. può essere calcolato con la seguente formula:

$$(3.3) \quad t = \frac{C * U_{dc}^2}{2 * P} = \frac{5 * 10^{-3} * (735^2 - 565^2)}{2 * 90 * 10^3} = 6 \text{ ms}$$

Questo campo di valori vale normalmente per tutti gli azionamenti moderni in c.a. a bassa tensione, indipendentemente dalla loro potenza nominale. In pratica questo significa che il regolatore di sovratensione e il suo regolatore di coppia, che funge da “cavallo da tiro” del motore in c.a., devono essere molto veloci. Inoltre, l'attivazione della rigenerazione o del chopper di frenatura deve essere rapidissima.

Principio di funzionamento del chopper di frenatura

Un'altra possibilità per limitare la tensione del bus in c.c. consiste nel condurre l'energia di frenatura verso una resistenza attraverso un chopper di frenatura. Il chopper di frenatura è un interruttore elettrico che collega la tensione del bus in c.c. a una resistenza, dove l'energia di frenatura viene convertita in calore. I chopper di frenatura vengono attivati automaticamente quando la tensione effettiva del bus in c.c. supera un determinato livello, in base alla tensione nominale dell'inverter.

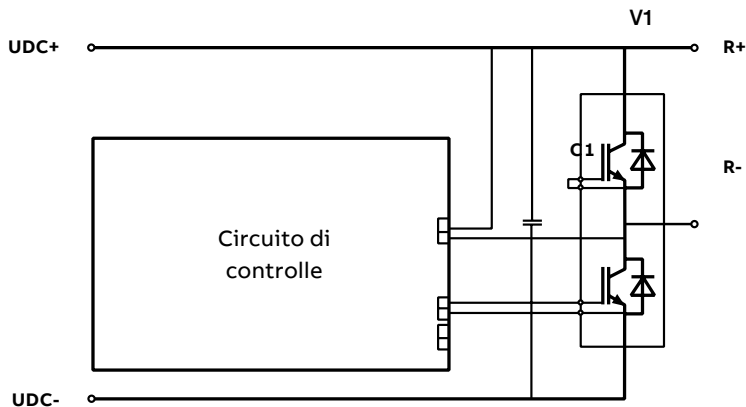


Figura 3.2 Diagramma circuitale di un chopper di frenatura. UDC rappresenta i morsetti del bus in c.c., R i morsetti della resistenza.

I principali vantaggi della soluzione con resistenza e chopper di frenatura sono:

- Configurazione elettrica semplice e tecnologia consolidata.
- Investimento limitato per chopper e resistenza.
- Il chopper funziona anche in mancanza di alimentazione in c.a. In alcune applicazioni, ad esempio elevatori o altre apparecchiature con funzioni di sicurezza, può essere necessario assicurare la frenatura anche in mancanza di rete.

I principali svantaggi della soluzione con resistenza e chopper di frenatura sono:

- L'energia di frenatura va sprecata se l'aria riscaldata non è riutilizzabile.
- Le resistenze e il chopper di frenatura richiedono spazio.
- Possono rendersi necessari investimenti supplementari per i sistemi di raffreddamento e di recupero del calore.
- I chopper di frenatura sono normalmente dimensionati per un determinato ciclo, ad esempio il 100% della potenza 1/10 minuti, e lunghi tempi di frenatura richiedono un dimensionamento più preciso del chopper.
- Maggior rischio di incendi a causa del calore della resistenza e possibile presenza di polveri e componenti chimici nell'atmosfera dell'ambiente di lavoro.
- Il maggior livello di tensione del bus in c.c. durante la frenatura determina un'ulteriore sollecitazione termica in corrispondenza dell'isolamento del motore.

Quando applicare un chopper di frenatura:

- Il ciclo di frenatura si utilizza solo occasionalmente.
- La quantità di energia di frenatura è estremamente ridotta rispetto all'energia motrice.
- Occorre assicurare la frenatura in caso di mancanza di rete.

Quando considerare soluzioni alternative alla resistenza e al chopper di frenatura:

- La frenatura è costante o si ripete regolarmente.
- La quantità totale di energia di frenatura è elevata a fronte dell'energia motrice richiesta.
- La potenza di frenatura istantanea è elevata, ad esempio diverse centinaia di kW per diversi minuti.
- L'ambiente circostante contiene grandi quantità di polveri o di altri componenti.

Configurazione di ponti di tiristori

Nei convertitori di frequenza i ponti di raddrizzatori a diodi possono essere sostituiti da due raddrizzatori a tiristori in opposizione di fase. Questa configurazione consente di modificare il ponte raddrizzatore in base al flusso di potenza richiesto dal processo.

I componenti principali dell'unità di alimentazione a tiristori sono due ponti di tiristori a 6 impulsi. Il ponte di andata converte l'alimentazione trifase da c.a. in c.c. in c.c. Esso alimenta gli azionamenti (inverter) attraverso il circuito intermedio. Il ponte di ritorno riconverte la tensione da c.c. in c.a., quando occorre rigenerare la potenza di frenatura del motore in eccesso, verso la rete di alimentazione.

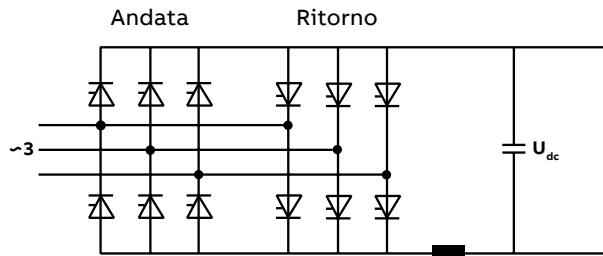


Figura 3.3 Diagramma lineare di un'unità di alimentazione a tiristori.

