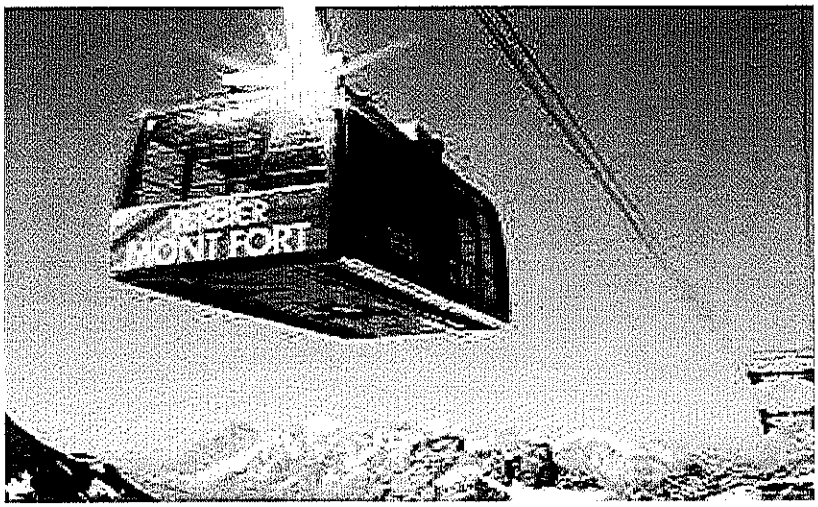
Frenatura elettromeccanica



Indice

1. Introduzione 5

1.1 Generalità 5
1.2 Mappa degli azionamenti in base a velocità e coppia 5

2. Valutazione della potenza di frenatura 7

2.1 Principi dimensionali generali per la frenatura elettromeccanica 7
2.2 Elementi di base della descrizione del carico 8
2.2.1 Coppia costante e coppia quadratica 8
2.2.2 Valutazione della potenza e della coppia quadratica 8
2.2.3 Sintesi e conclusioni 12

3. Soluzioni di frenatura elettromeccanica negli azionamenti 13

3.1 Flusso di frenatura del motore 13
3.2 Chopper di frenatura e resistenza di frenatura 14
3.2.1 Le funzioni di magazzinaggio di energia del convertitore di frequenza 14
3.2.2 Principio del chopper di frenatura 15
3.3 Configurazione di ponti di tiristori collegati in anti-parallelo 17
3.4 Configurazione del ponte IGBT 19
3.4.1 Principi generali dei sistemi IGBT basati su generatori 19
3.4.2 Obiettivi di controllo della rigenerazione basata su tecnologia IGBT 19
3.4.3 Controllo diretto di coppia sotto forma di controllo diretto di potenza 20
3.4.4 Dimensionamento di un'unità di rigenerazione IGBT 22
3.5 Bus comune in c.c. 22

4. Valutazione del costo delle diverse forme di frenatura elettromeccanica per l'intero ciclo di vita 24

4.1 Calcolo del costo diretto dell'energia 24
4.2 Valutazione del costo dell'investimento 24
4.3 Calcolo del costo per l'intero ciclo di vita 25

5. Simboli e Definizioni 29

6. Indice analitico 30

Capitolo 1 - Introduzione

1.1 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.

1.2 Mappa degli azionamenti in base a velocità e 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. E' 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 i metodi di controllo chiusura. Tuttavia, oltre a non presta 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.

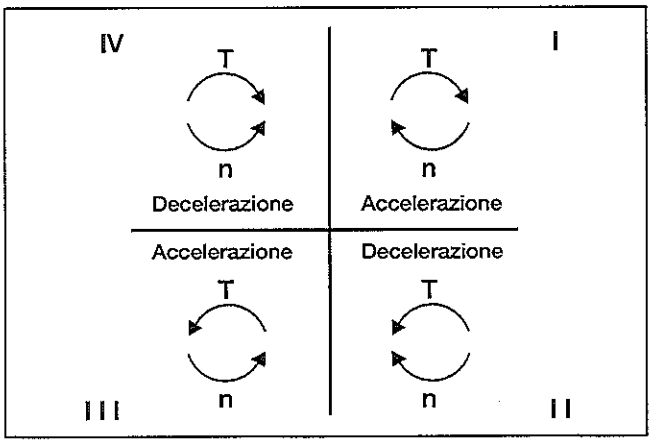


Figura 1.1 Mappa degli azionamenti in base alla velocità e alla coppia.