I ponti funzionano alternativamente, quando uno funziona l'altro è bloccato. L'angolo di accensione dei tiristori viene regolato costantemente per mantenere la tensione del circuito intermedio al livello desiderato. La selezione del ponte di andata/di ritorno e il controllo della tensione del circuito intermedio dipendono dai valori della corrente e della tensione di alimentazione e della tensione del circuito intermedio. La reattanza in c.c. filtra i picchi di corrente del circuito intermedio.

I principali vantaggi del ponte di tiristori sono:

- Soluzione tecnicamente consolidata.
- Investimento ridotto rispetto ad una soluzione a IGBT.
- La tensione in c.c. può essere controllata e impostata su un livello inferiore alla rete. In alcune applicazioni speciali ciò può costituire un vantaggio.

Gli svantaggi principali del ponte di tiristori sono:

- La tensione del bus in c.c. deve sempre essere inferiore alla tensione di alimentazione in c.a. per mantenere un margine di commutazione. Pertanto, la tensione alimentata al motore risulta più bassa della tensione in c.a. in ingresso. L'utilizzo di un autotrasformatore elevatore nell'alimentazione consente comunque di superare questo problema.
- Se si interrompe l'alimentazione in c.a. durante la frenatura, si rischia la bruciatura dei fusibili per un guasto di commutazione dei tiristori.
- Il $\cos\phi$ varia al variare del carico.
- La distorsione armonica totale è superiore rispetto alle unità rigenerative a IGBT.

- La distorsione di corrente passa attraverso l'impedenza della rete e può determinare una distorsione di tensione indesiderata in altri dispositivi alimentati dal punto in cui si verifica tale distorsione di tensione.
- La capacità di frenatura non è disponibile durante le interruzioni di rete.

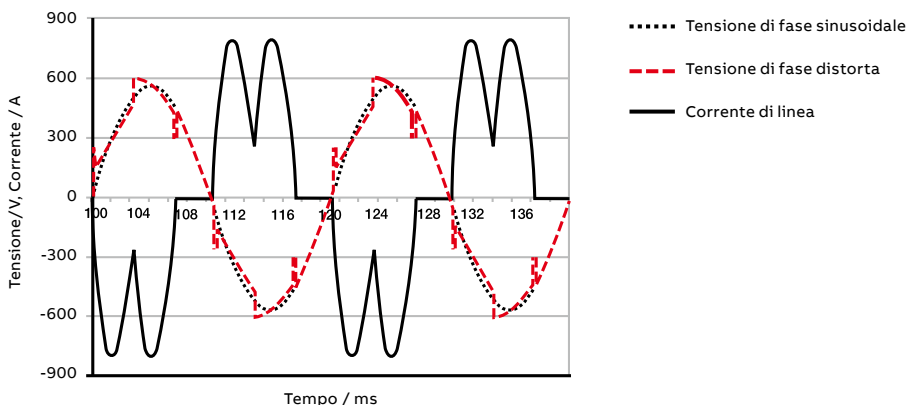


Figura 3.4. Esempio di forme d'onda della tensione e della corrente dei ponti di tiristori durante la frenatura.

Raddrizzatore rigenerativo

Un'alternativa al raddrizzatore a ponte di tiristori è un raddrizzatore rigenerativo con IGBT e diodi, collegati in anti-parallelo, controllato come un ponte di tiristori. Durante il funzionamento del motore, la corrente in entrata scorre attraverso i diodi verso il bus c.c. e l'alimentatore funge da ponte di diodi. In fase di rigenerazione, la corrente fluisce dal bus c.c. attraverso gli IGBT per tornare in rete. Gli IGBT vengono commutati in conduzione una sola volta durante ogni mezzo ciclo di tensione della rete, con un processo comparabile a un alimentatore a diodi a 6 impulsi. Questo procedimento riduce le perdite di commutazione e consente all'unità di raggiungere potenze maggiori in ingresso e in uscita. Poiché gli IGBT possono essere spenti in qualsiasi momento, il raddrizzatore rigenerativo, diversamente dal ponte di tiristori, resta integro anche in caso di caduta della rete di alimentazione, quando opera in modalità rigenerativa.

I vantaggi principali del raddrizzatore rigenerativo sono:

- Risparmio energetico, in quanto l'energia di frenatura viene reimpressa in rete invece di essere dispersa sotto forma di calore.
- Possibilità di piena potenza di frenatura continua.
- Funzionamento più affidabile in condizioni di rete instabile rispetto all'alimentatore a tiristori.
- Densità di potenza elevata che consente un dimensionamento ottimizzato.

Gli svantaggi principali del raddrizzatore rigenerativo sono:

- Livelli di distorsione armonica maggiori rispetto alle unità rigenerative a IGBT.
- Funzione di frenatura non disponibile in caso di caduta della rete.

Tecnologia a matrice

Gli azionamenti a matrice usano nove IGBT bidirezionali disposti a matrice per generare l'uscita c.a. a frequenza variabile direttamente dall'ingresso c.a. Non esistono condensatori del bus c.c. e la distorsione armonica della corrente di ingresso è molto inferiore agli azionamenti standard con raddrizzatore a ponte di diodi a 6 impulsi.

Grazie alla possibilità di collegare la fase di ingresso con qualsiasi fase di uscita in qualsiasi momento, il motore può essere comandato con la tensione appropriata alla frequenza appropriata, secondo necessità; inoltre, l'energia di frenatura generata dal motore può essere reimmessa nella rete di alimentazione.

I vantaggi principali della tecnologia a matrice sono:

- Risparmio energetico, in quanto l'energia di frenatura viene reimmessa in rete invece di essere dispersa sotto forma di calore.
- L'utilizzo di un componente unico riduce gli ingombri di installazione rispetto a una soluzione con chopper e resistenza.
- Possibilità di piena potenza di frenatura continua.
- Livelli di distorsione armonica simili a quelli delle unità rigenerative a IGBT.

Gli svantaggi principali della tecnologia a matrice sono:

- Costo di investimento elevato.
- Funzionamento inaffidabile in reti instabili. L'assenza di condensatori c.c. limita la capacità di superare perdite di potenza in caso di caduta temporanea della rete di alimentazione.
- La tensione di uscita massima è tipicamente pari all'87% della tensione di alimentazione c.a. per raggiungere livelli di distorsione armonica paragonabili alle unità rigenerative con IGBT. Questo richiede una corrente del motore maggiore per una data potenza meccanica, aumentando le perdite del motore e riducendo l'efficienza del sistema.
- Quando è richiesta la piena tensione in uscita, le armoniche della corrente in entrata aumentano notevolmente.
- La funzione di frenatura non è disponibile in caso di caduta della rete.
- Armoniche intensione ad alta frequenza, a causa dell'alta frequenza di commutazione. Un filtro dedicato per sopprimere il contenuto di alta frequenza è necessario per prevenire interferenze. Questo filtro può far parte del design dell'azionamento.

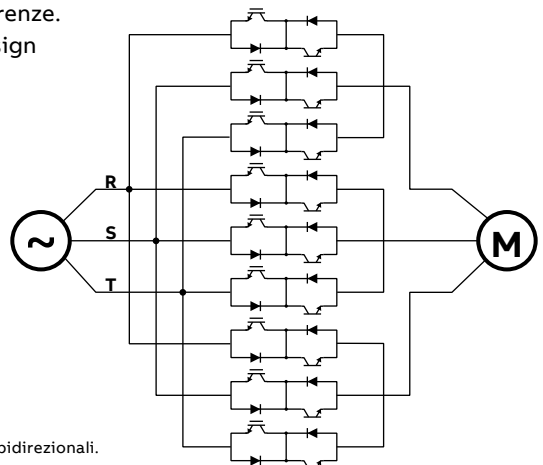


Figura 3.5. Azionamento a matrice con nove IGBT bidirezionali.

Unità di frenatura rigenerativa

Un'unità di frenatura rigenerativa è un componente esterno collegato ai morsetti c.c. dell'azionamento. È composto tipicamente da semiconduttori (tiristori o IGBT) e condensatori c.c. Durante il funzionamento del motore, l'azionamento fornisce potenza senza che l'unità di frenatura rigenerativa sia coinvolta. L'unità di frenatura rigenerativa viene attivata quando l'energia rigenerativa proveniente dal motore carica i condensatori c.c. dell'azionamento e dell'unità stessa. L'unità di frenatura rigenerativa reimmette l'energia di frenatura in rete.

I vantaggi principali dell'unità di frenatura rigenerativa sono:

- Risparmio energetico, in quanto l'energia di frenatura viene reimpressa in rete invece di essere dispersa sotto forma di calore.
- L'unità di frenatura rigenerativa può essere ottimizzata secondo i requisiti di frenatura dell'applicazione.

Gli svantaggi principali dell'unità di frenatura rigenerativa sono:

- Nella maggior parte dei casi serve un filtro esterno aggiuntivo (reattanza di frenatura) per attenuare la distorsione di corrente e tensione durante la frenatura.
- La dotazione aggiuntiva di fusibili e cavi di potenza e comando aumenta la complessità e i costi del sistema.
- I livelli di distorsione armonica durante il funzionamento del motore sono superiori rispetto alle unità rigenerative a IGBT o agli azionamenti a matrice.
- I livelli di distorsione armonica sono tipicamente elevati durante la frenatura.

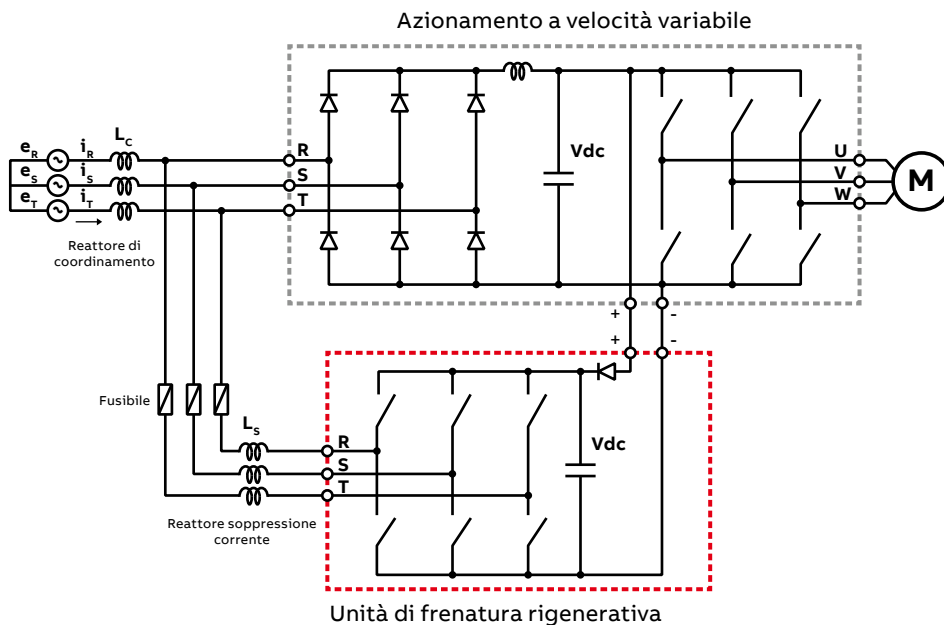


Figura 3.5. Azionamento a matrice con nove IGBT bidirezionali.