Capitolo 2 - Valutazione della potenza di frenatura

2.1 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 sul lato generatore a velocità costante o leggermente variabile.

E' 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 dellla 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 cosϕ. Esso definisce la quantità di corrente di motore 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 cosϕ 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.

$$P_{macc} = T * \omega = T * \frac{n}{60} * 2\pi \qquad (2.1)$$

$$P_{elettr} = U_{c.c.} * I_{c.c.} = \sqrt{3} * U_{c.a.} * I_{c.a.} * \cos\phi \qquad (2.2)$$

2.2 Elementi di base della descrizione del carico

I carichi tipici possono essere distinti tra carichi a coppia costante e carichi a coppia quadratica. Ccoppia 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.

2.2.1 Coppia costante e coppia quadratica

Coppia costante:

C: costante

$$T_{caric} = C \tag{2.3}$$

$$P_{caric} = T * \omega = C * \omega \tag{2.4}$$

Coppia quadratica:

$$T_{caric} = C * \omega^2 \tag{2.5}$$

$$P_{caric} = T * \omega = C * \omega^2 * \omega = C * \omega^3 \tag{2.6}$$

2.2.2 Valutazione della potenza e della coppia 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.

$$T_{motore} = -[J * \alpha + \beta * w + T_{caric}(\omega)] \tag{2.7}$$

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 un unico 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) di attrito,l'attrito e la coppia di carico avvengono in direzione opposta alla coppia del motore.

$$0 = -[J * \alpha + \beta * w + T_{caric}(\omega)] \tag{2.8}$$

In pratica, è difficile definire l'effetto dell'attrito in modo preciso. Supponendo che l'attrito sia uguale a zero, il tempo è calcolato dal punto di vista della sicurezza .

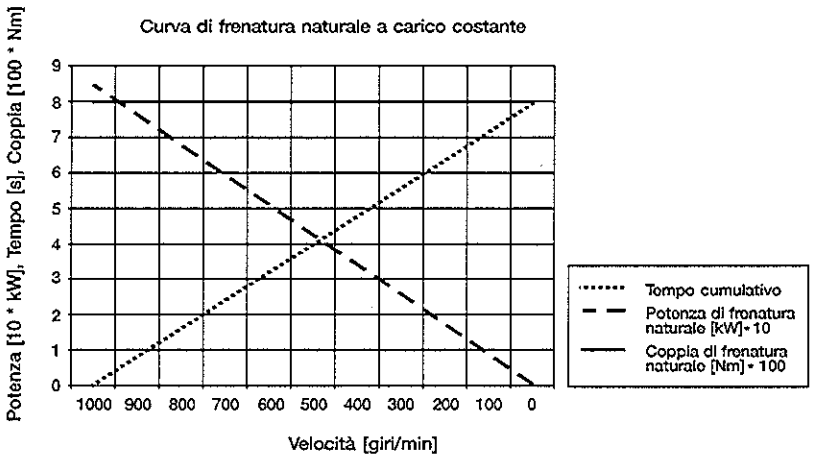


Figura 2.1 Tempo di frenatura cumulativo, potenza di carico di frenatura e coppie in funzione della velocità.

$$T_{caric}(\omega) = J * \alpha = J * \frac{(\omega_{avvio} - \omega_{fine})}{t} = J * \frac{(n_{avvio} - n_{fine}) * 2\pi}{t * 60} \qquad (2.9)$$

Risolvendo t si ottiene la formula:

$$t = J * \frac{(n_{avvio} - n_{fine}) * 2\pi}{60 * T_{caric}(\omega)} \qquad (2.10)$$

Supponendo che l'inerzia del carico sia pari a 60 kgm² 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 i tempi:

$$t = J * \frac{(n_{avvio} - n_{fine}) * 2\pi}{60 * T_{caric}(\omega)} = 60 * \frac{(1000 - 0) * 2\pi}{60 * 800} = 7{,}85\ s \qquad (2.11)$$

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. Presentando iltempo 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.