Configurazione del ponte IGBT

Principi generali delle unità di rigenerazione basate su IGBT

La rigenerazione basata su IGBT si fonda sugli stessi principi della trasmissione di potenza all'interno di una rete di alimentazione. In una rete di alimentazione sono collegati più generatori e punti di carico. Si può supporre che, in corrispondenza del punto di collegamento, la rete di alimentazione sia un generatore sincrono di grandi dimensioni a frequenza fissa. Il ponte IGBT di ingresso dell'azionamento (di seguito convertitore di linea) può essere considerato alla stregua di un altro sistema di tensione in c.a. collegato al generatore attraverso una induttanza. Il principio del trasferimento di potenza tra due sistemi in c.a. con tensione U collegati l'uno all'altro può essere calcolato con la formula (3.4).

$$(3.4) \quad P = \frac{U_{\text{line}} * U_{\text{rec}}}{X} \sin \delta$$

La formula indica che, perché si realizzi un trasferimento di potenza tra i due sistemi, è necessaria una differenza di fase nell'angolo tra le tensioni dei due sistemi in c.a. Per controllare il flusso di potenza tra i due sistemi è necessario controllare l'angolo.

Rigenerazione basata su IGBT: obiettivi di controllo

Vi sono tre obiettivi generali di controllo per quanto riguarda le unità rigenerative basate su IGBT. Il primo consiste nel mantenere stabile la tensione del bus in c.c. indipendentemente dal valore assoluto del flusso di potenza e dalla sua direzione. Utilizzando questo metodo, gli inverter che alimentano i motori in c.a. possono operare in modo ottimale indipendentemente dal punto di funzionamento, grazie alla stabilità della tensione del bus in c.c.. La tensione del bus in c.c. è stabile quando il flusso di potenza verso il bus in c.c. e quello in uscita dal bus in c.c. si equivalgono. Il controllo del corretto flusso di potenza con questo sistema si ottiene controllando l'angolo di potenza tra i due sistemi in c.a.

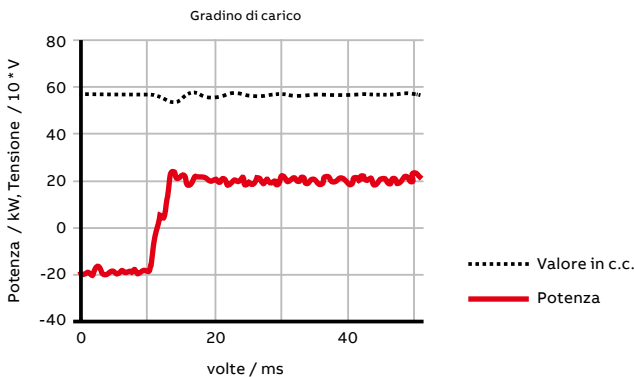


Figura 3.7. Rapida commutazione dal modo rigenerazione al modo motore. Si noti la stabilità della tensione del bus in c.c. durante la transizione

Il secondo obiettivo di controllo consiste nel minimizzare il fabbisogno di corrente di alimentazione, mantenendo un $\cos\phi = 1.0$ durante l'esercizio. Questo si ottiene controllando la tensione in uscita del convertitore di linea.

Il terzo obiettivo di controllo consiste nel minimizzare il contenuto di armoniche nella corrente di alimentazione. I principali criteri cui attenersi per la progettazione sono il valore di impedenza dell'induttanza e un metodo di controllo idoneo.

Controllo attivo degli IGBT per ridurre il contenuto di armoniche

Il metodo del controllo diretto di coppia associato alla tecnologia IGBT contribuisce a ridurre le armoniche di corrente. Per questa ragione l'unità di alimentazione IGBT può essere utilizzata in sostituzione delle configurazioni di alimentazione a singolo quadrante a 12 o 18 impulsi, normalmente utilizzate per ridurre le correnti armoniche sul lato alimentazione. L'unità di alimentazione IGBT risulta pertanto utile anche per i casi in cui il problema è costituito dalle correnti armoniche piuttosto che dalla gestione dell'energia di frenatura.

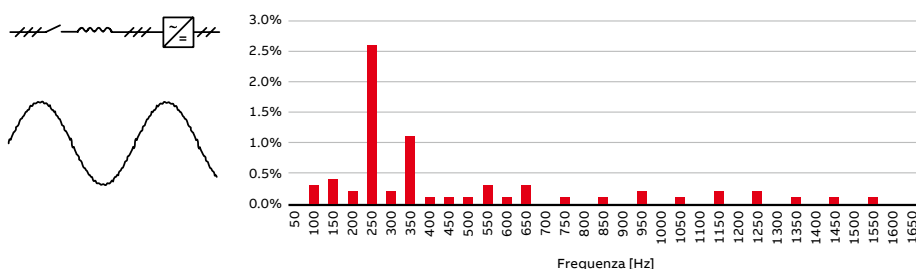


Figura 3.8. Forma d'onda tipica della corrente lineare e armoniche di un'unità di generazione lineare IGBT.