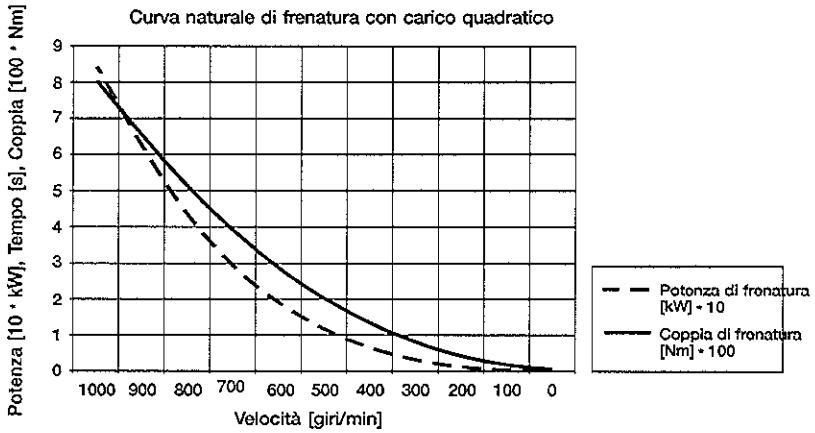


Figura 2.2 Curva naturale di frenatura per un ventilatore da 90 kW con potenza di carico di frenatura e coppia in funzione della velocità.

E' 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).

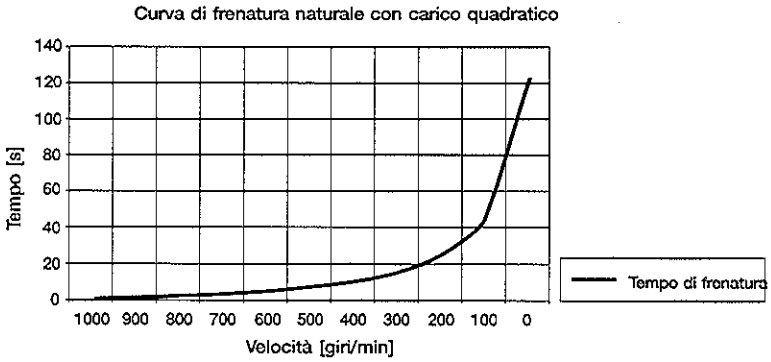


Figura 2.3 Esempio di tempo cumulativo di frenatura per un ventilatore da 90 kW.

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

Il ventilatore da 90 kW ha un'inerzia di 60 kgm^2. 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 prudenziale poiché non si tiene conto della caratteristiche di carico del ventilatore.

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

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

$$\frac{1}{2} * 60 * (\frac{1000}{60} * 2\pi)^2 * \frac{1}{20} = 16{,}4 \text{ kW} \qquad (2.13)$$

Quando il chopper di frenatura è dimensionato per un valore di 16,4 kW e la capacità di frenatura del motore a velocità più elevate è molto superiore a 16,4 kW, l'azionamento deve integrare una funzione di controllo per massimizzare la potenza rigenerativa. Tale funzione è presente solo in alcuni azionamenti.

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 prudenziale, 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.

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

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

$$\frac{1}{2} * 60 * (\frac{500}{60} * 2\pi)^2 * \frac{1}{10} = 8{,}2 \text{ kW} \qquad (2.15)$$

2.2.3 Sintesi 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 linearrmente 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.

Capitolo 3 - 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 viene rigenerata 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 ridotta a fronte della potenza necessaria, il raddrizzatore deve erogare sempre la potenza necessaria al motore più le perdite del sistema di azionamento.

3.1 Flusso di frenatura del motore

Il flusso di frenatura è un metodo basato sulle perdite a livello del motore. Quando è necessario frenare l'azionamento, 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 (per ulteriori informazioni in merito al controllo diretto di coppia si veda la Guida tecnica N. 1). Mediante il controllo diretto di coppia l'inverter è controllato direttamente perché raggiunga i valori di coppia e di flusso necessari al motore. Durante il flusso di frenatura 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 alimentata al motore, cosicché il controllo del flusso del motore si interrompe durante la frenatura. Il metodo del flusso di frenatura basato sui sistemi a controllo diretto di coppia consente, se necessario, un rapido passaggio del motore dalla potenza frenante alla potenza motrice.

Nel flusso di frenatura, l'aumento di corrente dipende da una riduzione delle perdite all'interno del motore. La potenza di frenatura pertanto aumenta, sebbene la potenza di frenatura fornita al convertitore di frequenza rimanga invariata. A un maggiore livello di corrente corrisponde un aumento delle perdite a livello delle resistenze del motore. A una maggiore 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.