I principali vantaggi dell'unità di rigenerazione IGBT sono:

- Bassissimo livello di armoniche nella corrente di alimentazione sia in modo motore che in modo rigenerazione.
- Risparmio energetico, in quanto l'energia di frenatura viene reimpressa in rete invece di essere dispersa sotto forma di calore.
- Possibilità di piena potenza di frenatura continua.
- Dinamica elevata durante i cambi rapidi del flusso di potenza sul lato del carico.
- Possibilità di incrementare la tensione in c.c. a un livello superiore alla rispettiva alimentazione in c.a. in ingresso. Questa funzione può essere utilizzata per compensare la debolezza della rete o per aumentare la capacità di coppia massima del motore nell'area di indebolimento di campo. Contribuisce inoltre a ridurre i tempi di fermo nel processo.
- Possibilità di controllare il fattore di potenza.
- Alimentazione anche in mancanza di rete con sincronizzazione automatica alla rete.

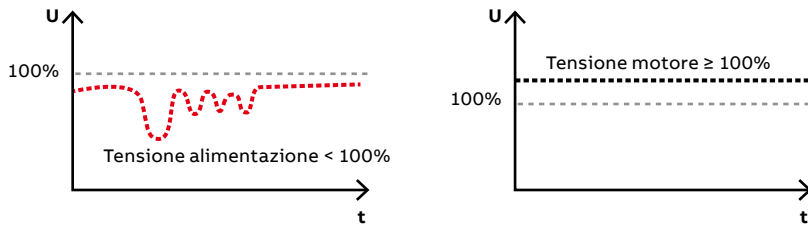


Figura 3.9. Capacità di incrementare la tensione di alimentazione.

I principali svantaggi dell'unità rigenerativa IGBT sono:

- Costo dell'investimento più elevato
- La capacità di frenatura non è attiva in caso di interruzioni dell'alimentazione. In applicazioni critiche può essere utilizzato un freno meccanico o un sistema con chopper e resistenza di frenatura come metodo di frenatura secondario.
- Elevata frequenza delle armoniche di tensione, determinata da un'elevata frequenza di commutazione. Queste componenti di tensione di diversi kilohertz possono eccitare i piccoli condensatori utilizzati in altri dispositivi elettrici. Grazie a una configurazione idonea dei trasformatori di alimentazione per i vari dispositivi è possibile eliminare questi fenomeni.
- Distorsione comune ad alta frequenza sulle tensioni fase-neutro e fase-terra. E' necessario un filtro dedicato per sopprimere le componenti ad alta frequenza per prevenire le interferenze. Questo filtro può far parte del design dell'azionamento.

Quando utilizzare un'unità rigenerativa IGBT:

- La frenatura è costante o si ripete regolarmente.
- La potenza di frenatura è molto elevata.
- Quando è possibile ridurre l'ingombro rispetto alla soluzione dotata di resistenza di frenatura. Nella maggior parte dei casi, l'ingombro di installazione con un'unità di rigenerazione a IGBT è minore.
- Quando le armoniche di rete sono un fattore critico. Un livello di armoniche inferiore riduce il carico sul trasformatore e sul generatore di alimentazione.
- Quando è conveniente aumentare la tensione del motore per compensare i cali di tensione nel sistema, causati ad esempio da cavi di alimentazione lunghi.
- Per ridurre i costi dell'energia e delle apparecchiature. Nella frenatura meccanica o con resistenza, l'energia viene dissipata sotto forma di calore e può essere necessario un raffreddamento supplementare.

Dimensionare un'unità di rigenerazione a IGBT

Il dimensionamento della corrente di alimentazione di un'unità IGBT si basa sulla potenza richiesta. Supponiamo che sia necessaria una potenza motrice resa di 130 kW con una potenza di frenatura di 100 kW. Per dimensionare l'unità di alimentazione IGBT occorre selezionare il valore più elevato dei due, in questo caso 130 kW. La tensione del motore è pari a 400 V. Il valore minimo per la rete di alimentazione è di 370 V. In questo caso si può sfruttare la capacità di incremento della tensione; la tensione del bus in c.c. viene elevata fino a raggiungere una tensione in c.a. di 400 V. Tuttavia, la corrente di alimentazione richiesta viene calcolata in base al livello di 370 V. Supponendo che vi sia un 5% di perdite nel sistema a livello del motore e dell'azionamento, la rete deve alimentare complessivamente una potenza pari

a 136,5 kW. La corrente di alimentazione può essere calcolata con la seguente formula:

$$(3.6) \quad I_{in} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{in}} = \frac{136.5 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 370 \text{ V}} = 213 \text{ A}$$

L'unità rigenerativa IGBT viene selezionata solo in base al valore di corrente calcolato.

Common DC bus

Quando un processo comprende vari azionamenti dove un solo motore può richiedere funzioni di frenatura mentre gli altri funzionano in modo motore, il common DC bus costituisce una soluzione molto efficiente per riutilizzare l'energia meccanica. Gli azionamenti che adottano il common DC bus comprendono un raddrizzatore di alimentazione separato che converte la tensione da c.a. in c.c. e vari inverter che alimentano i motori in c.a. collegati al common DC bus. Pertanto, il DC bus costituisce il canale per convogliare l'energia di frenatura proveniente da un motore verso altri motori. La configurazione di base del sistema è quella riportata nella figura (3.10).

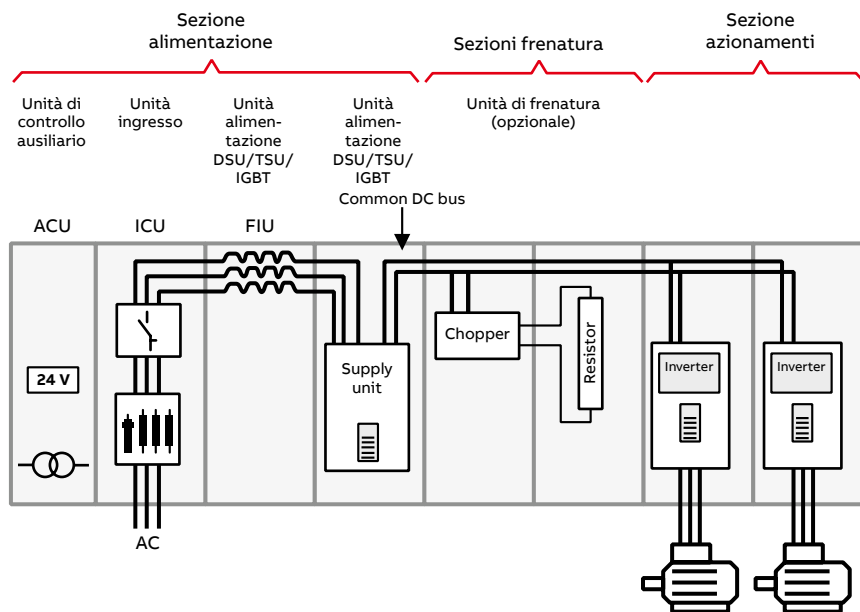


Figura 3.10. La configurazione di base della soluzione con bus comune in c.c.

I principali vantaggi della soluzione con common DC bus sono:

- Facile distribuzione della potenza tra i vari azionamenti.
- Bassa incidenza delle perdite di sistema connesse alla conversione dell'energia di frenatura, grazie al common DC bus
- Sebbene la potenza di frenatura istantanea sia più elevata rispetto alla potenza motrice, il chopper di frenatura e la resistenza non devono essere dimensionati per la piena potenza installata
- Se è necessario utilizzare la potenza di frenatura per periodi di tempo prolungati, è possibile utilizzare diversi raddrizzatori combinati insieme.

I principali svantaggi della soluzione in common DC bus con raddrizzatore a singolo quadrante sono:

La potenza motrice istantanea deve essere superiore o uguale alla potenza di frenatura.

Se la potenza di frenatura istantanea supera la potenza motrice è necessario ricorrere alla resistenza e al chopper di frenatura.

Se il numero dei motori è ridotto, il costo supplementare per un inverter dedicato che scolleghi il dispositivo dal bus in c.c. fa lievitare il costo dell'investimento.

La soluzione basata sul bus comune in c.c. con raddrizzatore a singolo quadrante è indicata quando:

- Il numero di azionamenti è elevato.
- La potenza motrice è sempre superiore alla potenza di frenatura oppure il chopper di frenatura richiede una potenza di frenatura ridotta.

Valutazione dei costi dei diversi metodi di frenatura elettromeccanica per l'intero ciclo di vita

È sempre più importante valutare i costi per l'intero ciclo di vita quando si tratta di prodotti a ridotto consumo energetico. Gli azionamenti in c.a. sono utilizzati per controllare la velocità e la coppia. Tale funzione di base comporta la possibilità di risparmio energetico a fronte di altri metodi di controllo in uso. Sebbene le applicazioni come pompe e ventilatori richiedano solo raramente funzioni di frenatura, i moderni azionamenti in c.a. vengono utilizzati sempre più di frequente nelle applicazioni che richiedono tali funzioni.

Sono già stati citati diversi criteri tecnici. In questa sezione si valuteranno i fattori economici relativamente alle diverse opzioni di frenatura elettromeccanica.

Calcolo del costo diretto dell'energia

Il costo diretto dell'energia può essere calcolato, ad esempio, in base al prezzo dell'energia, al tempo e alla potenza di frenatura previsti giornalmente. Il prezzo dell'energia varia in base al paese, ma si può prendere come riferimento un prezzo medio tipico di 0,05 euro/kilowattora. 1 euro ~ 1 dollaro USA. Il costo energetico annuo si calcola con la seguente formula:

$$(4.1) \quad \text{Cost} = \text{Braking time (h/day)} * \text{Average braking power (kW)} * \text{price of energy (euros/kWh)} * 365$$

Ad esempio, per un azionamento da 100 kW che funziona 8.000 ore l'anno e opera in modalità frenatura alla potenza media di 50 kW per 5 minuti l'ora, vale a dire per 667 ore l'anno, il costo annuo diretto relativo all'energia di frenatura è pari a 1.668 euro.

Valutazione del costo dell'investimento

L'investimento necessario varia in base ai diversi metodi di frenatura. Occorre valutare le seguenti componenti del costo dell'investimento.

Chopper di frenatura:

- Il costo supplementare per la resistenza e il chopper di frenatura, più il costo dello spazio supplementare necessario per installare i due componenti.
- Il costo dell'investimento relativo alle funzioni di ventilazione supplementari necessarie per il chopper di frenatura.

Frenatura elettromeccanica basata su sistema a IGBT o a tiristori:

- Il costo supplementare per le funzioni di frenatura rigenerativa basata su sistema a IGBT o a tiristori rispetto ad un azionamento di analoga potenza privo di funzioni di frenatura elettromeccanica.

Common DC bus.:

- Il costo supplementare per la resistenza e il chopper di frenatura, più il costo dello spazio supplementare, se necessario nella configurazione in DC bus.
- La differenza di costo tra la soluzione basata sul common DC bus e la corrispondente soluzione “single drive”.

Calcolo del costo per l'intero ciclo di vita

Il calcolo dei costi per l'intero ciclo di vita riguarda gli aspetti prettamente economici dell'investimento. Il prezzo dell'energia e il prezzo degli azionamenti variano in base al paese, all'impianto, alle dimensioni dell'azienda, ai tassi d'interesse, al tempo di utilizzo dell'investimento e alla situazione macroeconomica complessiva. I valori assoluti dei prezzi forniti nei seguenti esempi sono utilizzati solo allo scopo di illustrare i principi di calcolo.