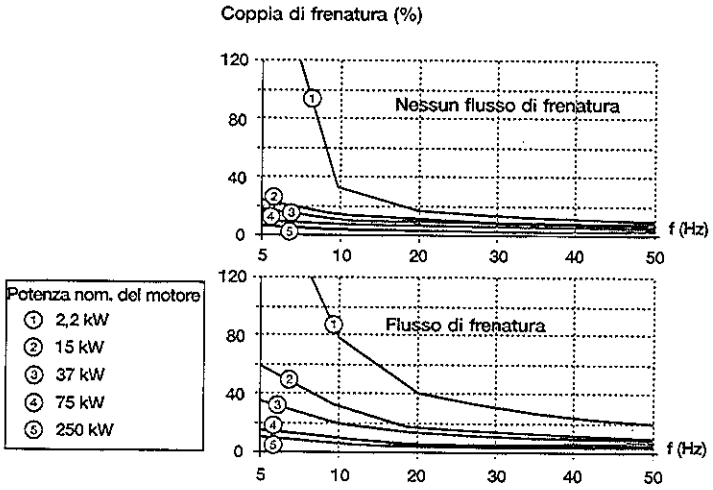


Figura 3.1 Percentuale della coppia di frenatura motore della coppia nominale in funzione della frequenza di uscita.

I principali vantaggi del flusso di frenatura 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.

3.2 Chopper di frenatura e resistenza di frenatura

Negli azionamenti standard si utilizza normalmente un raddrizzatore a diodi a 6 o 12 impulsi in grado di alimentare 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 alimentata 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 capacitanza 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.

$$W = P * t = \frac{C * U_{c.c.}^2}{2} \tag{3.1}$$

$$U_{c.c.} = \sqrt{\frac{2 * W}{C}} = \sqrt{\frac{2 * P * t}{C}} \tag{3.2}$$

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.

3.2.1 Le funzioni di magazzinaggio di energia del convertitore di frequenza

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 da 400 Vca, il bus in c.c. ha un valore pari a 1,35 * 400 = 565 Vcc. Supponendo che i condensatori possano sopportare un valore massimo di 735 Vcc, il tempo necessario per alimentare una potenza nominale di 90 kW al condensatore in c.c. può essere calcolato con la presente formula:

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

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 se utilizzata in una configurazione di azionamento.

3.2.2 Principio 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.

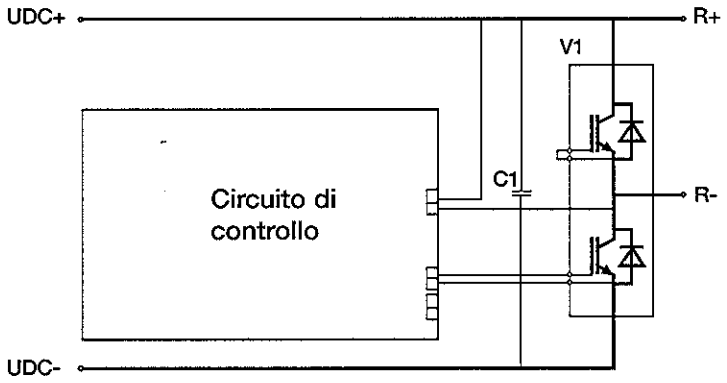


Figura 3.2 Diagramma circuitale di un chopper di frenatura. UDC rappresenta i morsetti del bus in c.c., R i morsetti della resistenza.

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 utilizzabile.
- 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 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'aria ambiente contiene grandi quantità di polveri o di altri componenti metallici o esplosivi o potenzialmente combustibili.

3.3 Configurazione di ponti di tiristori collegati in anti-parallelo

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 di raddrizzatori 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 reversibile converte l'alimentazione trifase da c.a. in c.c. Gli azionamenti (inverter) vengono alimentati attraverso il circuito intermedio. Il ponte di inversione 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.

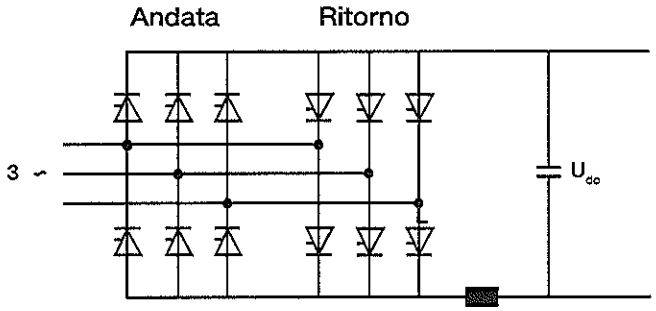


Figura 3.3 Diagramma lineare di un'unità di alimentazione a tiristori in anti-parallelo.