Case 1 – Occasional braking

Si consideri la seguente applicazione:

La potenza motrice continua è pari a 200 kW ad una velocità del motore pari a 1.500 giri/min. In caso di arresto di emergenza, l'applicazione deve frenare in 10 secondi. In base alla nostra esperienza del processo possiamo affermare che un arresto di emergenza si verifica una volta al mese. L'inerzia J del sistema azionante è pari a 122 kgm². Quando l'arresto di emergenza viene attivato, si può trascurare la coppia di carico.

Calcolando la coppia di frenatura necessaria al motore:

$$(4.2) \quad T = J * \frac{(\omega_{start} - \omega_{end})}{t} = J * \frac{(n_{start} - n_{end}) * 2 \pi}{t * 60} =$$

$$122 * \frac{(1500 - 0) * 2 \pi}{10 * 60} = 1915 \text{ Nm}$$

Il valore di coppia tipico per un motore da 200 kW, a 1.500 giri/min è di circa 1.200 Nm. Un normale motore in c.a. controllato istantaneamente da un inverter può funzionare con una coppia pari al 200% del valore nominale. Per ottenere valori di coppia più elevati è necessaria anche una corrente motrice molto maggiore.

La potenza di frenatura raggiunge il suo massimo livello all'inizio del ciclo di frenatura.

$$(4.3) \quad P_{br, max} = T * \omega = 1915 * \frac{1500}{60} * 2 \pi \approx 300 \text{ kW}$$

La resistenza e il chopper di frenatura devono resistere istantaneamente alla corrente per una potenza di 300 kW. La potenza di frenatura media si calcola come segue.

$$(4.4) \quad W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t$$

$$(4.5) \quad P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 122 * \left(\frac{1500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 150.3 \text{ kW}$$

Costo della resistenza di frenatura:

È necessario un chopper di frenatura con una potenza di frenatura massima di 300 kW. Se l'azionamento è dotato di funzioni di limitazione di potenza, la resistenza di frenatura può essere dimensionata in base a una potenza di 150,3 kW. Il costo supplementare della resistenza e del chopper di frenatura è pari a 4.000 euro. La resistenza di frenatura richiede un ingombro a terra aggiuntivo di 0,4 m². Il costo dell'ingombro al suolo è pari a 1000 euro/m².

Considerando l'esigua energia termica complessiva e l'uso ridotto della frenatura di emergenza, il costo relativo al raffreddamento supplementare risulta trascurabile.

Il costo dell'investimento supplementare complessivo comprende:

- Resistenza e chopper di frenatura in armadio, 4.000 euro.
- Ingombro 0,4 m² * 1000 euro/m², 400 euro.

Il costo complessivo dell'energia sprecata durante un intervento di frenatura è pari a:

$$(4.6) \quad \text{Cost} = \frac{10}{3600} (\text{h}) * \frac{300}{2} (\text{kW}) * 0.05 (\text{euros} / \text{kWh}) = 0.02 \text{ euros}$$

In questo caso il costo dell'energia di frenatura è trascurabile. Anche grazie alla ridotta energia di frenatura, non è necessario investire in un impianto di raffreddamento aggiuntivo nel locale elettrico.

Costo della frenatura con unità a IGBT:

Il costo supplementare per un sistema di frenatura elettromeccanica con ponte a IGBT a un azionamento con chopper di frenatura è superiore a 10.000 euro. Come previsto, il risparmio energetico non giustifica l'investimento supplementare richiesto.

Caso 2 - Applicazione per gru

Si consideri la seguente applicazione:

Una gru con potenza di sollevamento pari a 90 kW. La gru richiede la piena potenza sia sul lato motore che sul lato generatore. Il tempo massimo di funzionamento del sistema di sollevamento può essere di 3 minuti. Il tempo di servizio medio del sistema di sollevamento in un anno è pari al 20%.

Costo della resistenza di frenatura:

La resistenza e il chopper di frenatura devono essere dimensionati considerando una frenatura costante a 90 kW per un tempo massimo di frenatura di 3 minuti. Il dimensionamento massimo tipico per un chopper di frenatura si basa su un tempo di frenatura di 1 minuto ogni 10 minuti.

- Resistenza e chopper di frenatura in armadio 7.500 euro.

La configurazione meccanica della gru consente la presenza di armadi con chopper di frenatura. Non vi sono costi supplementari per il maggiore ingombro al suolo.

Si suppone che la gru funzioni da generatore per il 50% del tempo di servizio, equivalente in media a 2,4 ore/giorno. Il costo complessivo dello spreco energetico corrisponde a:

$$(4.7) \quad \text{Cost} = 2.4 \text{ (h/day)} * 90 \text{ (kW)} * 0.05 \text{ (euros/kWh)} * 365 \text{ days} = 3942 \text{ euros}$$

Costo della frenatura con unità a IGBT:

La frenatura con IGBT è consigliata per applicazioni di gru. In questo caso, la frenatura con IGBT offre maggiori vantaggi in termini di costi di investimento e risparmio energetico.

Nel caso della resistenza di frenatura, l'alta energia di frenatura richiede una resistenza di grandi dimensioni.

Il costo di investimento per un azionamento con resistenza e chopper di frenatura è superiore di 2.000 euro rispetto alla frenatura con IGBT. In virtù dell'ulteriore risparmio energetico stimabile in 4.000 euro, la frenatura con unità a IGBT è la soluzione economicamente più conveniente.