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 reversibile / di inversione e il controllo della tensione del circuito intermedio dipendono dai valori della corrente e della tensione di alimentazione e e della tensione del circuito intermedio. Il reattore in c.c. filtra i picchi di corrente del circuito intermedio.

I principali vantaggi del ponte di tiristori collegato in anti-parallelo sono:

- Soluzione conosciuta.
- Investimento ridotto a fronte della soluzione 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 collegato in anti-parallelo 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. si rischia la bruciatura del fusibile per un guasto di commutazione dei tiristori.
- Il cosϕ varia al variare del carico.
- La distorsione armonica totale è superiore rispetto alle unità rigenerative IGBT.
- La distorsione di corrente passa attraverso l'impedenza di altre reti 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.

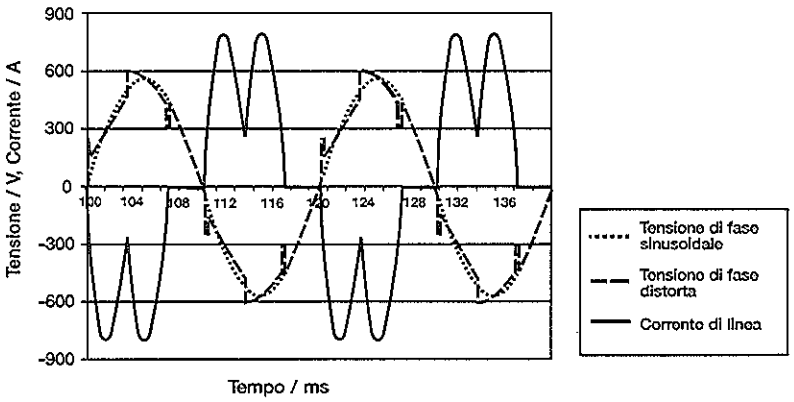


Figura 3.4. Esempio di forme d'onda della tensione e della corrente dei ponti collegati in anti-parallelo durante la frenatura.

3.4 Configurazione del ponte IGBT

La rigenerazione basata sul sistema 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 diun 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).

$$P = \frac{U_{linea} * U_{rog}}{X} \sin\delta \qquad (3.4)$$

3.4.1 Principi generali dei sistemi IGBT basati su generatori

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.

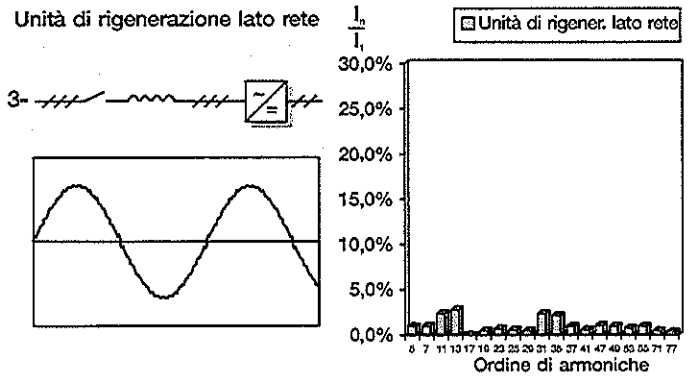


Figura 3.5. Armoniche e forma d'onda tipica della corrente di linea in un generatore di linea IGBT.

3.4.2 Obiettivi di controllo della rigenerazione basata su tecnologia IGBT

Vi sono tre obiettivi generali di controllo per quanto riguarda le unità rigenerative basate su sistemi 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 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.

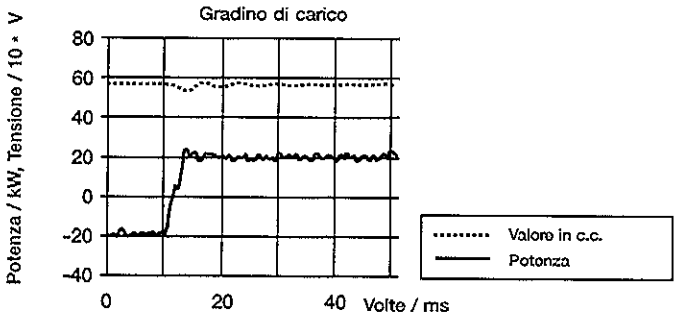


Figura 3.6. Rapida commutazione dal modo rigenerazione al modo motore. Si noti la stabilità della tensione del bus in c.c. durante la transizione.

Il secondo obiettivo di controllo consiste nel minimizzare il fabbisogno di corrente di alimentazione, mantenendo un $\cos\varphi = 1.0$ durante l'esercizio. Questo si ottiene controllando la tensione in uscita del convertitore di linea. Per alcune applicazioni è auspicabile che anche il convertitore di linea IGBT operi come carico induttivo o capacitivo.

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

3.4.3 Controllo diretto di coppia sotto forma di controllo diretto di potenza

Il controllo diretto di coppia è una modalità di controllo del motore in c.a. alimentato da un inverter. Il principio teorico alla base del controllo prevede l'attivazione e la disattivazione diretta degli interruttori IGBT in base alla differenza tra la coppia effettiva del motore in c.a. e la coppia di riferimento dell'utente (Guida Tecnica N. 1). Lo stesso principio può essere applicato nel caso di un convertitore di linea che controlli il flusso di potenza dalla rete di alimentazione verso l'azionamento e viceversa. La potenza equivale alla coppia moltiplicata per la sua frequenza angolare, che nella rete è costante. Pertanto, controllare la coppia significa anche controllare il flusso di potenza.

$$P = \frac{U_i\, U_{lc}}{X} \sin\delta = |\underline{T}||\underline{\omega}| \qquad (3.5)$$

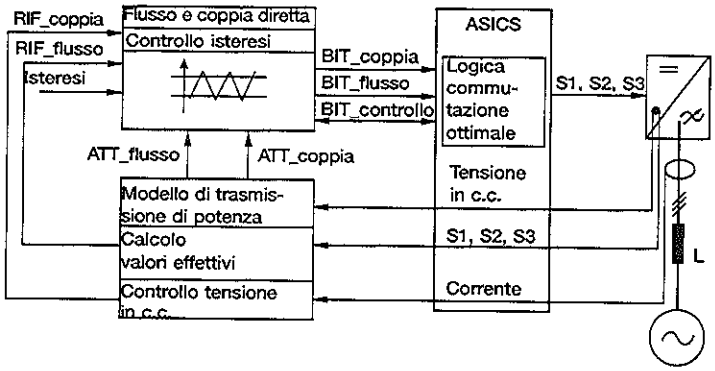


Figura 3.7. Diagramma di controllo fondamentale per unità rigenerative IGBT basate sul controllo diretto di coppia.

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 un unico 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.

I principali vantaggi dell'unità di rigenerazione IGBT sono:

- Basso livello di armoniche nella corrente di alimentazione sia in modo motore che in modo rigenerazione.
- Elevate dinamiche durante rapide commutazioni 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.
- Completa compensazione delle cadute di tensione del sistema grazie alla capacità di incrementare la tensione.
- Possibilità di controllare il fattore di potenza.
- Alimentazione anche in mancanza di rete mediante sincronizzazione automatica rispetto alla rete.
- La tensione del bus in c.c. ha all'incirca lo stesso valore in modo motore o frenatura. Assenza di ulteriori sollecitazioni di tensione in corrispondenza dell'isolamento dell'avvolgimento del motore durante la frenatura.

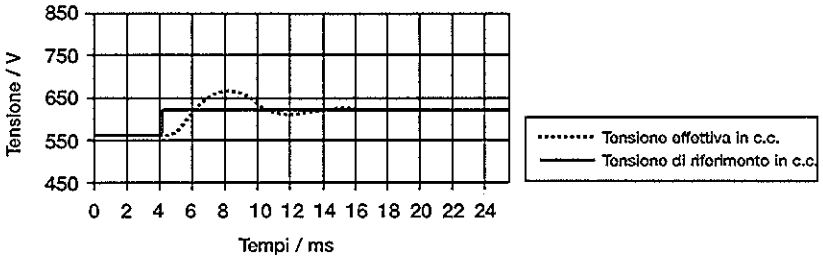


Figura 3.8. Capacità di incrementare la tensione di alimentazione.

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.
- 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.

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.
- Quanto i limiti delle armoniche di rete sono critici.