Caso 3 - Applicazione per centrifuga

Si consideri la seguente applicazione:

Centrifuga per l'estrazione dello zucchero con motore a 6 poli da 160 kW di potenza. Il motore richiede la coppia massima per un periodo di 30 secondi per poter accelerare il cestello carico alla velocità massima di 1.100 giri/min, quindi il liquido viene estratto per 30 secondi ad alta velocità. Una volta che il contenuto del cestello è secco, il motore decelera la centrifuga il più velocemente possibile per consentire le operazioni di scarico e carico.

Poiché i tempi di carico, centrifugazione e scarico sono fissi per tutti i lotti, l'unica possibilità di migliorare la produttività consiste nell'aumento del ritmo di accelerazione e decelerazione. Ciò si ottiene utilizzando un azionamento a 4 quadranti a IGBT, che consente di incrementare la tensione del collegamento in c.c. per il funzionamento nel range di indebolimento di campo (da 1.000 a 1.100 giri/min). In tal modo è possibile risparmiare circa 3 secondi per ogni ciclo, riducendo il tempo di ciclo da 110 secondi a 107 secondi. Di conseguenza si può ottenere un miglioramento complessivo della produttività del processo. Il costo supplementare per un sistema a IGBT è pari al 10%.

Confronto fra diverse tecnologie di frenatura

	Azionamento a 6 impulsi con chopper e resistenza di frenatura	Azionamento a 6 impulsi e unità rigenerativa esterna	Azionamento a matrice	Raddrizzatore rigenerativo	Azionamento con alimentazione a IGBT, a basso contenuto armonico ¹⁾
THDI% tipico	Senza induttanza di ingresso: >100% Con induttanza di ingresso: ~40%	Senza induttanza di ingresso: >100% Con induttanza di ingresso: ~40%	<5% ²⁾	> 5 fino a 100% in base alle tecnologie e ai filtri utilizzati	<5%
Capacità di reimmettere energia in rete	No	Si	Si	Si	Si
Efficienza dell'azionamento (esclusi alimentatore e motore), valore tipico alla potenza nominale	0% in frenata ²⁾ 98% in modo motore	96%	95%	97%	97%
Componenti base da installare	~0.95 × tensione alimentazione	~0.95 × tensione alimentazione	~0.87 × tensione alimentazione ³⁾	~0.95 × tensione alimentazione	Piena tensione motore
Componenti base da installare	Azionamento standard a 6 impulsi Chopper di frenatura ⁴⁾ Resistenza di frenatura Induttanza di ingresso ⁵⁾ filtro EMC ⁵⁾	Azionamento standard a 6 impulsi Unità di frenatura Reattore di frenatura Induttanza di ingresso ⁵⁾ filtro EMC ⁵⁾	Componente singolo	Inverter motore Raddrizzatore Induttanza di ingresso Filtro EMC	Componente singolo
L'azionamento richiede fusibili in ingresso	Si	Si	Si	Si	Si
Fusibili aggiuntivi richiesti per componenti del circuito di frenatura	No	Fusibili in ingresso necessari per unità di frenatura	No	No	No
Ingombro di installazione ⁵⁾	600%	220%	250%	220%	120%

I dati sono riferiti a un'applicazione di sollevamento da 90 kW con ciclo di frenatura del 50%.

I componenti del circuito sono dimensionati per la piena potenza di frenatura.

I risultati possono variare in base alla tipologia e al dimensionamento delle apparecchiature.

L'azionamento standard a 6 impulsi utilizzato come termine di paragone è ABB ACS880-01-206A-3.

¹⁾ Per gli azionamenti con alimentazione a IGBT, la valutazione si basa su azionamenti ultra-low harmonic di ABB.

²⁾ Questo valore si ottiene quando la tensione del motore è sotto il suo valore nominale. Con la piena tensione del motore il valore tipico di THDI% è >10%

³⁾ L'efficienza combinata totale dipende dal ciclo di frenatura.

⁴⁾ Una tensione del motore maggiore (> 0,87 × tensione di alimentazione) si traduce tipicamente in una maggiore distorsione armonica della corrente in ingresso.

⁵⁾ I componenti possono essere incorporati nell'azionamento o esterni.

⁶⁾ Ingombro rispetto a un azionamento a 6 impulsi standard

Simboli e definizioni

c.a.:	corrente o tensione alternata
B:	coefficiente di attrito
C:	costante o coefficiente
cosφ:	Coseno dell'angolo di sfasamento tra la corrente e la tensione fondamentale
c.c.:	tensione o corrente continua
DPF:	Displacement Power Factor (Sfasamento alternato) definito $\cos\phi_1$, dove ϕ_1 è l'angolo di fase tra la corrente di frequenza fondamentale assorbita dalla macchina e la componente di frequenza fondamentale della tensione di alimentazione.
I:	corrente [Ampere, A]
J:	inerzia [kgm^2]
n:	Velocità di rotazione [giri/min]
P:	potenza [Watt, W]
PF:	Fattore di potenza definito come $FP = P/S$ (potenza/ voltampere) = $I_1 / I_s * DPF$ (Con corrente sinusoidale $PF = DPF$)
T:	coppia (Newton metri, Nm)
t:	tempo
THD:	Total Harmonic Distortion (distorsione armonica totale) nella corrente definita come:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1}$$

dove I_1 è uguale al valore in giri/min della corrente di frequenza fondamentale. La THD in tensione può essere calcolata nello stesso modo.

U:	Tensione [V]
W:	Energia [Joule, J]
ω :	Velocità angolare [radianti/secondo, 1/s]

Per maggiori informazioni, contattate il vostro
referente ABB di zona o visitate:

www.abb.it/drives

www.abb.it/drivespartners

new.abb.com/drives/regenerativedrives