3.4.4 Dimensionamento di un'unità di rigenerazione IGBT

Il dimensionamento della corrente di alimentazione di un'unità IGBT si basa sulla potenza richiesta. Supponiamo che sia nesessaria 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:

$$I_{in} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{in}} = \frac{136{,}5\ \text{kW}}{\sqrt{3} * 370\ \text{V}} = 213\ \text{A} \qquad (3.6)$$

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

3.5 Common DC

Quando un processo comprende vari azionamenti dove un solo motore può richiedere funzioni di frenatura mentre gli altri funzionano in modo motore, il bus comune in c.c. costituisce una soluzione molto efficiente per riutilizzare l'energia meccanica. Gli azionamenti che adottano il bus comune in c.c. 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 bus comune in c.c. Pertanto il bus in c.c. costituisce il canale per convogliare l'energia di frenatura proveniente da un motore

verso altri motori. La configurazione di base del sistema con bus comune in c.c. è quella riportata nella figura (3.9).

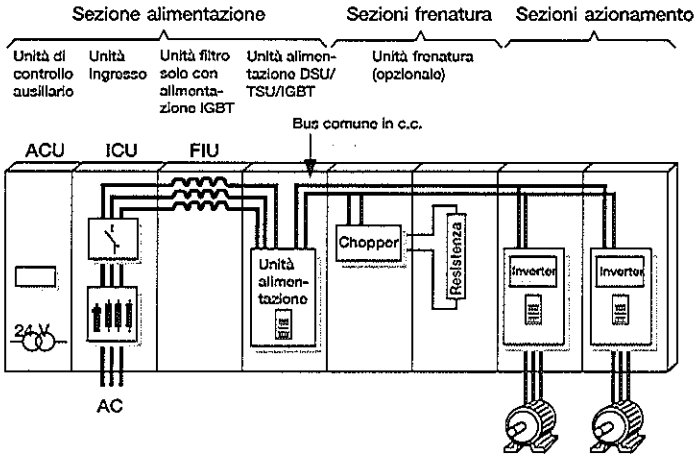


Figura 3.9. La configurazione di base della soluzione con bus comune in c.c.

I principali vantaggi della soluzione con bus comune in c.c. sono:

- Facile equilibrio del flusso di potenza tra i vari azionamenti.
- Bassa incidenza delle perdite di sistema connesse alla conversione dell'energia di frenatura attraverso il bus comune in c.c.
- Sebbene la potenza di frenatura immediata sia più elevata rispetto alla potenza motrice, il chopper di frenatura e la resistenza non devono essere dimensionati per la potenza di frenatura a regime.
- Se può essere necesario utilizzare la potenza di frenatura per periodi di tempo prolungati, è possibile utilizzare diversi raddrizzatori associati.

I principali svantaggi della soluzione del bus comune in c.c. con raddrizzatore a un 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 un unico 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.

Capitolo 4 - Valutazione del costo delle diverse forme di frenatura elettromeccanica per l'intero ciclo di vita

E' 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 possibilità di risparmio energetico a fronte di altri metodi di controllo in uso. Sebbene le applicazioni di tipo pump and fan 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.

4.1 Calcolo del costo diretto dell'energia

Il costo diretto dell'energia può essere calcolato, ad esempio, in base al prezzo dell'energia e 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:

Costo = Tempo di frenatura (h/giorno) * Potenza di frenatura media (kW) * Prezzo dell'energia (euro/kWh) * 365 (4.1)

Ad esempio, per un azionamento da 100 kW che funziona 8.000 ore l'anno e opera in modo 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.

4.2 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 IGBT o a tiristori:

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

Bus comune in c.c.:

- I costo supplementare per la resistenza e il chopper di frenatura, più il costo dello spazio supplementare necessario per installare i due componenti, se necessari per la soluzione basata su bus comune in c.c.
- La differenza di costo tra la soluzione basata su bus comune in c.c. e la rispettiva soluzione basata su un unico azionamento.

4.3 Calcolo del costo per l'intero ciclo di vita

Il calcolo dei costi per l'intero ciclo di vita riguarda solo 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.

Caso 1 - Frenatura occasionale

Si consideri la seguente applicazione:
La potenza motrice continua è pari a 200 kW alla potenza resa di 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.
Calcolare la coppia di carico necessaria al motore:

$$T = J * \frac{(\omega_{avvio} - \omega_{fine})}{t} = J * \frac{(n_{avvio} - n_{fine}) * 2\pi}{t * 60} =$$

$$122 * \frac{(1500 - 0) * 2\pi}{10 * 60} = 1915 \text{ Nm} \qquad (4.2)$$

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.

$$P_{max.fr.} = T * \omega = 1915 * \frac{1500}{60} * 2\pi \approx 300 \text{ kW} \tag{4.3}$$

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.

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

$$P = \frac{1}{2} * J * (\frac{n}{60} * 2\pi)^2 * \frac{1}{t} =$$
$$\frac{1}{2} * 122 * (\frac{1500}{60} * 2\pi)^2 * \frac{1}{10} = 150{,}3 \text{ kW} \tag{4.5}$$

Costo della resistenza di frenatura:
E' 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 m^2. Il costo dell'ingombro al suolo è pari a 500 euro/m^2.

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 m^2 * 500 euro/m^2, 200 euro.

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

$$\text{Costo} = \frac{10}{3600}(h) * \frac{300}{2}(kW) * 0{,}5\,(\text{euro/kWh}) = 0{,}02 \text{ euro} \tag{4.6}$$

In questo caso il costo dell'energia di frenatura è trascurabile.

Costo di un azionamento a 4 quadranti:
Il costo supplementare per un sistema di frenatura

elettromeccanica con ponte di tiristori montati in antiparallelo a fronte di un azionamento con chopper di frenatura è pari a 7.000 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 100 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 100 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 7.800 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 sul lato generatore per il 50% del tempo di servizio, equivalente in media a 2,4 ore/giorno. Il costo complessivo dello spreco energetico corrisponde a:

$$\text{Costo} = 2{,}4\ (\text{ore/giorno}) * 100\ (\text{kW}) * 0{,}05\ (\text{euro/kWora}) * 365 = 4.380\ \text{euro} \tag{4.7}$$

Costo dell'azionamento a 4 quadranti:
L'azionamento a 4 quadranti IGBT è consigliato per applicazioni di gru.

Il costo dell'investimento supplementare per la frenatura elettromeccanica con ponte IGBT in ingresso a fronte di un azionamento con chopper di frenatura è pari a 4.000 euro.

In base al calcolo del ritorno economico diretto risulta che un investimento supplementare di 4.000 euro nel primo anno di utilizzo consente di realizzare lo stesso risparmio energetico.

Caso 3 - Applicazione per centrifuga

Si consideri la seguente applicazione:
Centrifuga per l'estrazione dello zucchero con motore esapolare 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 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 IGBT è pari al 10%.

Capitolo 5 - Simboli e Definizioni

c.a.: Corrente o tensione alternata

B: Coefficiente di attrito

C: Costante o coefficiente

cosϕ: Coseno dell'angolo di campo elettrico tra la corrente e la tensione fondamentale

c.c.: Tensione o corrente continua

DPF: Displacement Power Factor (Sfasamento alternato) definito cosϕ1, doveϕ1 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 = a DPF).

T: Coppia (Metri Newton, Nm)

t: Tempo

THD: Total harmonic distortion (Distorsione armonica totale) nella corrente definita come

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{40} I_k^2}}{I_1} \qquad (5.1)$$

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 [radiante/secondi, 1/s]

Capitolo 6 - Indice analitico

A
attrito 8, 9, 12

C
centrifuga 27
chopper di frenatura 11, 12, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 26, 27
comune in c.c. 22, 23, 25
controllo di sovratensione 15
Controllo diretto di coppia 13, 20
convertitore di linea 19, 20
coppia costante 8, 12
coppia quadratica 8, 12
cosf 7, 18, 29

D
distorsione armonica 18, 29
due quadranti 5

F
frenatura con iniezione in c.c. 13
frenatura di flusso 13, 14
frenatura naturale 10, 11, 12

G
gru 12, 27

I
IGBT 18, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 28
impedenza 18, 20
inerzia 9, 10, 25, 29
inverter 13, 15, 16, 19, 20, 23, 25

M
magazzinaggio energia 14, 15

N
nastri trasportatori 12

P
pompe 12
ponte di tiristori 17, 18, 26
potenza di frenatura 7, 11, 12, 13, 15, 17, 22, 23, 26
Potenza in c.a. 7
potenza in c.c. 7

Q
quattro quadranti 5

R
raddrizzatore 13, 14, 17, 22, 23

S
sovra dimensionamento 12

U
unico quadrante 5, 8, 21, 23

V
ventilatori 12